

A3 - Energie



Futurs énergétiques 2050

Principaux résultats

Octobre 2021

RÉSUMÉ EXÉCUTIF

Elhoussin ELBOUCHIKHI

Bureau : A2 - 80

COP27
SHARM EL-SHEIKH
EGYPT 2022



La transition énergétique
au cœur d'une transition sociétale

Synthèse du scénario négaWatt 2022

Climat, ressources, biodiversité : nous pouvons tous agir !
Le scénario négaWatt trace une voie possible pour guider notre action,
en s'appuyant avant tout sur plus de sobriété dans nos modes de vie.

www.negawatt.org



A3 : Energie - Organisation

Cours (12 h – 8 séances)

Séance 1 : Contexte général sur l'énergie, la puissance

Séance 2 : Les différents moyens de production et de stockage d'énergie

Séance 3 : Réseau électrique

Séance 4 : Réseau électrique

Séance 5 à 8 : Nucléaire / Eolien / PV

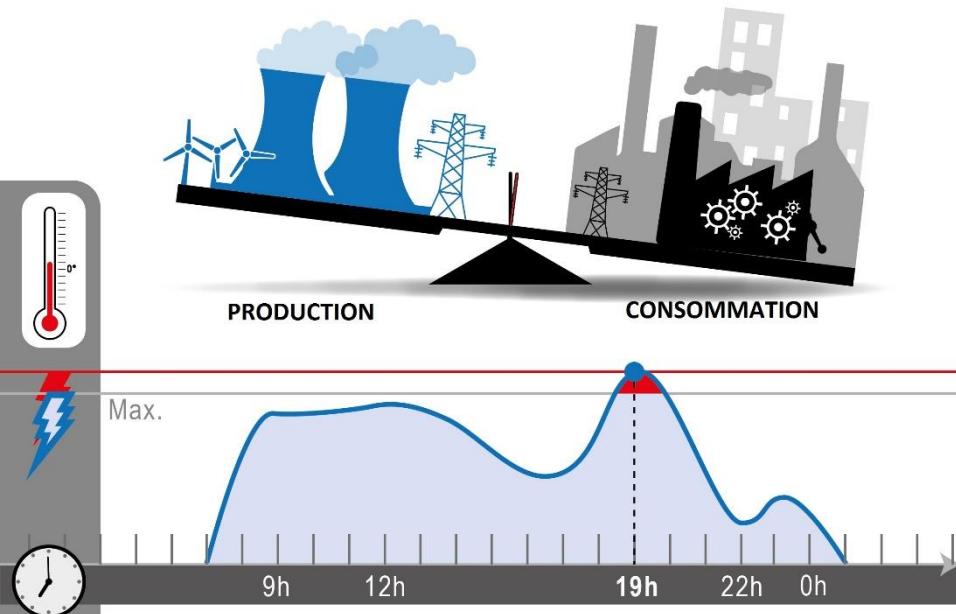
TD (18 h – 12 séances)

Séances 1 et 2 : durée 1h30. Distribution du premier article (thème imposé) au premier groupe à la séance 2.

Séance 3 et suivantes : 1h de TD, 25 min d'exposé (15 min de présentation + 5 à 10 min de questions)

On distribue l'article au groupe suivant ...

Energie et Puissance



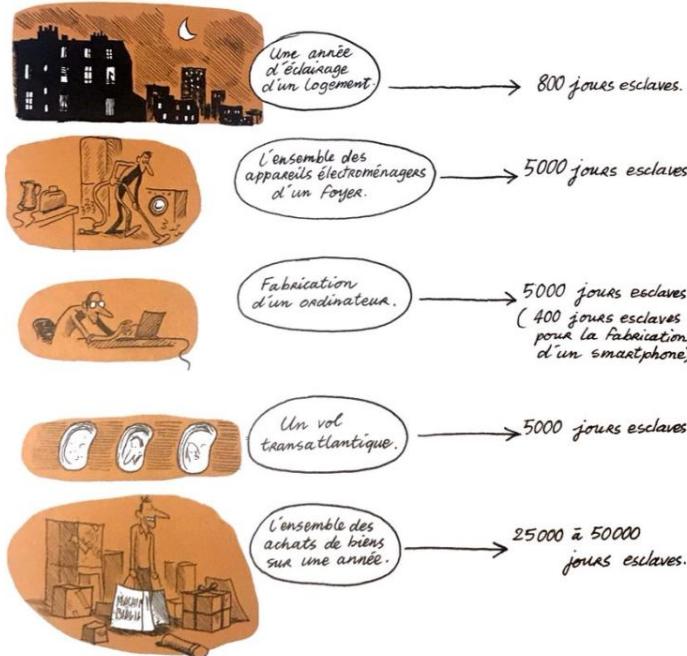
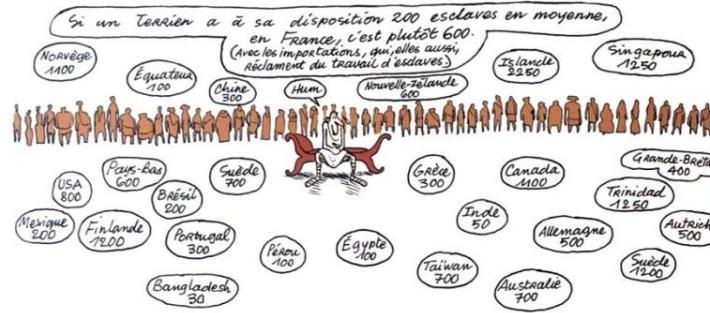
Energie et Puissance : de quoi parle-t-on ?



<https://www.youtube.com/watch?v=S4O5voOCqAQ>

Energie et Puissance :

de quoi parle-t-on ?



Le ²Monde sans fin Christophe Blain et Jean-Marc Jancovici

Contexte général : la terre

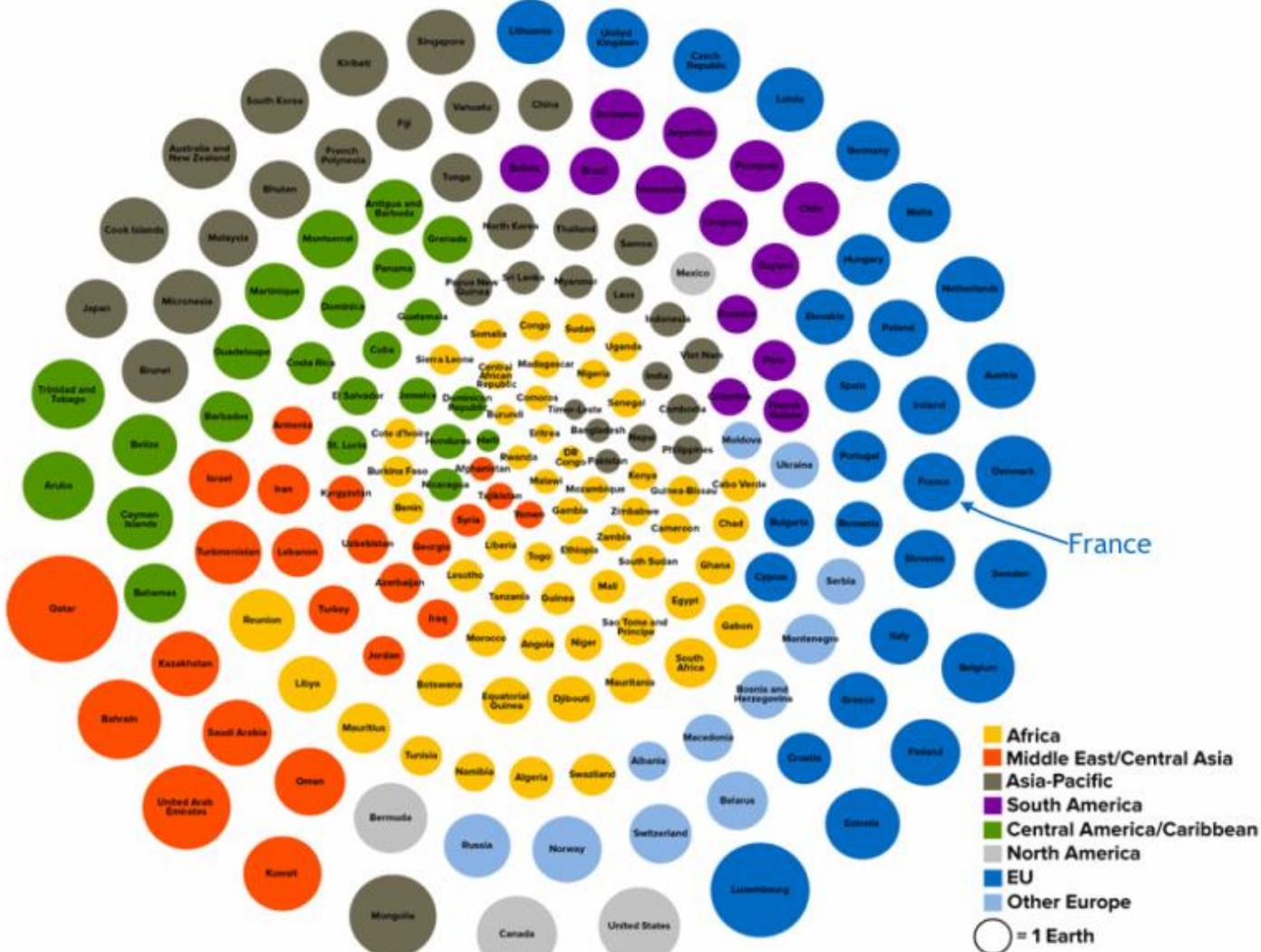
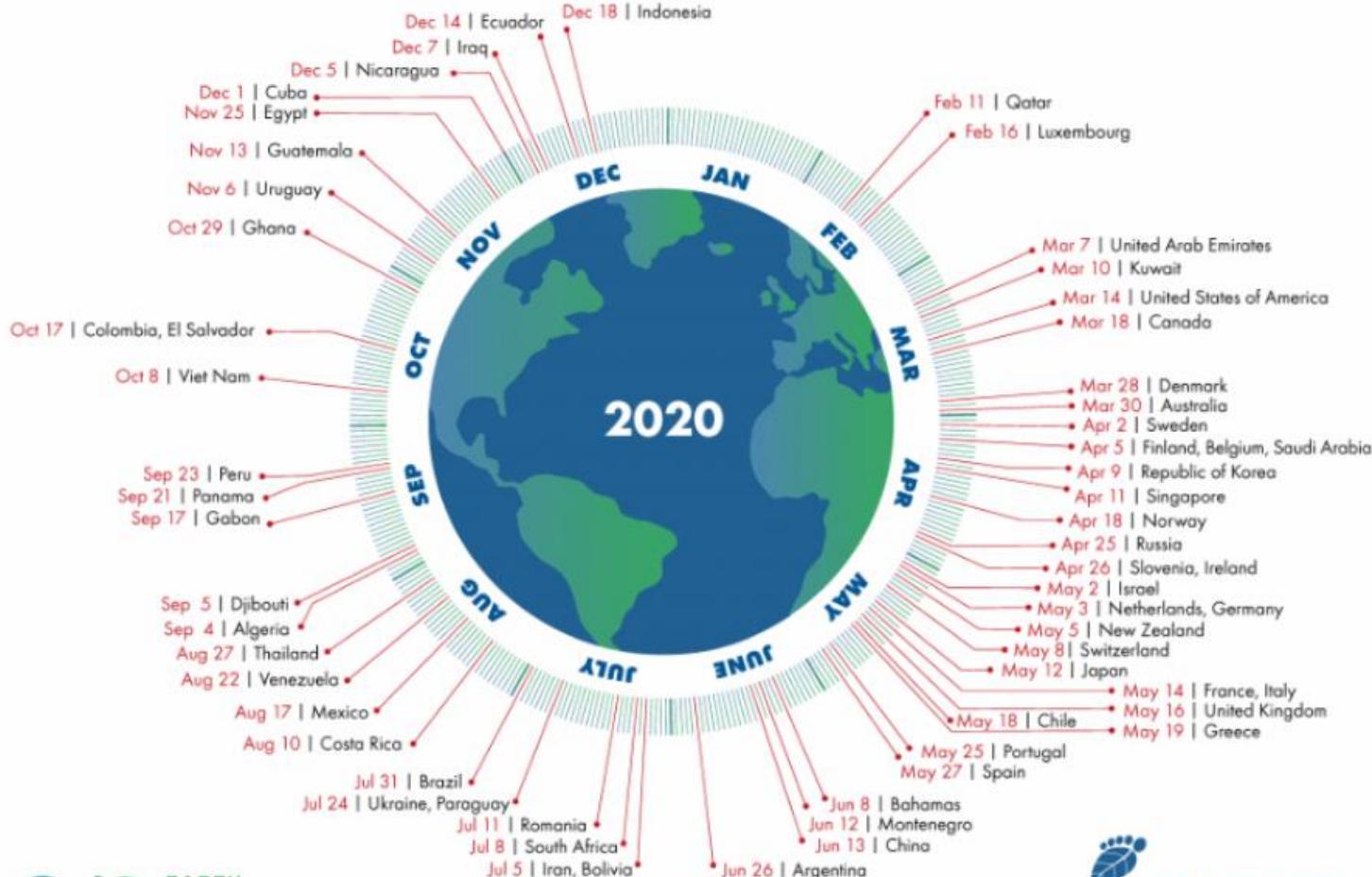


Figure 1 : Combien de Terres seraient nécessaires si l'humanité vivait comme ..., source [1]

Contexte général : la terre

Country Overshoot Days 2020

When would Earth Overshoot Day land if the world's population lived like...



Source: Global Footprint Network National Footprint
and Biocapacity Accounts 2019



Jour du dépassement en 2020 calculé sur la base du mode de vie des différentes nations, source [2]

Notion d'énergétique

Energies primaire, finale et utile...

