

I N S T I T U T
P H O T O V O L T A Ï Q U E
D ' I L E - D E - F R A N C E

UMR 9006

Energies renouvelables intermittentes : État des lieux, perspectives et défis

Daniel Suchet^{1,2}, Zacharie Jehl², Adrien Jeantet³, Thomas Elghozi

¹ UMR IPVF, Ecole polytechnique, Palaiseau, France

² NextPV, LIA, CNRS-RCAST/U. Tokyo-U. Bordeaux, Tokyo, Japan

³ Enercoop, 16-18 Quai de la Loire, 75019 Paris, France

Remerciements à Yves Bréchet, Paul Fourment, Frédéric Wertz et Omblin Lafont.

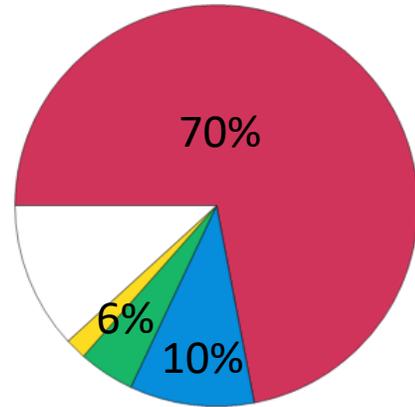
Journée SFP - SFC « climat, énergie, environnement », 19/01/2019

L'intermittence en France



Mix électrique Français

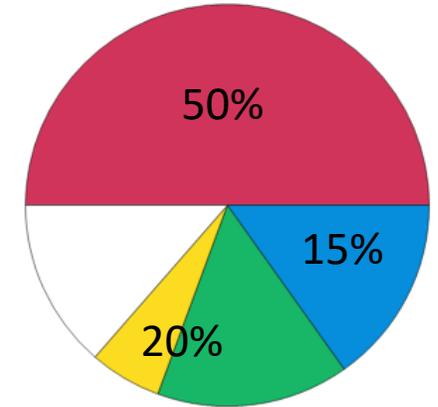
Nucléaire
Hydro
Éolien
Solaire



2017 (RTE)

IEA (2017) : Pas de difficultés particulières pour ENRi < 15%

Objectif : ~20% PV + éolien



2025-35 ? (LTECV, PPE)

« Nullement intermittentes – contrairement à la production des centrales thermiques de forte puissance – l'éolien et le photovoltaïque contribuent en fait à la réduction de la production d'électricité d'origine fossile et nucléaire. »

“Décrypter l'énergie”, Association Negawatt

“The first point to be made, however, is that wind is ‘variable’, not ‘intermittent’. It is the output from ‘conventional’ sources of power that is intermittent.”

“Wind Power on the Grid”, David Milborrow

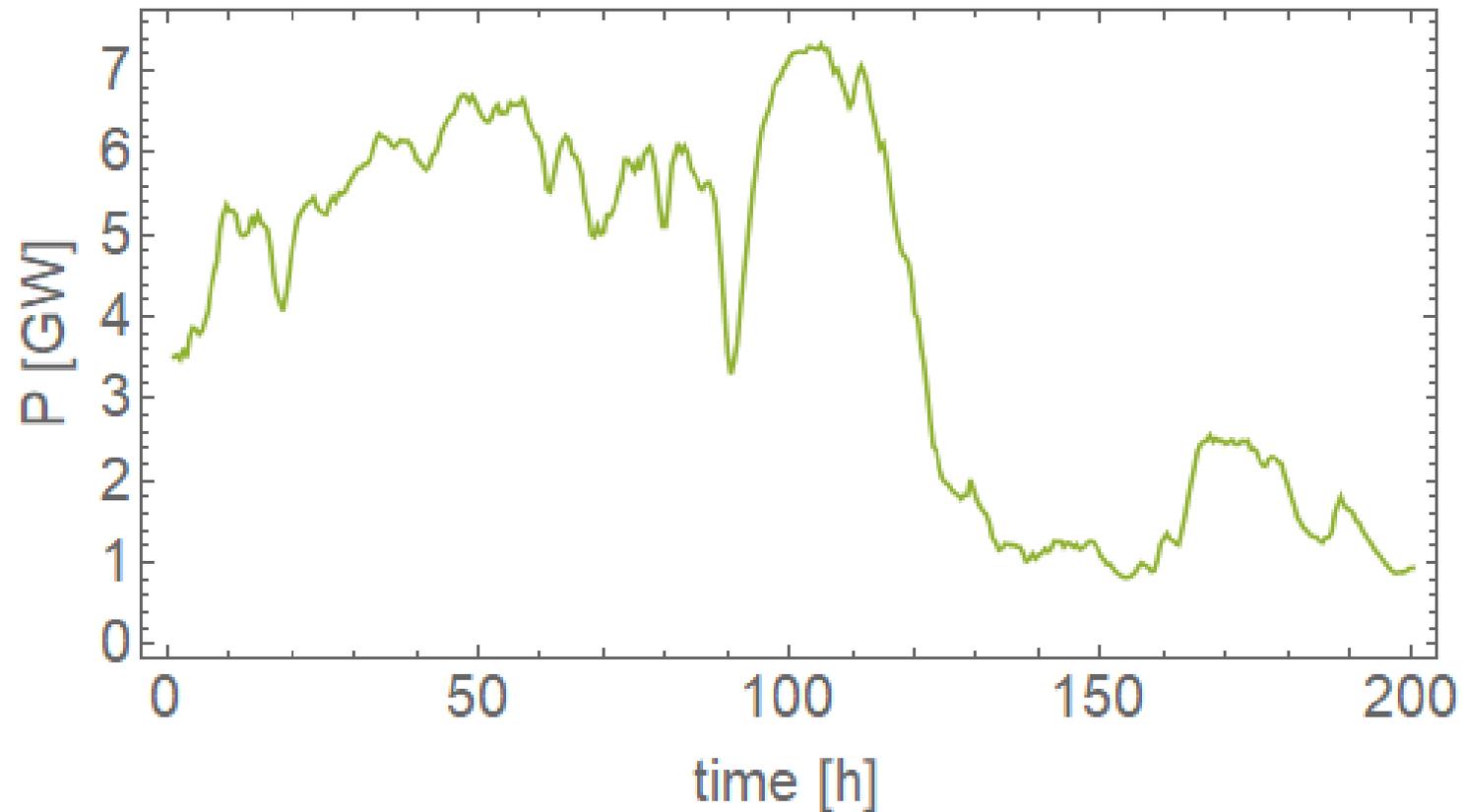
« Il s'agit d'arrêter de tromper les citoyens en affirmant que les énergies renouvelables subventionnées, fatales, diffuses, ruineuses et intermittentes pourront succéder, même partiellement, aux énergies fossiles et fissiles. »

**Michel Gay (prix Yves Chelet de la SFEN),
“Au diable les énergies renouvelables”**

Définir l'intermittence ?

