

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

cea den

ENERGIES INTERMITTENTES ET TRANSITION ÉNERGÉTIQUE. L'EXEMPLE DE L'ALLEMAGNE



PRÉSENTATION EDF CAP/AMPERE 7 DÉCEMBRE 2017

JOEL GUIDEZ

ATTACHÉ NUCLÉAIRE À L'AMBASSADE DE FRANCE À
BERLIN DE 2009 À 2011

RAPPELS SUR L' ÉNERGIE WENDE.

En 2000 , l'Allemagne fait le choix d'une sortie du nucléaire compensée par une production » verte «

En 2010, le gouvernement revient sur ces points en considérant l' énergie nucléaire comme une énergie de transition nécessaire.

En 2011, après Fukushima, le gouvernement accélère la sortie du nucléaire et publie un plan : « Die Energiewende » avec objectifs précis et chiffrés.

Par exemple: baisse de 40% des émissions de CO2 en 2020 , arrêt définitif de 8 réacteurs et date butoir en 2022 pour les 9 réacteurs restants, 35% d'ENR en 2020, etc..

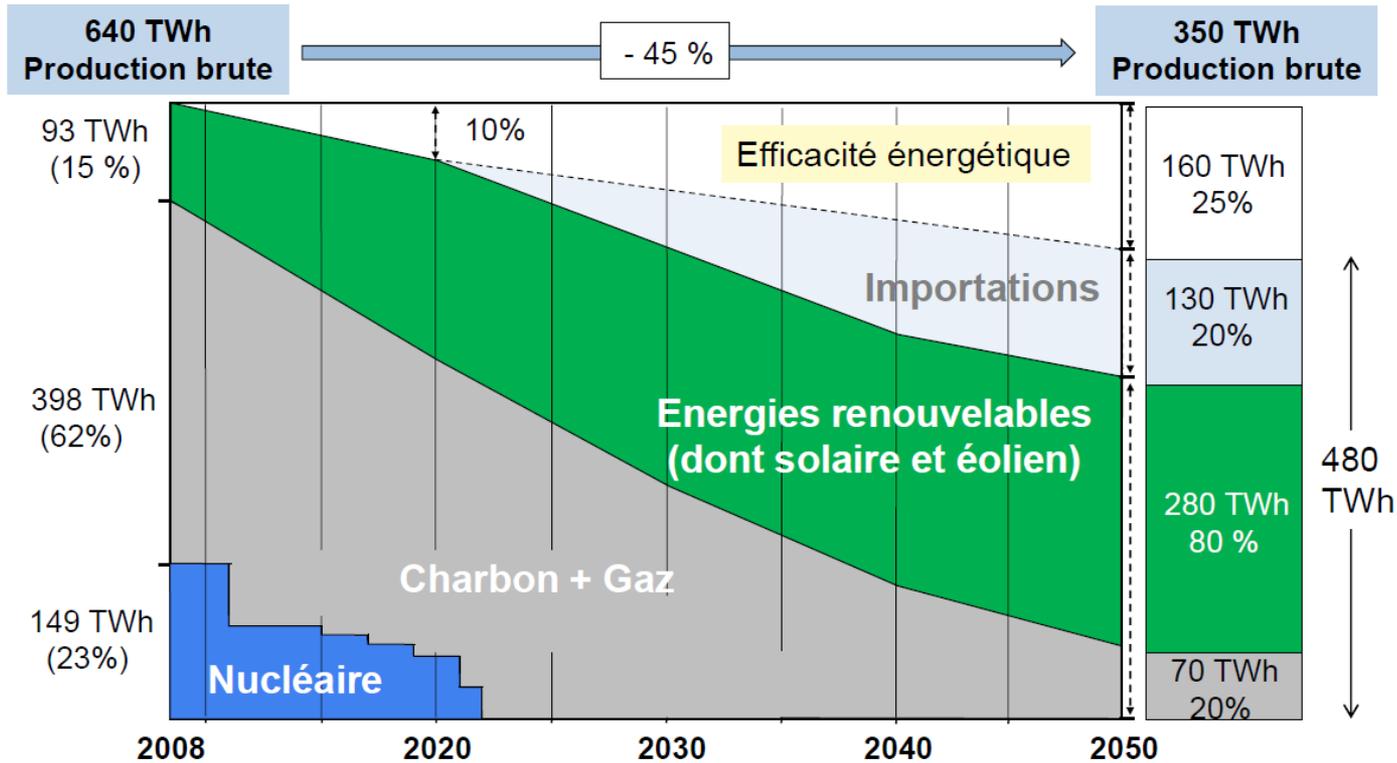
LA FRANCE ET L'EXEMPLE ALLEMAND

La loi sur la transition énergétique impose une puissance installée maximale de 63,2 GW pour le nucléaire et le passage de la fourniture nucléaire à 50% d'ici 2025 (bientôt 2035 ?) par l'utilisation accrue d'énergies renouvelables.

Sur votre facture EDF page 2 : « origine 2015 de l'électricité française : 89,7% nucléaire, 6,9 % renouvelables (dont 6,3% hydraulique), 1,5% charbon, 0,8% gaz et 1,1% fuel »

Nos voisins allemands se sont engagés résolument sur une transition énergétique depuis 16 années pour passer leur production nucléaire de 30 à 0% d'ici 2022, et il est donc extrêmement utile d'analyser leurs réussites et leurs difficultés pour apprécier la faisabilité de notre transition énergétique

Tournant énergétique du secteur de l'électricité: Sortie du nucléaire, réalisation d'économies, hausse significative des importations et développement massif des EnR



Dr.-Ing. Hartmut Lauer

Source: Energiekonzept der Bundesregierung,

1

QUELLES ÉNERGIES RENOUVELABLES ?

Toutes les énergies renouvelables ne sont pas intermittentes: bioénergies, hydraulique , géothermie, etc..

Mais les deux principaux supports pour l' extension des ENR en Allemagne, sont le solaire et l' éolien , qui sont des énergies intermittentes.

Des mécanismes attractifs ont été mis en place dès 2000 pour favoriser le développement de ces modes de production.

UNE MONTÉE EN PUISSANCE CONTINUE

La montée en puissance des installations solaires et éoliennes a été continue de 2000 à 2016

Fin 2016, l'Allemagne dispose plus de 90 GW installés en solaire et éolien, donc en production intermittente.
(à comparer aux 63,2 GW du nucléaire français)

