

Electricité de demain : consommation, production, stockage. Le dur chemin vers le 100% renouvelable.

Philippe Barois
Centre de Recherche Paul Pascal
UMR 5031 – CNRS – Université de Bordeaux
philippe.barois@crpp.cnrs.fr

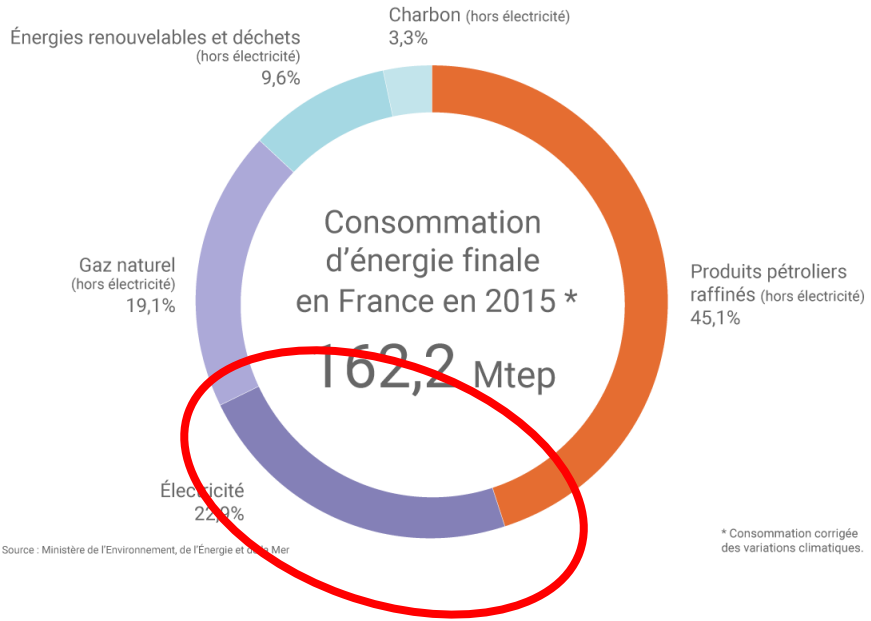


COMBIEN ?

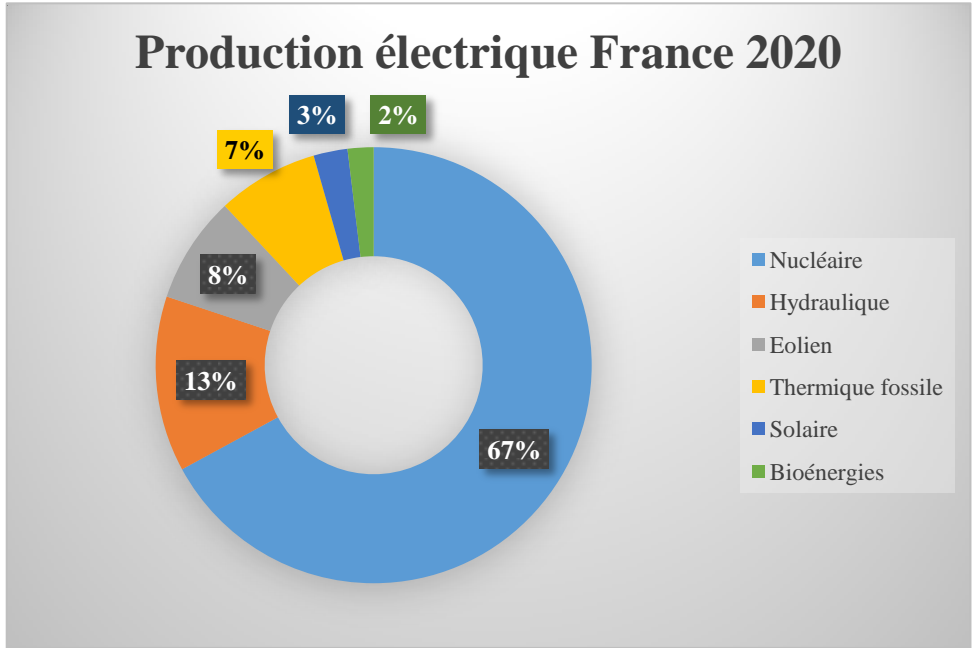


Consommation d'énergie en France

2019 : 1700 TWh



Electricité 23%



Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) : Objectif : décarbonation !

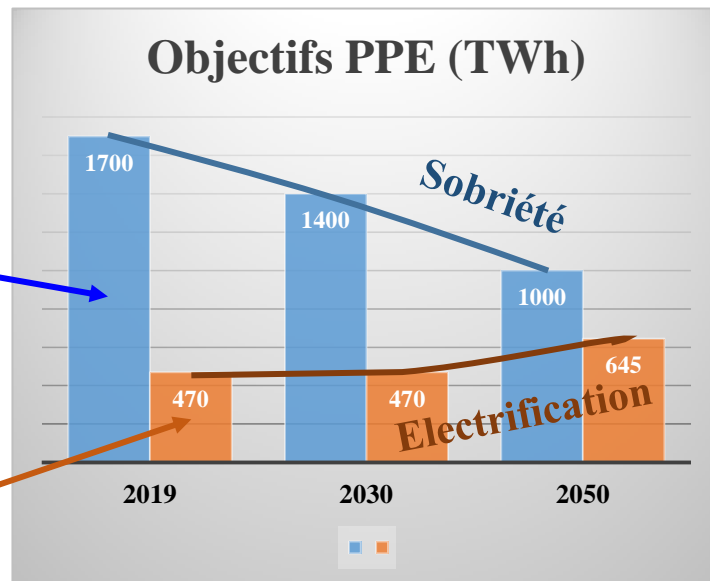
Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE)

Scénarios RTE

Sobriété énergétique :

Consommation
énergie finale

Consommation
électrique



- Scénario de référence RTE : 645 TWh électriques en 2050
- Scénarios RTE : de 555 à 752 TWh

LES TRAJECTOIRES DE CONSOMMATION À L'HORIZON 2050

SCÉNARIOS		
HYPOTHÈSES	NIVEAU 2050	PRINCIPALES ÉVOLUTIONS
<p>Référence</p> <p>Électrification progressive (en substitution aux énergies fossiles) et ambition forte sur l'efficacité énergétique (hypothèse SNBC). Hypothèse de poursuite de la croissance économique (+1,3% à partir de 2030) et démographique (scénario fécondité basse de l'INSEE). La trajectoire de référence suppose un bon degré d'efficacité des politiques publiques et des plans (relance hydrogène, industrie). L'industrie manufacturière croît et sa part dans le PIB cesse de se contracter. Prise en compte de la rénovation des bâtiments mais aussi de l'effet rebond associé.</p>	645 TWh	<ul style="list-style-type: none"> 180 TWh 134 TWh 113 TWh 99 TWh 50 TWh
<p>Sobriété</p> <p>Les habitudes de vie évoluent dans le sens d'une plus grande sobriété des usages des consommations (moins de déplacements individuels au profit des mobilités douces et des transports en commun, moindre consommation de biens manufacturés, économie du partage, baisse de la température de consigne de chauffage, recours à davantage de télétravail, sobriété numérique, etc.), occasionnant une diminution générale des besoins énergétiques, et donc également électriques.</p>	555 TWh (-90 TWh)	<ul style="list-style-type: none"> 160 TWh (-20 TWh) 111 TWh (-23 TWh) 95 TWh (-18 TWh) 77 TWh (-22 TWh) 47 TWh (-3 TWh)
<p>Réindustrialisation profonde</p> <p>Sans revenir à son niveau du début des années 1990, la part de l'industrie manufacturière dans le PIB s'infléchit de manière forte pour atteindre 12-13% en 2050. Le scénario modélise un investissement dans les secteurs technologiques de pointe et stratégiques, ainsi que la prise en compte de relocalisations de productions fortement émettrices à l'étranger dans l'optique de réduire l'empreinte carbone de la consommation française.</p>	752 TWh (+107 TWh)	<ul style="list-style-type: none"> 239 TWh (+59 TWh) 134 TWh (0 TWh) 115 TWh (+2 TWh) 99 TWh (0 TWh) 87 TWh (+37 TWh)
VARIANTES		
<p>Électrification rapide</p> <p>La part de l'électricité dans la consommation finale s'accroît de manière plus forte que dans la SNBC. Certains usages basculent plus rapidement ou fortement vers l'électricité. C'est particulièrement le cas dans le secteur des transports, dans lequel l'adoption du véhicule électrique et l'électrification de certaines catégories de poids lourds est beaucoup plus rapide. Le transfert vers le chauffage électrique se fait également plus rapidement et de manière plus volontariste.</p>	700 TWh (+55 TWh)	<ul style="list-style-type: none"> 192 TWh (+12 TWh) 139 TWh (+5 TWh) 120 TWh (+7 TWh) 125 TWh (+27 TWh) 50 TWh (0 TWh)
<p>Moindre électrification</p> <p>La part de l'électricité dans la consommation finale augmente de manière moins forte et moins rapide que dans la SNBC. Dans l'industrie, par exemple l'électricité ne parvient pas à être compétitive et la bascule vers l'électrification se fait moins rapidement. Il en est de même pour le transfert vers la mobilité électrique (véhicules légers et lourds) et vers les dispositifs de chauffage électrique dans les secteurs résidentiel et tertiaire.</p>	578 TWh (-67 TWh)	<ul style="list-style-type: none"> 150 TWh (-30 TWh) 126 TWh (-8 TWh) 107 TWh (-6 TWh) 81 TWh (-18 TWh) 50 TWh (0 TWh)
<p>Efficacité énergétique réduite</p> <p>Les hypothèses de progrès de l'efficacité énergétique des équipements électriques généralement retenues ne se matérialisent pas, ou s'accompagnent de phénomènes de surconsommation au-delà de ce qui est prévu dans la trajectoire de référence. Dans le secteur du bâtiment, les objectifs de rénovation et la conversion aux pompes à chaleur ne sont pas atteints, et le taux d'atteinte des gisements d'efficacité énergétique ne dépasse pas 50% en 2050 (contre 70% dans la trajectoire de référence).</p>	714 TWh (+69 TWh)	<ul style="list-style-type: none"> 191 TWh (+11 TWh) 156 TWh (+22 TWh) 135 TWh (+22 TWh) 105 TWh (+6 TWh) 50 TWh (0 TWh)
<p>Hydrogène +</p> <p>Le développement de la production d'hydrogène décarboné connaît une forte accélération conduisant à une demande finale d'hydrogène nettement plus élevée que dans la trajectoire de référence. L'hydrogène se substitue à l'électrification directe dans certains secteurs difficiles à électrifier (sidérurgie...) ainsi qu'à l'utilisation de biomasse (transport lourd, chaleur industrielle).</p>	754 TWh (+109 TWh)	<ul style="list-style-type: none"> 164 TWh (-16 TWh) 134 TWh (0 TWh) 113 TWh (0 TWh) 93 TWh (-6 TWh) 171 TWh (+121 TWh)

Puissance



~700 W



~1 kW



~100 kW



~1 MW



~1 GW

Energie (/an)



kWh
kilo



MWh
mega



GWh
giga



TWh
tera

NB :
 $1 \text{ GW} \times 24 \text{ h} \times 365 \text{ j}$
 $= 8,76 \text{ TWh/an}$

$$1 \text{ kW.h} = 1000 \text{ Watts} \times 3600 \text{ secondes} = 3\,600\,000 \text{ J} = 3,6 \text{ MJ}$$



OFFRE POUR LES CLIENTS PARTICULIERS

Applicable au 1^{er} Janvier 2020

Option Base (TTC)		
Puissance Souscrite (kVA)	Abonnement mensuel (€ TTC/mois)	Prix du kWh (cts € TTC/kWh)
12	13,73	15,57

Option Heures Creuses (TTC)			
Puissance Souscrite (kVA)	Abonnement mensuel (€ TTC/mois)	Prix du kWh (cts € TTC/kWh)	
		Heures Pleines	Heures Creuses
12	15,89	17,11	13,21

1 kWh = 15,57 cts € TTC

$$E_{\text{pot}} = mgh \rightarrow 1 \text{ kWh} =$$

FRANCE : 1700 TWh/an (68 millions habitants)

→

~ 25 MWh/hab/an

→

1 esclave : 100W 10h/jour et 365 j/an = 365 kWh

→ **Consommation équivalente à ~70 esclaves/habitant !**

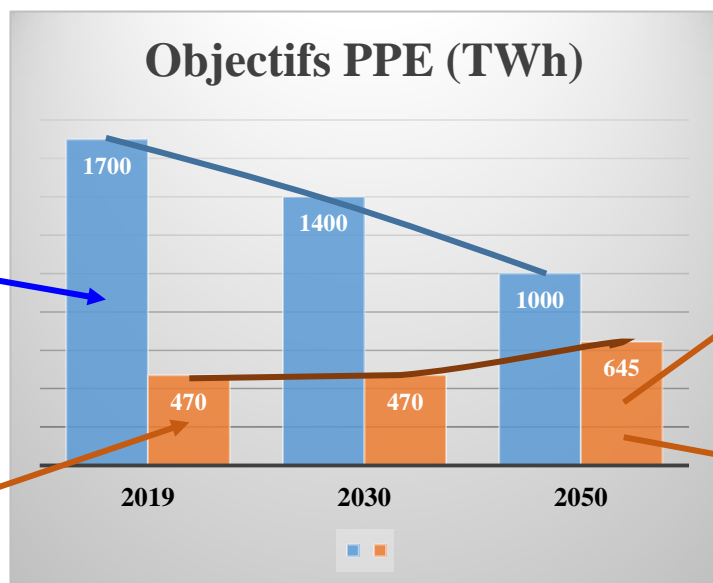
$$E_{\text{cin}} = \frac{1}{2} mV^2 \rightarrow 1 \text{ kWh} =$$

(> 4 milliards d'esclave en France) à 100 km/h

10 t

Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE)
Objectif : décarbonation !

