

Vers 100% d'énergie renouvelable

N°10 Formation EELV-COMENER
Cycle 2021 / Antoine Bonduelle



Plan des cours 10-11



La métaphore: La machine à vapeur fonctionne en continu grâce au **volant d'inertie** et au condenseur séparé ainsi que son **régulateur de vitesse** centrifuge. Cette inertie mécanique contrôlée est au cœur de fonctionnement régulier de la machine. Le **réseau électrique** a une problématique similaire : créer un équilibre dynamique à la frontière entre la demande et l'offre d'énergie.

- ✓ 100% ENR?
- ✓ Le nouveau cadre décentralisé
- ✓ Un système centré sur l'hiver
- ✓ L'équilibre offre-demande
- ✓ Le système: la monotone, la défaillance, le brown-out, le black-out, le dispatcher
- ✓ La déclin de la centrale à vapeur
- ✓ La critique de la monotone en France
- ✓ Nouveaux outils pour les ressources variables
- ✓ Intermittence et foisonnement
- ✓ Manoeuvres en mer du Nord
- ✓ L'échelle des flexibilités et le besoin de stockage
- ✓ Trois périodes à quantifier
- ✓ Les techniques de stockage et leur progression



100% ENR

- ✓ Le système énergétique à construire est dominé par la ressource renouvelable
- ✓ Il implique à la fois le territoire et l'ensemble de l'Europe
- ✓ Il jongle entre des formes différentes d'énergie et passe de l'une à l'autre
- ✓ En grande partie il répond de façon à des questions déjà posée aux réseaux électriques actuels.

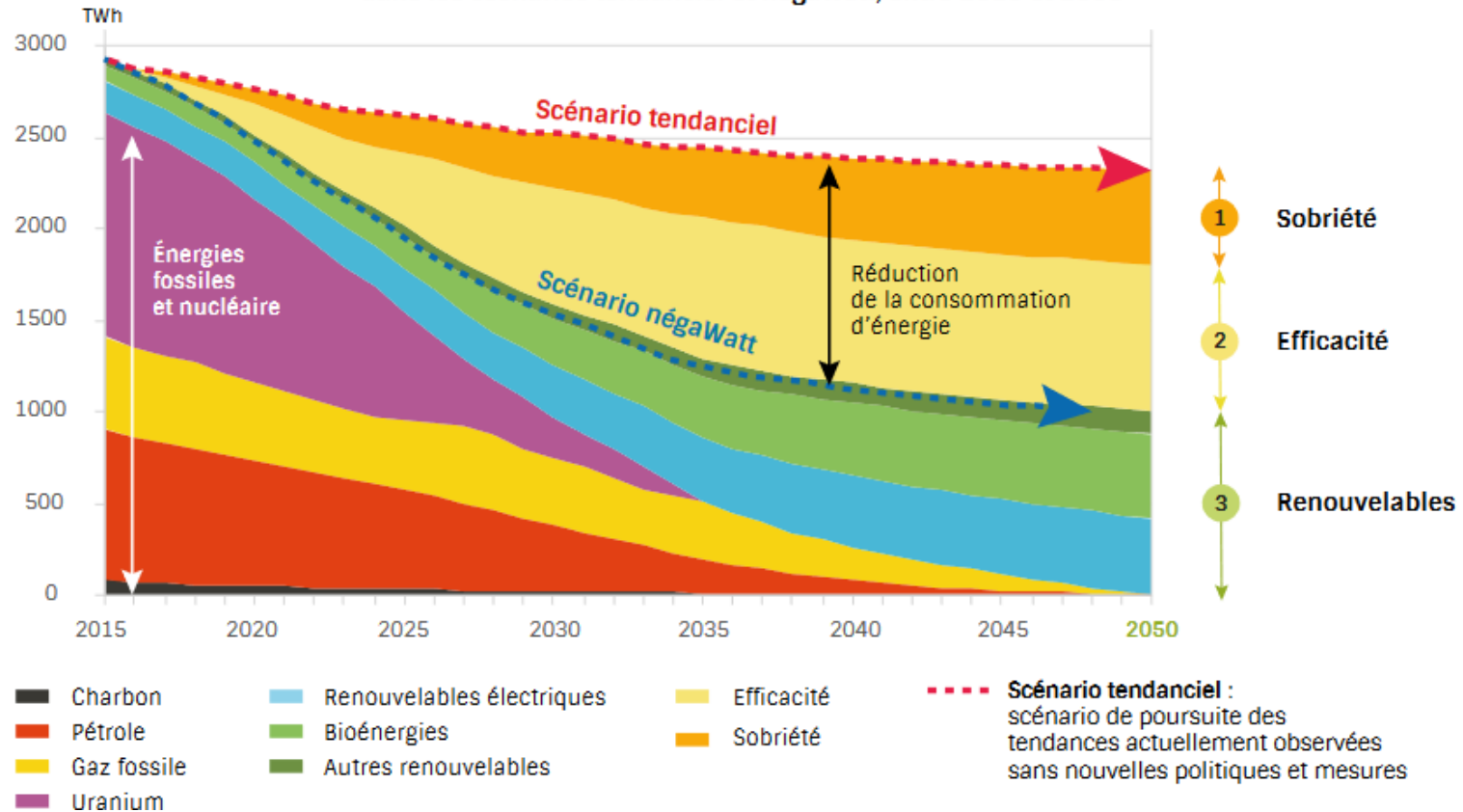


Image Siemens



Sortir des fossiles et du nucléaire...

Évolution de la consommation d'énergie primaire dans les scénarios tendanciel et négaWatt, entre 2015 et 2050



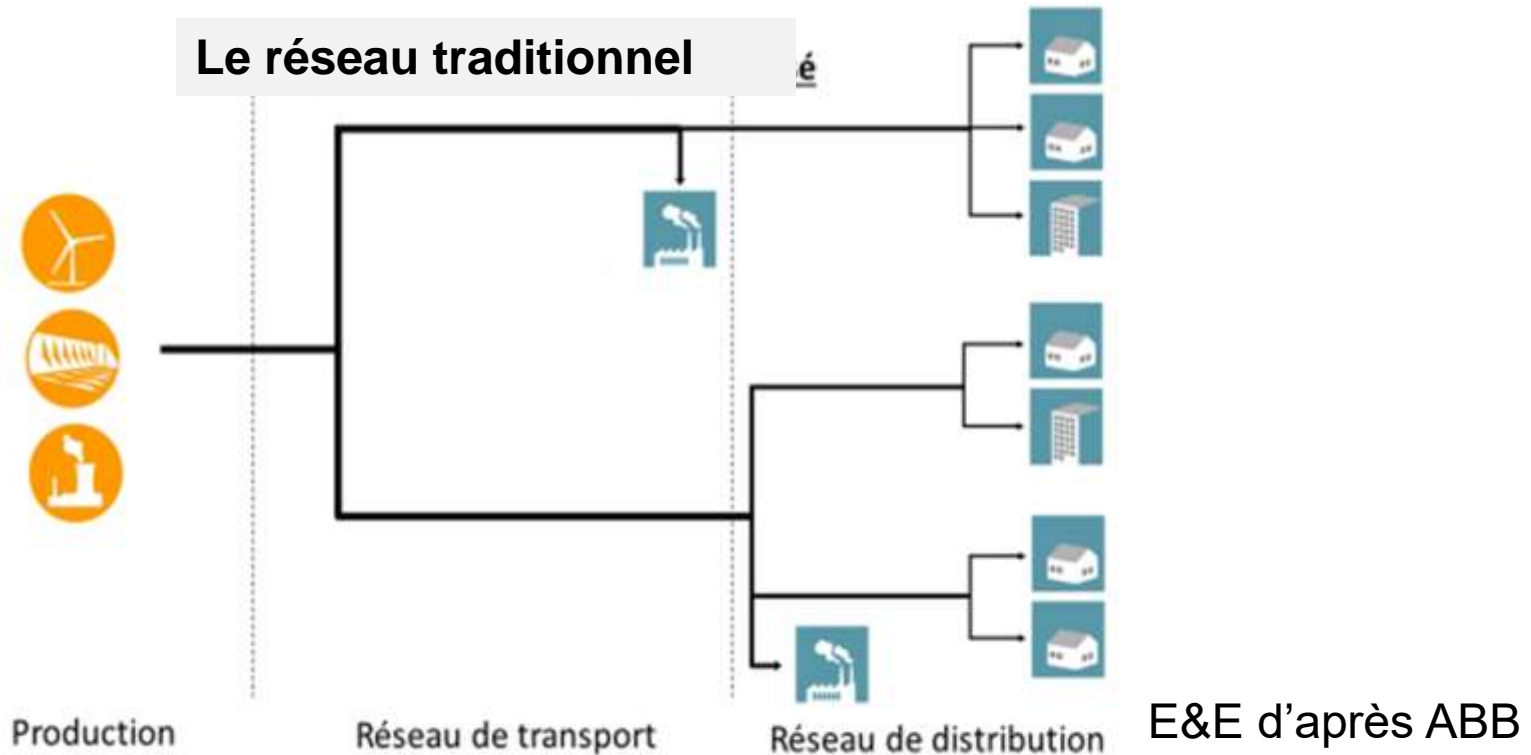
Toutes énergies: le défi climatique c'est de neutraliser l'ensemble du bilan énergétique, tout en créant les conditions d'un développement durable. L'évolution du système électrique s'inscrit dans ce cadre de transformation globale. Voir le scénario negaWatt ici <https://youtu.be/i3Ih-AAxELo>



Vers 100% ENR...



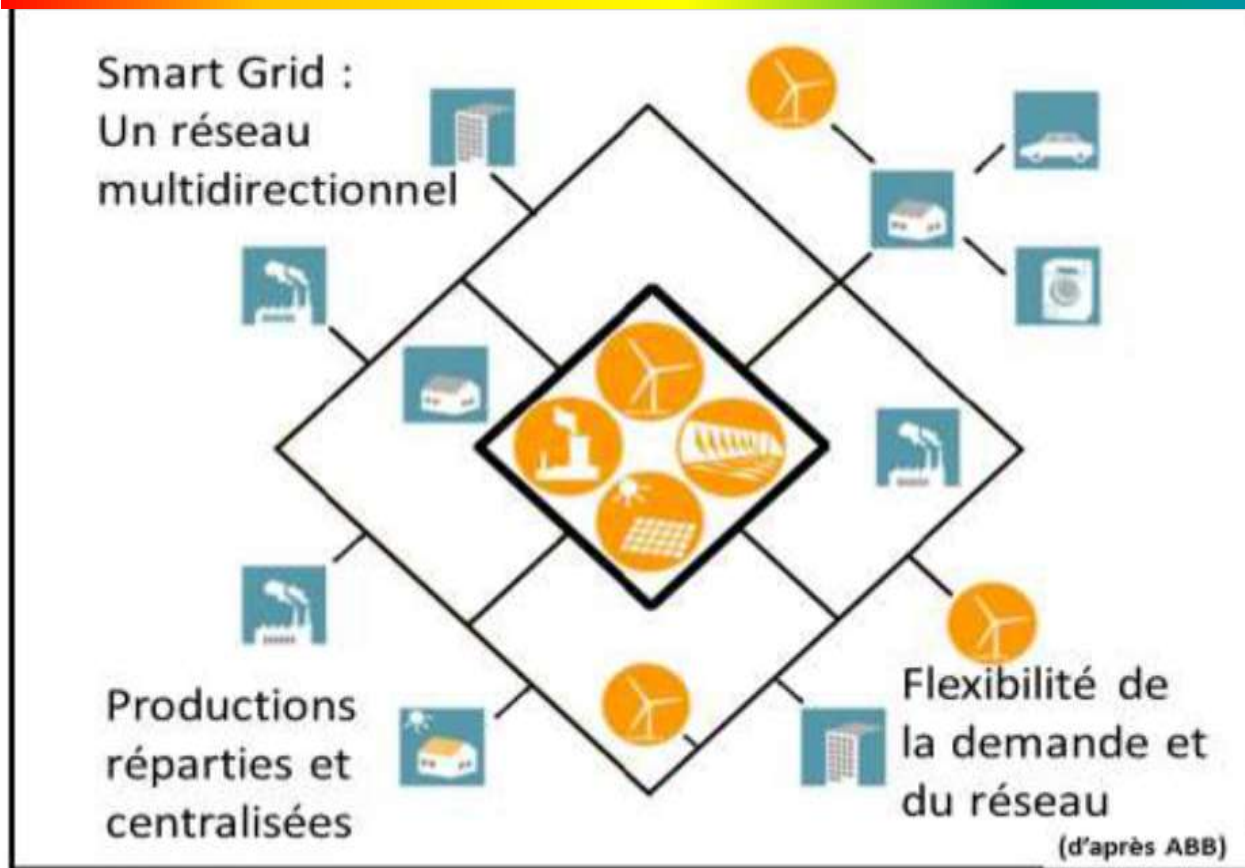
Ancien: Le réseau descendant



Descendant : Dans le réseau électrique traditionnel, la production se produit dans des centrales de grande taille (cf cours 6). Le transport, et même la tarification sont mis au service de la croissance « optimisée » des moyens de production. Ce modèle est remis en cause par la crise technique de la grande centrale à vapeur (cf. cours 6) d'abord par la turbine à gaz dérivée de l'aéronautique, les moteurs à combustion interne, puis les énergies renouvelables.



L'avenir est décentralisé



Le réseau du futur
(E&E d'après ABB)

Décentralisé : Le réseau futur mélange des ressources classiques décarbonées, des producteurs locaux, des consommateurs qui auto-produisent. L'accent est mis sur la flexibilité collective, nécessaire pour que le réseau fonctionne. Le système électrique n'est donc pas plus « localisé », il a juste perdu son orientation univoque et le centre décideur.



Vers 100% ENR...



Danemark – Hier et aujourd'hui

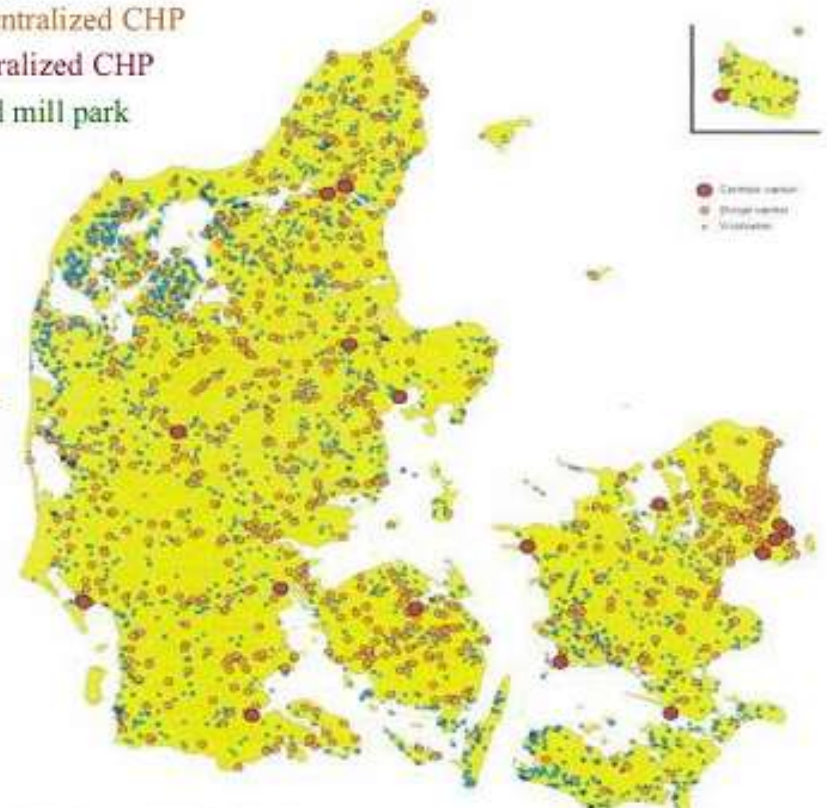
Centralized production in 1985



Decentralized production of today

Legend:

- Decentralized CHP
- Centralized CHP
- Wind mill park



Le réseau danois a multiplié les points de production en énergies renouvelables et en production combinée d'électricité sur réseaux de chaleur. Il échange aussi avec ses voisins suédois et allemands pour faire face aux variations de demande et d'offre.



Vers 100% ENR...



Décentralisé?



- ✓ Un système décentralisé sort de la logique du réseau descendant en s'ouvrant aux **ressources locales** et à l'**auto-production**.
- ✓ La répartition des ressources sort du Centre de Répartition d'Énergie (« Dispatching Center ») et d'une Bourse d'Échanges unique.
- ✓ L'organisation nouvelle repose sur une planification alliant **décision collective nationale** (par ex. Accord de Paris), avec les **choix des territoires et des citoyens** confrontés à la **logique des acteurs économiques**. Et donc plus uniquement sur une proposition univoque (« léonine ») du **réseau en monopole**.



Vers 100% ENR...



Le nouveau cadre



Cadre Moderne : Ce tableau d'art, de ligne abstraite et minimaliste est livré chez vous pour 11,79€. Livraison Amazon Gratuite.

- ✓ Décentralisé (= « sans centre »), n'est donc pas forcément localisé et peut être en réalité très dispersé géographiquement.
- ✓ Les enjeux de flexibilité s'élargissent: le plus local n'est pas le plus écologique
- ✓ L'insertion dans le réseau régional et européen est essentielle pour un fonctionnement optimal et soutenable : local, régional, européen



Vers 100% ENR...



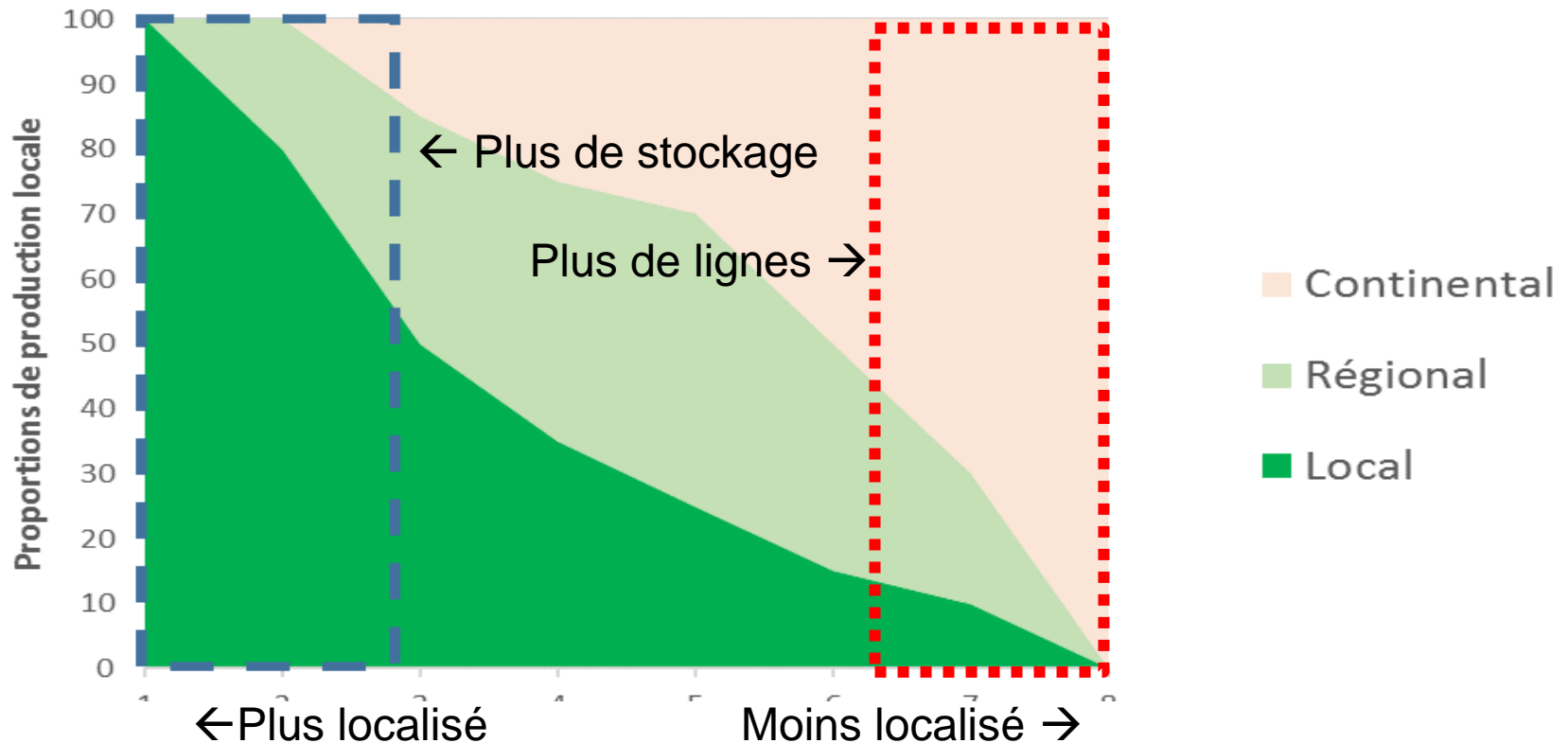
Où est l'optimum ?