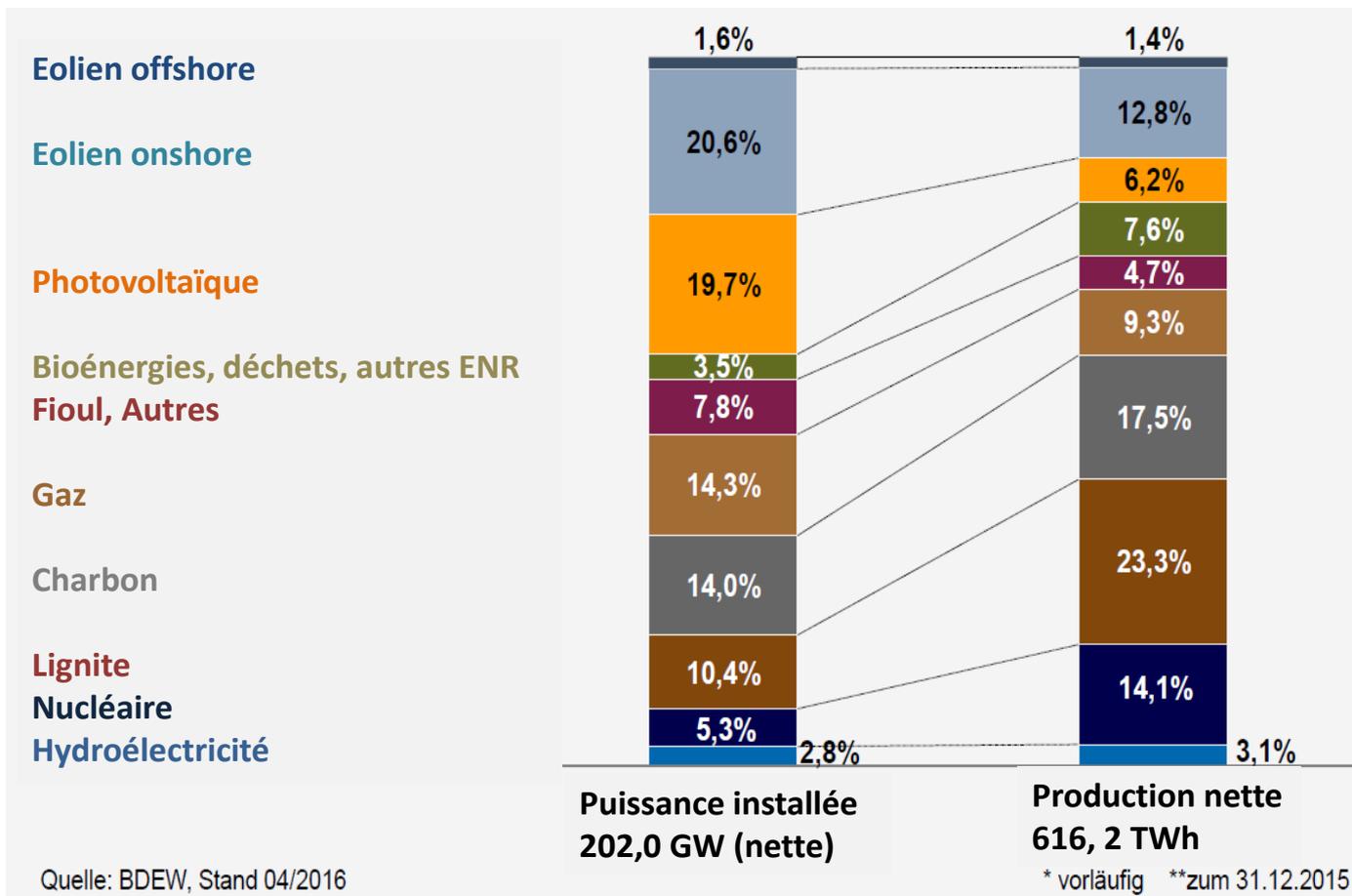
PREMIÈRE CONSÉQUENCE DE L'INTERMITTENCE: UN MAUVAIS RENDEMENT.

L' éolien terrestre a un rendement d'environ 20% , le solaire d'environ 10% et l'offshore espère 30%.

Avec 84 GW de puissance installée en 2015, l' éolien et le solaire ont produit 20% de la puissance nette électrique allemande .

Les 63,2 GW de puissance nucléaire installée en France ont produit en 2015 89,7 % du courant produit par EDF (76,3% du courant Français en tenant compte des autres producteurs)

BILAN 2015 DES PUISSANCES INSTALLÉES ET DES PRODUCTIONS NETTES EN ALLEMAGNE



DEUXIÈME CONSÉQUENCE DE L'INTERMITTENCE : LES CARENCES

Fin 2016 , un hiver anticyclonique froid et sec

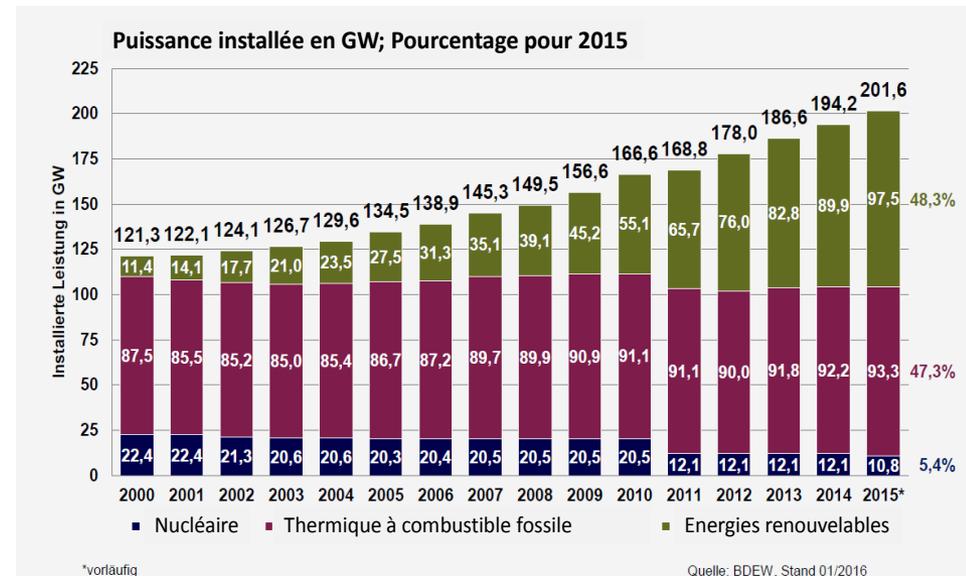
Exemple du lundi 19 décembre 2016 en Allemagne

- vers 0 h : 0,34 GW éolien onshore, 0 offshore, 0 solaire
- vers 4 h: 0,87 GW onshore, 0,26 GW offshore, 0 solaire
- vers 8 h : 2 GW onshore, 0,22 GW offshore et 0,14 GW solaire

Vers 8 h la demande d' électricité était de 72 GW, solaire et éolien ont fourni 3,3 % de la demande !

ET POURTANT IL N'Y A PAS DE COUPURES: EN MATIÈRE DE SÉCURITÉ D'APPROVISIONNEMENT L'ALLEMAGNE FAIT MIEUX QUE LA FRANCE !

- Un argument souvent entendu est que malgré cette intermittence il n'y a pas de coupures d'électricité
- La raison en est très simple : l'Allemagne a gardé intégralement son ancien parc pour suppléer aux carences des ENR
- On est donc dans une situation très luxueuse de deux parcs totalisant une puissance de 202 GW pour une consommation maximale de 84 GW
- Aux problèmes de réseau près, on arrive donc à suppléer aux carences.



