

# La transition énergétique allemande

Que peut-on apprendre de la situation actuelle?

Jusqu'où pourrait-on aller dans l'utilisation  
d'énergies renouvelables aléatoires?

Christian Le Brun

Sauvons le climat

# Pourquoi cette présentation?

- L'énergie est la clé du futur (eau, nourriture et conditions de vie) et assurer sa disponibilité pour tous est un vrai challenge.
- Dans le choix allemand officiel, on ne trouve au mieux que des chiffres très partiels.
- Le développement partout des énergies renouvelables aléatoires est privilégié, car bien vues par l'opinion et les médias et ne demandant pas de combustibles
- L'analyse de F. Wagner faite pour l'Allemagne et basée sur les besoins en électricité et la production d'énergies renouvelables aléatoires (EnRa) en 2010 est la base de l'exposé et sera en partie présentée

# Evolution des besoins énergétiques

## le constat

- L'utilisation croissante de l'énergie a accompagné l'évolution de la société
- Quel est le besoin minimum pour une vie acceptable pour tous? Pour avoir 2tep par personne en 2050, il faudra multiplier la production mondiale par 1,5 (8tep aux USA, 4 en France et 0,2 en Ethiopie aujourd'hui)
- Part de l'électricité dans le futur: égale à l'actuelle pour faire décroître les fossiles par exemple dans les transports et tenir compte des utilisations nouvelles
- Beaucoup de scénarios s'appuient sur une forte décroissance de la consommation énergétique y compris électrique (en contradiction avec le vécu!)

# Quelques règles concernant l'électricité qui ne stocke pas directement

- La puissance installée(PI) en GW mesure la capacité d'une installation à fournir de l'électricité et doit à chaque instant être égale à la puissance appelée (les pointes et les creux )
- L'énergie produite(EP), se mesure en TWh. Le bilan en général annuel est nécessaire mais pas du tout suffisant pour gérer la grille à chaque instant.
- Le facteur de charge(FC), donne en pourcentage sur l'année le temps pendant lequel une installation fournit de l'électricité à sa puissance maximum. Il conditionne l'efficacité et la rentabilité.
- Sources gérables : hydraulique, fossiles, biomasse, nucléaire ou le stockage, nécessaires au moins en cas d'absence des EnR
- Les énergies variables ou aléatoires ou chaotiques: leur production varie de 0 à la puissance installée, ce sont l'éolien, le solaire (PV, thermique, biomasse) et la cogénération et elles bénéficient de l'obligation d'achat et d'un prix garanti (CSPE).

# La transition énergétique en Allemagne

# La transition énergétique allemande

- Fermer le nucléaire en 2022. Pour 2050, réduire de 50% l'utilisation d'énergie primaire, de 25% celle d'électricité et de 80% l'émission de GES en faisant passer les renouvelables de 16 à 80%
- La question pour l'électricité: est-ce possible ?  
Comment? A quel prix?
- Oct. 2012: « Eolien, une illusion » J. Hayes, ministre de l'énergie de D. Cameron
- Mars 2013: « la France doit imiter l'Allemagne qui a mis en service 32GW de Photo- Voltaïque (PV) soit 20 EPR » le ministre allemand de l'écologie au débat sur la transition énergétique
- Le même ministre : « la transition énergétique allemande pourrait coûter 1000 milliards d'euros jusqu'en 2030 »

# La situation 2010 Allemagne

Puissance installée 144GW

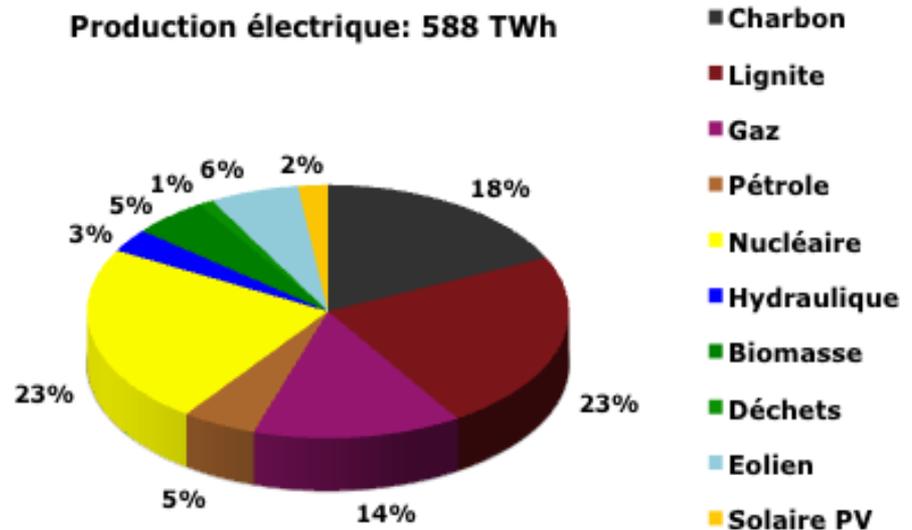
- Thermique 68 47,2%
- Nucléaire 20,5 14%
- Vent 28 19,4%
- PV 17,3 12%
- Autres 10,6 7,4%

Production :

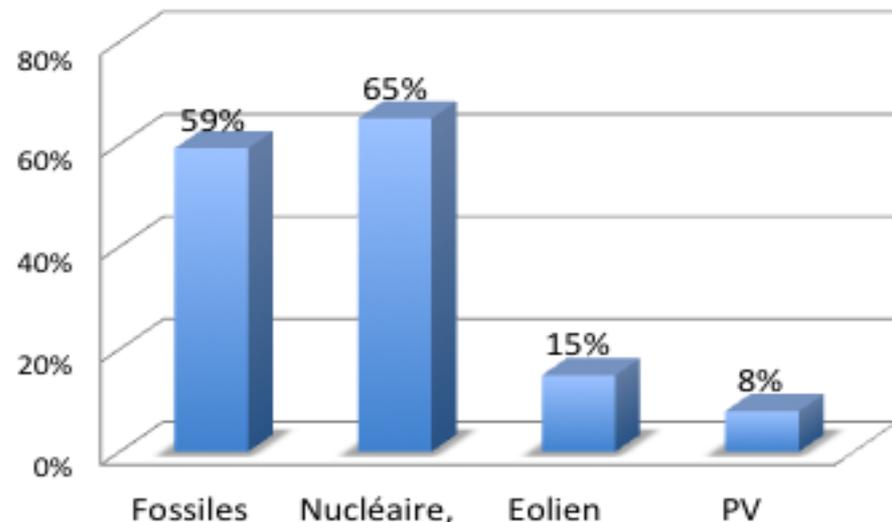
- Thermique 342TWh, 60%
- nucléaire 135,2TWh 23%
- Eolien: 35,3TWh 6%
- PV 11,8 TWH 2%