Echelle	Raccordement électrique	Exemple type d'échange	Exemple de financement	Exemple type
Local	Basse ou moyenne tension	Auto-production	Auto financement	Toiture PV
Régional	Moyenne tension	Coopératives d'investissement	Fonds d'investissement spécialisés	Groupe d'éoliennes terrestres
Continental	Réseau de transport	Planification par des états	Syndicats bancaires	Eolien off-shore ou flottant



Localisation optimale du système

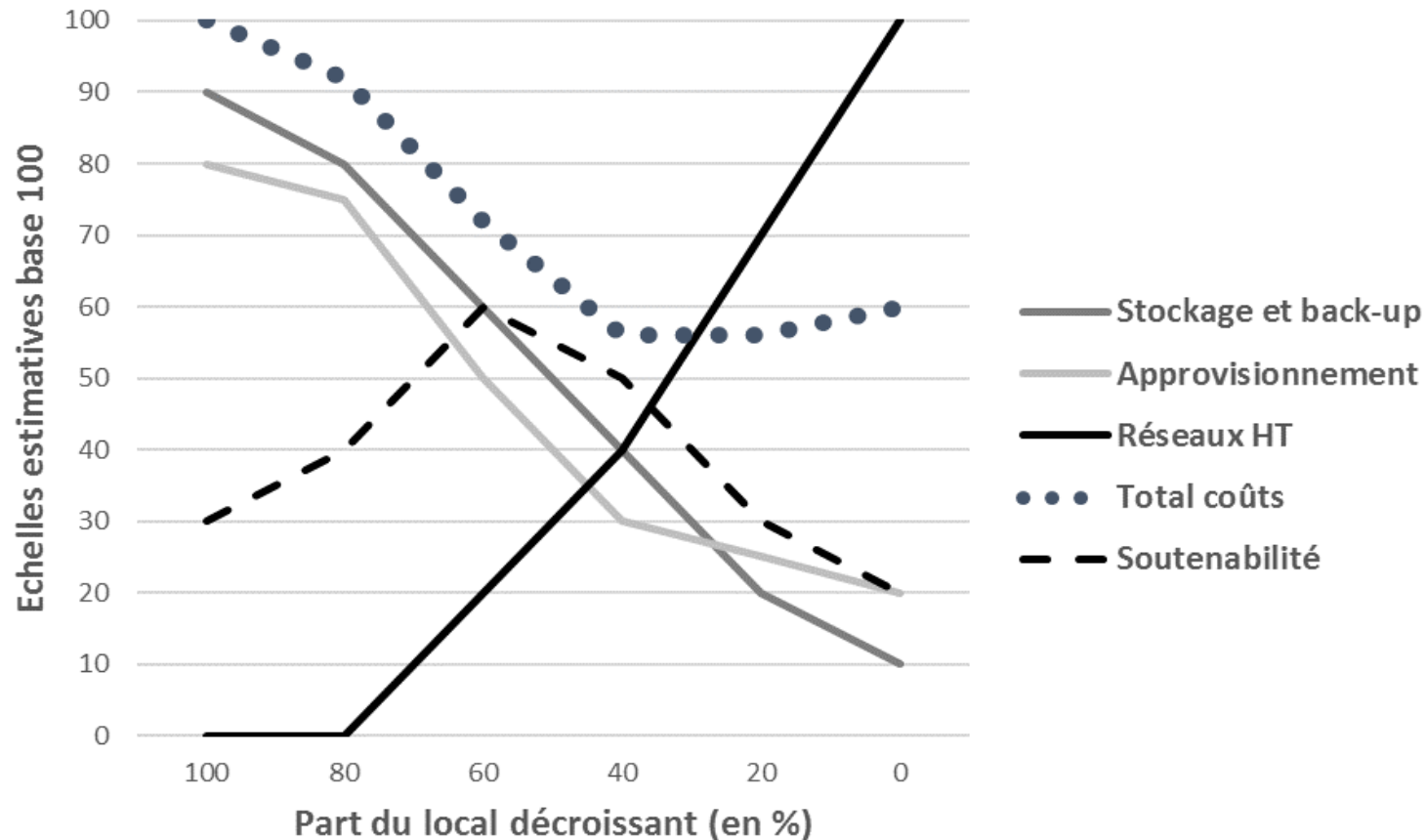
Ressources décentralisées : du local au continental



Echelle du plus local au plus continental. Le pointillé bleu suggère la zone d'autonomie totalement locale qui n'a pas de foisonnement de production et demande du stockage à grande échelle. Le pointillé rouge n'est pas plus écologique car il laisse au marché la production renouvelable et induit des besoins de lignes électriques.



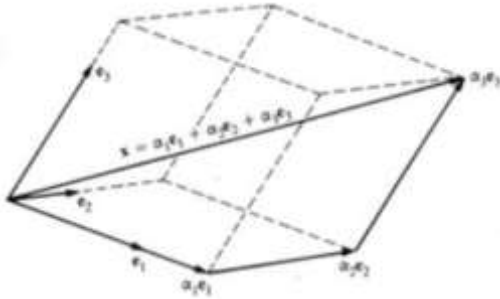
Un compromis local/régional, notion de « TEPOS » (territoire à énergie positive...)



[Valeurs illustratives] Le caractère plus ou moins local induit un équilibre entre économie et écologie. Les extrêmes (tout local ou tout continental) posent problème à la fois par les performances techniques, l'économie et l'écologie.



Les vecteurs d'énergie



Problème d'espace vectoriel

Certaines formes d'énergie ne sont que des « **vecteurs** », intermédiaires entre la ressource primaire et l'usage final. C'est le cas de l'électricité. D'autres énergies sont à la fois un vecteur mais aussi une ressource pour la chimie ou des matières premières (l'hydrogène). Enfin, le gaz naturel est à la fois une ressource primaire abondante, un vecteur et une matière première de la chimie (pour les engrais), en plus d'un GES majeur.

Le **changement de vecteur**, de même que les **cascades énergétiques de récupération**, seront des briques essentielles d'un système énergétique renouvelable, qui devra alimenter **tous les secteurs de l'économie**.



Comment changer de vecteur?

Matrice des vecteurs d'énergie				
De / Vers	Chaleur	Electricité	Gaz	Hydrogène
Chaleur	x	ORC	x	x
Electricité	Pompe à chaleur	x	Méthanation	Electrolyse
Gaz	Combustion	Turbines / Pile à combustible	x	Reformage
Hydrogène	Pile à combustible	Pile à combustible	Méthanation	x

Parcs d'Activité TRI/REV3. [E&E Consultant; Cohérence Energies; Co-Porteurs; Synergie]

* ORC : Cycle Organique de Rankine. Les machines à ORC transforment des sources de chaleur en électricité.

Elles sont notamment utilisées dans les industries lourdes mettant en œuvre des chaleurs élevées (cimenteries...)

Le passage d'un vecteur à l'autre est déjà le point de départ pour éponger le surplus d'éolien (PAC sur réseau de chaleur en Allemagne du Nord) ou de PV (chauffe-eau des particuliers). La méthanation et l'électrolyse seront détaillées dans le cours #11.

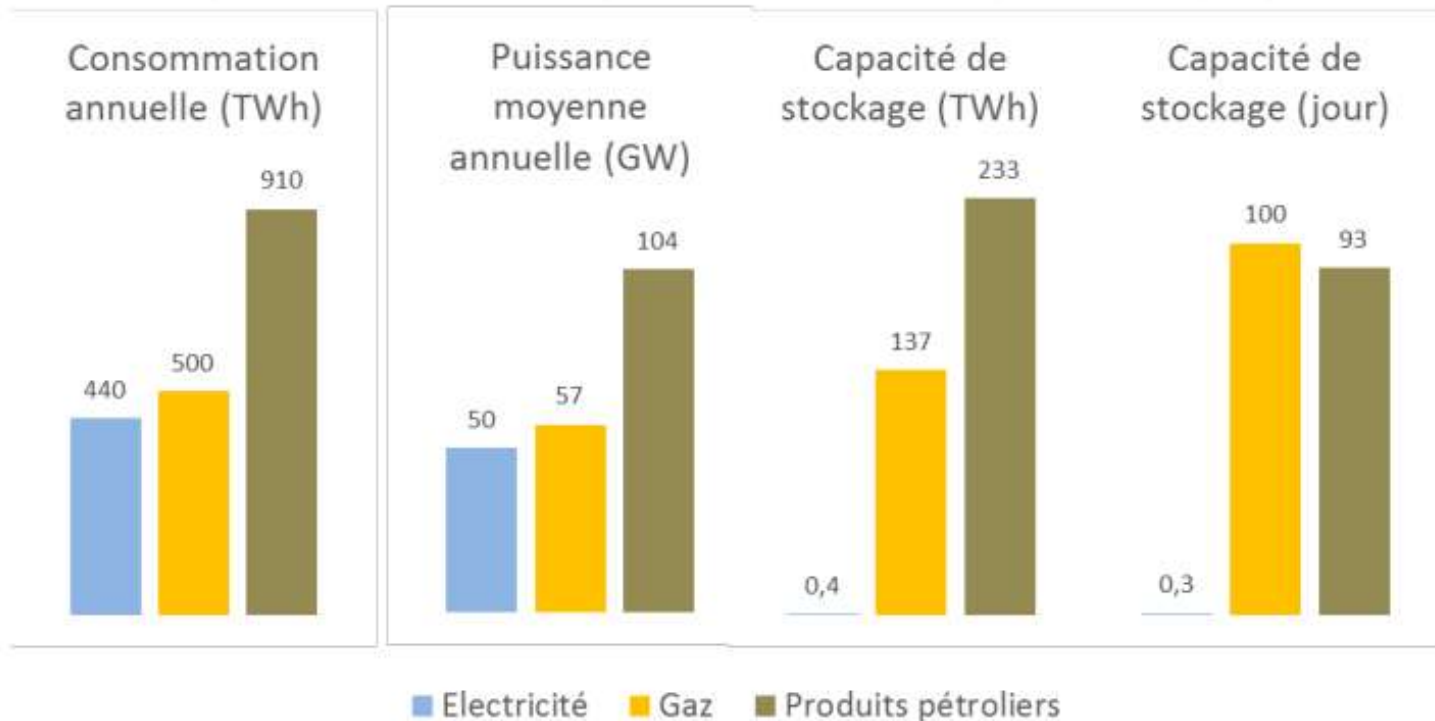


Vers 100% ENR...



Quels stockage par vecteur?

Figure 2 - Consommation énergétique et capacité de stockage en France (2012)



NB : la capacité de stockage en jours est estimée à puissance moyenne annuelle

Source : E&E consultant d'après (SOES, 2013), (DGEC, 2008), (DGEC, 2009), (DGEC, 2011)

Ce graphe est essentiel pour comprendre l'importance stratégique du stockage de gaz existant, situé notamment dans la ceinture parisienne. Il représente « environ » 350 fois l'énergie finale contenue dans les bar



de stockage (STEP) de l'EDF

Vers 100% ENR...



11)

Des questions ?

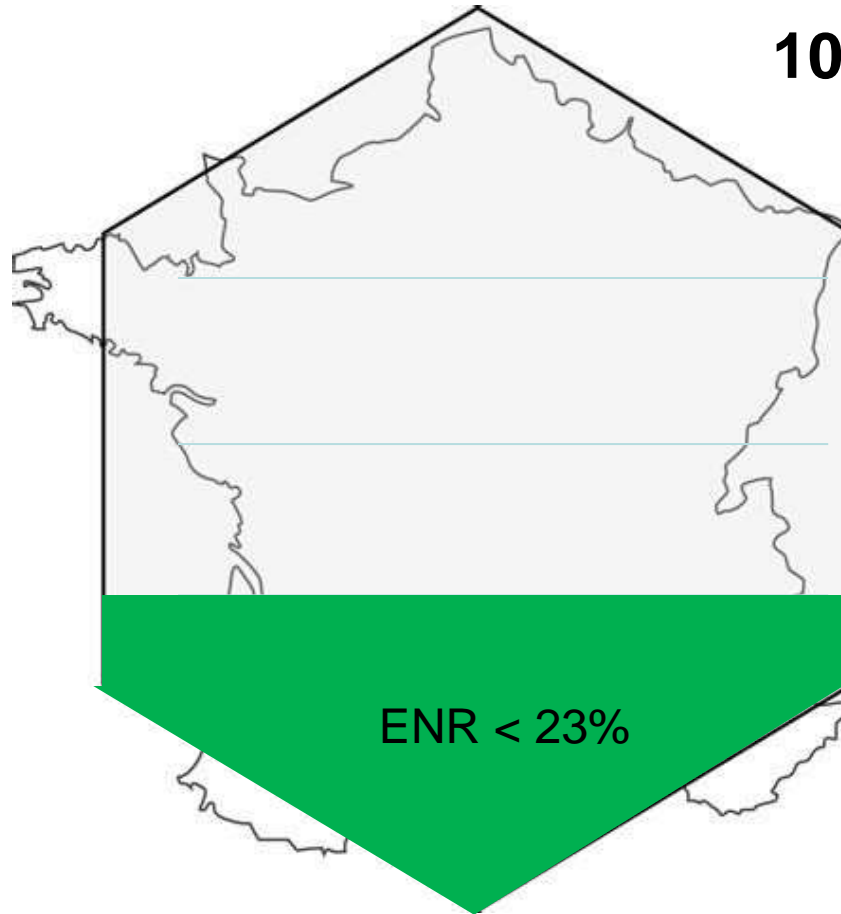


TD « Midnight Oil »:

Panneau solaire 100W,
batterie 6v-7.2Ah,
convertisseur 1500W 12V DC
230V AC, câbles et outils.
Objectif 450 TWh. Vous avez
4 heures.



<https://www.youtube.com/watch?v=ejorQVy3m8E>



Vers 100% ENR...

Plan de cours



La métaphore: La machine à vapeur fonctionne en continu grâce au **volant d'inertie** et au condenseur séparé ainsi que son **régulateur de vitesse** centrifuge. Cette inertie mécanique contrôlée est au cœur de fonctionnement régulier de la machine. Le **réseau électrique** a une problématique similaire : créer un équilibre dynamique à la frontière entre la demande et l'offre d'énergie.

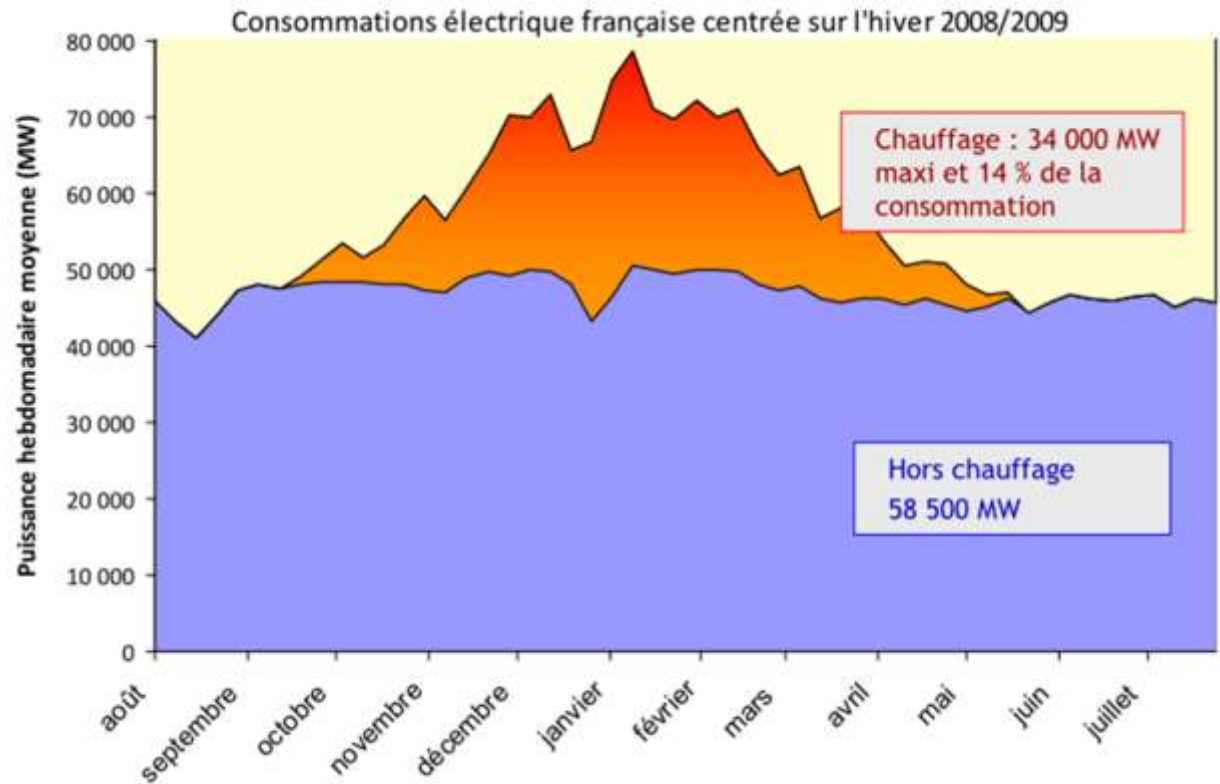
- ✓ 100% ENR?
- ✓ Le nouveau cadre décentralisé
- ✓ Un système centré sur l'hiver
- ✓ L'équilibre offre-demande
- ✓ Le système: la monotone, la défaillance, le brown-out, le black-out, le dispatcher
- ✓ La déclin de la centrale à vapeur
- ✓ La critique de la monotone en France
- ✓ Nouveaux outils pour les ressources variables