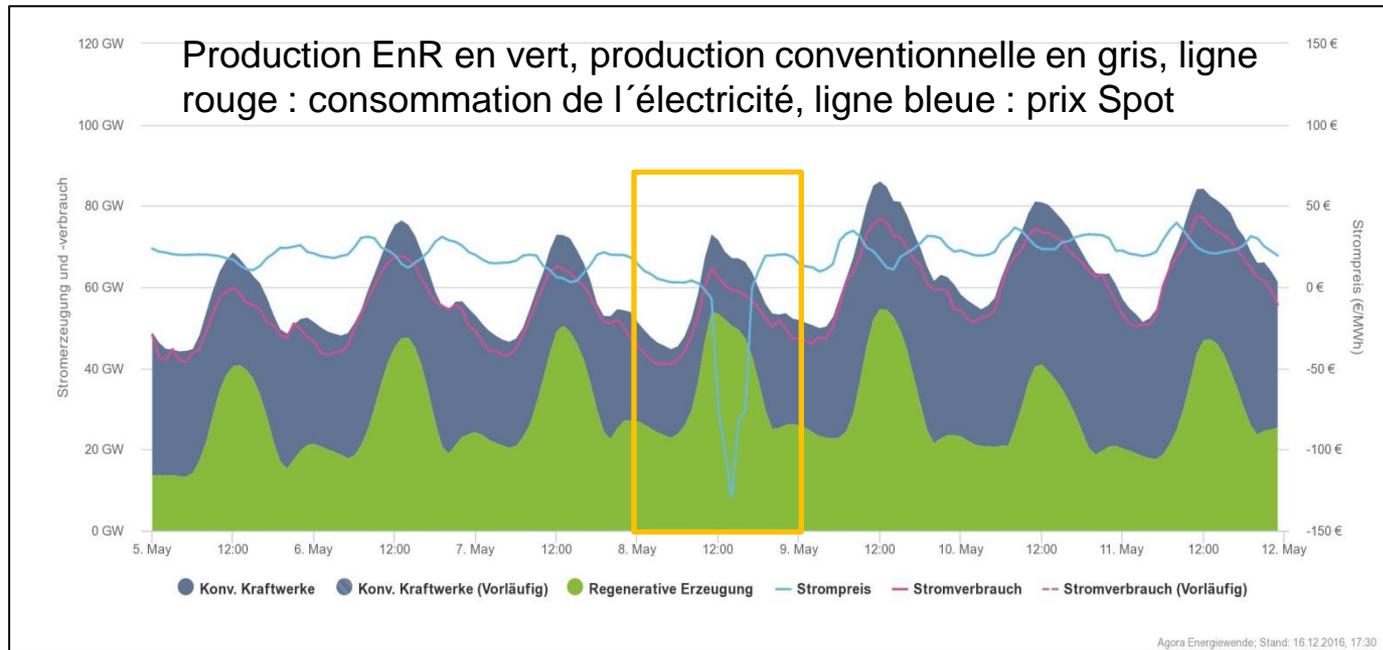
Avec cette gigantesque puissance installée , s'il fait soleil et qu'il y a du vent, une puissance largement supérieure à la consommation allemande se déverse sur le réseau.

Cette puissance (obligatoire) est alors bradée sur le marché spot désorganisant complètement celui-ci.

Les prix ont chuté en 2016 aux environ de 30 €/MWh

On voit même des prix négatifs!

Cette chute ne concerne pas les ENR qui ont un coût de rachat cher, fixe et imposé sur 20 ans

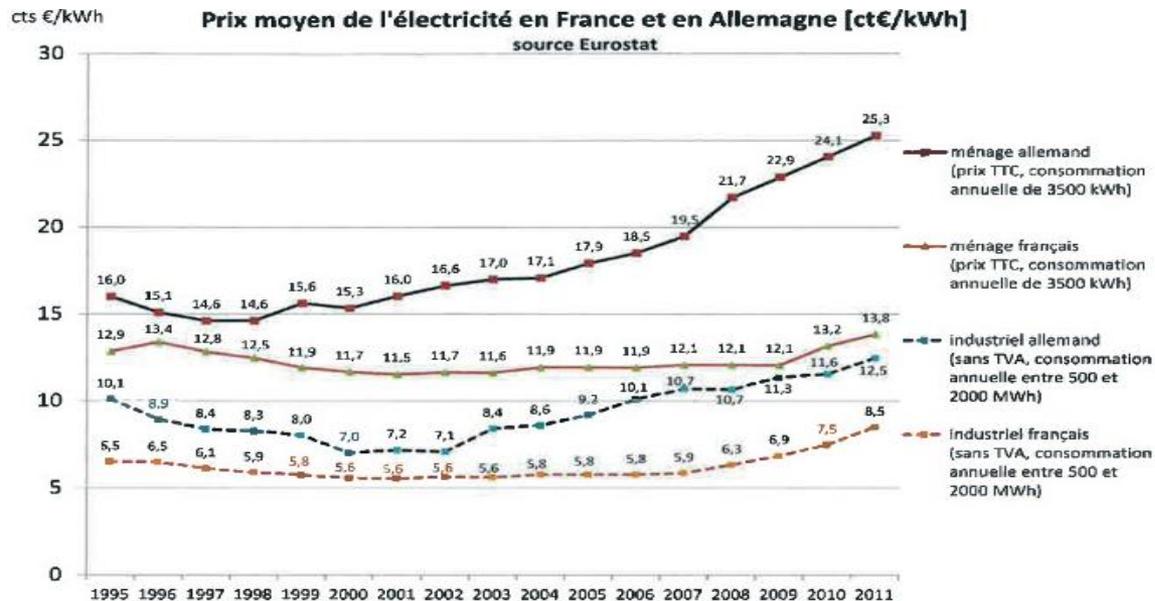


Par exemple, le 8.5.2016, la production d'ENR avait atteint en Allemagne, 54 GW vers 13 h (86,3 % de la demande) et le prix au marché spot était négatif entre 10 et 17 heures et avait chuté jusqu'à -130€/MWh.

A 20 h du même jour la production EnR avait chuté à 25 GW, les centrales conventionnelles ont du compenser environ 30 GW en quelques heures.

UN COÛT DE L'ENERGIEWENDE SUPPORTÉ PAR LE CONSOMMATEUR ALLEMAND.

Avant 2000, les prix de l'électricité sont comparables pour le consommateur en France et en Allemagne aux environ de 15c€/KWh. A partir de 2000, les pentes de progression des coûts divergent pour atteindre en 2016, 29,7c€/KWh en Allemagne et 16;8 c€/KWh en France



SI LES PRIX CHUTENT, POURQUOI LA FACTURE DU CONSOMMATEUR AUGMENTE ?

Le coût de l' Energiewende a été intégralement supporté par le consommateur allemand qui a vu sa facture doubler en 16 ans. Pourquoi cette facture augmente avec des prix spot qui chutent?

L'analyse de la décomposition du coût montre qu'il paye de moins en moins des coûts de production (19%)

Les tarifs d'utilisation des réseaux sont en pleine augmentation (26% du coût)

Et les taxes pour soutenir les ENR font le reste (55%):
taxe de mutualisation de coûts induits sur le réseau, taxe de support aux ENR (CSPE française), taxe de fiscalité écologique, taxe de soutien à la cogénération et la toute dernière de 2015 , taxe de raccordement des éoliennes offshore.