Sobriété énergétique :



Consommation
énergie finale

Consommation
électrique

Scénario 1 (M0 de RTE) :

- 0% Fossile
- 0% Nucléaire
- 100% renouvelable

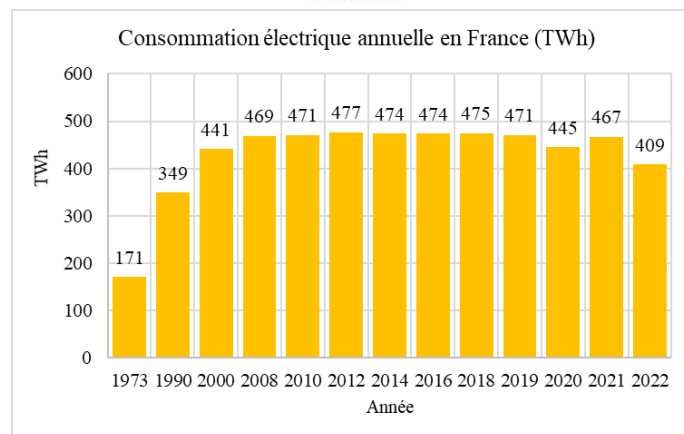
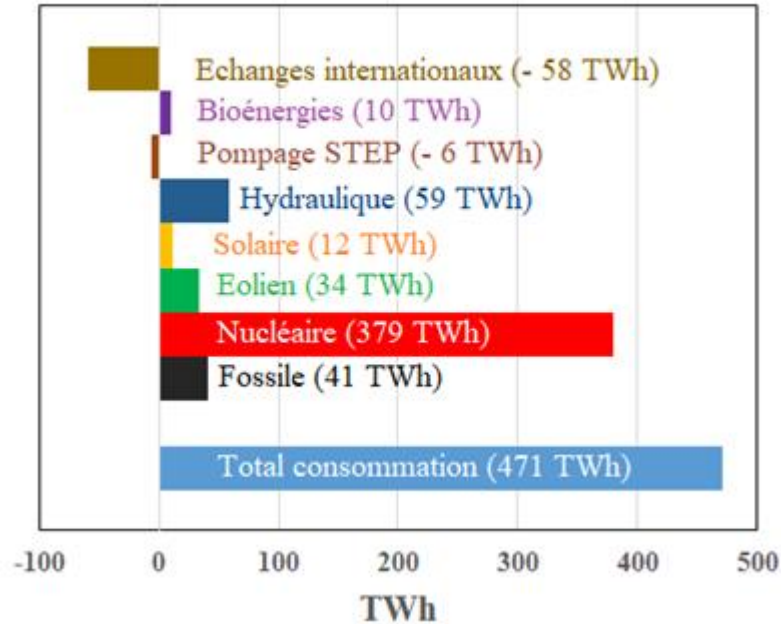
Scénario 2 (N03 de RTE) :

- 0% Fossile
- 50% Nucléaire
- 50% renouvelable

- Scénario de référence RTE :
645 TWh électriques en 2050
- Scénarios RTE : de 555 à 752 TWh

Bilan électrique 2019

Mix énergétique France 2019

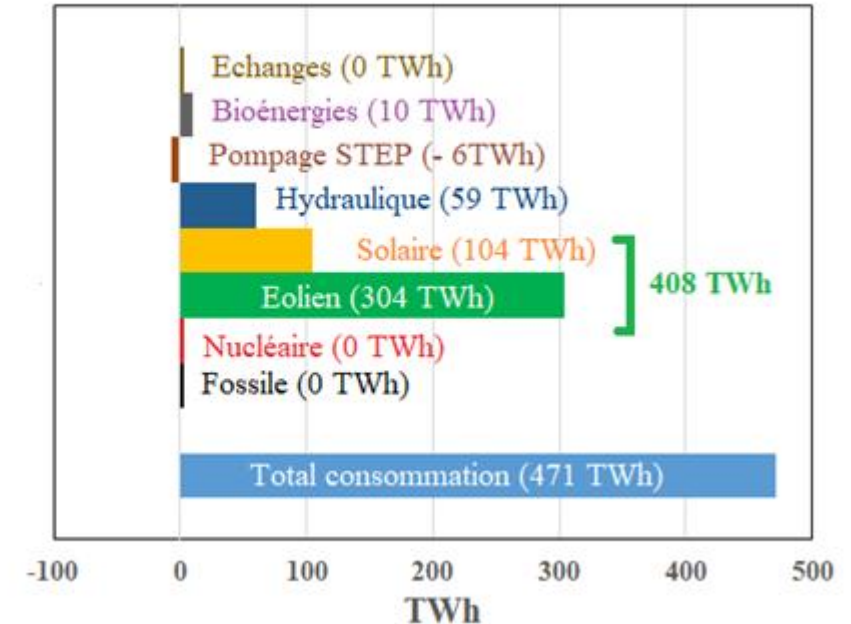


<https://www.rte-france.com/eco2mix/la-production-deelectricite-par-filiere>

<https://www.rte-france.com/eco2mix/telecharger-les-indicateurs>

« Expérience de pensée »

Mix 100% renouvelable

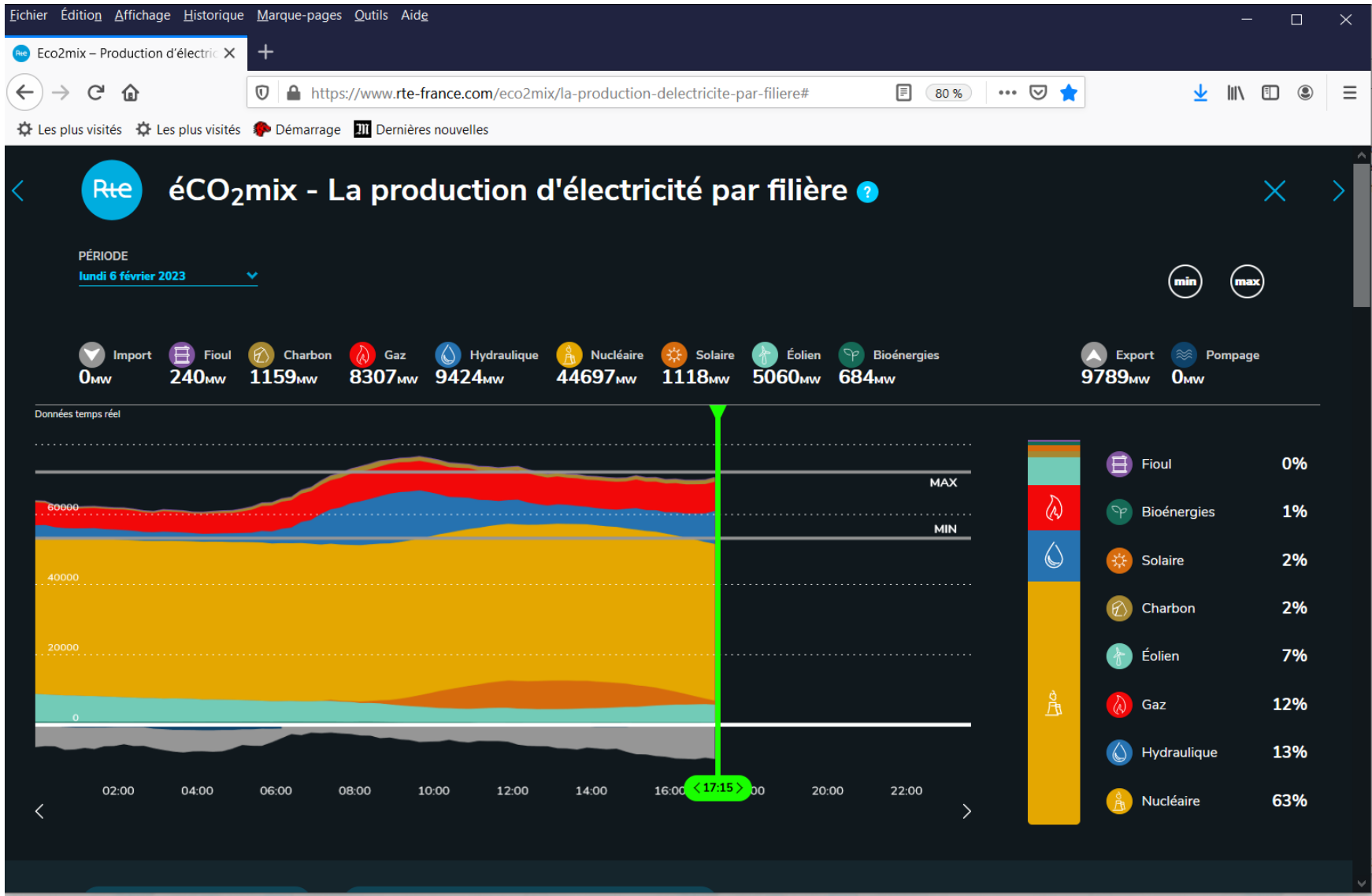


Règles du jeu:

- Consommation préservée
- Bioénergies, hydraulique inchangés
- Echanges internationaux = 0

→ Quelles implications « quantitatives » ?

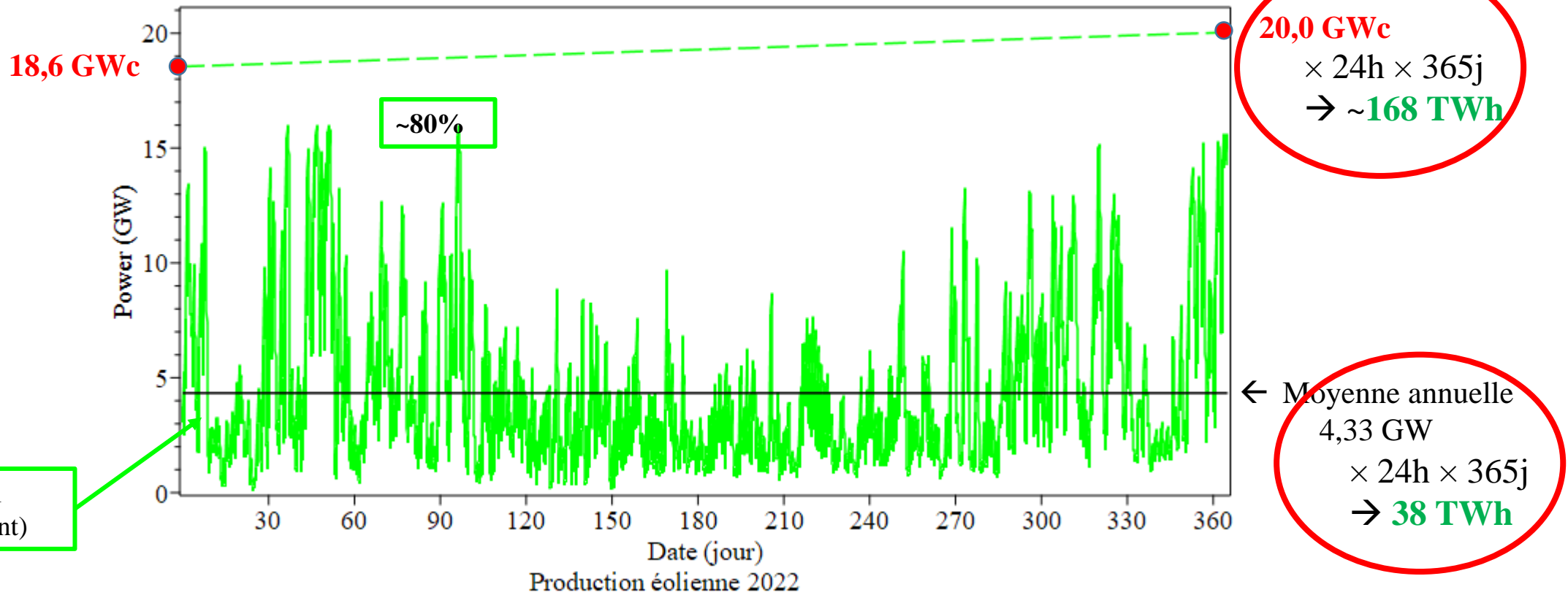
- Combien d'éoliennes ?
- Quelle surface de panneaux PV ?
- Quelles capacités de stockage ?
- ?...





Eolien

Production éolienne – France 2022



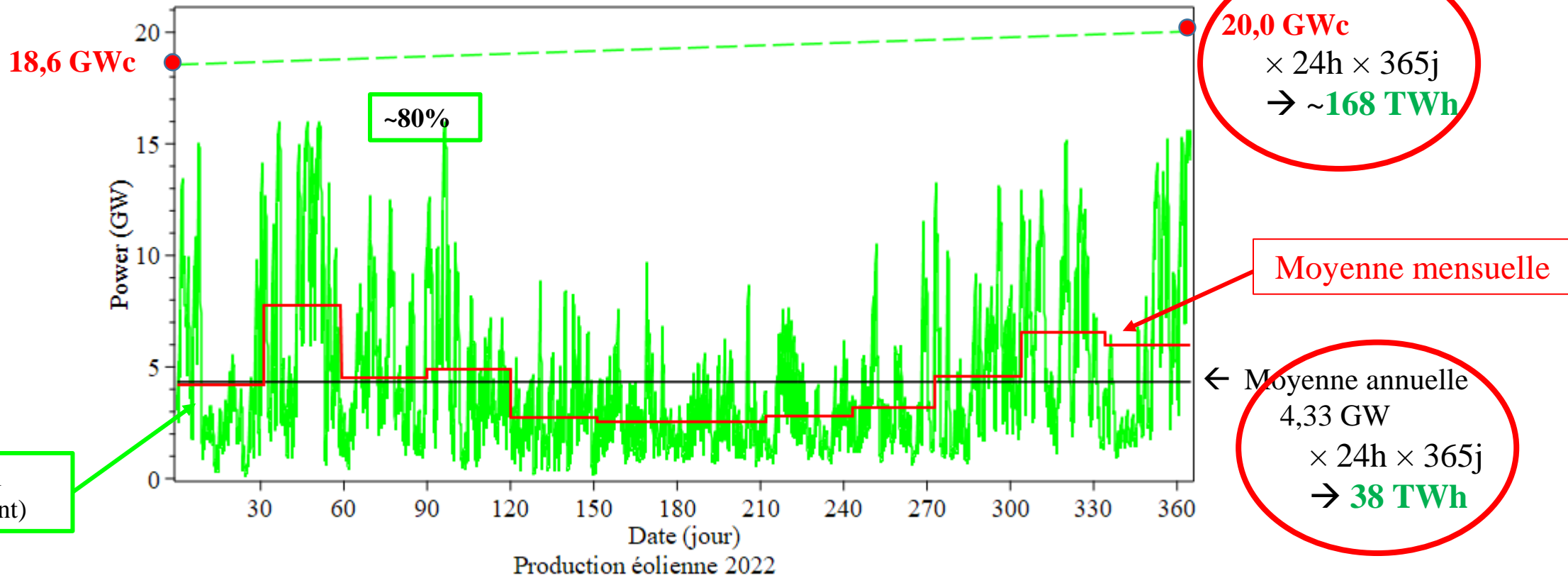
Facteur de charge éolien 2022 = $38/168 = 22,6\%$

Année	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
FC éol	22,6	24,5	22,0	21,6	22,8	24,6	26,4	26,0	22,6



