

# Stockage d'énergie vers 100% ENR

N°11 Formation EELV-COMENER  
Cycle 2021 / Antoine Bonduelle





# Cours 10-11

Dans le cours N°10, nous avons étudié **le cadre d'un système à 100%** d'électricité renouvelable, exploré le fonctionnement du système électrique, et enfin observé les outils traditionnels et récents pour représenter le réseau. Dans ce cours 11, nous revenons sur **les options de flexibilité** et notamment sur **le stockage d'énergie**, dernier maillon de la construction du 100% ENR.

- ✓ 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



# L'éolien et le solaire sont intermittents(?)



Eoliennes à La Désirade (Guadeloupe) à fonctionnement permanent (sauf « à la Toussaint ») et de leur débrayage lors des cyclones.



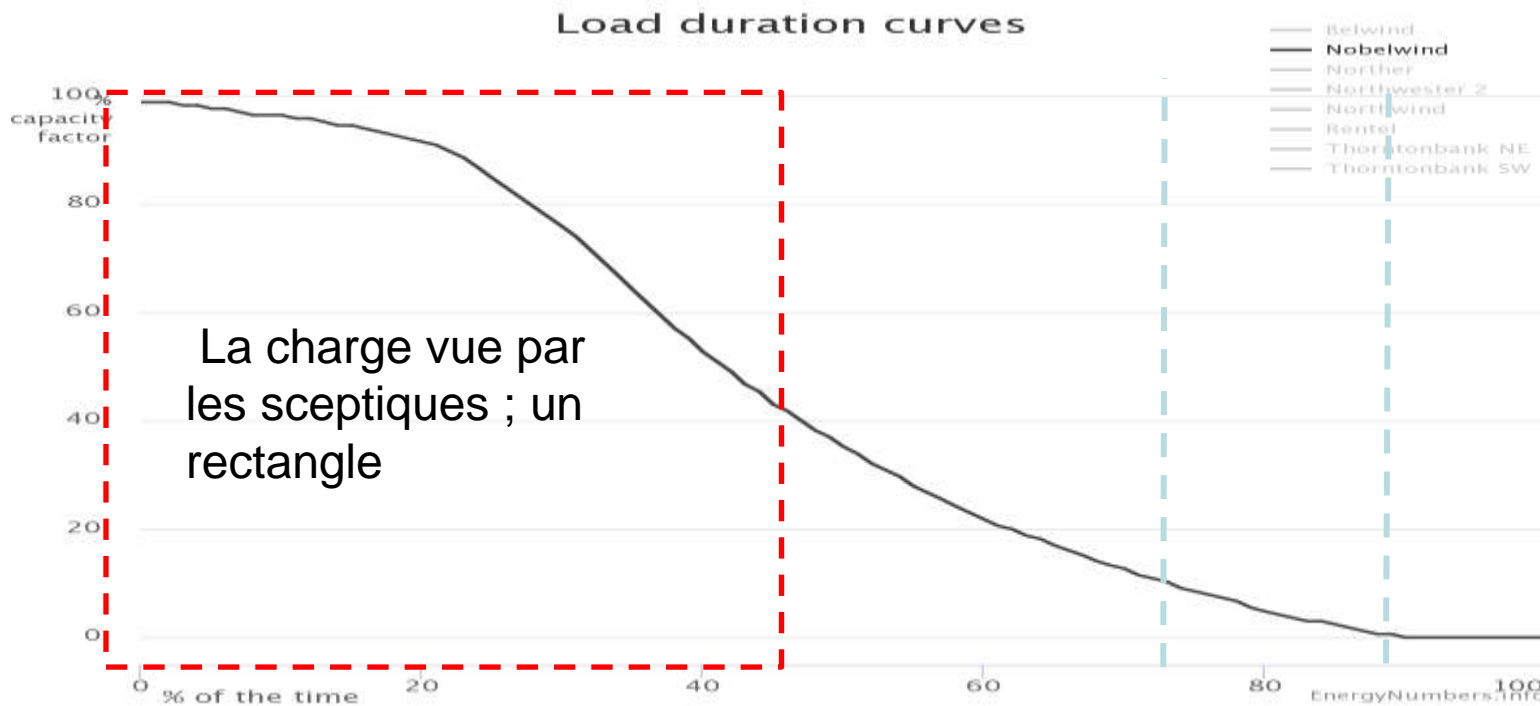
« Une éolienne ça marche que un cinquième du temps » (...) « Un capteur solaire c'est moins d'un dixième du temps »

✓ Mathieu Auzanneau, « l'écologie est-elle une cause perdue » 2017 <https://theshiftproject.org/article/lecologie-est-elle-une-cause-perdue-2/>

- Réponse 1. Une auto n'est utilisée que moins d'une demi-heure par jour à pleine puissance (soit un facteur de charge de 1/50), elle est pourtant fonctionnelle.
- Réponse 2. Dix éoliennes, cent éoliennes, mille éoliennes, ça fonctionne bien plus longtemps qu'une seule (voir plus loin)
- Réponse 3. L'éolienne offshore c'est près de 50%, l'éolienne flottante jusqu'à 65%. Le solaire est plus près de 15% que de 10%
- Réponse 4 Le facteur de charge de l'éolienne est un choix économique (entre 1% et 80%!) <https://energynumbers.info/capacity-factor-of-wind>



# En réalité, l'éolien s'étale



Exemple ici en Belgique, la centrale Nobelwind (44% de facteur de charge).

Elle fonctionne bien plus longtemps que son taux de charge

<https://energynumbers.info/capacity-factors-load-duration-curves-belgian-offshore-windfarms>

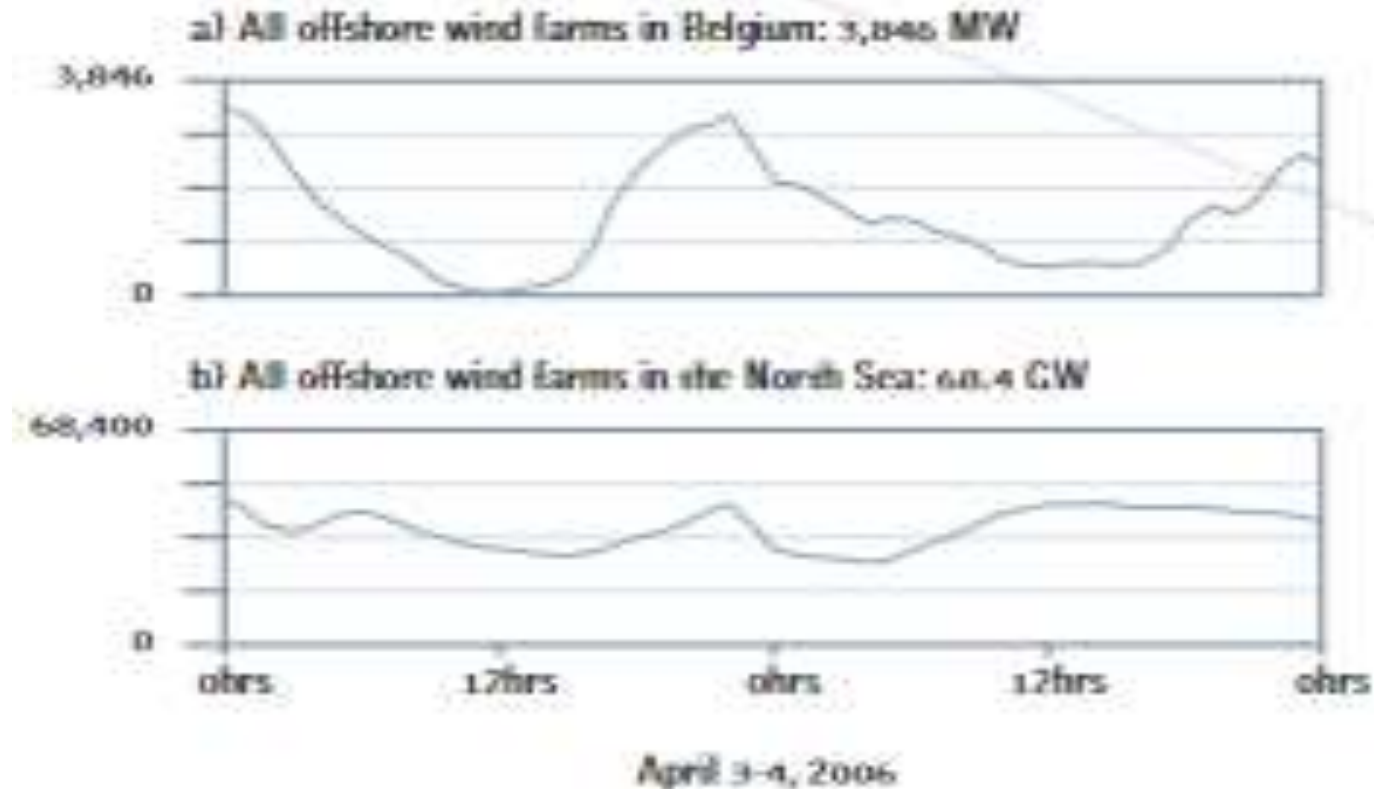


Vers 100% ENR...



# Le nombre fait la constance

Deux jours de production de la centrale belge et d'un ensemble de centrales sur la mer du Nord. La production prise globalement est alors proche d'un ruban

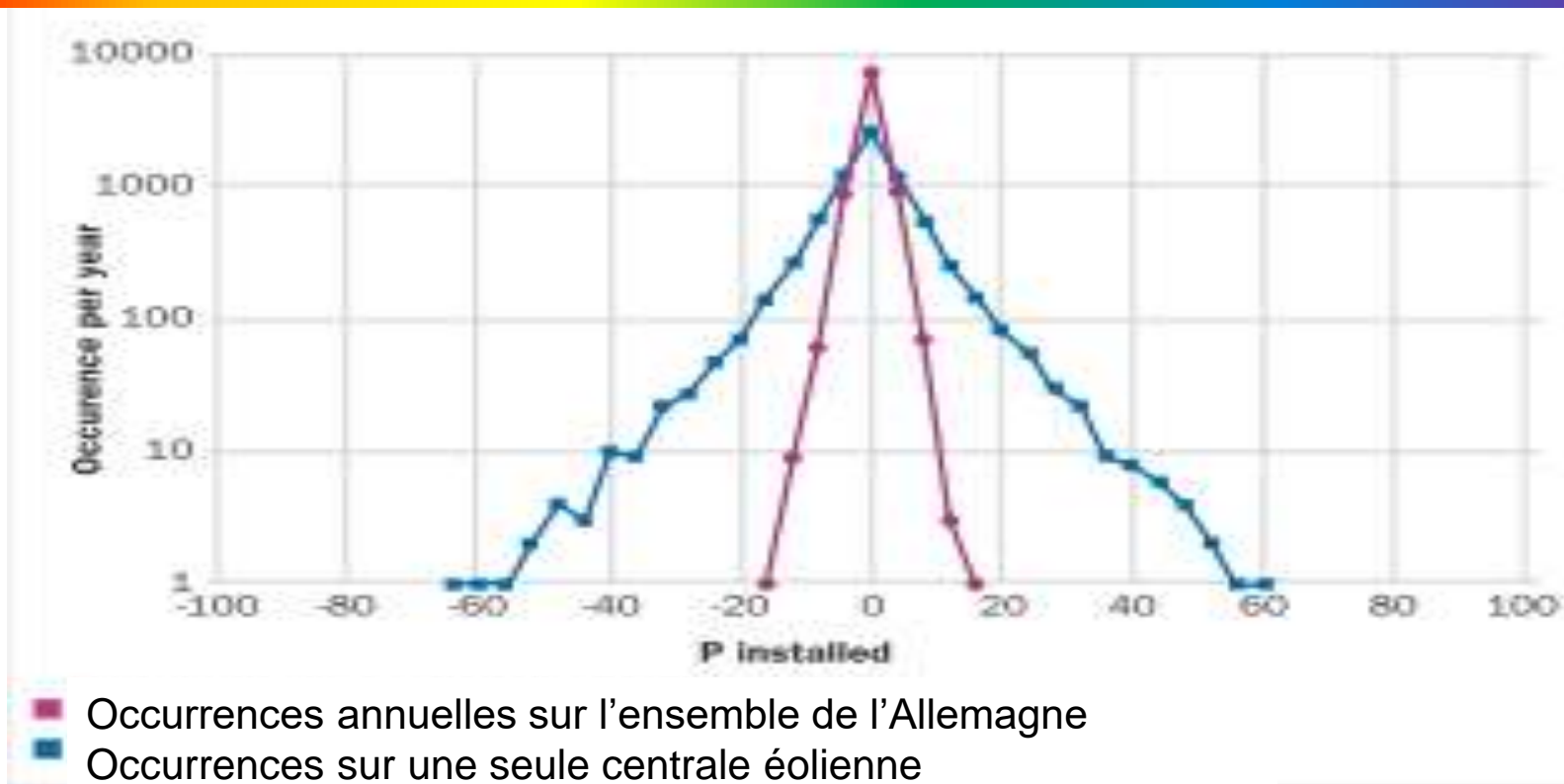


<http://drømstørre.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/en/tour/wres/weibull.htm>

Le paradoxe est bien expliqué sur ce site en anglais (éolien danois DWIA)



# L'éolien varie en continu



L'occurrence de variations horaires extrêmes est très limitée par la multiplication des ressources (source ISET).

Ce n'est pas le cas pour le solaire PV qui présente peu d'inertie vis à vis du le reseau ou pour les ressources vapeur (qui sont sujets à des arrêts d'urgence ou des pannes sur des grosses unités).



Vers 100% ENR...



# Foisonnement



Arts ménagers



Disjoncteur

<https://www.dailymotion.com/video/x1dbnpa>



- ✓ Le système électrique repose sur le **foisonnement des demandes**. La puissance disponible à la production n'est qu'une fraction du total qui pourrait être appelé par les usagers. Le tarif fixe (fonction de la puissance), mais aussi le disjoncteur sont des moyens efficaces pour cela.
- ✓ Un exemple très simple de **foisonnement des offres** consiste à combiner des capteurs PV d'orientation différentes, ce qui allonge la production sur la journée.
- ✓ Des autres formes de foisonnement consistent à **relier des régions** de climat et d'économies différentes.



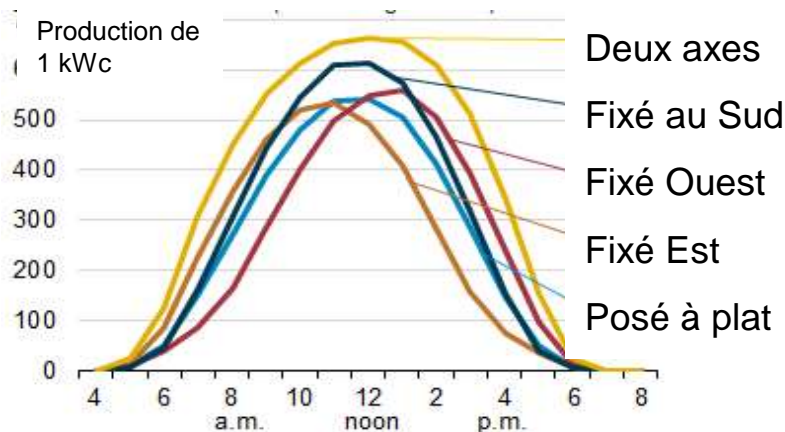
Vers 100% ENR...





# Le suiveur solaire

Le système à deux axes a quelques atouts pour un fermier (traite des vaches) ou un vigneron (ombrage variable) (voir cours 3). L'agri-solaire pose la question de la valeur ajoutée de l'agriculture (55% de la surface, 1,4% de VA) face à celle de l'énergie (4,3% VA)



- ✓ Le «tracker» solaire à un ou deux axes (azimuth et élévation) ajoute un peu de complexité au système
- ✓ Il va avoir pour effet d'augmenter la production (par exemple de 30% sur l'année) mais surtout il va l'étaler un peu sur la journée
- ✓ L'auto-consommation augmente, via une meilleure coïncidence entre production et consommation plus tôt ou tard dans la journée.
- ✓ Un système solaire fixe à plusieurs pans de toiture aura un effet similaire.

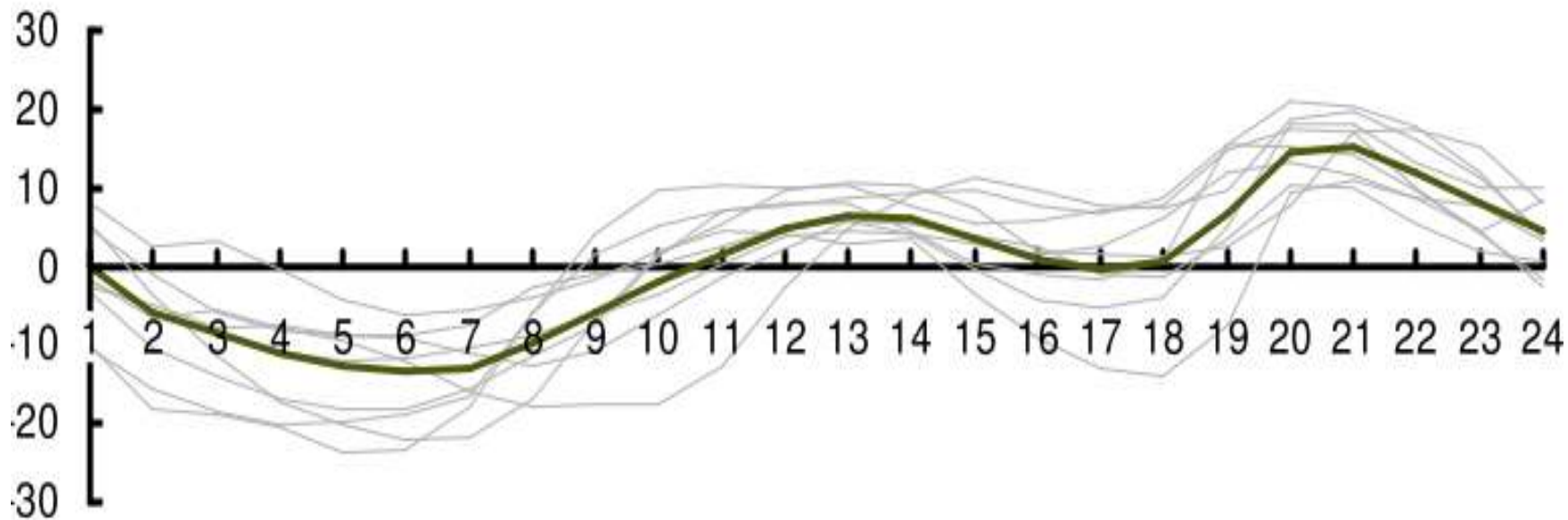
<https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=18871>





# Impacts par les échanges

En Europe, les échanges effacent une partie des fluctuations. Variations sur une journée entre les pays européens (en %)... les écarts à la moyenne sont significatifs

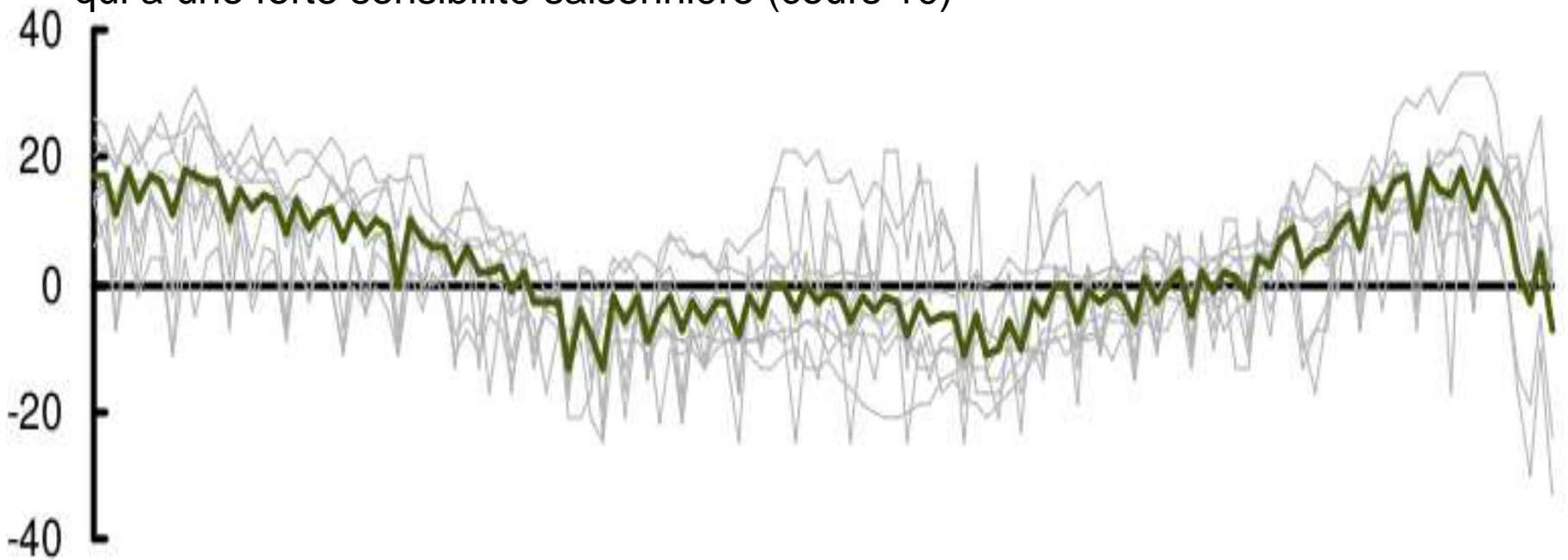


Vers 100% ENR...



# Les écarts d'usages saisonniers

Les écarts de demande sur la saison sont plus limités... C'est surtout la France qui a une forte sensibilité saisonnière (cours 10)



Vers 100% ENR...



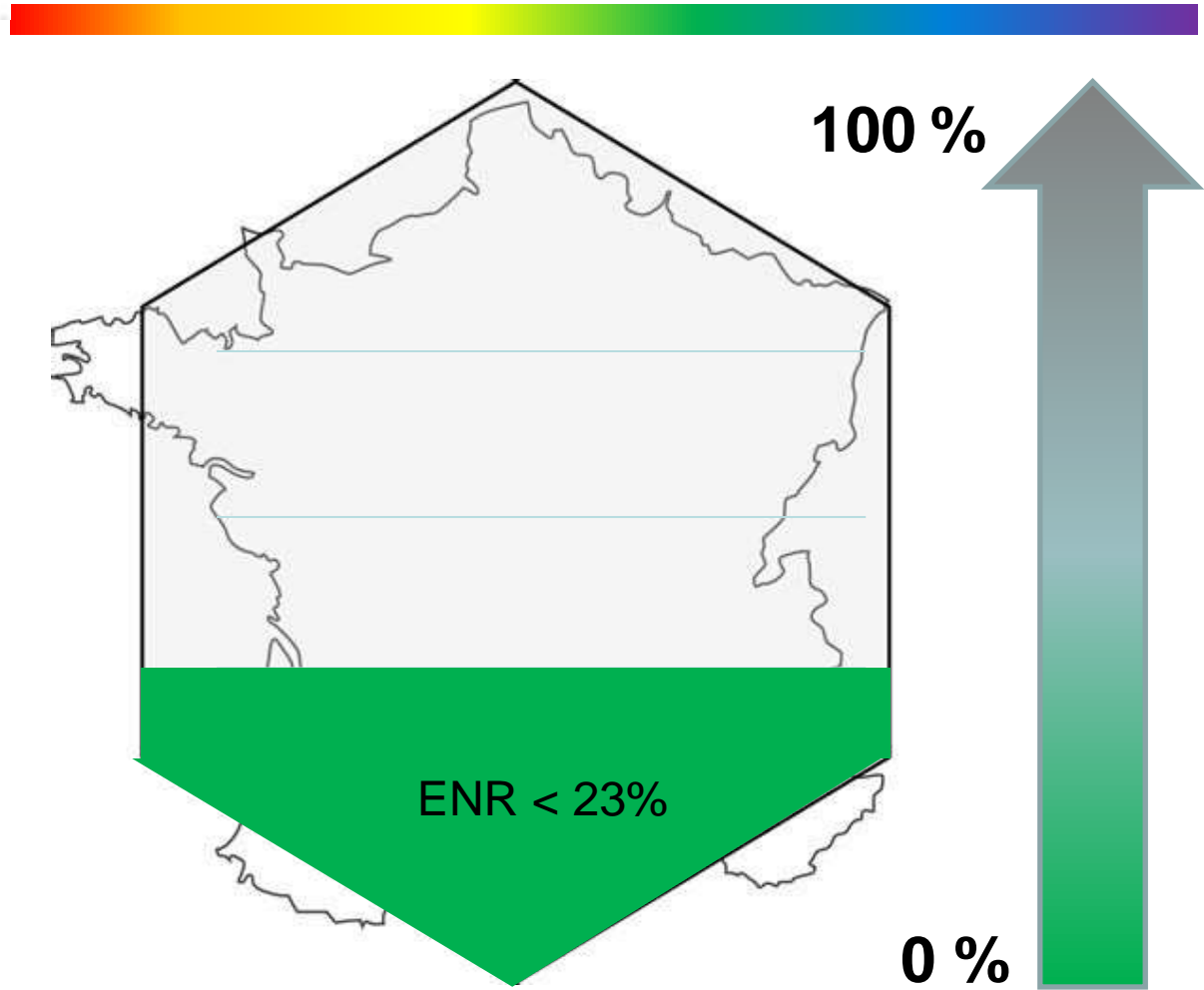
# Des questions ?