Exemple électrique



Pertes à la production



Pertes
au transport
et à la distribution

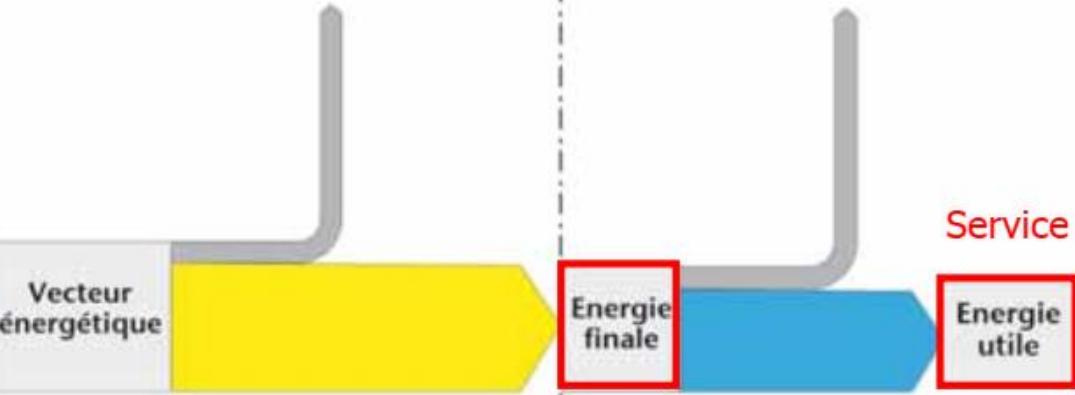


Pertes
à la consommation

Ressources
naturelles
renouvelables
ou non

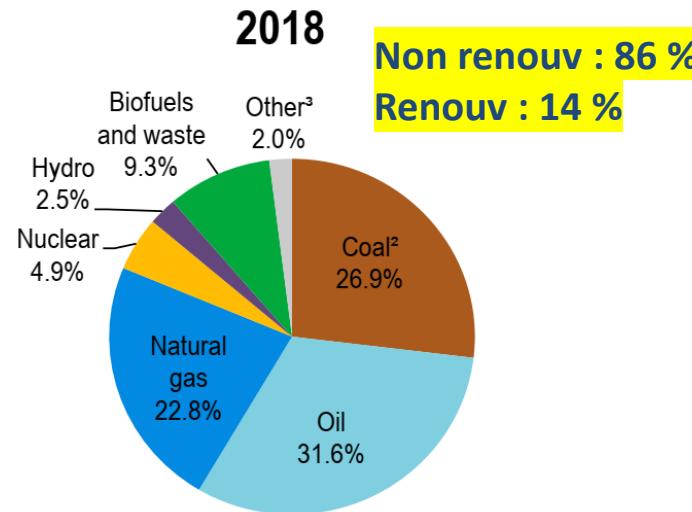


Vecteur
énergétique

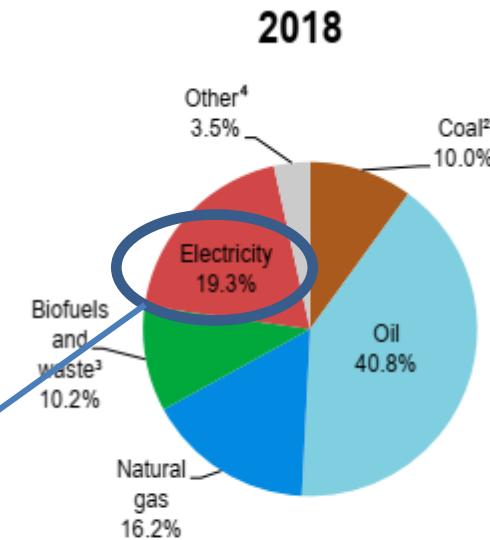


Source : négaWatt

Sources : Bernard Multon ENS Rennes

World total energy supply (TES)

14 282 Mtoe

World total final consumption (TFC)

9 938 Mtoe

1 Toe = 1 tep = 11,6 MWh

14 282 MToe = 165 700 TWhp ≈40% utilisé pour l'élec 66 300 TWhp

Elec produite ≈40% de rendement : 26 520 TWhp

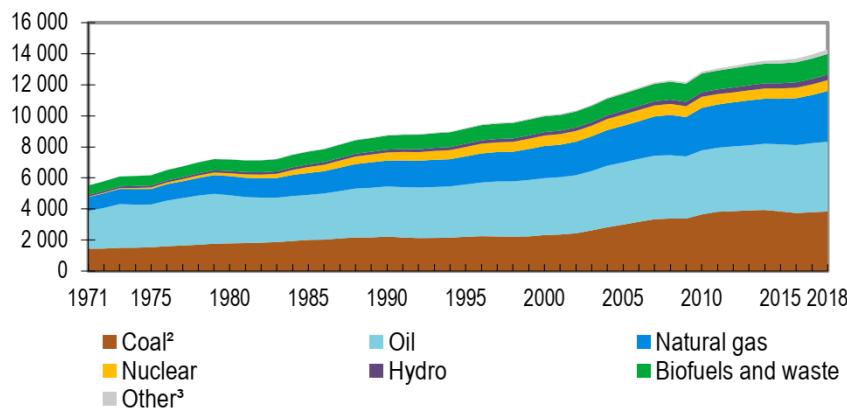
Elec livrée au consommateur ≈95% de rendement : 22 542 TWhe cohérent avec
0,193 x 9 938 * 11,6 = 22 250 TWhePart du nucléaire : 4,9 % de l'énergie primaire, 1,93% de l'énergie finale (10 % de
l'élec prod est nucléaire)

Sources : Agence Internationale de l'Energie

Evolution de la production d'énergie primaire

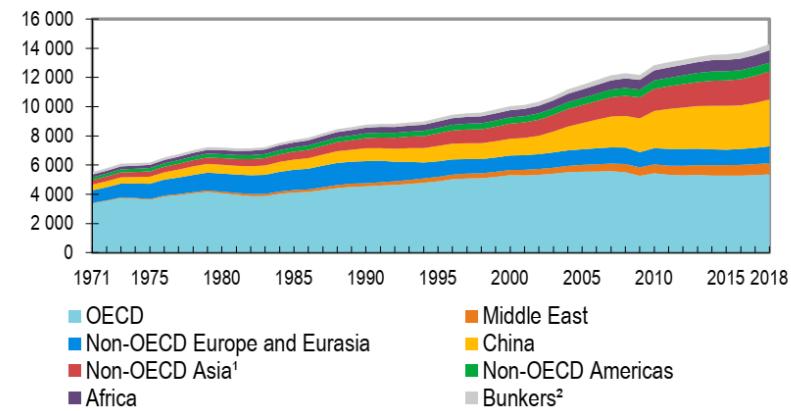
World total energy supply (TES) by source

World¹ TES from 1971 to 2018 by source (Mtoe)



World total energy supply by region

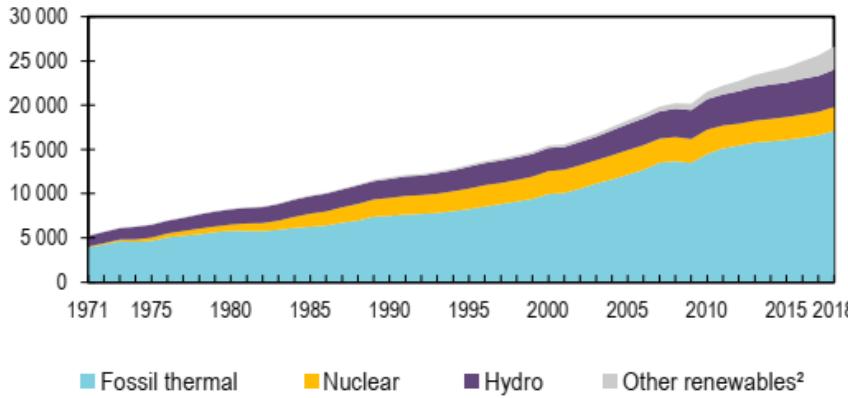
World TES from 1971 to 2018 by region (Mtoe)



Sources : Agence Internationale de l'Energie

Electricity generation by source

World electricity generation¹ from 1971 to 2018 by fuel (TWh)



Non renouv : 74,4 %
Renouv : 25,6 %

Coal ¹	TWh
People's Rep. of China	4 773
United States	1 272
India	1 163
Japan	339
Korea	258
Germany	239
South Africa	227
Russian Federation	178
Indonesia	160
Australia	158
Rest of the world	1 393
World	10 160

2018 data

Oil	TWh
Saudi Arabia	160
Japan	52
United States	43
Iraq	40
Mexico	35
Pakistan	31
Kuwait	31
Islamic Rep. of Iran	29
Egypt	23
Lebanon	21
Rest of the world	319
World	784

2018 data

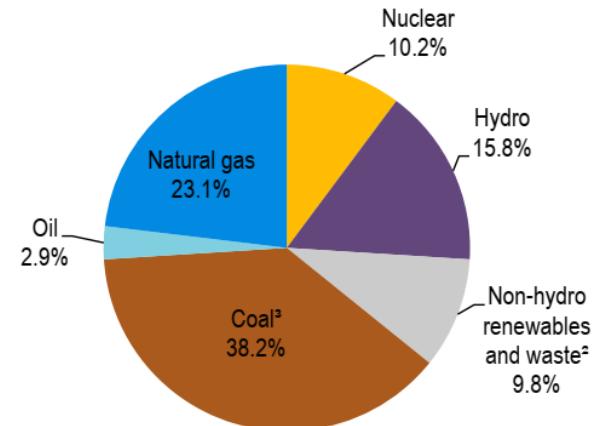
Natural gas	TWh
United States	1 519
Russian Federation	528
Japan	378
Islamic Rep. of Iran	256
People's Rep. of China	224
Saudi Arabia	218
Mexico	202
Korea	156
Egypt	155
United Arab Emirates	134
Rest of the world	2 380
World	6 150

2018 data

Renewables ²	TWh
People's Rep. of China	1 833
United States	743
Brazil	495
Canada	434
India	300
Germany	225
Russian Federation	193
Japan	177
Norway	143
Italy	114
Rest of the world	2 043
World	6 700

2018 data

Sources : Agence Internationale de l'Energie



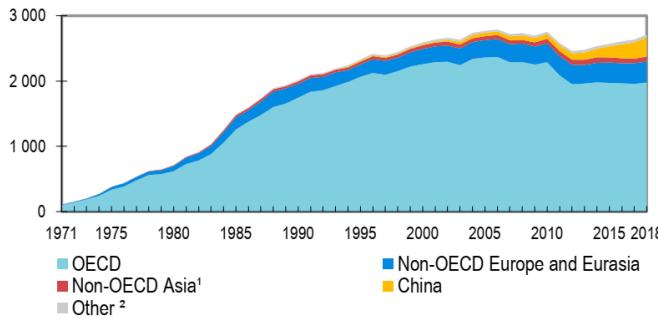
26 619 TWh

Evolution de la production d'électricité

Sources : Agence Internationale de l'Energie

Nuclear electricity production

World nuclear electricity production from 1971 to 2018
by region (TWh)



Producers	TWh	% of world total
United States	841	31.0
France	413	15.2
People's Rep. of China	295	10.9
Russian Federation	205	7.5
Korea	134	4.9
Canada	101	3.7
Ukraine	84	3.1
Germany	76	2.8
Sweden	69	2.5
United Kingdom	65	2.4
Rest of the world	427	16.0
World	2 710	100.0

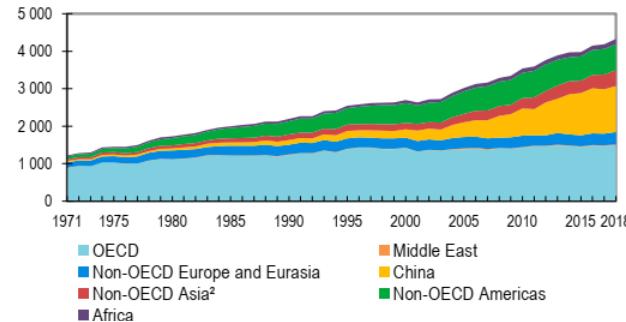
2018 data

Country (top ten producers)	% of nuclear in total domestic electricity generation
France	71.0
Ukraine	52.8
Sweden	42.0
Korea	22.6
United Kingdom	19.5
United States	18.9
Russian Federation	18.4
Canada	15.4
Germany	11.8
People's Rep. of China	4.1
Rest of the world ¹	7.6
World	10.1

2018 data

Hydroelectricity production

World hydroelectricity production¹ from 1971 to 2018
by region (TWh)



Producers	TWh	% of world total
People's Rep. of China	1 232	28.5
Brazil	389	9.0
Canada	386	8.9
United States	317	7.3
Russian Federation	193	4.5
India	151	3.5
Norway	140	3.2
Japan	88	2.0
Viet Nam	84	1.9
France	71	1.6
Rest of the world	1 274	29.6
World	4 325	100.0

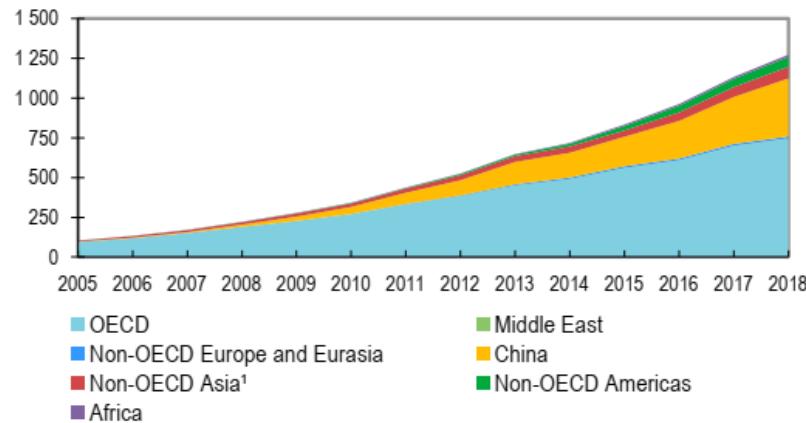
2018 data

Country (top ten producers)	% of hydro in total domestic electricity generation
Norway	95.0
Brazil	64.7
Canada	59.0
Viet Nam	34.9
Russian Federation	17.3
People's Rep. of China	17.2
France	12.1
India	9.6
Japan	8.4
United States	7.1
Rest of the world ²	15.6
World	16.2

2018 data

Wind electricity production

World wind electricity production from 2005 to 2018 by region (TWh)



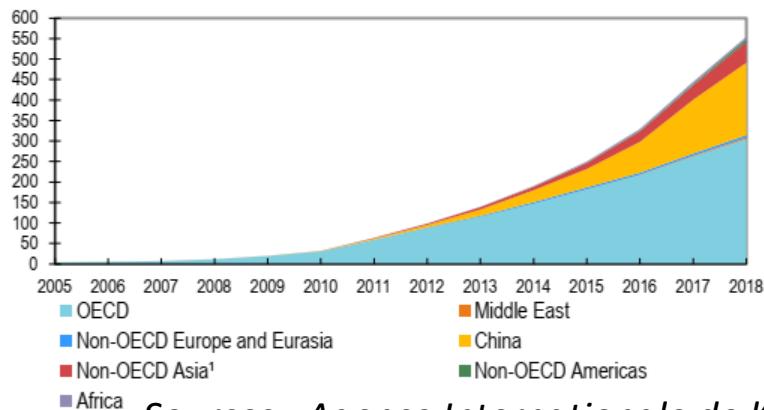
Producers	TWh	% of world total
People's Rep. of China	386	28.7
United States	276	21.7
Germany	110	8.6
India	64	5.0
United Kingdom	57	4.5
Spain	51	4.0
Brazil	48	3.8
Canada	33	2.6
France	29	2.2
Turkey	20	1.6
Rest of the world	220	17.3
World	1 273	100.0

Country (top ten producers)	% of wind in total domestic electricity generation
Spain	18.5
Germany	17.1
United Kingdom	17.1
Brazil	8.1
Turkey	6.5
United States	6.2
People's Rep. of China	5.1
Canada	5.1
France	4.9
India	4.1
Rest of the world ¹	2.5
World	4.8

2018 data

Solar photovoltaic electricity production

World solar PV electricity production from 2005 to 2018 by region (TWh)



Sources : Agence Internationale de l'Energie

Producers	TWh	% of world total
People's Rep. of China	177	31.9
United States	81	14.7
Japan	63	11.3
Germany	46	8.3
India	40	7.2
Italy	23	4.1
United Kingdom	13	2.3
France	11	1.9
Australia	10	1.8
Korea	9	1.7
Rest of the world	81	14.8
World	554	100.0

2018 data

Country (top ten producers)	% of solar PV in total domestic electricity generation
Italy	7.8
Germany	7.1
Japan	5.9
United Kingdom	3.9
Australia	3.8
India	2.5
People's Rep. of China	2.5
United States	1.8
France	1.8
Korea	1.6
Rest of the world ¹	0.9
World	2.1