Chauffage électrique



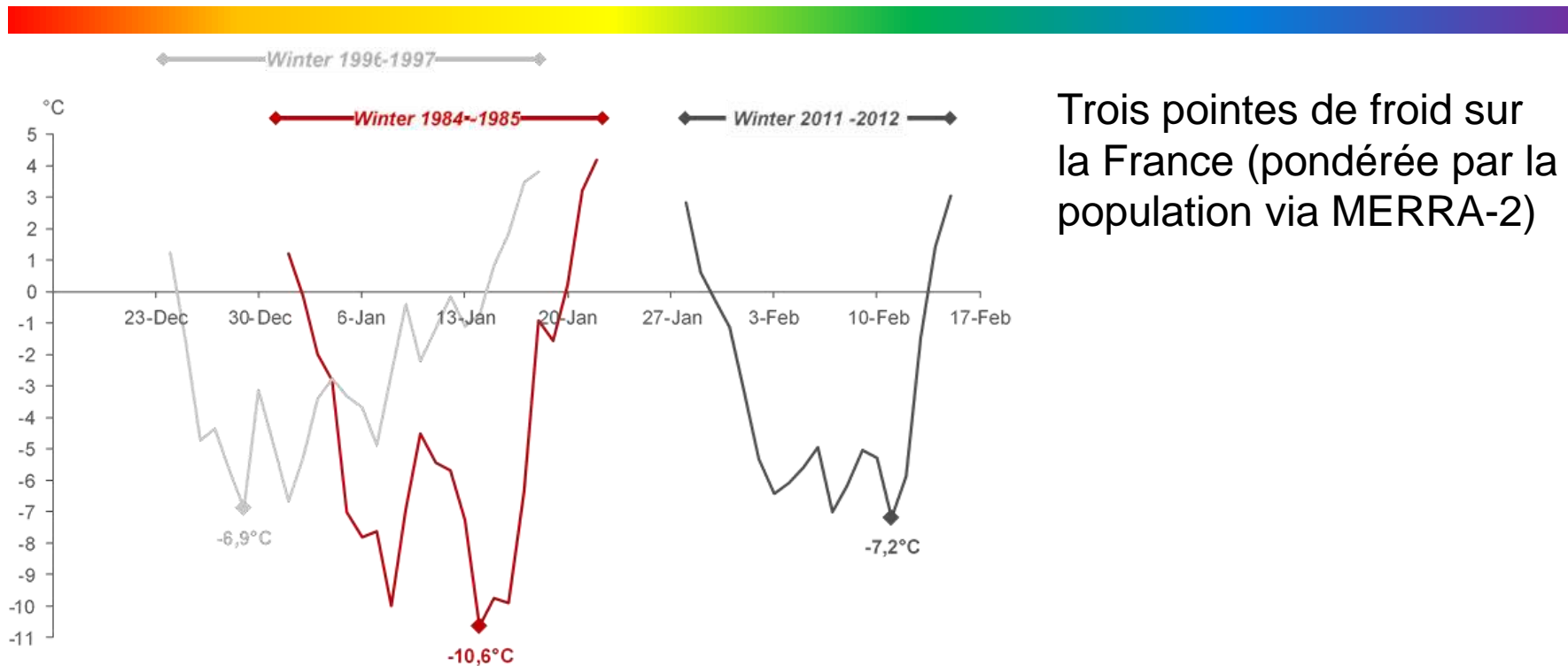
La séduction: Radiateur électrique à rayonnement 1000W Leopard vertical multicolore (Leroy Merlin, 799€)



En France, le chauffage électrique et les usages thermosensibles représentent jusqu'à **la moitié de la demande** de puissance hivernale. C'est l'aléa N°1



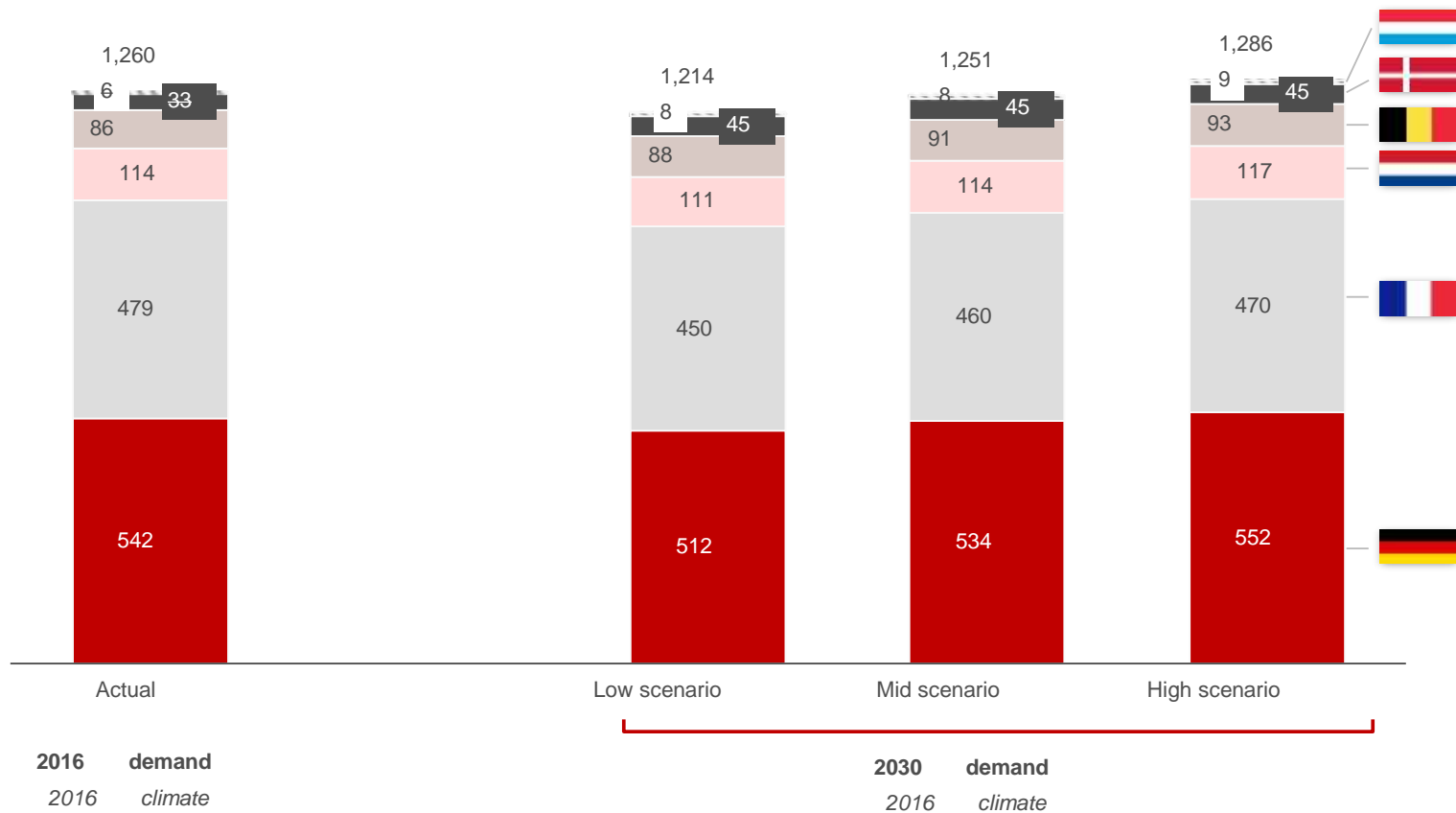
Le rapport EWI E-Cube



Le rapport EWI E-Cube étudie la thermo sensibilité des réseaux du Nord de l'Europe : « 2030 Peak Power Demand in North-West Europe », septembre 2020, EWI E-Cube pour Engie, par Abiven P. Blondel M Taoufik M. (E-Cube), Dr E. Künle, A. Lilienkamp, N. Namocke, J. Zinke (EWI)



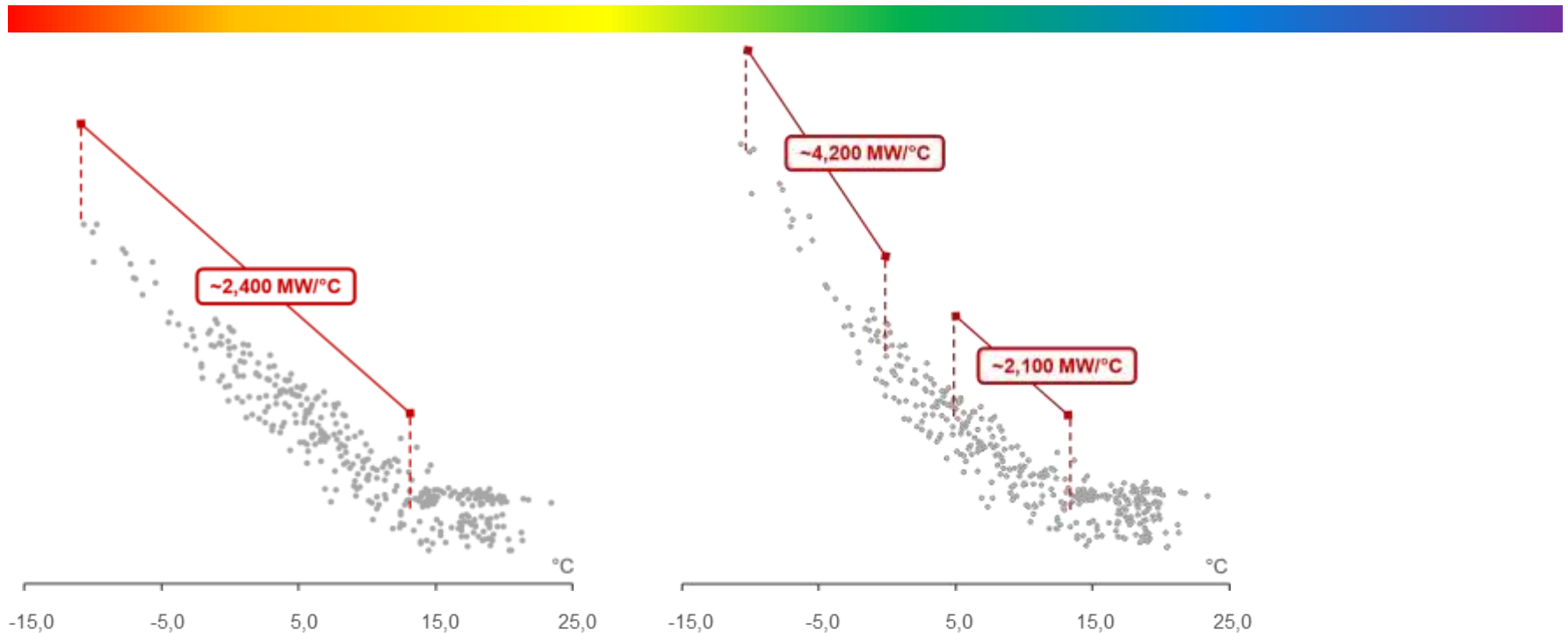
La consommation diminue



La consommation de six pays européens est projetée dans la zone centrale étudiée, pas d'explosion de l'énergie consommée dans les six pays étudiés



Le gradient de température

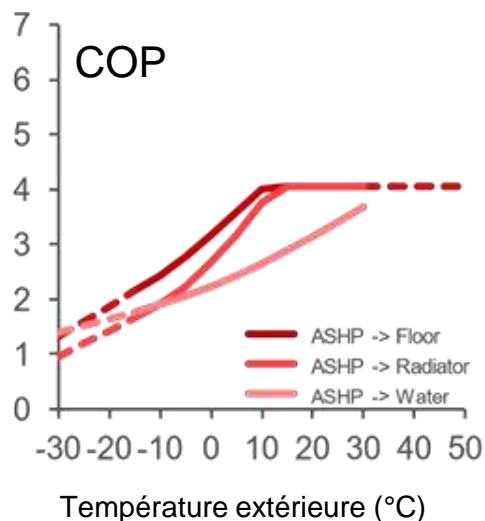


La sensibilité de la consommation à la température (le « gradient de température ») est de 2400 MW/°C de froid supplémentaire, mais passe à 4200 MW/°C pour les très grands froids en 2030 à cause de la part croissante des pompes à chaleur dont la performance s'effondre en conditions extrêmes (E-CUBE EWI 2020 avec MERRA-2)

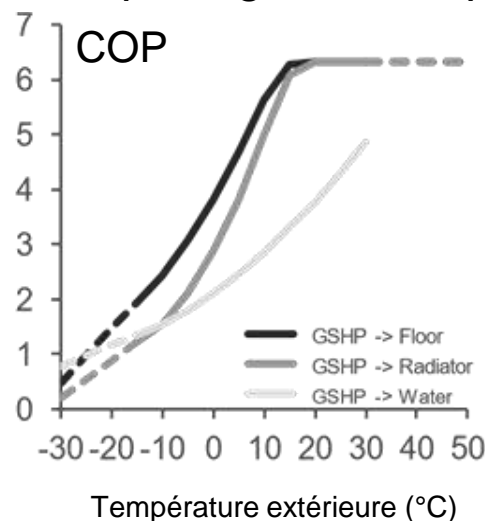


La pompe à chaleur n'aime pas le froid

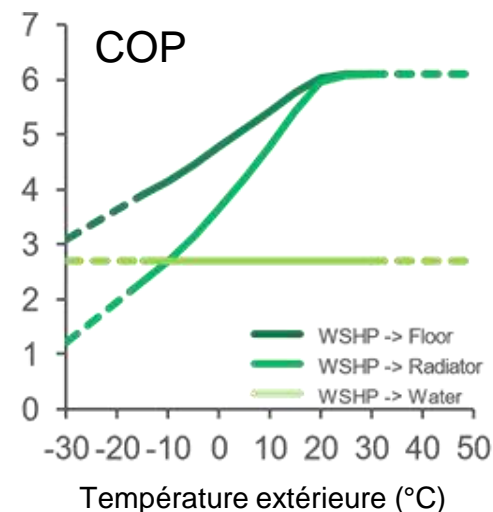
Source air



Source puits géothermique



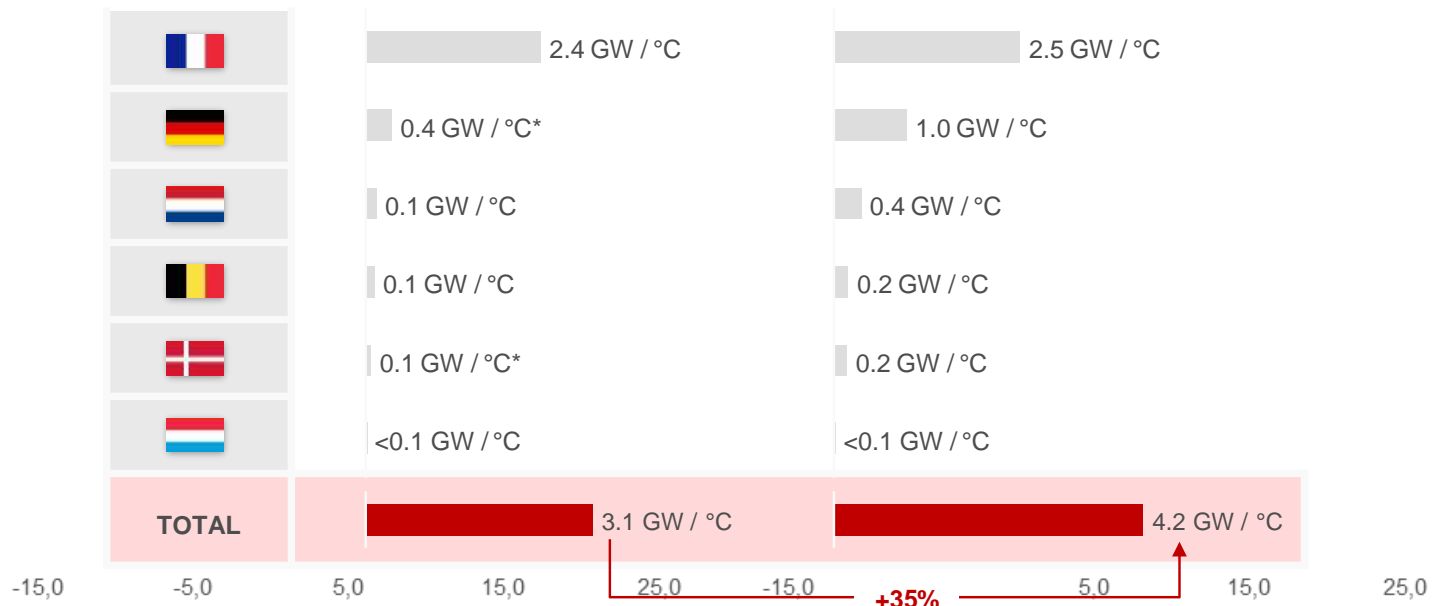
Source eau



La performance (mesurée par le COP) des pompes à chaleur domestiques se dégrade fortement pour les basses températures. Les gains obtenus par la pompe à chaleur s'annulent et s'inversent même. Les graphes tiennent compte de la température des émetteurs (chauffage basse température par le sol; radiateur; circuit d'eau) [étude when2heat citée par DEWI/E-Cube]



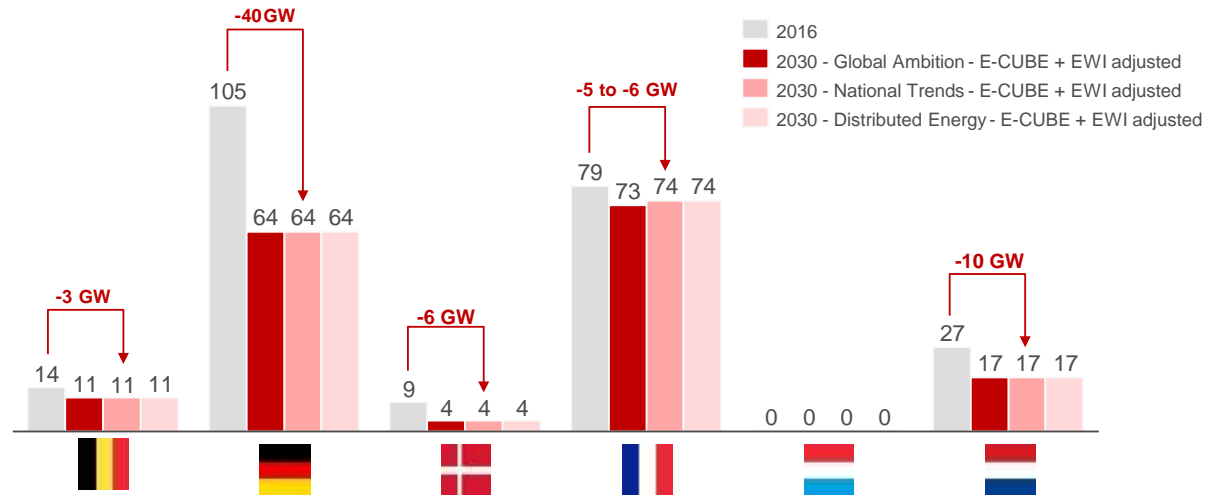
Gradient : La France écrase l'Europe



La sensibilité de la consommation à la température sur les pays centraux du réseau européen provient toujours d'une part française prépondérante du chauffage électrique, soit 2,5 GW/°C sur 4,2 °C (60% contre 77% actuellement) (E-CUBE EWI 2020 avec MERRA-2)



Mais la pointe diminue



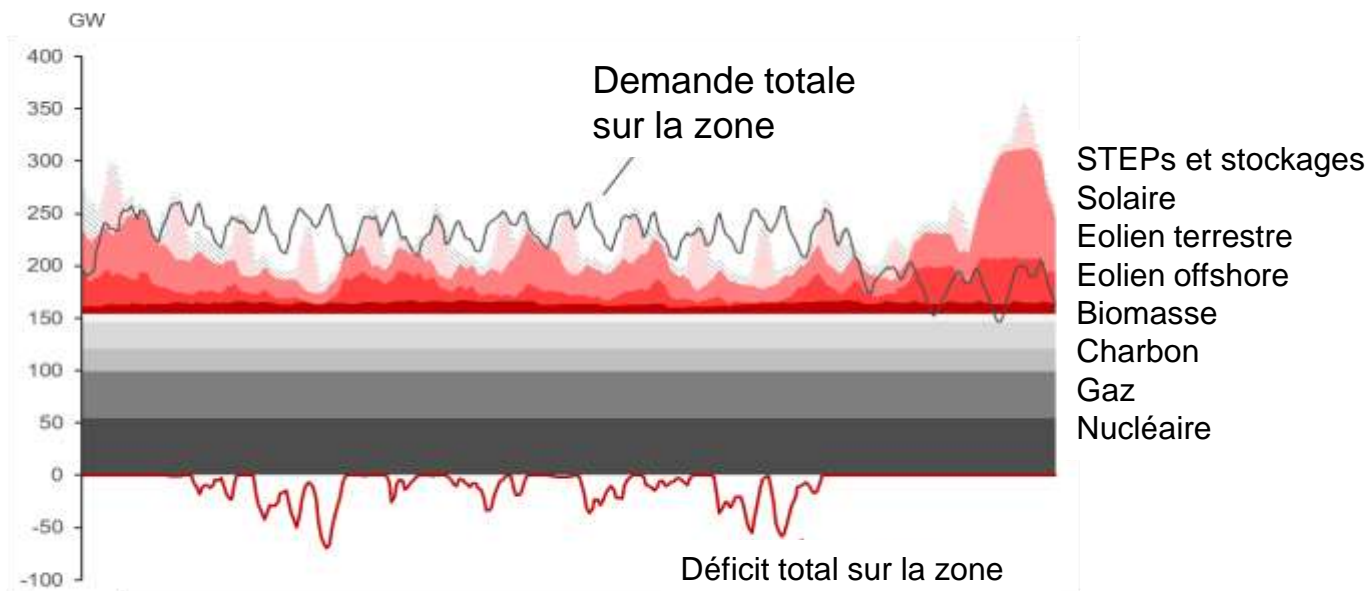
1) Includes: nuclear, gas, coal, oil, waste, biomass and other non-RES generation
 Source: ENTSO -E TP, TYNDP 2020, E-CUBE Strategy Consultants+EWI Analysis

La pointe de consommation baisse nettement en Allemagne et aux Pays-Bas et reste stable en France. Le gradient est surtout un signe d'instabilité de la consommation [qui demande de la réserve en puissance] et dans une moindre mesure d'énergie durant les périodes de pointe hivernale, les «montagnes de charge».