**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...





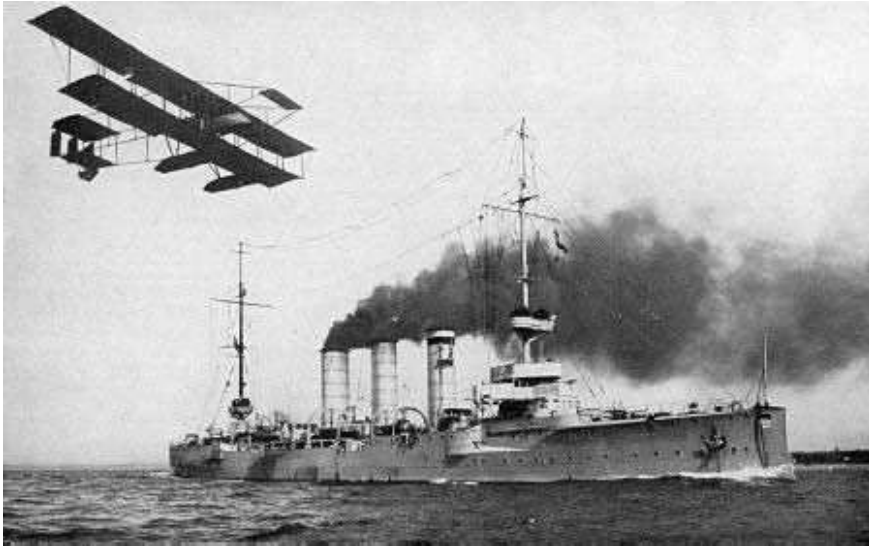
# Cours 10-11

Dans le cours N°10, nous avons étudié **le cadre d'un système à 100%** d'électricité renouvelable, exploré le fonctionnement du système électrique, et enfin observé les outils traditionnels et récents pour représenter le réseau. Dans ce cours 11, nous revenons sur **les options de flexibilité** et notamment sur **le stockage d'énergie**, dernier maillon de la construction du 100% ENR.

- ✓ 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



# Manœuvres en Mer du Nord



La bataille de Hélioland (1914)

- ✓ La Commission Européenne commande dès 2005 de nombreux travaux sur le « Super-Grid ».
- ✓ L'enjeu : produire en quasi-continu la moitié de l'électricité de l'Union.
- ✓ 300-350 GW d'off-shore, c'est une production de l'ordre de 1400-1800 TWh, qui domine le système électrique des pays concernés.
- ✓ 150 GW d'éolien flottant à l'horizon 2050 pourraient suivre selon l'industrie pour environ 800 TWh de plus



# Ocean of opportunities (2009)

Dans ce rapport, Wind Europe (EWEA) propose un « Master Plan fait d'une série d'ajouts de réseaux construits en séquence ». Il est en partie en train de se réaliser



En 2010, les projets « Trade Wind » et « EWIS » proposent des renforcements autour de la mer du Nord, selon le volume d'énergie éolienne à produire.

Le projet Offshore Grid au même moment propose une vision de la répartition possible des productions basées sur les données MERRA-1

En 2014, l'étude Ecofys-Tractebel montre les bénéfices de l'interconnexion, ou enc en 2019 ECN-TNO montre la poursuite de la baisse des coûts après 2030

[https://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/reports/Economics\\_of\\_Wind\\_Energy.pdf](https://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/reports/Economics_of_Wind_Energy.pdf)



Vers 100% ENR...



# Liaisons courant continu

Les Pays-Bas ont entamé la construction de liaisons AC-DC (courant continu DC) vers le continent pour multiplier la capacité de leurs futures champs d'éoliennes offshore (750 MW l'unité)



AC → DC la perte est moindre en courant continu pour une distance de plus de cent kilomètres... les Néerlandais ont choisi le 525 kV qui transporte bien plus que les cables AC équivalents. Le site représente 6 GW de puissance sur un objectif national de 11,5 GW d'éolien offshore en 2030

<https://www.youtube.com/watch?v=v2AC41dglNlM>

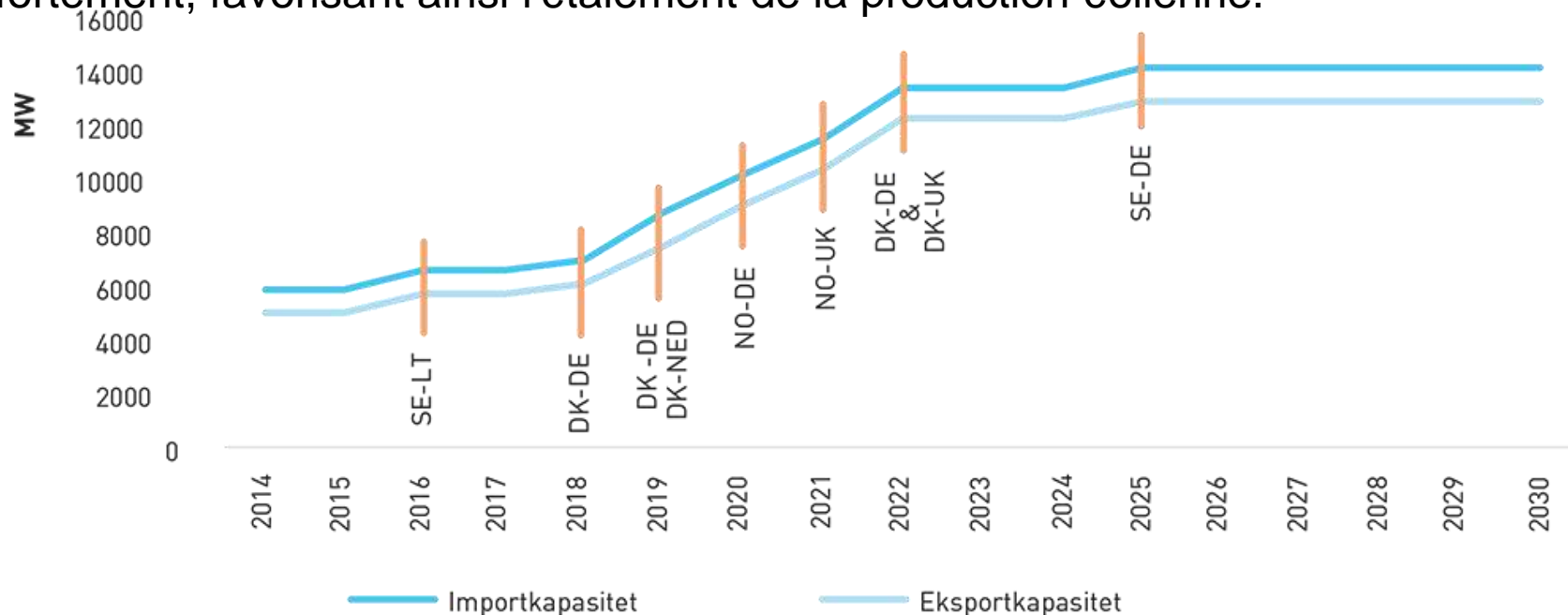


Vers 100% ENR...



# Scandinavie : Electrons en stock

Norvège (81 700 GWh) et Suède (33 000) possèdent une capacité de stockage dans leur système hydro-électrique supérieur au total des autres pays européens. Les liaisons avec le reste de l'UE augmentent aussi fortement, favorisant ainsi l'étalement de la production éolienne.



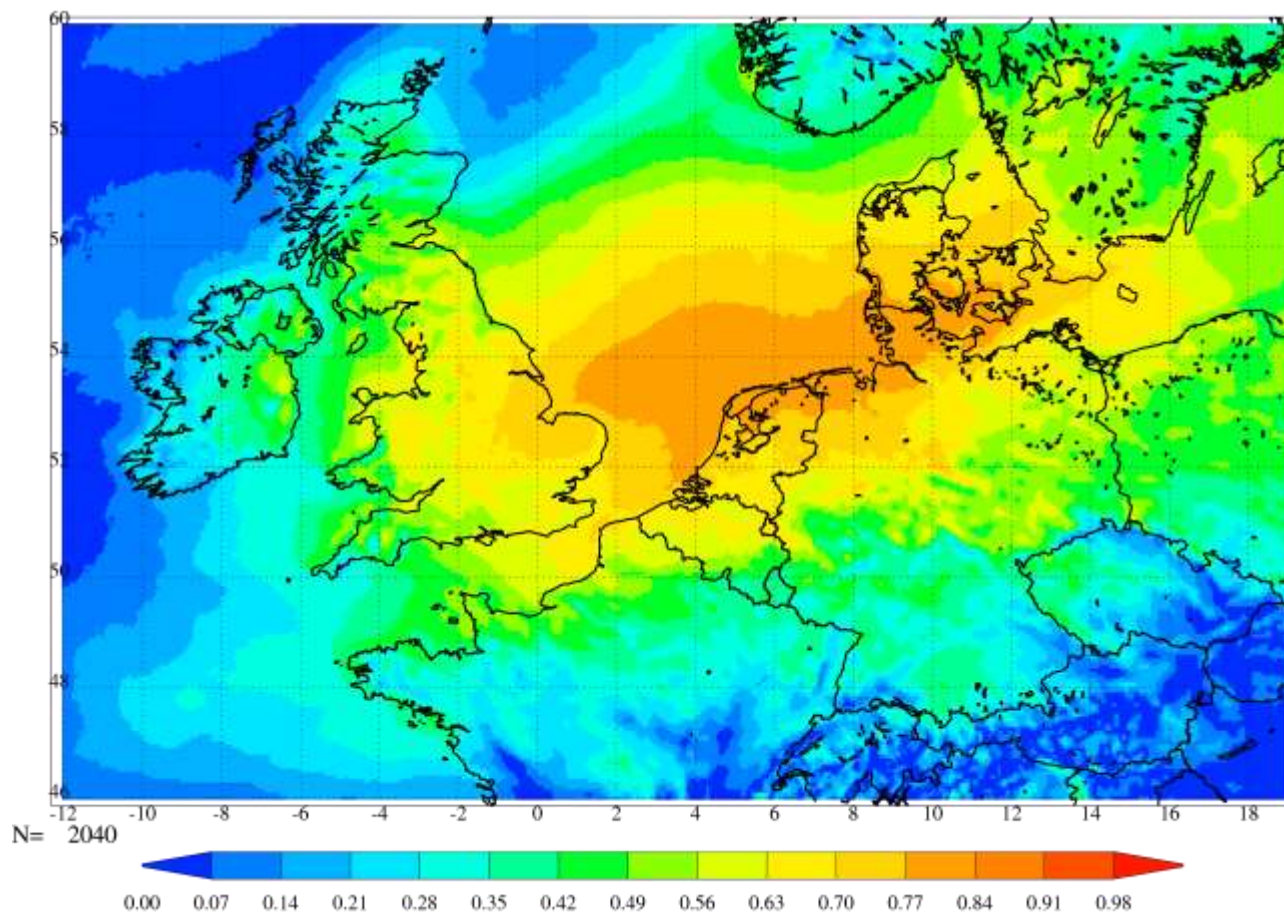
La Norvège peut ajouter à son potentiel le chiffre faramineux de 20 TWh... sans ajouter un seul barrage. En reliant les réservoirs existants et en les suréquipant de turbines réversibles, c'est une capacité équivalente à 50 fois celle de la France qui peut être construite.





# Décorrélérer les productions futures

Hiver



Les cartes type „von-Bremen“ ne décrivent pas des potentiels mais des niveaux de décorrélation moyenne pour penser l'avenir du réseau. Elles se base sur les séries satellitaires type MERRA

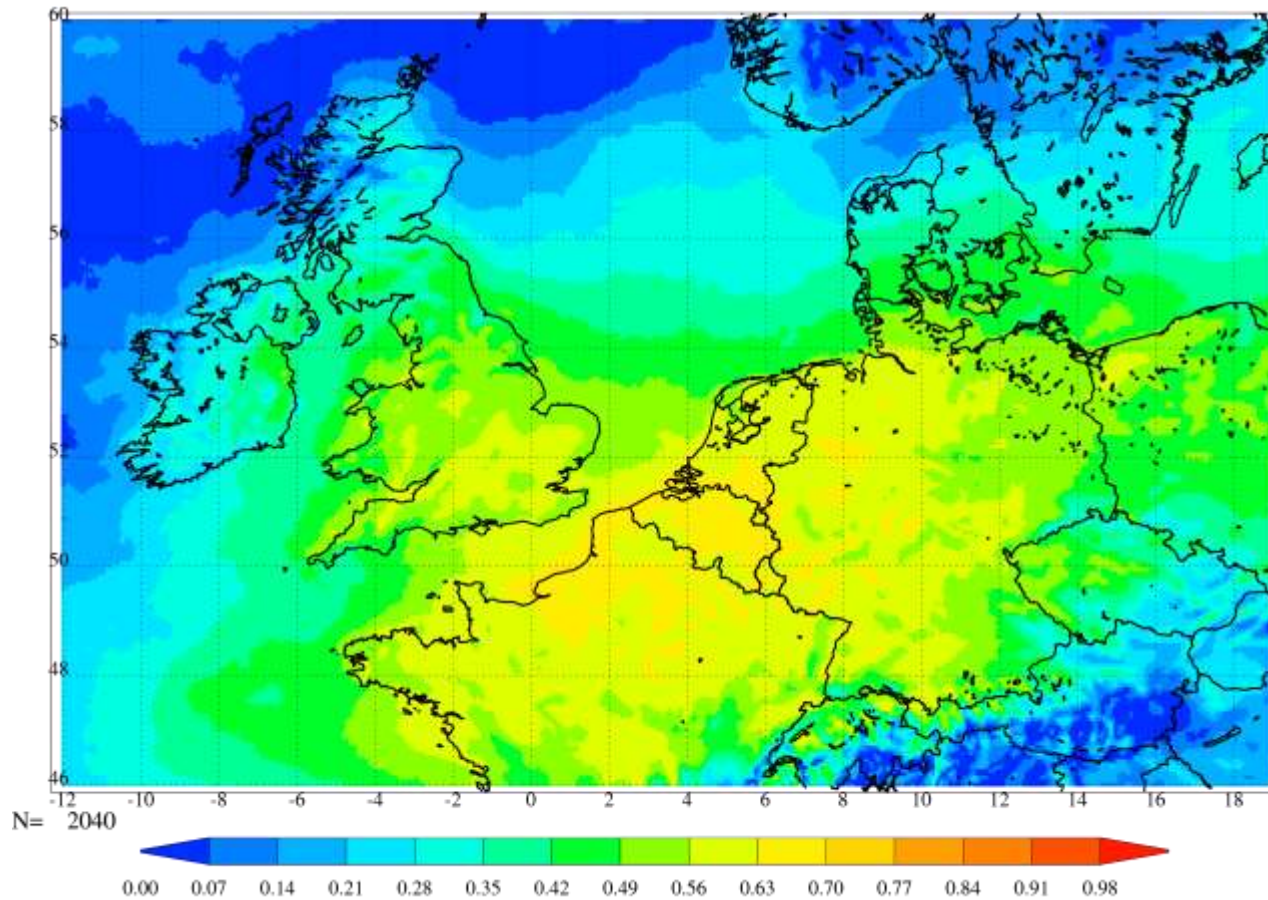


Vers 100% ENR...



# Corrélations éolien terrestre dans l'UE

Hiver



L'éolien nordiste n'est pas très différent de celui du Nord de l'Allemagne la plupart du temps. Un investissement sur la façade atlantique est plutôt plus intéressant comme contribution collective.

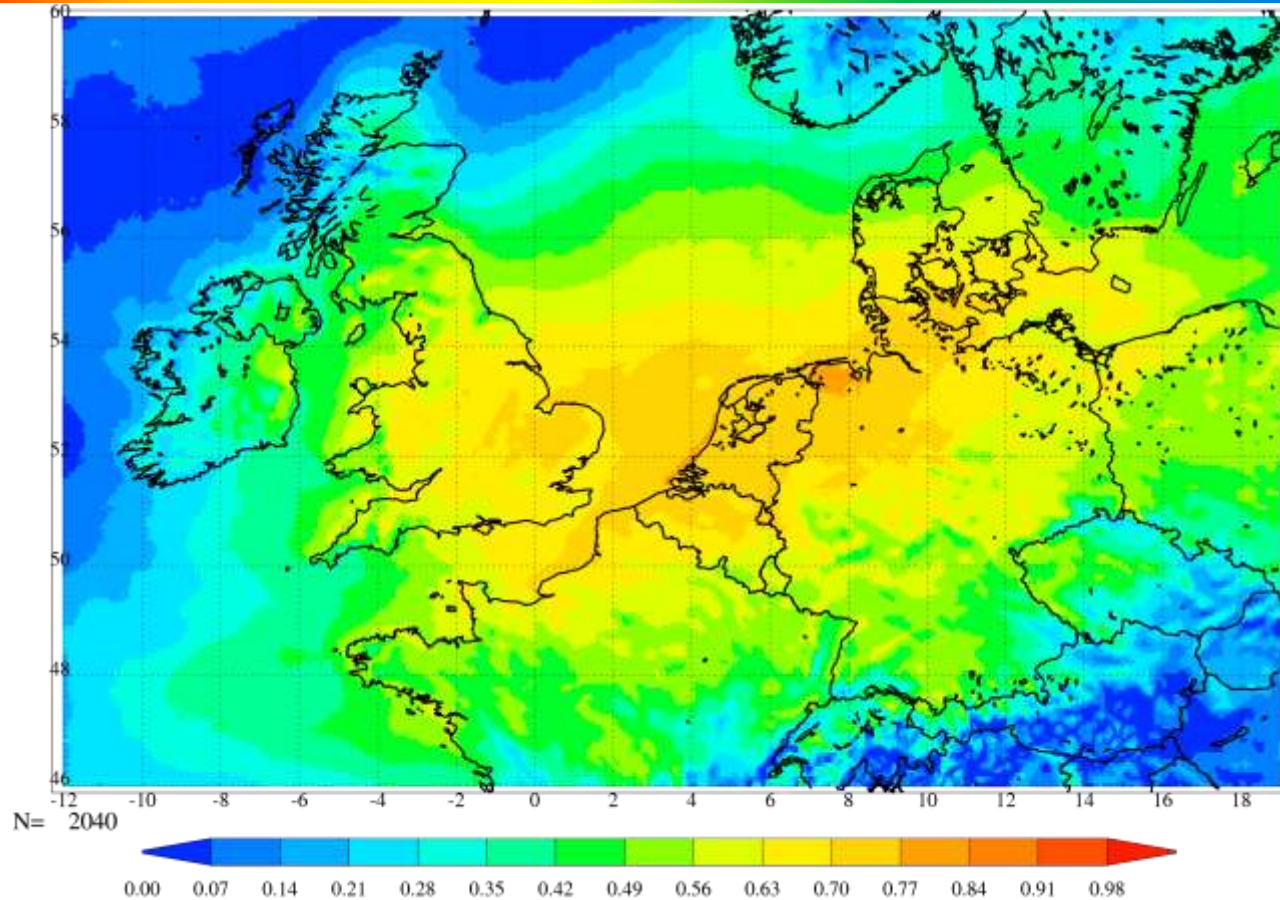


Vers 100% ENR...



# Corrélation totale terrestre + offshore

Hiver



Le réseau a donc intérêt à compléter sa «turbo-zone» de la mer du Nord par des productions sur les autres façades, et à relier l'Europe sur des axes Nord-Sud.\*  
La France et son réseau Nord-Sud est très bien placée pour accélérer sa propre transition. A quand un vrai chantier de l'off-shore flottant à grande échelle?

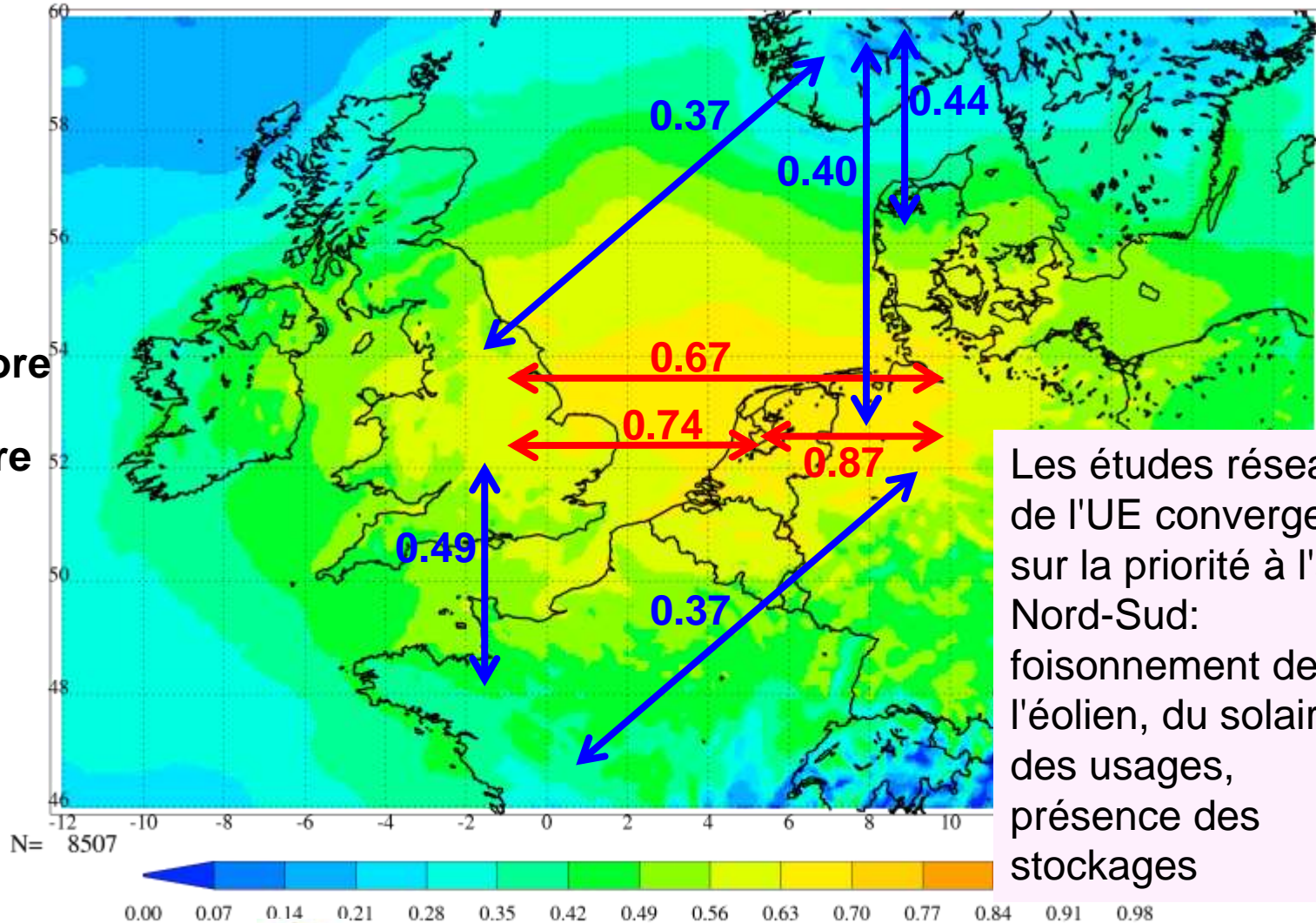


Vers 100% ENR...