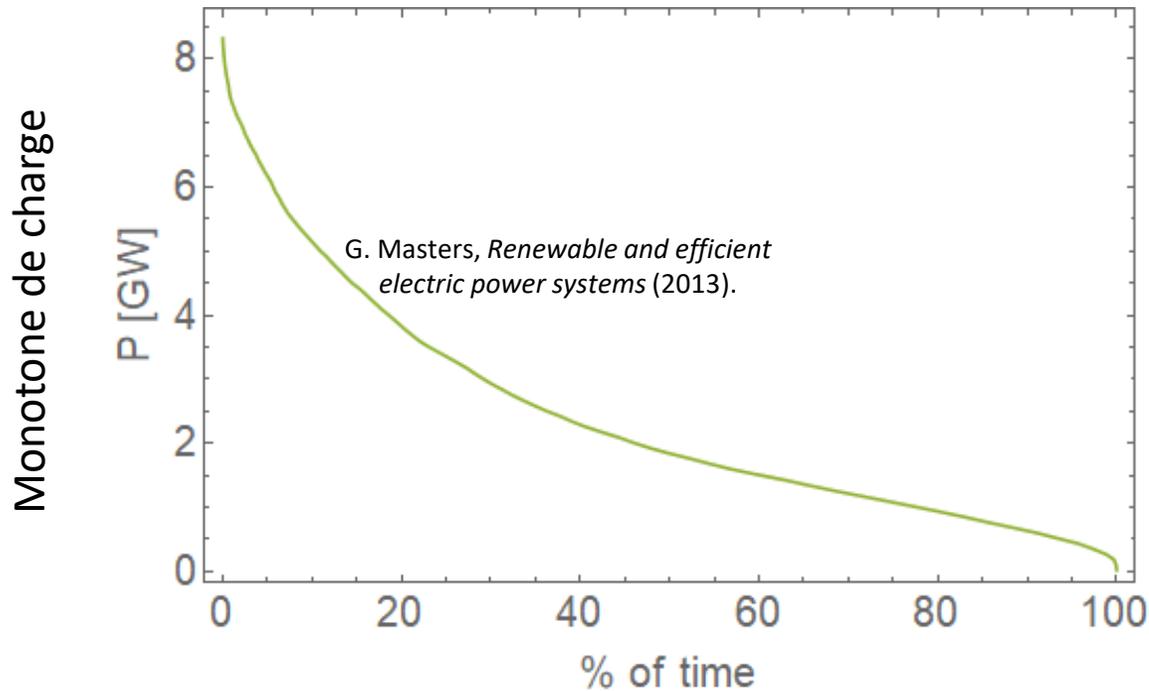


Définition a priori : Intermittent = variations importantes (extinction ?) et rapides.



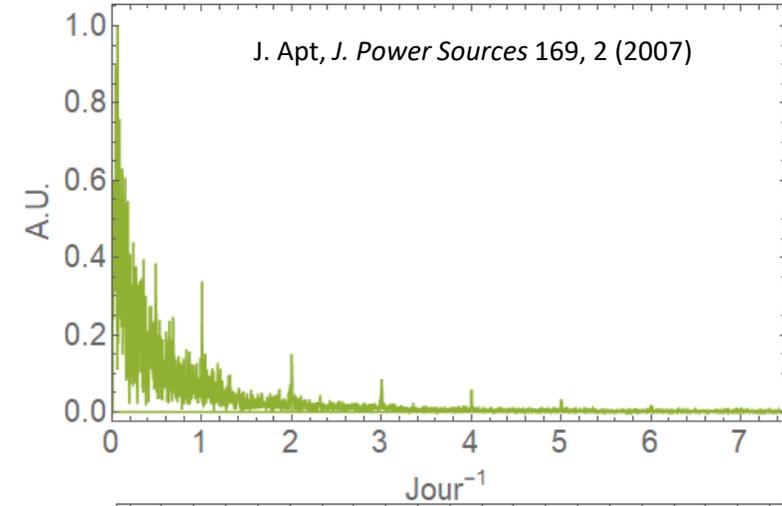
Quels indicateurs ? (Quelles valeurs de références ?)

Quelle quantification ?