Le défi thermique + ENR

Combinaison extrême de demande par grand froid et de calme plat



Le grand défi du système 100% ENR est de faire fonctionner un système électrique thermosensible lors de périodes de froid intense et de moindre production d'éolien ou de solaire (rapport EWI E-Cube 2020) A noter que la première étude ADEME (visions 2030-2050) prévoit plutôt un écrasement du gradient à ces horizons, lié à l'amélioration du parc bâti.



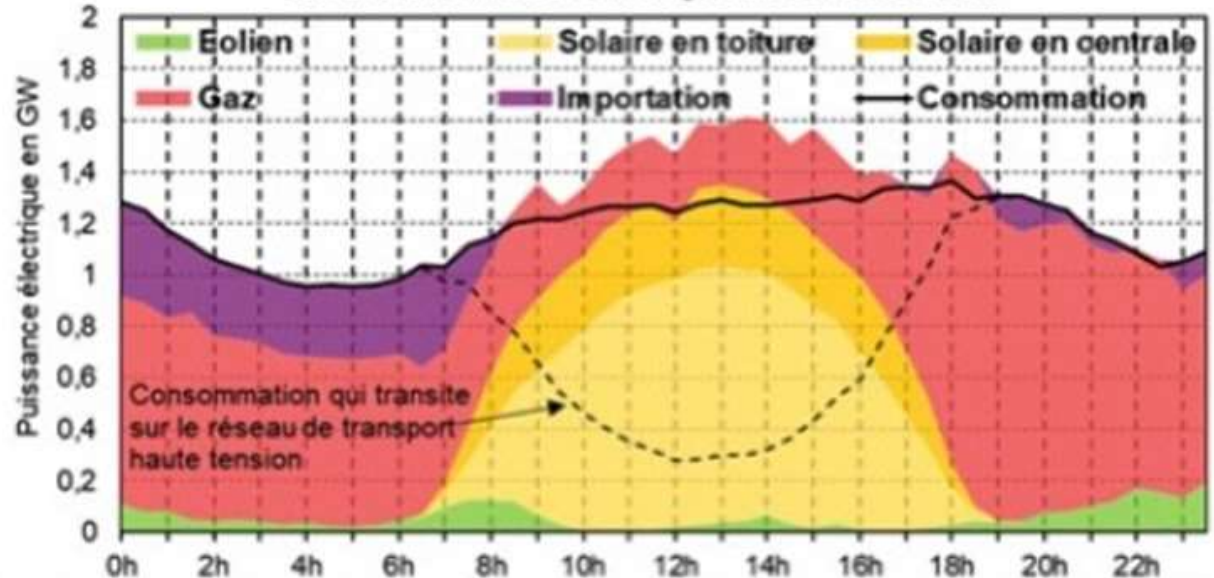
Pointe d'été



Coup de chaud. En Californie du Sud, la consommation est dominée par la climatisation d'été, qui détermine le dimensionnement des réseaux et des productions. Le solaire PV y est donc un moyen de pointe.

A noter que le courant éolien produit dès les années 90 à Tehachapi Valley bénéficiait d'une brise maritime en phase avec les pointes du matin et du soir en Californie du Nord... Illustration vidéo: Monterey Festival, Wild Thing, Jimmy Hendrix, 1967
<https://www.youtube.com/watch?v=E2aQ4gVsSL8>

Consommation et production électrique dans la région d'Australie Méridionale, le 11 octobre 2020



En Australie du Sud, la demande de pointe d'été à midi et compensée par la production solaire (d'après Réseau AEMO). Les toitures individuelles (jaune) et les centrales (orange) compensent la demande électrique. A Nice ou à Toulon c'est ce qui nous attend...



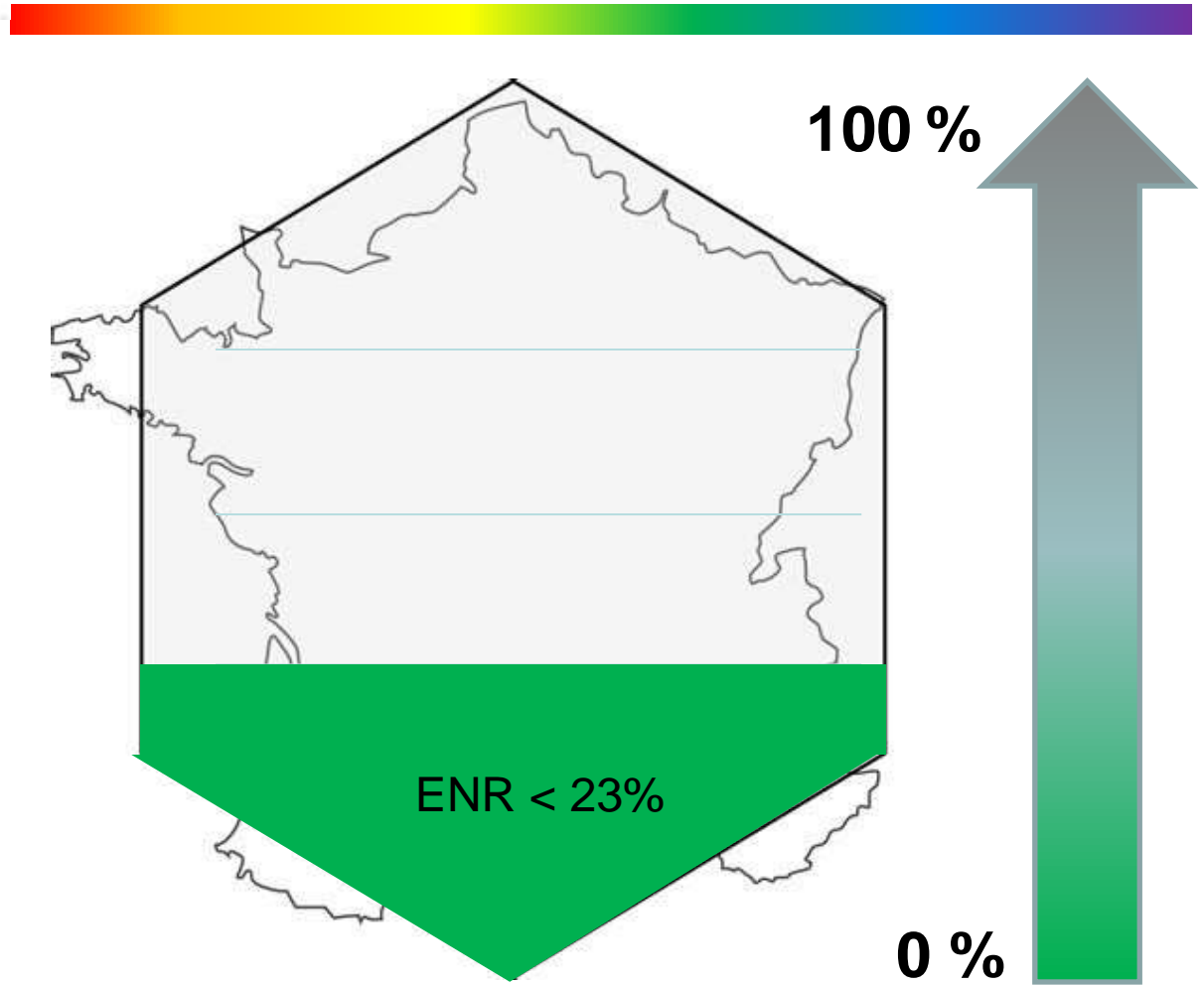
Des questions ?



Midnight Oil: Panneau solaire 100W, batterie 6v-7.2Ah, convertisseur 1500W 12V DC 230V AC, câbles et outils. Objectif 450 TWh. Vous avez 4 heures.



<https://www.youtube.com/watch?v=ejorQVv3m8E>



Vers 100% ENR...



Plan de cours



La métaphore: La machine à vapeur fonctionne en continu grâce au **volant d'inertie** et au condenseur séparé ainsi que son **régulateur de vitesse** centrifuge. Cette inertie mécanique contrôlée est au cœur de fonctionnement régulier de la machine. Le **réseau électrique** a une problématique similaire : créer un équilibre dynamique à la frontière entre la demande et l'offre d'énergie.

- ✓ 100% ENR?
- ✓ Le nouveau cadre décentralisé
- ✓ Un système centré sur l'hiver
- ✓ L'équilibre offre-demande
- ✓ Le système: la monotone, la défaillance, le brown-out, le black-out, le dispatcher
- ✓ La déclin de la centrale à vapeur
- ✓ La critique de la monotone en France
- ✓ Nouveaux outils pour les ressources variables



L'équilibre offre - demande



L'OFFRE

- ✓ les différents moyens de production en France
- ✓ les imports (production à l'étranger)

La fréquence de référence : 50Hz

LA DEMANDE

- ✓ la consommation France
- ✓ les exports (consommation à l'étranger)
- ✓ les pertes réseau

Production + Imports = Consommation + Exports + Pertes

L'équilibre fin du réseau repose sur la réserve tournante, c'est-à-dire les composants du réseau dont l'inertie ou le déclenchement très rapide participent à l'équilibre dynamique. Ces équilibres sont très codifiés au niveau européen (réserve primaire, secondaire, tertiaire...). En particulier le réseau doit pallier immédiatement au déclenchement de son plus important élément (Civaux 1-2 soit 3000 MW)



Vers 100% ENR...



Source : RTE

Enjeu temporel



La planification s'étale entre le très court terme (transitoires), le court terme (appels de puissance), le moyen terme (décisions d'engagement et de stockage) et le long terme (investissements nouveaux).



Vers 100% ENR...



Equilibre du réseau

Les moyens d'ajustements en réseau classique :

	<u>Long terme</u>	<u>Moyen terme</u>	<u>Court terme</u>
<u>Production</u>	+ Construction / mise hors service de centrales + Liaisons électriques	+ Planning des maintenances + Maintien de centrale « prête » à démarrer ou au minimum technique	+ Démarrer/arrêter centrales (en particulier centrales de pointe) + Modulation puissance des centrales en service
<u>Demande</u>	+ Prendre en compte nouveaux usages + Mise en œuvre de maîtrise de l'énergie	+ Signal prix (exemple tarif tempo ou jour/nuit) + Information aux consommateur	+ Délestage + Gestion « intelligente » de la demande + Baisse de la qualité : fréquence / voltage
<u>Stockage</u>			+ Station de turbinage et de pompage + Batterie, volant d'inertie, supercondensateur...





Michel de Nostredame, dit Nostradamus, mort le 2 juillet 1566 à Salon-de-Provence, est un apothicaire et auteur français. Pratiquant l'astrologie, il est surtout connu pour son ouvrage intitulé Les Prophéties.

Valeur des prévisions

L'adaptation du réseau c'est aussi :

- ✓ Des enchères ou des tarifs adaptés à l'état de l'art en matière de prévision météo
- ✓ Le lien avec les réponses et les productions locales (« smart-grid »)
- ✓ Une amélioration constante de la fiabilité des prévisions qui augmente la valeur de la ressource renouvelable et permet de la synchroniser avec la demande



Vers 100% ENR...



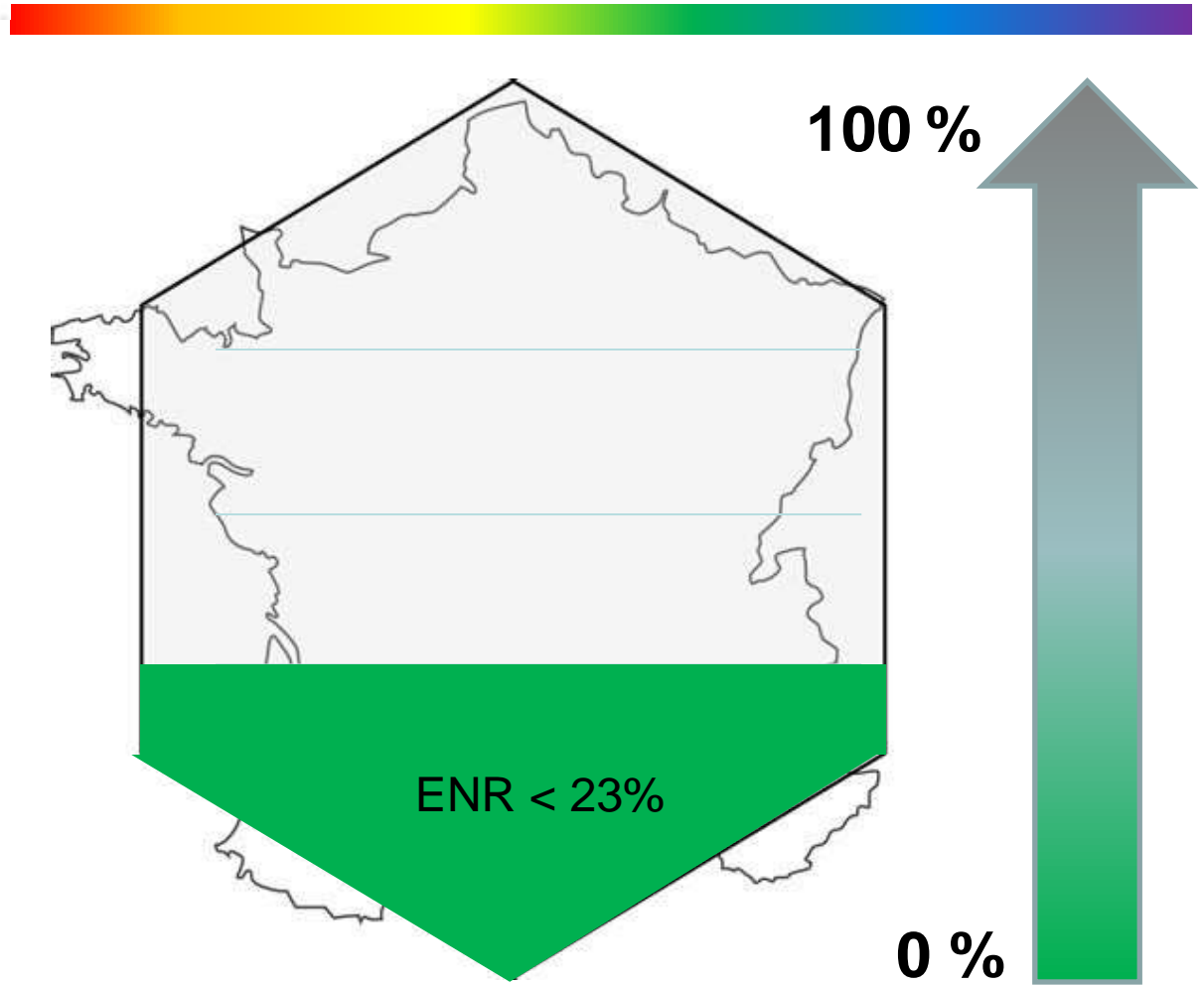
Des questions ?



Midnight Oil: Panneau solaire 100W, batterie 6v-7.2Ah, convertisseur 1500W 12V DC 230V AC, câbles et outils. Objectif 450 TWh. Vous avez 4 heures.



<https://www.youtube.com/watch?v=ejorQVy3m8E>



Vers 100% ENR...



Plan de cours



La métaphore: La machine à vapeur fonctionne en continu grâce au **volant d'inertie** et au condenseur séparé ainsi que son **régulateur de vitesse** centrifuge. Cette inertie mécanique contrôlée est au cœur de fonctionnement régulier de la machine. Le **réseau électrique** a une problématique similaire : créer un équilibre dynamique à la frontière entre la demande et l'offre d'énergie.

- ✓ 100% ENR?
- ✓ Le nouveau cadre décentralisé
- ✓ Un système centré sur l'hiver
- ✓ L'équilibre offre-demande
- ✓ Le système: la monotone, la défaillance, le brown-out, le black-out, le dispatcher
- ✓ La déclin de la centrale à vapeur
- ✓ La critique de la monotone en France
- ✓ Nouveaux outils pour les ressources variables



Notions de réseau et du système de production



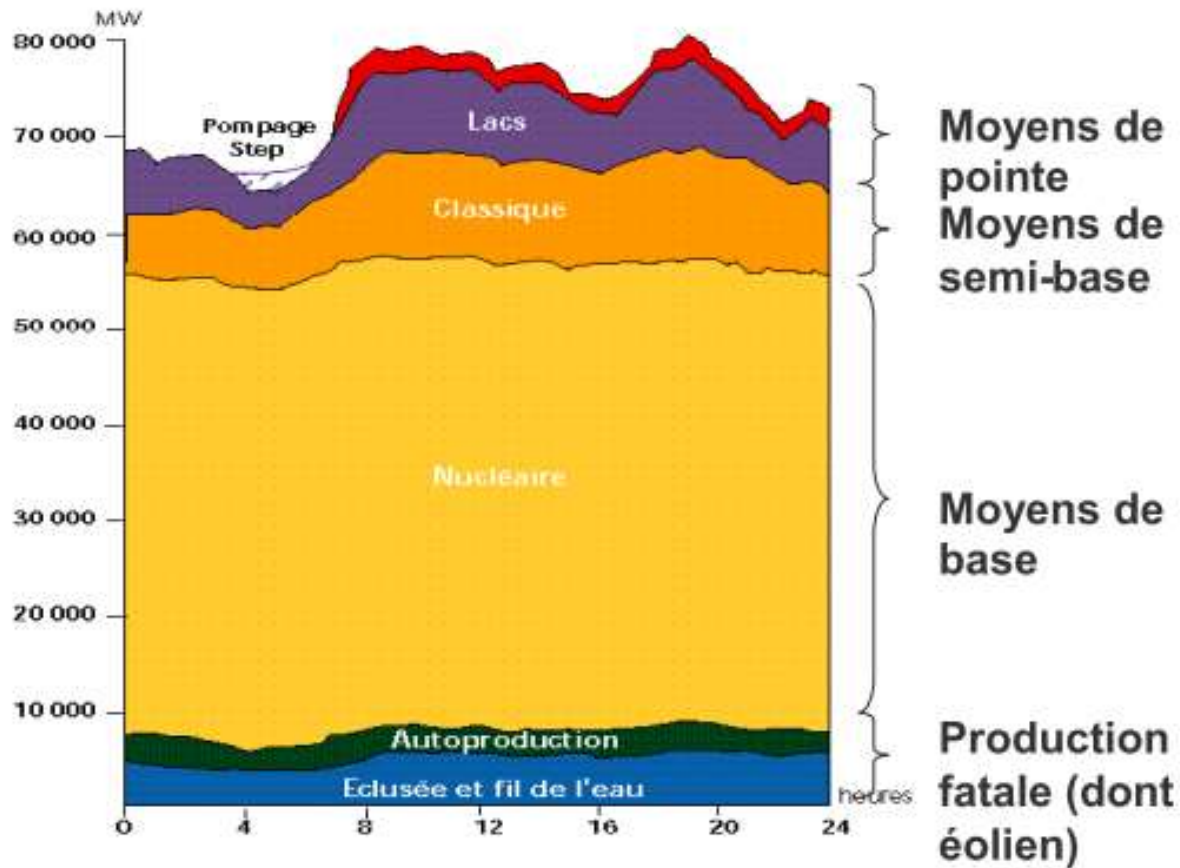
Non ce n'est pas un extrait du film «Le règne du feu» (Rob Bowman 2002). L'arbre à vent, ici chez L'Oreal à Chevilly-Larue (94) est une combinaison de micro-éoliennes dont l'espérance de production est faible.