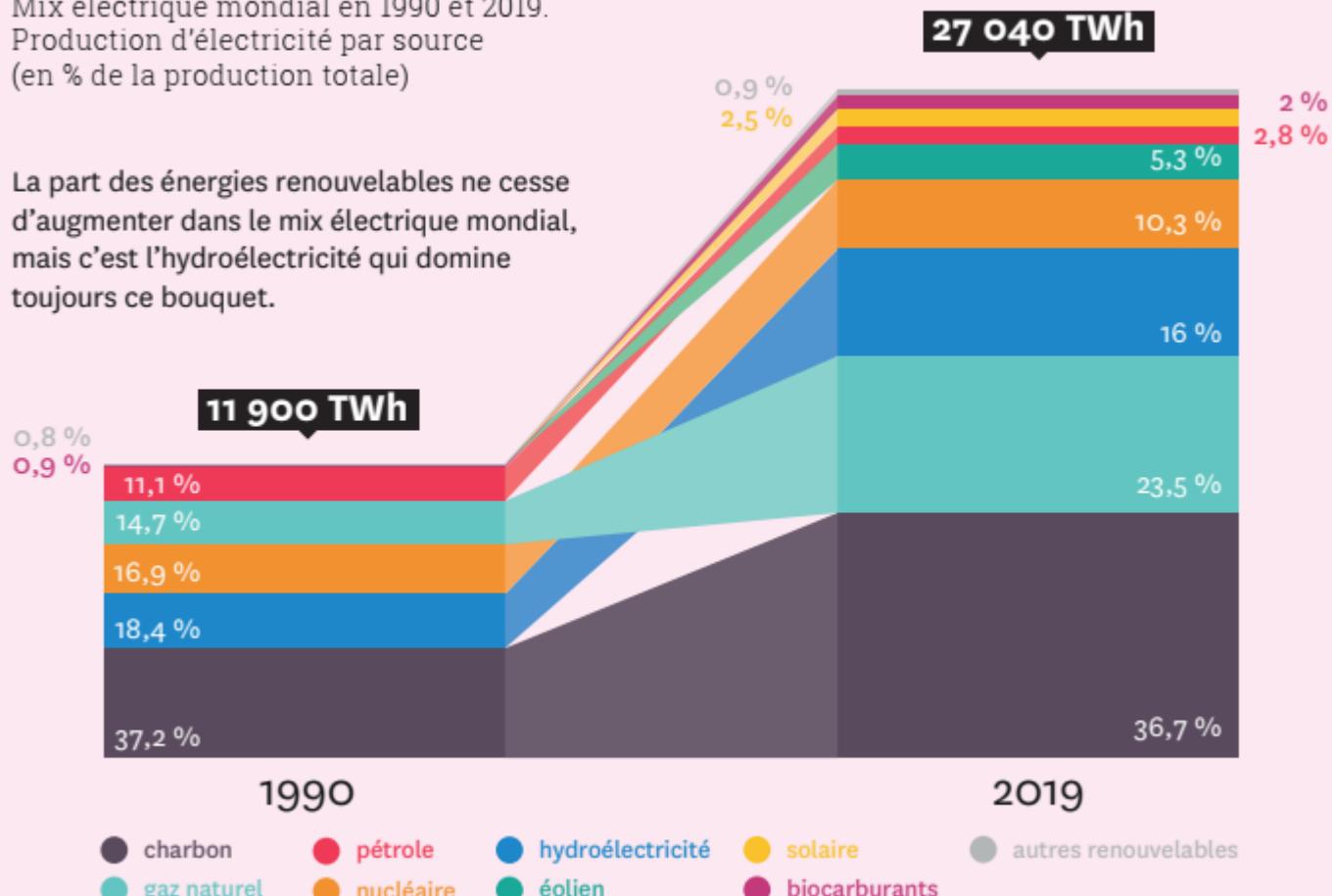
2018 data

Alimentation électrique

Mix électrique mondial en 1990 et 2019.

Production d'électricité par source
(en % de la production totale)

La part des énergies renouvelables ne cesse
d'augmenter dans le mix électrique mondial,
mais c'est l'hydroélectricité qui domine
toujours ce bouquet.



L'Europe sous perfusion de gaz russe

Situation au 31 décembre 2020

Part des importations de gaz russe par rapport à l'ensemble du gaz consommé (par pays de l'UE)

- 80 % et plus
- De 60 % à 79 %
- De 40 % à 59 %
- De 20 % à 39 %
- Moins de 20 %

Volume de gaz importé de Russie (en millions de m³)

- | |
|--------|
| 50 000 |
| 30 000 |
| 20 000 |
| 10 000 |
| 3 500 |

▲ TOP 5 des pays producteurs de gaz en Europe

Situation à la mi-juillet 2022

La Russie ferme des gazoducs en représailles du soutien de l'UE à l'Ukraine

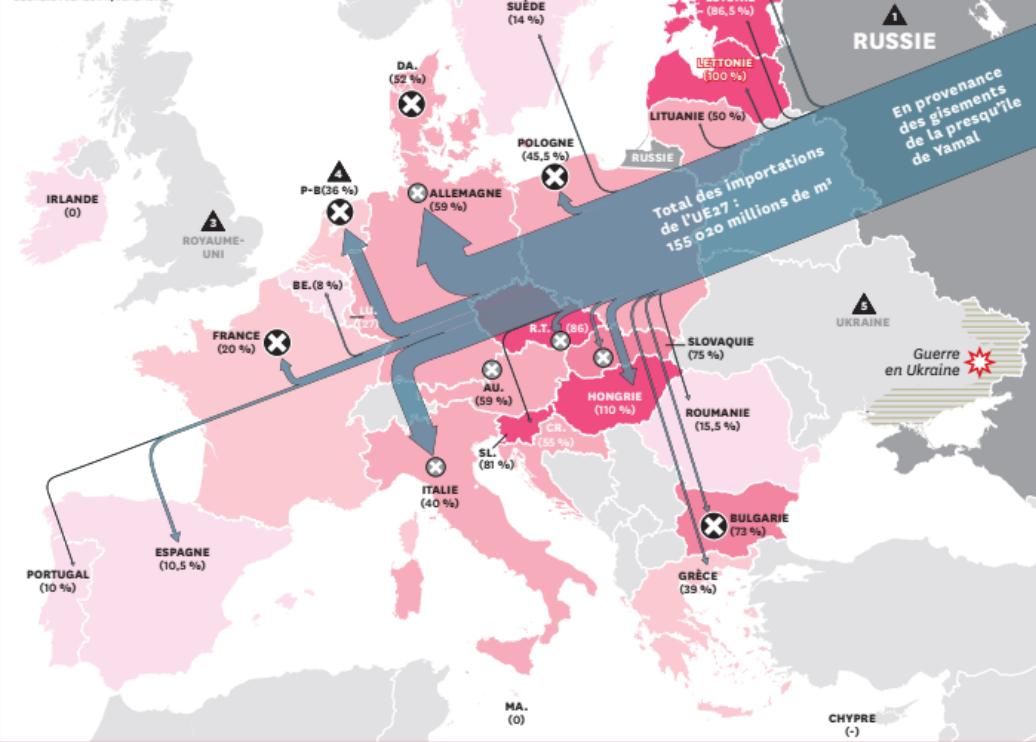
✖ fermé ✖ débit fortement réduit

Note : les volumes de gaz importés de Russie par l'Autriche, la Croatie et le Danemark, ne sont pas clairement identifiés par ces pays et ne figurent donc pas sur la carte.

Abréviations :

AU. Autriche, BE. Belgique, CR. Croatie,
DA. Danemark, LU. Luxembourg, P-B Pays-Bas,
R.T. République tchèque, SL. Slovénie

SOURCES : EUROSTAT, EURONEWS



La Chine voit la vie en noir



60 %

DE L'ÉLECTRICITÉ CHINOISE provient de centrales au charbon. Ce parc de centrales a une capacité opérationnelle de plus de 1 TW, d'après le **Global Energy Monitor**. C'est plus de sept fois la puissance électrique totale installée en France métropolitaine.

1000

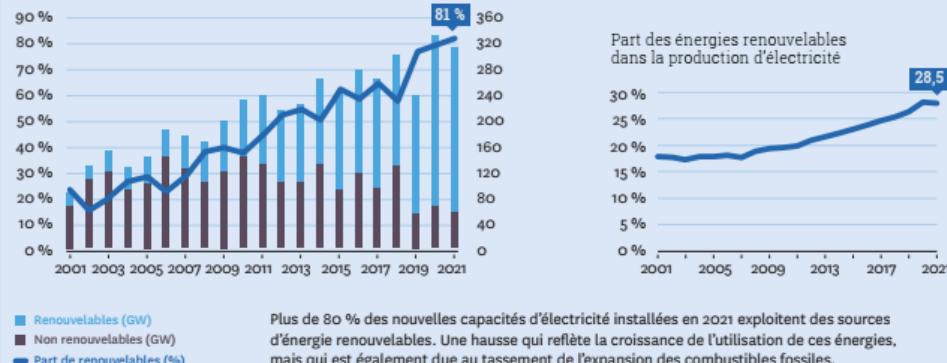
GW DE NOUVELLES CAPACITÉS de centrales charbon ont été installées en Chine entre 2000 et 2021, d'après le **Global Energy Monitor**. Au pic de la "décennie dorée" du développement accéléré de l'industrie du charbon en Chine (2002 à 2012), la Chine construisait plus de 80 GW de capacités par an.

LA TRANSITION A ENFIN COMMENCÉ

Sources d'indépendance énergétique et outils clés de la lutte contre le dérèglement climatique, les énergies renouvelables connaissent une expansion continue depuis plus de vingt ans. Mais, parallèlement, le recours aux combustibles fossiles continue lui aussi de croître, ce qui retarde le moment où l'énergie proviendra majoritairement de sources renouvelables.

Une montée en puissance

Part des énergies renouvelables dans l'accroissement des capacités mondiales de production d'électricité



SOURCE : RENEWABLE CAPACITY HIGHLIGHTS 2022 (IRENA)

10 %
C'est la part de l'électricité mondiale fournie par le solaire et l'éolien en 2021, selon une étude réalisée par Ember, un groupe de réflexion spécialisé dans le climat et l'énergie, rapporte le site de la chaîne britannique BBC. Une première. Pour limiter le réchauffement de la planète à 1,5 °C par rapport à l'ère préindustrielle, le solaire et l'éolien devront croître d'environ 20 % chaque année jusqu'en 2030, estiment les scientifiques.

Une croissance tirée par le solaire et l'éolien

Capacités de production d'énergie de sources renouvelables ajoutées en 2021

C'est le solaire qui a connu le plus important accroissement de capacités de production (133 GW), suivi par l'éolien (93 GW). Ces deux sources d'énergie ont contribué pour 88 % aux capacités renouvelables nouvellement installées en 2021.



SOURCE : RENEWABLE CAPACITY HIGHLIGHTS 2022 (IRENA)

L'hydroélectricité, énergie dominante

Part des différentes sources d'énergies renouvelables dans la capacité mondiale d'énergies renouvelables en 2021



Quels sont les pays les plus en pointe?

Part des énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie en 2020

En 2020, les énergies renouvelables représentaient près de 83 % de la consommation d'énergie en Islande, près de 70 % en Norvège et 48 % en Suède. Une part qui s'élevait à 46 % au Brésil et à 37 % en Nouvelle-Zélande, également dans le peloton de tête des pays consommateurs d'énergies renouvelables.

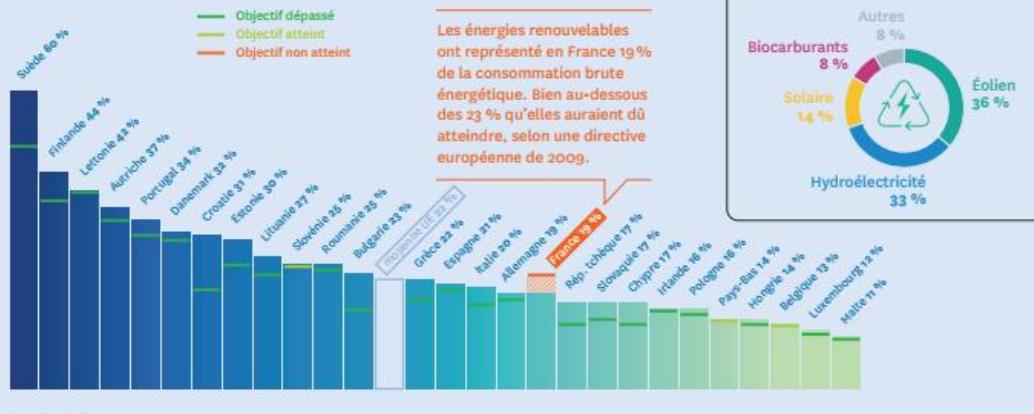


SOURCES : BP STATISTICAL REVIEW OF WORLD ENERGY 2021



La France, mauvais élève de l'Europe

Part des énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie en 2020



Ressources et réserves primaires de la planète Terre

COMBUSTIBLES FOSSILES (charbons, pétroles, gaz naturel) :

environ 5000 Gtep (400 à 700 pétroles – 250 gaz – 3500 charbons)

Réserves prouvées : **1000 Gtep** (300 pétroles, 160 gaz, 620 charbons)

URANIUM FISSILE : **environ 150 Gtep** (avec réacteurs actuels)

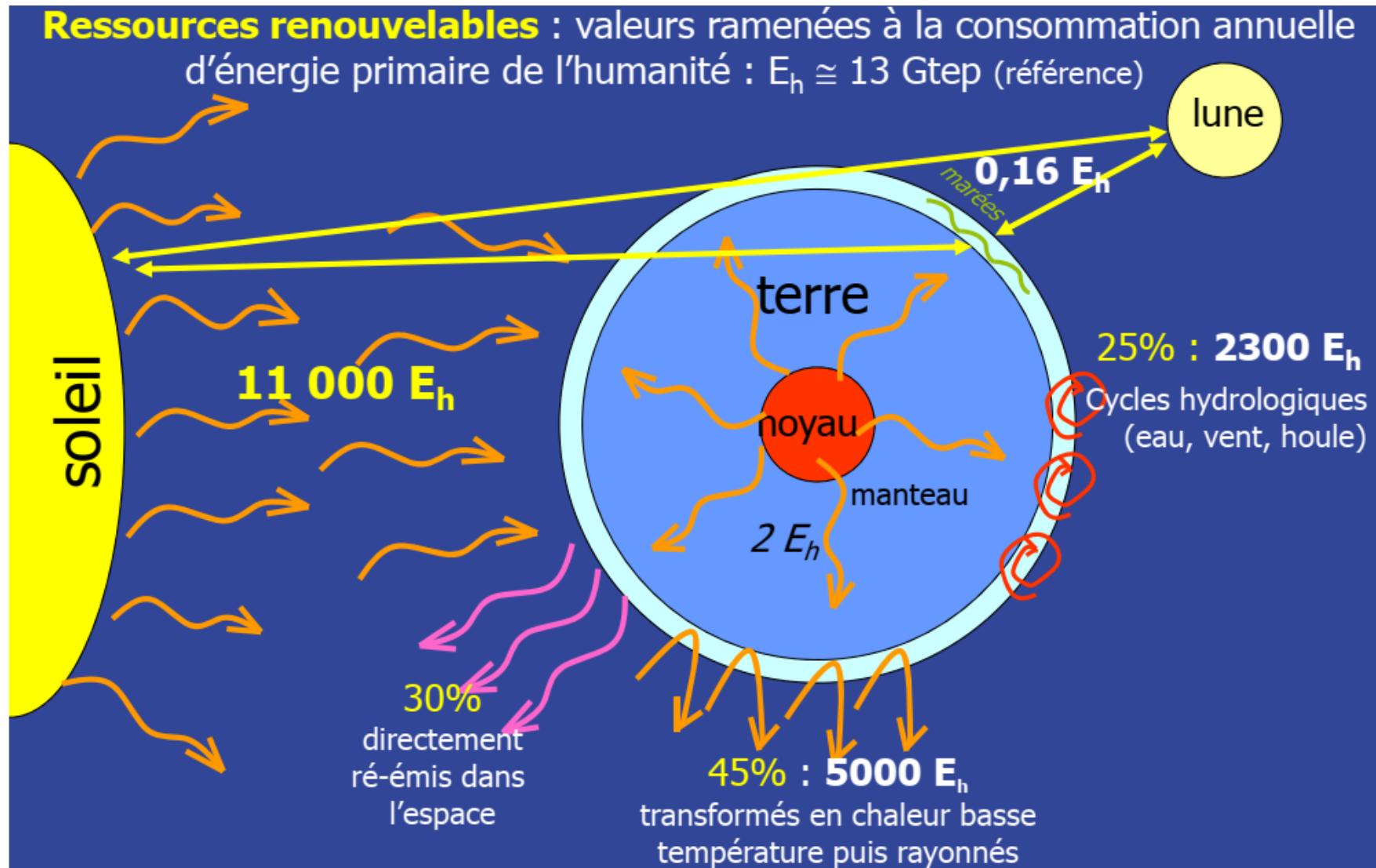
Réserves estimées : **60 Gtep**

RAYONNEMENT SOLAIRE ET SOUS-PRODUITS AU SOL :