soit 8% du total EP pour  
31,5% de la PI d'où les  
faibles facteurs de charge

Production électrique: 588 TWh



Facteur de charge



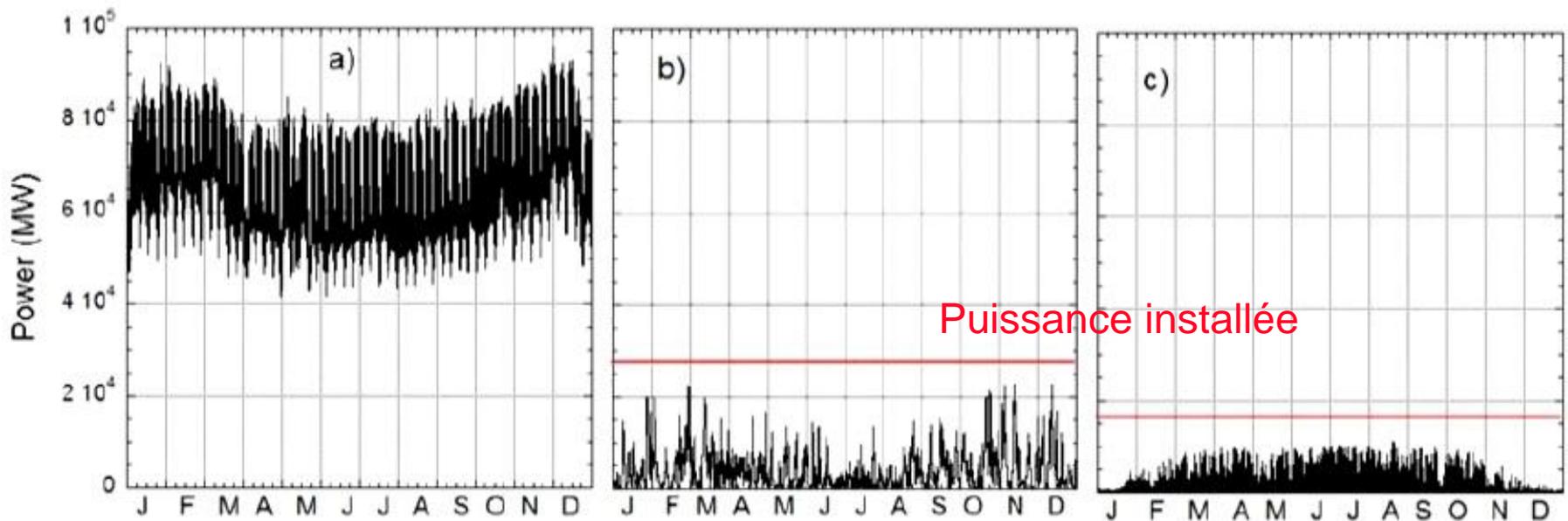
# L'Allemagne, un modèle?

- Les Allemands le font, pourquoi pas nous? les Français favorables au EnRa (sondage récent)
- PV installé en Allemagne fin 2012 32GW=20EPR soit mais seulement 28TWh produits
- **1kWh<sub>elec</sub> = 450g de CO2 en Allemagne et 90 en France**
- En 2012 + 9% sur le charbon et +7% pour le lignite
- **Que peut-on attendre des renouvelables? test plus significatif chez eux que chez nous**
- Coût électricité : 25,3c€ le kWh pour 14,03 en France pour le particulier, l'industrie allemande dispensée du coût de rachat des renouvelables payant 13c€

# Les énergies renouvelables aléatoires (EnRa)

# Demande et production d'électricité en 2010

- La puissance appelée ou demande d'électricité (courbe a) varie pendant l'année (minimum l'été), la semaine (minimum le week-end), le jour (minimum la nuit) et l'heure (10GW/h de pentes).
- La puissance de l'éolien terrestre varie sans cesse entre zéro et les 2/3 de la PI avec une moindre de production l'été
- La puissance du PV a une variation journalière prévisible (sauf nuages) avec un maximum l'été mais toujours  $\ll$  PI



# L'éolien

## Quelques repères

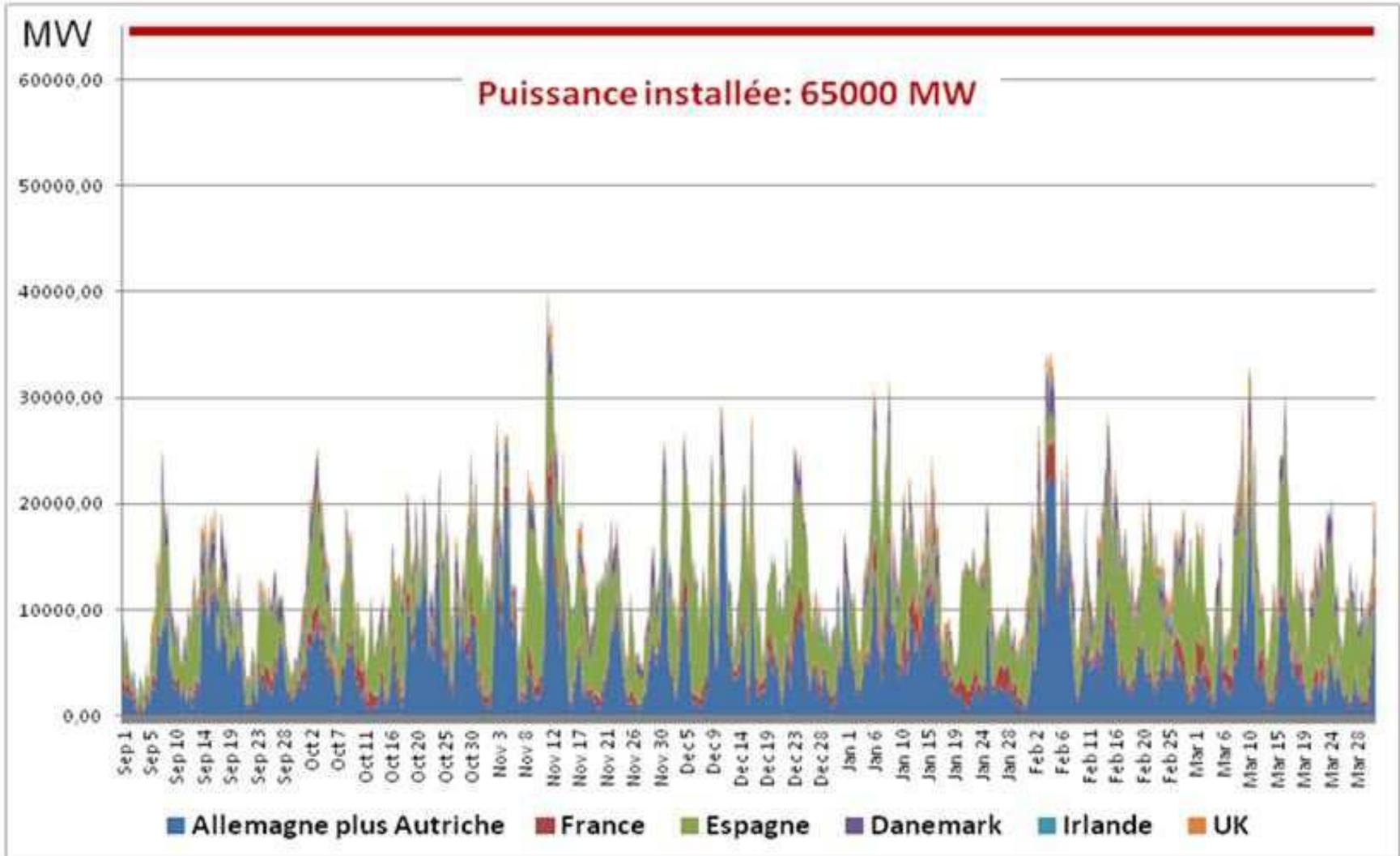
- $P=0$  pour  $V < 12,5\text{Km/h}$
- $P$  en  $a V^3$  pour  
pour  $12,5 < V < 52,5\text{km/h}$
- $P = P_{\text{max}}$  pour  
 $52,5 < V < 108\text{km/h}$
- $P=0$  pour  $V > 108\text{km/h}$
- Espacement: 5 fois le  
diamètre, ce qui donne  
en moyenne  $2,2\text{W/m}^2$