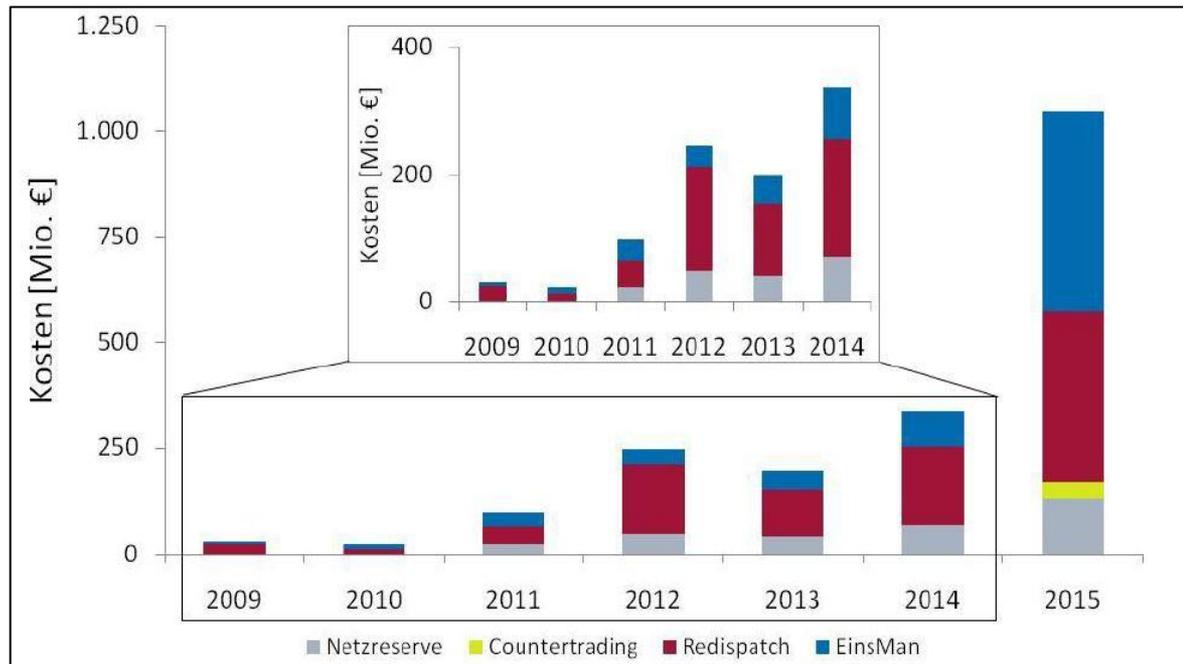
UN PROBLÈME NON LINÉAIRE

Le nucléaire représentait 30% de la production électrique allemande en 2000, et encore 14% en 2015, qu'il va falloir compenser rapidement.

Augmenter le parc solaire + éolien de 50% (outre un coût considérable) ne résout donc pas le problème: on continuerait à avoir besoin de l'ancien parc pour pallier aux carences, et on braderait des quantités encore plus grandes lorsque ce gigantesque parc de 130 GW se mettrait à produire.

Avoir un parc intermittent supérieur à la puissance maximale historique consommée n'a pas beaucoup de sens sans stockages adaptés. On notera à cet effet que malgré 6 GW supplémentaires installés en 2016, la production 2016 de ces énergies intermittente a été, avec 115,6 TWh, légèrement inférieure à celle de 2015 (117,9 TWh)

Les coûts relatifs au réseau sont en nette augmentation pour le dispatching , avec l'arrivée du « counter trading » et surtout avec l' »einsman » qui est le remboursement aux producteurs d'ENR du courant refusé pour cause de surproduction.



Les solutions de stockage d'énergie électrique se divisent en quatre grandes catégories :

- mécanique (barrage hydroélectrique, Station de transfert d'énergie par pompage - STEP, stockage d'énergie par air comprimé – CAES, volants d'inertie),
- électrochimique (piles, batteries, vecteur hydrogène),
- électromagnétique (bobines supraconductrices, supercapacités),
- thermique (chaleur latente ou sensible).

Les systèmes hydrauliques/ Double barrage / (STEP) ont un rendement correct (70 à 80 %) mais leur puissance est limitée en Allemagne (moins de 10 GW/ 38 GWh) et peu de sites sont disponibles. Les projet actuels ~ 4 GW sont confrontés à des problèmes de rentabilité et/ou à la résistance des riverains)

Fonctionnement d'une installation de stockage gravitaire

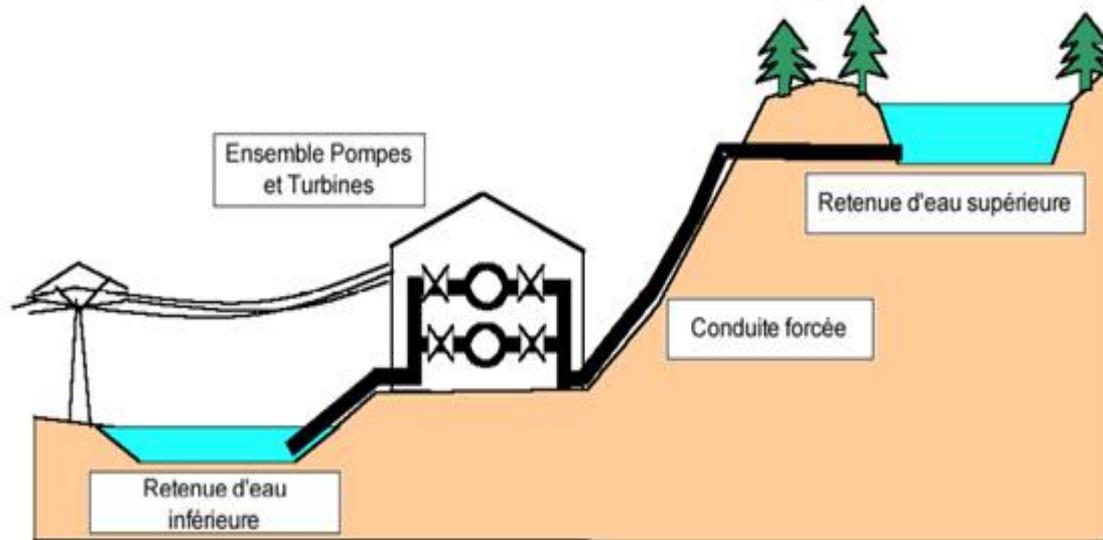
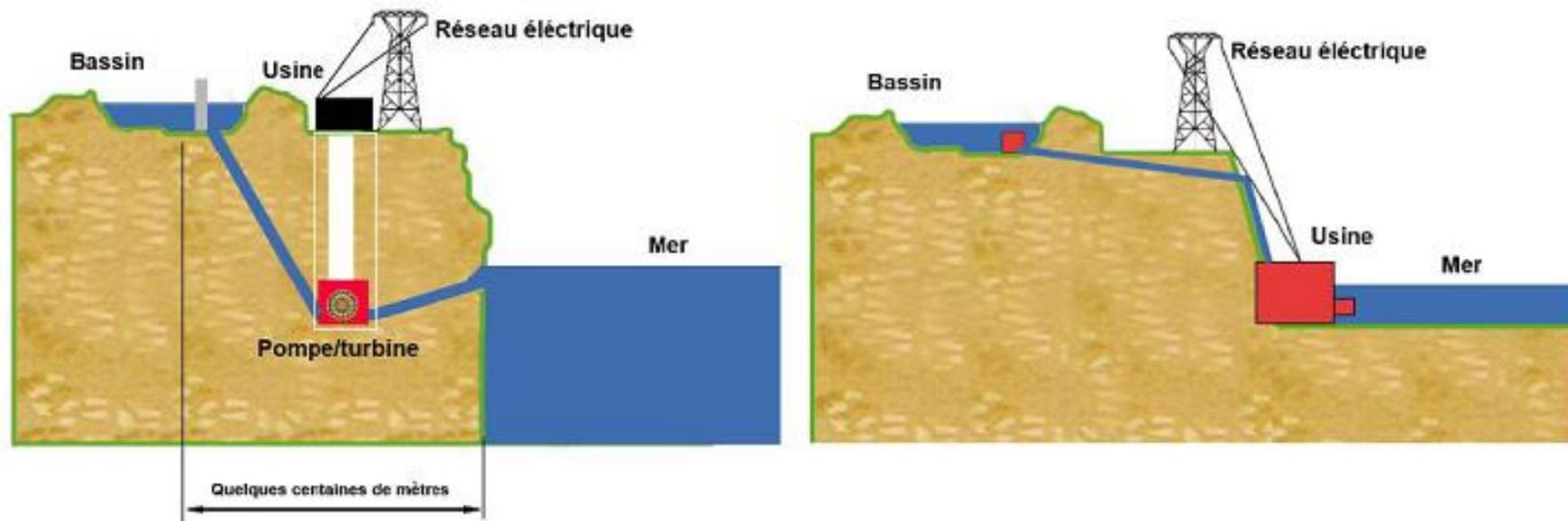
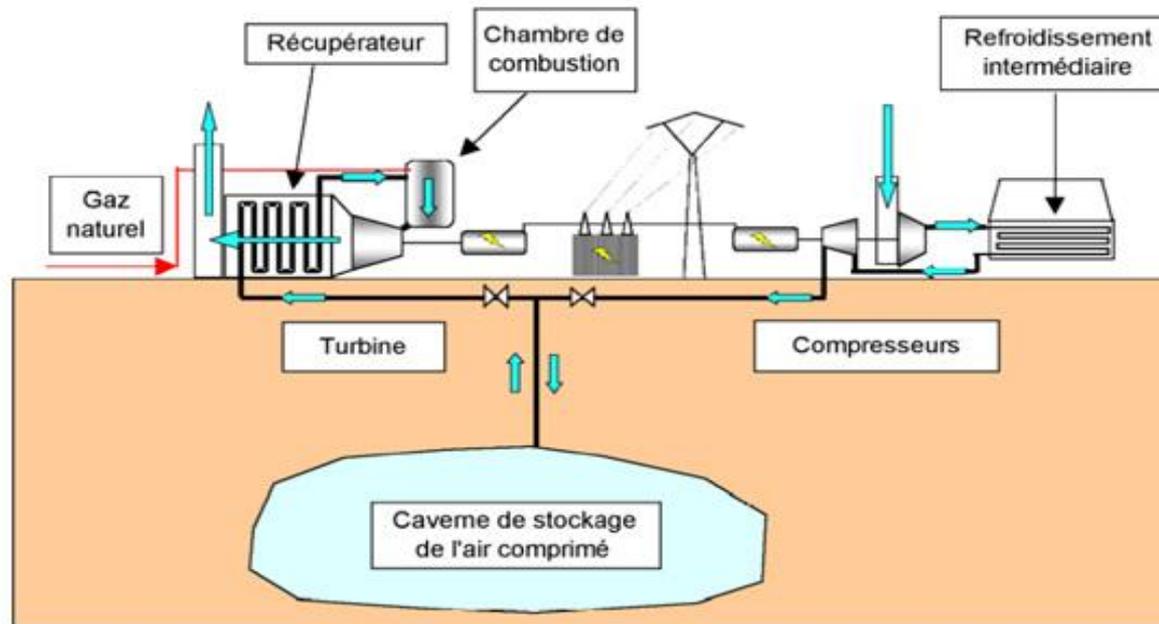