- ✓ La monotone et la défaillance
- ✓ La panne fortuite et la maintenance
- ✓ Les ressources variables
- ✓ Les marchés et la gestion de la pointe
- ✓ Le centre de répartition (dispatch)



L'offre chronologique

Courbe de production : journée froide d'hiver



Vers 100% ENR...

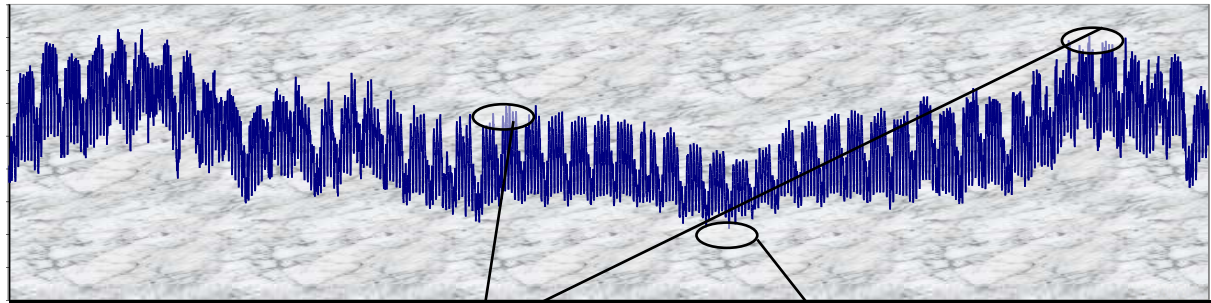


Source : RTE

Courbe de consommation et monotone de charge



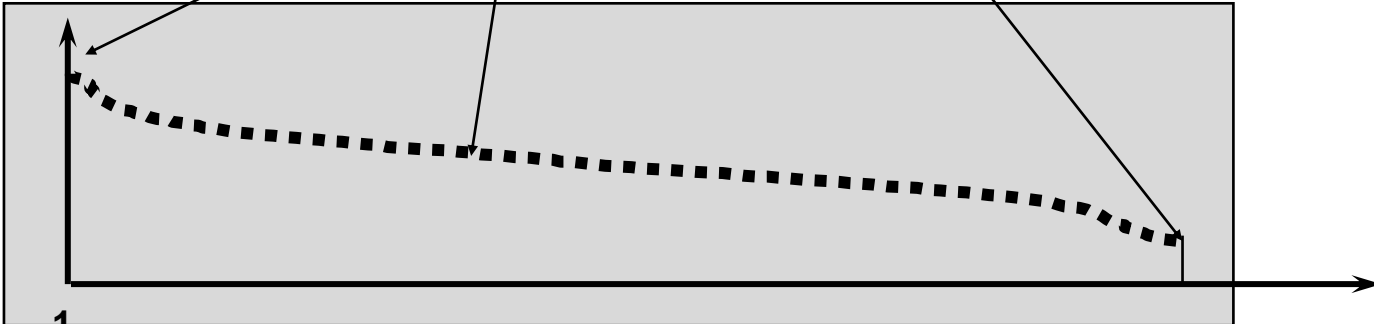
GW



1

8760 heures chronologiques

GW



1

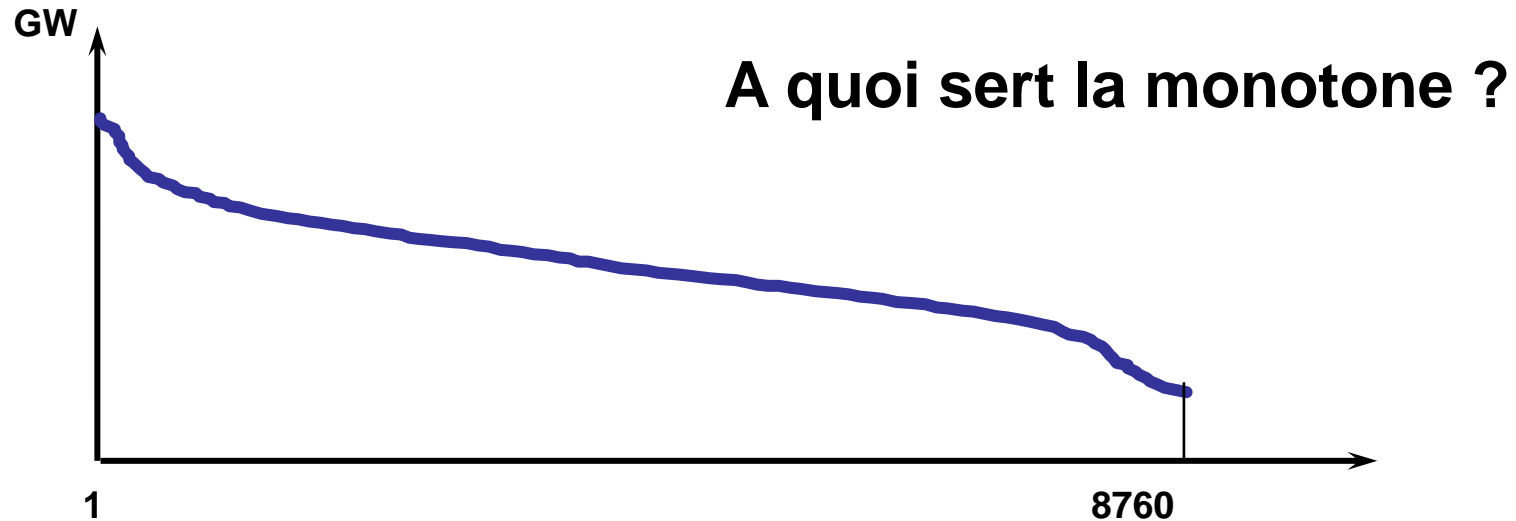
8760 points discrets

Les demandes annuelles (chronologiques) sont classées par ordre de taille (monotone)

Source : INESTENE



Notion réseaux électriques



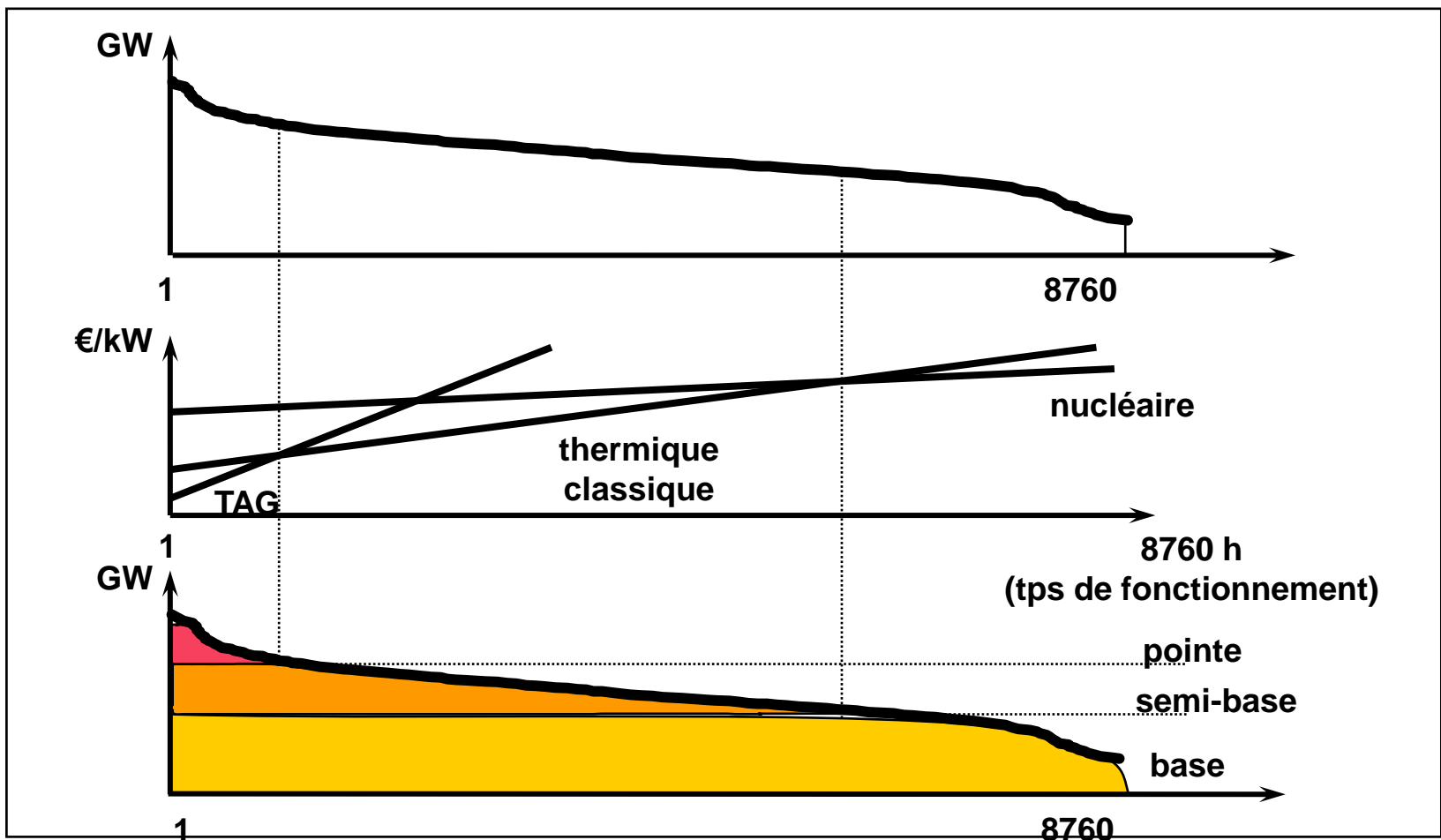
Elle a été longtemps l'élément indispensable pour planifier le parc de production à moindres coûts. Elle reste intéressante pour comprendre la répartition des ressources en fonction de leur coût.



Vers 100% ENR...



Les ressources se placent par coût croissant



Les ressources « classiques » sont représentées par une droite affine avec un coût fixe annuel (départ) et un coût variable (pente de la courbe).



Vers 100% ENR...



Les variables aléatoires



- ✓ Pannes (= fortuites) et Maintenance (= planifiée) des centrales
- ✓ La probabilité de pannes multiples dépend de la distribution des ressources et du système considéré.
- ✓ Le besoin de réserve immédiate (= « tournante ») va dépendre de la panne $n/n-1$ et donc du plus gros maillon du réseau. En France c'est la centrale de Civaux (>3200 MW)
- ✓ Le réseau doit toujours avoir des options pour répondre à différents cas d'aléas
- ✓ D'autres pannes proviennent du réseau électrique externe



Vers 100% ENR...



La défaillance

- ✓ C'est la probabilité de ne pas remplir la monnaie (« LOLP » pour loss-of-load probability). Elle est mesurée en pourcentage (%)
- ✓ Elle vient d'une combinaison de disponibilités défavorables et de pannes combinées.
- ✓ L'état de l'art suggère de ne pas dépasser « une journée par dix ans »
- ✓ Elle est liée à une autre notion, l'énergie non livrée (« ENS » en MWh)
- ✓ Le coût acceptable de la défaillance est lié à l'acceptation à payer du client, et renvoie au contrat et au tarif.



La défaillance est une probabilité de ne pas fonctionner, c'est un processus dynamique, pas un état comme la panne (ci-dessus)



Black-out, brown out

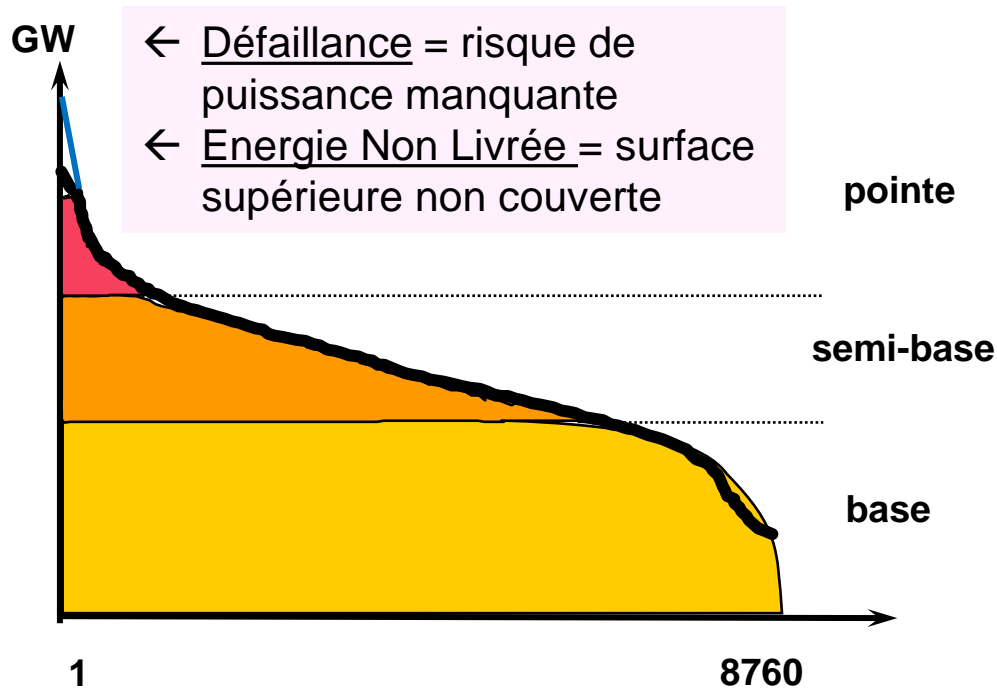


Centrales thermiques dans le jeu « Sim City ». La simulation du « Brown-Out » y est bien rendue en cas de déficit de constructions de nouvelles centrales, qui handicape le reste de l'économie. Jusqu'à récemment en Inde l'énergie non-livrée pouvait atteindre 30% chez des particuliers.

- ✓ Le black-out c'est la panne en cascade, en général issue d'un incident du réseau : branches d'arbres, centrale thermique...
- ✓ Le brown-out c'est le manque de centrales qui oblige le répartiteur à des coupures.
- ✓ En Europe, les coupures proviennent essentiellement du réseau de distribution



La « défaillance » n'est pas un échec



Analogies commerciales:
Le **loueur de voiture** durant les périodes de vacances va tout faire pour satisfaire ses clients réguliers... et va rejeter les autres
L'éditeur de journaux doit à l'inverse avoir un « bouillon », des invendus restants en kiosque qui coûtent moins que des ventes manquées.

La défaillance n'est pas un « échec » de l'opérateur, juste une grandeur économique calculée. Au dessus d'un certain coût il vaut mieux indemniser le client, ou juste ne pas livrer. Ceci sera aussi en lien avec la capacité de l'électricien de facturer le tarif qu'il veut. Dans l'exemple texan d'une vague de froid, certains clients sont mis en faillite par leur facture d'électricité... au régulateur de poser les limites du marché.



Marchés et moyens de pointe



La turbine aéro-dérivée (ici une Siemens 44 MW) est issue des recherches aéronautiques et militaires (>45% de rendement). Elle a révolutionné la production de pointe et reste la référence de comparaison avec toute alternative

- ✓ Les déboires du système EJP-Tempo (cours 9) suggèrent que la tarification est efficace pour moduler la demande quotidienne ou hebdomadaire mais pas les variations annuelles
- ✓ Les coûts de l'énergie lors de la pointe annuelle ne justifient jamais à eux seuls un investissement privé (la réserve non plus). Une intervention régulée est nécessaire
- ✓ Des systèmes d'enchères sur le court ou le moyen terme, à échelle plus ou moins large, sont nécessaires et plus efficaces que des systèmes unilatéraux. Mais ils comportent des risques (obsolescence, subventions implicite aux émissions...).



Le sélectionneur



Centre de surveillance et de répartition des énergies (« dispatch »), Hydro-Québec

- ✓ Le « **Merit Order** » en principe, c'est l'énergie de moindre **coût marginal** déterminé par le centre d'énergie (« **dispatcher** »).
- ✓ Sur un marché, c'est l'offre la moins chère d'un producteur indépendant à échéance fixe (souvent 24h).
- ✓ Le répartiteur va aussi allouer des ressources pour les écarts entre la prévision et la réalité proche



Vers 100% ENR...



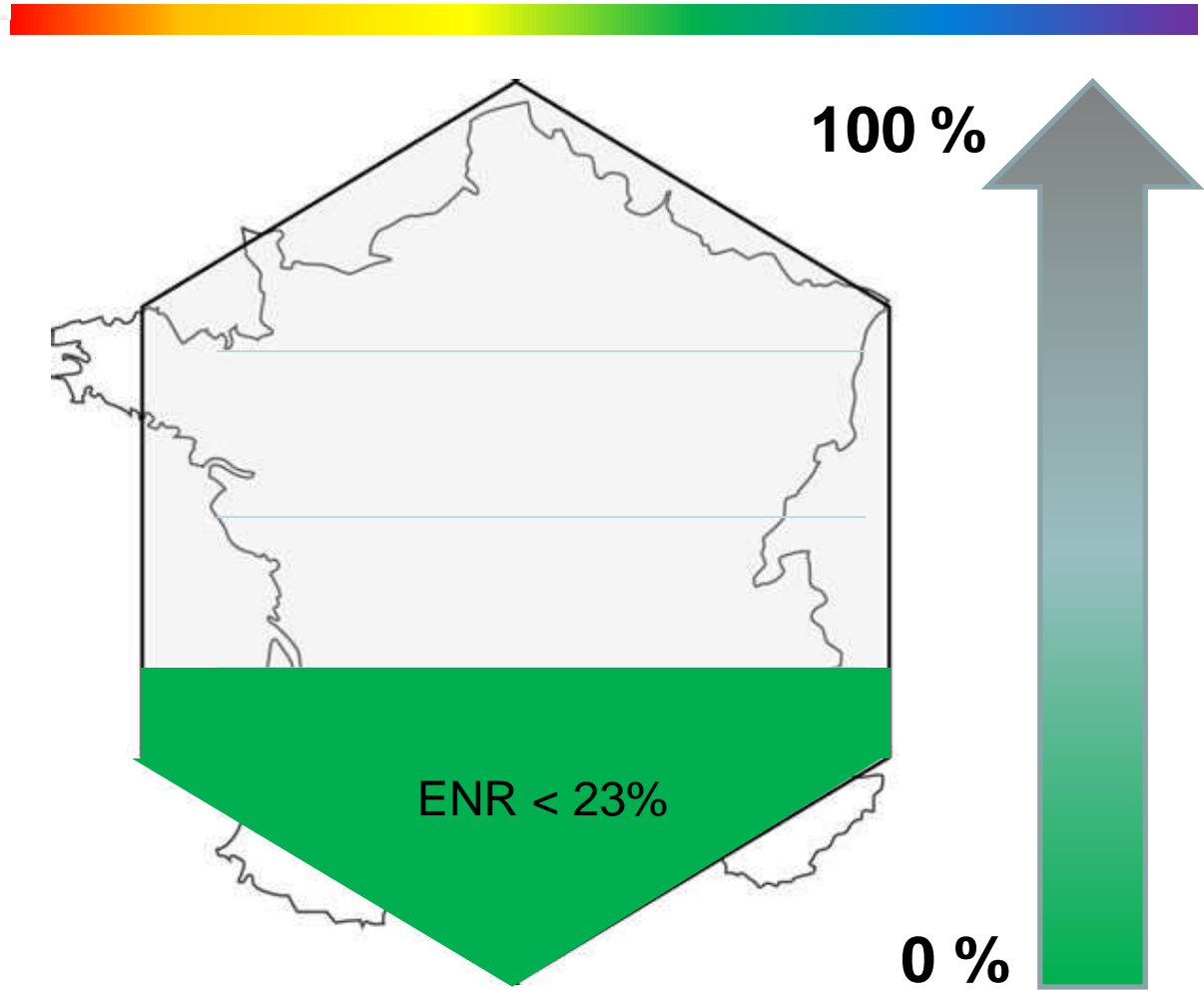
Des questions ?