## Eoliennes offshore



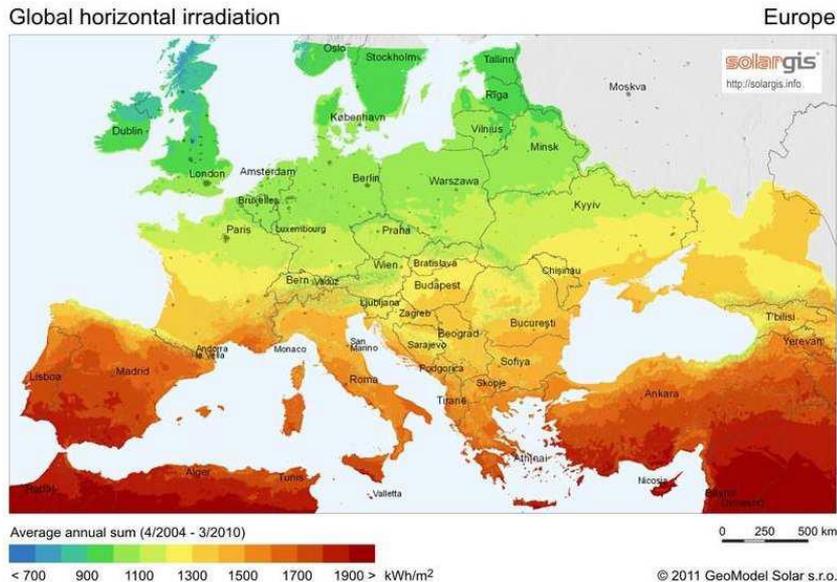
# Production éolienne en Europe

peu de foisonnement, 2h entre sud et nord en Allemagne



# Le solaire (PV, thermique, biomasse)

## Ensoleillement moyen

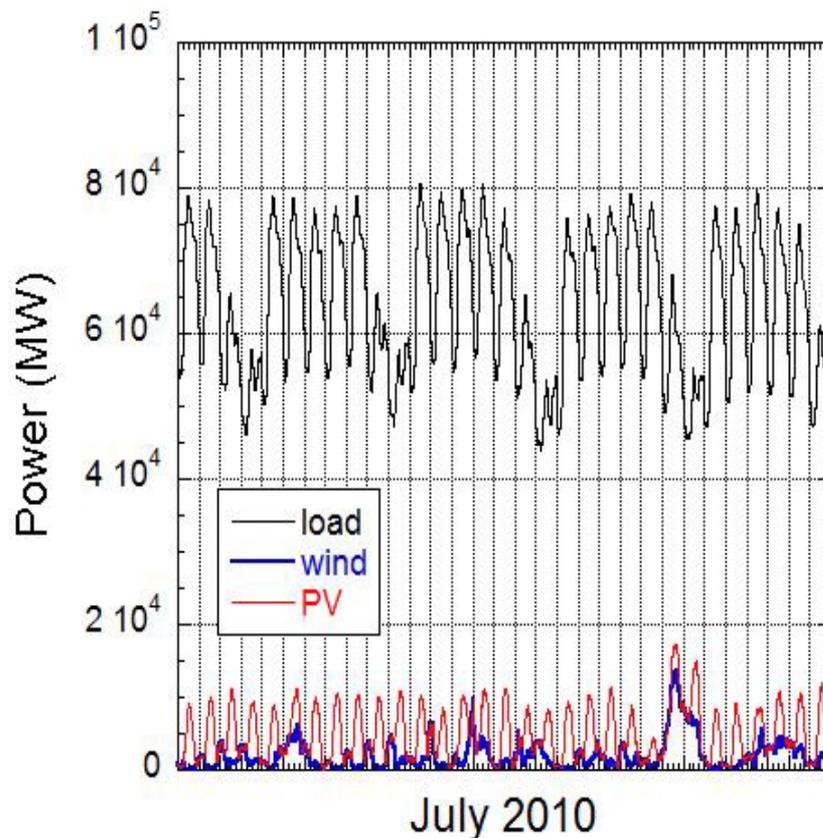
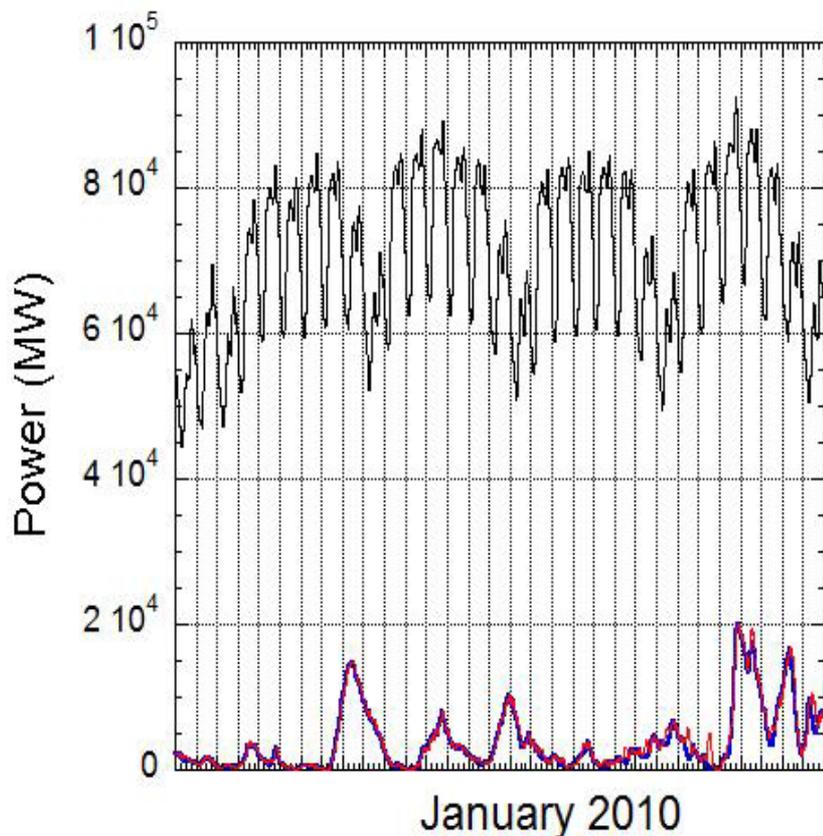


## Caractéristiques

- Source abondante 15 000 fois l'énergie mondiale mais
- Diffuse: de 2 à 4kWh par m<sup>2</sup>. jour au nord à 4 à 6 en PACA
- Prédicible avec forte variation (nuages)
- Facteur 2 entre été et hiver
- Rendements de 3 à 30% en PV (~5W/m<sup>2</sup>)
- Pourquoi le manque d'intérêt et de soutien pour le solaire thermique (jusqu'à 50W/m<sup>2</sup>)
- La biomasse (0,5kW/m<sup>2</sup>)

# La situation en Allemagne en 2010

Comparaison puissance appelée (noir)- production (éolien en bleu, PV+éolien en rouge) janvier juillet



# Le travail de Friedrich Wagner

# Le travail de F. Wagner

- Utiliser la distribution en temps de la consommation d'électricité en Allemagne et celles de la production d'électricité de l'éolien et du PV multipliée par un coefficient qui permet d'obtenir une énergie produite choisie
- En imposant la quantité d'énergie produite, regarder ce qui va être produit en trop et qui sera baptisé surplus et ce qui manquera et qui nécessitera un système d'appoint et aussi caractériser les variations

# Les hypothèses choisies

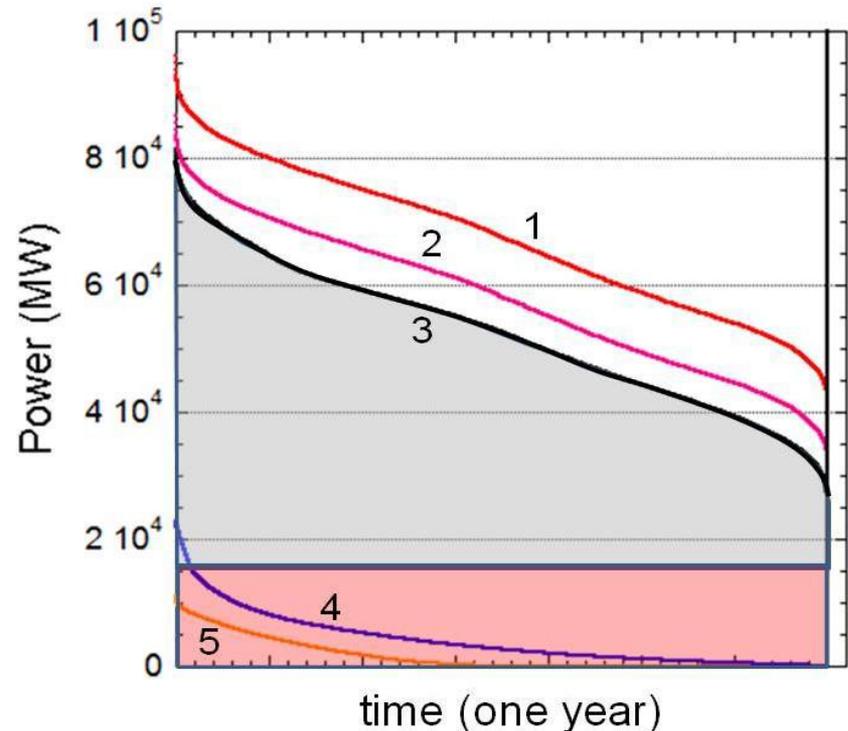
- Le scénario n'inclut pas de nucléaire, il utilise le gaz et/ou le stockage pour l'appoint
- La charge réduite 562TWh utilisée ne comprend pas l'hydraulique, le stockage et les déchets de 2010 qu'il ne voit pas changer dans le futur
- La biomasse n'est pas utilisée car F. Wagner veut la réserver pour les transports
- Il ne diminue pas la quantité d'électricité utilisée en raison des nouvelles utilisations qui peuvent diminuer la demande d'énergie primaire et des tendances actuelles où la consommation d'électricité continue de croître