# Les axes Nord-Sud sont à privilégier

Carte « Von Bremen » année entière tout éolien



Année  
entière  
Off-shore  
et  
terrestre

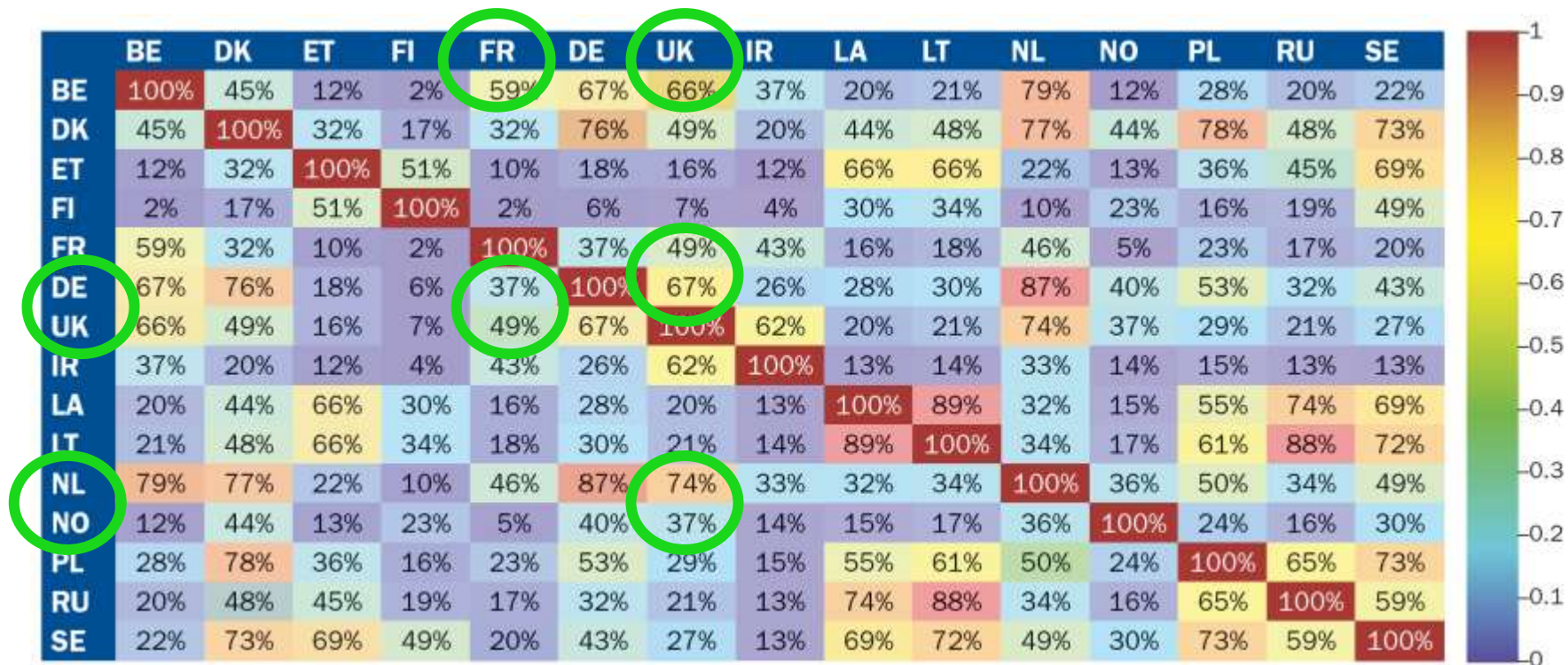
Les études réseaux de l'UE convergent sur la priorité à l'axe Nord-Sud: foisonnement de l'éolien, du solaire et des usages, présence des stockages



Vers 100% ENR...



# Corrélations EU27 & Norvège



Les axes Nord-Sud relient des zones moins corrélées. La Norvège est aussi le siège de stockage potentiel important d'électricité. La France et l'Allemagne sont ainsi très complémentaires pour la production éolienne (hors Hauts de France, très corrélés avec le nord de l'Allemagne)



# La France Nord-Sud



Source : RTE

- Le réseau français est historiquement au Nord (Charbon) et au Sud (Hydraulique)
- Il est largement maillé, héritage du nucléaire
- La France a trois régimes de vent et un potentiel offshore très important

**Etude RTE-AIE sur un système 100% ENR** : [https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-01/RTE-AIE\\_synthese%20ENR%20horizon%202050\\_FR.pdf](https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-01/RTE-AIE_synthese%20ENR%20horizon%202050_FR.pdf)



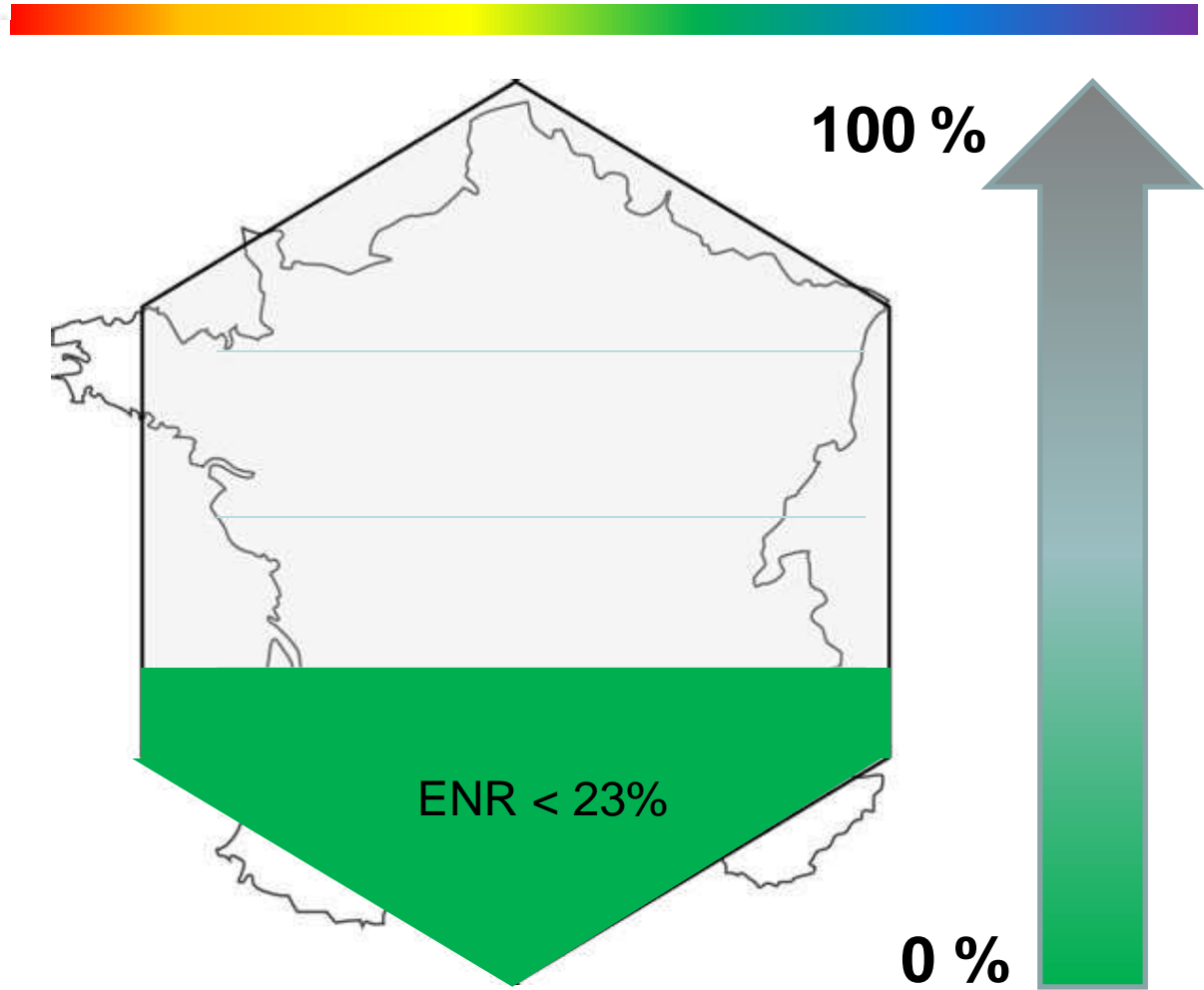
# Des questions ?



**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...





# Cours 10-11

Dans le cours N°10, nous avons étudié **le cadre d'un système à 100%** d'électricité renouvelable, exploré le fonctionnement du système électrique, et enfin observé les outils traditionnels et récents pour représenter le réseau. Dans ce cours 11, nous revenons sur **les options de flexibilité** et notamment sur **le stockage d'énergie**, dernier maillon de la construction du 100% ENR.

- ✓ 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





# Les choix de la flexibilité



- Pour un réseau et un système donné :
- Flexibilité du marché, tarifs, etc.
  - Production par des centrales très réactives, turbines à gaz, etc.
  - Débrayage lors des pointes extrêmes des moyens de production variables
  - Stockages innovants
  - Meilleures prévisions météo

Better seasonal forecasts for the renewable energy industry  
Anton Orlov, Jana Sillmann & Ilaria Vigo  
Nature Energy volume 5, pages108–110(2020)



# La déconnexion peut se justifier



Déconnecter

- ✓ Le coût écologique et économique du stockage n'est pas forcément justifié. Il est même souvent intéressant de simplement déconnecter des ressources
- ✓ Une partie des productions PV ou éolienne de production de pointe ne se produit que très peu de temps et peut donc être réduite sans grande perte économique pour éviter de surdimensionner le réseau.
- ✓ Il peut s'agir également de choix provisoires motivés par des considérations économiques et logistiques (ex tourisme).



# Autres options

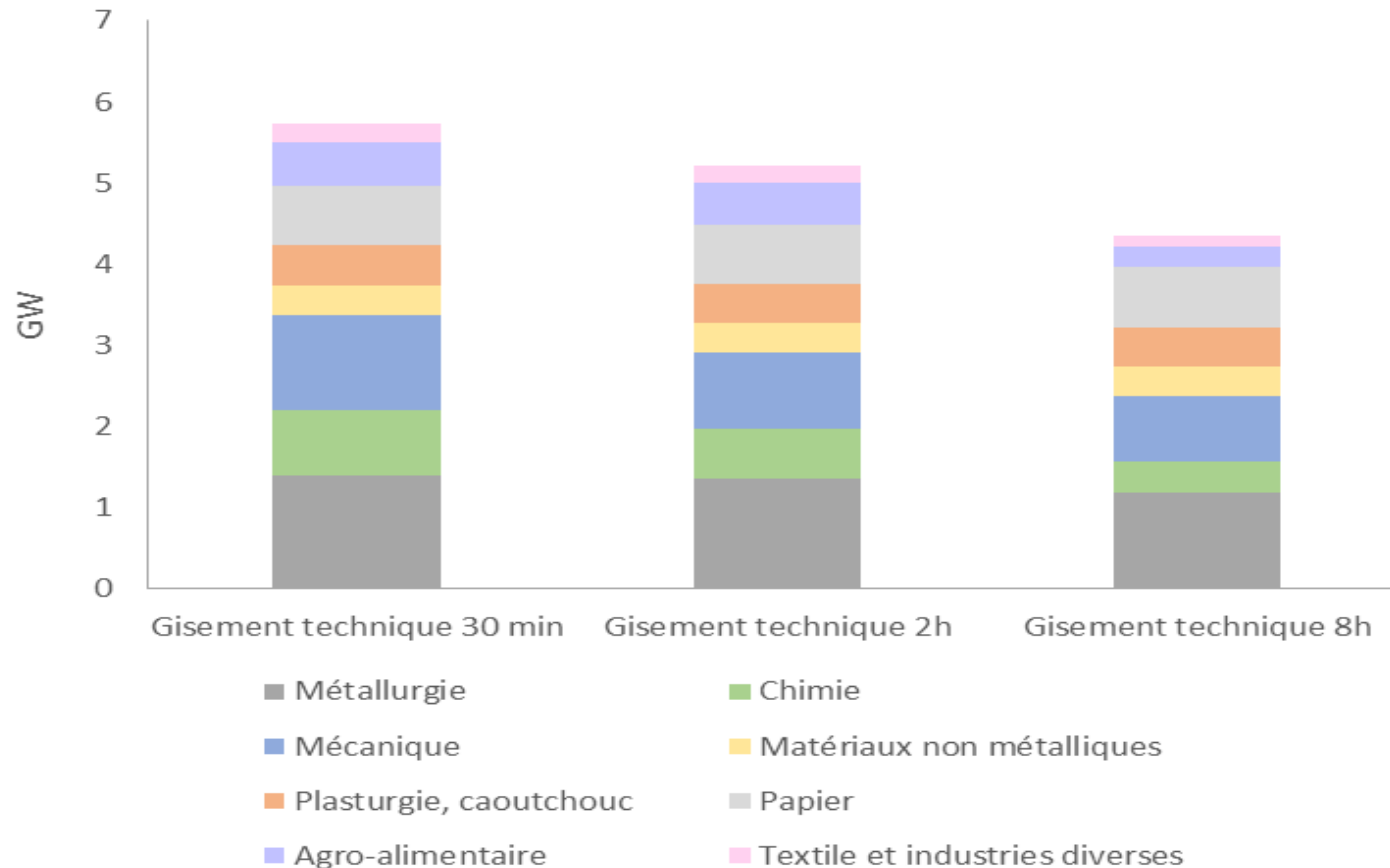


Fonderie électrique (fiche métier).  
Les puissances de délestage potentielles de l'industrie et du tertiaire atteignent plus de 7 GW  
Attention que l'on comptera soit la pointe brute (ce qui est délesté chez le client) soit une valeur coïncidente qui se retranche à la pointe.

- ✓ On distingue des options pilotables, parfois à la main des gestionnaires du réseau ou des agrégateurs
- ✓ Les options tarifaires (Tempo/EJP) ont fait leurs preuves mais sont en déshérence (cf cours 9)
- ✓ Les fermetures hivernales industrielles et tertiaires négociées
- ✓ La gestion et la maîtrise dans le bâtiment et l'industrie
- ✓ L'auto électrique représente une source importante de délestage mais aussi une capacité d'injection sur le réseau.



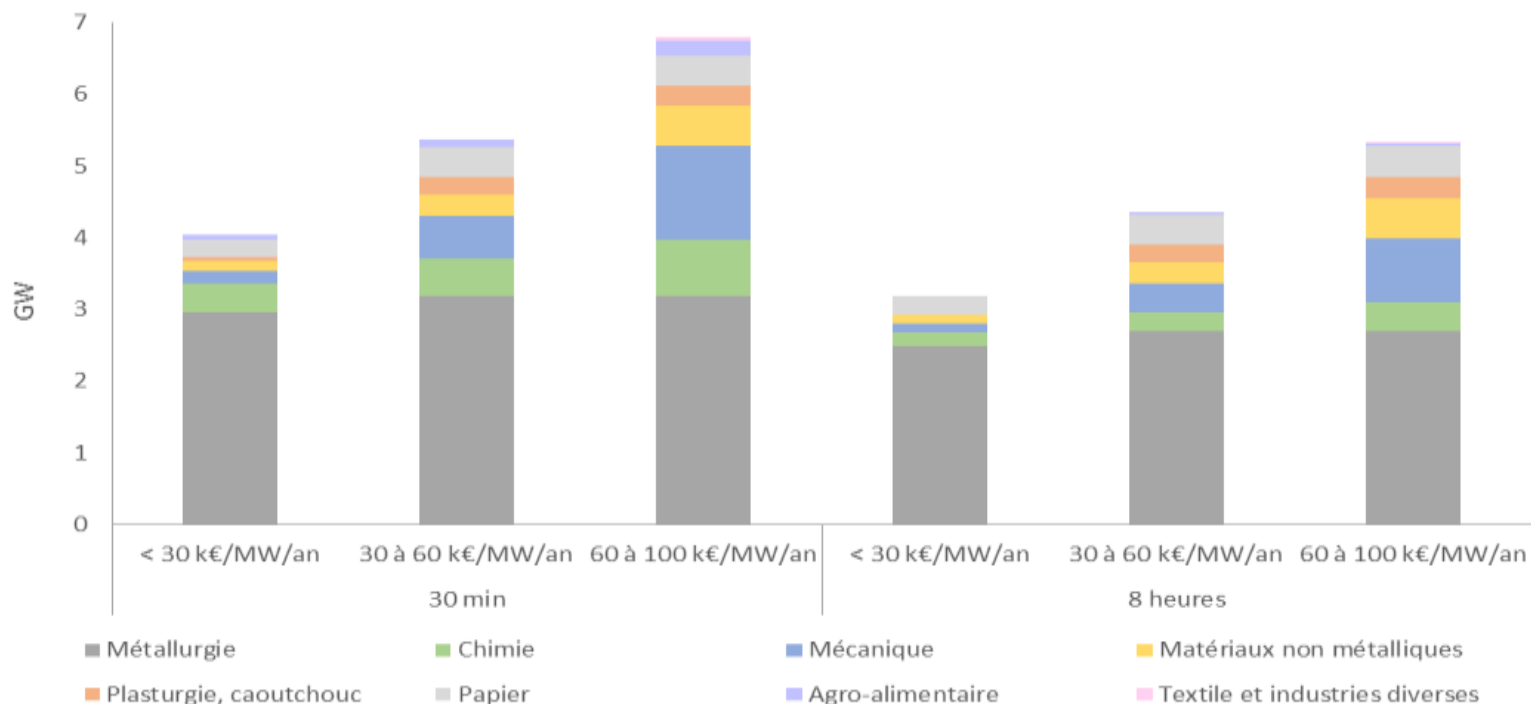
# Délestage industrie (pointe)



Le potentiel de l'industrie vu par l'ADEME (2017) cité par le groupe RTE sur la flexibilité (2020). Ce gisement reste inférieur à des évaluations d'autres pays



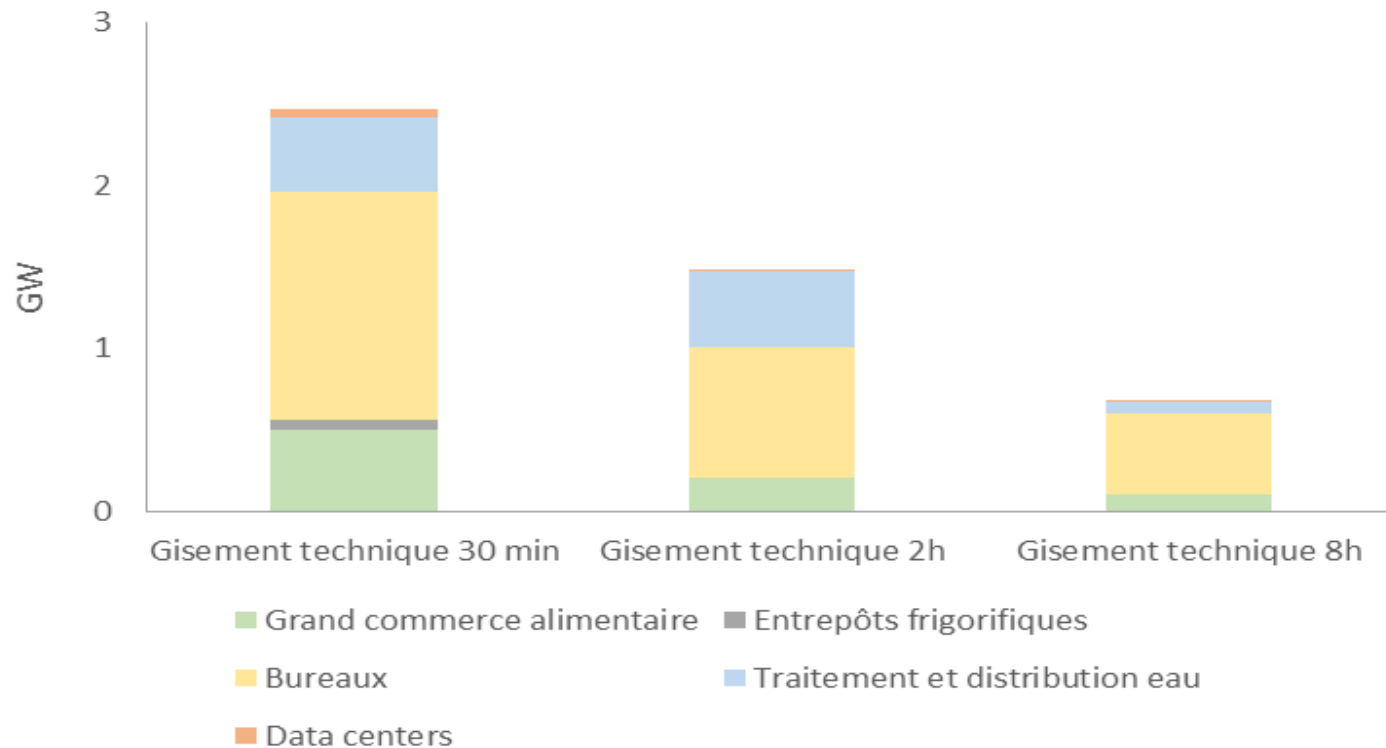
# Mais cela dépend du coût



Le potentiel de l'industrie vu par l'ADEME (2017) cité par le groupe RTE sur la flexibilité. Toutes ces valeurs sont «contingentes» c'est à dire qu'elles viennent de questionnaires et non d'appels d'offres ou d'engagements fermes, ce qui pose **la question de crédibilité** face aux «sceptiques de la transition».