Eolien

Production éolienne – France 2022



Facteur de charge éolien 2022 = $38/168 = 22,6\%$

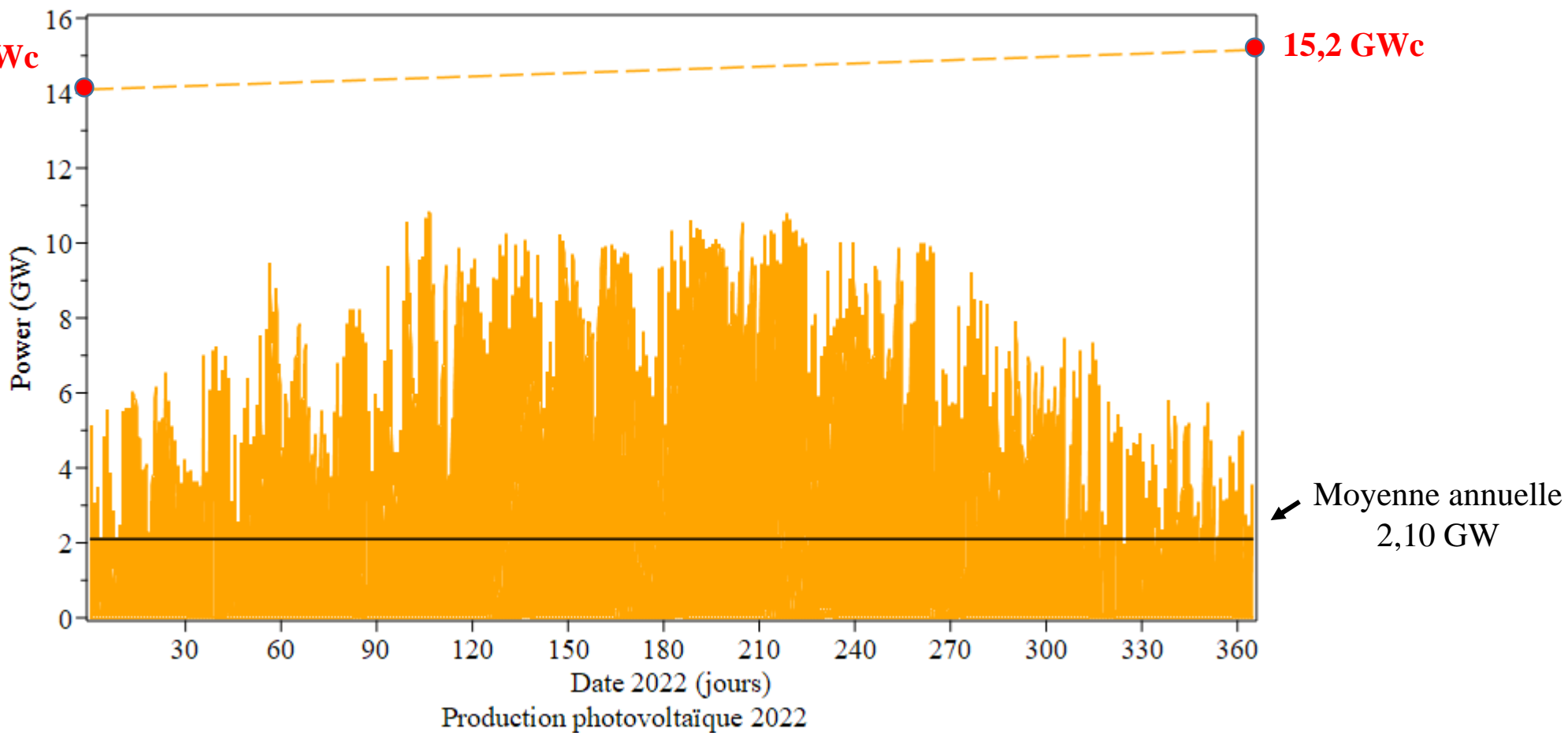
Année	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
FC éol	22,6	24,5	22,0	21,6	22,8	24,6	26,4	26,0	22,6



Production photovoltaïque – France 2022

Photovoltaïque

14,1 GWc



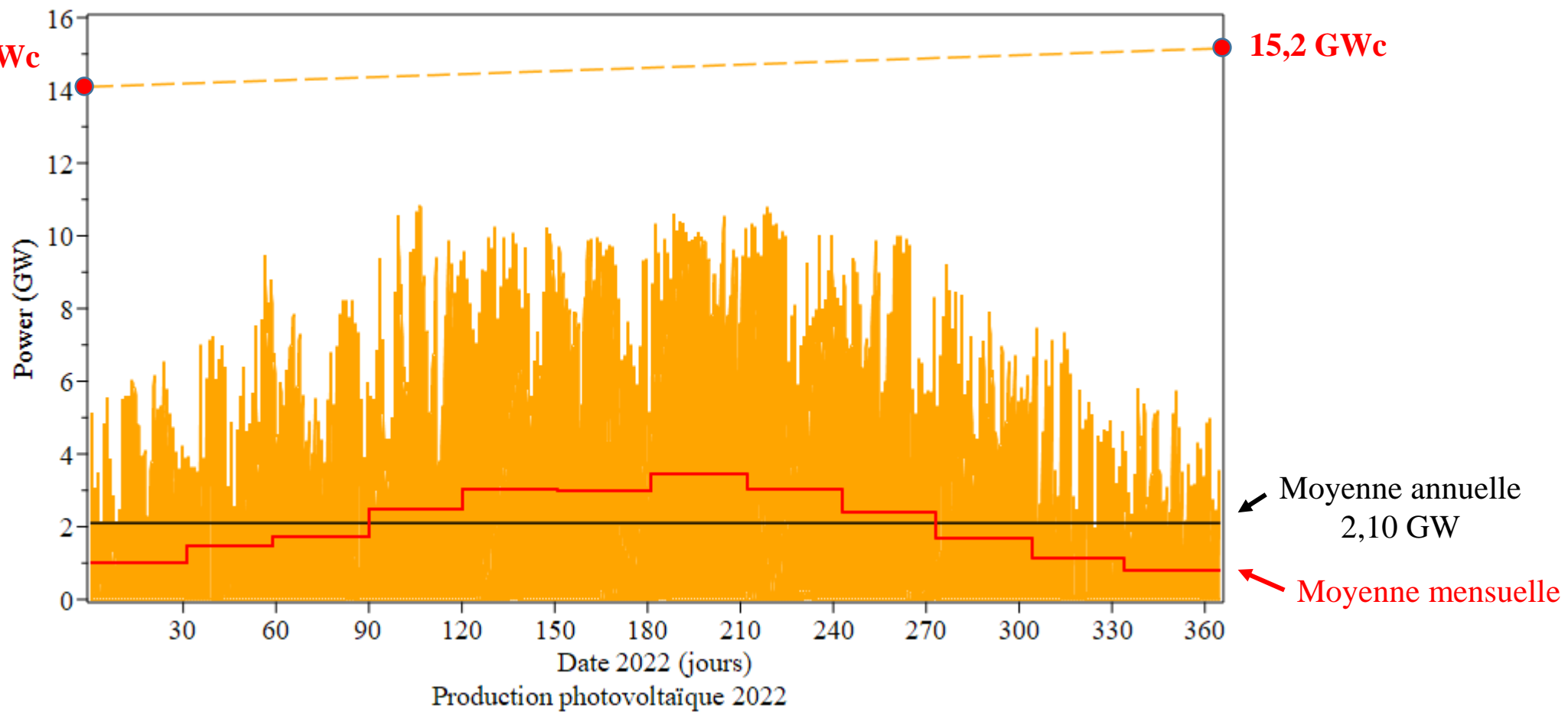
Facteur de charge photovoltaïque 2022 = 14%



Photovoltaïque

14,1 GWc

Production photovoltaïque – France 2022



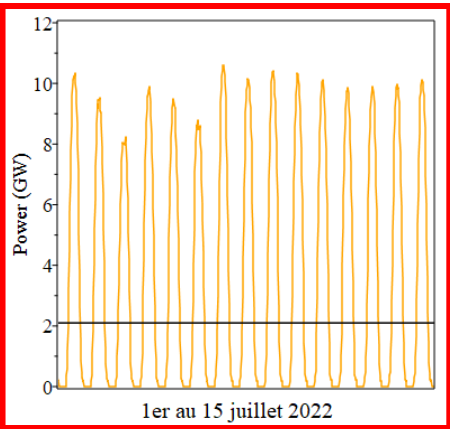
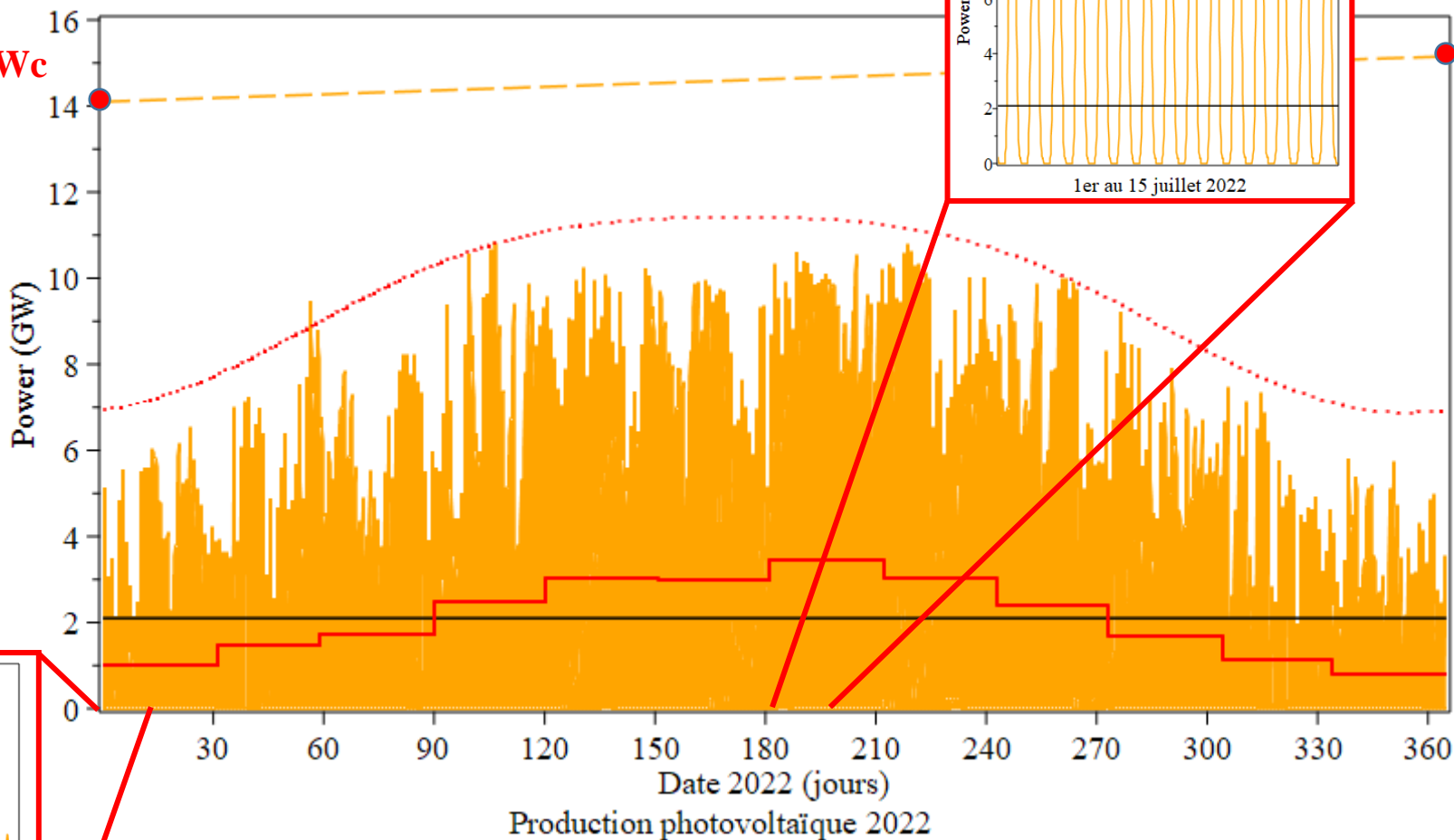
Facteur de charge photovoltaïque 2022 = 14%



Photovoltaïque

14,1 GWc

Production photovoltaïque – France



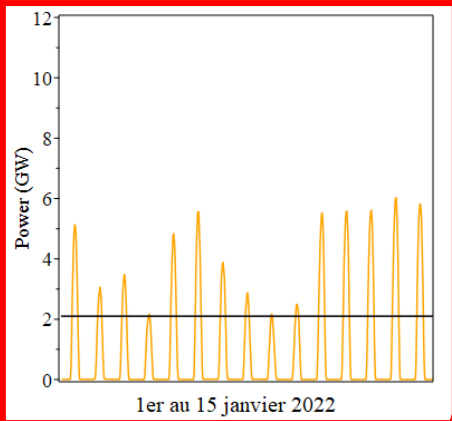
15,2 GWc

Effet d'angle d'incidence

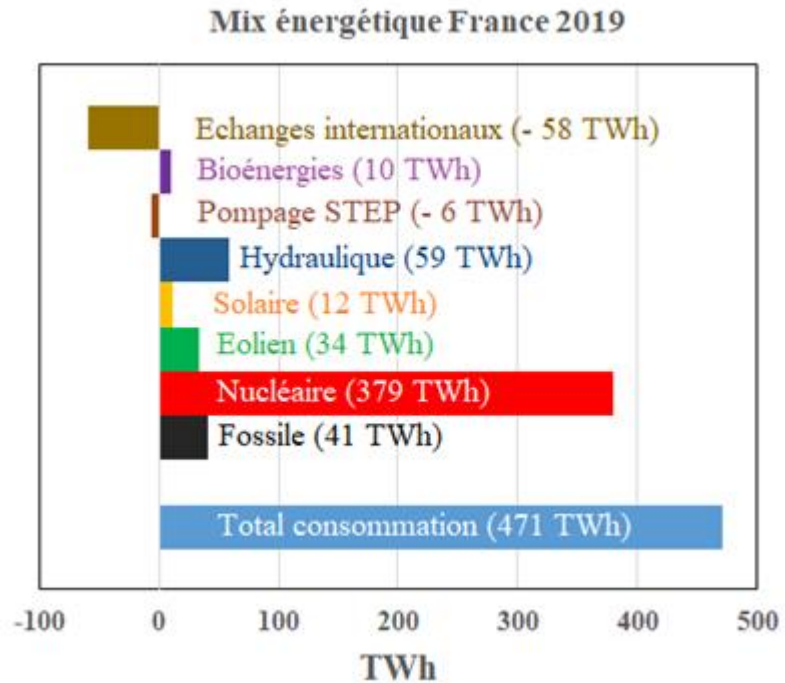
Moyenne annuelle 2,10 GW

Moyenne mensuelle

Facteur de charge photovoltaïque 2022 = 14%



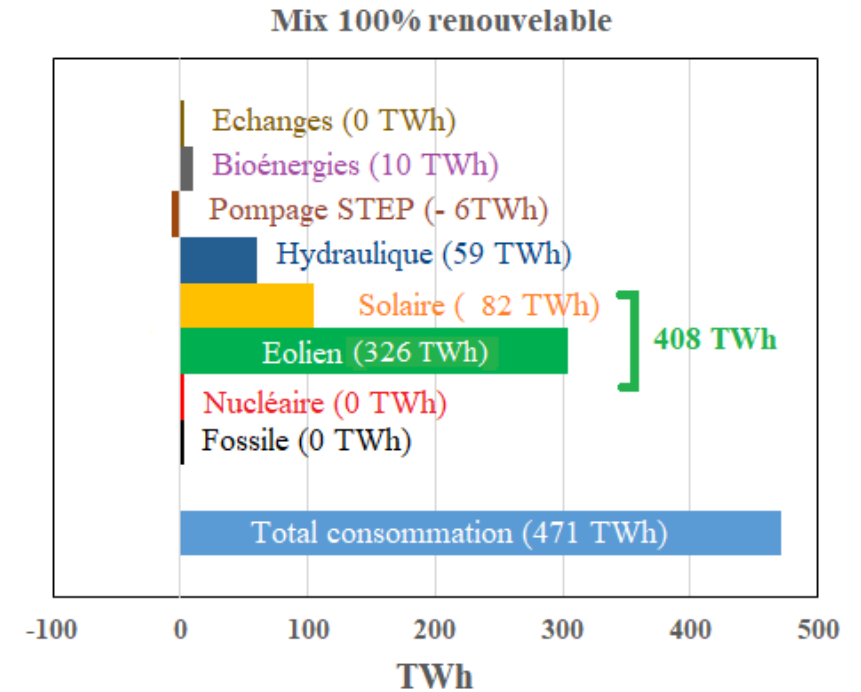
Bilan électrique 2019



(Eolien + solaire) 2019 = 46 TWh



« Expérience de pensée »