# Les distributions temporelles pour 2010

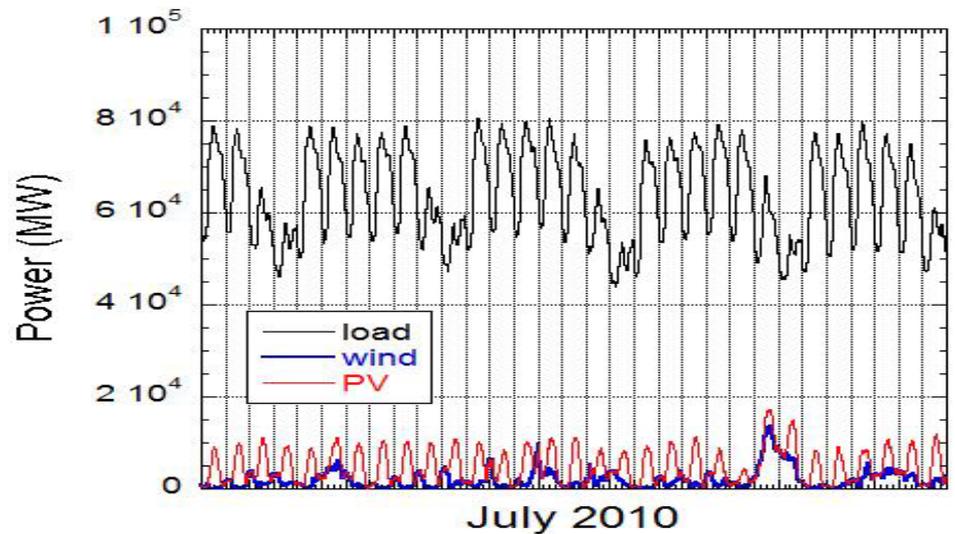
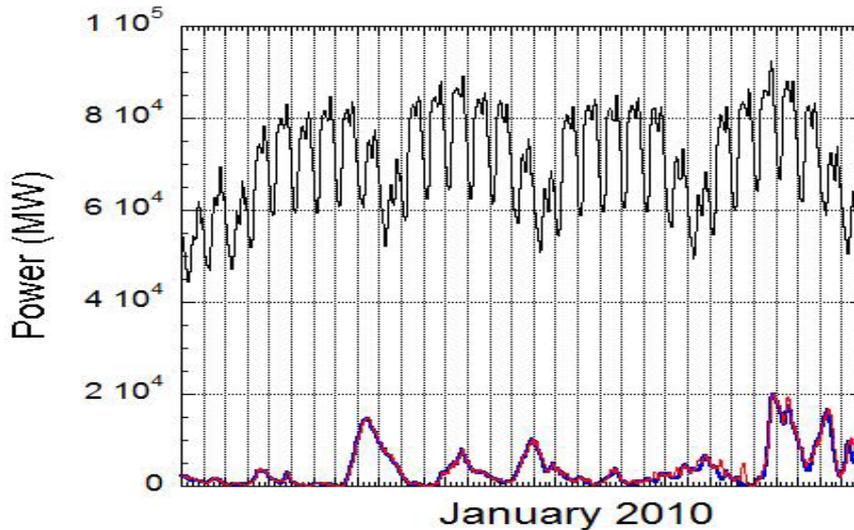
- 1- Courbe de la charge 588TWh
- 2- Charge réduite 562TWh
- 3- Charge après soustraction de l'éolien et du PV 2010
- 4- Production éolienne 35,3TWh
- 5- Production PV 11,8TWh

- La courbe de la charge ou demande est concave, les courbes de production EnRa sont convexes et ne produisent pas sur toute l'année = incompatibilités

Quantités produites ou à produire rangées en ordre décroissant



# Les différentes contraintes



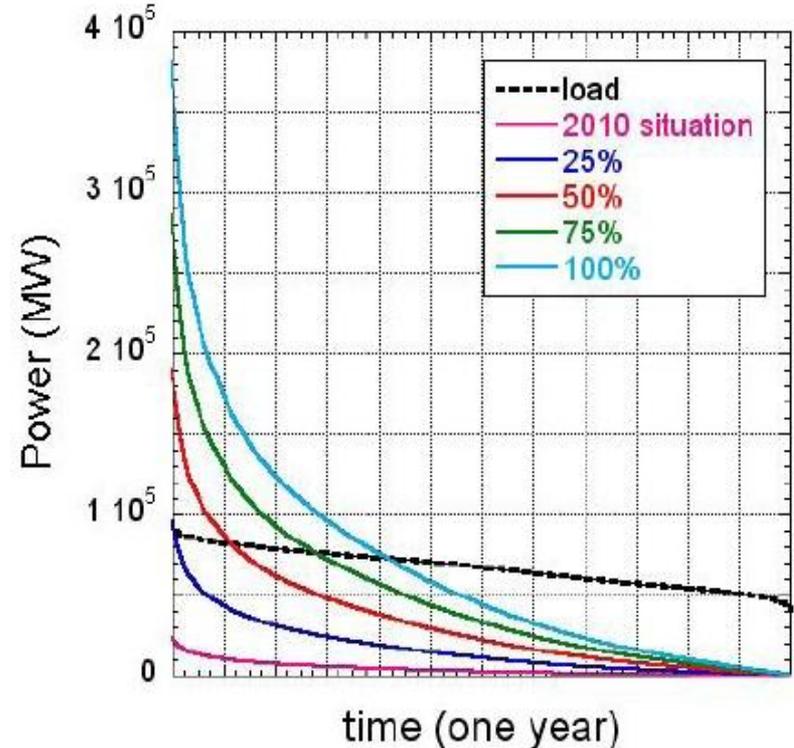
- Le besoin présente des effets nuit- jour et weekend mais ces modulations apparaissent au dessus d'un besoin fixe supérieur à 40GW
- Le **PV** comme l'**éolien** présentent des pics réguliers l'été pour l'un et aléatoire pour l'autre mais aussi des plages avec une très faible production continue. Ils ne peuvent seuls assurer la production quelle que soit la puissance installée

# Scénario tout éolien

## Les conséquences (cas 100%)

- Pour produire en 2010, les 562TWh consommés, il faudrait installer 367GW (28GW en 2010)
- Production excédentaire pendant 4 mois et déficitaire pendant 8.
- Besoin d'un apport extérieur de 83GW pour 218TWh produits et d'un surplus à évacuer de même valeur