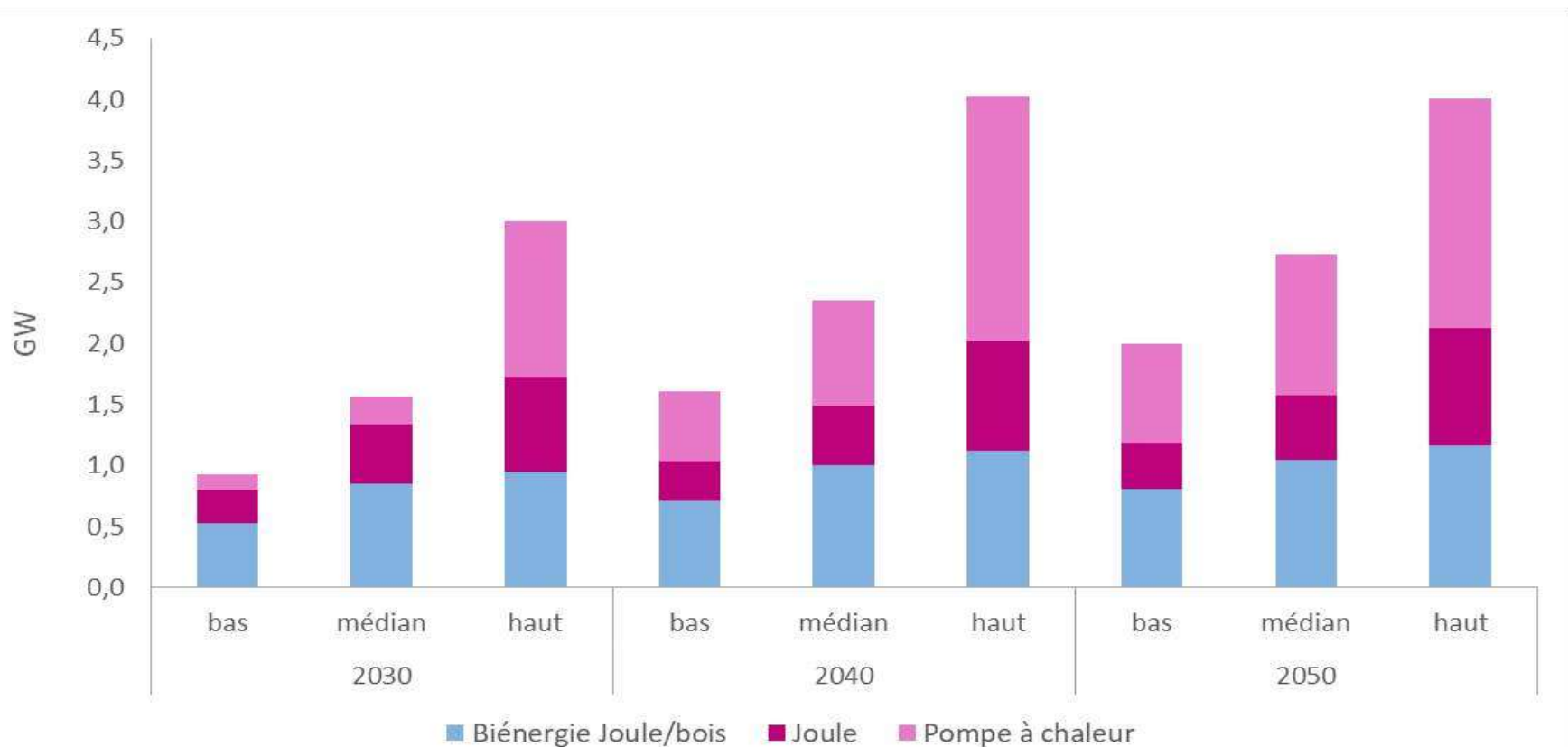
# Délestage tertiaire (pointe)



Le potentiel du tertiaire vu par l'ADEME (2017) cité par le groupe RTE sur la flexibilité (2020). Des mesures plus structurelles (dates des soldes, horaires aménagés...) ne sont pas incluses



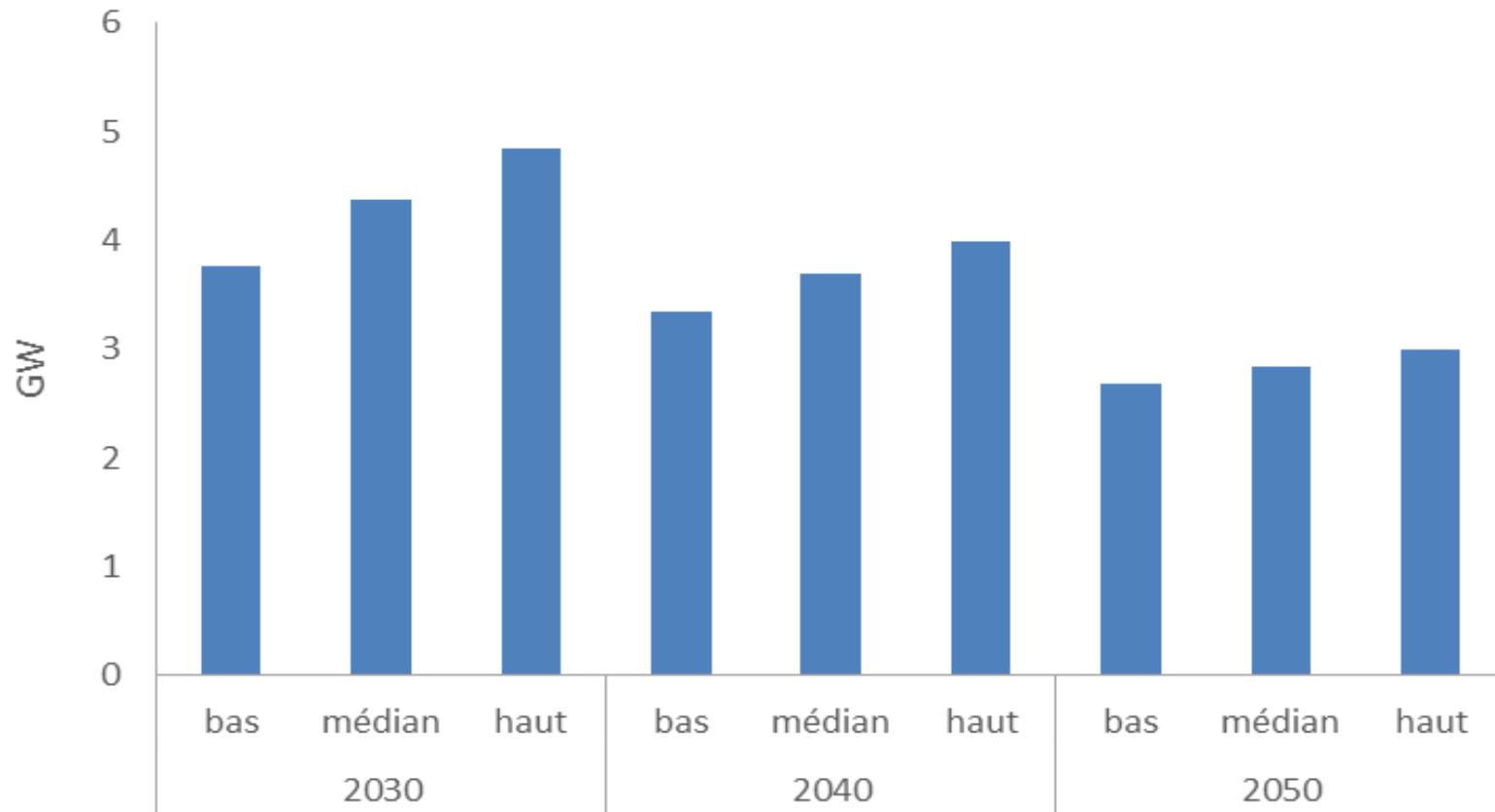
# Chauffage résidentiel (pointe)



Le potentiel de délestage du chauffage domestique cité par le groupe RTE sur la flexibilité (2020). Les variantes vont de **30% à 50% de participation** en 2050. Il correspond assez bien à l'expérience Tempo



# Chauffe-eaux (pointe)



Le potentiel des chauffe-eaux domestiques vu par le groupe RTE sur la flexibilité (2020). RTE suggère l'option d'une gestion fine (temps réel ou «DR») et non seulement une programmation pour accueillir les ENR.

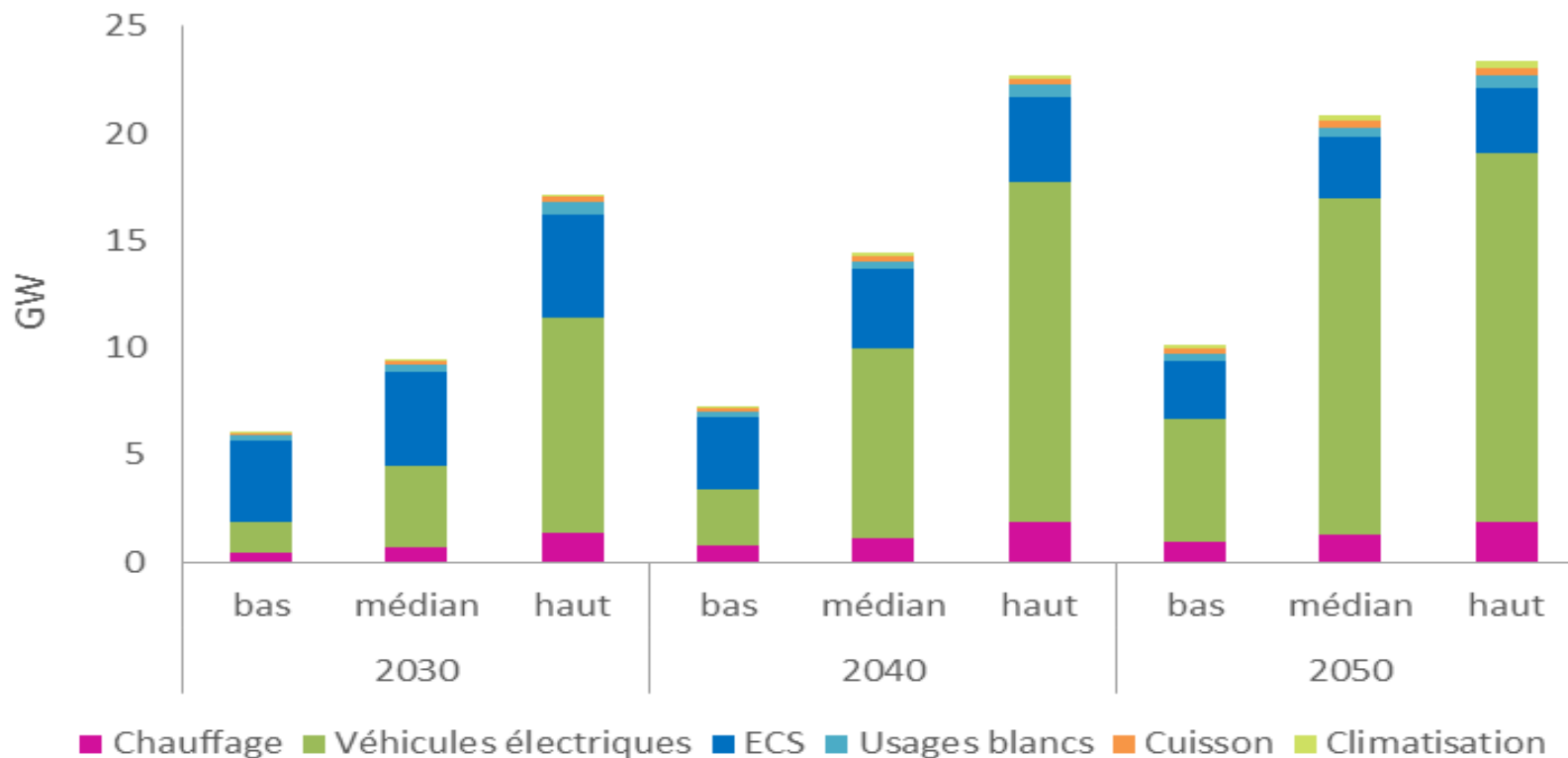


Vers 100% ENR...





# Potentiels domestiques



Les potentiels domestiques vus par le groupe RTE sur la flexibilité (2020). RTE suggère l'option d'une gestion fine (temps réel) et non seulement une programmation pour accueillir les ENR. L'hypothèse basse est liée au mécanisme de capacité actuel qui limite ces politiques.



# Usages flexibles en 2050 (étude ADEME)

Usage	Part flexible en 2050	Consommation flexible journalière moyenne	Contraintes sur la flexibilité
Eau-chaude sanitaire	100%	48GWh de consommation journalière déplaçable	Demande journalière à satisfaire dans la journée (48GWh) Puissance maximum instantanée de 12 GW
Véhicules électriques (charge à la maison)	80%	Environ 90 GWh de consommation journalière à satisfaire sous contrainte	Charge uniquement quand les véhicules sont connectés, selon des profils statistiques d'arrivée et de départ ; les véhicules doivent être entièrement chargés au départ Pas de vehicle-to-grid
Véhicules électriques (charge au travail)	80%	Environ 65 GWh de consommation journalière à satisfaire sous contrainte	Puissance maximum : 3 kW par véhicule pour les charges à la maison, 7 kW par véhicule au travail.
Chauffage	75%	14 GWh déplaçables par jour en moyenne sur l'hiver (2 effacements non consécutifs d'une heure)	Report de l'énergie effacée sur les heures suivantes Puissance maximum effacée de 7GW en moyenne sur l'hiver
Produits blancs	38%	Volume journalier entre 8 GWh et 14 GWh	Demande journalière à satisfaire Puissance maximum instantanée de 4 à 7 GW
Industriels	50%	Capacité d'effacement de 7 GW en moyenne	Coût d'effacement : 300 €/MWh En pratique, cet effacement n'est appelé que très rarement (de l'ordre de 10h par an en 2050)
Pompes à chaleur industrielles	100%	Résultat de l'optimisation	Capacité de pompe à chaleur ou électrolyseur optimisée avec un gisement maximum de chaleur et d'hydrogène en TWh annuels, et un prix de vente exogène pour l'hydrogène ou la chaleur produite
Electrolyse de l'eau pour usage industriel	100%	Résultat de l'optimisation	
Electrolyse de l'eau pour usage mobilité	100%	Résultat de l'optimisation	



# Une échelle de coûts croissants



Il existe aussi un enjeu institutionnel national et européen dans l'organisation du réseau:

C. Weber 2019, Risky being green, Nature Energy

<https://doi.org/10.1038/s41560-019-0494-z>

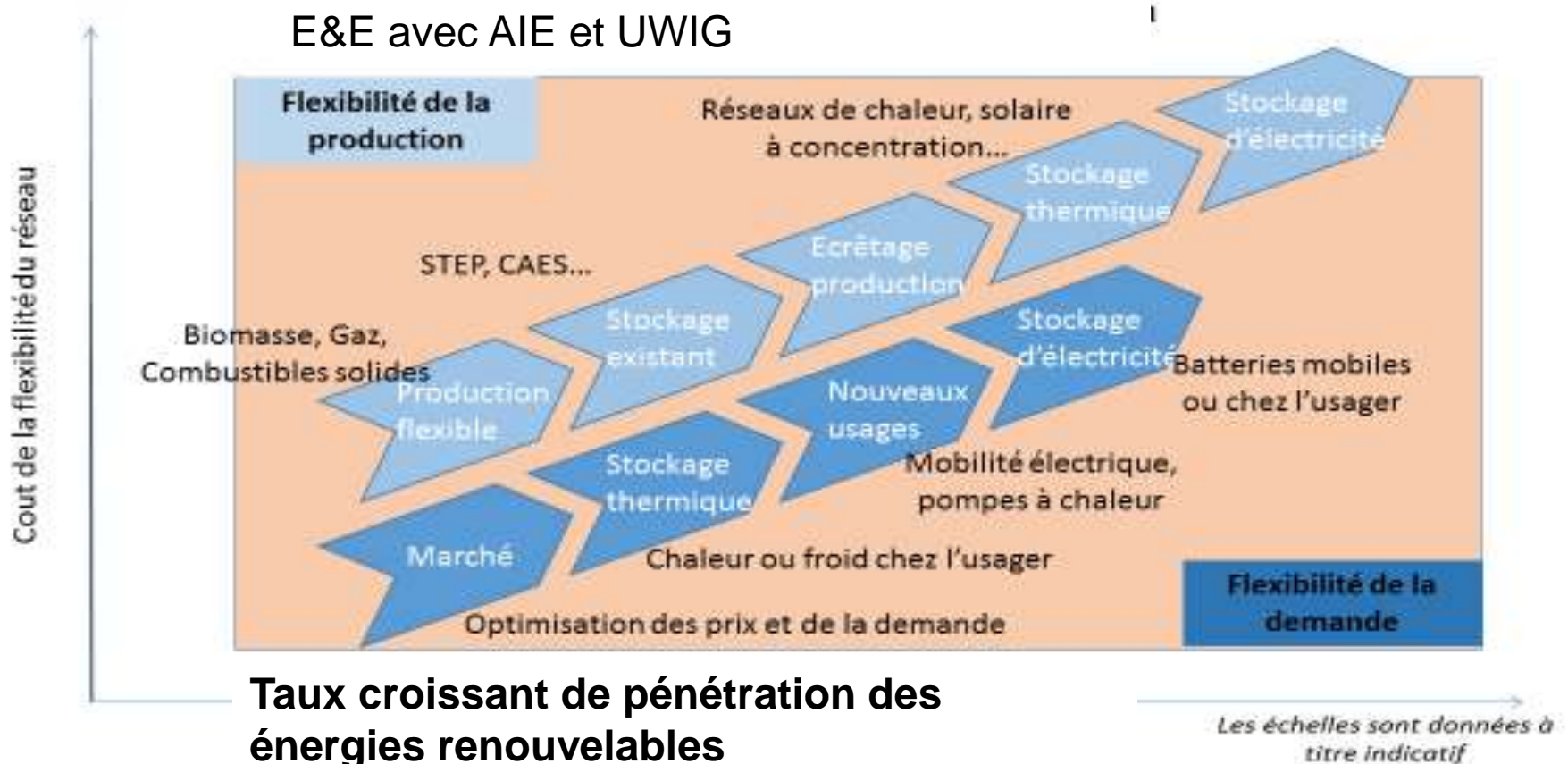
L'intégration progressera en passant des solutions des plus simples aux plus coûteuses :

- ✓ adaptation des ressources existantes
- ✓ foisonnement local, régional, international des productions renouvelables et des demandes
- ✓ synchronisation des producteurs sous contrainte carbone
- ✓ modulation de la demande électrique
- ✓ stockage saisonnier d'électricité, de chaleur ou de biomasse...

Sur plus longue période, on adapte aussi le réseau de transports européen et l'organisation du marché.



# Les ressources de flexibilité



Graphe des options de flexibilité dans le réseau (à court-moyen terme). Les additions au réseau et modifications fortes des usages ne sont pas représentées.



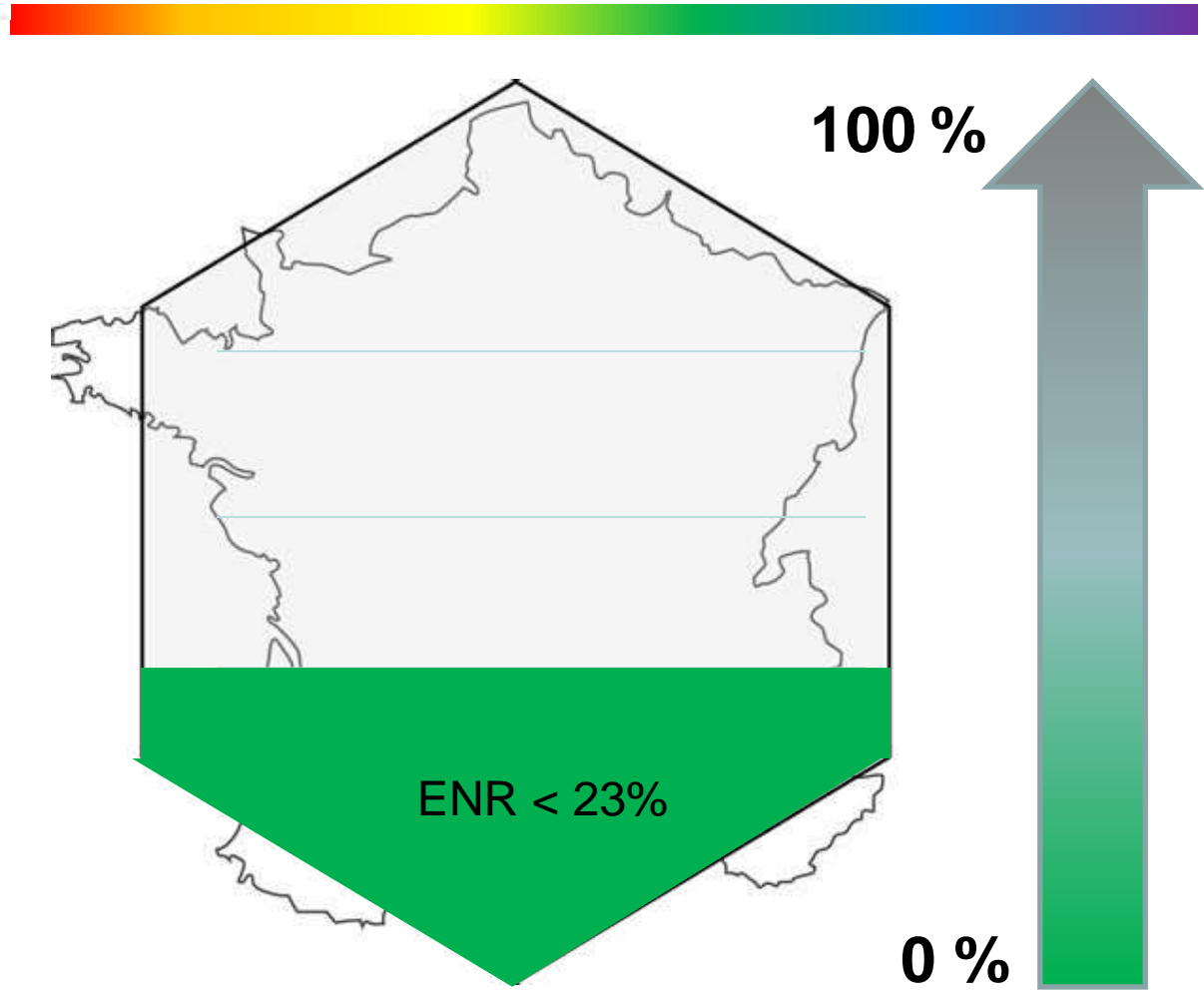
# Des questions ?



**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...





# Cours 10-11

Dans le cours N°10, nous avons étudié **le cadre d'un système à 100%** d'électricité renouvelable, exploré le fonctionnement du système électrique, et enfin observé les outils traditionnels et récents pour représenter le réseau. Dans ce cours 11, nous revenons sur **les options de flexibilité** et notamment sur **le stockage d'énergie**, dernier maillon de la construction du 100% ENR.

- ✓ 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



# Jour, semaine, année

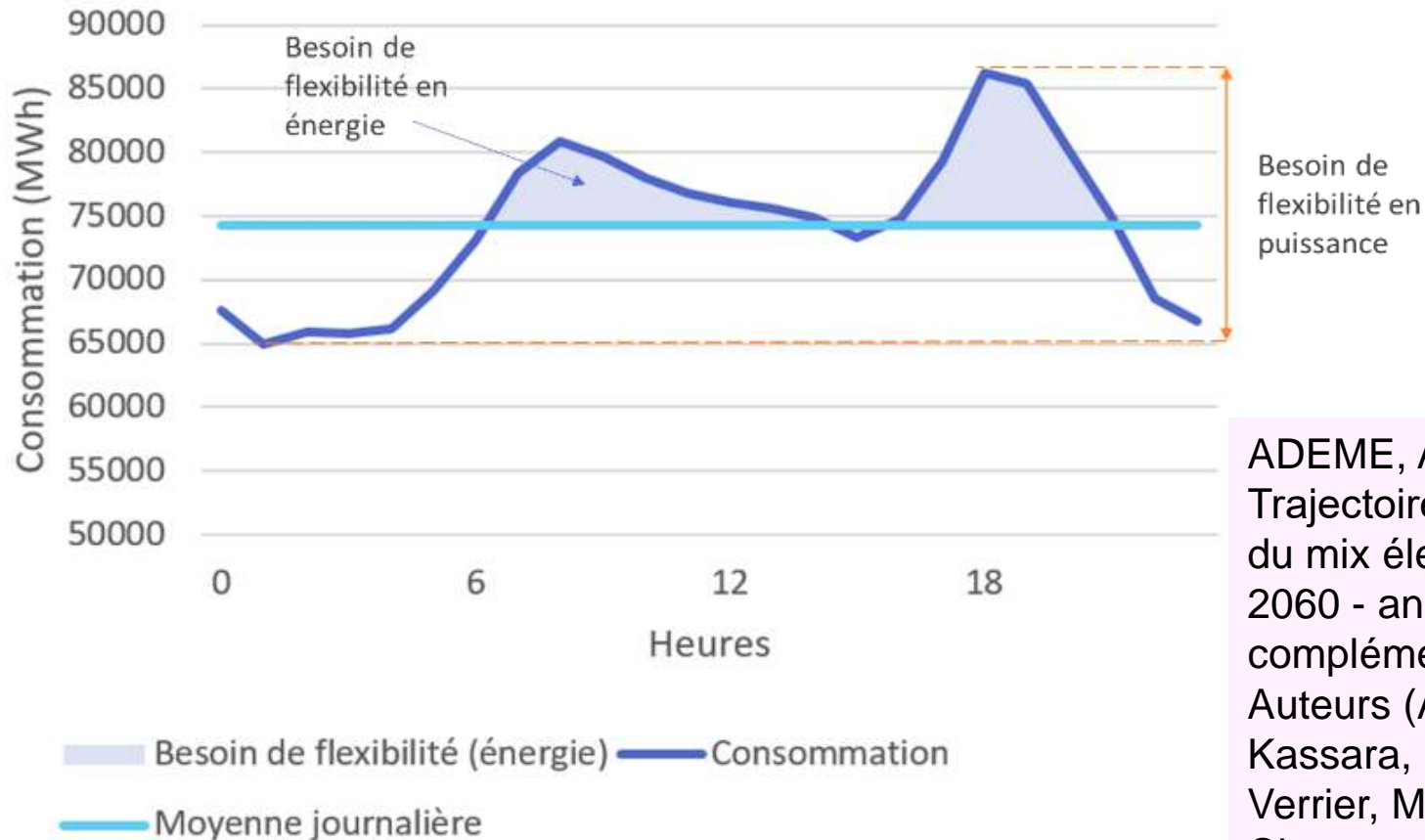
Notre problème comprend trois niveaux distincts

- Aux heures et à la journée, un fonctionnement peu différent. Se pose la question de l'absence d'inertie du solaire PV face au réseau, des transitoires côté demande, du pilotage offre-demande au niveau micro-local face au développement de l'auto-consommation par exemple
- A la semaine, la prévision météo a fait des bonds de géant et doit s'adapter pour intégrer les nouvelles offres de flexibilité côté demande et côté offre.
- A l'année, il s'agit aussi d'un compromis coût/fiabilité technique/écologique qui peut comprendre des composantes décentralisées laissées au marché et aux acteurs locaux, et des infrastructures à la main du réseau national ou européen. Cette réserve « stratégique » peut comprendre une part de stockage centralisé type méthanation.