(Eolien + solaire) virtuel 2019 = 408 TWh

Hypothèse : 80% éolien + 20 % PV

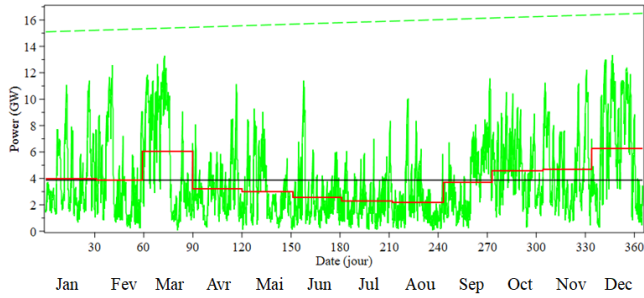
Soit 326 TWh éolien + 82 TWh PV

→ × 9 →



Eolien

Production éolienne cible – France 2019 326 TWh



Facteur de charge éolien 2019 = 25%

$$Pc_{\text{éolien}}(GW) = \frac{\text{Production annuelle (GWh)}}{\text{Nombre d'heures annuel}} \times \frac{1}{\text{Facteur de charge}}$$

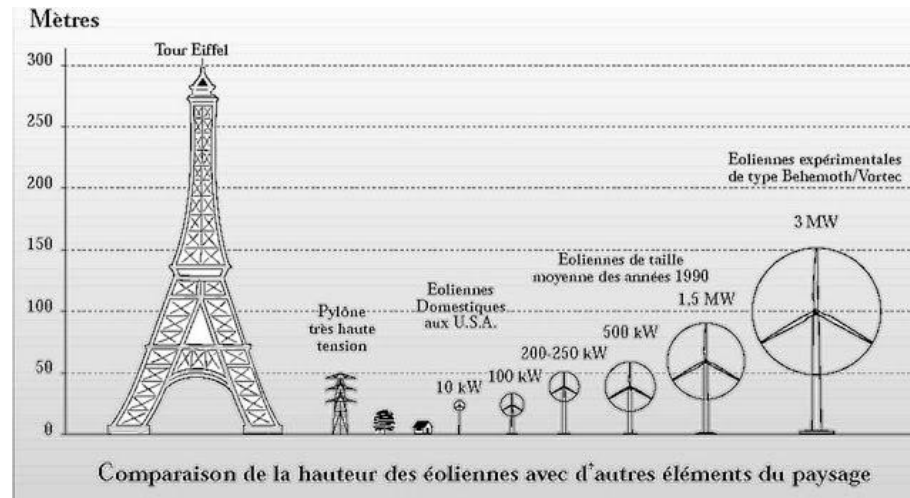
$$= \frac{326\,000 \text{ GWh}}{24 \times 365 \text{ heures}} \times \frac{1}{0,25} \sim 150 \text{ GWc(éolien)}$$

~ 8,3 fois la puissance installée au 31 mars 2021

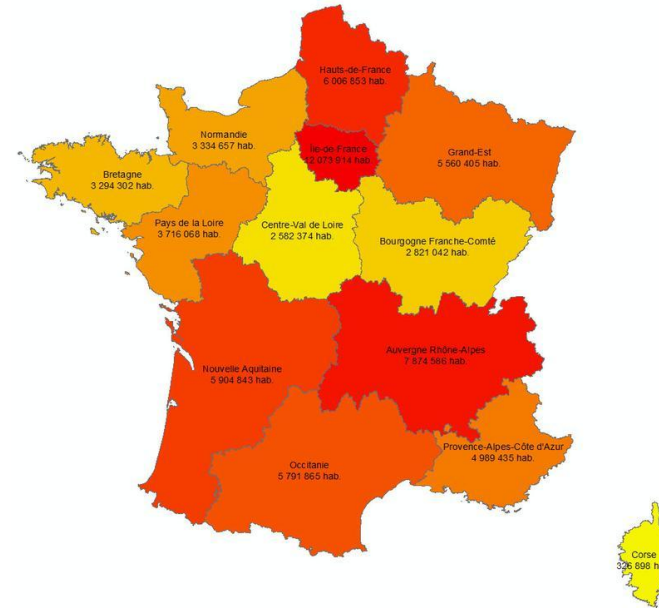
~ 75 000 éoliennes terrestres de 2 MWc (D=80m)

~ 50 000 éoliennes terrestres de 3 MWc (D=100m)

NB : France métropolitaine = 550 000 km²
 → 1 éolienne 3MWc par « cellule » de 11 km²
 → soit 1 éolienne tous les 3,3 km, partout,
 dans toutes les directions



Surface occupée par les éoliennes – Effet de sillage



Eoliennes de puissance crête **3 MWc** (diamètre de rotor 100m)
disposées sur des cellules de 0.375 km^2 (500m x 750 m soit 5 rotors x 7,5 rotors pour éviter l'effet de sillage),
50 000 éoliennes → 18 750 km²

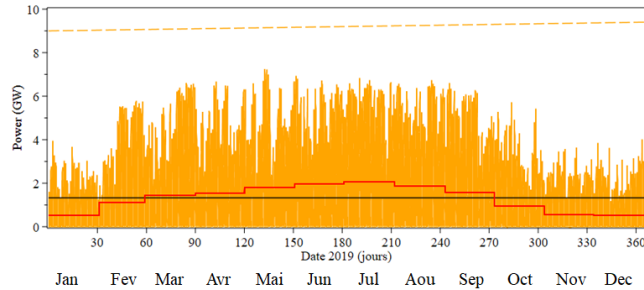
> deux fois la superficie de la Corse (8 680 km²) ou 1,5 fois la région Ile-de-France (12 011 km²).
= **3,4%** de la France métropolitaine.

NB : ensemble des sols artificialisés = 49 500 km² = 9% du territoire (INSEE 2018)



Photovoltaïque

Production photovoltaïque cible – France 2019 82 TWh



$$Pc_{PV}(GW) = \frac{\text{Production annuelle (GWh)}}{\text{Nombre d'heures annuel}} \times \frac{1}{\text{Facteur de charge}}$$

$$= \frac{82\,000\text{ GWh}}{24 \times 365\text{ heures}} \times \frac{1}{0,14} = 67\text{ GWc(PV)}$$

Facteur de charge PV = 14%

~ 6,2 fois la puissance installée au 31 décembre 2020



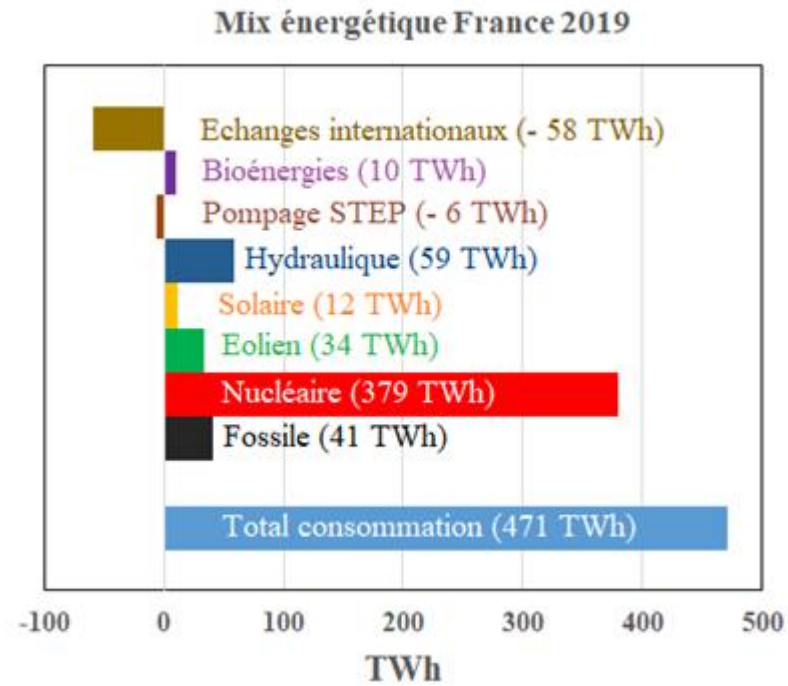
Projet Saucats 1000 ha, 2 GWc

- Soit **383 km² (38 300 ha)** de panneaux Si de puissance crête 175Wc/m²
- = 0,14% des terres agricoles (NB : 820 km²/an disparues de 2006 à 2010)
- = 0,75% des sols artificialisés

NB : Projection fin 2028 (PPE) entre 35 et 44 GWc

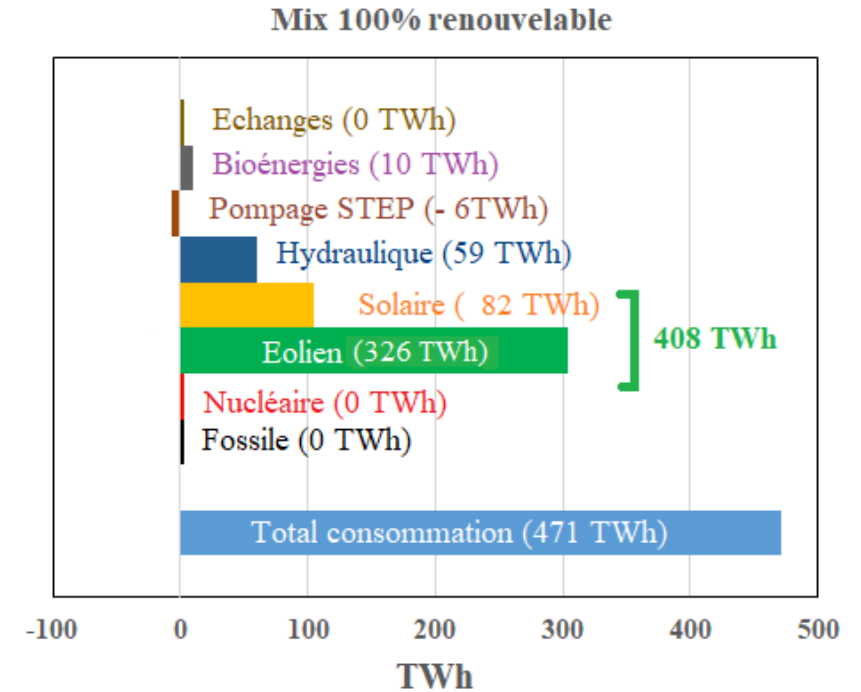
<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publicationweb/343?type=versionimprimable>

Bilan électrique 2019



(Eolien + solaire) 2019 = 46 TWh

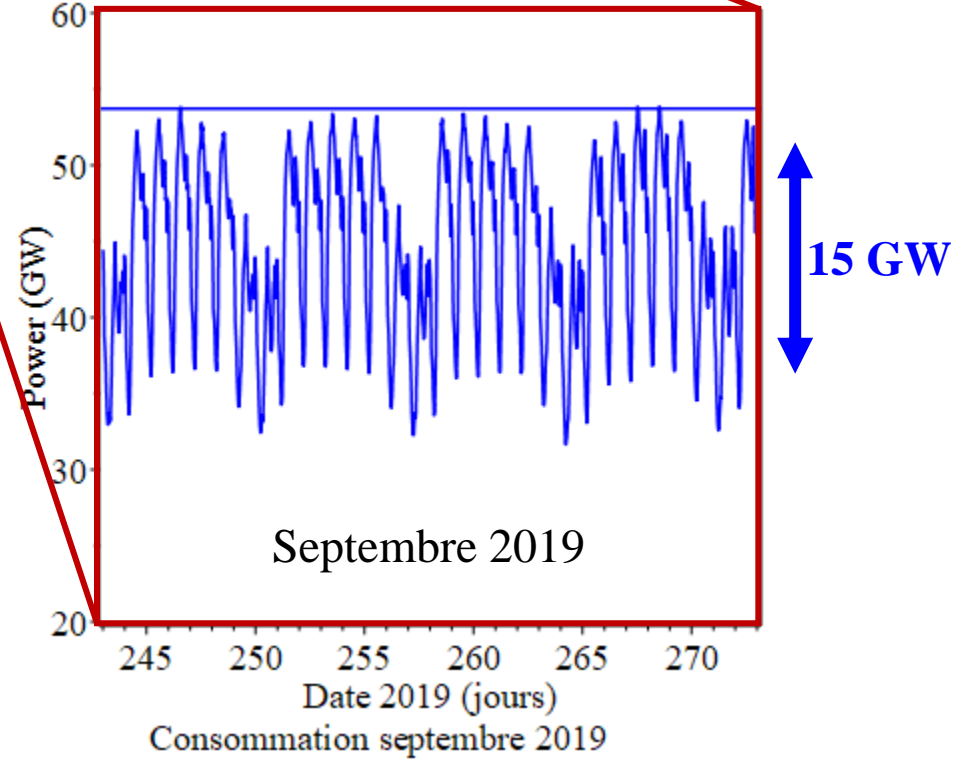
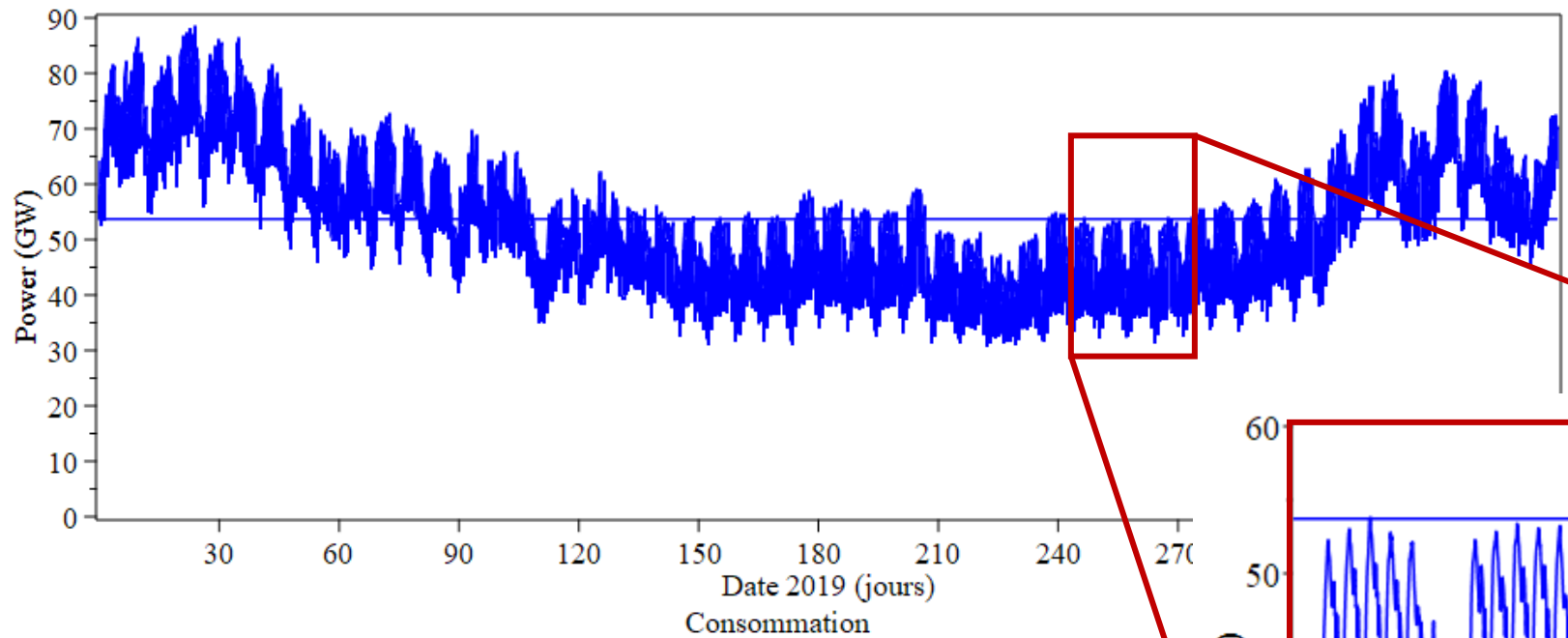
« Expérience de pensée »