Midnight Oil: Panneau solaire 100W, batterie 6v-7.2Ah, convertisseur 1500W 12V DC 230V AC, câbles et outils. Objectif 450 TWh. Vous avez 4 heures.



<https://www.youtube.com/watch?v=ejorQVy3m8E>



Vers 100% ENR...



Plan de cours



La métaphore: La machine à vapeur fonctionne en continu grâce au **volant d'inertie** et au condenseur séparé ainsi que son **régulateur de vitesse** centrifuge. Cette inertie mécanique contrôlée est au cœur de fonctionnement régulier de la machine. Le **réseau électrique** a une problématique similaire : créer un équilibre dynamique à la frontière entre la demande et l'offre d'énergie.

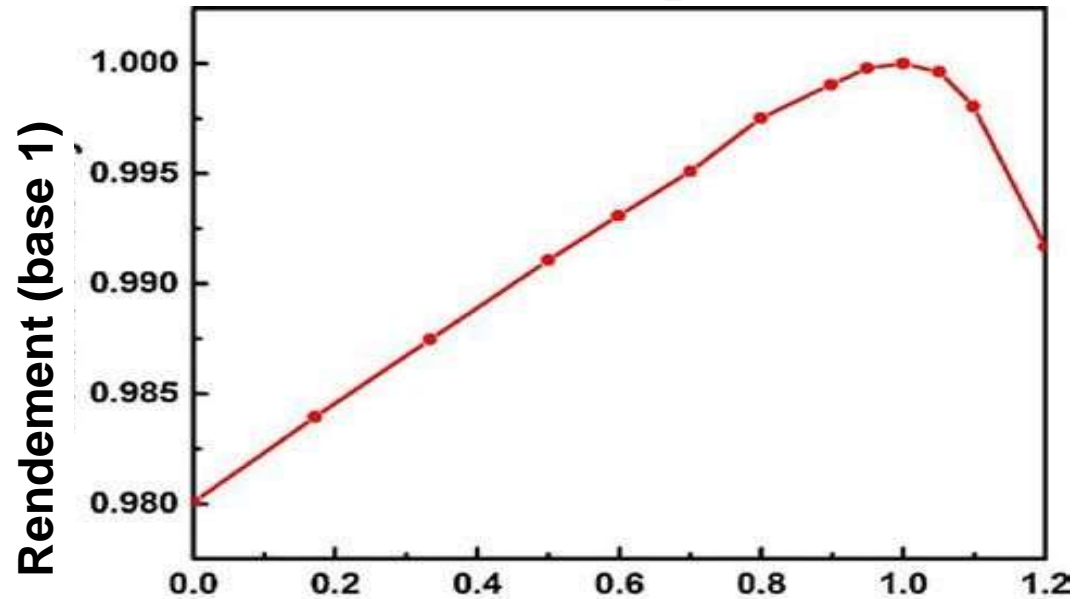
- ✓ 100% ENR?
- ✓ Le nouveau cadre décentralisé
- ✓ Un système centré sur l'hiver
- ✓ L'équilibre offre-demande
- ✓ Le système: la monotone, la défaillance, le brown-out, le black-out, le dispatcher
- ✓ La déclin de la centrale à vapeur
- ✓ La critique de la monotone en France
- ✓ Nouveaux outils pour les ressources variables



La centrale à vapeur



Centrale vapeur Calor Express Power. Rien à voir avec ce qui suit.



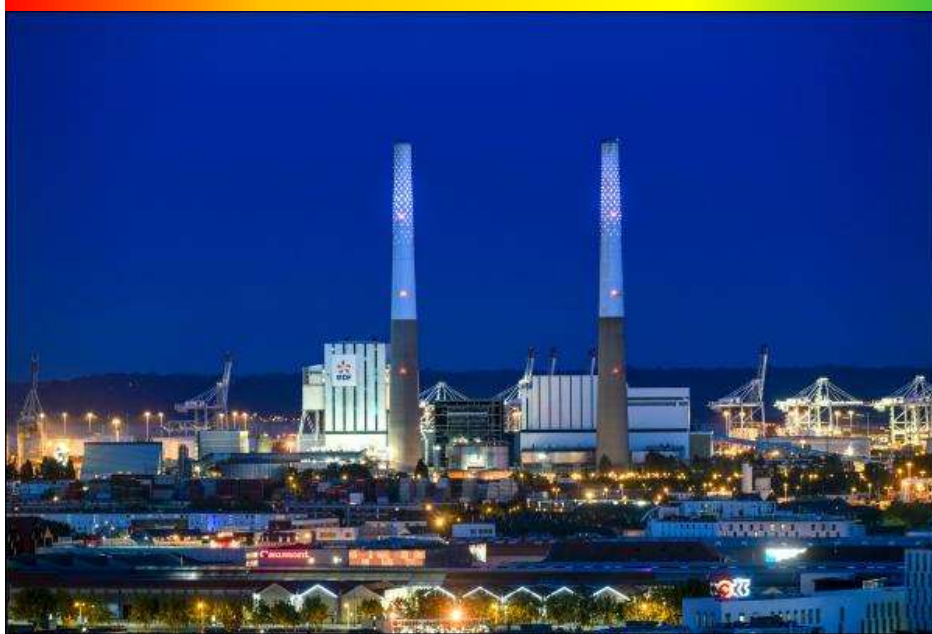
Masse de vapeur consommée (base 1)

La centrale à vapeur a des atouts très importants dans le réseau, notamment son rendement très constant dans sa plage de fonctionnement, et aussi son inertie qui en fait la réserve par excellence.

Mais ces centrales sont en crise (voir cours N°6) depuis les années 70, grignotées par la turbine à gaz et par les énergies renouvelables. Le nucléaire français « modulable » a été équipé pour obtenir certaines de ces propriétés.



Centrale à vapeur (démarrage lent)



Centrale charbon du Havre (600 MW) [document EDF]. La centrale à vapeur est lente à démarrer, mais elle a beaucoup d'inertie (réserve) et a une large zone de fonctionnement modulé à rendement constant. C'est l'outil traditionnel de la réserve tournante.

- ✓ Ces centrales ont des caractéristiques communes :
- ✓ Un minimum de fonctionnement élevé (ici 270 MW sur 600 MW)
- ✓ Un temps de chauffe élevé avant couplage électrique (11h à froid !)
- ✓ Pour le nucléaire la proportion est par exemple de 20% (par exemple 260 MW mini pour 1330 MW de Puissance Continue Nette dans le palier P4/P'4 (20 unités) mais les montées en charge sont plus lentes qu'avec le charbon





Lord Kitchener vous propose de vous engager dans l'armée anglaise...

Engagement

- ✓ L'engagement des tranches vapeur (« **unit commitment** ») est une fonction essentielle du répartiteur d'énergie. Il doit mettre en service les centrales à démarrage lent nécessaires, juste celles nécessaires. Cela suppose que le Centre Répartiteur lance à l'avance la tranche en fonction de la météo et de la demande prévue.
- ✓ Ce problème classique donnait lieu à des avancées algorithmiques pour minimiser les coûts. C'est moins le cas désormais, car le charbon ou le gaz sont de moins en moins la ressource la moins chère.
- ✓ Pour le répartiteur, la question la plus épineuse deviendra de plus en plus la gestion fine du stockage-déstockage ou de la modulation des demandes, qui demandent des paris en projection sur plusieurs semaines.



Vers 100% ENR...



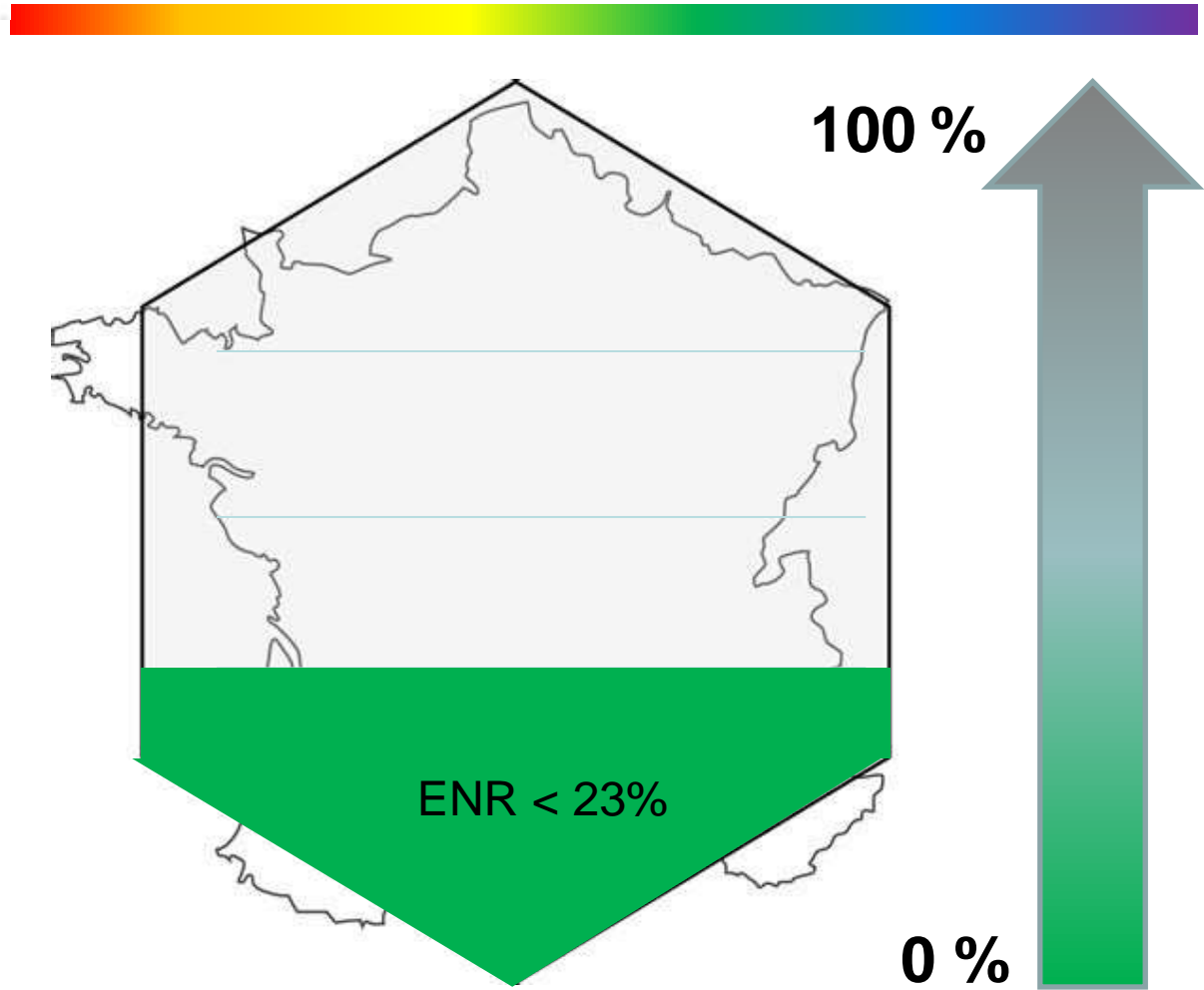
Des questions ?



Midnight Oil: Panneau solaire 100W, batterie 6v-7.2Ah, convertisseur 1500W 12V DC 230V AC, câbles et outils. Objectif 450 TWh. Vous avez 4 heures.



<https://www.youtube.com/watch?v=ejorQVy3m8E>



Vers 100% ENR...



Plan de cours



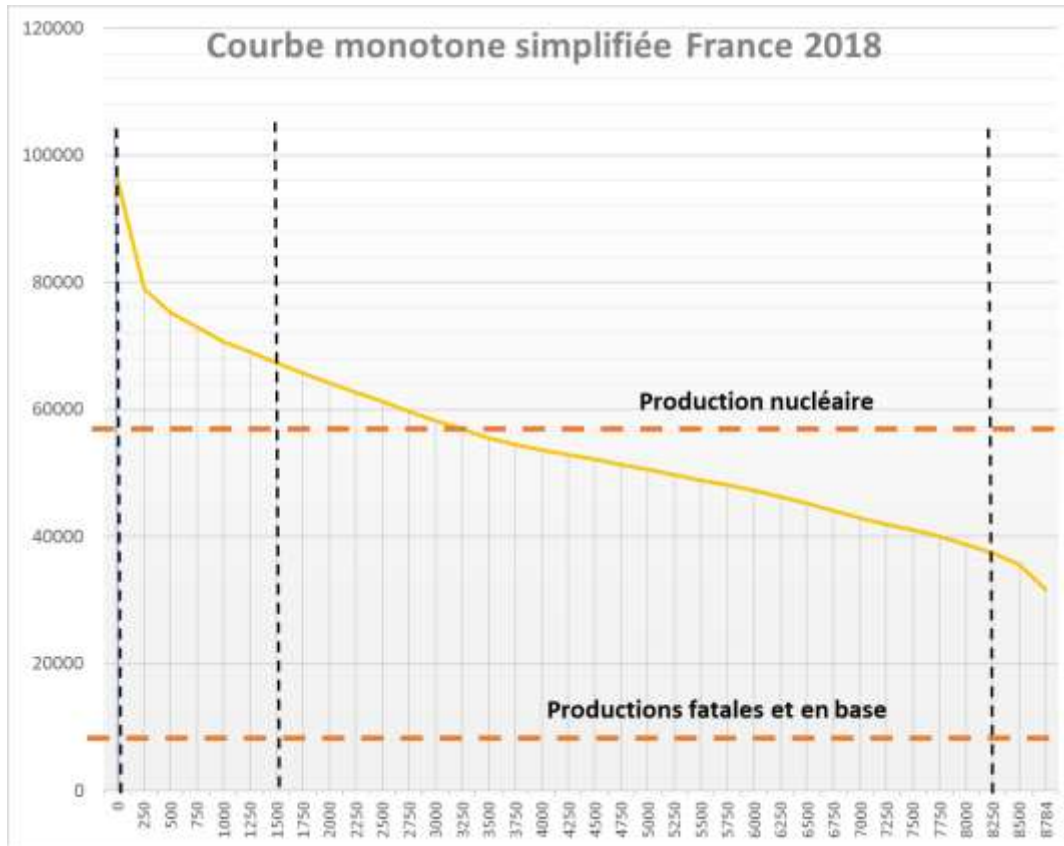
La métaphore: La machine à vapeur fonctionne en continu grâce au **volant d'inertie** et au condenseur séparé ainsi que son **régulateur de vitesse** centrifuge. Cette inertie mécanique contrôlée est au cœur de fonctionnement régulier de la machine. Le **réseau électrique** a une problématique similaire : créer un équilibre dynamique à la frontière entre la demande et l'offre d'énergie.

- ✓ 100% ENR?
- ✓ Le nouveau cadre décentralisé
- ✓ Un système centré sur l'hiver
- ✓ L'équilibre offre-demande
- ✓ Le système: la monotone, la défaillance, le brown-out, le black-out, le dispatcher
- ✓ La déclin de la centrale à vapeur
- ✓ La critique de la monotone en France
- ✓ Nouveaux outils pour les ressources variables



Demande France 2018

Où placer les ressources sur la monotone ?



L'**hydraulique** est scindée en deux parties: fatale en base et réservoirs en pointe. La modélisation va aussi désagréger les périodes (semaine, mois)...

← Hydraulique de réservoirs et STEPS

← Le nucléaire est pour moitié en semi-base (depuis 25 ans)

← Hydraulique fluviale, éolien et solaire

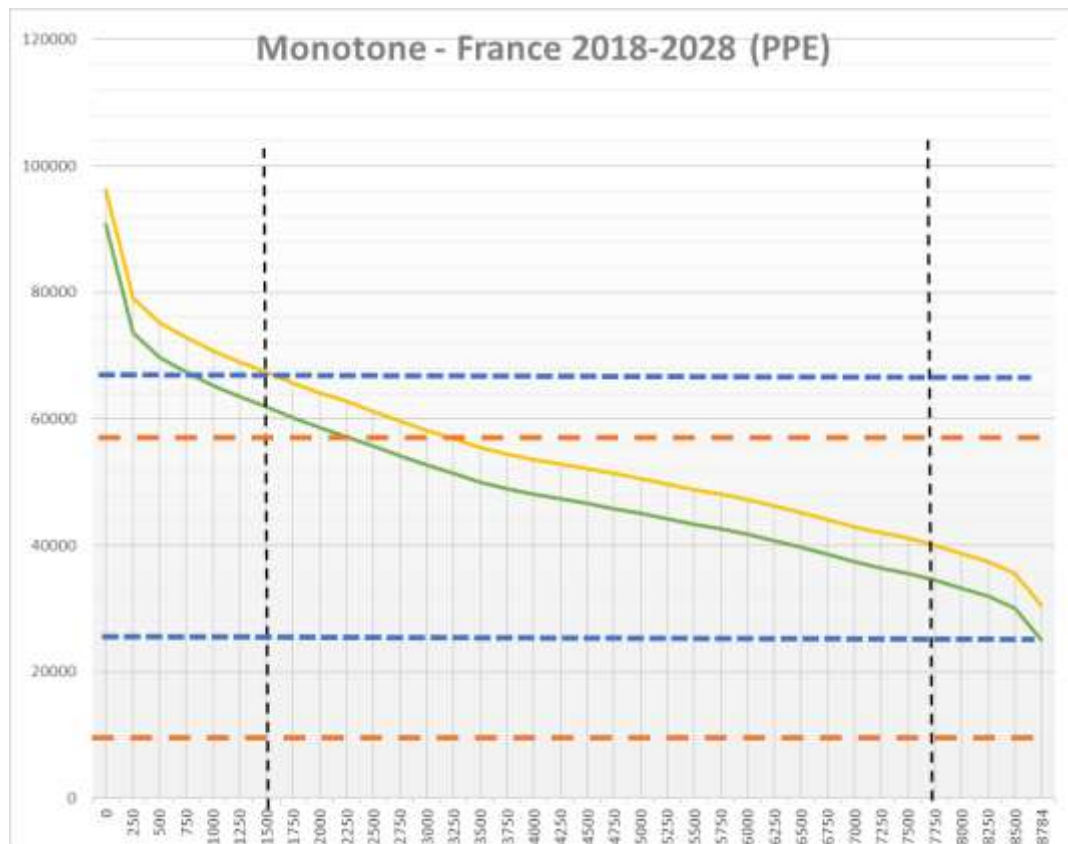


Vers 100% ENR...