# La question quotidienne

## Besoin de flexibilité journalière

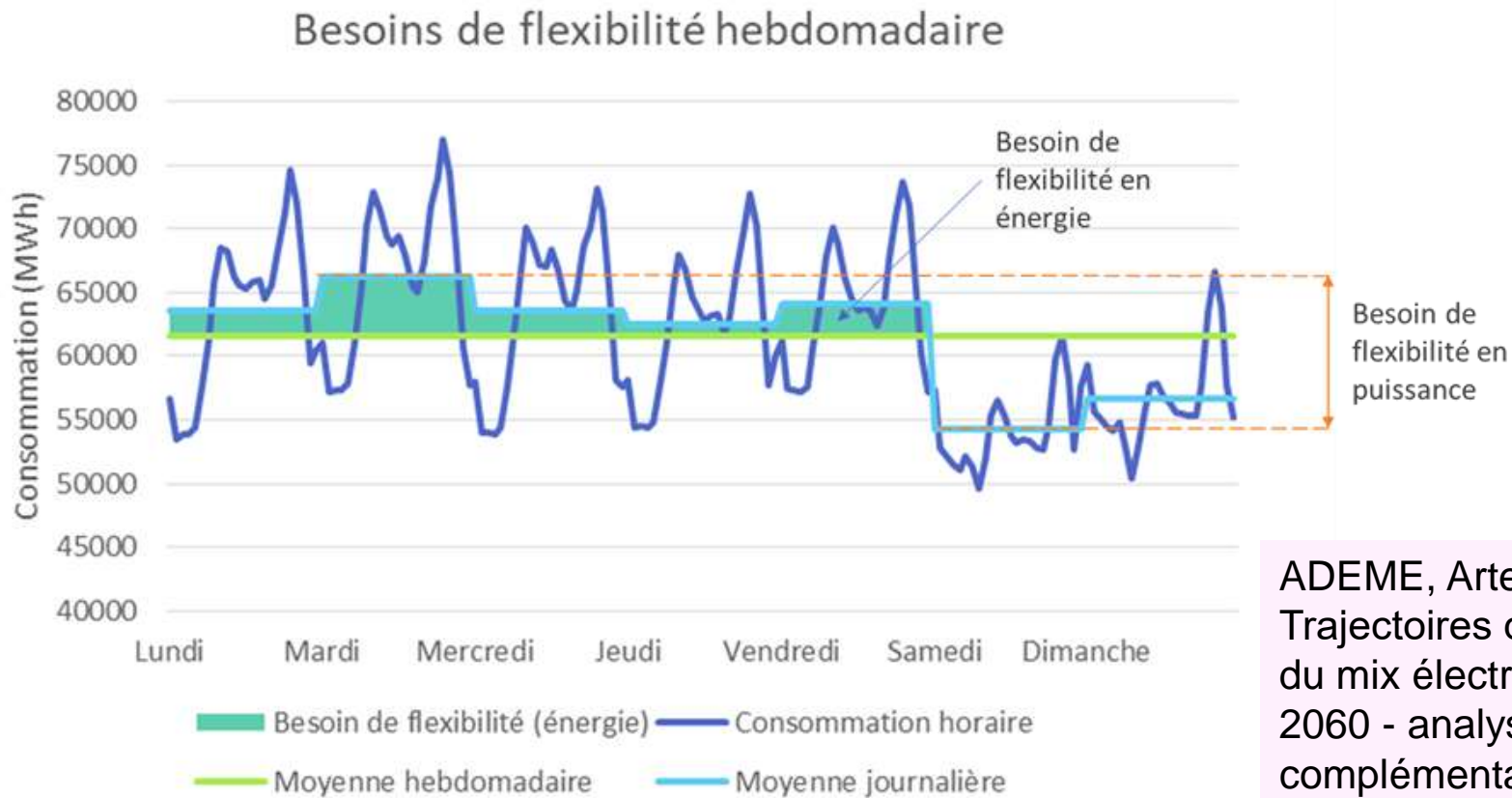


ADEME, Artelys, 2019, Trajectoires d'évolution du mix électrique 2020-2060 - analyses complémentaires. Auteurs (Artelys) : Ghita Kassara, Gaspard Peña Verrier, Maxime Chammas, Laurent Fournié





# La question hebdomadaire

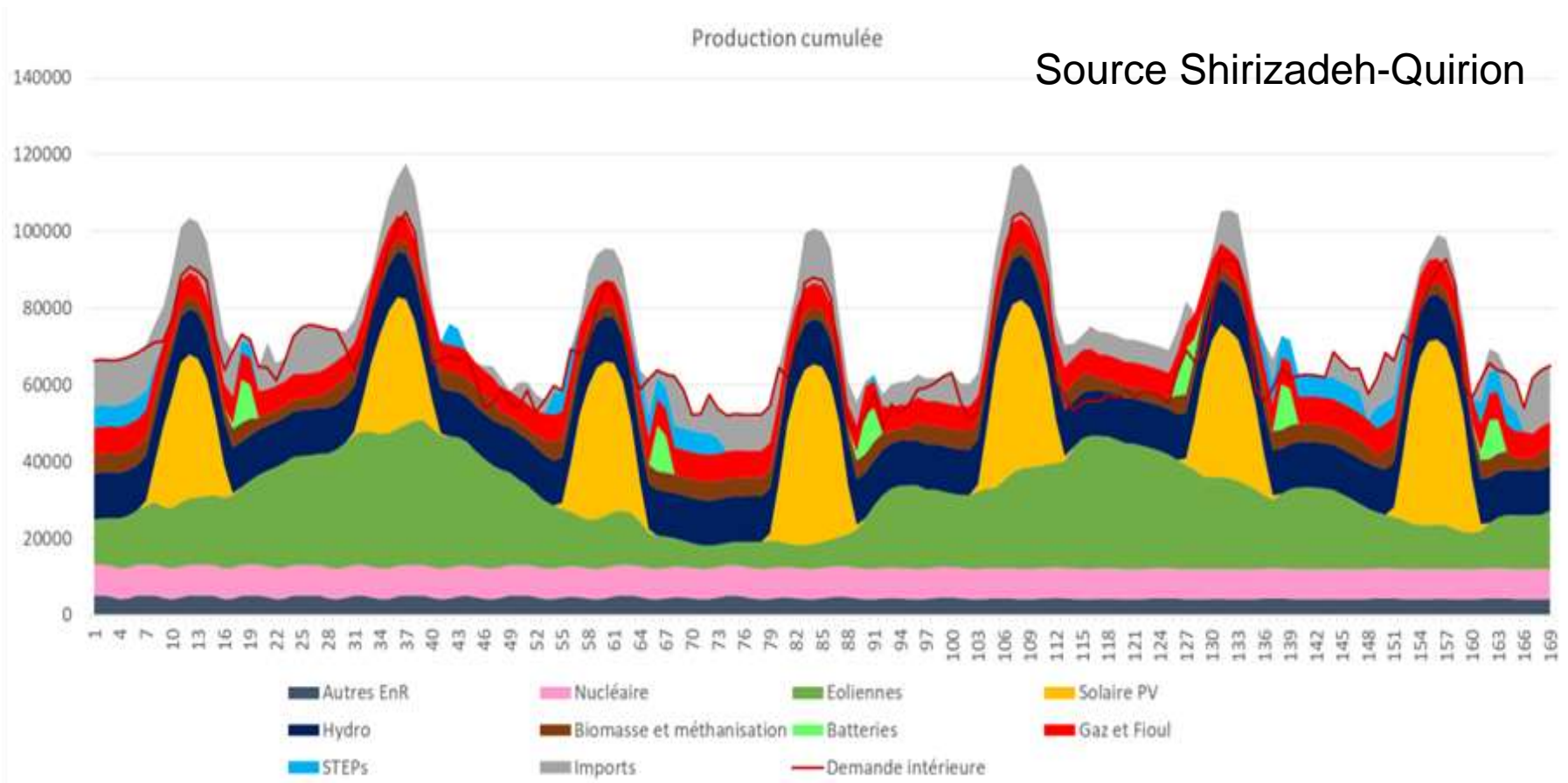


ADEME, Artelys, 2019, Trajectoires d'évolution du mix électrique 2020-2060 - analyses complémentaires. Auteurs (Artelys) : Ghita Kassara, Gaspard Peña Verrier, Maxime Chammas, Laurent Fournié



# Une semaine « difficile »

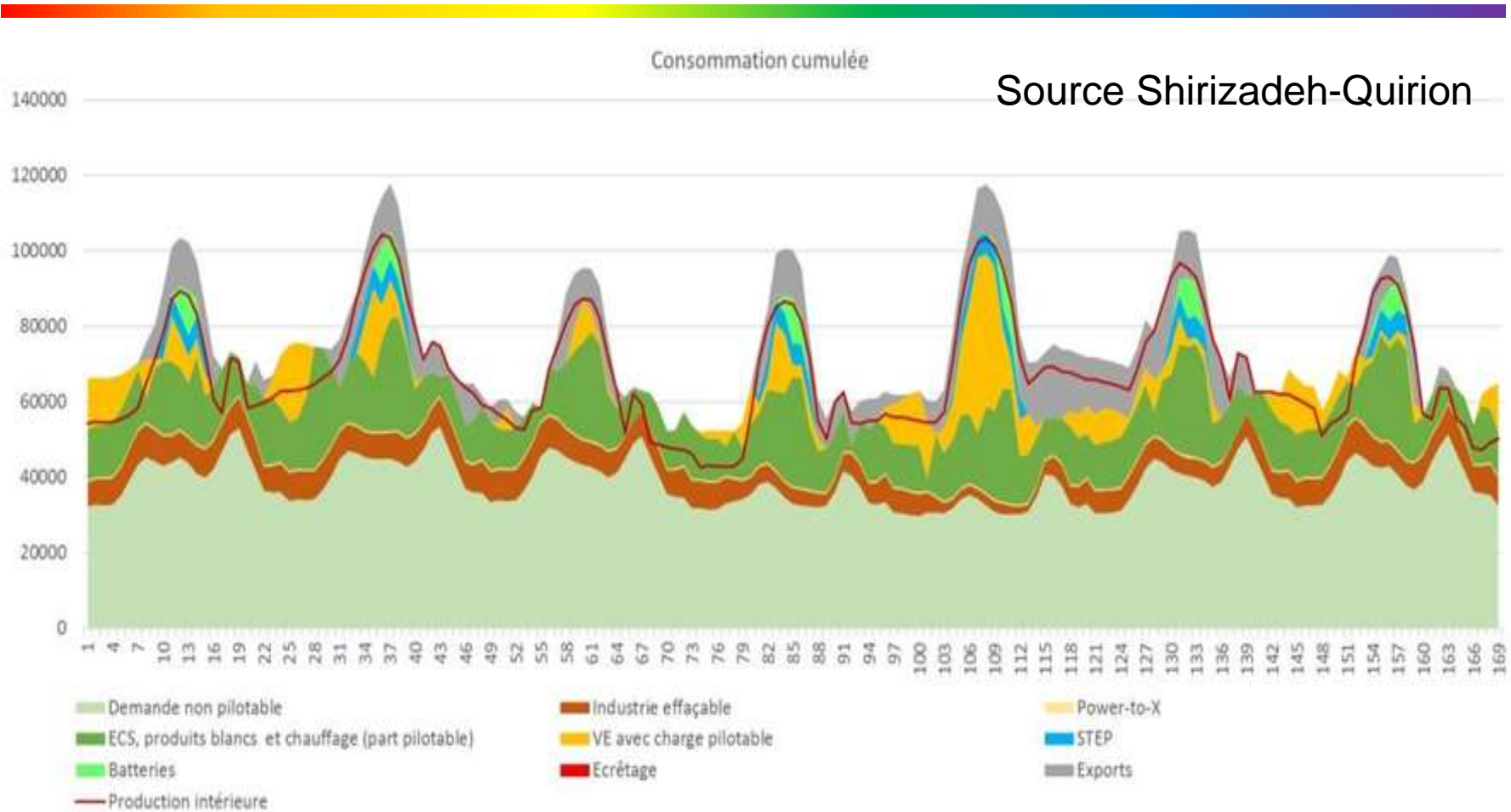
Visions ADEME: Production cumulée en France pour la trajectoire « Référence » en 2050, semaine du 13 au 19 février, ajusté sur scénario climatique 2012 – 2013



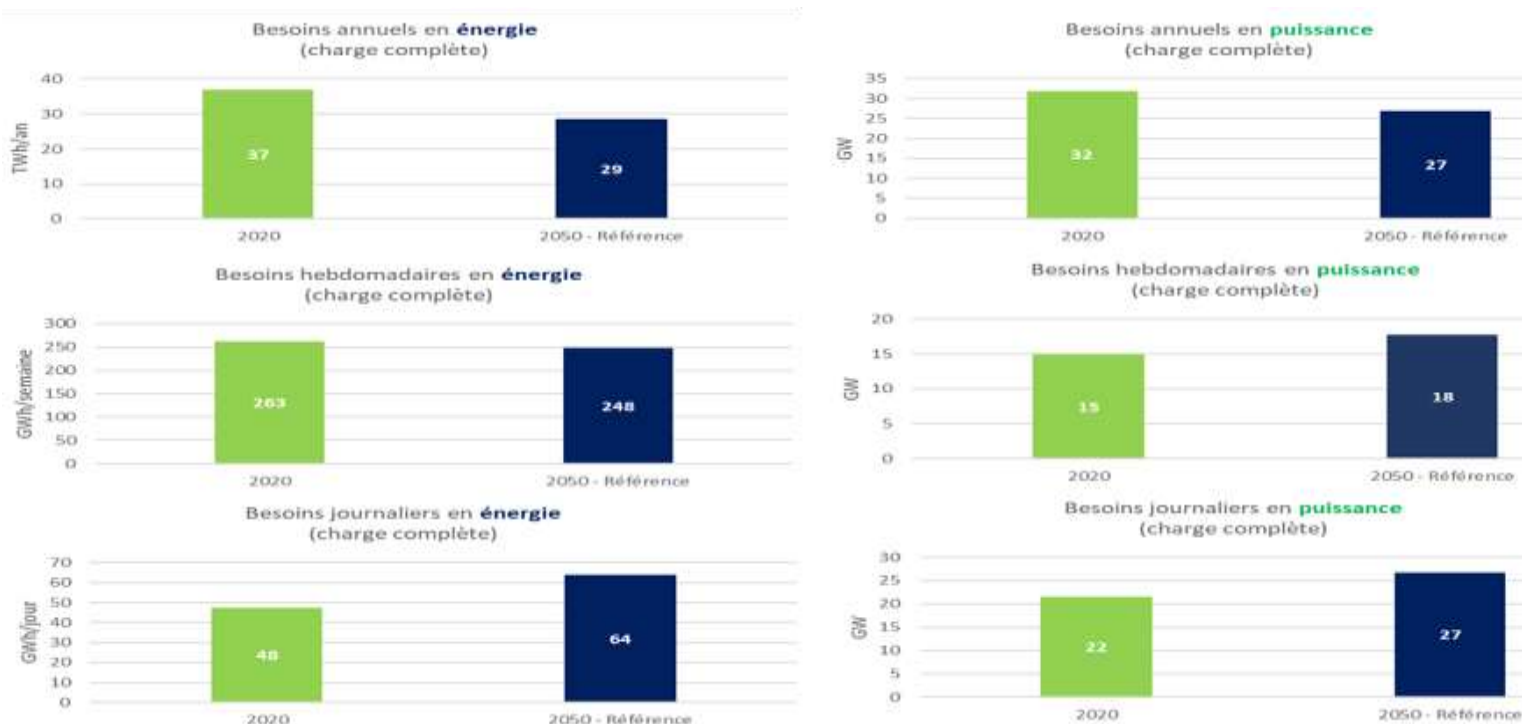
Vers 100% ENR...



# La même semaine en consommation



# Le défi est avant tout saisonnier

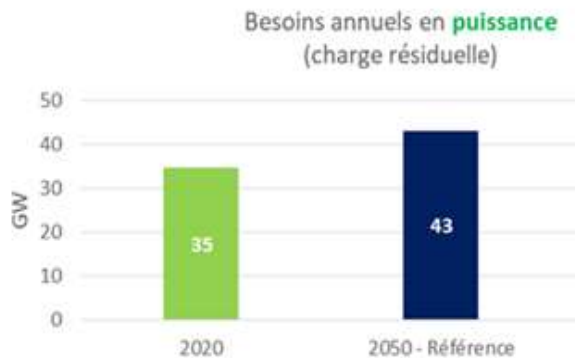


Le principal besoin de flexibilité ou de stockage est saisonnier : Pour remplacer 37 TWh, principalement de fossiles, le calcul du modèle Artelys demande 29 TWh supplémentaires. On va aussi tenir compte des variations possibles de la demande entre années, qui accroissent ces grandeurs

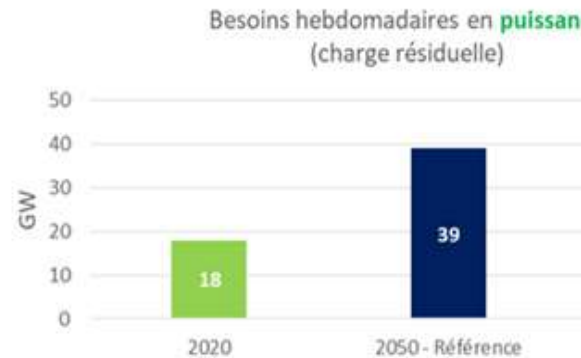


# Besoins en puissance

Besoins annuels



Besoins hebdomadaires



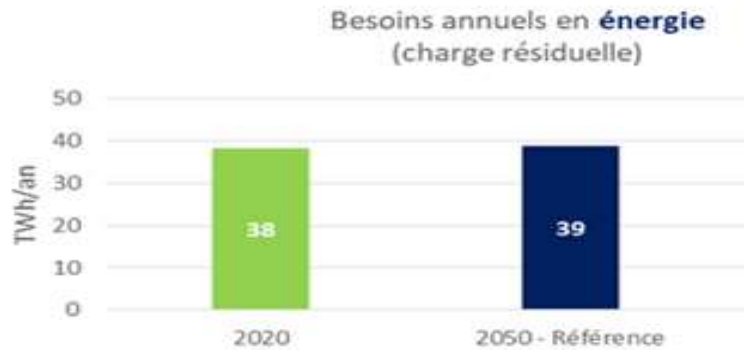
Besoins journaliers



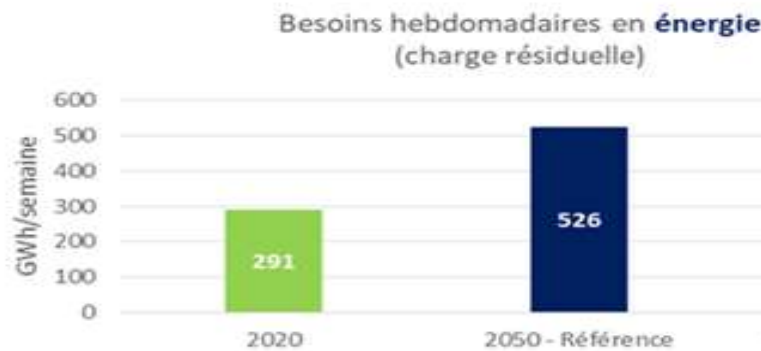
Dans l'étude ADEME, le besoin de puissance nécessaire pour les trois cycles dépasse celui des moyens actuels de la pointe. Ce calcul est réalisé avant les programmes d'action sur la demande ou sur le report des consommations à court terme

# Besoin en énergie

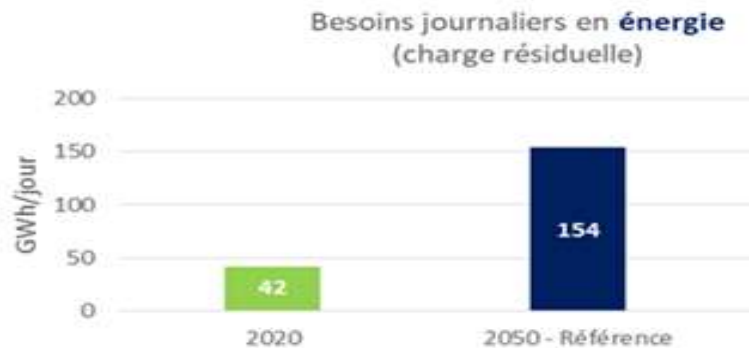
Besoins annuels



Besoins hebdomadaires

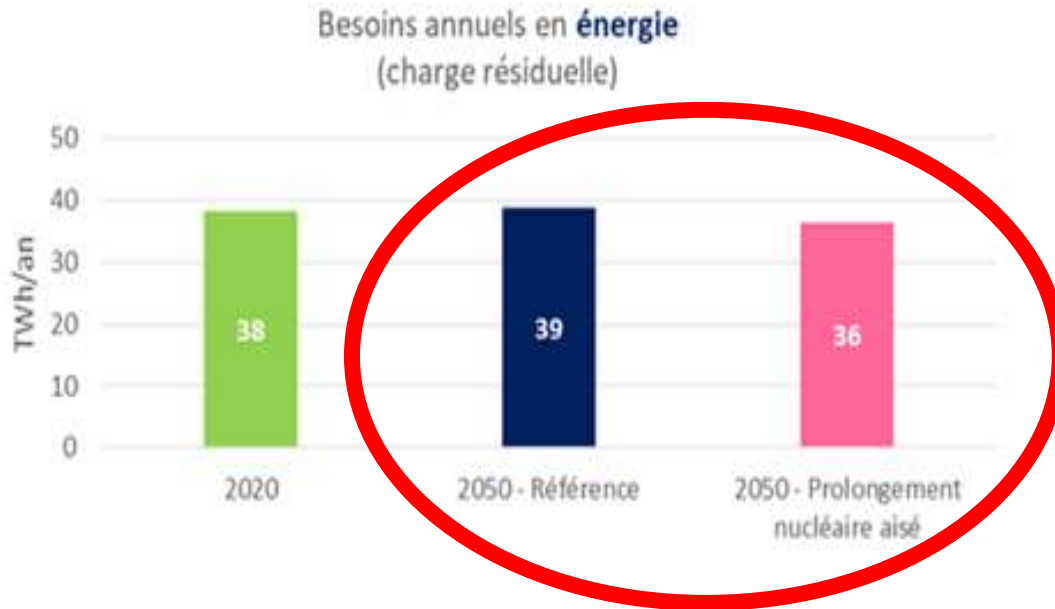


Besoins journaliers



Dans l'étude ADEME, l'énergie de pointe saisonnière annuelle (39 TWh) est très englobante par rapport à celle des autres besoins journaliers (154 GWh/jour) ou hebdomadaires (526 GWh) bien plus limités.