Schéma de principe d'une STEP marine

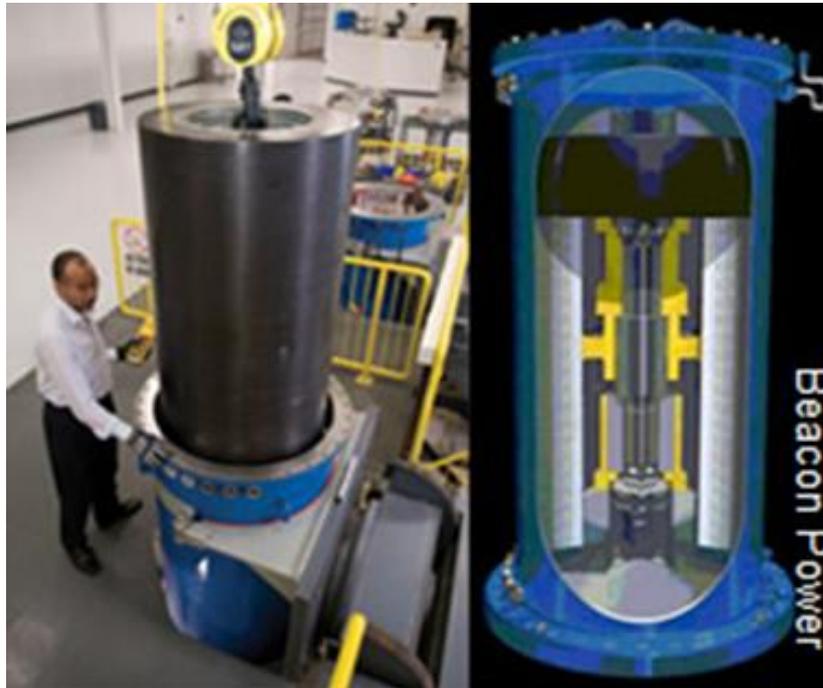


Une solution combinant des coûts d'investissement importants, un mauvais rendement final, et des problèmes écologiques. Une installation pilote fonctionne en Allemagne.

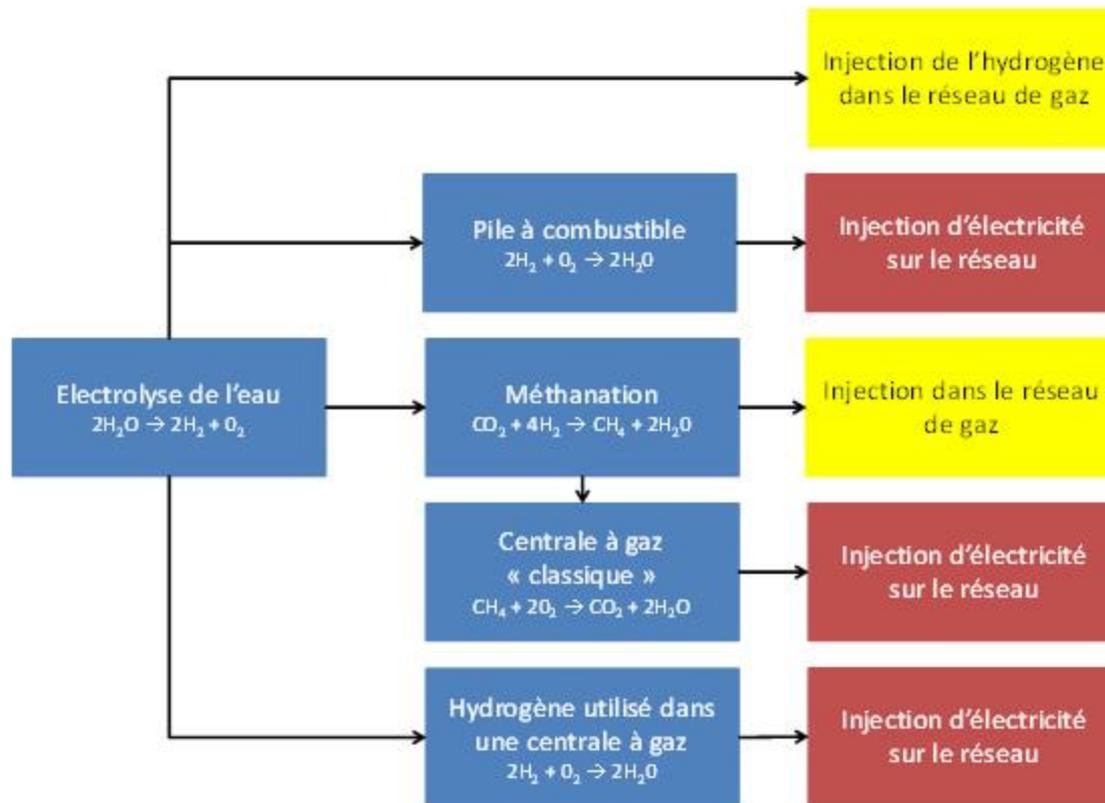
Schéma de principe d'une installation de stockage à air comprimé



Le stockage inertiel est étudié essentiellement pour étaler la production solaire (d'autres dispositifs thermiques sont aussi disponibles). On cumule chaque fois, perte de rendement , coût importants d'investissement et capacité limitée.