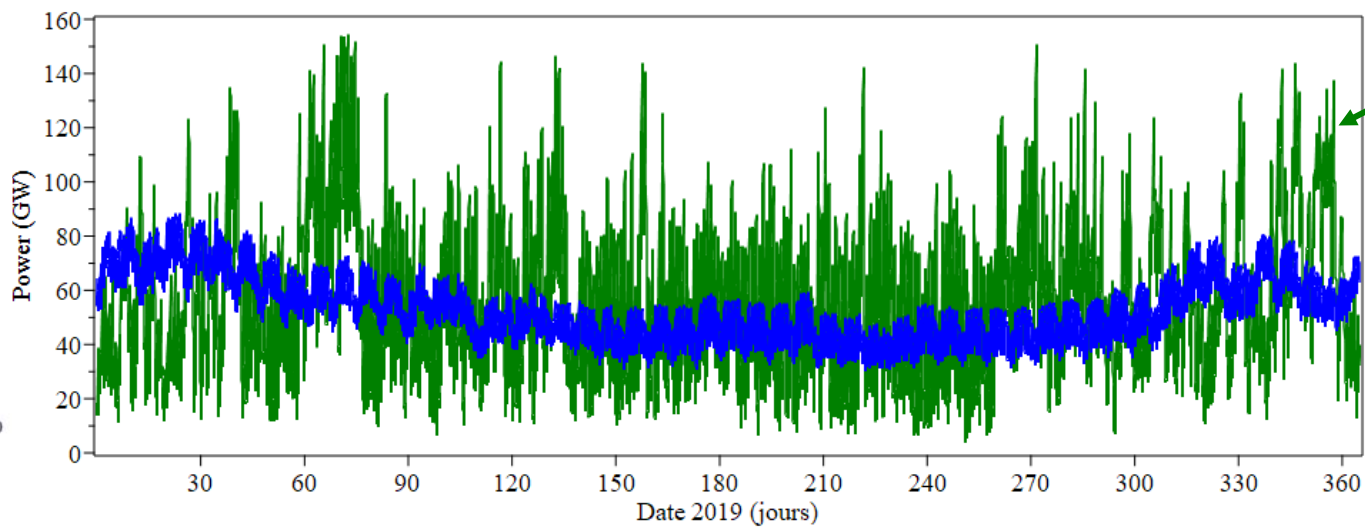
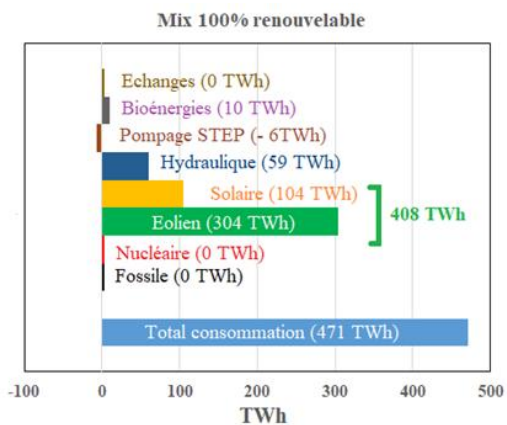


(Eolien + solaire) virtuel 2019 = 408 TWh

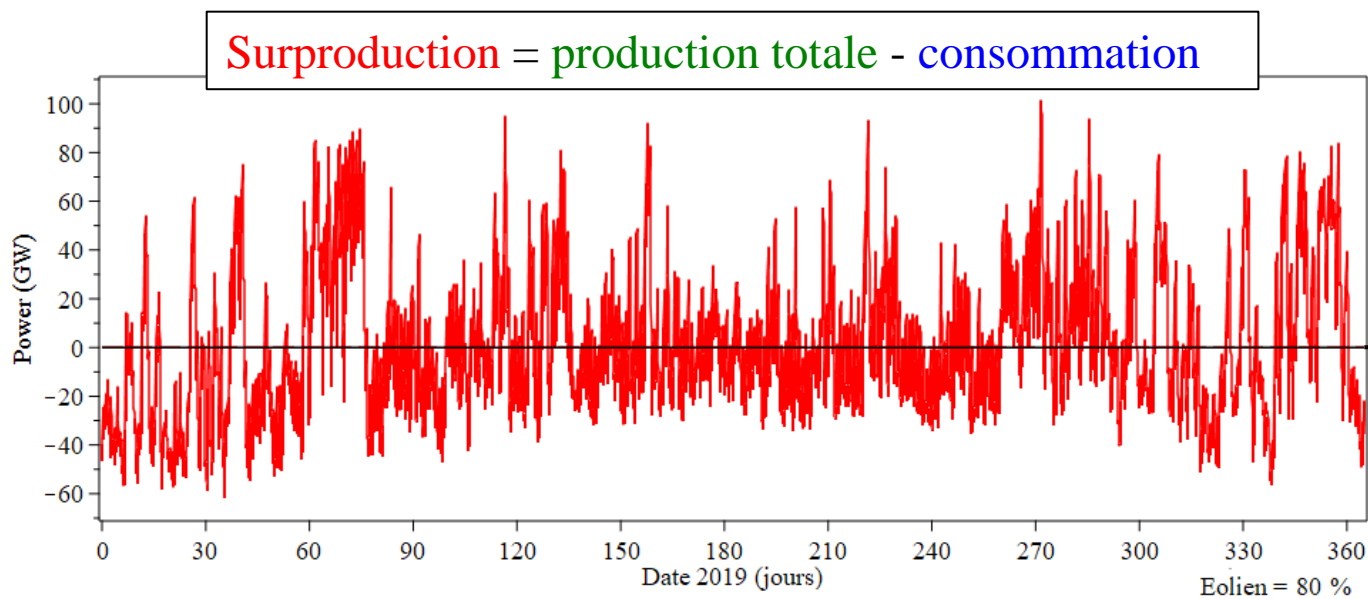
~ 50 000 éoliennes terrestres de 3 MWc
~ 38 300 ha de panneaux PV

Puissance électrique nette consommée - France 2019



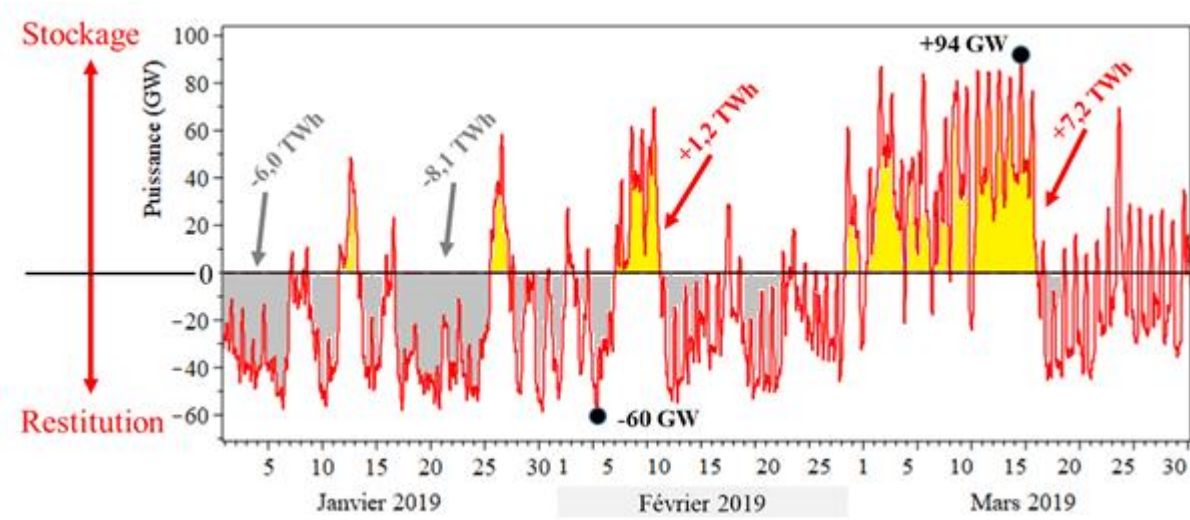


Courbe de surproduction

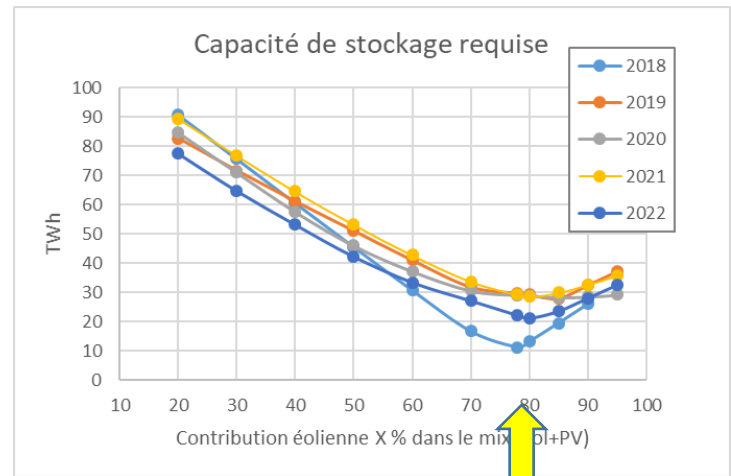
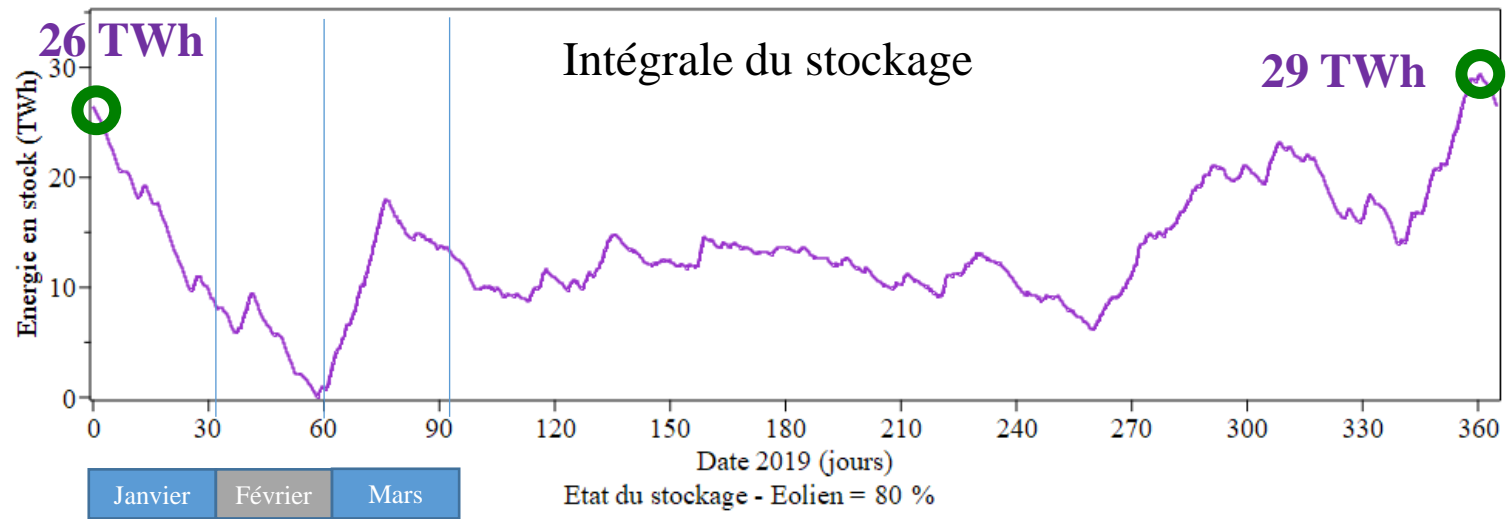


Sur- et sous-production : contraintes de stockage

Zoom premier trimestre 2019

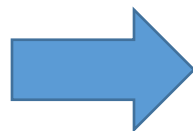
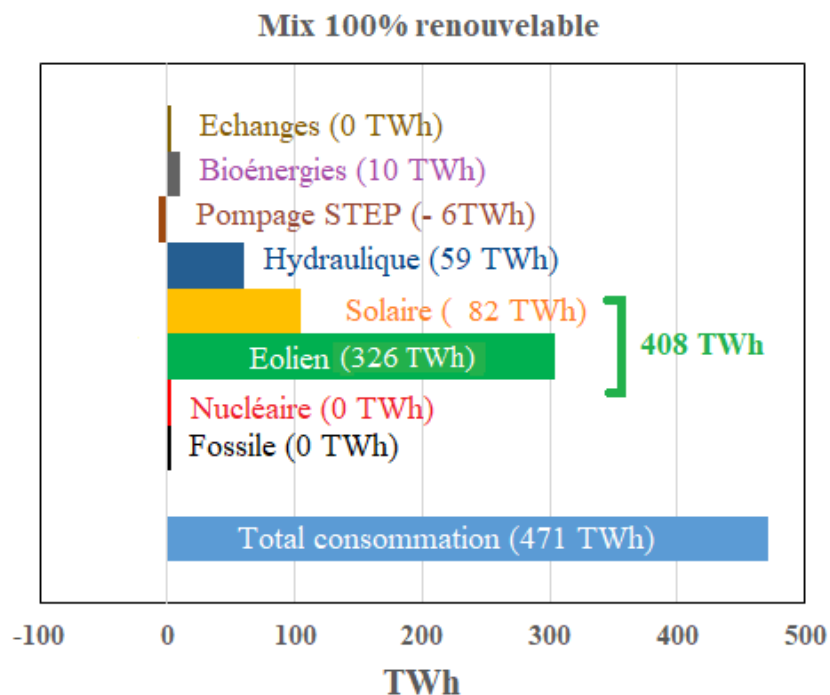