100 000 Gtep... par an !

près de 8000 fois la consommation d'énergie primaire

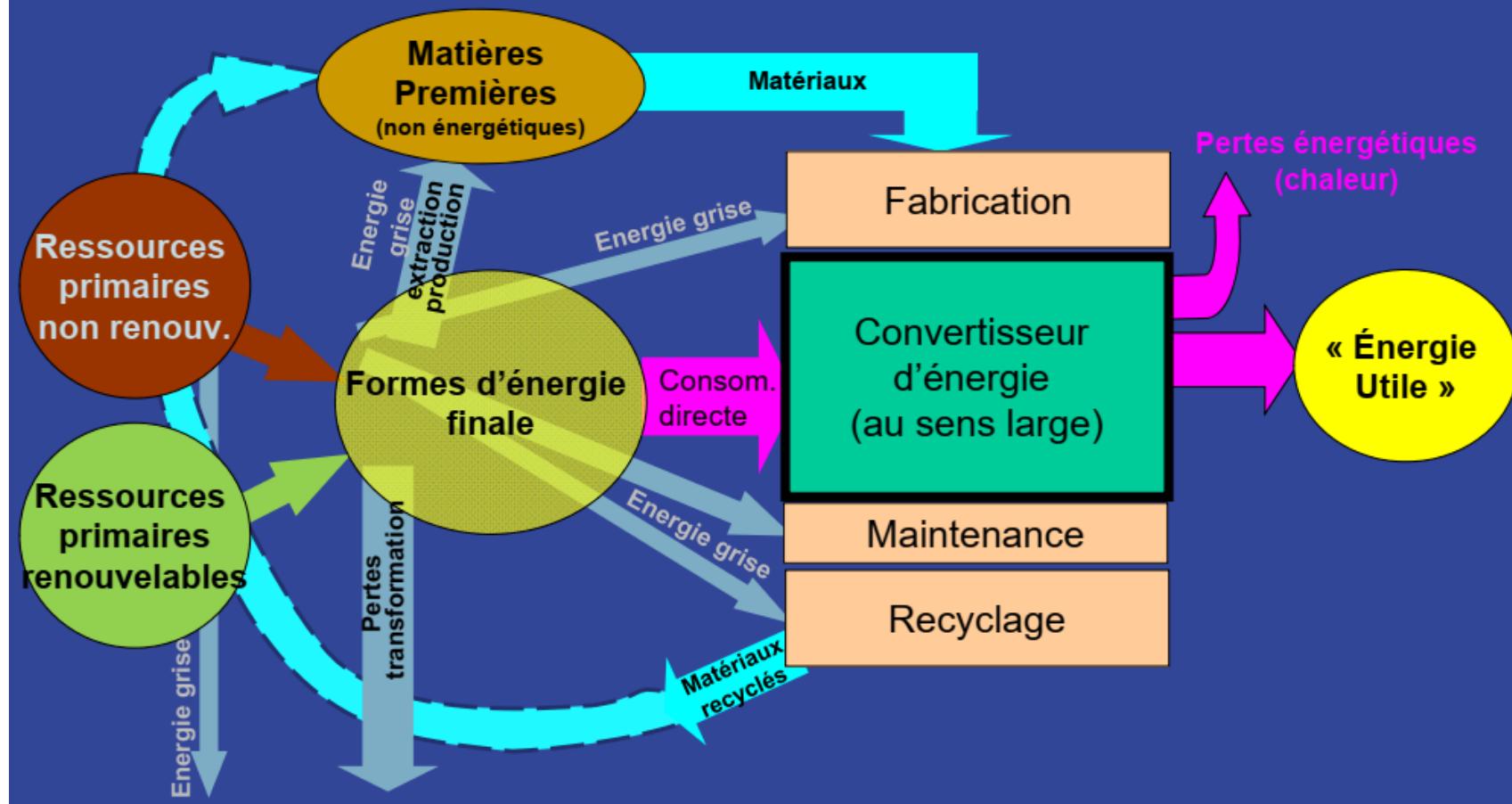
Ressources et réserves de la planète



Sources : Bernard Multon ENS Rennes

Cycle de vie d'un convertisseur d'énergie

Un critère important : **l'énergie primaire non renouvelable consommée sur tout le cycle de vie**



Sources : Bernard Multon ENS Rennes

Un critère habituellement utilisé dans le domaine de l'énergie :

L'EROEI (Energy Returned On Energy Invested)

$$\text{EROEI} = \frac{\text{Energie récupérée sur la vie}}{\text{Energie dépensée à l'investissement}}$$

« rentabilité »
si $\text{EROEI} > 1$

Attention, l'EROEI ne prend pas en compte les ressources consommées durant toute la vie et leur nature non renouvelable

Ainsi l'EROEI de la production d'électricité au pétrole peut être supérieur à celui de l'éolien ou du PV !

Nécessité de comptabiliser la part non renouvelable consommée sur la vie :

$$\text{EROEI}_{\text{sust}} = \frac{\text{Energie récupérée sur la vie}}{\text{Energie non renouvel. dépensée sur la vie}}$$

soutenabilité si
 $\text{EROEI}_{\text{sust}} > 1$

Cycle de vie d'un convertisseur d'énergie

Comparaison de deux modes de génération d'électricité bas carbone

Réacteur nucléaire

Productivité : $1 \text{ GW} \times 7000 \text{ h} = 7 \text{ TWh} \times 40 \text{ ans} = \textbf{280 TWh}_e$



Consommation d'uranium naturel : 7800 tonnes (195 tonnes/an)

Extraction minière de l'uranium : $0,58 \text{ TWh}_p$



Transformation en combustible fissile : $5,1 \text{ TWh}_p$

Construction et démantèlement : $9,3 \text{ TWh}_p$



Stockage déchets : $0,43 \text{ TWh}_p$

Énergie grise : $15,4 \text{ TWh}_p$

$$EROEI = \frac{280}{15,4} = 18$$

Consommation d'énergie primaire non renouvelable sur le cycle de vie :
avec un rendement de production électrique de 33% :

$$EROEI_{sust} = \frac{280}{855} = 0,33 < 1$$

$$E_{pNR} = 3 \times 280 + 15,4 \approx 855 \text{ TWh}_p$$

+ des déchets à longue durée de vie
+ beaucoup de matière non recyclable...

Source : Energy Analysis of Power Systems, feb. 2015, World Nuclear Association <http://world-nuclear.org/info/Energy-and-Environment/Energy-Analysis-of-Power-Systems/>

Sources : Bernard Multon ENS Rennes

Cycle de vie d'un convertisseur d'énergie

Photovoltaïque en toiture

Pour produire **7 TWh_e /an** avec un rayonnement
de **1000 kWh_p/m²/an** (1000 h @ 1 kW/m²)



Avec technologie silicium polycristallin (**rendement 16% et PR = 0,75**)

Puissance nominale : **9,3 GW_c** (7 TWh_e / (1000 h x 0,75))

soit **58 km²** (9,3 GW_c / (1000 W/m²) / 0,16)

(en France : 8500 km² de superficie bâtie)



Fabrication des modules + montage en toiture + onduleur

fourchette de données ([voir source](#)) : 280 à 730 kWh_p/(m² PV)

Énergie grise : 16 à 42 TWh_p

Consommation d'énergie primaire non renouvelable sur le cycle de vie :

sur 40 ans (1 renouvellement au bout de 20 ans) **E_{pNR} ≈ 2 x (16 à 42) = 32 à 84 TWh_p**

Production d'énergie sur 40 ans :

E_u ≈ 2 x 20 x 7 = 280 TWh_e

$$EROEI = EROEI_{sust} = \frac{280}{32 \text{ à } 84} = 3,3 \text{ à } 8,7 > 1$$

(en réalité, énergie grise en baisse)

+ matériaux recyclables

et beaucoup moins de déchets toxiques

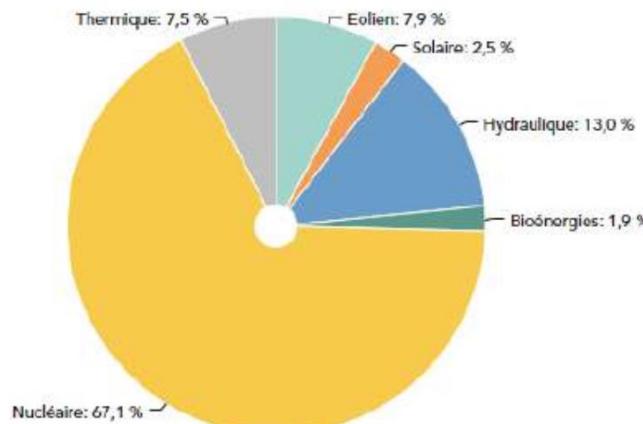
Source : Koppelaar Imperial College

Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 72, May 2017

Sources : Bernard Multon ENS Rennes

Quelle production d'électricité pour la France en 2020 ?

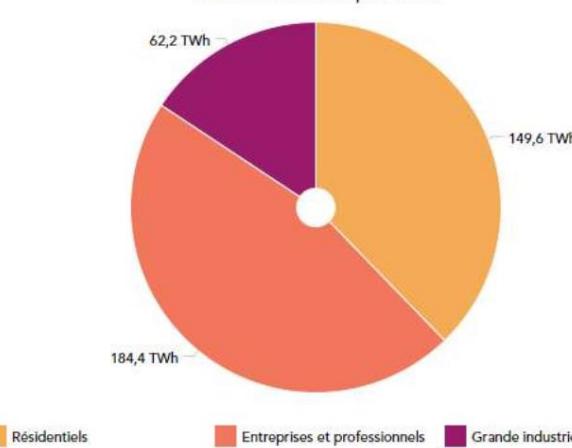
Energie produite



Production 2020 : 500 TWh

Consommation 2020 : 460 TWh

Consommation finale par secteur



Renouv : 26,3 % en progression

Répartition de la production par filière



335,4 TWh

67,1 %

Nucléaire



65,1 TWh

13 %

Hydraulique



39,7 TWh

7,9 %

Éolien



37,6 TWh

7,5 %

Thermique fossile



12,6 TWh

2,5 %

Solaire



9,6 TWh

1,9 %

Bioénergies

Sources : RTE Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité

Quelle production d'électricité pour la France en 2020 ?

La **situation actuelle en France** : un **réseau très centralisé**

Le **nucléaire domine**

Des **solutions techniques existent** pour produire de **l'électricité « soutenable »** :



- Hydraulique (barrages ...)
- Eolien
- Photovoltaïque
- Bio énergie

Avantages et inconvénients ?

Perspectives moyen terme: un **réseau plus décentralisé et interconnecté**

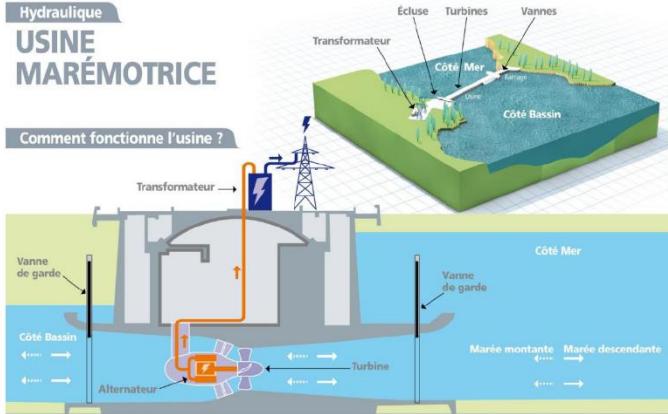
D'autres solutions pour l'avenir ?

Comment produire de l'électricité propre ?

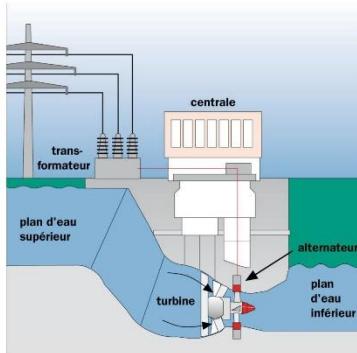
L'hydraulique

Hydraulique USINE MARÉMOTRICE

Comment fonctionne l'usine ?



Centrale au fil de l'eau



Centrale d'éclusée



Centrale de grande chute (Lac)