# Et avec du nucléaire?

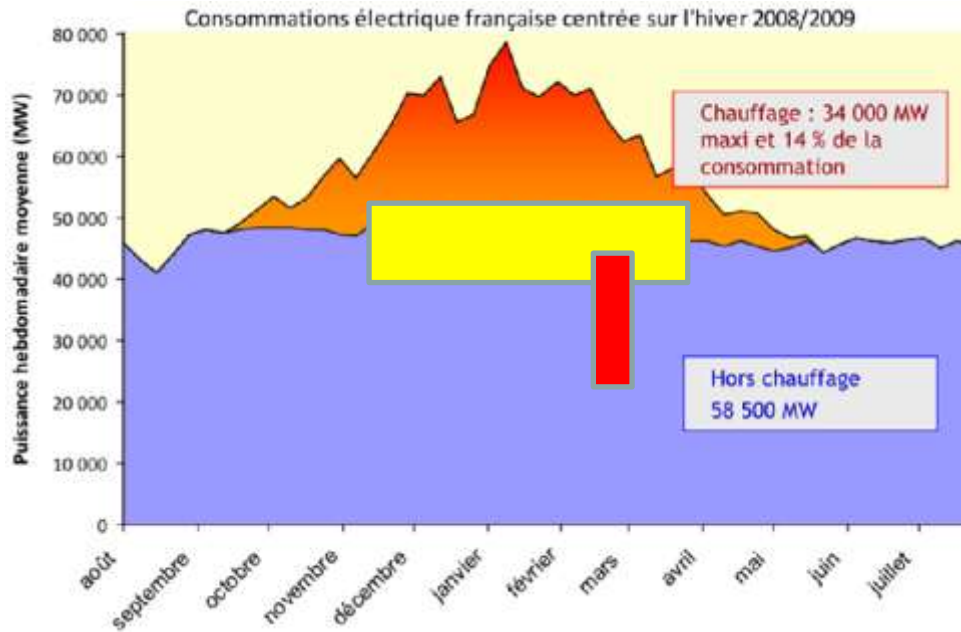


Besoins de puissance en "charge résiduelle"			
	Actuel	Sans nucléaire	Avec nucléaire
Annuel	35	43	40
Hebdo	18	39	32
Quotidien	22	64	55
Besoins d'énergie en "charge résiduelle"			
	Actuel	Sans nucléaire	Avec nucléaire
Annuel	38	39	36
Hebdo	0,291	0,526	0,454
Quotidien	0,042	0,154	0,131

Source Etude ADEME 2019

Dans l'étude ADEME, l'option « nucléaire prolongé » change peu le volume du stockage saisonnier nécessaire, la principale grandeur. Le besoin de flexibilité en «charge résiduelle » se monte à 36 TWh avec nucléaire contre 39 TWh sans. Les autres besoins d'énergies et puissances sont légèrement moindres pour la version «avec nucléaire» (tableau) et surtout d'un ordre de grandeur inférieur pour l'énergie nécessaire.

# La montagne et la réserve



La «montagne de charge» du chauffage électrique (cf. cours 10) en comparaison des réserve. On peut définir une demande «avant maîtrise» qui pourra inclure une partie de recharges véhicules et une partie de substitution de chauffage

Le besoin d'énergie saisonnier s'exprime de deux façons:

- La réserve «stratégique» saisonnière (en rouge) permet de **faire face à un ou plusieurs évènements extrêmes** sur la production éolienne combinée.
  - La «montagne de charge» sur la saison hivernale est grignotée par une série de mesures réparties (en jaune). Elle est liée au **besoin de chauffage** et d'usages thermiques
- Ces deux données du besoin «résiduel brut» sont **objectivables** sur un scénario donné avec **une incertitude très limitée**





# Quantification

40 TWh à économiser ou déplacer vers l'été soit 15 GW en moyenne sur quatre mois (exemple ADEME)



10 TWh à effacer ou substituer économiser ou déplacer soit 25 GW sur 400 heures (exemple du scénario WWF « normatif »)



<--- La diminution de la montagne de charge peut être répartie sur la période hivernale. Elle peut inclure des mesures structurelles et très anticipées

<-- La réserve «stratégique» saisonnière est incluse dans le besoin annuel et doit être activable dans un préavis de l'ordre de la semaine

Par ailleurs, les mesures « ancillaires » (réserve tournante, fréquence..) sont déjà actionnables ou incluse dans la «boucle» quotidienne.

L'utilisation des données MERRA donne une valeur précise à ces deux grandeurs pour un parc de production donné. On peut les évaluer sur plusieurs années pour obtenir une incertitude très réduite. Par ex. 10-20 années MERRA transposées donnent des valeurs très robustes.



# Cadre du scénario



Le surmoi des modélisateurs :  
Laurence Tubiana et Laurent  
Fabius à la COP21 de Paris 2015  
Greta Thunberg à Davos «I want  
you to panic»



Priorité doit aller au scénario compatible 1,5°C et aux objectifs du développement durable.

L'économie du scénario, la logique industrielle ou l'emploi suggèrent des compromis un peu différents.  
La question de développements de filières européennes et des apprentissages industriels globaux peut aussi entrer en ligne de compte.

Des questions «pédagogiques» voire l'action des lobbys peut amener des choix discutables pour rendre «certaines» et «nationales» des propositions de scénarios au détriment d'autres critères.



# Options externes



Centrale solaire PV Prieska en Afrique du Sud (document Total). Chili, Mauritanie... le coût H2 est divisé si on produit dans un désert ensoleillé. Le bilan carbone (même avec les tankers) n'est pas forcément pire... La France ou l'UE peut en faire un outil de développement au service des contributions climat des pays

La turbine à gaz associée à une importation d'hydrogène vert (ou dérivés) fait partie des solutions décarbonées au meilleur marché à moyen terme pour la réserve (par ex. Agora EnergieWende)

Ces options sont à mettre en regard des besoins liés aux transports, à l'industrie et à la pointe de fonctionnement du chauffage qui ont aussi des besoins en pointe.



# La biomasse et le biogaz



Alkylation et reformage d'huiles de palme à La Mède (document Total). La déforestation importée est une des plus importantes contributions aux changements climatiques

L'objectif d'autonomie du seul secteur électrique doit être pesé face aux autres risques (bio-carburants, biomasse, protéines végétales et.).

Il faut aussi prendre en compte les limitations des autres réseaux dont celui du gaz pour le chauffage.

Pour cela le «quota» de biomasse doit être limité et centré sur les besoins de pointe, voire réservé à d'autres secteurs.



# Les swaps éoliens



Vue de la centrale London Array. Le barycentre des projets d'éolien offshore se trouve au sud de la mer du Nord, proche du «hub» de Sangatte et bien relié vers Paris. Au delà d'un contrat de swap lié à des investissements directs, une mutualisation plus poussée suppose un nouveau traité entre pays riverains de la mer du Nord et de la Manche.

L'investissement supplémentaire en éolien off-shore hors du territoire français est d'ores et déjà à bon marché.

Diverses formes de «swap» (échange de production) permettent de garantir un ruban ferme de production.

Un tel choix permet à la France de participer à l'essor industriel gigantesque planifié en mer du Nord. Ceci peut être couplé à un développement éolien flottant côté français.



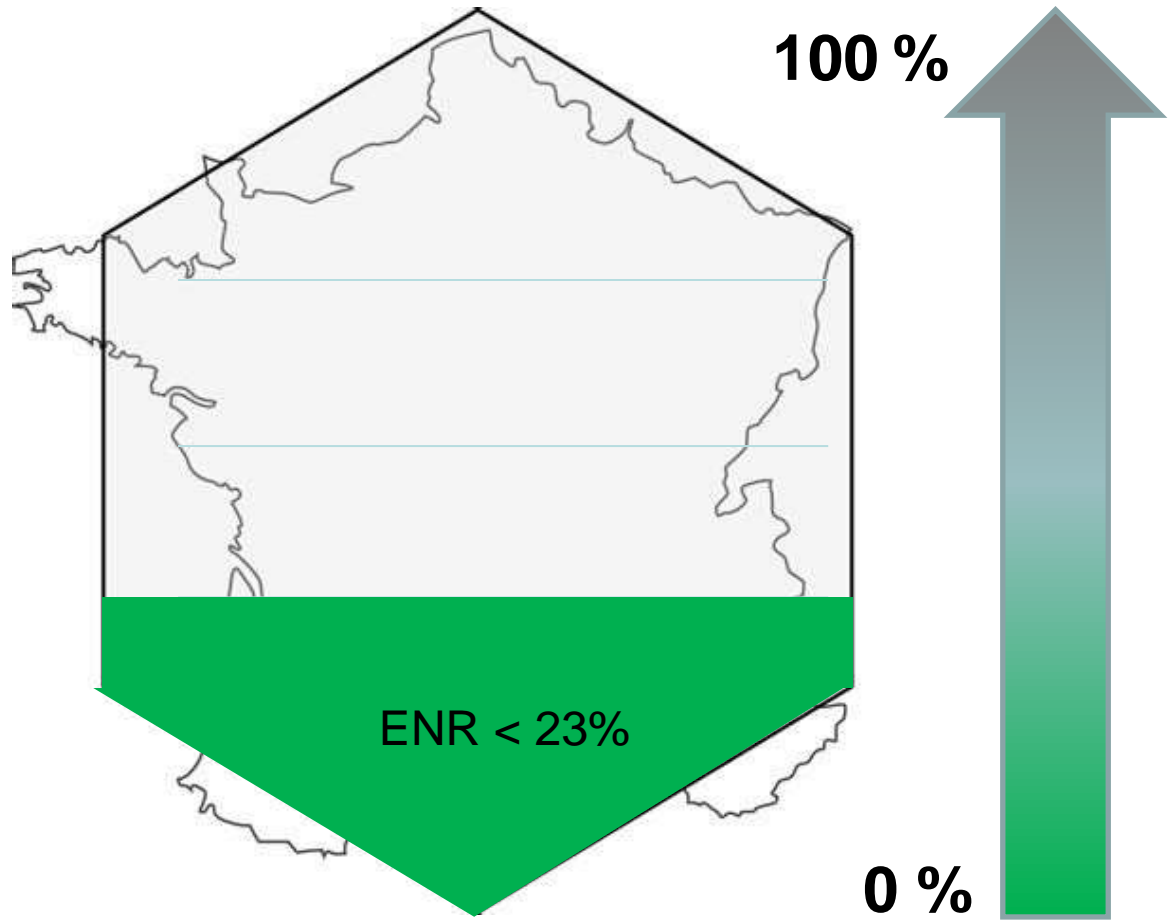
# Des questions ?



**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...





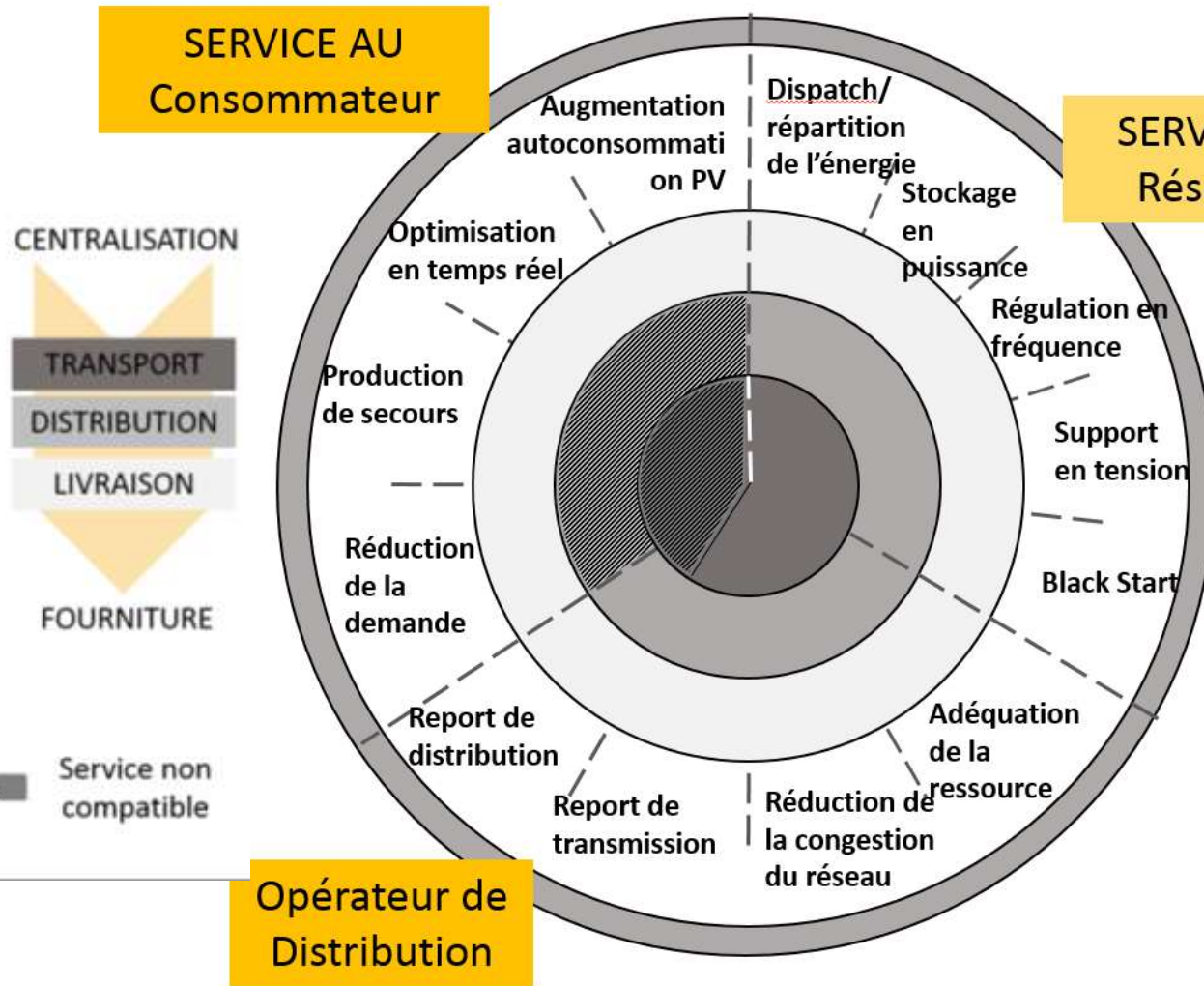
# Cours 10-11

Dans le cours N°10, nous avons étudié **le cadre d'un système à 100%** d'électricité renouvelable, exploré le fonctionnement du système électrique, et enfin observé les outils traditionnels et récents pour représenter le réseau. Dans ce cours 11, nous revenons sur **les options de flexibilité** et notamment sur **le stockage d'énergie**, dernier maillon de la construction du 100% ENR.

- ✓ 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**



# Déterminants multi-usage



D'après Amory Lovins RMI. L'adoption des techniques de stockage et leur industrialisation suppose leur intérêt (et leur rémunération) pour plusieurs usages voire plusieurs acteurs.

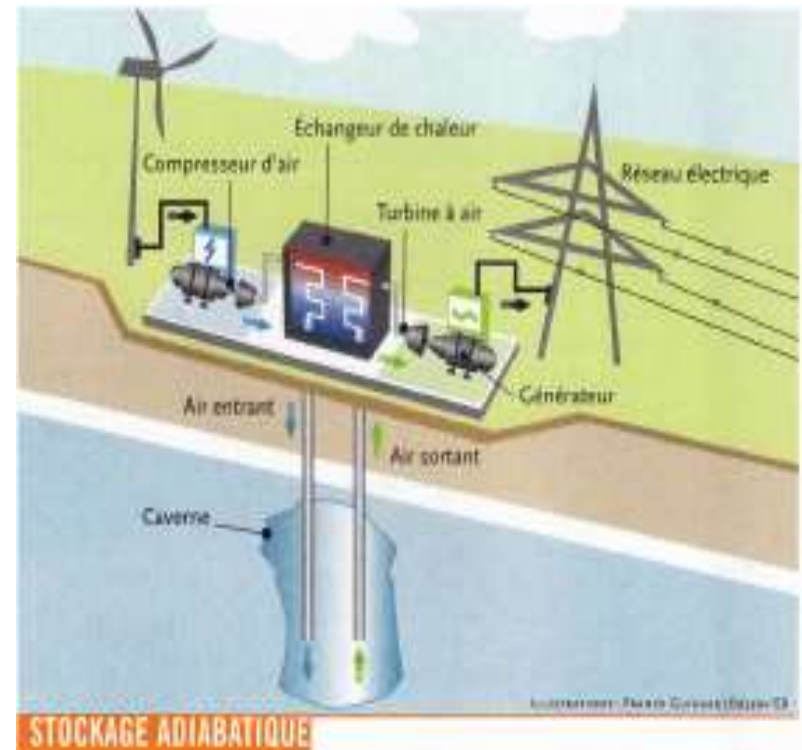


# Stockage air comprimé

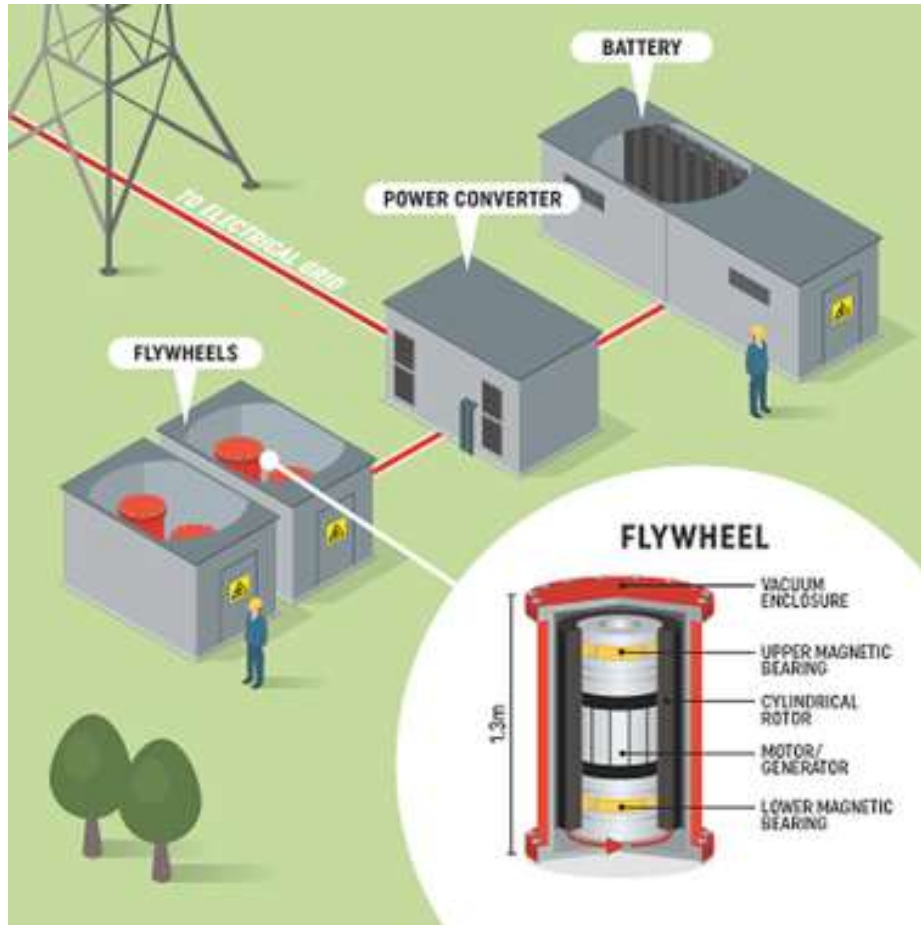


Le stockage d'air comprimé multiplie la puissance d'une turbine à gaz ou peut produire directement le courant dans une turbine à air en récupérant le froid de décompression.

Une cavité saline ou une caverne étanche est nécessaire. Elle entre désormais en concurrence avec le stockage de l'hydrogène...



# Le volant d'inertie



Le volant d'inertie («flywheel») est adapté pour gérer les transitoires du réseau à délai extrêmement court. Il supplée à l'absence d'inertie mécanique de la machine à vapeur, par exemple dans un système tout-solaire/batteries



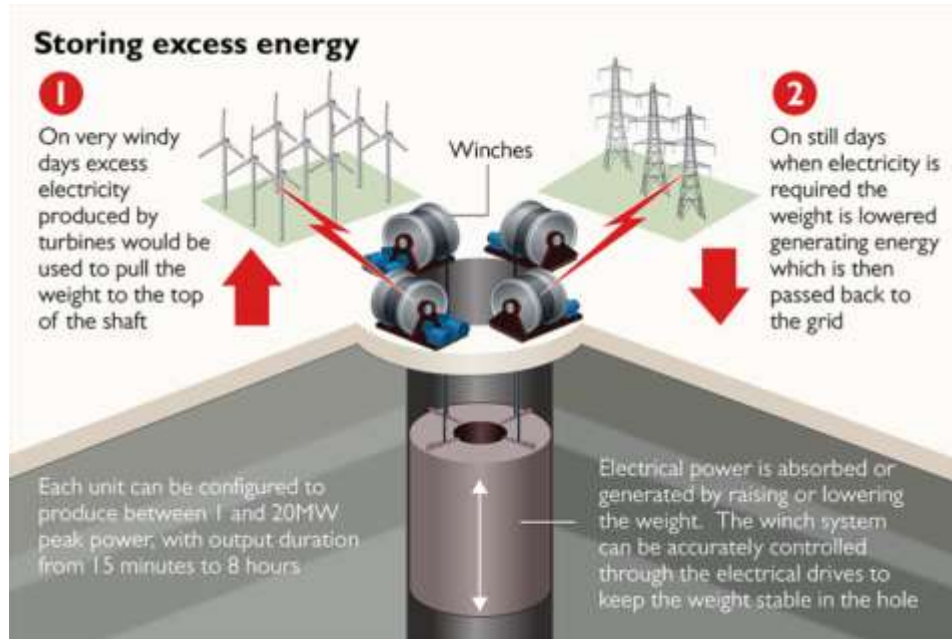
flywheel <https://youtu.be/BYqX4xDiO8M>



Vers 100% ENR...



# Rêves électro-mécaniques



**Gravitricity repose sur un potentiel gravitaire.**

Gravitricity propose un système d'énergie stockée dans le potentiel gravitaire mécanique. Un poids de 500 tonnes est simplement relevé ou déroulé par des câbles. L'efficacité affichée est de 80 à 90%. Le coût est très inférieur à un système hydraulique.

Pour des puissances de l'ordre de 1 à 20 MW et un puits existant de 300 m, ce système permet de contenir 25 MWh restitué à 10 MW.