Performances de stockage:
 ~ 10 TWh sur plusieurs mois
 ~ 100 GW en stockage
 ~ 60 GW en déstockage



**Optimum du mix éolien-solaire
 ~ 80% éolien + 20% solaire**

Bilan provisoire



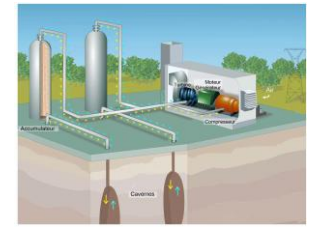
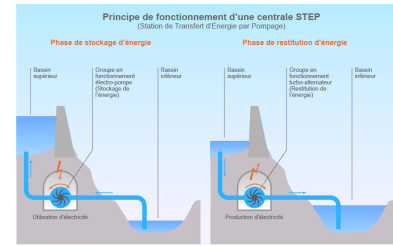
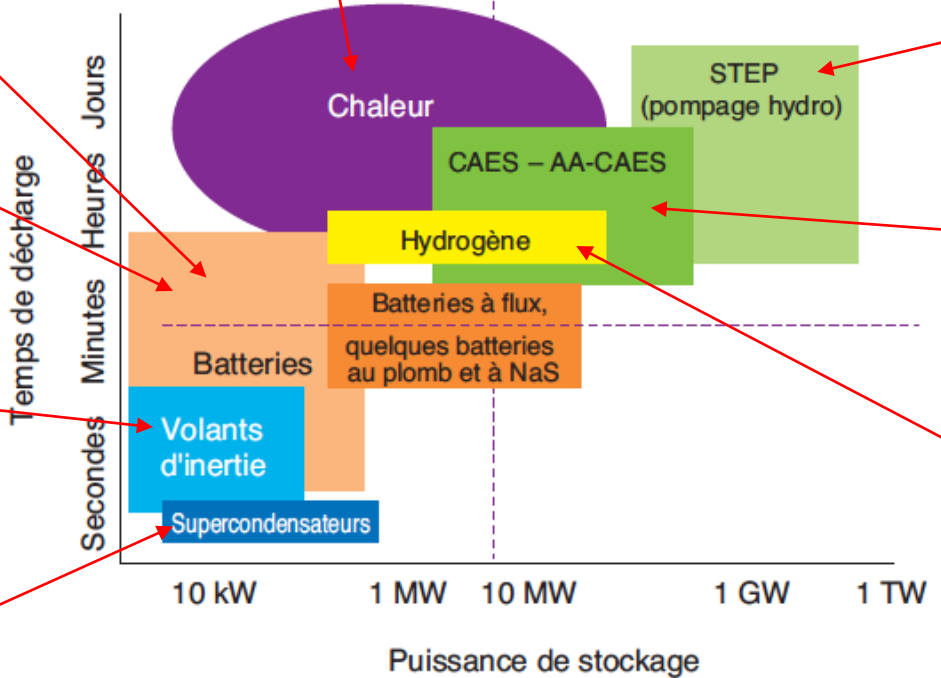
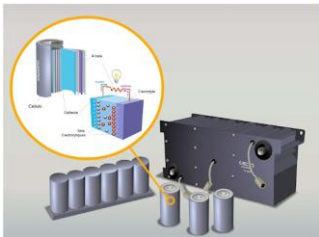
Hypothèses:

- Consommation inchangée
- Hydraulique, pompage et biomasse inchangés
- Echanges internationaux = 0

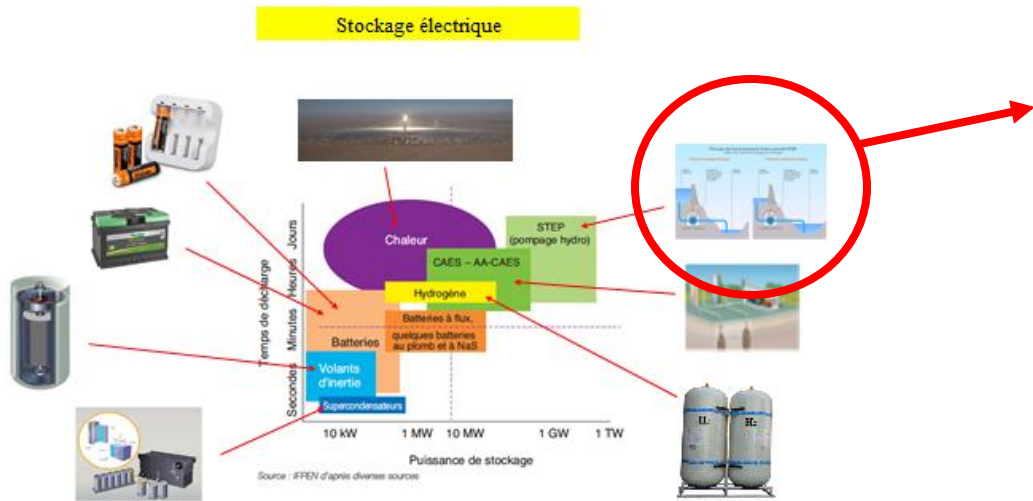
- **Eolien / PV ~ 80% / 20%**
 - Eolien = 326 TWh, PV = 82 TWh
- **50 000 éoliennes terrestres de 3 MWc**
 - ❖ 8,3 fois le parc 2021, 18 750 km²
- **38 300 ha de panneaux photovoltaïques**
 - ❖ 6,2 fois 2021
- **~30 TWh en capacité de stockage**
 - ❖ Puissance ~ -60 GW < P < 100 GW
 - ❖ Durée 10 TWh > 6 mois



Stockage électrique

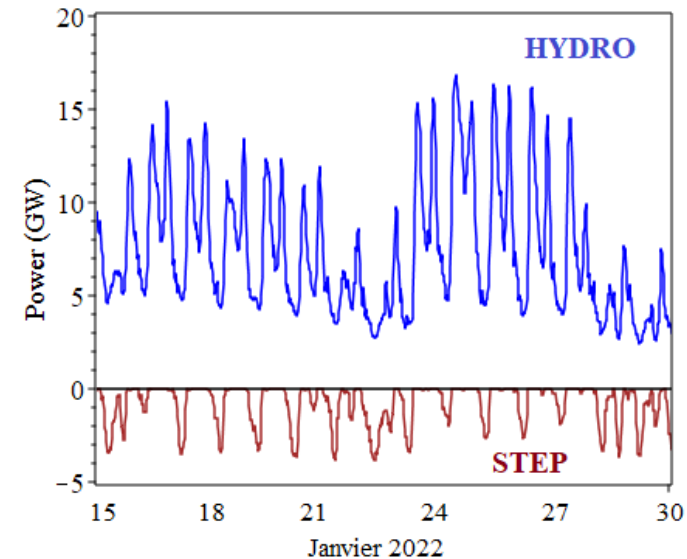
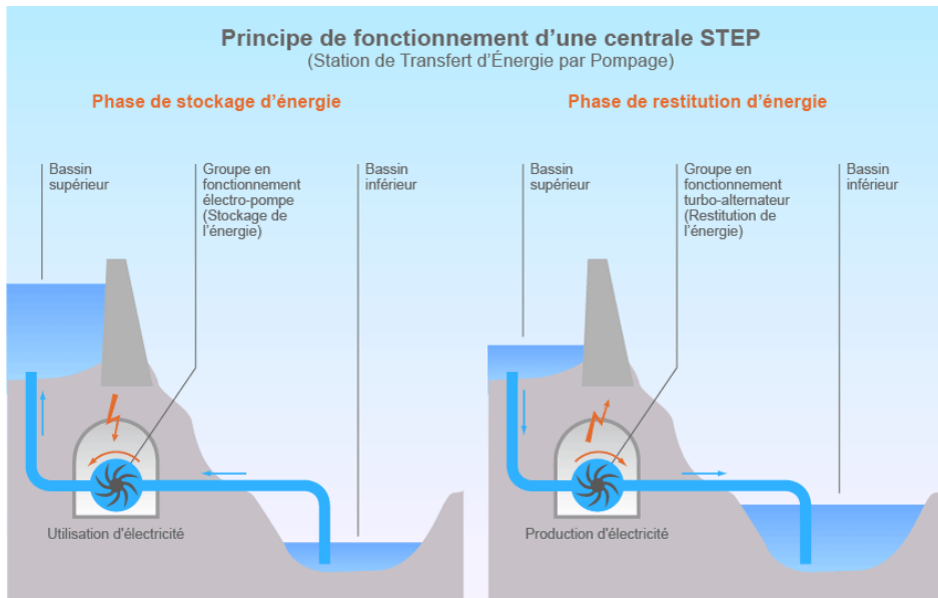


Source : IFPEN d'après diverses sources

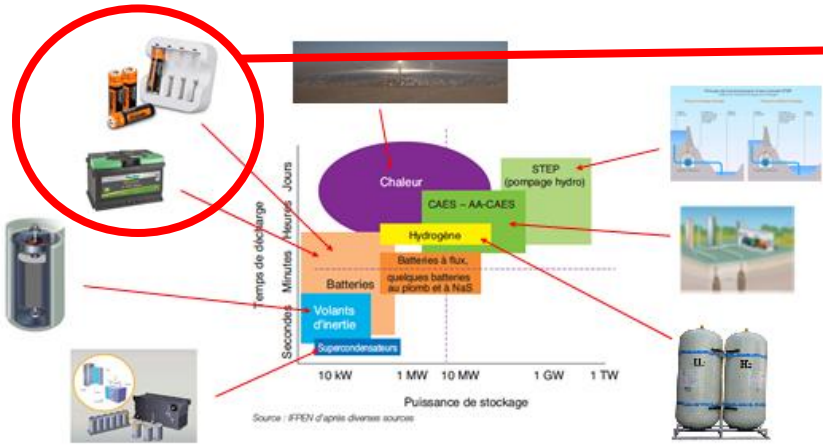


Stockage Hydraulique : STEP (Station de Transfert d'Énergie par Pompage)

- Technologie mature
- 97% de l'énergie électrique stockée dans le monde (2018)
- Rendement élevé ~80%
- Puissance installée en France : ~7 GW (2018) + 1 à 2 GW (2030)
- Capacité de stockage 2018 en France : 0.184 TWh ~ **0,6% besoin**

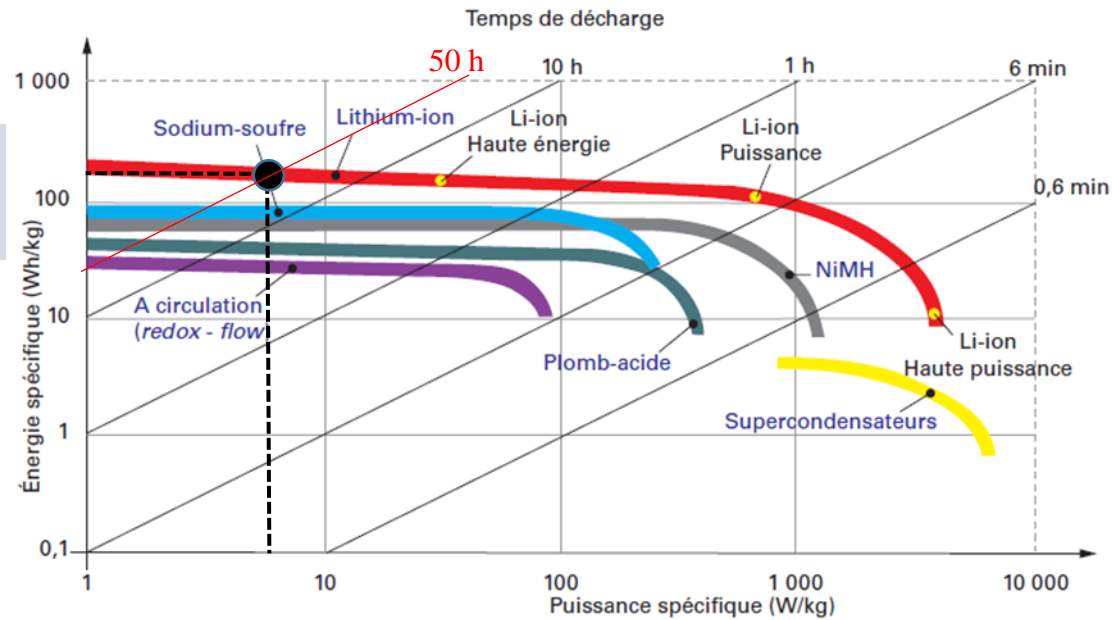


Stockage électrique



BATTERIES

Stockage 30 TWh
 → > 120 millions de tonnes



Puissance 100 GW
 → ~ 20 millions de tonnes

Rendement » 80-90 %
 Cyclabilité ?

TESLA - Megapack 2022



Modèle	Technologie	Capacité	Puissance	Efficacité sur cycle	Poids
Megapack 2022	Lithium-ion	3,9 MWh	970 kW (4h) 1927 kW (2h)	93,5 %	38 100 kg



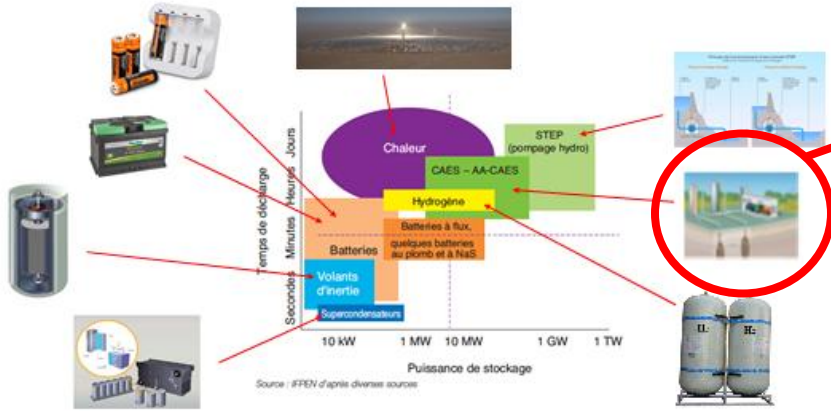
Pillswood, Yorkshire (UK)

- Capacité = 196 MWh
- Puissance jusqu'à 98 MW.