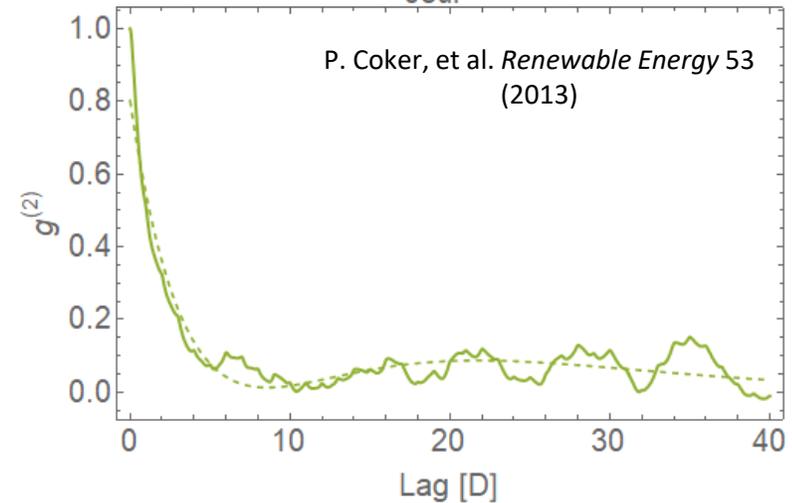


- + : puissances garanties et facteur de charge lisibles
- : pas de dynamique

Analyse spectrale



Autocorrélation

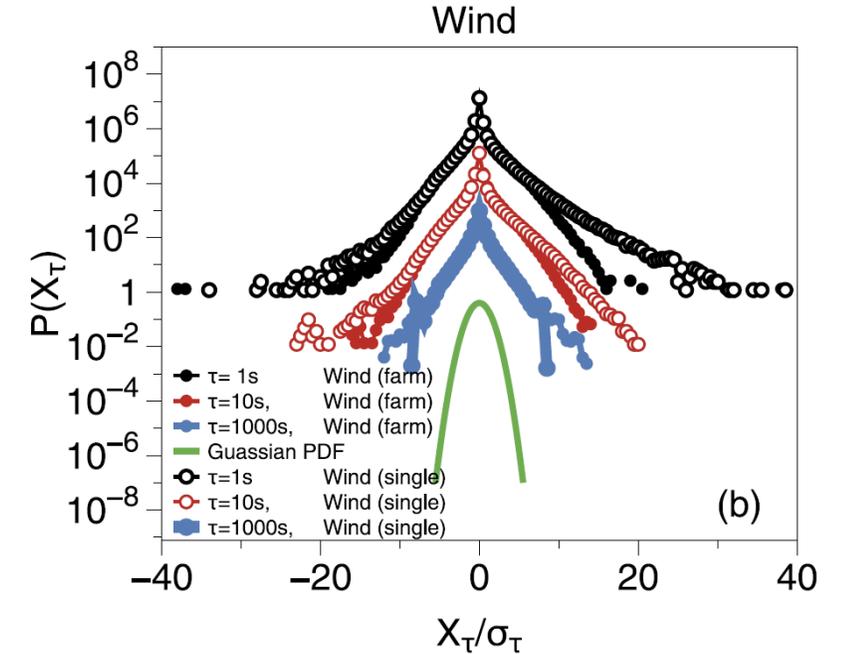
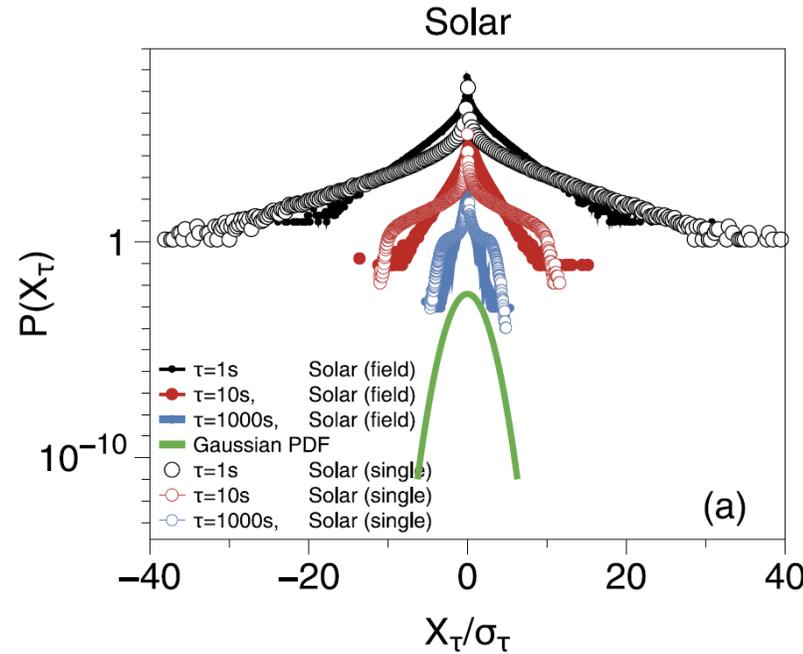


- + : temps caractéristiques, propriétés dynamiques,
- : Interprétation difficile

Quelle quantification ?



Distribution des écarts
 $P(t+\tau)-P(t)$



M. Anvari et al., "Short term fluctuations of wind and solar power systems", *New J. Phys.* 18, 6 (2016).

Importance des événements extrêmes

Fluctuations à 20σ :

Gaussienne : 1 fois / 3 millions d'années

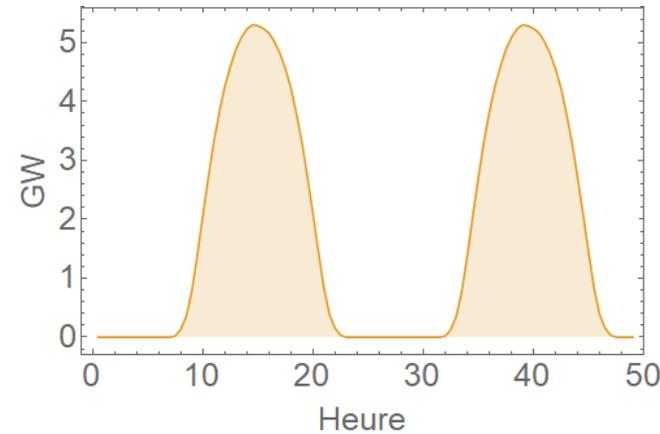
Eolien : 1 fois / mois, PV : 1000 fois / mois

Diversité
 Des intermittences

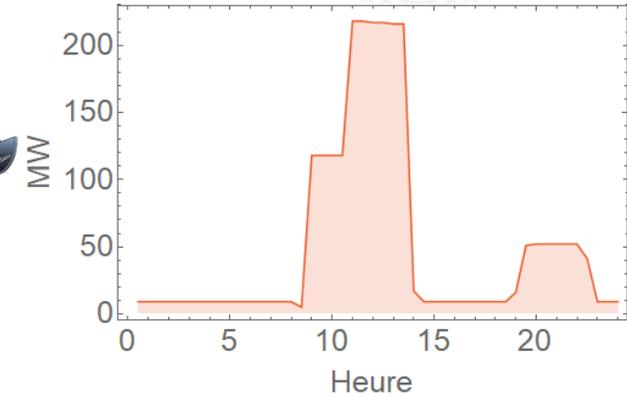
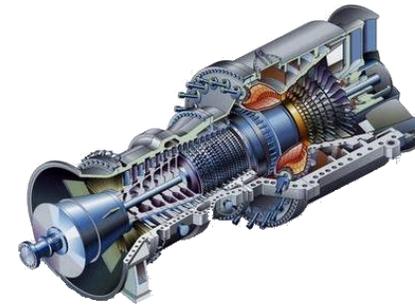
Comportement statistiques différents pour éolien et PV, pour le court et le long terme

Intermittent, pilotable et/ou prévisible ?