Les différentes possibilités de stockage de l'énergie grâce à l'hydrogène



ESTIMATION DE LA MATURITÉ DES DIFFÉRENTES TECHNIQUES ÉTUDIÉES

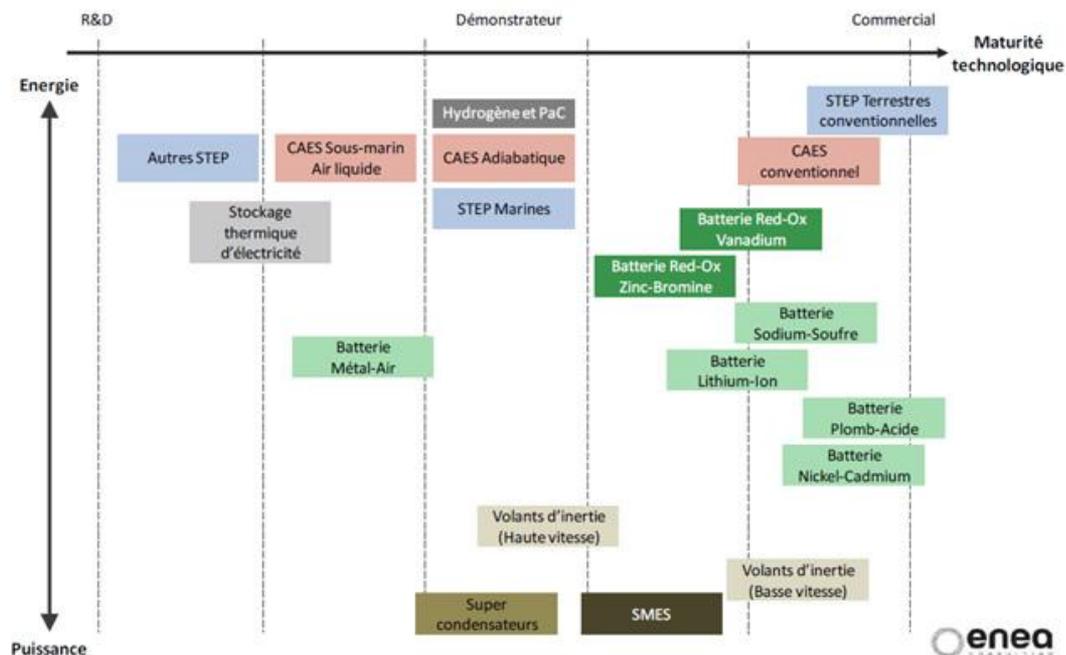


Figure 4 : Niveau de maturité technologique des différents moyens de stockage d'électricité

Typologie des moyens de stockage d'électricité

 Stockage gravitaire	 Stockage chimique	 Stockage inertielle
 Stockage à air comprimé	 Stockage électrochimique	 Stockage électrostatique
 Stockage thermique	 Stockage électrochimique à circulation	 Stockage électromagnétique

⁶ DoE : Department of Energy

⁷ NEDO : New Energy and Industrial Technology Development Organization

CONCLUSION SUR LE STOCKAGE .

C'est bien sûr la solution, pour les énergies intermittentes, mais les systèmes opérationnels type batterie ne sont pas adaptés aux fortes puissances recherchées et les double barrage / (STEP) sont largement utilisés et saturés , sans nouveau site disponible.

De nombreuses solutions de stockage sont étudiées (air comprimé , vecteur hydrogène, ...) mais les installations prototypes mises en place confirment des coûts importants et des rendements faibles (30 à 40%). De plus certaines conceptions posent d'importants problèmes écologiques.

Dans la pratique , il reste donc moins coûteux d'utiliser le parc classique et disponible, en secours.

ET LA PRODUCTION DE CO2 ?

Les émissions de CO2 du mix de production d'électricité n'ont baissé que de 325 Mt en 2000 à 312 Mt en 2015. En fait elles remontent depuis 2009.

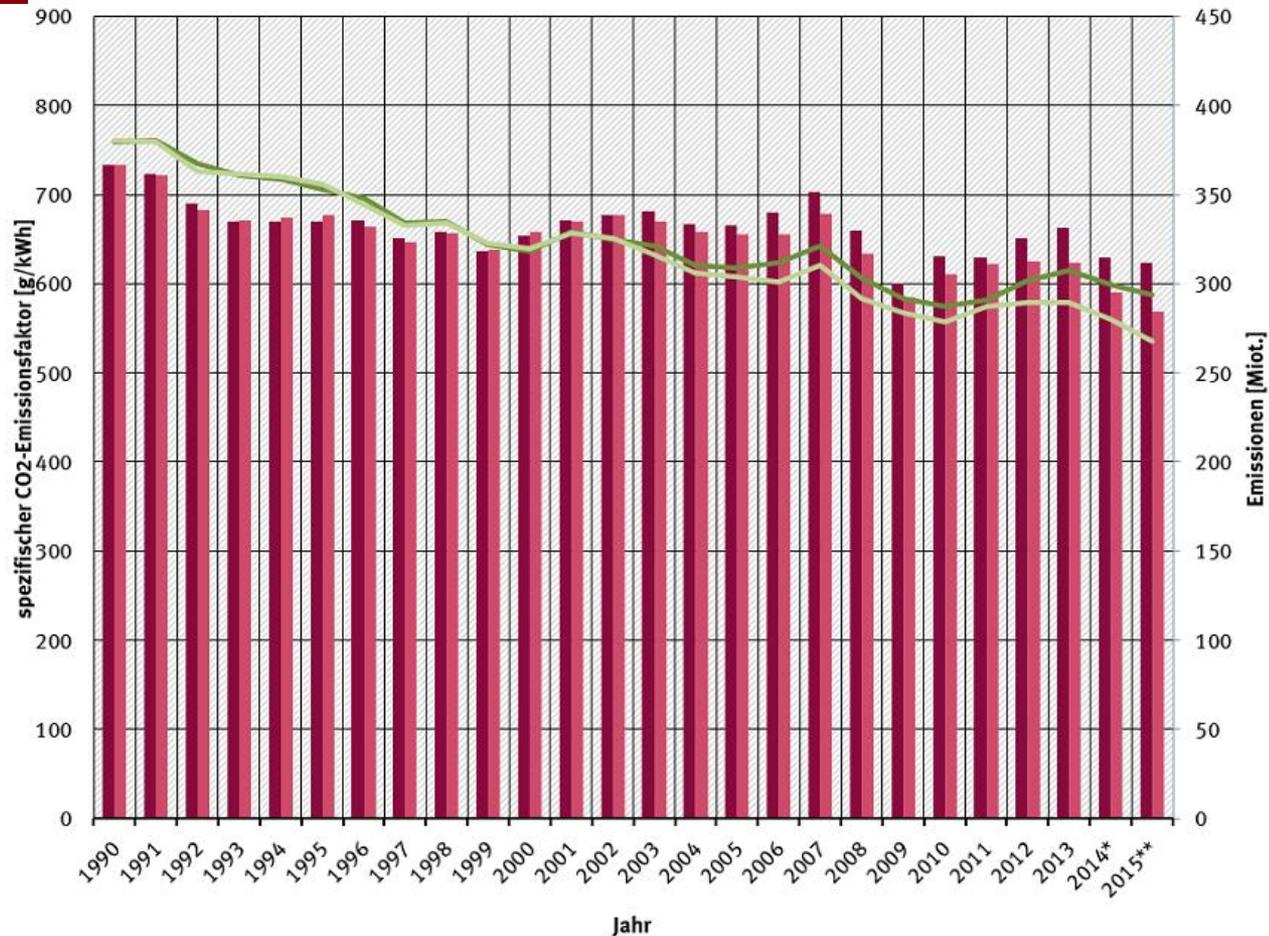
L'arrêt des derniers réacteurs nucléaires producteurs d'électricité décarbonnée, d'ici 2022, va certainement conduire à une remontée de ces émissions.