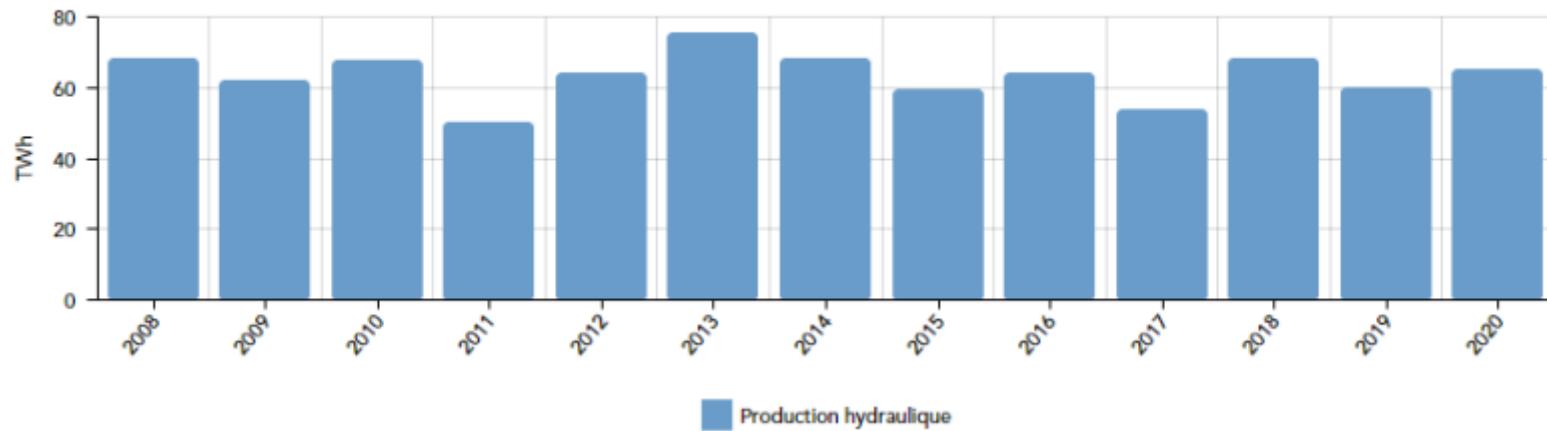
L'hydraulique



+8,4 %

Production d'électricité d'origine hydraulique

Evolution de la production hydraulique



Pb : capacités limitées, pas de perspectives d'augmentation

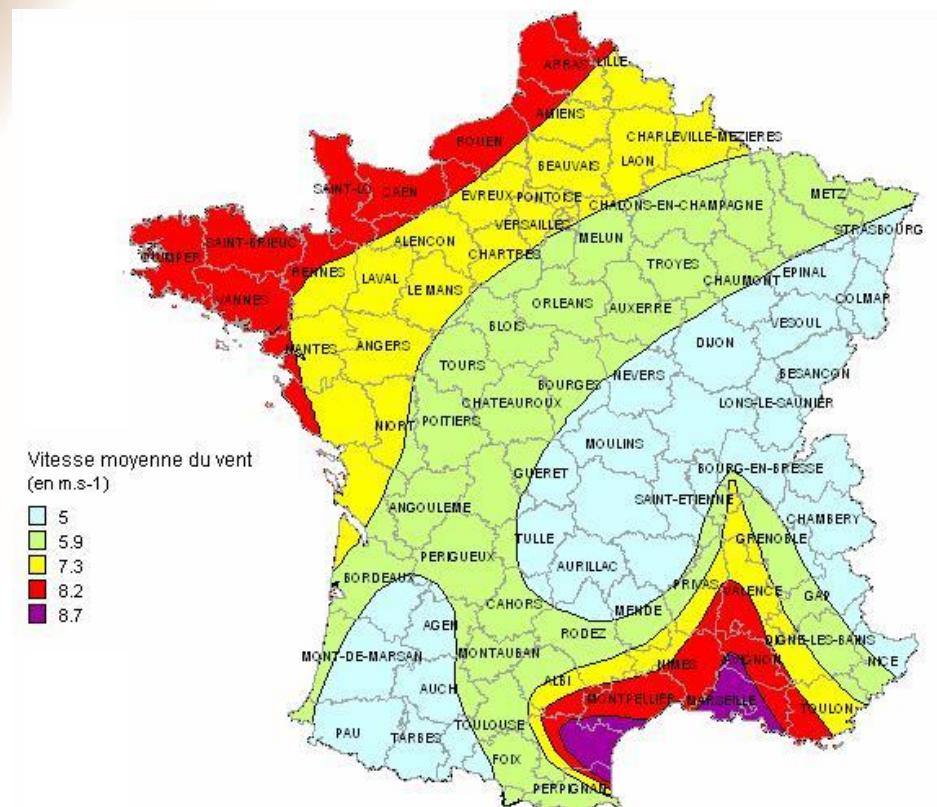


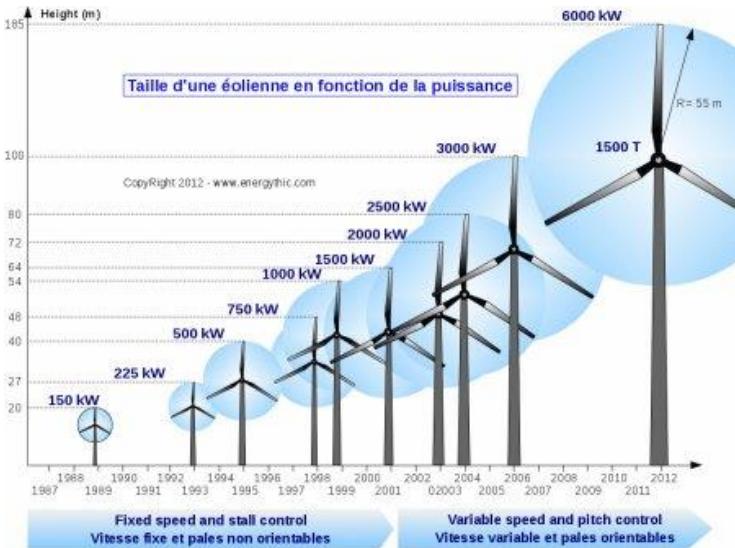
L'éolien en France



+17,3 %

Production d'électricité d'origine éolienne

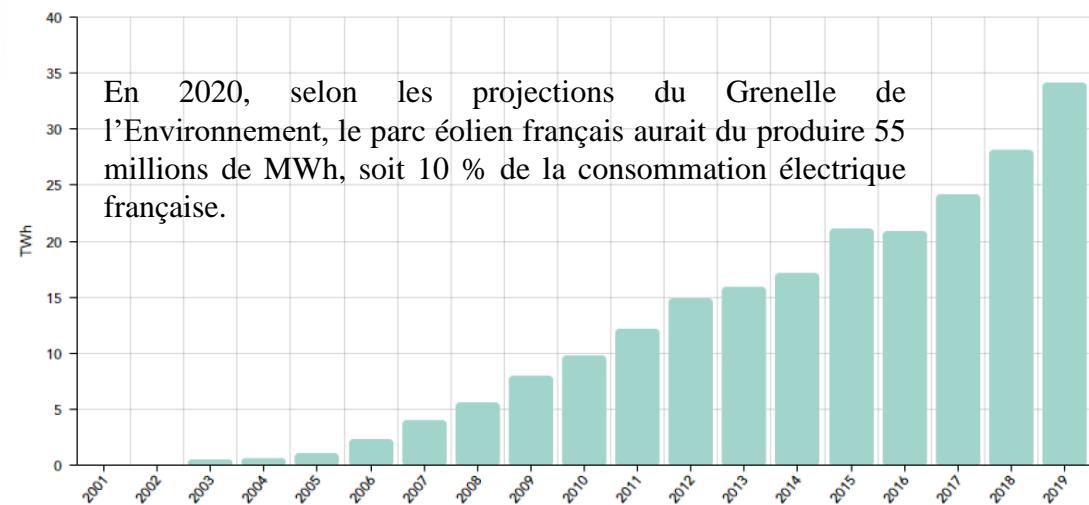
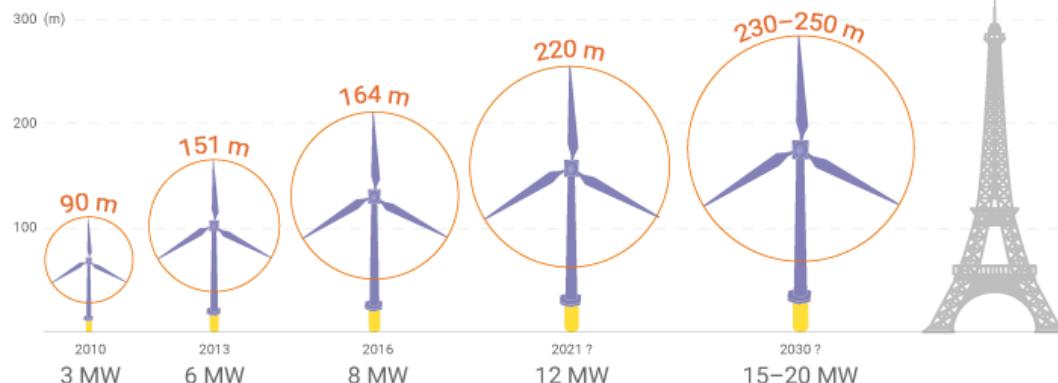




L'éolien en France

Éolien offshore

Évolution de la taille et de la puissance des nouvelles unités de production

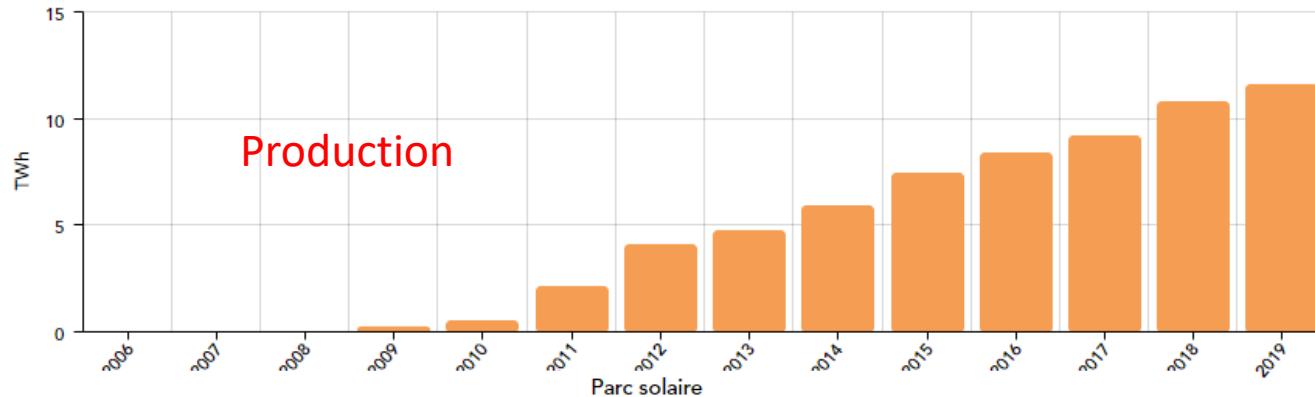


Pb : intermittence : Pas de vent pas d'électricité !

Photovoltaïque (PV) en France

**12,6 TWh**

Production d'électricité d'origine solaire

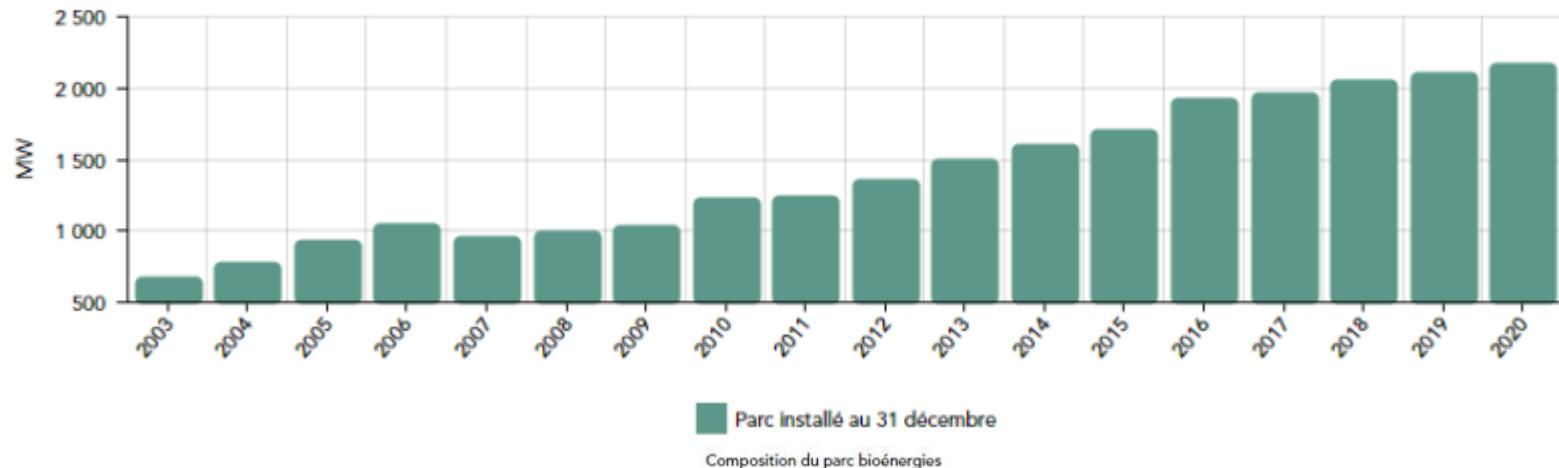
Évolution
+2,3 %

Pb : intermittence : Pas de soleil pas d'électricité !

Bio énergie

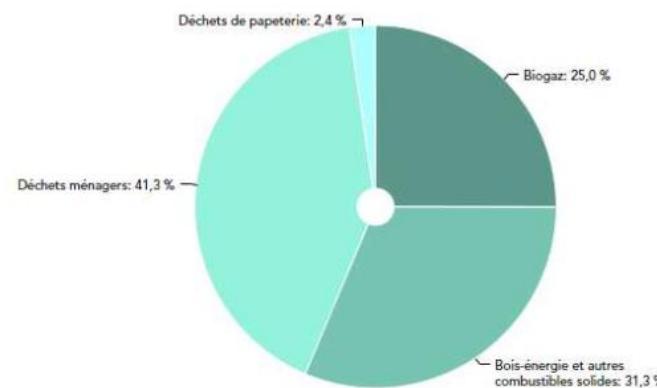
Stable en 2020

Parc bioénergies



■ Parc installé au 31 décembre

Composition du parc bioénergies



Pb : nombre d'installations limité

Quelle réponse à l'intermittence ? Le Stockage

Méthodes de stockage dépendent du type d'énergie

- **Energies fossiles** (charbon, gaz, pétrole) : **réservoirs** à l'état **naturel**. Une fois extraites, elles peuvent facilement être **isolées, hébergées et transportées**.
- **Energies intermittentes** : production relayée par des vecteurs énergétiques tels que l'électricité, la chaleur ou l'hydrogène, nécessitant des **systèmes spécifiques de stockage**.

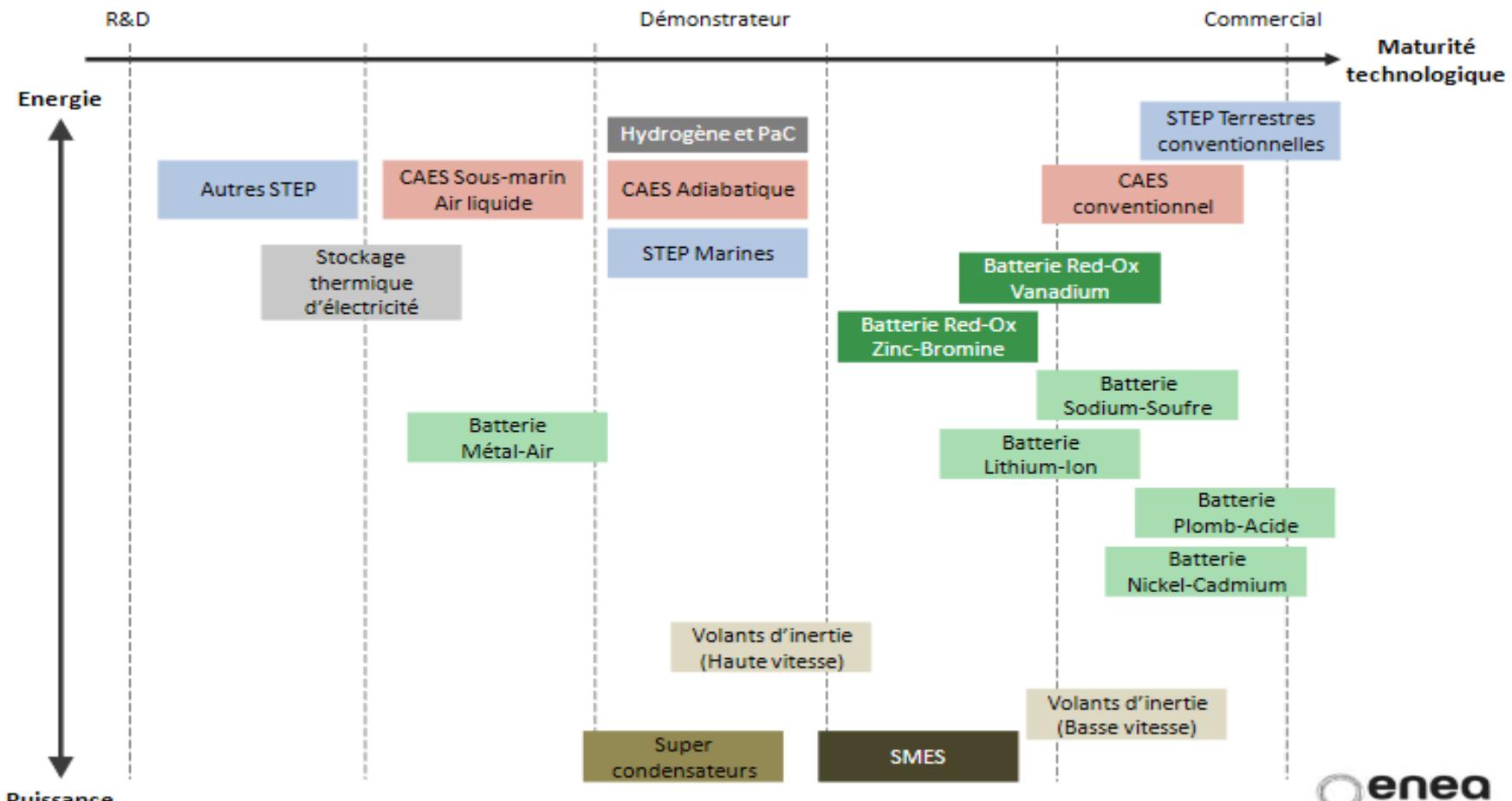
Buts du stockage : **optimiser les ressources énergétiques ou en favoriser l'accès.**

- **Ajuster la « production » et la « consommation »** d'énergie en limitant les pertes.
- **Face à l'intermittence** ou la fluctuation de production de certaines énergies, par exemple renouvelables, cette opération permet également de **répondre à une demande constante**.