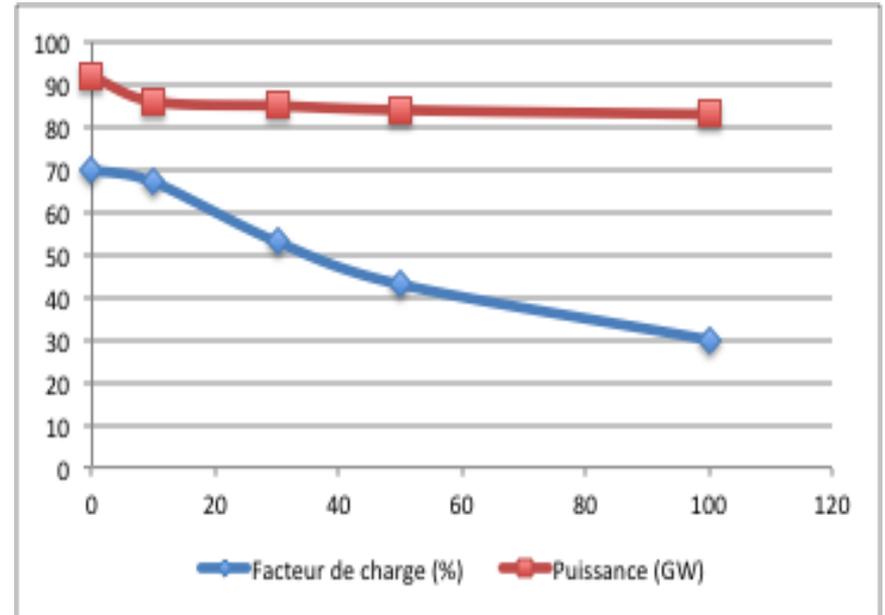
Distributions temporelles du besoin (noir) et productions possibles entre 6% (actuelle) et 100%



# Besoin d'un système d'appoint

Pour suivre la demande en électricité, il faut

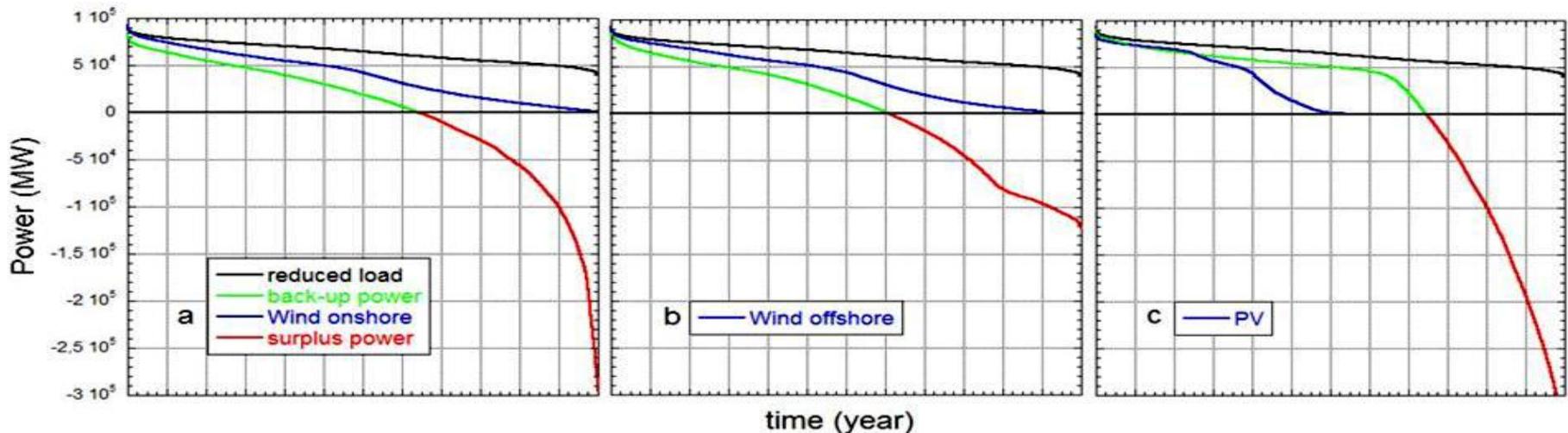
- Installer un système d'appoint dont la puissance ne diminue que très peu
- Par contre son temps d'utilisation va diminuer ce qui n'améliore pas la rentabilité
- Sinon coupures et impossibilité de répartir



- Puissance installée et facteur de charge du système d'appoint pour une production d'éolien terrestre de 0 à 100 % de la demande

# Comparaison des sources possibles: ce que demande chaque source produisant seule les 562TWh demandés

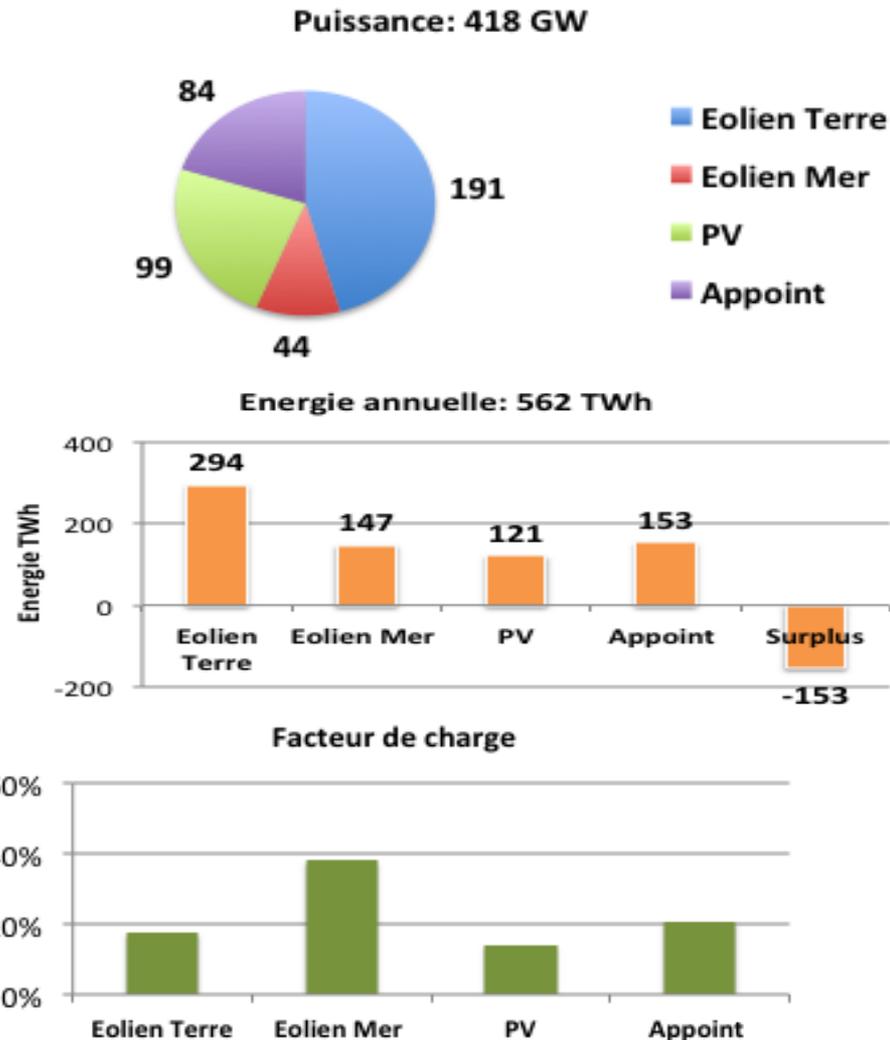
	P I GW EnRa	P appoint GW	Pi totale	Energie EnRa utile (TWh)	E appoint = surplus TWh
Eolien ter.	365	83	418	344	218
Eolien mer	165	87	252	344	218
PV	463	555	214	348	



# Le meilleur mélange d'EnRa

Gain notable sur l'appoint et les surplus (153TWh) mais la puissance totale à installer (418GW) reste très importante (3 fois la puissance installée actuellement 140GW))