Le gaz a été éjecté du marché par le charbon (effondrement des coûts du charbon US) et par la lignite (Allemagne premier producteur mondial)

Globalement l'Allemagne est à - 13% d'émissions de gaz à effet de serre depuis 2000 et on est très loin des 40% en 2020, par rapport à 1990, promis par l'Energiewende.

L'Allemagne reste par tête d'habitant le pays le plus pollueur d'Europe avec la Pologne.

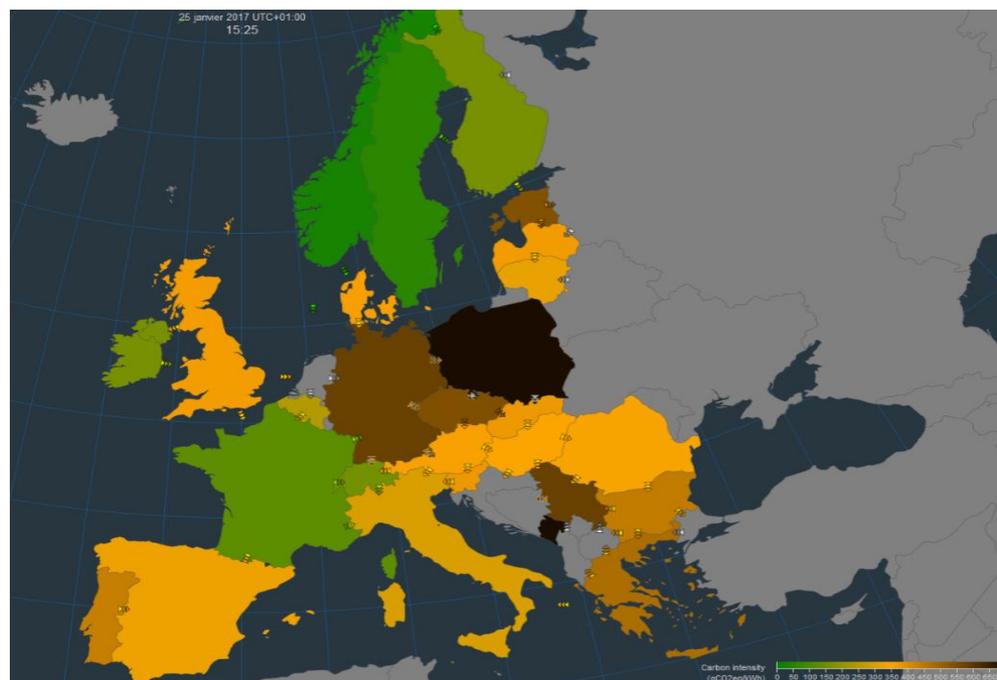
EVOLUTION PRODUCTION CO₂ DU MIX ÉNERGÉTIQUE ALLEMAND DE 1990 À 2015.



- Émission CO₂ produites par la production d'électricité (Mio. t)
- Émission CO₂ produites par la production d'électricité corrigée (sans exportation) (Mio. t)
- Émission spécifique du CO₂ de la consommation de l'électricité en Allemagne [g/kWh]
- Émission spécifique du mix de l'électricité [g/kWh]

CARTE DE L'EMPREINTE CARBONE DE L'EUROPE LE 25 JANVIER 2017.

- En vert inférieur à 200g de CO₂/KWh (en France 110)
- En jaune , aux environs de 400 g/KWh
- En marron supérieur à 500 g/KWh (522 pour l'Allemagne)
- En noir supérieur à 600g/KWh (756 pour la Pologne)



ET LE FUTUR PROCHE ?

- La fermeture en 2022 des centrales nucléaires restantes, sera à compenser. On n'a fait qu'une moitié du chemin ! De 33% à 15%.
- En 2016, 6 GW de plus ont été implantés en Solaire +Eolien pour dépasser 90 GW. Mais la puissance brute fournie a été du même niveau.
- Espoirs dans l'offshore: c'est là qu'on espère un rendement supérieur et moins d'intermittence. Mais coûts plus élevés, difficulté de transport et difficultés techniques. (d'où la nouvelle taxe)
- Espoirs dans des stockages, mais explosion des prix à prévoir et faisabilité technique à grande échelle à démontrer (avec les problèmes d'écologie et d'acceptation sociale correspondants)

ET LE COÛT ?

Les mécanismes mis en place avaient pour but de développer une industrie permettant de baisser les coûts d'installation au Kw. Cela a fonctionné avec des baisses réelles et importantes de ces coûts d'installation. (on notera cependant que les panneaux solaires ont été repris par l'industrie chinoise)

Mais le coût global reste très important : environ 24 milliards d'euros en 2016, et estimé à plus de 500 milliards de 2000 à 2025. Et les investissements ne s'arrêtent pas en 2025.

La production électrique relative à cet investissement correspond à celle de 9 EPR . Leur coût aurait été moindre d'un ordre de grandeur, sans les problèmes de l'intermittence et pour une durée de 60 ans.

UNE VOLONTÉ POLITIQUE MAIS DES DEMI VÉRITÉS TECHNIQUES

- Il faut reconnaître une constance politique sur 16 ans avec les moyens correspondants mis en place. Il y a aussi une réelle transparence avec publication ouverte de tous les chiffres nécessaires et questionnements correspondants.
- Mais alors que le consommateur allemand paye cher pour atteindre cet objectif d'une énergie verte , les chiffres montrent de plus en plus une réalité plus coûteuse et moins verte qu'espérée.
- La présentation du « Klimaschutzplan 2050 » ,à la COP 22 maintient les objectifs théoriques de l' Energiewende mais avec des explications techniques peu crédibles.

- Tout d'abord une grande fierté d'avoir établi ce programme « colbertiste » et d'être en voie de réussir une sortie du nucléaire remplacée par les ENR. L'adhésion des citoyens au projet reste forte.
- En termes de sécurité d'approvisionnement, le système a réussi à garder d'excellents résultats en dépit de ces productions intermittentes.
- Le doublement de la facture reste bien supporté, dans la mesure où les consommations sont plus faibles (peu ou pas de chauffages électriques) avec des salaires plus élevés.
- Pour la production de CO2 les objectifs annoncés sont d'abord de sortir du nucléaire puis de sortir du charbon. La sortie du nucléaire était perçue comme prioritaire par l'opinion allemande.
- Une confiance dans la rigueur et la technologie allemande pour trouver au fur et à mesure des solutions aux problèmes techniques qui vont se poser, en particulier pour le stockage qui va devenir de plus en plus nécessaire, si on continue de développer l'intermittence.

CONCLUSION D'UN INGÉNIEUR FRANÇAIS

- Le problème de l'intermittence a été un peu négligé au début, car posant moins de problèmes dans le mix énergétique initial. Ce problème n'est pas linéaire et lorsque la puissance intermittente installée dépasse la puissance maximale consommée (moins la puissance de stockage), il y a de moins en moins de sens de continuer à l'augmenter.
- Dans cette situation, ces puissances intermittentes contribuent aujourd'hui à environ 20% de la consommation allemande.
- Le coût de cet effort est déjà considérable et a doublé les factures du consommateur.
- Le passage à une contribution supérieure de ces énergies dans le MIX conduirait à des effets d'échelle importants dans les surcoûts avec la mise en place nécessaire de dispositifs de stockage extrêmement onéreux (rôle joué aujourd'hui par le maintien en double du parc de production thermique actuel)
- Et enfin tous ces efforts se traduisent actuellement par une stagnation de la production de gaz à effets de serre et par un bilan écologique, en conséquence, très limité.