# L'hydraulique STEP



La Centrale de Revin a une capacité de pompage-stockage réversible de 2 X 200 MW

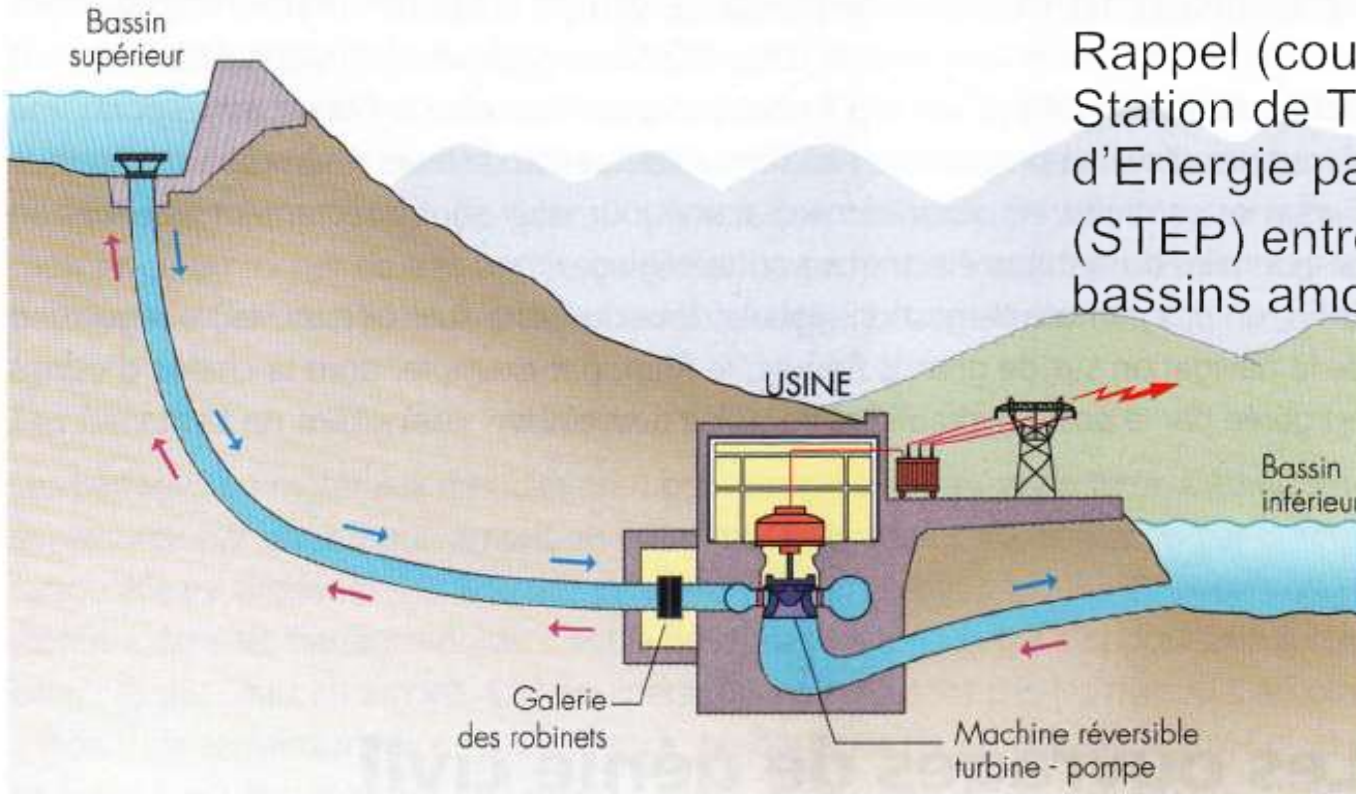
Le pompage-stockage hydraulique a un rendement élevé de restitution globale (70-80% selon l'âge) et une réaction rapide, adaptée au réglage du réseau. Il existe un potentiel de centrales «virtuelles» à base des lacs existants.

Mais le coût et surtout l'absence de sites favorables limitent l'extension de cette technique

A noter qu'il existe aussi des marges pour l'optimisation CO2/ENR du système, parfois utilisé comme secours pour des centrales nucléaires ou en soutien des exportations.



# Technologies: STEP



Rappel (cours #7)  
Station de Transfert  
d'Énergie par Pompage  
(STEP) entre deux  
bassins amont et aval

Il existe aussi des installations basées sur un seul bassin amont, par exemple en haut d'une falaise maritime donnant sur l'océan (Japon). La STEP « virtuelle » relie des barrages réservoirs (exemple périodique à Aussois en Haute-Savoie à l'occasion d'essais hydrauliques)



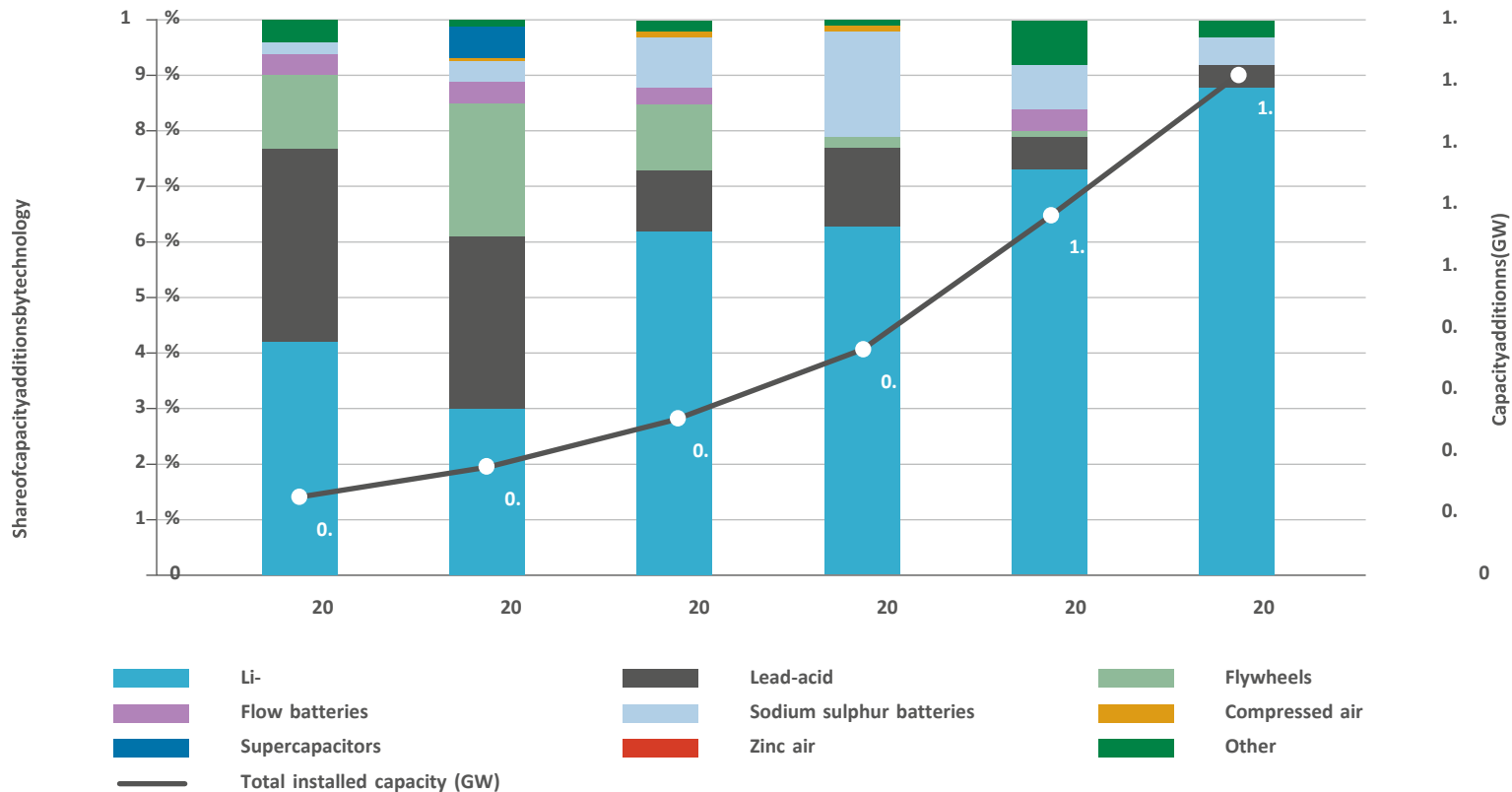
# Les STEP en France

Utilisation quotidienne (ex. Lac Noir), hebdomadaire (ex. Montezic) ou saisonnière (ex. Grand-Maison). Rendements global de 60% à 75% pour les plus récentes pour le cycle complet. Le Lac Noir (Vosges) est hors service.

CENTRALES			LAC NOIR	MONTÉZIC	REVIN	LA COCHE	LE CHEYLAS	GRAND MAISON	SUPER BISSORTE		
Nature du pompage			pur	pur	pur	mixte	mixte	mixte	mixte		
RÉSERVOIR SUPÉRIEUR	Capacité utile	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	2,2	30,8	6,9	2	4,9	134,8	37		
	Capacité en énergie	GWh	0,45	29,61	3,66	4,14	2,96	276,1	97,9		
	Durée de remplissage à pleine puissance	heures	11	42	7	17	8	277	202		
	Durée de vidange à pleine puissance	heures	8	31	5	14	6	173	146		
RÉSERVOIR INFÉRIEUR	Capacité utile	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	2,1	30,5	6,9	0,4	4	14,5	1,1		
TURBINE	Type		Francis	Réversible	Réversible	Réversible	Réversible	Francis	Pelton	Francis	Pelton
	Nombre		4	4	4	4	2	8	4	4	1
	Puissance nominale	MVA	100	1 000	800	340	540	1 360	680	680	170
		MW	80	910	736	309	491	1 224	612	612	153
	Puissance maximale	MW	80	967	800	310	485	1 070	620	580	166
	Débit maximal	m <sup>3</sup> /sec	100	273	400	41	234	141	76	56	15
POMPE	Puissance maximale	MW	71	872	709	331	480	1 275	630		
PRODUCTIBILITÉ ANNUELLE			GWh	-	-	-	480	680	220	165	



# Stockage chimique : lithium-ion *rules*



Le stockage sur réseau (hors STEPs) est largement dominé par la batterie lithium-ion qui suit un apprentissage industriel mondial et bénéficie de la révolution automobile.

Source: AIE (2018); Sandia Corporation (2018)

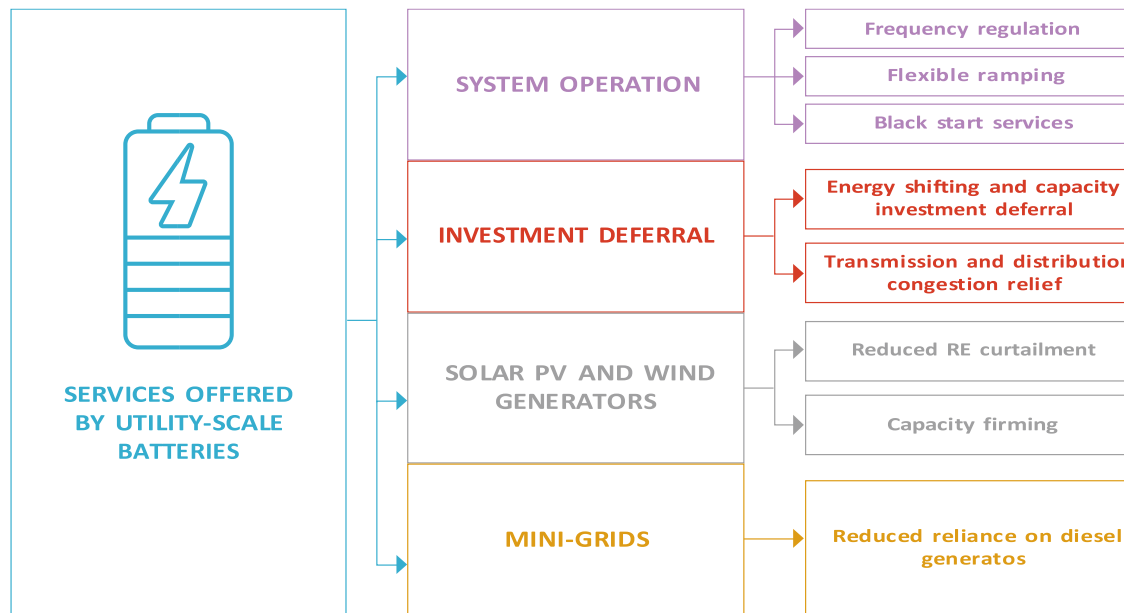


Vers 100% ENR...



# Des services multiples

Les services des batteries réseau s'ajoutent à l'utilisation automobile. Ces usages multiples, parfois combinés, des batteries confirment l'intuition de l'équipe RMI de Amory Lovins expliquée plus haut, qui renforcent la trajectoire de baisse des coûts

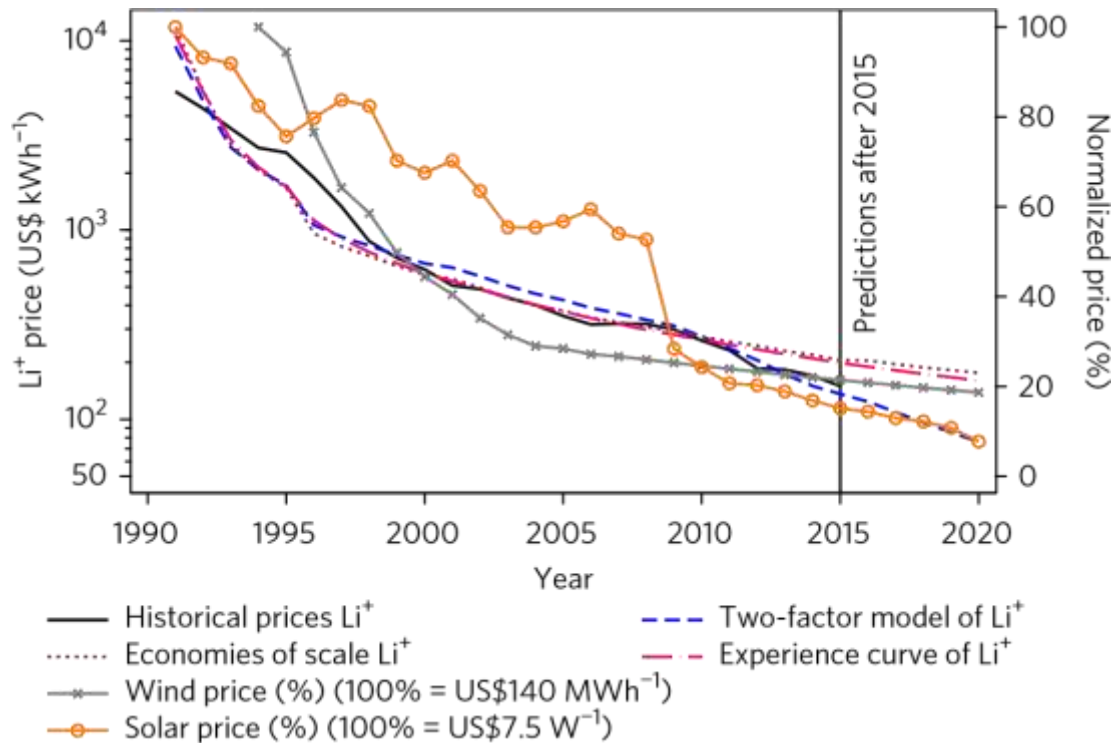


(Rapport IRENA 2019) [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA\\_Utility-scale-batteries\\_2019.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Utility-scale-batteries_2019.pdf)





# Déterminants de la baisse



Le prix des batteries lithium suit une fonction combinant les volumes («apprentissage industriel») combiné avec une partie importante d'innovation technique, selon une équipe du laboratoire de Berkeley

Kittner, N., Lill, F. & Kammen, D. Energy storage deployment and innovation for the clean energy transition. Nat Energy 2, 17125 (2017). <https://doi.org/10.1038/nenergy.2017.125>



# Déjà sous les 100\$/kWh

Selon Bloomberg, pour la première fois en 2020, des prix de batteries ont été cotés à moins de 100 \$/kWh avec une moyenne de 137 \$/kWh. Le graphe présente les prix moyens pondérés du marché mondial.

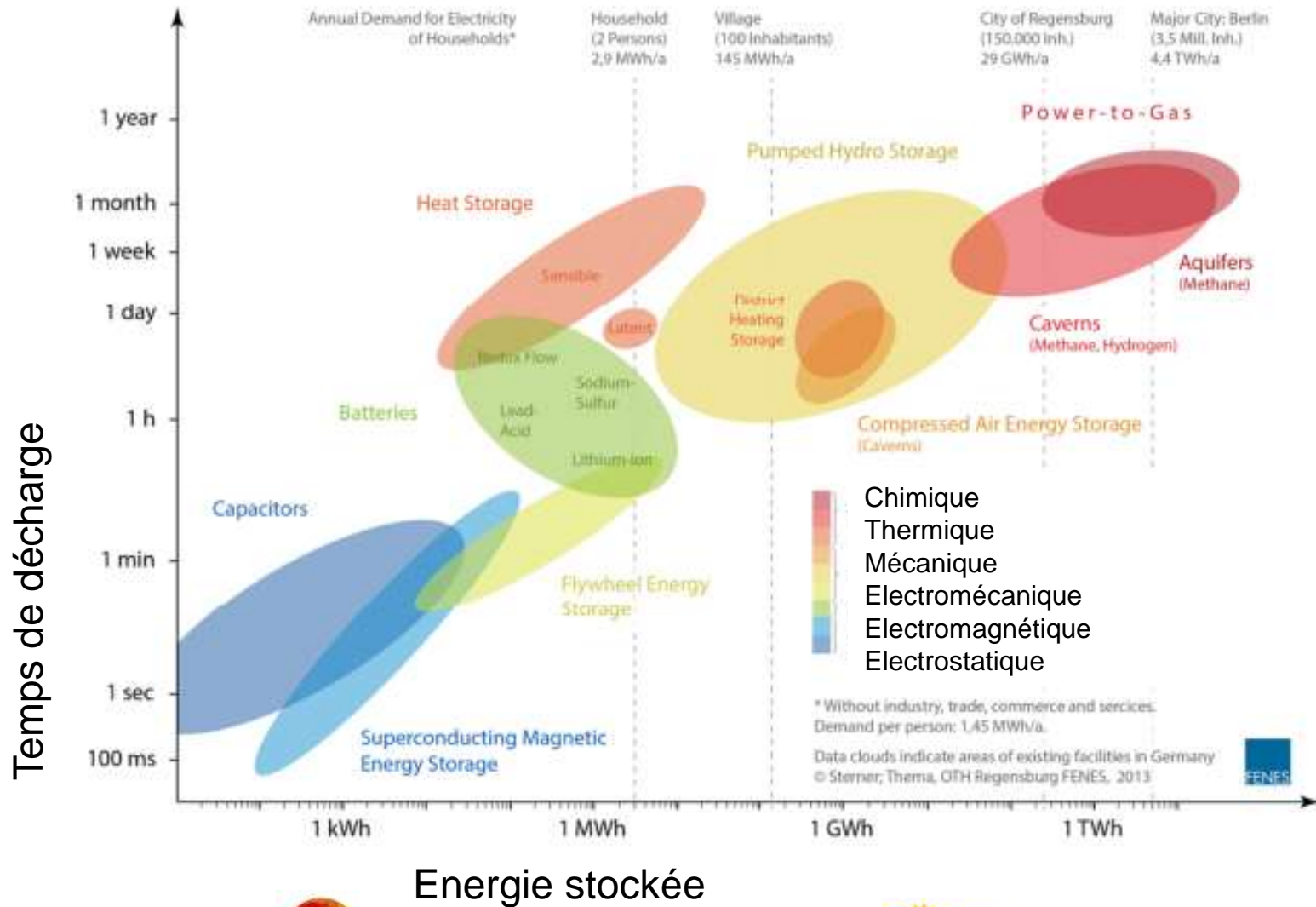


Source: BloombergNEF

Sous les 100 \$/kWh, une réserve stratégique de 1 TWh revient encore à 100 Mds€ tout compris, soit des sommes qui restent hors de portée pour une simple réserve saisonnière utilisée sur cycle annuel.



# Les stockages de masse



Energie stockée

Vers 100% ENR...



# 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...)

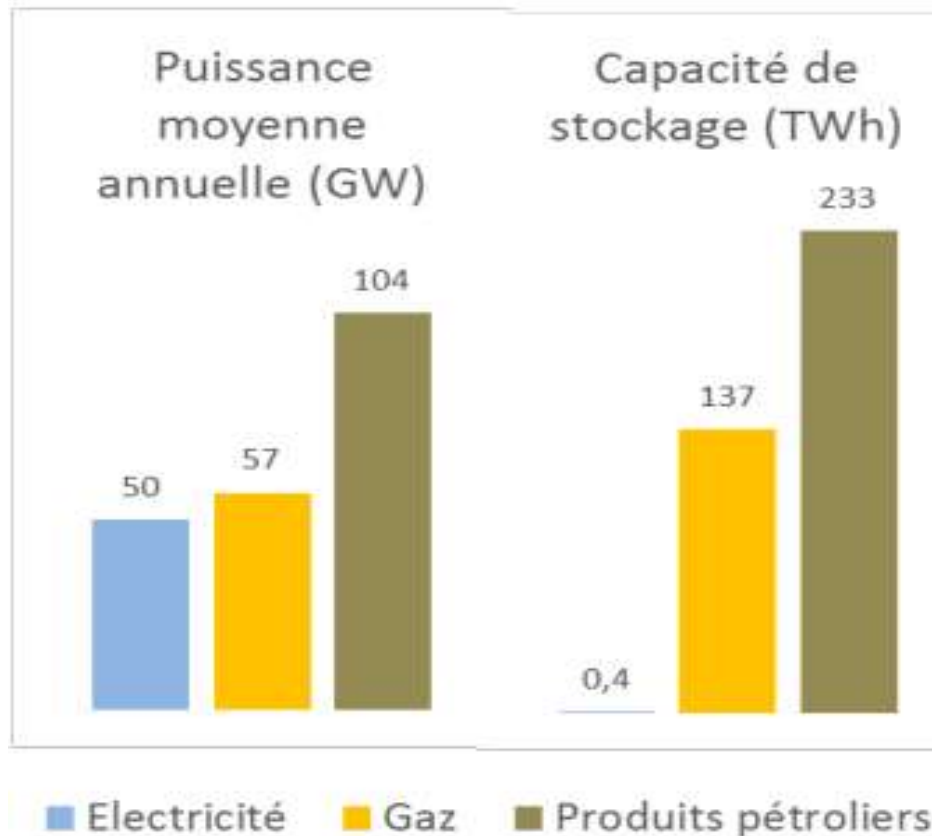
Le passage d'un vecteur à l'autre est déjà le point de départ pour éponger le surplus d'éolien (PAC sur réseau de chaleur en Allemagne du Nord) ou de PV (chauffe-eau des particuliers). La méthanation et l'électrolyse ouvrent cette voie pour le stockage saisonnier.



Vers 100% ENR...



# Les stockages massifs



En France, pétrole et gaz disposent de stocks très importants qui représentent plusieurs mois de consommation. C'est 350 fois la capacité de stockage des réservoirs de STEP (prévus en fait pour des cycles plus courts sauf Grand-Maison et Super-Bissorte)  
C'est aussi 20% de la consommation de gaz ou encore six mois d'usage pour les réservoirs de la région parisienne.

Une partie des stockages de gaz suffirait pour constituer la réserve saisonnière stratégique, sous forme H<sub>2</sub> (cavités salines) ou en utilisant les énormes stockages en aquifères, avec ou sans méthanation.