Les facteurs de charge sont faibles partout sauf pour l'éolien marin

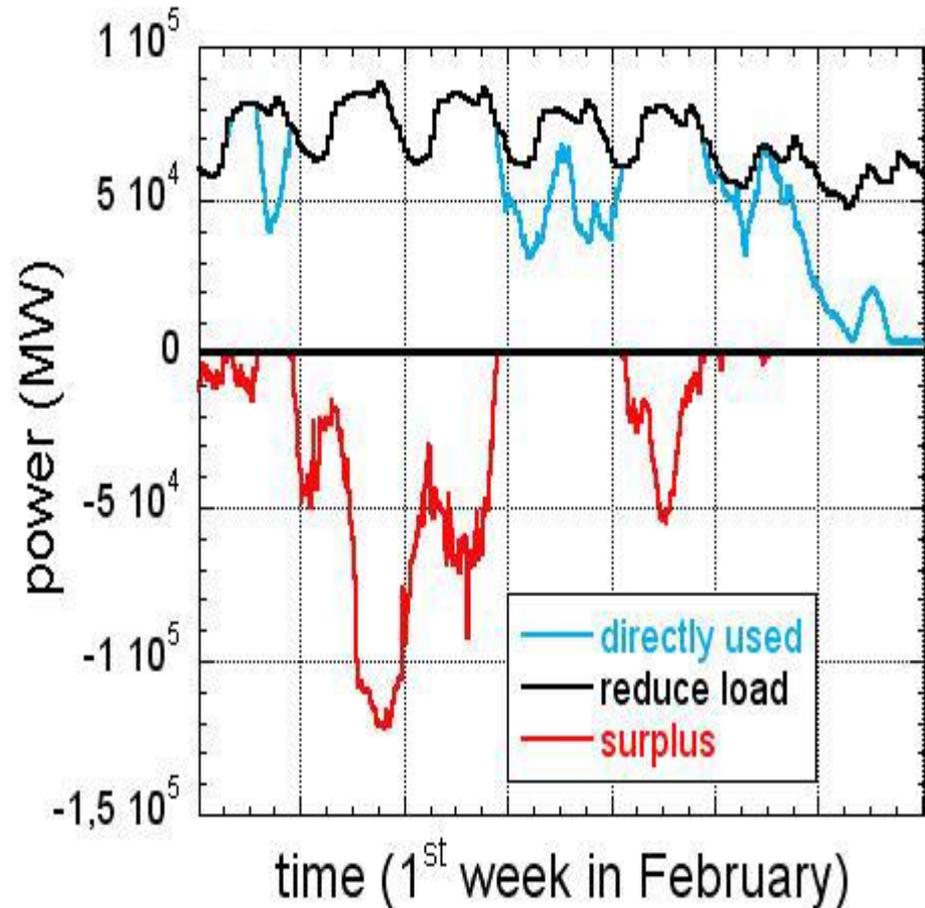


# Le surplus ou trop produit (cas optimal)

-La courbe noire représente la demande pendant la première semaine de février

-Les EnRa sont supposées fournir ce qui sera consommé sur l'année, mais dans la semaine présentée ici, elles produisent pas assez (courbe bleue) ou trop (courbe rouge)

-Ceci a déjà pu être observé en 2012 avec les productions faibles actuelles



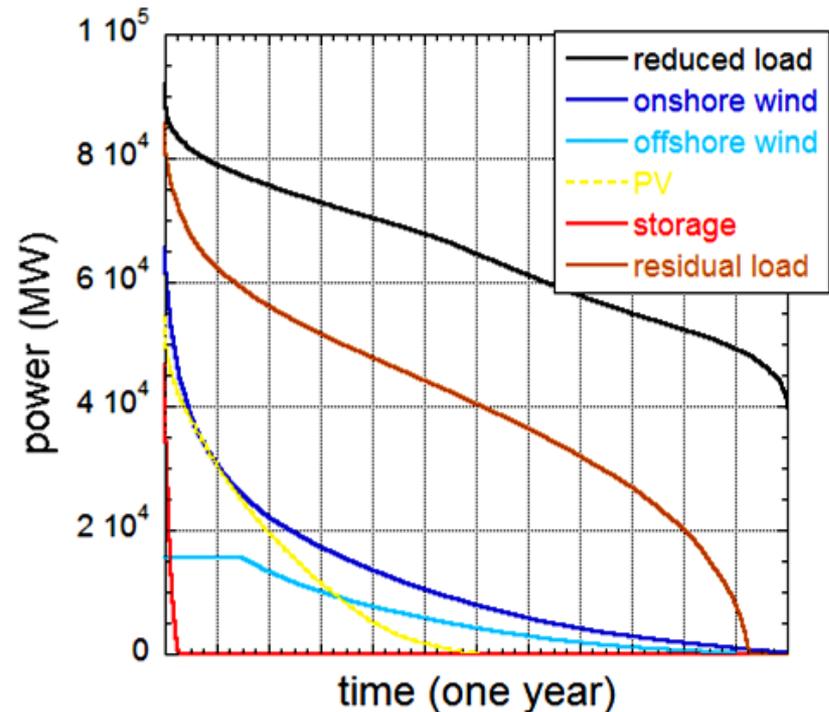
# Une limite réaliste: 40% d'EnRa?

- Ce choix est fait pour limiter le surplus et la puissance gérée par les grilles de distribution
- L'appel aux EnRa est fait selon le mix optimal
- Encore beaucoup d'investissements à faire: 226GW au lieu de 144GW actuellement

Source	PI (GW)	Production (TWh)	Rapport PI/2010	FC %
Eolien terre	69	106	x2,5	17,5
Eolien mer	16	53	x~80	73,8
PV	55	66	x4,1	13,9
Appoint	86	340	~1	45
Surplus		3		

# Une limite réaliste: 40% d'EnRa?

- L'appoint est utilisé plus longtemps puisqu'il fournit les 60% manquants avec une puissance installée de 86GW
- Avec un stockage important (200GWh= 5 fois la capacité actuelle) 2,7TWh peuvent être utilisées et le surplus est ramené à 300GWh.

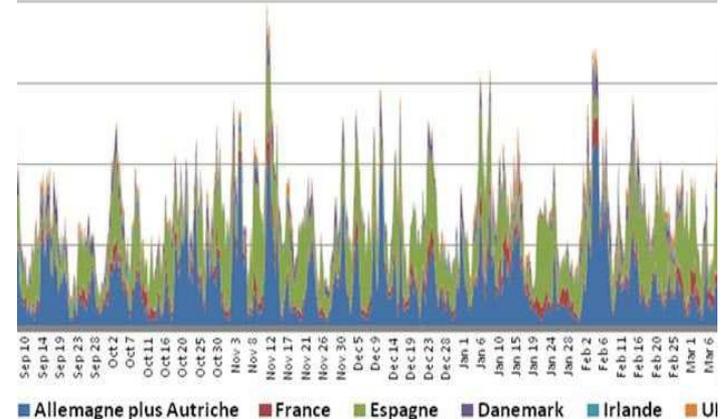


# Le système d'appoint

- Le système d'appoint a une puissance élevée et doit suivre des variations très brutales
- Des centrales à gaz sont proposées pour l'appoint mais d'autres systèmes sont possibles
- Le système d'appoint est utilisé que peu de temps et avec des variations brutales: problèmes industriels et d'investissement