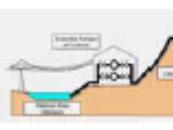
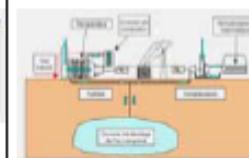
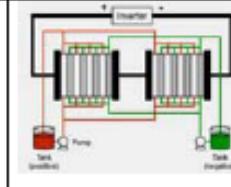
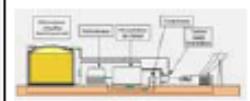
Quelles technologies de stockage ?

 enea CONSULTING	Capacité disponible	Gamme de puissance	Temps de réaction	Efficacité	Durée de vie	CAPEX puissance (€/kW)	CAPEX énergie (€/kWh)
STEP	1 – 100 GWh	100 MW – 1 GW	s - min	70 – 85 %	> 40 ans	500 – 1 500	70 – 150
CAES	10 MWh – 10 GWh	10 – 300 MW	min	50 % (1 ^{ère} gén.) 70 % (AA-CAES)	> 30 ans	400 – 1 200	50 – 150
Hydrogène et Pile à Combustible	10 kWh – 10 GWh	1 kW – 10 MW	s - min	25 – 35 %	5 – 10 ans	6 000	< 500
Batteries Sodium-Souffre	< 100 MWh	< 10 MW	ms	75 – 85 %	2 000 – 5 000 cycles	5 00 – 1 500	150 – 500
Batteries Lithium-Ion	< 10 MWh	< 10 MW	ms	85 – 95 %	2 000 – 10 000 cycles	1 000 – 3 000	300 – 1 200
Batteries Red-Ox Flow	< 100 MWh	< 10 MW	ms	65 – 80 %	2 000 – 12 000 cycles	500 – 2 300	100 – 400
Volants d'inertie	5 – 10 kWh	1 – 20 MW	ms	> 90 %	100 000 cycles	500 – 2 000	2 000 – 8 000
SMES	1 – 10 kWh	10 kW – 5 MW	ms	> 90 %	20 – 30 ans	300	> 10 000
Super condensateurs	1 – 5 kWh	10 kW – 5 MW	ms	90 – 95 %	500 000 cycles	100 – 500	10 000 – 20 000

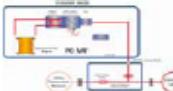
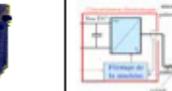
Quelles technologies de stockage ?



Stockage à grande échelle

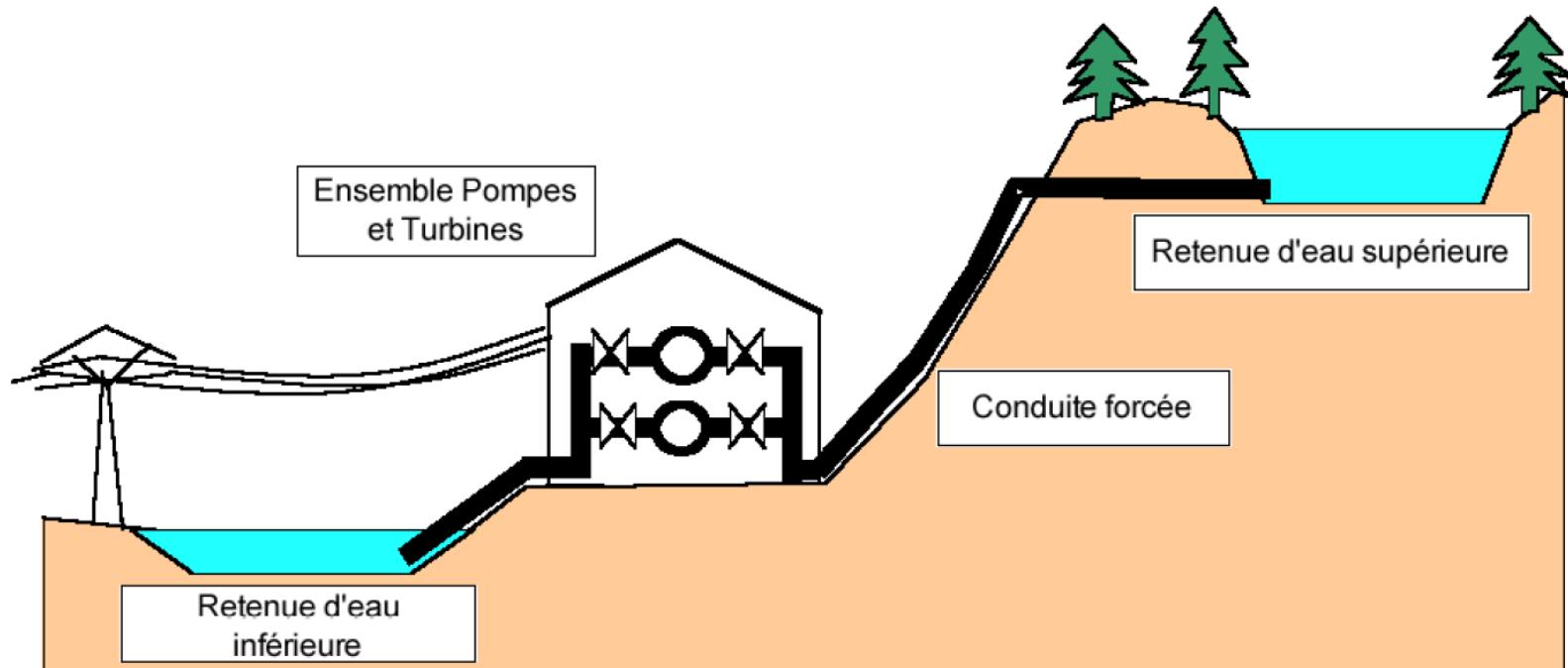
Technologie	Hydraulique gravitaire	Air comprimé en caverne	Batteries électrochimiques	Batteries à circulation	Thermique à turbine
					
Densité d'énergie	1 kWh/m ³ pour une chute de 360 m	12 kWh par m ³ de caverne à 100 bars	Batterie au plomb : 33 kWh/t Batterie Li-ion : 100 kWh/t	33 kWh/m ³	200 kWh/m ³
Capacité réalisable	1000 – 100000 MWh	100 – 10000 MWh	0,1 – 40 MWh	10 – qq 100 MWh	1000 – 100000 MWh
Puissance réalisable	100 – 1000 MW	100 – 1000 MW	0,1 – 10 MW	1 – qq 10 MW	10 – 100 MW
Rendement électrique	65% - 80%	50% (avec l'apport de gaz naturel)	70% ou moins en décharge rapide	70%	60%
Installations existantes	100 000 MWh 1000 MW	600 MWh 290 MW	40 MWh 10 MW	120 MWh 15 MW	----
Coût €/kWh(1) et €/kW(1)	70 à 150 600 à 1500	50 à 80 400 à 1200	200 (Pb) à 2000 (Li) 300 (Pb) à 3000 (Li)	100 à 300 1000 à 2000	50 350 à 1000
Maturité	Très bonne	Plusieurs expériences au monde	Plusieurs expériences avec des technologies matures	En développement prototypes en fonctionnement	A l'état de projet
Remarques	Sites avec dénivellation et retenues d'eau	Sites avec cavernes	Métaux lourds	Produits chimiques	Indépendant des contraintes géographiques

Stockage à petite échelle

Technologie	Inductif Supra-conducteur	Super-condensateur	Electro-chimique	Volant Inertie	Air comprimé en bouteille	Hydrogène PAC réversible
Illustrations						
Forme d'énergie	magnétique	électrostatique	chimique	mécanique	air comprimé	carburant
Densité d'énergie (accumulateur seul, hors équip. annexes)	1 à 5 Wh/kg	5 à 10 Wh/kg	20 à 120 Wh/kg	1 à 5 Wh/kg	8 Wh/kg (200 bars)	300 à 600 Wh/kg (200 à 350 bars) hors PAC
Capacité réalisable ou réalisée	qq kWh	qq kWh	qq Wh à qq MWh	qq kWh à qq 10 kWh	qq kWh à qq 10 kWh	NA
Constante de temps	qq s à 1 mn	qq s à qq mn	qq 10 mn (NiCd) à qq 10 heures (Pb)	qq mn à 1 h	1 h à qq jours (peu d'autodécharge)	1 h à qq jours (peu d'autodécharge)
Cyclabilité	qq 10 000 à qq 100 000 fatigue mécanique	qq 10 000 à qq 100 000	qq 100 à qq 1000 dégradations chimiques	qq 10 000 à qq 100 000 fatigue mécanique	qq 1000 à qq 10 000 fatigue mécanique	??
Rendement électrique	> 0,9	0,8 à > 0,9 selon régime	0,7 à 0,8 selon techno et régime	0,8 à > 0,9 selon régime	0,3 à 0,5 selon régime	0,3 à 0,5
Connaissance de l'état de charge	Aisée (courant)	Aisée (tension)	Difficile Paramètres variables	Aisée (vitesse)	Aisée (pression)	Aisée (remplissage H2)
Coût énergie €/kWh(1)	500 à 72000	50 000 à 150 000 (dimensionnement en puissance)	Pb-acide : 50 à 200 Lithium : 700 à 1000	150 à 2000 (massif) ≈ 25000 (composite)	?	15
Coût puissance €/kW(1)	≈ 300	≈ 300	250 à 1500	300 à 350	?	6000
Remarques	Cryogénie	Grande cyclabilité	Technologie mature	Coût global compétitif sur la durée de vie	Rendement faible	Intéressant si contexte de réseau d'hydrogène

Stockage hydraulique gravitaire

STEP : énergie stockée sous forme d'énergie potentielle, est W_{stock} (en J) = $\rho \cdot V \cdot g \cdot h$ (ρ est la masse volumique de l'eau en kg/m³, V le volume d'eau en m³, g la constante de gravitation $g = 9.81 \text{ m.s}^{-2}$ et h , en m, le dénivelé entre le bassin supérieur et le bassin inférieur).

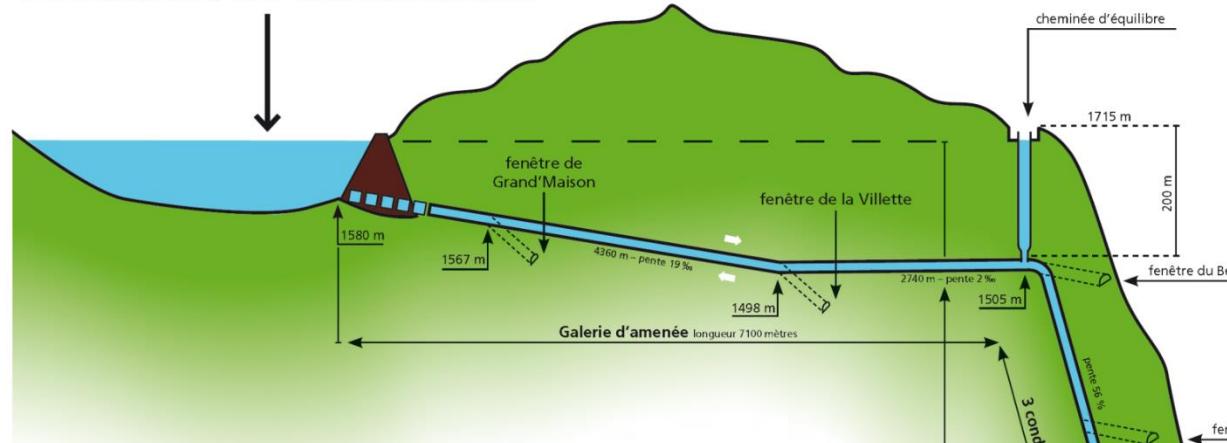


Stockage hydraulique gravitaire

STEP de grand Maison

REtenue de Grand'Maison

niveau retenue normale, 1695 mNGF – niveau maximal exceptionnel, 1698 m
niveau minimal (utilisable), 1590 m – capacité utile, 132 millions de m³



Capacité totale de la retenue : 140 MILLIONS DE m³

Hauteur de chute : 926,5 m

12 groupes qui permettent de turbiner jusqu'à 217 m³/ s

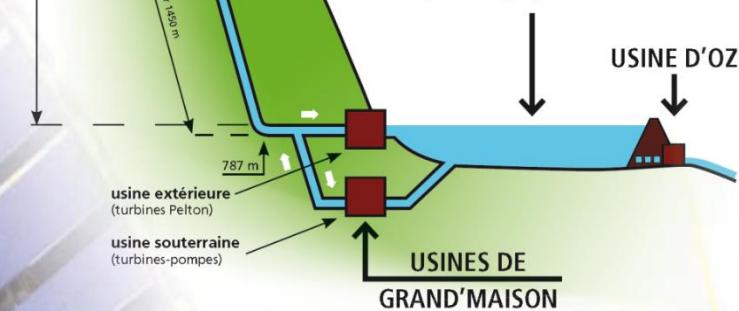
8 groupes qui permettent de pomper jusqu'à 135 m³/ s

Puissance de production : 1800 MW

Équivalence consommation résidentielle : une ville de 740 000 HABITANTS.