Demande France 2018-2028

La projection PPE à 2028

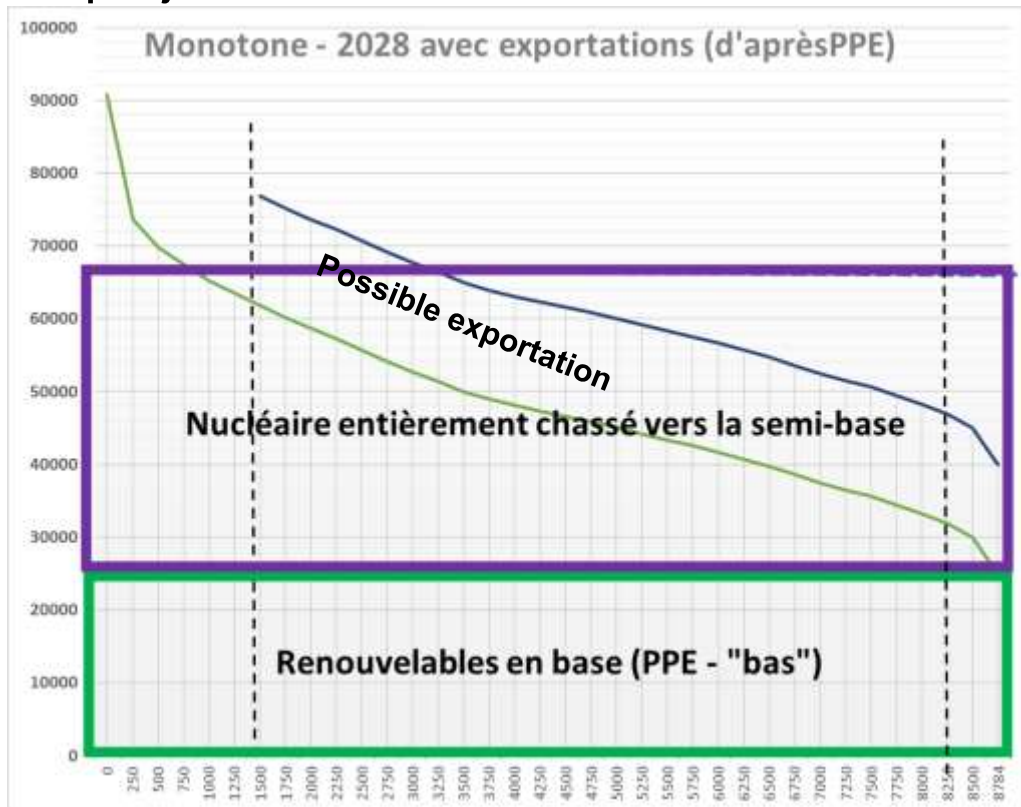


La demande en 2028 est assez similaire à celle de 2018, en faible diminution. Par contre la production nucléaire est repoussée vers le haut de la courbe par les productions fatales (éolien, solaire) en croissance (ici scénario « faible » des ENR)



Demande France 2018-2028

La projection PPE à 2028



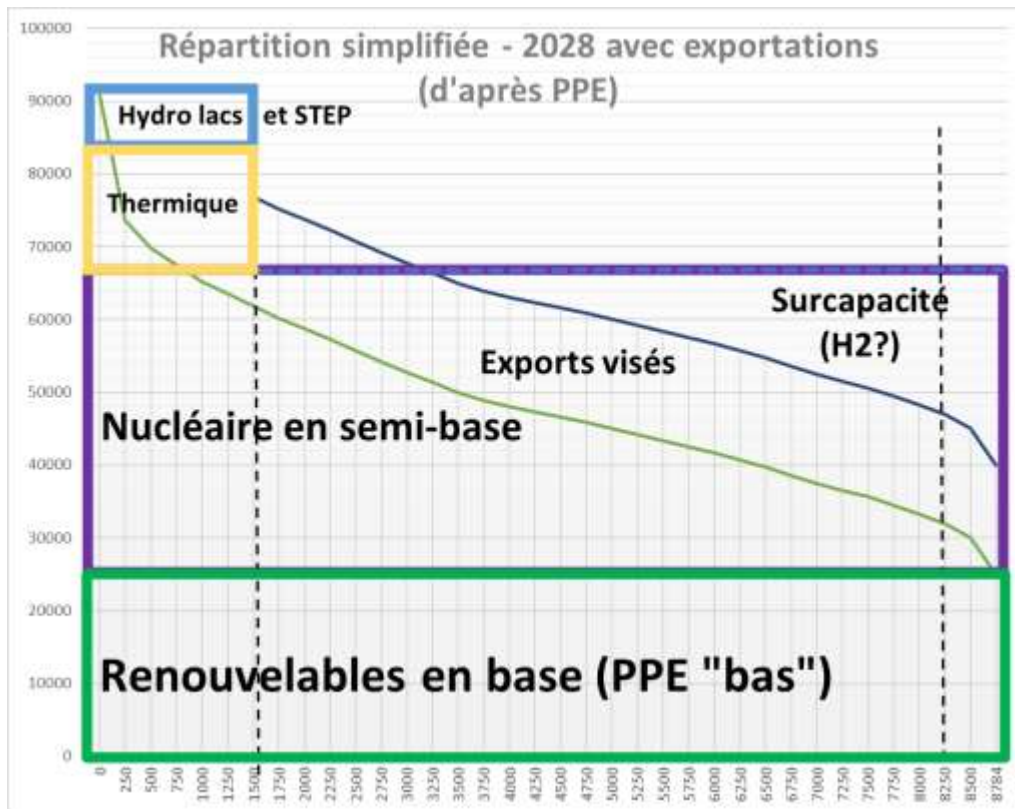
L'exportation, représentée en noir, est plafonnée d'une part par la capacité des lignes, mais aussi par la période de l'année : équilibre import-export en période de pointe à gauche, faible demande à droite.

Le passage suggéré à plus de 100 TWh/an d'exportations, contre 70 TWh/an au maximum historique (et 40 actuellement) semble compromis.



La monotone est dépassée en pointe

La projection PPE à 2028



La monotone et les modélisations qui exploitaient ses propriétés est clairement dépassée pour décrire la période de pointe. D'autres outils sont maintenant disponibles. La monotone, très graphique, nous permet encore de comprendre et d'échanger sur la position économique des ressources en production et côté demande.

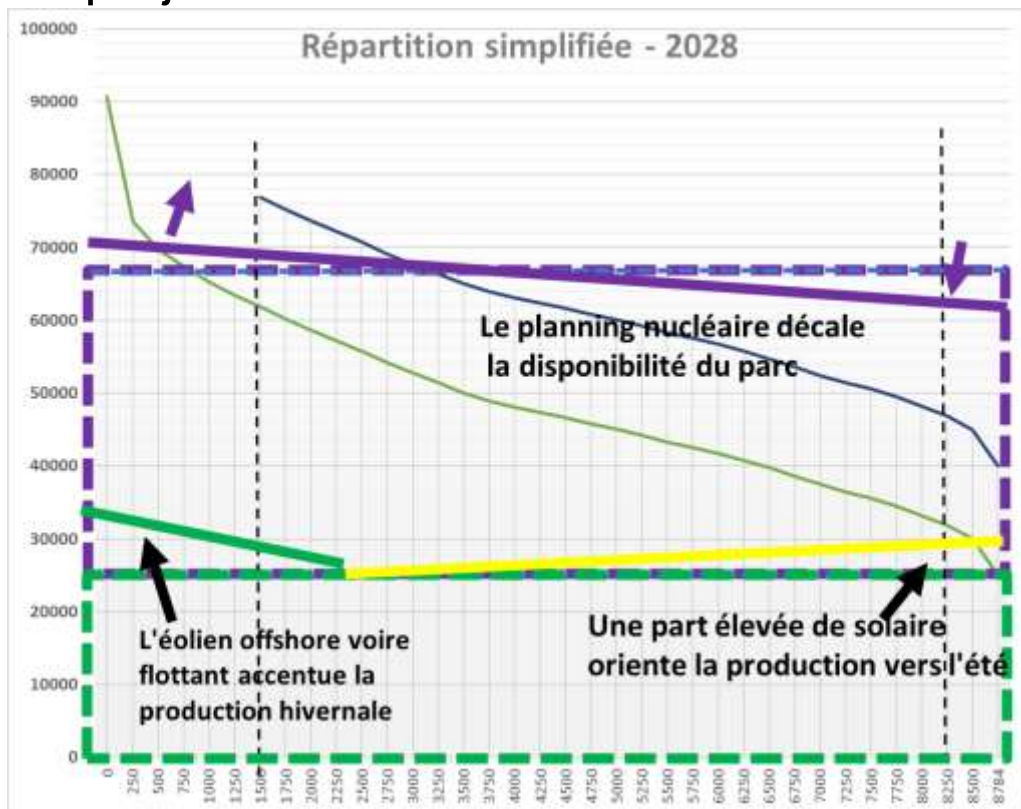


Vers 100% ENR...



Demande France 2018-2028

La projection PPE à 2028



En réalité, le nucléaire a été un peu décalé vers la pointe d'hiver par un planning de maintenance et de rechargement adapté. Les énergies renouvelables ne sont pas homogènes sur l'année ou sur le mois. Et surtout, les énergies renouvelables ne sont pas alignées sur la monotone



La monotone ne suffit plus avec des ressources variables

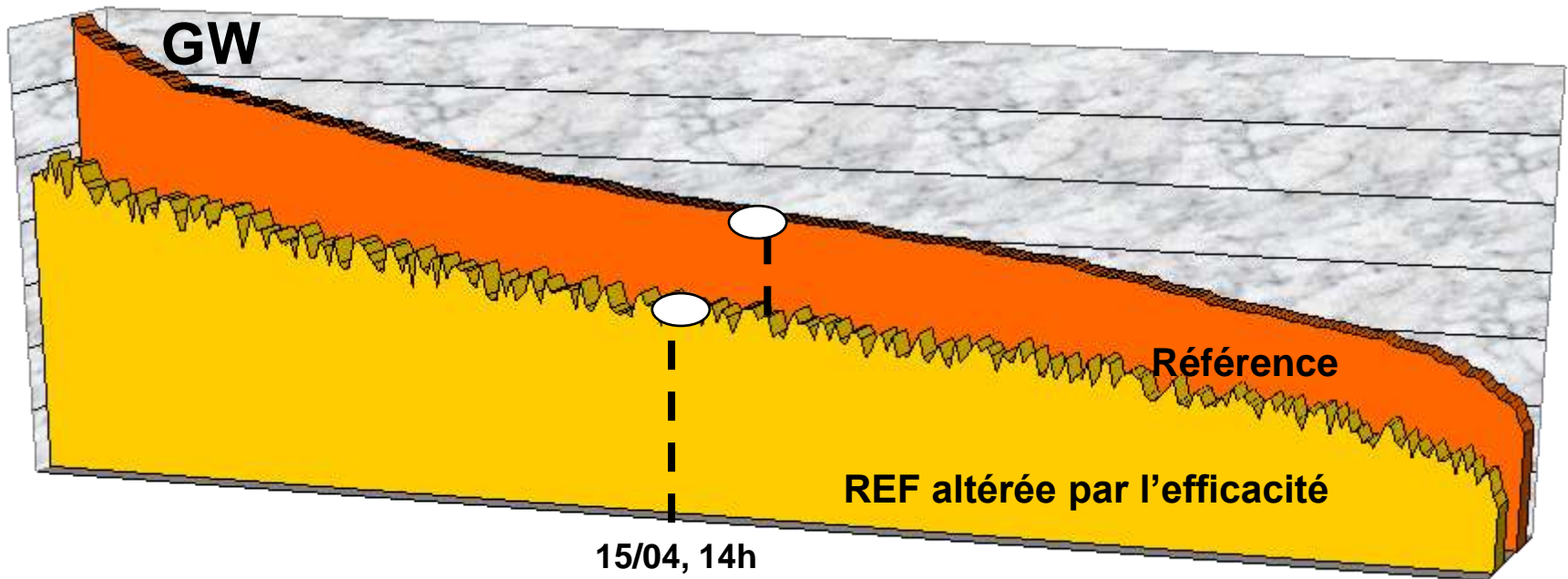
Soient une monotone de charge référence et une monotone de charge de gains d'efficacité. Ces monotones ne sont pas synchrones



Il ne faut pas comparer les valeurs pour un point d'abscisse donné : cela ne correspond pas à la même date.



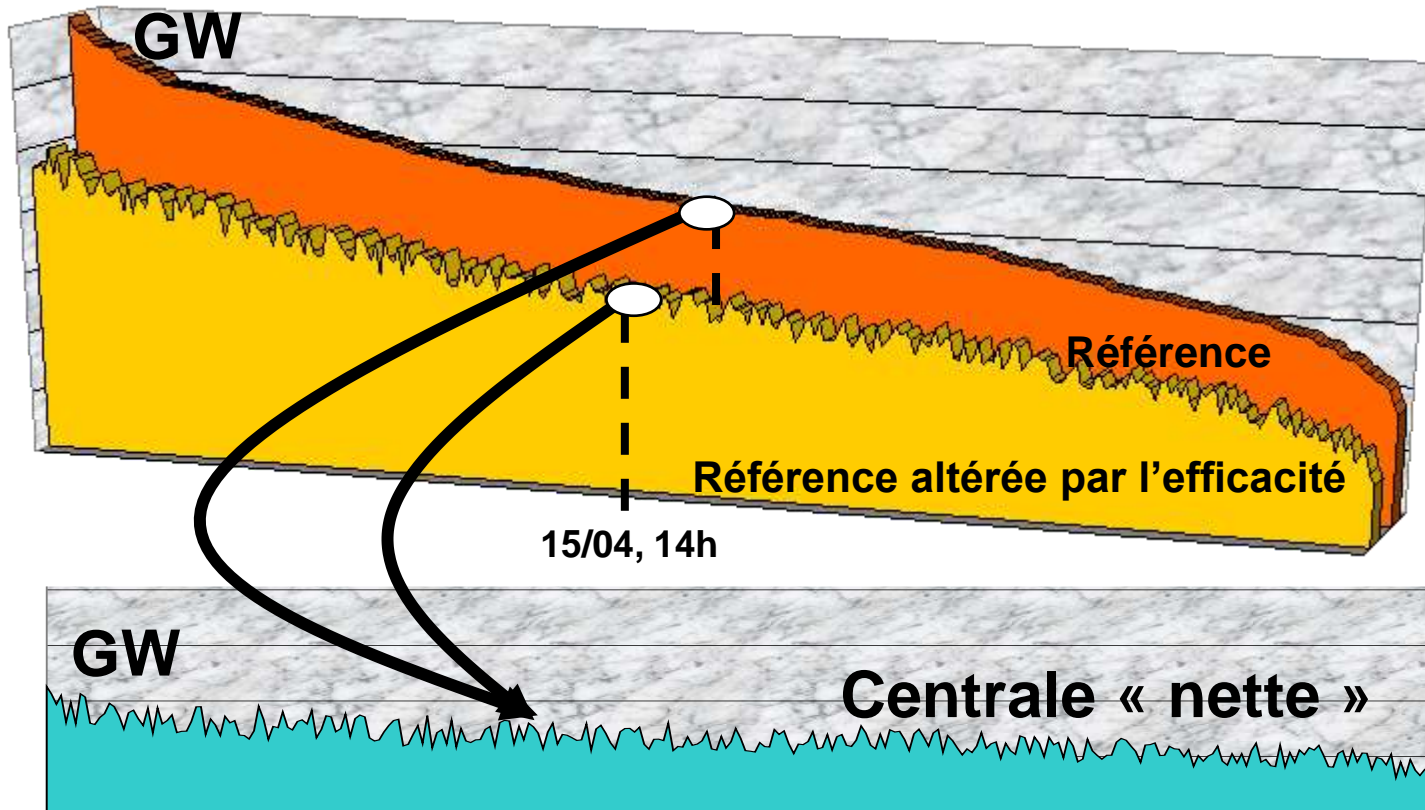
Représenter une « centrale d'économies »



Afin de comparer deux monotones de charge, il est intéressant de déterminer la charge restante, par différence entre courbes monotones.



La « centrale d'économies »



Si on veut représenter une centrale d'économie, il faut la mettre en regard des demandes d'énergie pour comprendre leur valeur

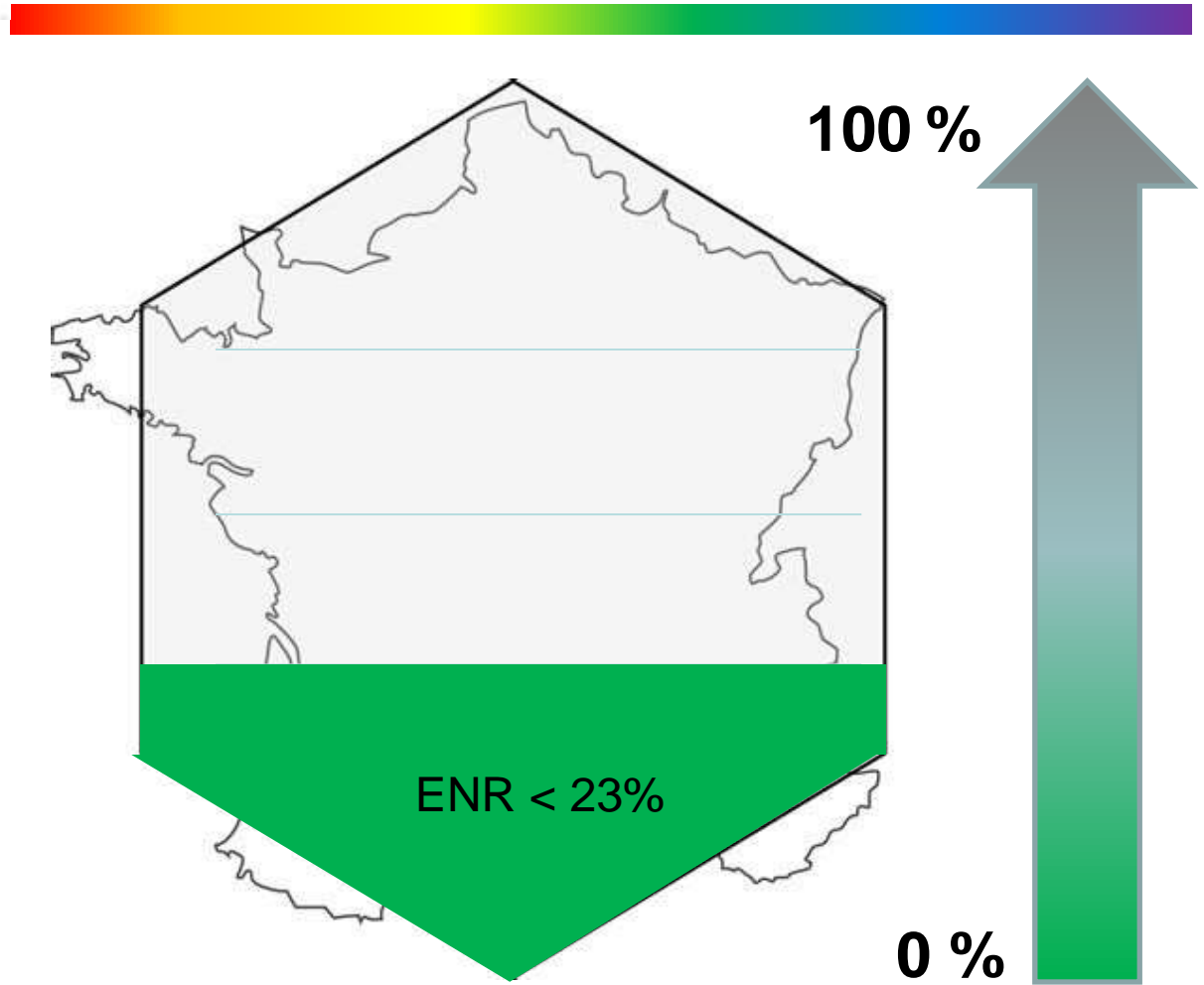
Des questions ?