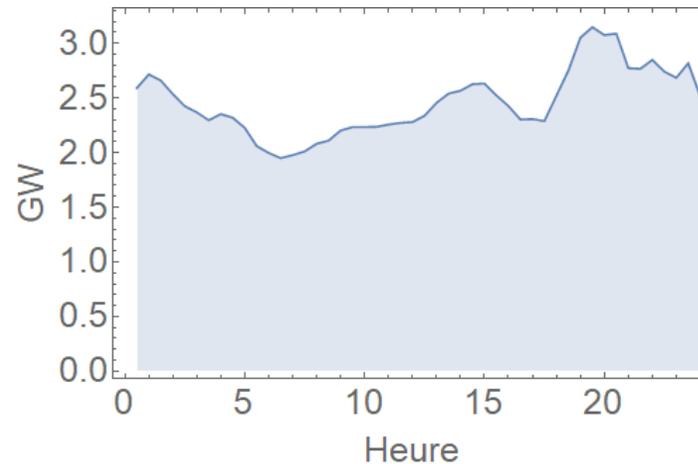
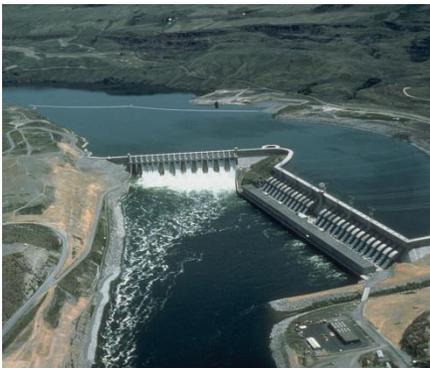
Prévisible mais intermittent ? (clignotant)



Pilotable mais intermittent ? (interrupteur)



Non prévisible, non pilotable mais non intermittent ?



Prévisibilité, pilotabilité, intermittence :
Trois enjeux couplés, mais bien distincts.

Quels enjeux?



Contraintes physiques

Equilibre production / consommation à *chaque instant*.

ms	s	min	heure	jour	mois	années
Inertie	Réserve primaire / secondaire / tertiaire		Programme d'appel		Planification	Développement
<i>Electronique ?</i>	<i>Disponibilité ? Pilotage ?</i>		<i>Prévision Conso et prod ?</i>		<i>Maintenance ? Intersaison ?</i>	<i>Infrastructures ?</i>

Contraintes (et leviers d'actions) économiques

Merit order des sources ? Equité énergétique ? Balance commerciale ? Dépendance ?

Quelles réponses ?



Foisonnement & Complémentarité

Stockage



Suivi de charge

Adaptation des usages

ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Énergie

Artelys
OPTIMIZATION SOLUTIONS

nw
ASSOCIATION
négaWatt



ANCRE
Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Énergie

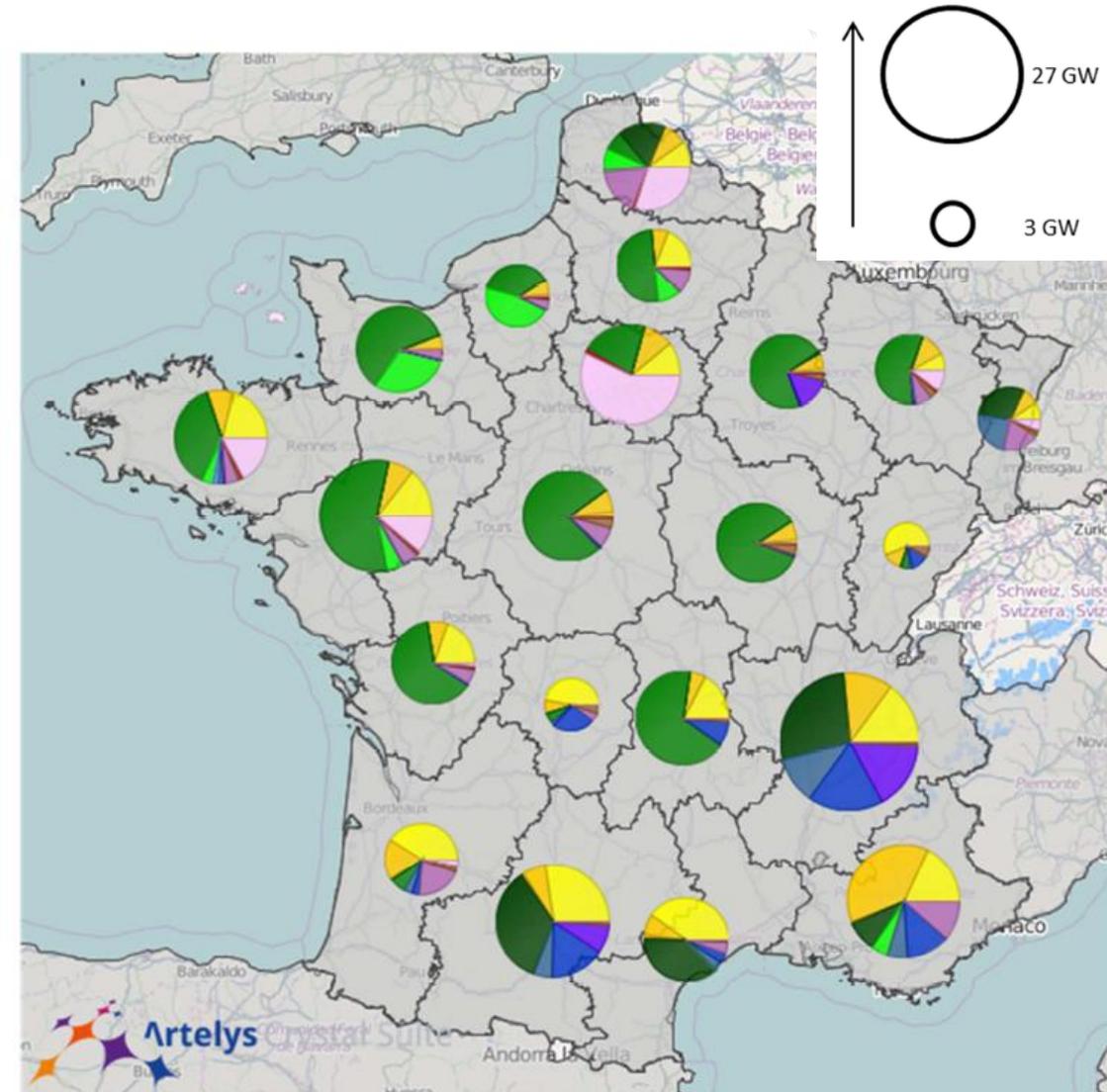
Complémentarité et foisonnement



Multiplier les productions pour lisser les fluctuations.