REtenue du Verney

niveau retenue normale, 768,50 mNGF
niveau maximal exceptionnel, 770 m
niveau minimal (utilisable), 740 m
capacité utile, 14,3 millions de m³



Stockage hydraulique gravitaire

EL Hierro



Dépendance d'altitude: $h = 658\text{m}$

Puissance du parc éolien:

$P = 11,5 \text{ MW}$

Puissance de la station de turbinage:

$P = 11,3 \text{ MW}$

Puissance de la station de pompage:

$P = 6 \text{ MW}$

Autonomie: 2 jours sans vent

Okinawa



Puissance : 30 MW –

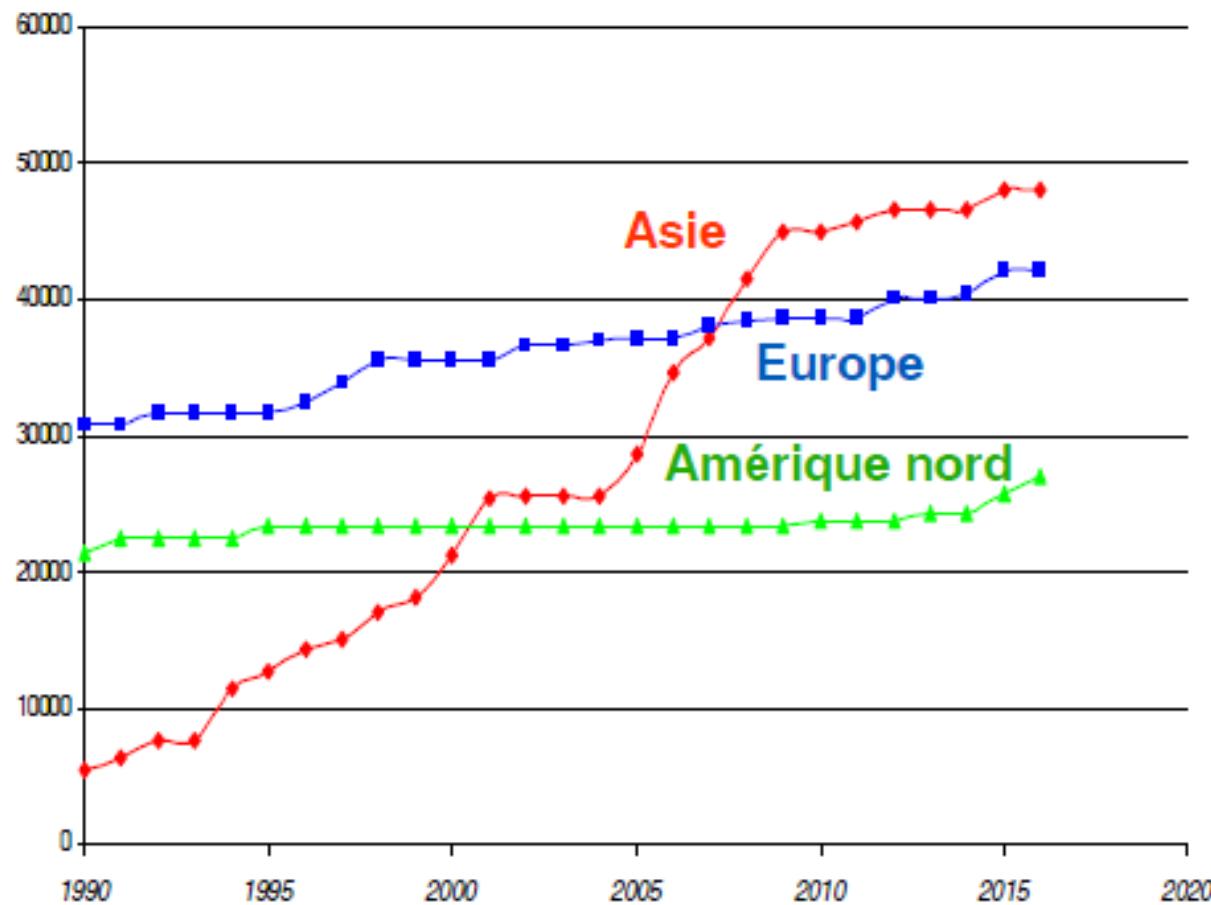
Capacité : 240 MWh

Hauteur : 136 m –

Rendement : 80 %

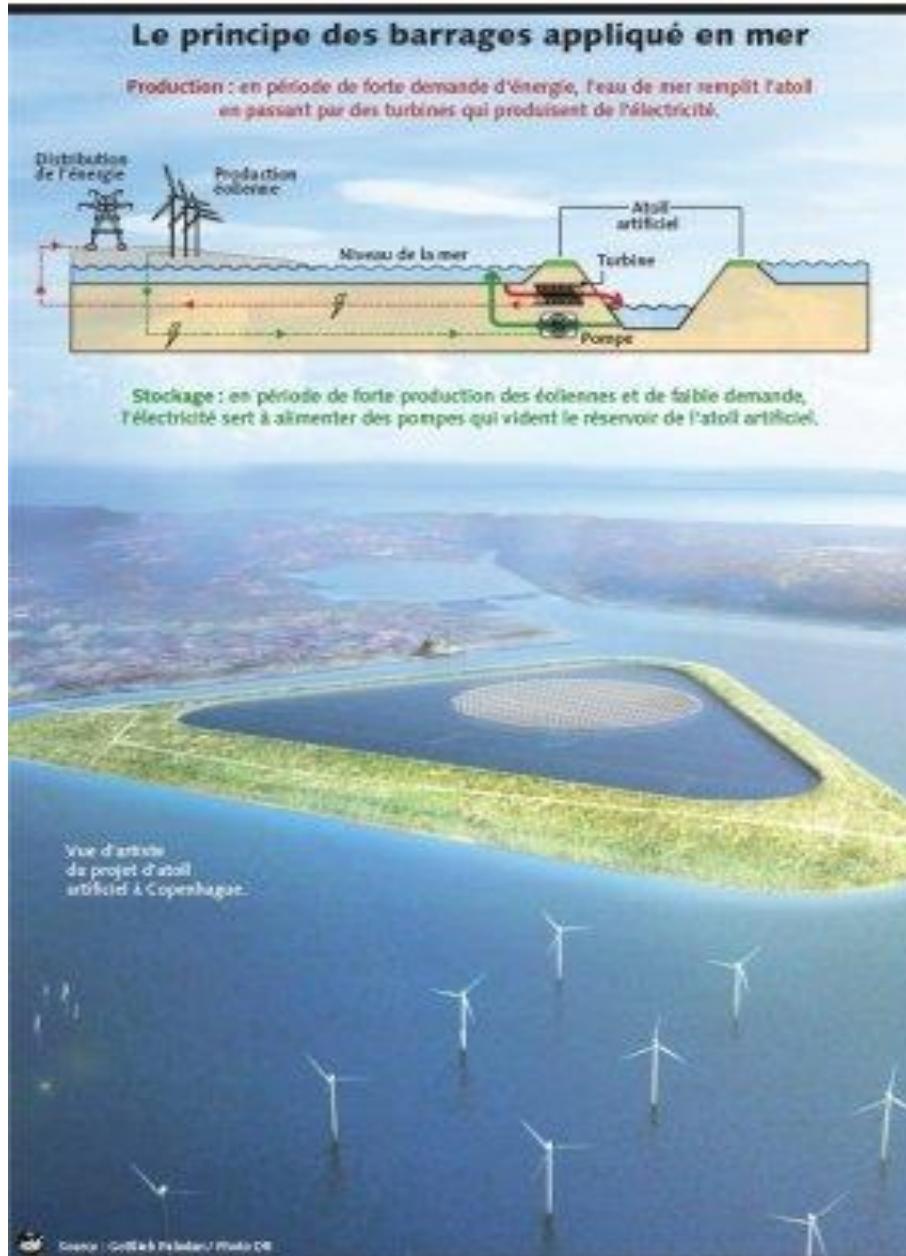
Stockage hydraulique gravitaire

Puissance cumulée (MW)



Danemark : études de gigantesques retenues d'eau en mer, à la façon des îles corallieennes. Les ingénieurs nordiques espèrent y stocker l'énergie intermittente de leurs grands parcs éoliens marins.

Stockage en mer ?



Stockage à air comprimé : CAES

Compressed Air Energy Storage (CAES) :

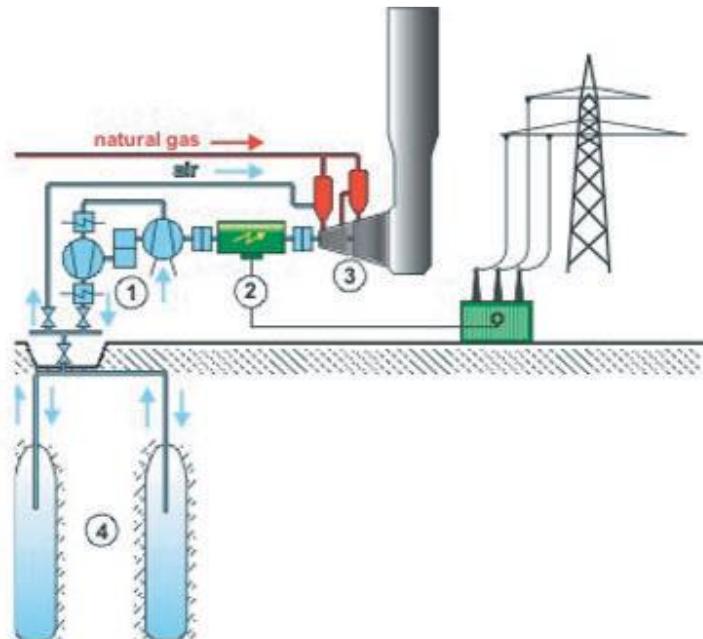
Deux installations de stockage d'air comprimé dans le monde :

- la centrale de 290 MW, propriété de E.N. Kraftwerke, à Huntorf en Allemagne, construite en 1978
- A.E.C. (Alabama Electric Corporation) à Mc Intosh en Alabama USA, mise en service en 1991.

Principes :

Une installation de stockage d'air comprimé comporte principalement :

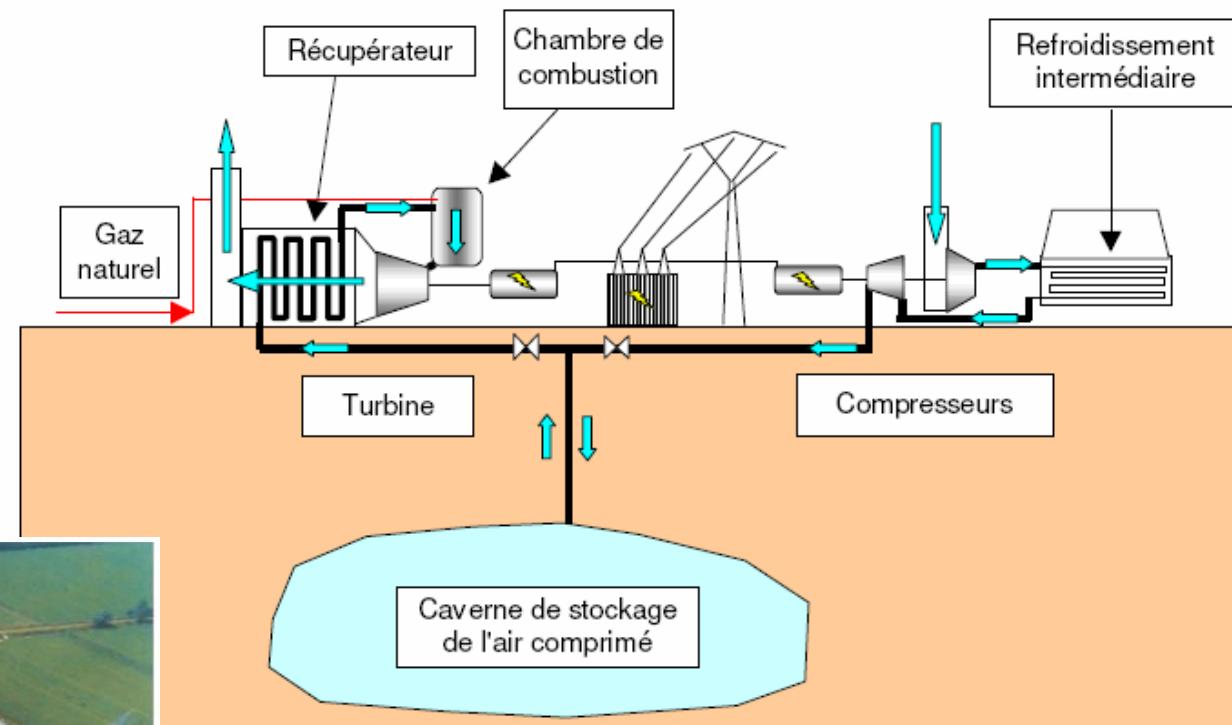
1. Système de compression,
2. Unité moteur-générateur,
3. Turbine à gaz,
4. Une ou plusieurs cavernes de stockage d'air comprimé.



Stockage à air comprimé : CAES

Hundorf en Allemagne

Puissance: $P=290 \text{ MW}$,
Temps: $T=3 \text{ h}$
Volume : 310000 m^3
Pression 70 bars
Rendement : 50-70%



Dihydrogène : PAC

ENERGIE HYDROGÈNE

Cet énorme gisement d'hydrogène naturel a été découvert en France

20.05.2023 - JEAN-LUC PONCIN

PARTAGER



C'est dans le bassin minier de Folschviller, en Lorraine, que FDE a trouvé d'importantes concentrations d'hydrogène blanc.

Dihydrogène : PAC

46 millions de tonnes d'hydrogène blanc dans le sous-sol lorrain !

Initialement parties pour étudier le méthane du bassin minier lorrain, leurs équipes ont trouvé le gaz recherché. Mais, fin 2022, elles sont tombées par hasard sur une petite quantité d'hydrogène, à 600 mètres de profondeur. Il fallait donc creuser, puisque plus l'on va en profondeur, plus l'oxygène disparaît au profit de l'hydrogène. Grâce à une sonde initialement développée pour la recherche de méthane par les chercheurs - conjointement avec l'entreprise Solexperts -, des investigations ont été menées jusqu'à 1,1 kilomètre de profondeur. À ce stade, la teneur en hydrogène était de 15 à 17 % et, d'après les estimations, il se pourrait qu'il soit produit à plus de 3 000 mètres de profondeur, où la teneur en hydrogène dépasse les 90 % ! Le gisement concerné mesurant six kilomètres de profondeur, au total, ce seraient 46 millions de tonnes d'hydrogène qui dormiraient dans le sol : c'est plus de la moitié de la production annuelle d'hydrogène gris (produit par vaporeformage).

Un hydrogène naturellement renouvelable

Cet hydrogène blanc, estime les chercheurs, serait produit par la réaction du carbonate ferreux très présent dans le sous-sol lorrain avec les molécules d'eau. « *Si cette hypothèse est vérifiée, cela devient encore plus intéressant, car on a affaire à de l'hydrogène blanc, qu'on peut qualifier de renouvelable puisque cette réaction continue de se produire !* », se réjouit Philippe de Donato dans les colonnes d'*Usine Nouvelle*. Une découverte aussi rare qu'enthousiasmante, vu qu'un seul autre gisement est connu à ce jour, au Mali.