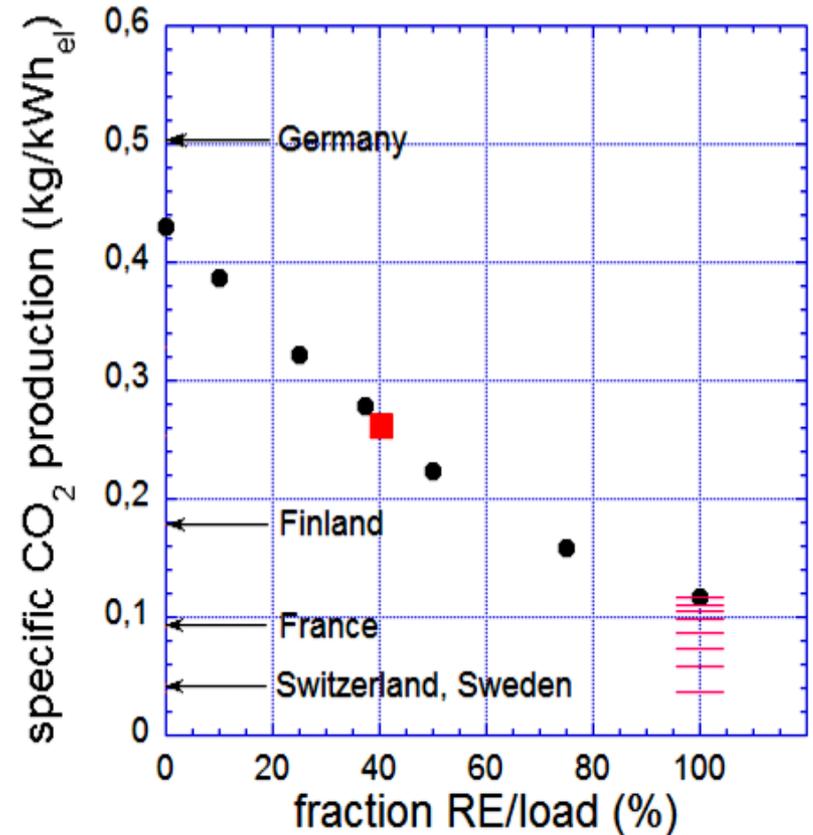


Puissance installée: 65000 MW



# Quel résultat pour le CO<sub>2</sub>

- Emission par des centrales à gaz sans perte de méthane
- Traits rouges: mix optimal avec stockage de 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000GWh
- N'arrive pas à faire mieux que le nucléaire + hydraulique actuel de la Suisse et même de la France.

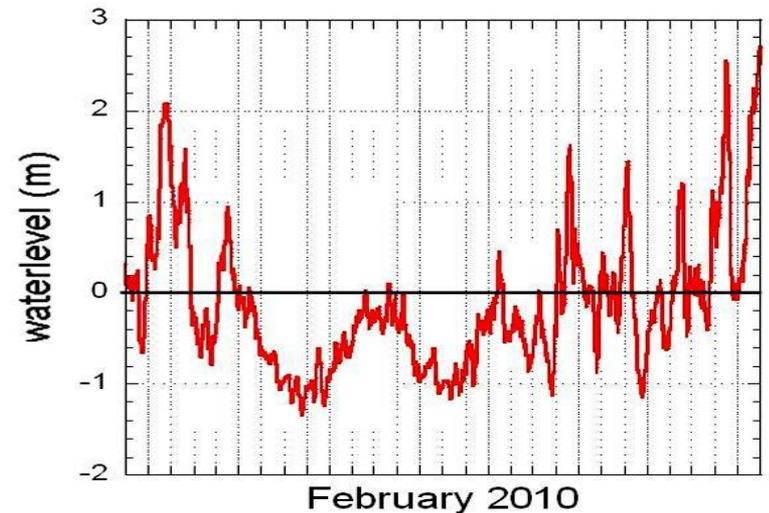


# Le surplus

- Impossible à éviter avec les EnRa et important à cause des grands puissances EnRa installées
- Pas utilisable sur la grille européenne ( évident pour le solaire, constaté pour l'éolien) même améliorée
- On atteint les limites déjà maintenant (déphaseurs, non- production, vente subventionnée)
- Stockage: valeurs gigantesques: 153TWh, bien au-delà des STEP, pas de technologies nouvelles pour le stockage de masse même dans les laboratoires
- Transformation en carburants (H<sub>2</sub>,....) difficile à cause des facteurs de charge faibles et des transitions très brutales induisant de fortes contraintes mécaniques et une usure importante.

# Le stockage hydro-électrique

- 1kWh= 1tonne d'eau tombant de 360m
- Grand maison: 1,7GW pendant 30h= 51GWh
- Variation de hauteur d'eau dans le lac de constance (536km<sup>2</sup>) pour stocker le surplus et fournir l'appoint en février 2010 (entre +3 et -1,5m) avec une chute de 10m et des débits instantanés 500 fois supérieurs au Rhin dans le cas mélange optimal



Où arrive-t-on?

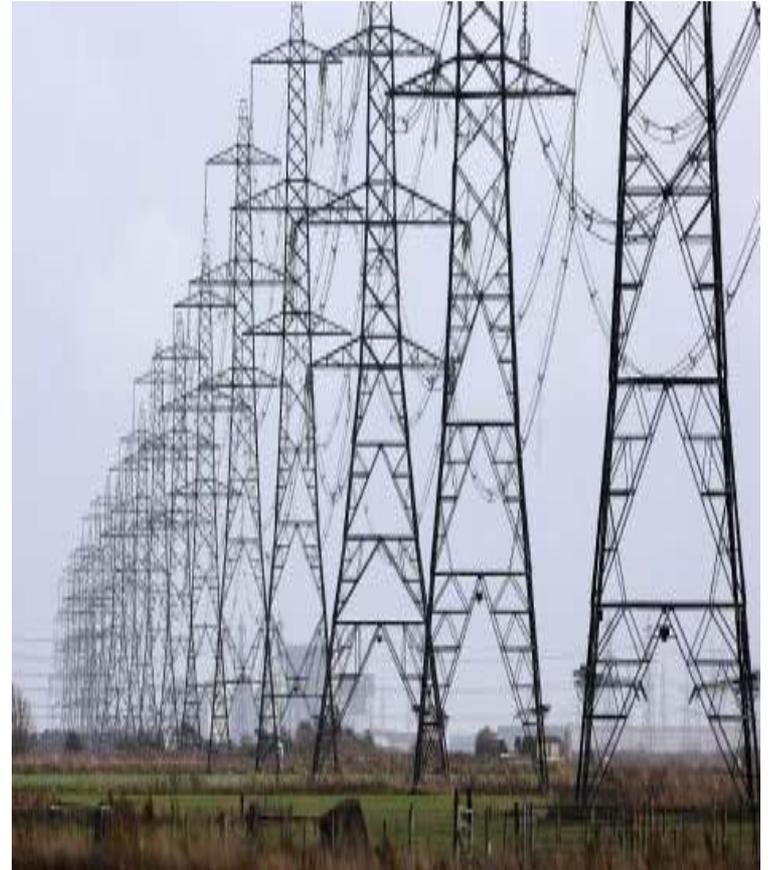
# Début de bilan

- Sécurité de fourniture: possible au prix d'investissements énormes
- Emission de CO2: reste un problème non résolu sauf stockage irréaliste
- 40% d'EnRa semble la limite supérieure; le reste avec quoi?
- Etude Fraunhofer: chiffres voisins qui confirment l'étude, rien sur l'appoint ou le stockage

Sour ce	2010	100% éolie n	Mix opti mal	40% EnR a	Frau nhof er
Eolie n terre	27,2	363	191	69	170
Eolie n mer	0,06		44	19	85
PV	13,4		99	55	200
Appoi nt	86	83	84	86	

# La grille de distribution

- Un problème crucial
- Besoin d'installer de grandes valeurs en relation avec la puissance installée
- Besoin de nœuds capables de stabiliser la fréquence
- Difficultés économiques et environnementales
- En Allemagne, retard important par rapport aux investissements EnRa



# Les considérations économiques à prendre en compte

- Ces difficultés sont évoquées par F. Wagner et par les ministres allemands sans proposition de solution:
- Les investissements (exemple sur la planche suivante pour des systèmes capables de produire 11TWh)
- Le fonctionnement en incluant les coûts CO<sub>2</sub> (à venir?)
- La durée de vie
- Le démantèlement et/ou le recyclage
- La rentabilité des systèmes d'appoint
- Le conflit obligation de rachat et gestion de la grille: risque de chute de réseau et remise en route difficile
- Le conflit obligation de rachat-coût fixé, libéralisation du marché = déconnexion éoliennes, ventes forcées

# Production électricité de 11TWh/an

parcs La Rosière(115MW), Quatre Faux(352,5MW),  
Guérande(450MW) et EPR

Origine production électricité	Puissance à installer en GW, (nb parcs)	Energie produite (TWh)	Facteur de charge ( % de l'année)	Surface à occuper (ha)	Investissements (G€) sans stockage
Nucléaire	1,6 (1)	11	80	51	8,5
Solaire PV La rosière	8,4 (73)	11	15	26 800	30
Eolien terrestre, quatre-Faux	6,3 (18)	11	20	90 000	12,6
Eolien mer, Guérande	3,6 (8)	11	35	28 800	12(?)