- Hydrolienne
- Houlomoteur
- Marée-motrice
- Fil de l'eau
- Lacs et éclusées
- STEP
- Cogénération bois
- UIOM
- Méthanisation
- Géothermie
- PV au sol
- PV sur toitures
- CSP
- Eolien terrestre AG
- Eolien terrestre NG
- Eolien en mer
- Eolien en mer flottant
- Gaz de synthèse
- Stockage court-terme

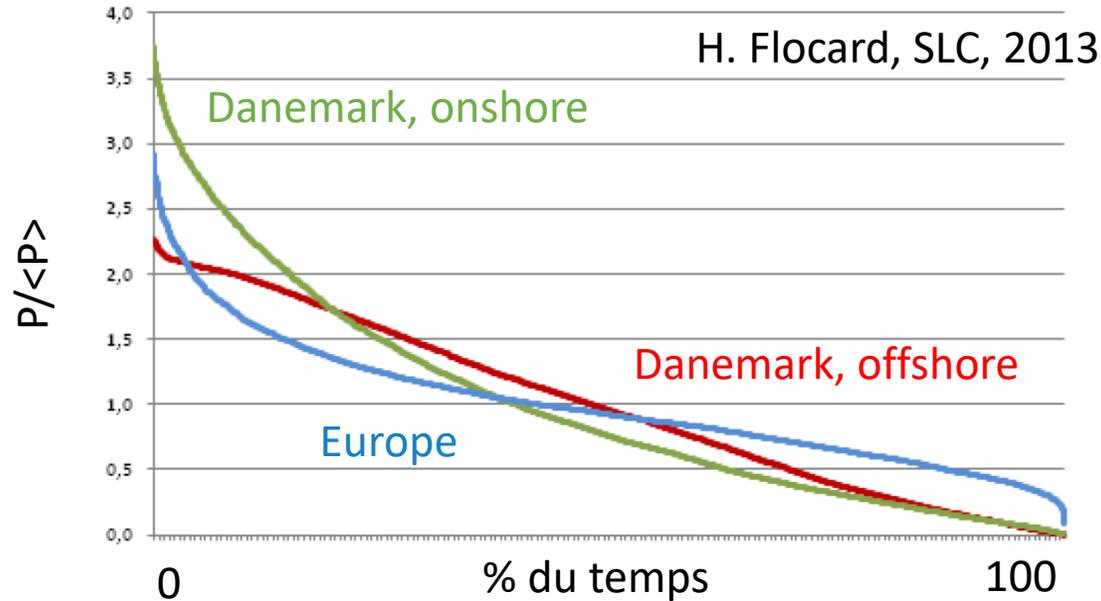


Capacités installées par filière et par région (2050), Ademe 2015.

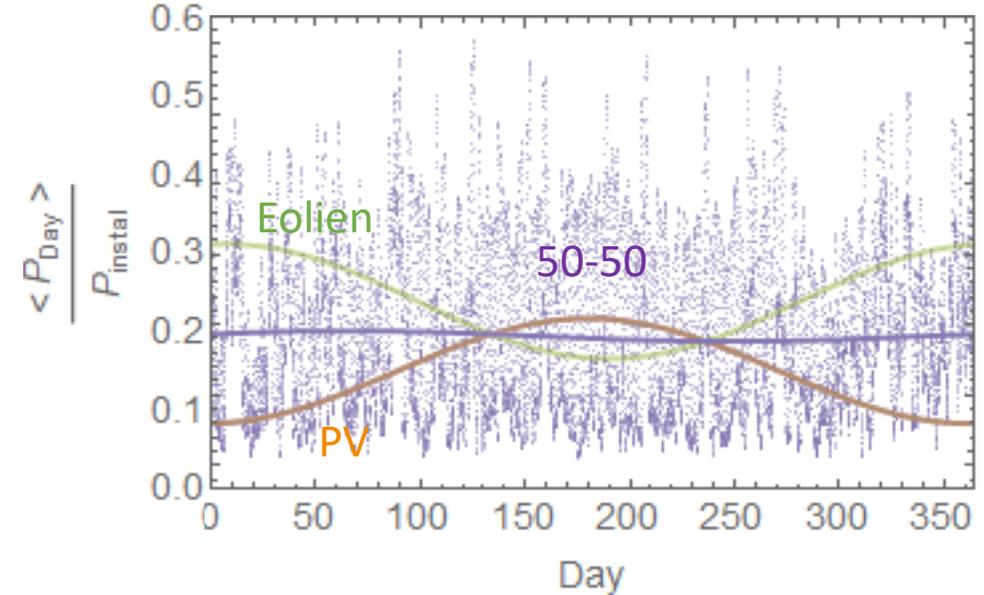
Complémentarité et foisonnement



Foisonnement



Complémentarité



“ As a remarkable result, the non-Gaussian characteristics remain for the aggregated power output of country-wide installations. This is a direct consequence of the long-range correlations of wind velocity and cloud size distributions. Therefore, the central-limit theorem, predicting a convergence to Gaussianity, does not apply.”

M. Anvari et al., *New J. Phys.* 18, 6 (2016).

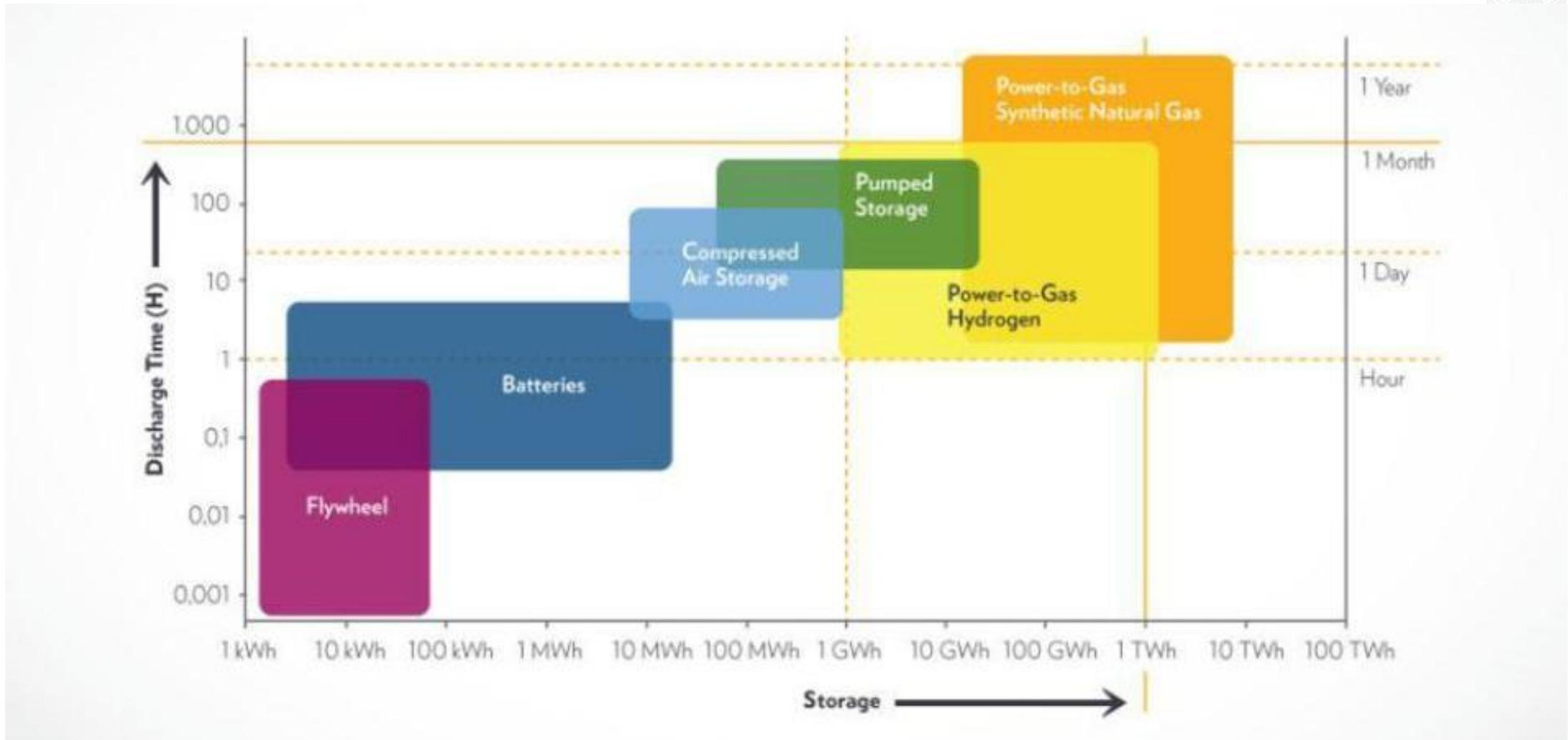
Effet existant, mais limité (surtout à l'échelle d'un pays).