Midnight Oil: Panneau solaire 100W, batterie 6v-7.2Ah, convertisseur 1500W 12V DC 230V AC, câbles et outils. Objectif 450 TWh. Vous avez 4 heures.



<https://www.youtube.com/watch?v=ejorQVy3m8E>



vers 100% ENR...



Plan de cours

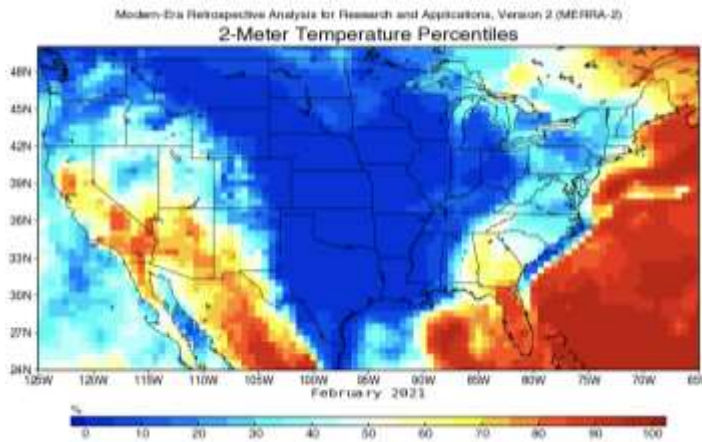


La métaphore: La machine à vapeur fonctionne en continu grâce au **volant d'inertie** et au condenseur séparé ainsi que son **régulateur de vitesse** centrifuge. Cette inertie mécanique contrôlée est au cœur de fonctionnement régulier de la machine. Le **réseau électrique** a une problématique similaire : créer un équilibre dynamique à la frontière entre la demande et l'offre d'énergie.

- ✓ 100% ENR?
- ✓ Le nouveau cadre décentralisé
- ✓ Un système centré sur l'hiver
- ✓ L'équilibre offre-demande
- ✓ Le système: la monotone, la défaillance, le brown-out, le black-out, le dispatcher
- ✓ La déclin de la centrale à vapeur
- ✓ La critique de la monotone en France
- ✓ Nouveaux outils pour les ressources variables



Les MERRA



[The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 \(MERRA-2\)](#), Ronald Gelaro, et al., 2017, J. Clim., <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>

L'équipe PlenR de Lille a par exemple calculé avec succès la production éolienne de centrales au large de la Belgique pour le compte du réseau.



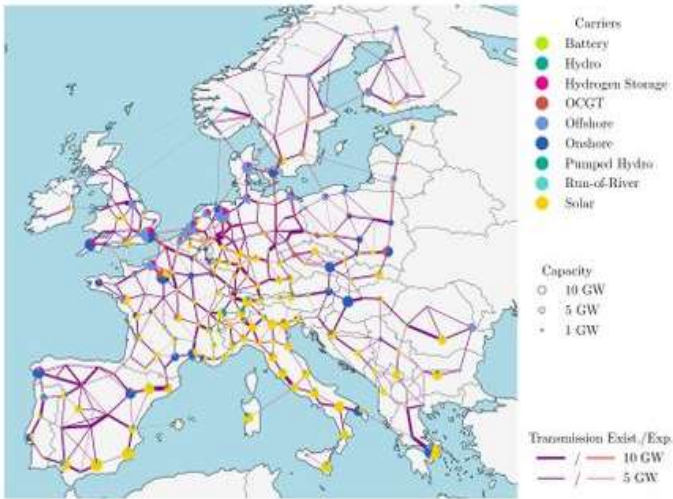
- ✓ La NASA met à disposition des données « réanalysées » sur une grille d'environ 50 X 50 km. On peut remonter à 1980 mais les deux dernières décennies sont plus précises.
- ✓ Ces mesures incluent sur base horaire la température, l'ensoleillement, le vent... justement les trois variables centrales pour aller vers «100% ENR ». Elles recourent précisément les productions mesurées par RTE (+98% éolien selon Shirizadeh-Quirion)
- ✓ Ces données massives et précises (plus humidité ou paramètres chimiques) permettent la simulation multi-annuelle d'installations « ex-nihilo » par exemple en mer, et aussi une modélisation puissante et démonstrative.



Vers 100% ENR...



PyPsa



«The strong effect of network resolution on electricity system models with high shares of wind and solar» Frysztacki, Martha Maria; Hörsch, Jonas; Hagenmeyer, Veit; Brown, Applied Energy 6-2021
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261921002439?via%3Dihub>
<https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000131224>



Karlsruher Institut für Technologie



- ✓ Une nouvelle génération de modèles exploite les données climatiques massives et calcule le réseau réel (28 pays) incluant Norvège et Grande-Bretagne
- ✓ Comme son nom l'indique, il fonctionne en Python et utilise des ressources de calcul massives (solveurs avancés...).
- ✓ Cela permet d'inclure l'impact de l'éolien offshore et flottant, les échanges et les capacités massives de stockage en Scandinavie, ou encore le couplage des secteurs (industrie, transport).
- ✓ Tom Brown et Martin Greiner sont issus de l'IAI (Automatisation et Informatique Appliquée) au KIT (Karlsruhe Institute of Technology). Ils bénéficient de moyens importants de la recherche appliquée en Allemagne
- ✓ Plusieurs équipes européennes ont développé des modélisations comme celle de Aarhus (Dpt Ingénierie) ou de Frankfurt (Etudes Avancées)

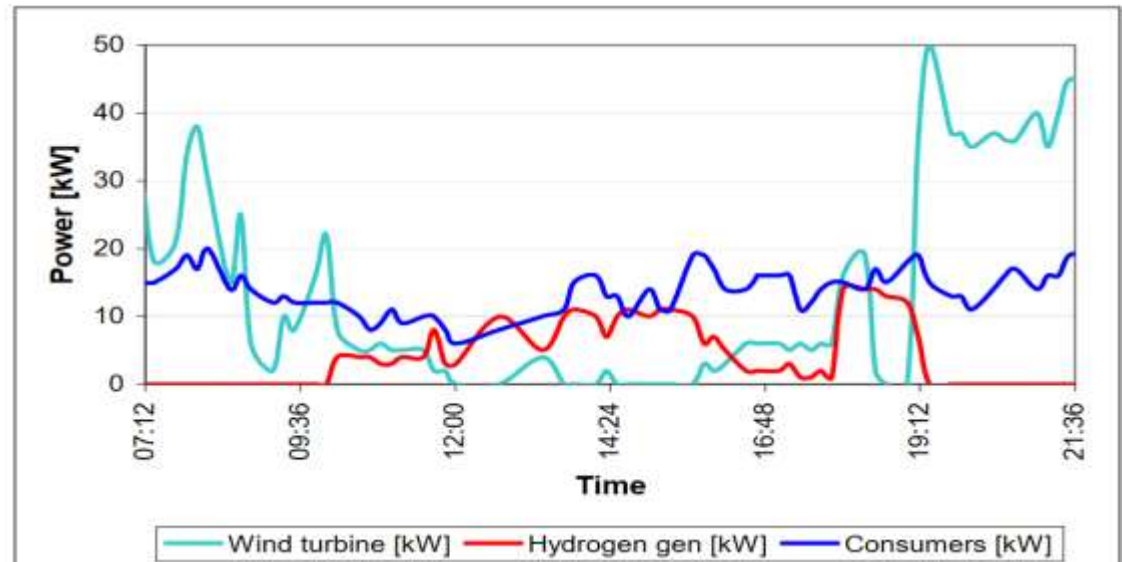
Expérience : une île 100%ENR



Project leader Torgeir Nakken, from Statoil's R&D center in Porsarunn



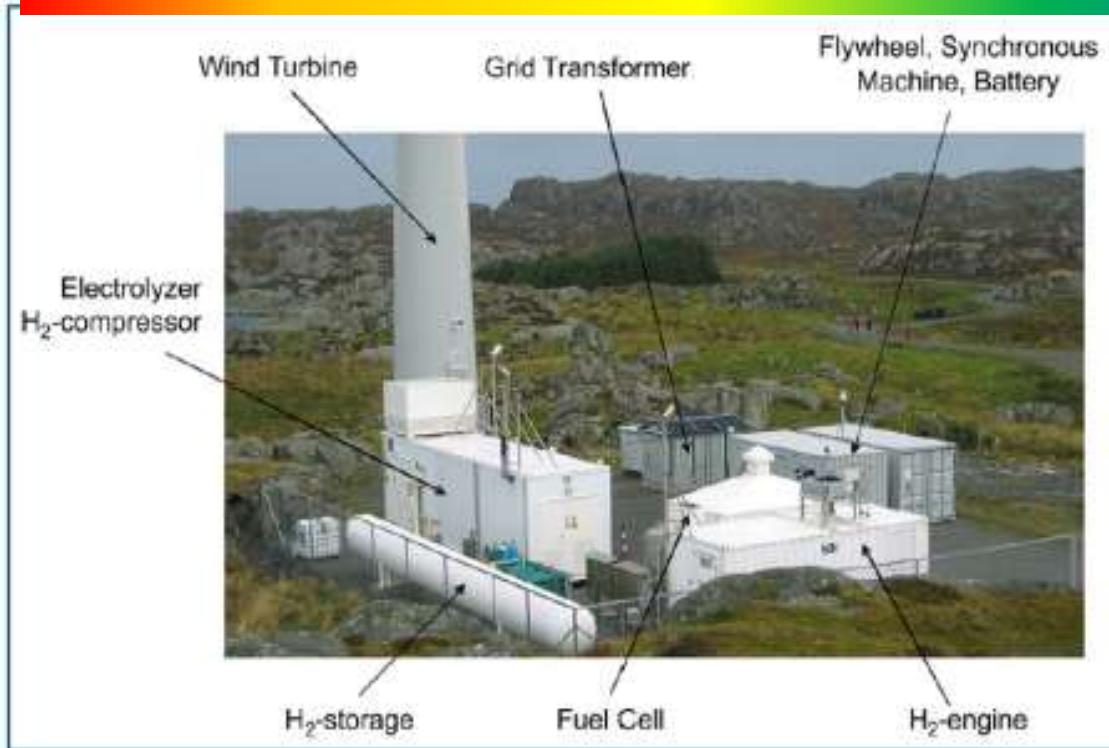
L'exemple d'une île de 10 habitations au large de Stavanger (Norvège) pour tester le 100% ENR entre 2004 et 2008. Désormais de nombreux territoires atteignent 100% ENR une partie de l'année.



Vers 100% ENR...



L'île de Utsira (Norvège)



Installation de démonstration d'Utsira par Statoil (N) et Enercon (D) entre 2004 et 2008

L'équilibre électrique est obtenu à partir de deux éoliennes de 'une seule éolienne:

- ✓ Production d'hydrogène comprimé lors des surcroûts de production
- ✓ Pile à combustible en base
- ✓ Moteur à combustion H₂ en pointe 55 kW
- ✓ Régulation à court terme : volant d'inertie de 5 kWh, rotor synchrone de 100 kVA, batterie



Vers 100% ENR...



Quel 100%?



Centrale moteurs fonctionnant au fioul lourd de Jarry (Guadeloupe) 212 MW, en cours de fermeture.

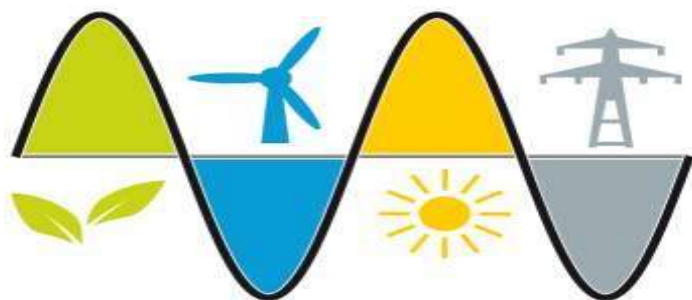
- ✓ Pour faire fonctionner le système électrique d'une île, on accepte un risque élevé de défaillance... que l'on trouve déjà dans les collectivités d'Outre Mer ou dans des îles
- ✓ On déroge en effet à la continuité **normale** ou **Gaussienne** de fonctionnement si des ressources discrètes dépassent environ 1/8 de la demande du système
- ✓ L'objectif d'un système renouvelable futur est de s'aligner sur les exigences de défaillance, soit 3h par an (ou une journée par dix ans)



„Kombikraftwerk“: Le mécanisme de pilotage



Les simulations réalisées en Allemagne pour le projet Kombikraftwerk fait d'abord appel à un modèle réduit du réseau «émulé» en fonction d'années réelles pour 300 000 habitants. Les versions ultérieures ont montré que le système complet à 100% est possible.



Kombikraftwerk 2

Kombikraftwerk

- ✓ Dès le début des années 2000, les pouvoirs publics en Allemagne s'intéressent à la transition énergétique («EnergieWende» soit le «Virage Energie», repris par l'association éponyme)
- ✓ Le projet Kombikraftwerk développe les concepts permettant à la demande combinée électricité-chaleur de couvrir l'ensemble de la demande : smart grid, modes de stockage, rôle du transport, besoins de prévision...
- ✓ Kombikraftwerk 2 ajoute la dimension du réseau de transport. Il intègre des partenaires majeurs comme Enercon ou Siemens, le Ministère Fédéral de l'Environnement, le Fraunhofer IWES.



Vers 100% ENR...



Etude ADEME



<https://www.ademe.fr/lademe/priorites-strategiques-missions-lademe/scenarios-2030-2050>



- ✓ L'étude ADEME développe des «visions» à 2030 et 2050, pas très différentes d'autres scénarios comme negaWatt, Virage Energie ou l'étude GRT-Gaz
- ✓ La modélisation est confiée à Artelys qui pousse notamment les détails des options de flexibilité sur la demande (voir plus loin). Cependant l'outil n'est pas en accès ouvert, et les projections d'offre ont une ampleur géographique et technique limitée.
- ✓ La force de l'étude ADEME est d'examiner toutes les dimensions et critères de la transition : les pollutions; les besoins en matériaux; les gains macro-économiques; les conséquences sur les modes de vie, en plus d'une description technique minutieuse du système futur.
- ✓ Une nouvelle étude sera publiée en fin 2021



Behrang Shirizadeh, l'auteur principal :
«*Nous développons un modèle qui assure toutes les contraintes techniques/opérationnelles importantes sur une durée météo assez longue (18 ans), et nous voyons qu'un mix électrique 100% renouvelable est non seulement techniquement faisable, mais aussi économiquement intéressant. De plus, le surcoût lié aux incertitudes sur les coûts des technologies émergentes est très modéré.*»

Quentin Perrier : «*Nos travaux confirment qu'un mix électrique 100% renouvelable est faisable techniquement en 2050, sans faire exploser la facture. Et ils révèlent que, contrairement à l'intuition, la proportion exacte d'éolien et de solaire influera assez peu sur le coût total : grâce au progrès du stockage, ces technologies deviennent largement substituables*».

<http://www.centre-cired.fr/fr/webinaire-une-electricite-100-renouvelable-est-elle-possible-en-france-dici-a-2050-et-si-oui-a-quel-cout/>

Shirizadeh-Quirion

- ✓ Behrang SHIRIZADEH, Quentin PERRIER et Philippe QUIRION ont modélisé le système électrique de 2050. Ils font ou ont fait partie du laboratoire CIREC à Nogent-sur-Marne (94)
- ✓ Publié dans la presse scientifique à **comité de lecture** et dans les colloques spécialisés, ce travail montre que le coût d'un système sans nucléaire modélisé de façon réaliste ne coûte pas plus cher qu'avec nucléaire.
- ✓ Renoncer au nucléaire augmente le coût de 5% au plus. Renoncer à la CCS augmente le coût de 15% au plus, **même sans flexibilité de la demande ni importations.**
- ✓ Un point important de ces travaux, c'est que des écarts même élevés sur des paramètres comme le coût du photovoltaïque changent peu les résultats.



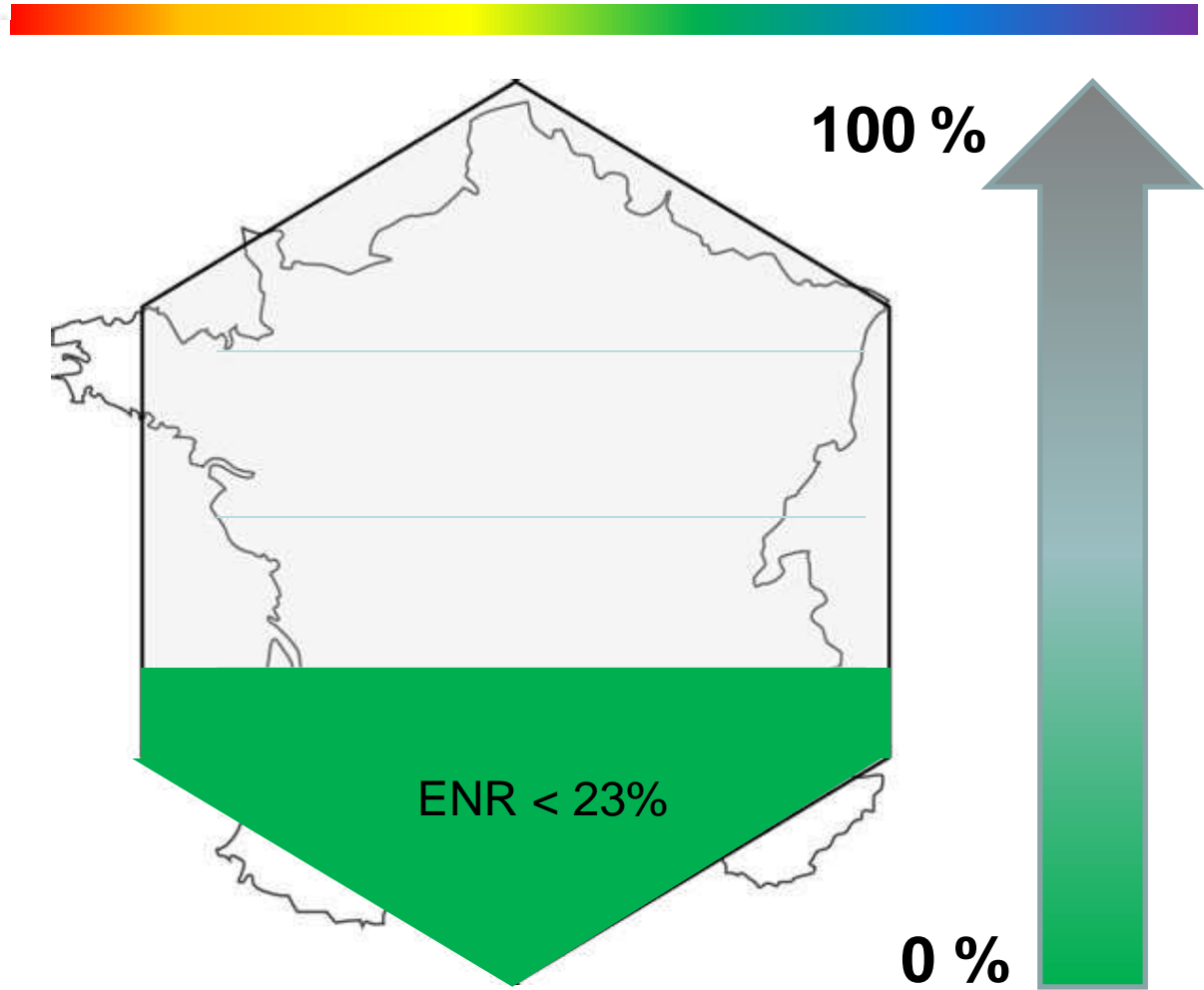
Des questions ?



Midnight Oil: Panneau solaire 100W, batterie 6v-7.2Ah, convertisseur 1500W 12V DC 230V AC, câbles et outils. Objectif 450 TWh. Vous avez 4 heures.



<https://www.youtube.com/watch?v=ejorQVy3m8E>



Vers 100% ENR...