# Bilan de l'étude

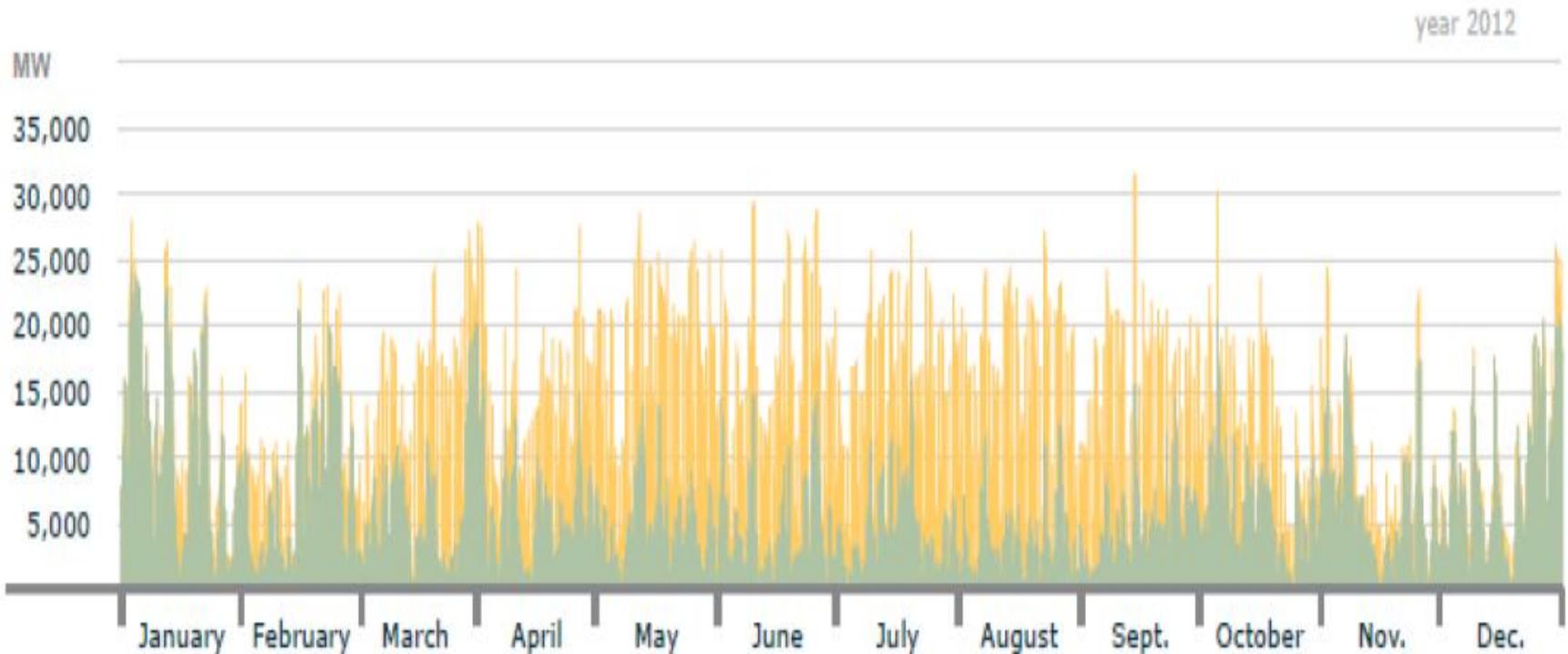
- Les EnRa ne peuvent **seules** fournir de façon assurée l'électricité consommée par un pays
- Il faut toujours un système d'appoint dont la puissance ne varie pas et seul le FC diminue
- Il se crée alors un surplus qui est très difficile à utiliser lorsque la production des EnRa dépasse 40% de l'électricité consommée
- Il faut maximiser le stockage mais les systèmes actuels sont insuffisants
- Le réseau, l'obligation d'achat et les prix subventionnés ne sont qu'abordés

# Qu'en tirer pour la France?

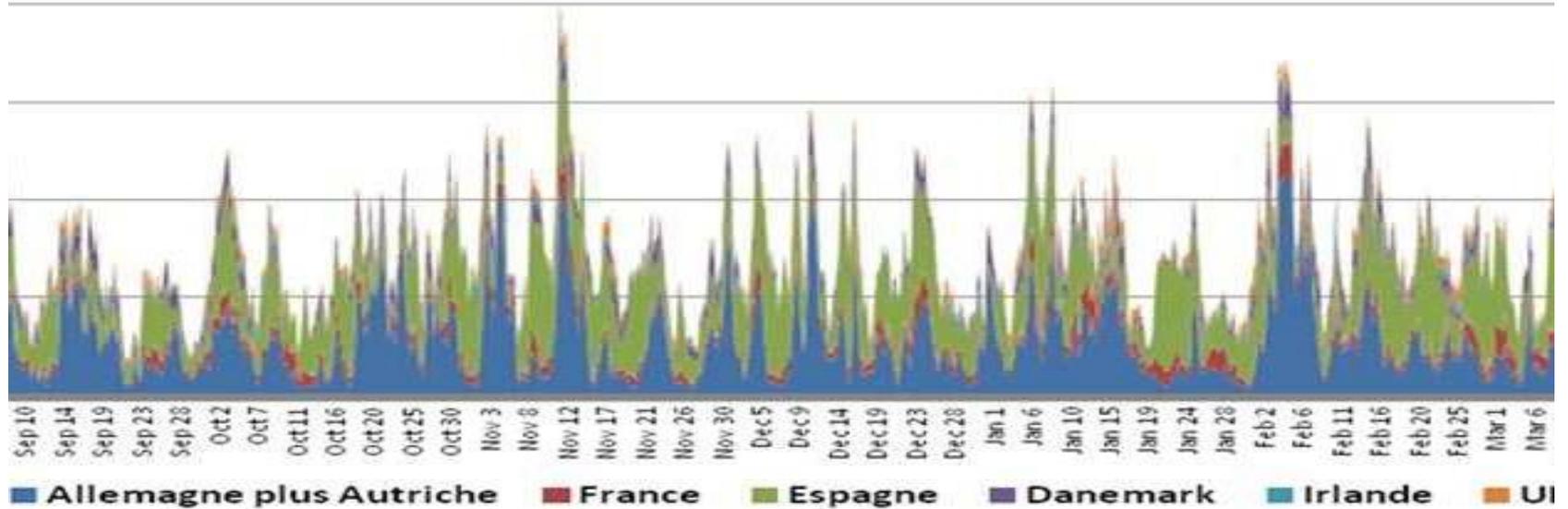
- Un système d'appoint est toujours nécessaire et devrait couvrir au moins 60% de la fourniture en électricité
- Si on ne veut pas de CO<sub>2</sub>, seules possibilités:
  - Le stockage 6GW en France actuellement (à x100 pour tenir 10j sans vent, déjà pas réaliste et insuffisant)
  - La biomasse qui doit répondre aux besoins de l'alimentation, des combustibles directs et liquides et de la méthanisation et en plus conserver la biodiversité surfaces insuffisantes
  - Le nucléaire
- Cette conclusion est valable quelle que soit le niveau de la fourniture demandée aux EnRa
- La seule solution pour avoir une gestion rationnelle des EnRa est de supprimer l'obligation d'achat

# La production PV + éolien en Allemagne en 2012

## Actual production solar and wind



Puissance installée: 65000 MW



# L'éolien en Europe

Foisonnement très limité

2H entre sud et nord de l'Allemagne