CONCLUSION « MIXTE »

Sur les problèmes liés à l'intermittence des ENR, une récente étude allemande de juin 2016 (réf 7) publiée par Hans-Werner Sinn, ancien président de ifo - Institut für Wirtschaftsforschung (Institut allemand des études économiques d'utilité publique) conclut sur cette phrase : “Etant donné toutes ces difficultés, il serait avantageux pour la communauté mondiale d'observer prudemment les résultats de l'expérience allemande avant de l'imiter et de démanteler ses réacteurs nucléaires”

« Given all these difficulties, it will be worthwhile for the world community to carefully observe the outcome of the German experiment before mimicking it by also dismantling its nuclear power plant. »

RÉFÉRENCES (1)

Références

- 1) Article RGN Juillet/Aout 2011 « Bilan des conséquences de l'accident de Fukushima sur la politique énergétique allemande » J Guidez
- 2) Article RGN N°5 2012 : « Point sur la situation énergétique en Allemagne, dix-huit mois après la décision d'abandon du nucléaire. » J Guidez
- 3) Fraunhofer, Metastudie Energiespeicher
<https://www.umsicht-suro.fraunhofer.de/content/dam/umsicht-suro/de/documents/studien/Abschlussbericht-Metastudie-Energiespeicher.pdf>
- 4) Agora - Stromspeicher in der Energiewende. Untersuchung zum Bedarf an neuen Stromspeichern in Deutschland für den Erzeugungsausgleich, Systemdienstleistungen und im Verteilnetz
https://www.agora-energiawende.de/fileadmin/downloads/publikationen/Studien/Speicher_in_der_Energiewende/Agora_Speicherstudie_Web.pdf
- 5) Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FFE): Merit Order of energy storage in 2030
https://www.ffe.de/attachments/article/414/Executive_MOS2030_engl.pdf
- 6) BMUB, "Klimaschutzplan 2050" du 14/Novembre 2016 présenté au COP22,
<http://www.bmub.bund.de/themen/klima-energie/klimaschutz/nationale-klimapolitik/klimaschutzplan-2050/>
- 7) CESifo , Group Munich, Novembre 2016, "Buffering Volatility: A Study on the Limits of Germany's Energy Revolution", Hans- Werner Sinn, <http://www.cesifogroup.de/de/ifoHome/publications/docbase/details.html?docId=19225905>
- 8) PROGNOSE AG, 7 Novembre 2012 „Bedeutung der thermischen Kraftwerke für die Energie-wende.“
http://www.kohlenimporteure.de/files/user_upload/download/diverses/Prognos_StudiezurBedeutungderthermischenKraftwerke.pdf
- 9) Document DG trésor de novembre 2013 : „Comparaison des prix de l'électricité en France et en Allemagne.“
<http://www.tresor.economie.gouv.fr/File/392245>
- 10) DICE - Düsseldorfer Institut für Wettbewerbsökonomik (Juin 2016) EEG & Co. treiben Energiewendekosten auf 520 Milliarden Euro. En ligne : <http://www.insm.de/insm/Presse/Pressemeldungen/Pressemeldung-Studie-EEG.html>,

- 11) M. Holmgren & al., "Measurements Of Methane Emissions From Biogas Production", Report 2015:158, Energiforsk, 2015
- 12) Article RGN N° 1, Janvier/Février 2011: " Les retombées sur le nucléaire du nouveau concept énergétique allemand ", H. Lauer
- 13) Article RGN N° 5, Septembre/Octobre 2011: " Tournant énergétique en Allemagne suite à l'accident de Fukushima ", H. Lauer
- 14) BDEW, Stromerzeugung in Deutschland nach Energieträgern, Netto -Stromerzeugung 2015, Octobre 2016, [https://www.bdew.de/internet.nsf/id/48384C59AE22169FC1257F03002FD0C7/\\$file/Netto-Stromerzeugung%20D%20nach%20ET%202015_online_o_jaehrlich_Ki_03112016.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/id/48384C59AE22169FC1257F03002FD0C7/$file/Netto-Stromerzeugung%20D%20nach%20ET%202015_online_o_jaehrlich_Ki_03112016.pdf)
- 15) BDEW, Kapazität und Erzeugung 2015, Gesamte Elektrizitätswirtschaft, Avril 2016, [https://www.bdew.de/internet.nsf/id/0AA8B79AEF5CD12DC12579F40041A6DF/\\$file/Kapazit%C3%A4t%20und%20Erzeugung%20D%202015_o_jaehrlich_Ba_online_26042016.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/id/0AA8B79AEF5CD12DC12579F40041A6DF/$file/Kapazit%C3%A4t%20und%20Erzeugung%20D%202015_o_jaehrlich_Ba_online_26042016.pdf)
- 16) BDEW-Strompreisanalyse, Communiqué de presse du 29 Novembre 2016, "Steuern und Abgaben beim Strompreis erreichen 2017 Rekordhoch", <https://www.bdew.de/internet.nsf/id/20161129-pi-steuern-und-abgaben-beim-strompreis-erreichen-2017-rekordhoch-de>
- 17) AG Energiebilanzen: Stromerzeugung nach Energieträgern 1990 - 2015 (25.11.2016) <http://www.ag-energiebilanzen.de/>
- 18) BDEW, Erneuerbare Energien und das EEG: Zahlen, Fakten, Grafiken (2016), 18 Février 2016 [https://www.bdew.de/internet.nsf/res/FDFDE1F303A781EBC1257F61005AA43C/\\$file/160218_Foliensatz%20Energie-Info_Erneuerbare%20Energien%20und%20das%20EEG_2016_final.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/res/FDFDE1F303A781EBC1257F61005AA43C/$file/160218_Foliensatz%20Energie-Info_Erneuerbare%20Energien%20und%20das%20EEG_2016_final.pdf)
- 19) AGORA Energiewende "Die Energiewende im Stromsektor: Stand der Dinge 2015", 7 Janvier 2016, <https://www.agora-Energiewende.de>
- 20) AGORA Energiewende, Agorameter, <https://www.agora-Energiewende.de>
- 21) BDEW, Redispatch in Deutschland, Auswertung der Transparenzdaten, Avril 2013 à Octobre 2016 [https://www.bdew.de/internet.nsf/id/20161103-oe-fakten-und-argumente-redispatch-in-deutschland-de/\\$file/Fakten%20und%20Argumente%20-%20Redispatch%20in%20Deutschland_oA.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/id/20161103-oe-fakten-und-argumente-redispatch-in-deutschland-de/$file/Fakten%20und%20Argumente%20-%20Redispatch%20in%20Deutschland_oA.pdf)
- 22) Umweltbundesamt: Emissionen der von der UN -Klimarahmenkonvention abgedeckten Treibhausgase, Mars 2016, <http://www.umweltbundesamt.de/>
- 23) Office franco-allemand pour la transition énergétique (OFATE) : EEG-Novelle endgültig verabschiedet, Mémo en français, 7 Septembre 2016, <http://enr-ee.com/de/systeme-maerkte/nachrichten/leser/eeg-novelle-endgueltig-verabschiedet.html>
- 24) Umweltbundesamt: "Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid- Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2015" Juin 2016, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/entwicklung-spezifischen-kohlendioxid-emissionen-0>