Importance des interconnexions

Importance d'une analyse à grande échelle

Stockage

Redistribuer temporellement la production pour lisser les fluctuations.



Power-to-gas-to-power



« La solution qui s'impose aujourd'hui est celle du "power-to-gas" [...] pour produire du méthane de synthèse. »

*« L'équilibre [du réseau] est assuré en mobilisant les différents leviers d'action dont dispose le système : complémentarité entre énergies renouvelables, dont une partie pilotable, maintien de centrales thermiques converties à l'usage de gaz d'origine renouvelable, lissage de la courbe de demande, globale et introduction progressive de capacités de **stockage**, dont à terme et de manière croissante, la méthanation. »*

Quelle implémentation dans le scénario ??

Au bout d'un an d'échanges (disponible sur <http://penangol.fr/energie/calculs-NW.pdf>), il apparaît que l'équilibre du réseau repose en fait sur la cogénération d'électricité, en contradiction avec les arguments avancés dans le texte...

Suivi de charge



Mobiliser des sources pilotables pour assurer l'équilibre offre / demande.

Hydro (notamment STEP)

*7 GW installés,
1.5 GW de gisement
(ADEME)*

Sources thermiques fossile

Production domestique ou exportée de CO₂

Imports/exports



Flexibilité de la production nucléaire

Actuellement : jusqu'à 5% Puissance nominale / min

Parmi les moyens de production les + flexibles en volume !

Vitesse de variation ?

Fréquence des variations ?

Durée à puissance intermédiaire ?

Evolution au cours du cycle ?

Physique du combustible ?

Conception des réacteurs ?

Aspects économiques ?

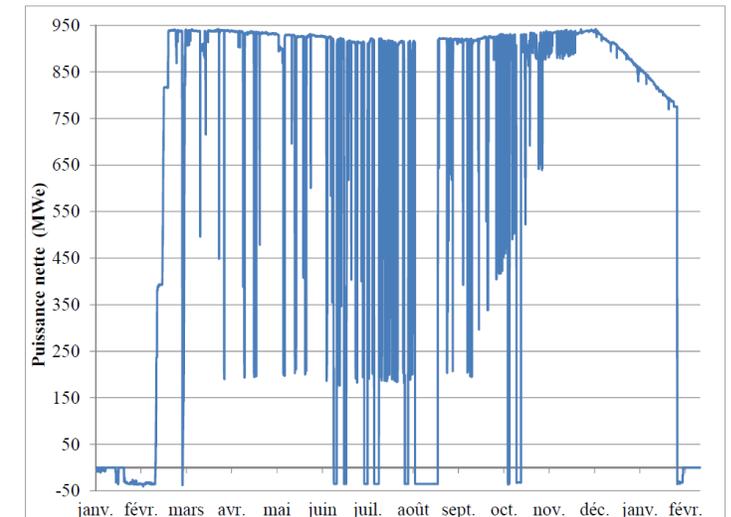
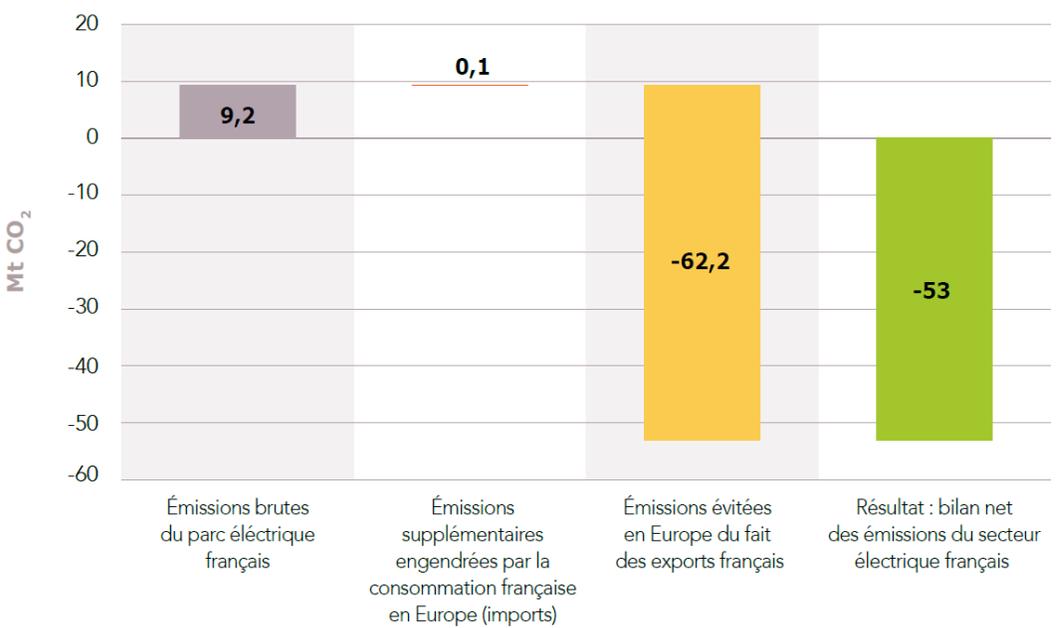
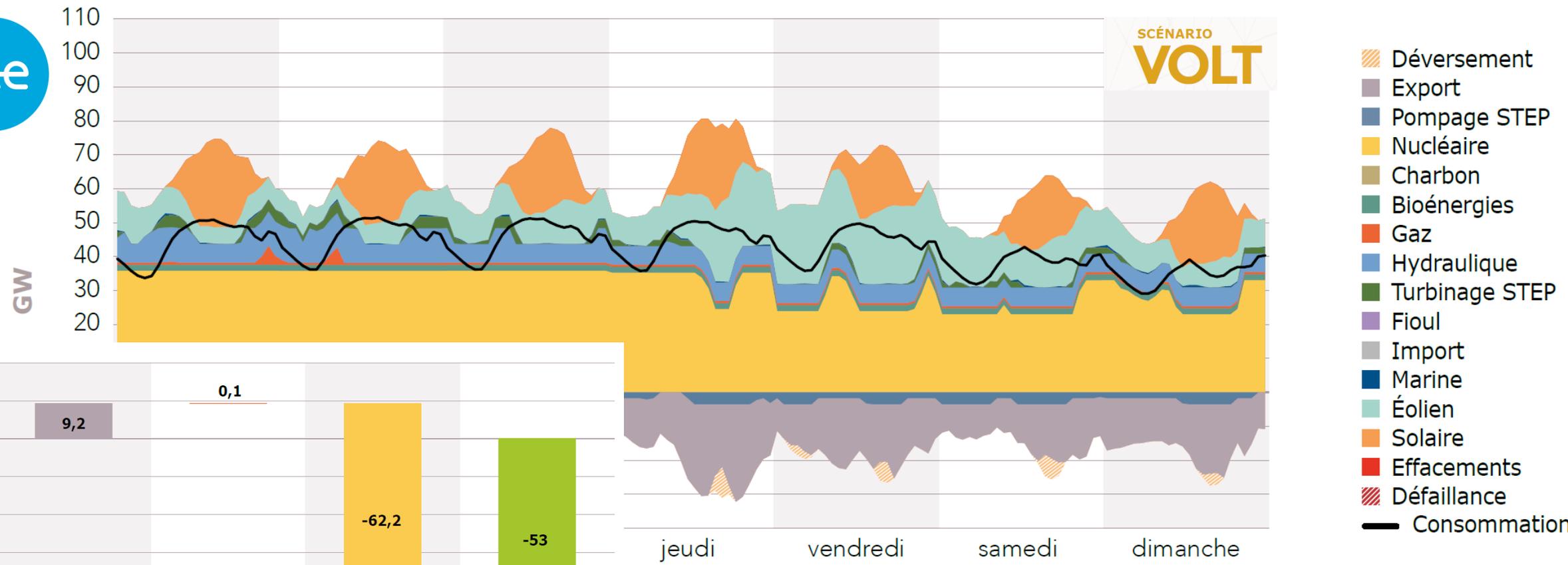