30 TWh → 7,7 millions de modules

~ 290 millions de tonnes

Stockage électrique



Air Comprimé

CAES – Compressed Air Energy Storage

AA-CAES – Adiabatic Advanced Compressed Air Energy Storage

CAES

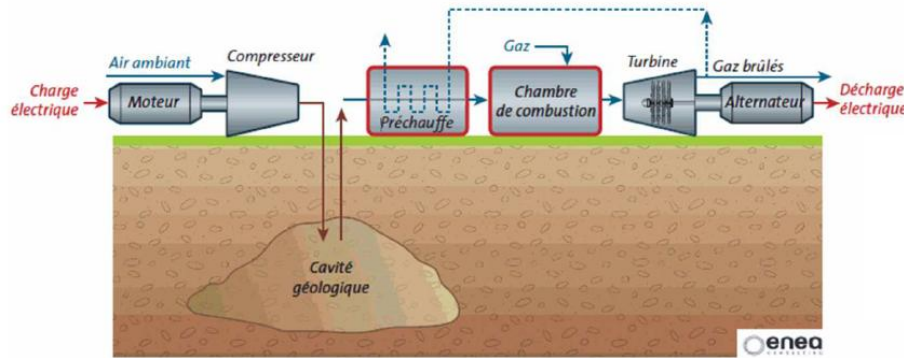


Figure 1 : Schéma de principe d'un stockage souterrain conventionnel de l'air comprimé (d'après ENEA Consulting, 2012)

Tableau 1 : Caractéristiques des stockages souterrains d'air comprimé d'Huntorf et de McIntosh

	Huntorf, Allemagne	McIntosh, Alabama, E.U.
Date de mise en service	1979	1991
Puissance	290 MW	110 MW
Rendement maximal	50 %	54 %
Pression d'air en condition normale	43 à 70 bars (vitesse de variation maximale : 15 bars/h)	45 à 76 bars
Caractéristique des cavités de stockage d'air	2 cavités salines (prof : 650 à 800 m, volume total : 310 000 m ³)	Cavité saline (prof : 450 à 800 m, volume : 538 000 m ³)
Temps de décharge	3 h	26 h

Adiabatic Advanced : AA-CAES

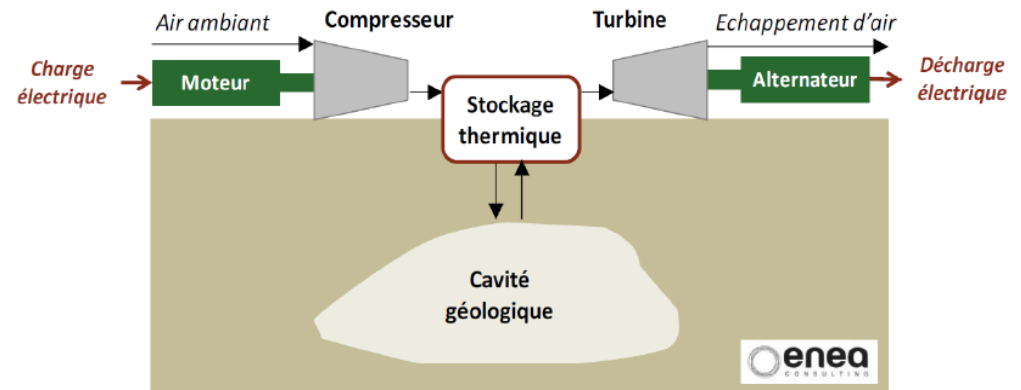


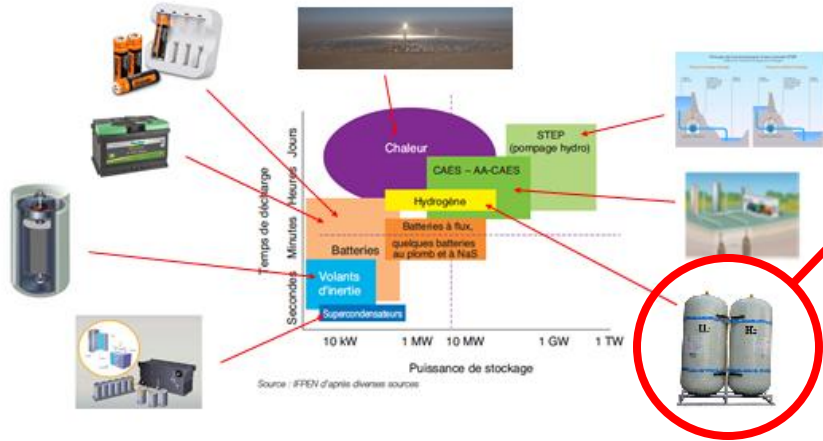
Figure 4 : Schéma de principe du « CAES isochore adiabatique souterrain » ou AA-CAES (d'après ENEA Consulting, 2012)

Rendement turbine : > 70%

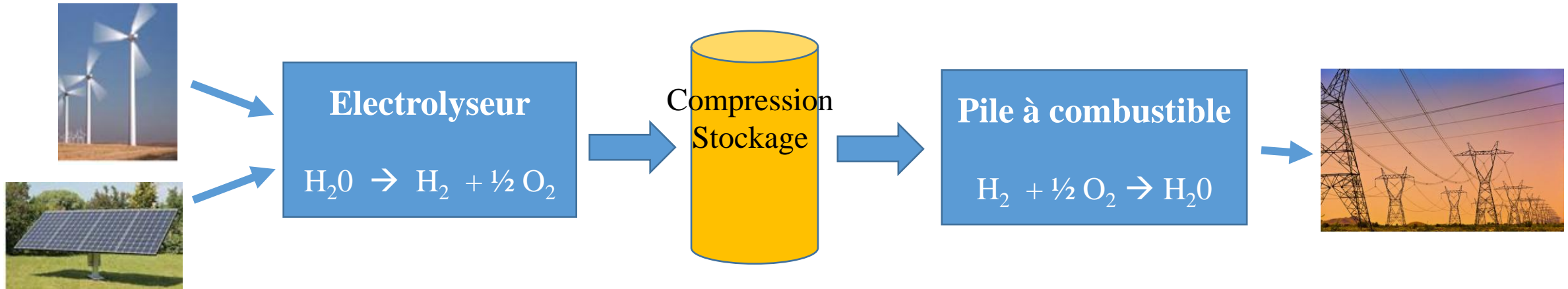
Rendement cycle complet : ~ 56%

Wei He *et al.*, Energy **141** (2017) 2120-2134

Stockage électrique



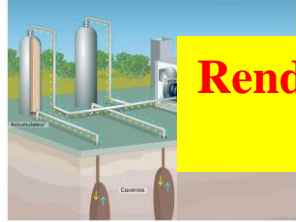
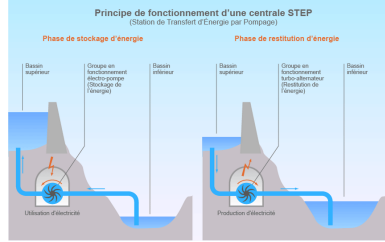
HYDROGENE



Rendement de cycle : ~ 25 à 30 %

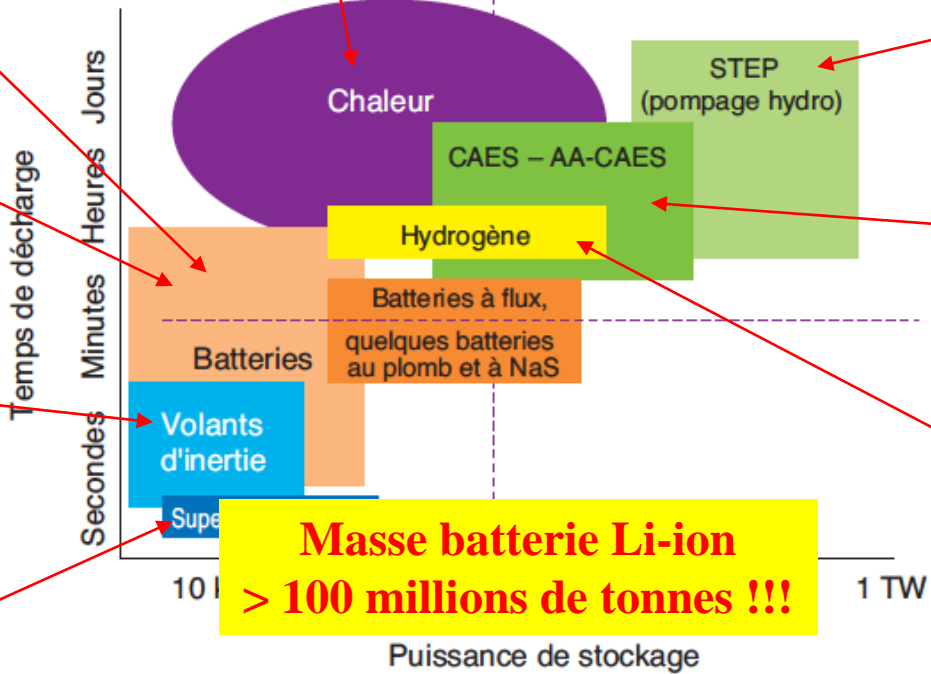
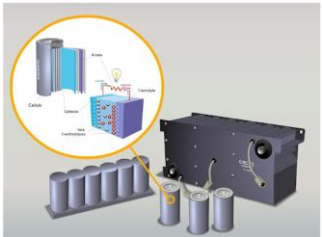
Stockage électrique

Capacité de stockage STEP 2018 en France : 0.184 TWh ~ 0,6 % !!!



Rendement de cycle ~ 50 % !!!

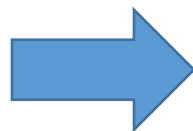
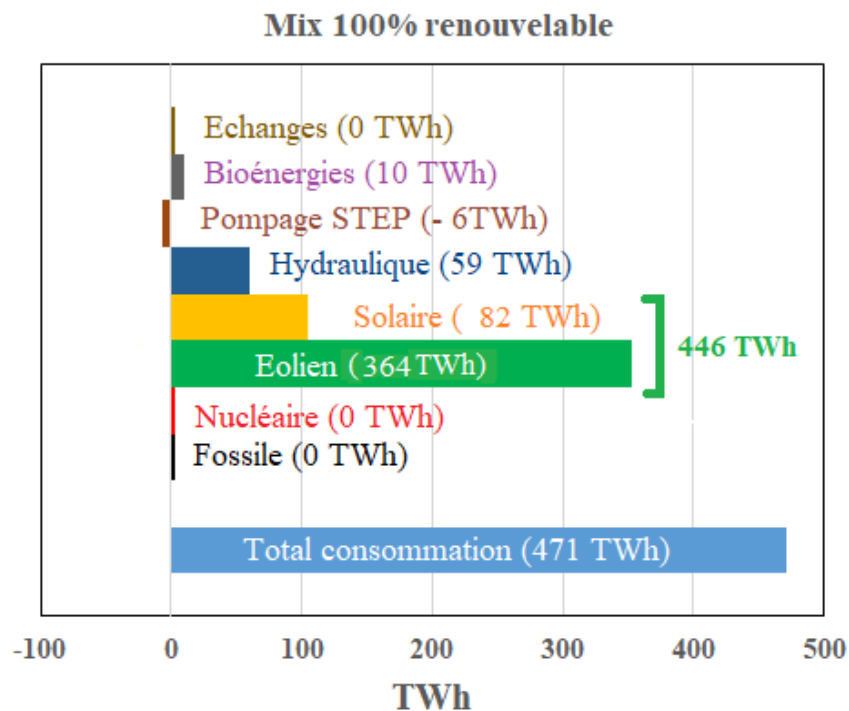
Rendement de cycle ~ 25-30 % !!!



Masse batterie Li-ion > 100 millions de tonnes !!!

Bilan provisoire

Rendement de stockage = 70%



Hypothèses:

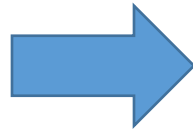
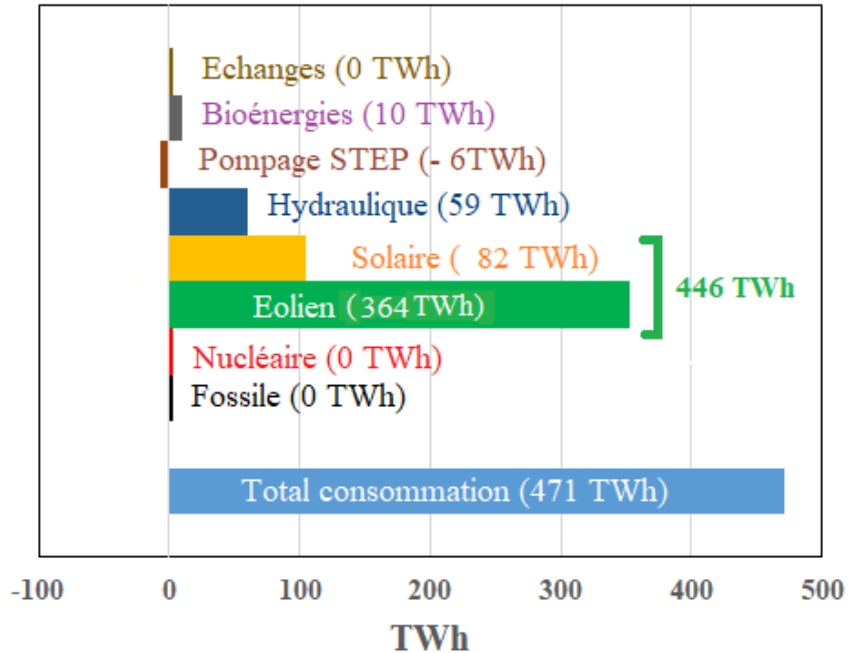
- Consommation inchangée
- Hydraulique, pompage et biomasse inchangés
- Echanges internationaux = 0