E&E Consultant, étude «méthanation»  
ADEME/GRT/GRDF, d'après SOES et DGEC  
sur <https://www.ee-consultant.fr/?Etude-portant-sur-l-hydrogene-et>



# Stocks de gaz en sous-sol



Document Storengy

**Stockages aquifères:**

<https://youtu.be/ddHQiSxA5uQ>

**Cavités salines:**

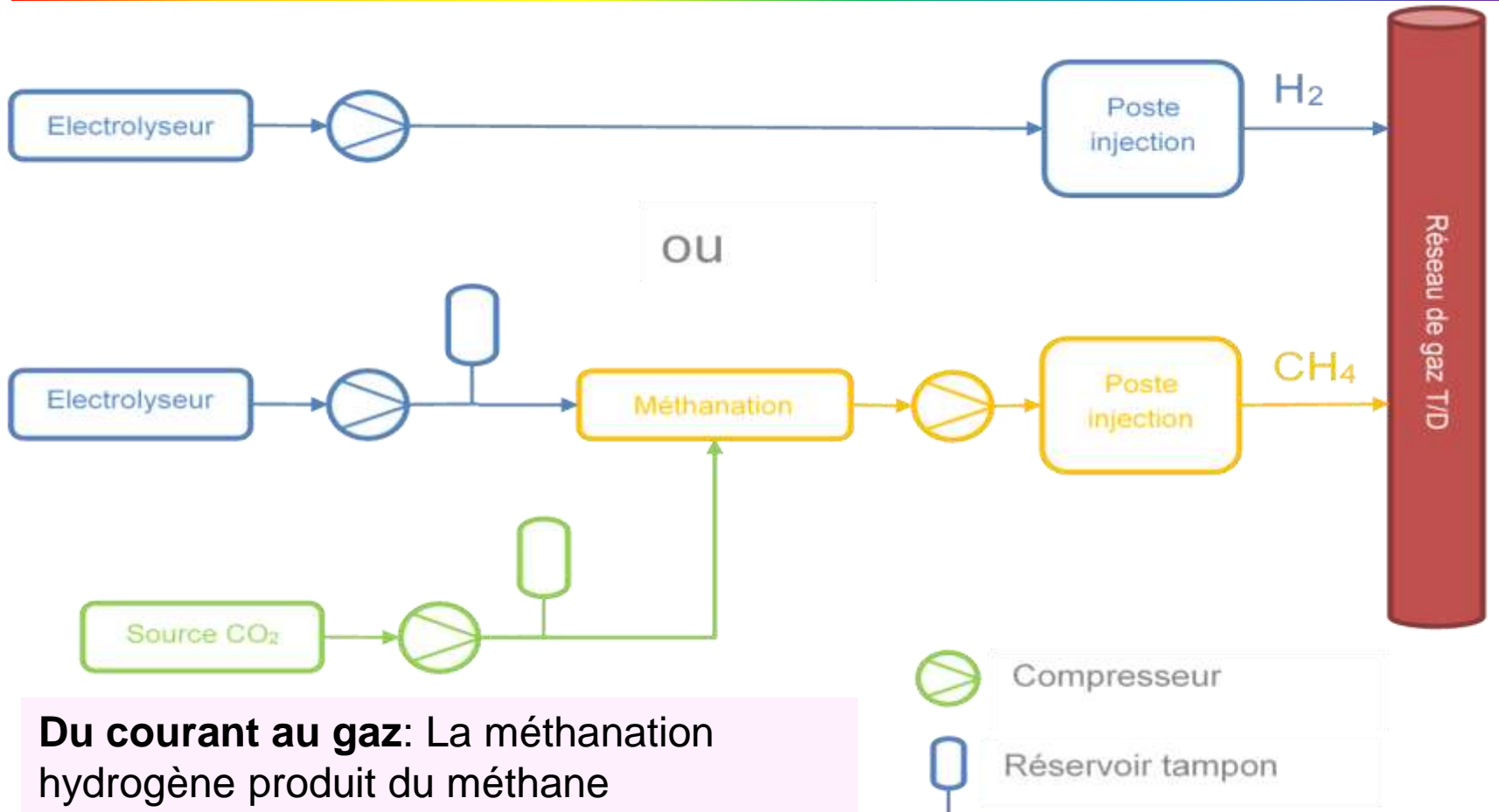
<https://youtu.be/o4nijTSbJOg>

A Gournay-sous-Arandon, à 15 km au nord de Compiègne, le plus grand stockage français est exploité par Storengy, une filiale de ENGIE

Il y en a treize autres en France  
Le réservoir est situé dans un ancien gisement pétrolier épuisé.  
Le stockage, qui rapporte en 2020 1,7 €/MWh, représente 20% de la consommation de gaz en France. Storengy est le premier stockeur gaz européen et représente un atout essentiel pour la transition énergétique



# Le « Power-to-Gas » »



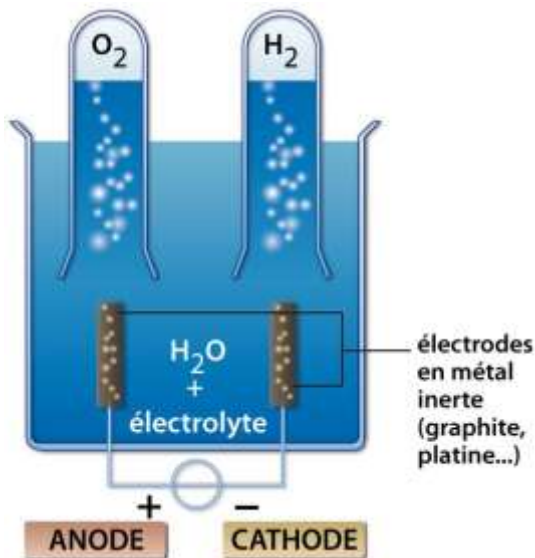
**Du courant au gaz:** La méthanation hydrogène produit du méthane «synthétique» à l'aide d'hydrogène

# (1) L'électrolyse

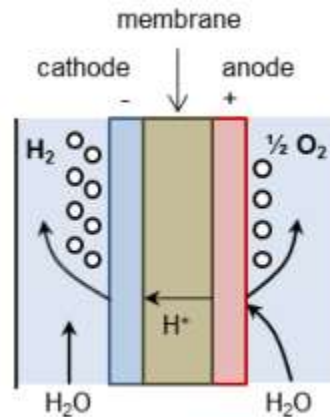
Réaction :



## Principe



## Cellule (ex : PEM)



## Empilement de cellules (Stack)

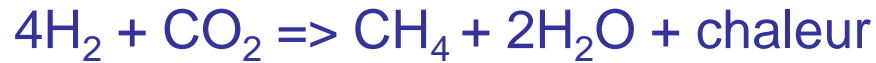


Sources : Larousse, Eifer, etogas



# (2) La méthanation

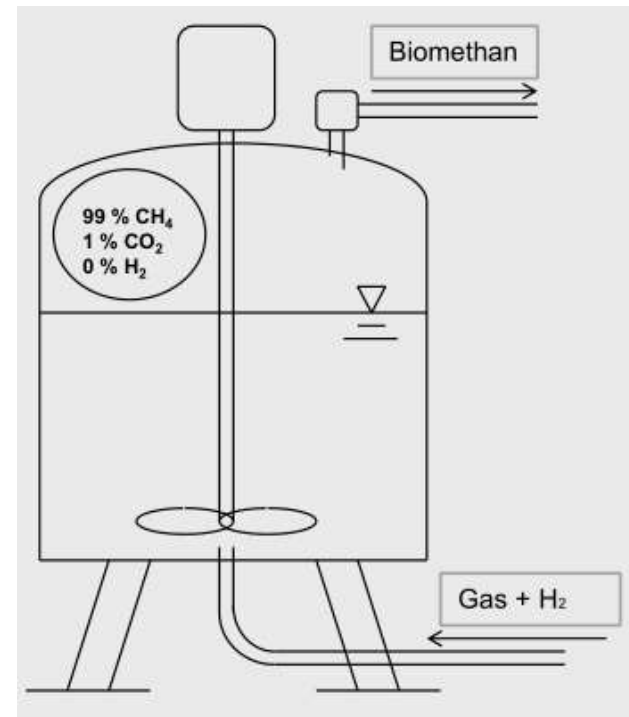
Réaction (de Sabatier) :



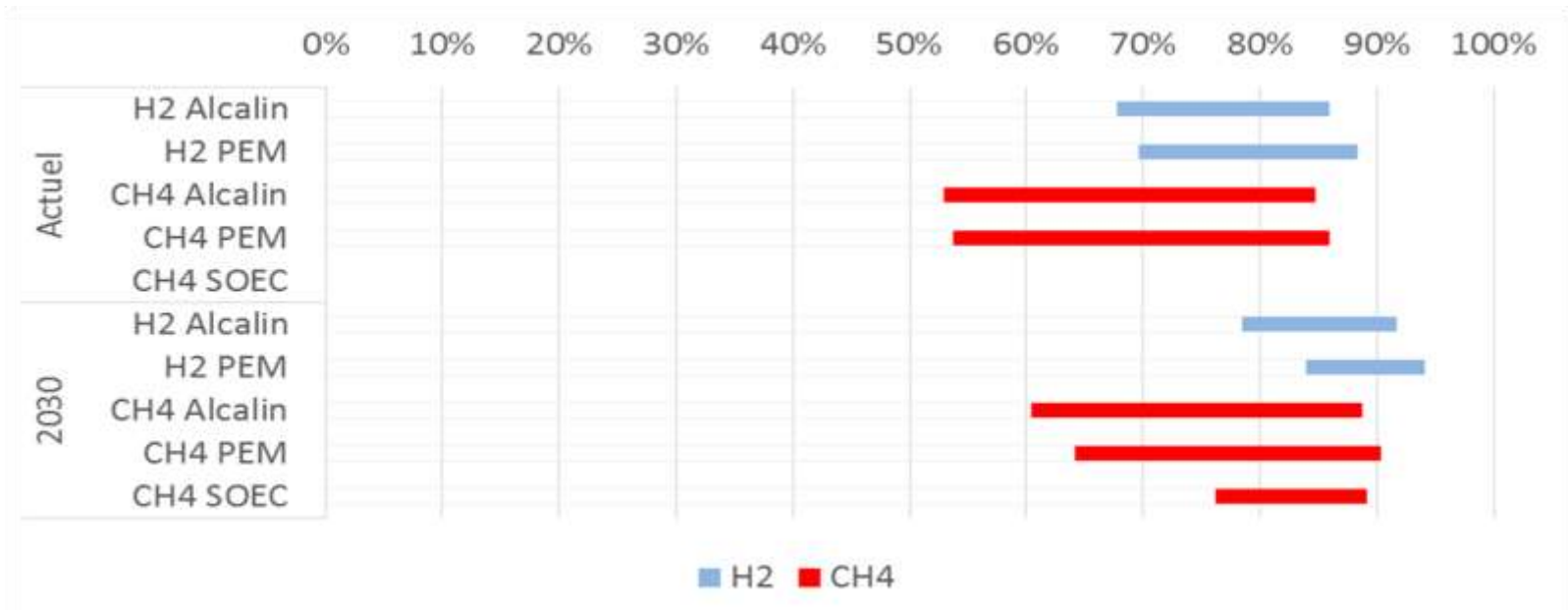
Réacteur catalytique



Réacteur biologique



# (3) La pile à combustible (PAC)



- Le bas de la fourchette prend en compte uniquement en sortie l'énergie (PCS) du gaz de synthèse
- Le haut de la fourchette prend en compte l'énergie du gaz + la chaleur valorisable

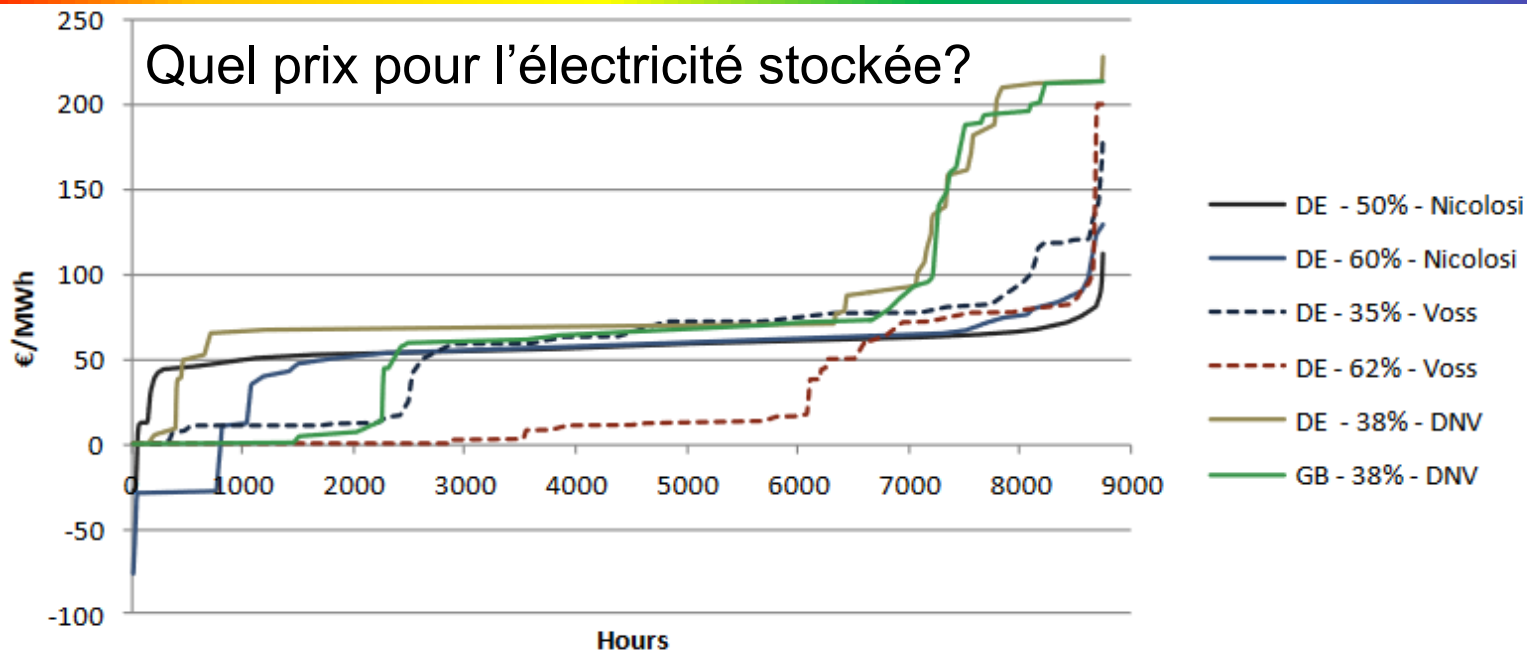
# Exemple d'organisation PtG

Par exemple injection méthane 7% en PCI en principe, expériences à 20% actuellement dans le réseau gaz de Dunkerque...



Le power to gaz (PtG) cumule les rendements défavorables et a besoin d'une source de CO<sub>2</sub> (méthanisation, capture du carbone...). Mais il produit du gaz méthane facile à stocker et à mobiliser (véhicules, électricité...)

# Coût du stockage massif



Le prix d'un stockage massif dépend du système électrique et de la durée de fonctionnement. La proportion de renouvelables variables est indiquée et la source

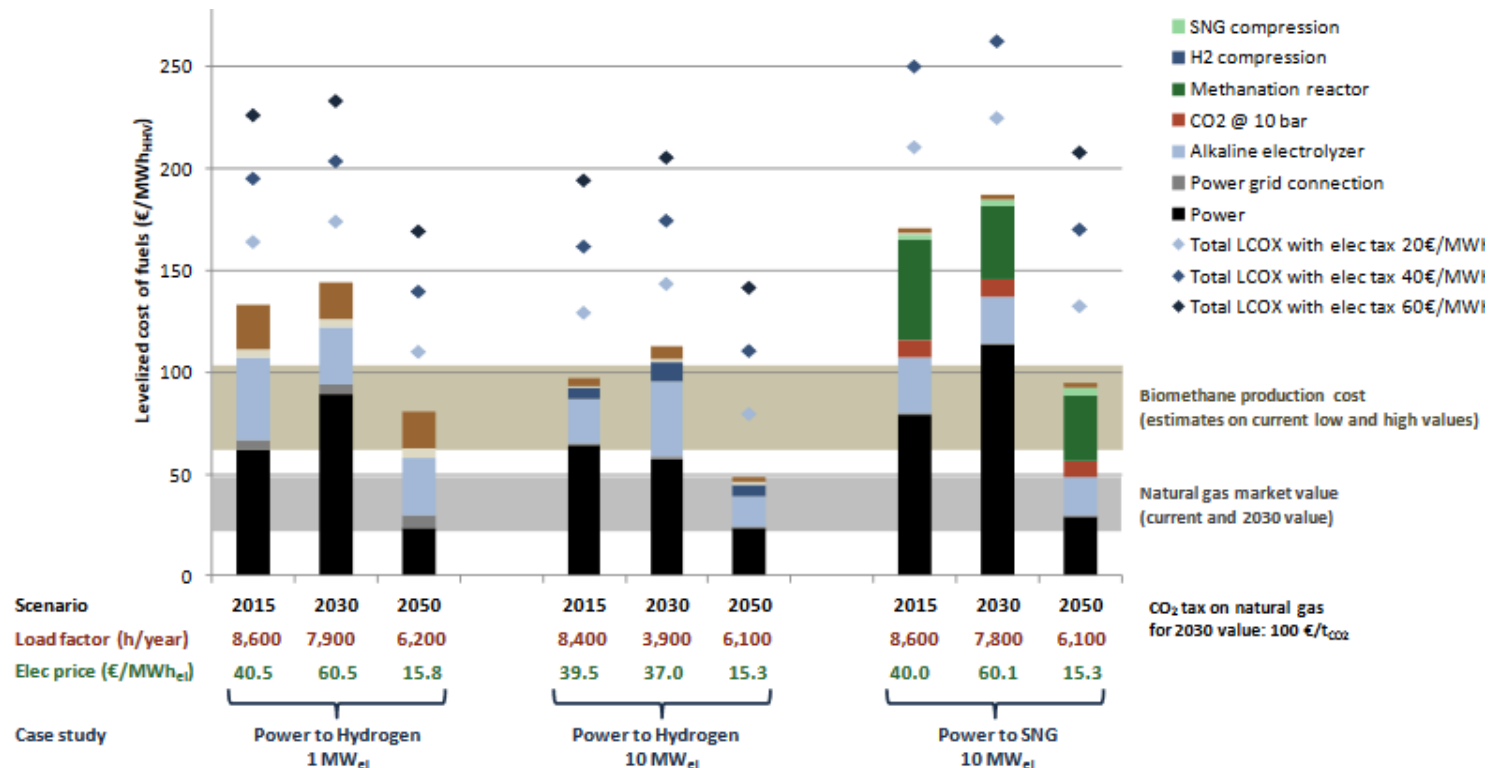
ENEA: <https://www.enea-consulting.com/wp-content/uploads/2016/01/ENEA-Consulting-The-potential-of-power-to-gas.pdf> hypothèse Electrolyseur 1000€/kW > 700€/kW en 2050

MIT: <https://news.mit.edu/2020/new-approach-to-carbon-capture-0709>

Hypothèse CO2 capturé dans l'air (DAC) 50-100€/tCO2, le CO2 peut aussi provenir d'installations de méthanisation. C'est le cas actuel en expérimentations.

# Coût d'un stockage PtP ?

(Power to power ou Power to H2)



Levelized costs of hydrogen and SNG produced from power-to-gas plants for grid injection for the three relevant case studies, three time horizons (2015, 2030, 2050) and for the load factor minimizing the LCOX (refer to 2.2.2 for details on load factor impact on LCOX); grid fees are taken into account while electricity tax is not in the nominal case. The effect of electricity taxes is shown separately for three different levels of taxes (20, 40 and 60€/MWh) and is materialized by blue markers on the graph. Finally, ranges of cost of biomethane and price of natural gas are displayed for comparison

# Stockage PtP comme «backstop»



La démonstration technique est terminée. La sortie des fossiles est en bonne voie pour l'électricité dans une grande partie du monde.

Mais comment convaincre et simplifier ce message ?  
(image: effigie dans une manifestation climat en Allemagne)



Ce jargon signifie que le concept «Power to Power» est une sorte de plafond des prix («backstop») pour créer une réserve stratégique saisonnière assez grande et bon marché pour répondre à la question, si les autres solutions sont exclues.

En combinaison entre hydrogène et méthane synthétique, le coût de 100 à 150 €/MWh est donc de trois ordres de grandeur inférieur à celui de la batterie ( $p < 500X$ !).

Le rendement à l'entrée (énergie d'été) est faible mais ce facteur est peu important.

Un parc de turbines simples (débitant sur réseaux de chaleur) a un très faible coût également pour un rendement électrique de l'ordre de 50%.

Pour un parc produisant 10 TWh le coût annualisé est de l'ordre de 2 Mds€/an.

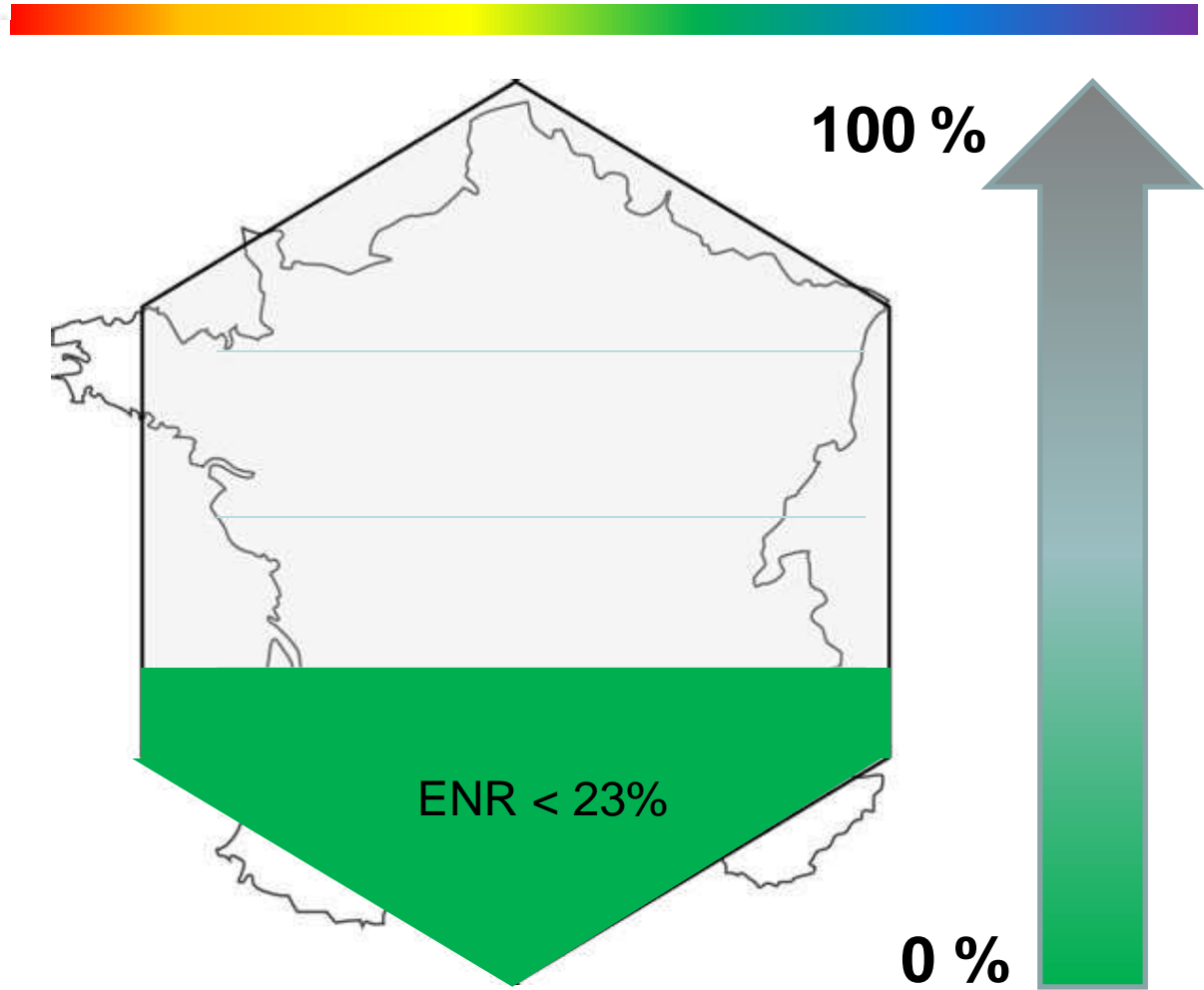
# Des questions ?



**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...