Figure II—3 : Exemple de profil de puissance de Blayais 2 pendant une campagne (de janvier 2014 à février 2015) (RTE, 2012–2016)



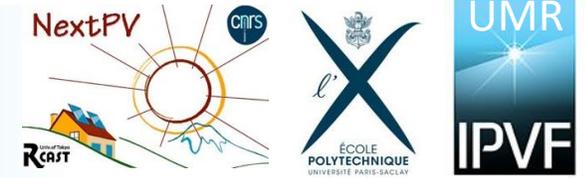
Suivi de charge



Forte participation du nucléaire au suivi de charge (France et Europe)

Forte contribution du mix Français à l'équilibre européen

Adaptation des usages



Redistribuer ou modifier la demande pour s'adapter à l'offre.

Historiquement, ballons d'eau chaude.

Demain, voitures électriques ?
(RTE : jusqu'à 8% conso. électrique en 2035)

Rôle croissant des outils de microgestion du réseau (smartgrids)

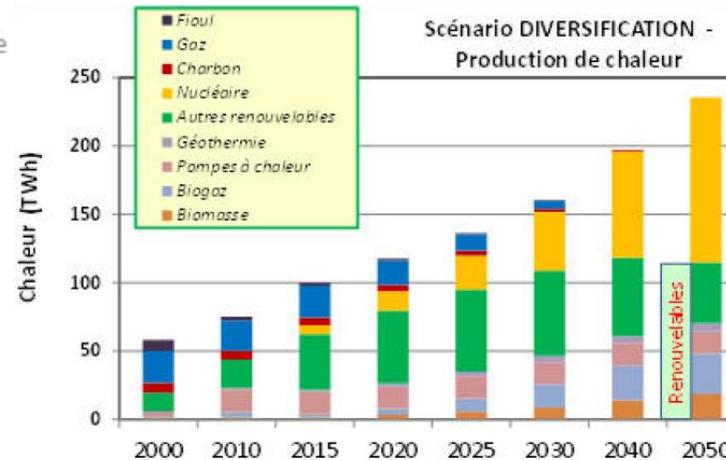
Retirer du réseau des usages qui n'ont pas besoin d'une alimentation finement pilotable ?



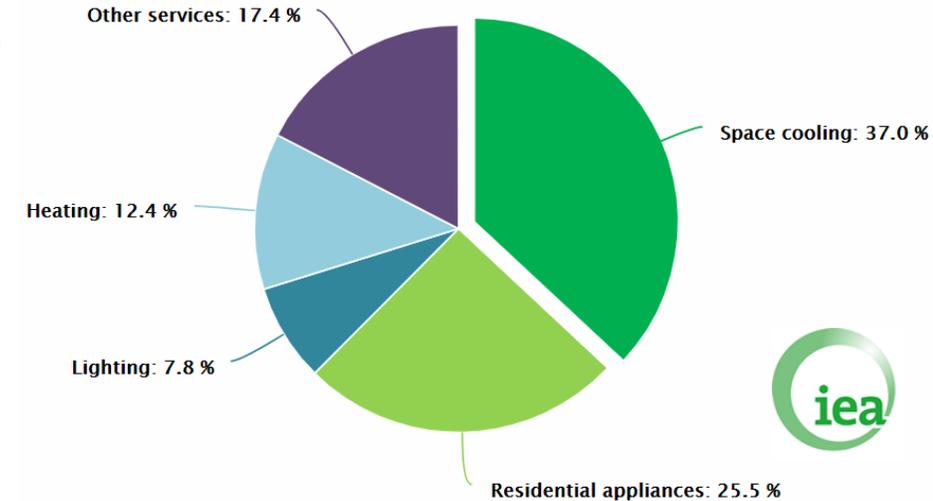
Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Énergie

« Dans ce scénario, le game changer est la récupération de la chaleur dissipée par les centrales nucléaires et sa distribution en réseaux. »

DIV



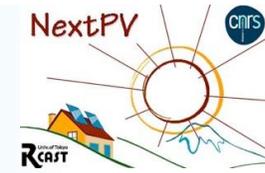
Share of final electricity demand growth to 2050



Réduction de la pointe hivernale (dimensionnement du réseau)

Matcher les productions et les usages ?