- Eolien / PV ~ 80% / 20%
 - Eolien = ~~326~~ TWh, PV = 82 TWh
364 TWh (+12%)
56 000
- ~~50 000~~ éoliennes terrestres de 3 MWc
 - ❖ 8,3 fois le parc 2021, ~~18 750~~ km²
21 000 km²
- 38 300 ha de panneaux photovoltaïques
 - ❖ 6,2 fois 2021
- ~~~30~~ TWh en capacité de stockage - 10%
 - ❖ Puissance ~ -60 GW < P < 100 GW
 - ❖ Durée 10 TWh > 6 mois

Bilan provisoire

Rendement de stockage = 70%
Surcapacité + 50%

Mix 100% renouvelable



Hypothèses:

- Consommation inchangée
- Hydraulique, pompage et biomasse inchangés
- Echanges internationaux = 0

➤ Eolien / PV ~ 80% / 20%

➤ Eolien = ~~326 TWh~~, PV = 82 TWh

~~75 000~~

~~56 000~~

~~364 TWh~~

489 TWh

➤ ~~50 000~~ éoliennes terrestres de 3 MWc

❖ 8,3 fois le parc 2021, ~~18 750 km²~~

~~21 000 km²~~

28 000 km²

➤ 38 300 ha de panneaux photovoltaïques

❖ 6,2 fois 2021

9 TWh

➤ ~~~30 TWh~~ en capacité de stockage

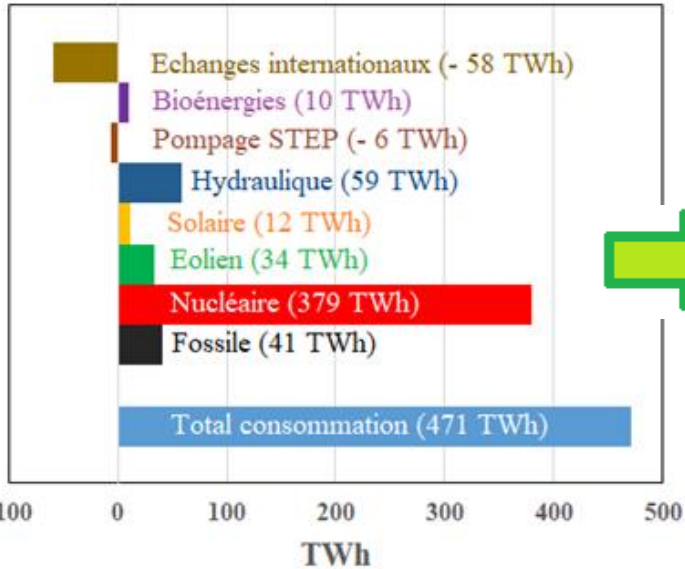
❖ Puissance ~ -60 GW < P < 100 GW

❖ Durée 10 TWh > 6 mois



Bilan électrique 2019

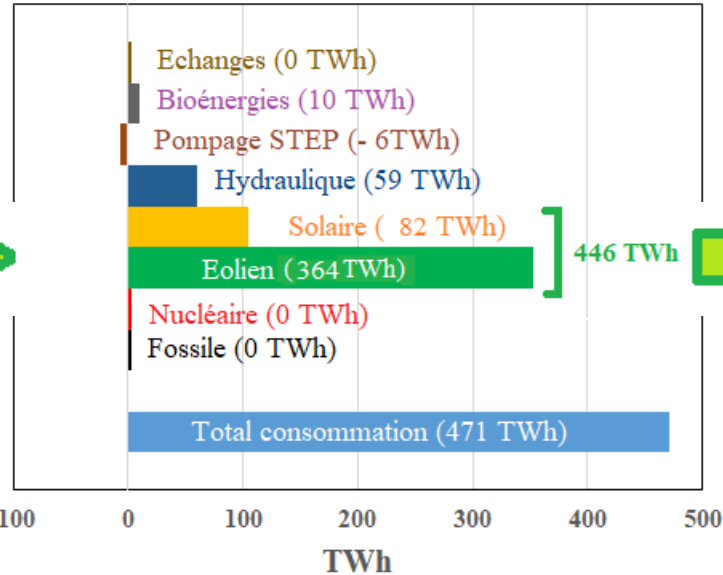
Mix énergétique France 2019



(Eolien + solaire) 2019 = 46 TWh

« Expérience de pensée »

Mix 100% renouvelable

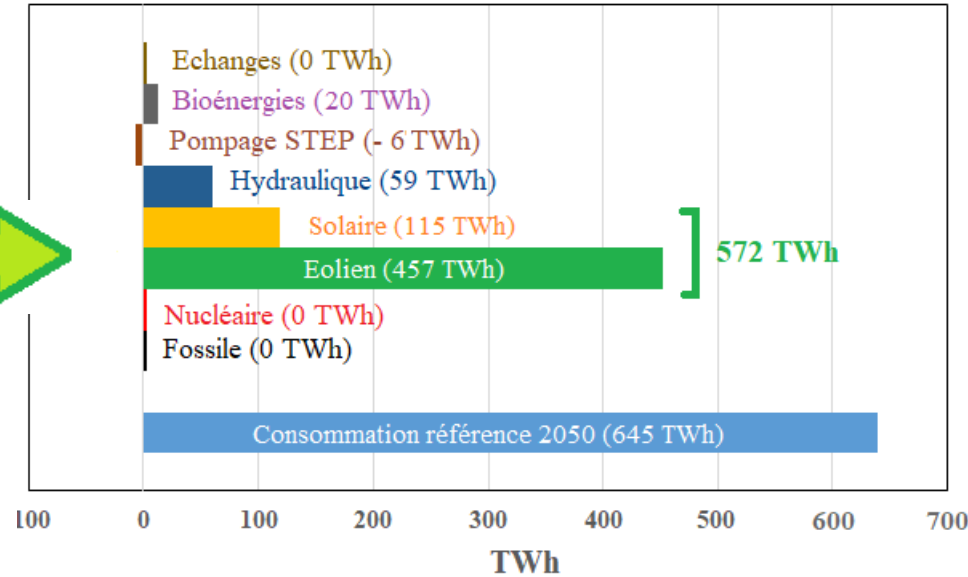


(Eolien + solaire) virtuel 2019 = 446 TWh

- ~ 56 000 éoliennes terrestres de 3 MWc
(21 000 km²)
- ~ 38 300 ha de panneaux PV
(0.14% des terres agricoles)
- ~ 30 TWh en capacité de stockage
à 70% de rendement

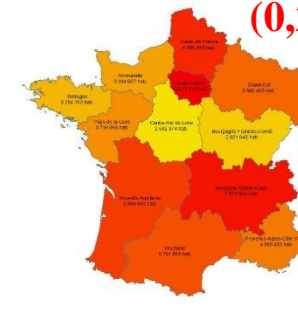
Projection SNBC 2050

Mix 100% renouvelable



(Eolien + solaire) cible 2050 = 572 TWh

- ~ 78 500 éoliennes terrestres de 3 MWc
(29 500 km² = 5,3% territoire » Normandie)
- ~ 53 700 ha de panneaux PV
(0,2% des terres agricoles)

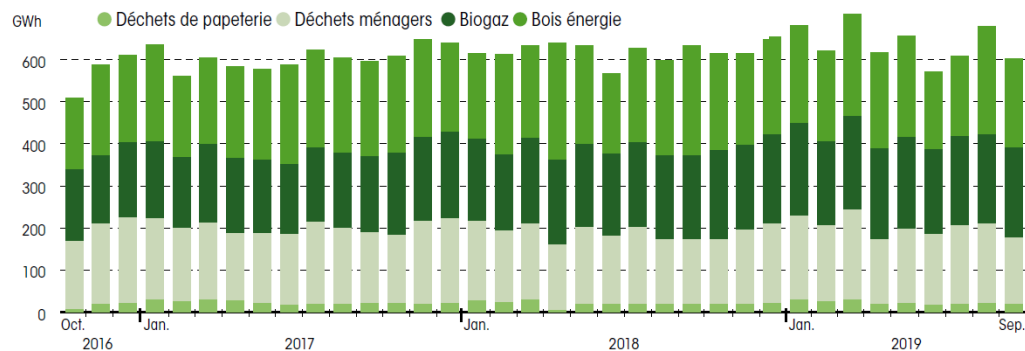


Stockage ?? > 30 TWh

Autres pistes : production

Biomasse

Production bioénergies mensuelle



- Source potentiellement pilotable
- Potentiel de croissance important lié à l'agriculture (déchets) et l'élevage (fumier, lisiers)

- 2019 : 10 TWh électriques
- 2036 : ~ 64 TWh biomasse brute (www.strategie.gouv.fr)
- 2050 : ~ 320 TWh (Negawatt)

- à répartir entre chaleur, biocarburants, biogaz et électricité

Eolien en mer (off-shore)



- Eoliennes plus puissantes (5 MWc, 8 MWc, ...)

- **Facteur de charge ~ 40 %**

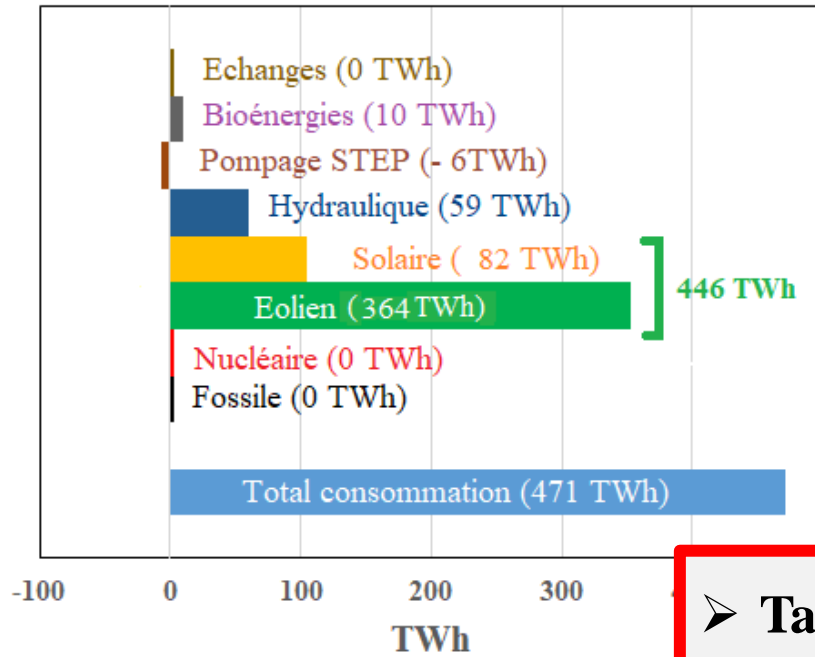
Potentiel France (ADEME) : 30 GWc → ~ 100 TWh
(Negawatt) : ~140 TWh (2050)

→ Restent > 250 TWh terrestres

Bilan provisoire

Rendement de stockage = 70%
Surcapacité + 50%

Mix 100% renouvelable



➤ Eolien / PV ~ 80% / 20%

➤ Eolien = ~~326 TWh~~, PV = 82 TWh

~~75 000~~

~~364 TWh~~

650 TWh

➤ ~~50 000~~ éoliennes terrestres de 3 MWc

❖ 8,3 fois le parc 2021, ~~18 750 km²~~

~~21 000 km²~~

28 000 km²

photovoltaïques

➤ **Tarifs variables incitatifs HP – HC,**

➤ **Effacement,**

➤ **Compteur à puissance variable,**

➤ **Recharge des véhicules électriques,**

➤ **Échanges internationaux**

➤ ...

Hypothèses:

Consommation inchangée

- Hydraulique, pompage et biomasse

- Echanges internationaux = 0

e stockage

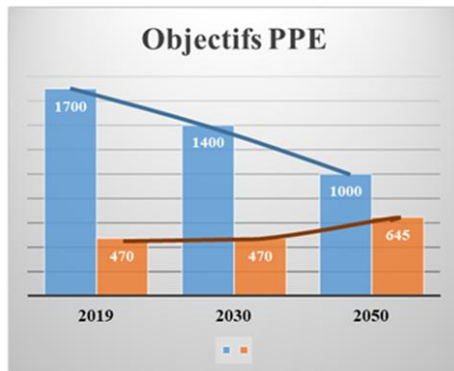
GW < P < 100 GW

5 mois

Conclusions

- **IMPOSSIBLE 2050 : électricité décarbonée, sans nucléaire, sans augmentation forte du parc éolien, sans changement des habitudes de consommation**

-1- Réduction de la consommation énergétique totale 1700 → 1000 TWh



→ effort de sobriété colossal

Exemple transports :

- carburants consommés en France en 2019 ~ **480 TWh**.
- Equivalent électrique (rendement supérieur) ~ **240 TWh**
- **RTE référence 2050 : 99 TWh !**

-2- Augmentation de la production électrique (470 → 645 TWh)

- A réaliser : Développement massif de l'éolien, de préférence maritime
Ratio éolien / photovoltaïque favorable proche de 80 %
- Défis techno : Stockage longue durée à rendement élevé
Sources d'énergie renouvelables et pilotables (biomasse ?)



Le problème de l'intermittence -



Ferme photovoltaïque de Cestas (33)

Superficie : 114 ha

Puissance crête : 300 MWc

Production annuelle : 350 GWh (facteur de charge 13%)

Consommation énergétique de 100 000 habitants

(Bordeaux : 814 GWh pour 240 000 habitants)

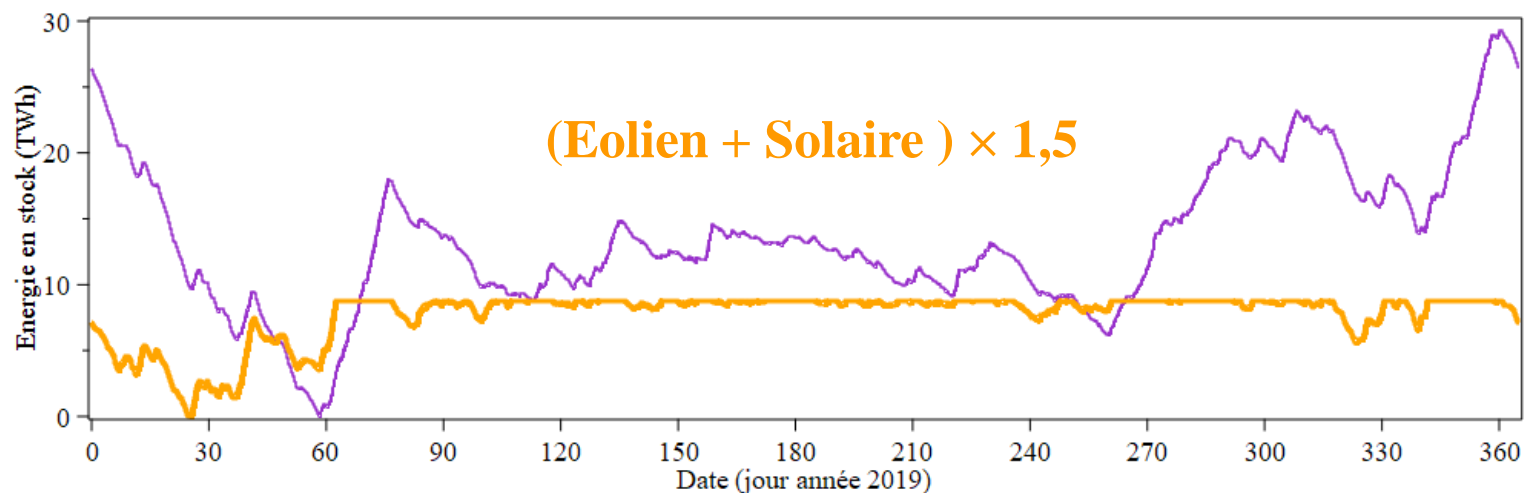
<https://www.agence-france-energie.fr/edf/bordeaux-33000/>

D'une puissance de 300 MWc, cette centrale pourrait, selon le groupe français Neoen, satisfaire les besoins électriques annuels d'une ville de 300 000 habitants (soit davantage que la ville voisine de Bordeaux).

Plus exactement :

- >> **100 000 habitants le jour**
- **0** **habitant la nuit**

Exemple de rendement de stockage = 70 % + écrêtage



Etat du stockage - Eolien = 80 %,
RSTOCK = 0.7, EXCES = 1.5, ECRETAGE = 8.77 TWh
Multiplication des parcs 2019 : Eolien X 14.4(489.3 TWh) + Solar X 10.5(122.3 TWh)

Eolien × 1,5

326 TWh → 489 TWh
50 000 éoliennes 3MWc → 75 000
18 750 km² → 28 125 km²
(NB : Bretagne = 27 000 km²)