Conclusions



En France et **en Europe**, les ENRi sont amenées à jouer un rôle de plus en plus important.

Co-existence ENRi – nucléaire inévitable pour les années à venir.

*L'intermittence est un défi **physique**, **économique** et **polémique** qui doit être relevé.*

Un concept, des physiques.

Intermittence vs pilotabilité vs prévisibilité ; quelle métrique pour quel effet ?

Pas de solution miracle disponible, mais un ensemble de mesures envisagées ou déjà utilisées.

Foisonnement & Complémentarité

Stockage

Suivi de charge

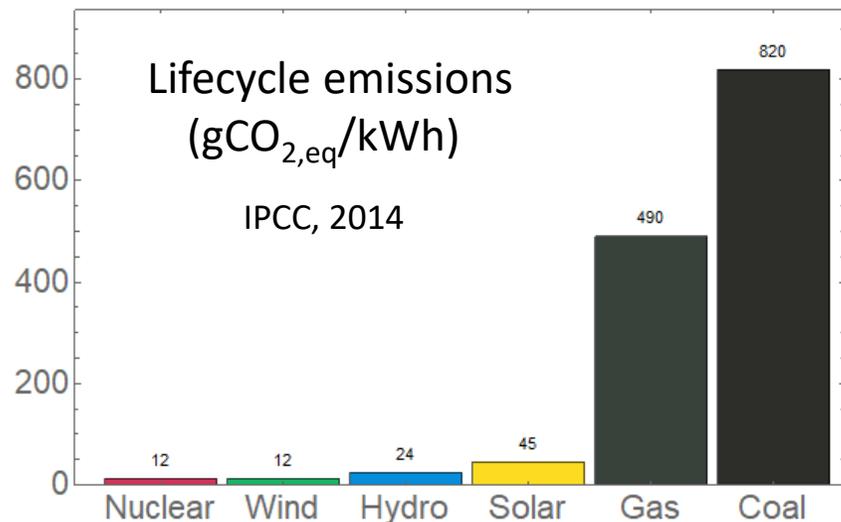
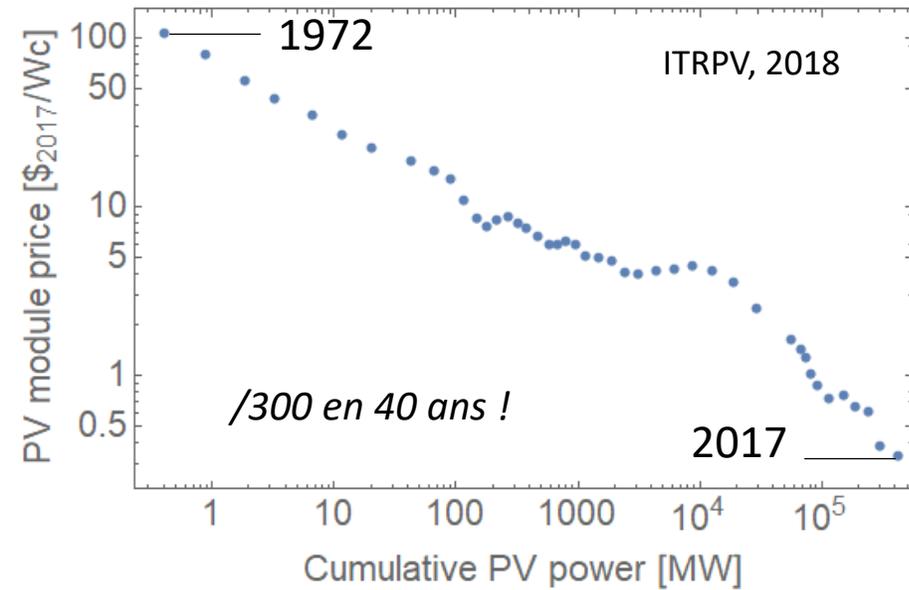
Adaptation des usages

Scénario énergétiques offrent des pistes prospectives, pas des démonstrations.

Evolutions technologiques rapides, qui changent régulièrement la donne.

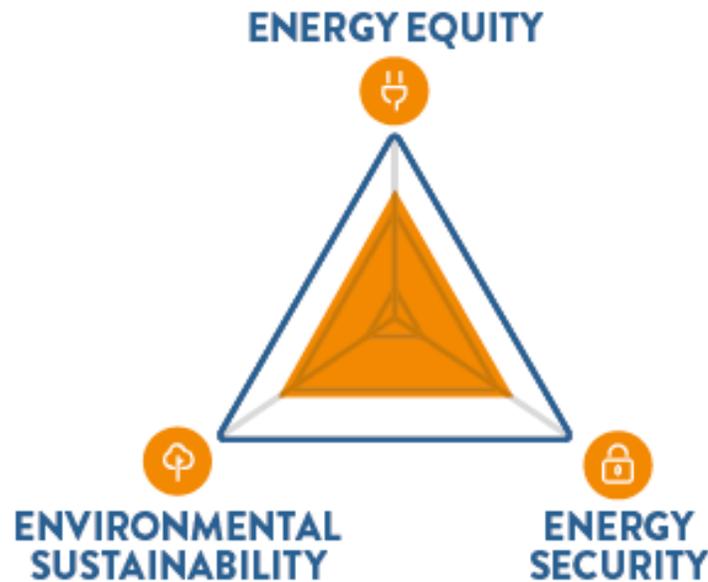
*Les mix ENRi (Danemark, Allemagne) ne sont pas forcément à imiter,
mais réalisent ce qui était « impossible » hier.*

Eolien et solaire : trilemne énergétique



Gisements et ressources (?) distribués

Coûts en diminution *très* rapide



Peu d'impacts climatiques et environnementaux

Ressources matérielles courantes (?)
(*peu de tension pour le PV*)

Gisements illimités
PV, éolien $\sim 100 \text{ W/m}^2$

Indépendance énergétique (?)
(*redistribution des dépendances*)

Puissance garantie ?

Stabilité dynamique ?