<https://www.futura-sciences.com/>

Dihydrogène : PAC

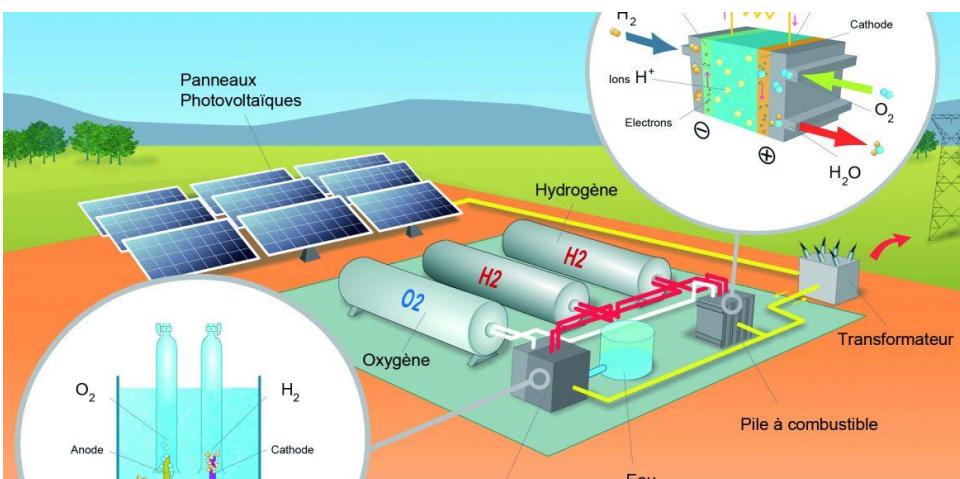
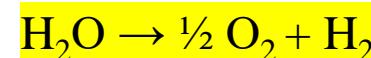


<https://www.youtube.com/watch?v=wNJEL2hUQ5E>

Dihydrogène : PAC

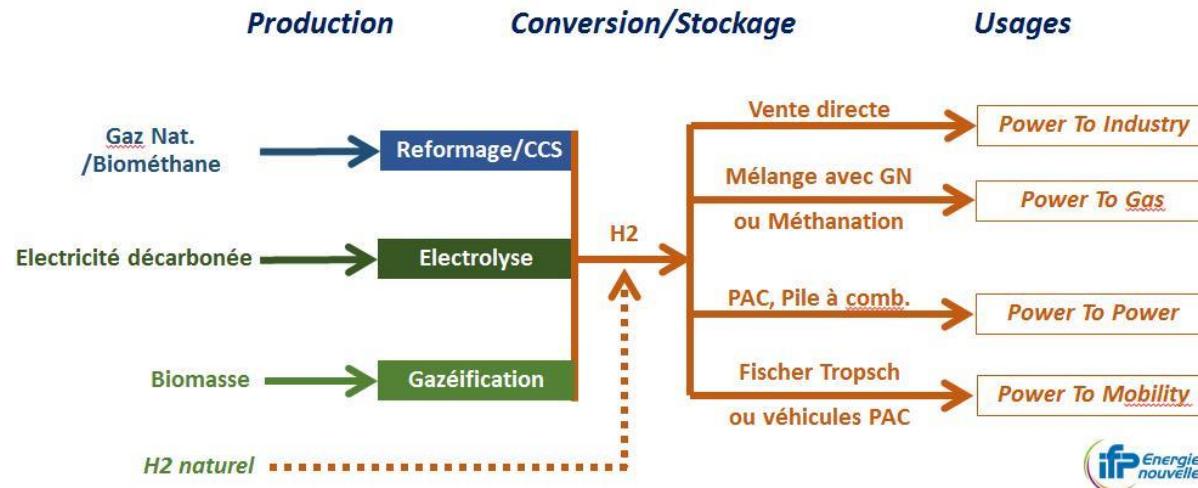
	Hydrogène	Essence	Diesel	Gaz Naturel	Méthanol
Densité énergétique (kWh/kg)	33,3	11,86	11,64	14	5,53
Densité énergétique (kWh/m ³)	2,2	8667	10139	10	4420

- **Dihydrogène** principalement vecteur énergétique produit à partir d'une autre ressource. Actuellement, à **96 %** issu du **gaz naturel**. Par reformatage
- Autre voie : à partir **d'énergies décarbonées** par **électrolyse de l'eau**



Rem : **dihydrogène « gris »** = Reformage du gaz naturel à la vapeur d'eau en faisant réagir du **méthane avec de l'eau** pour obtenir un mélange contenant de **dihydrogène et du CO₂**. Le CO₂ émis peut être capté puis stocké de façon pérenne dans le sous-sol pour obtenir un dihydrogène décarboné.

Hydrogène : PAC



Power to Industry: vente directe aux industries consommatrices d'hydrogène vert (raffinage, chimie) afin de décarboner leurs processus industriels.

Power to Gas : valorisation dans le secteur gazier sous deux formes :

- injection directe dans les réseaux gaziers pour combustion,
- production de méthane de synthèse (méthanation : conversion du monoxyde (CO) ou du dioxyde de carbone (CO₂) en présence d'hydrogène) qui peut ensuite être transformé en chaleur, électricité ou carburant.

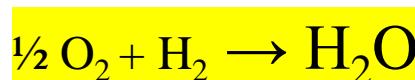
Power to Power: production d'électricité grâce aux piles à combustibles.

Power to mobility – efuel: transformation de l'hydrogène en un autre carburant via le procédé appelé Fischer Tropsch. Il s'agit de produire à partir d'H₂ et de CO₂ un carburant utilisable dans les moteurs actuels

Hydrogène : PAC

Principe :

Electrolyse inverse = combustion électrochimique contrôlée de dihydrogène H₂ et de dioxygène O₂, avec production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur



Consommation de combustible et courant électrique produit

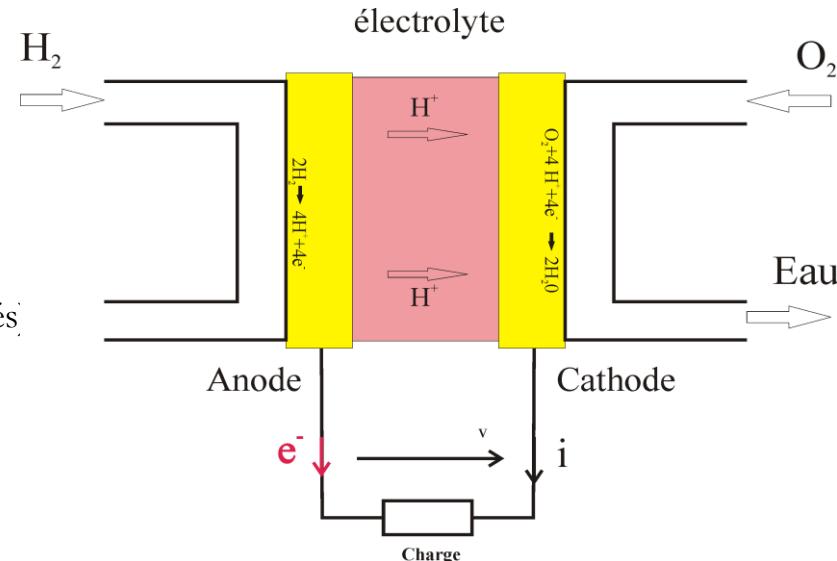


N moles de H₂ libèrent une charge (1 mole comprend 6,02.10²³ entités)
 $q = -2 \cdot e \cdot N_A \cdot N$

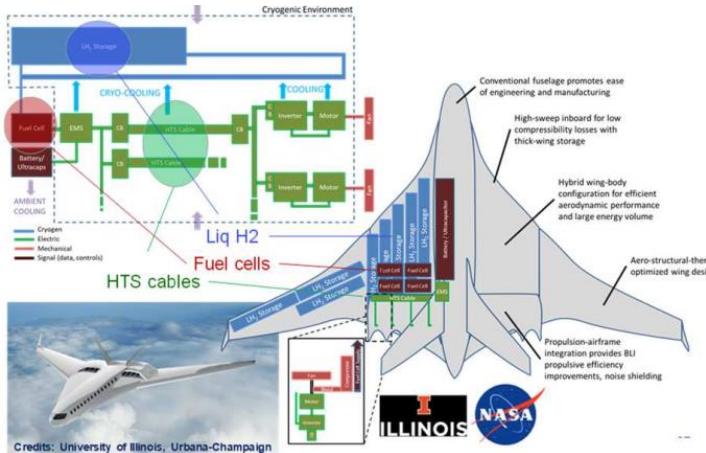
Intensité électrique délivrée : $i = \frac{dq}{dt} = -2 \cdot e \cdot N_A \frac{dN}{dt}$ avec le debit molaire $D_m = \frac{dN}{dt}$

Consommation de dihydrogène directement proportionnelle à l'intensité électrique

Rem : Tant que cette alimentation est maintenue, la pile à combustible fonctionne de manière stable et continue.

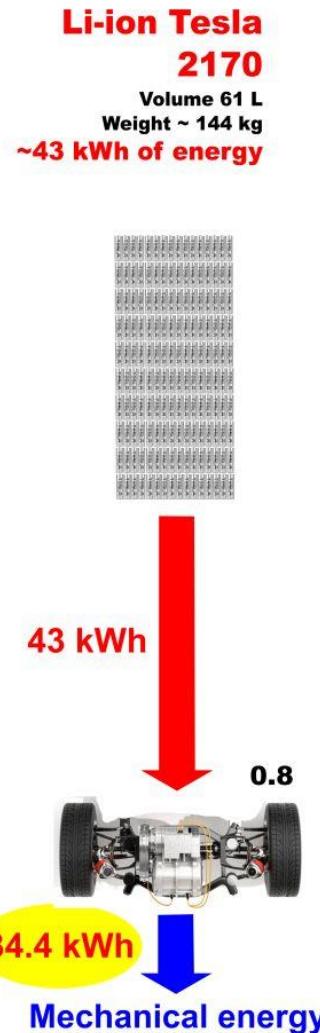
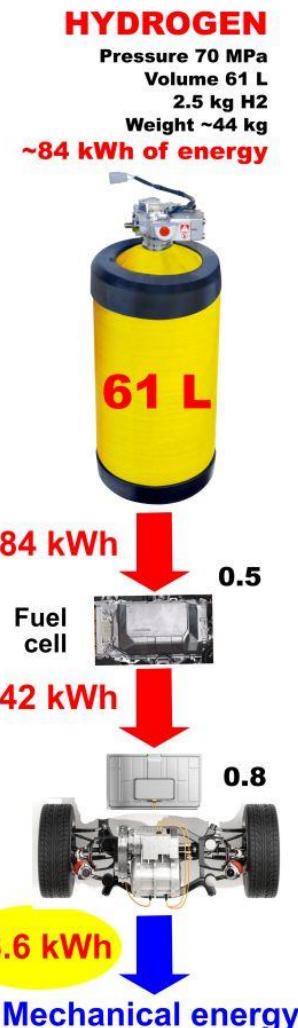


Hydrogène : Transports



Airbus 2020, 3 concepts d'avion propulsé au dihydrogène et **vise la mise en service d'un appareil commercial zéro émissions**



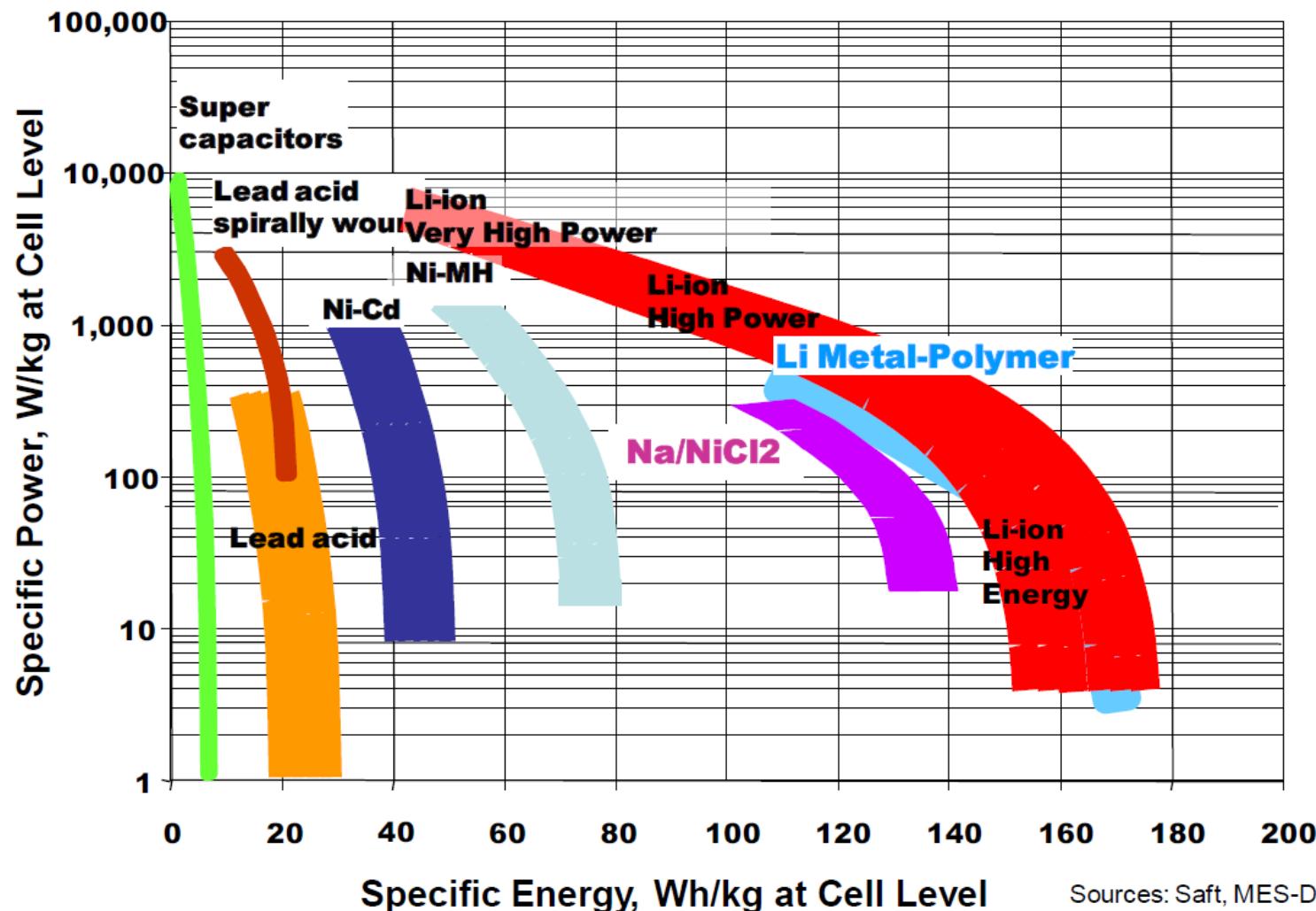


Hydrogène : Transports

We know that 84 kWh of energy is stored in a 61-liter high-pressurized hydrogen tank (70 MPa). But how much energy is stored in 61-liter li-ion cells? I chose Tesla 2170 as a typical sample of li-ion cell, it has a specific volumetric energy density of ~700 Wh/L and a gravimetric energy density of ~297 Wh/L, SoC (0-100%). If 61-liter hydrogen tank and 61-liter Tesla 2170 battery will be the source of energy for two vehicles, which vehicle of the two will have more mechanical energy at the wheels? At first glance, it seems that the winner is clear, but the result is surprising, it is the battery-powered vehicle. You can see the result in the picture. below.

*Note. In this example, I considered energy densities at the level of li-ion cell and not at the level of the battery pack.

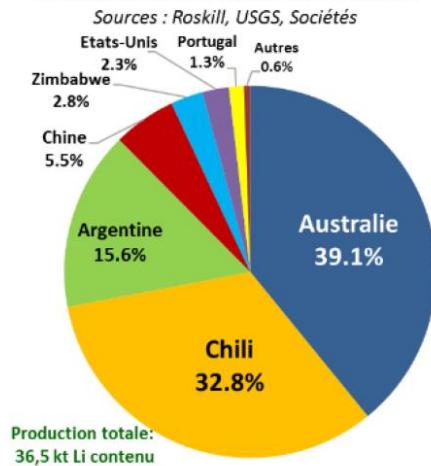
Stockage Electrochimique



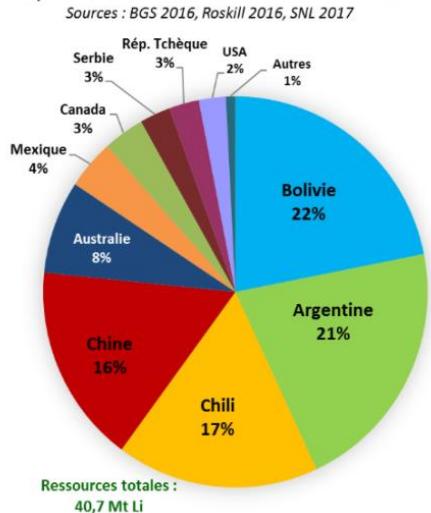
Sources: Saft, MES-DEA

Stockage Electrochimique

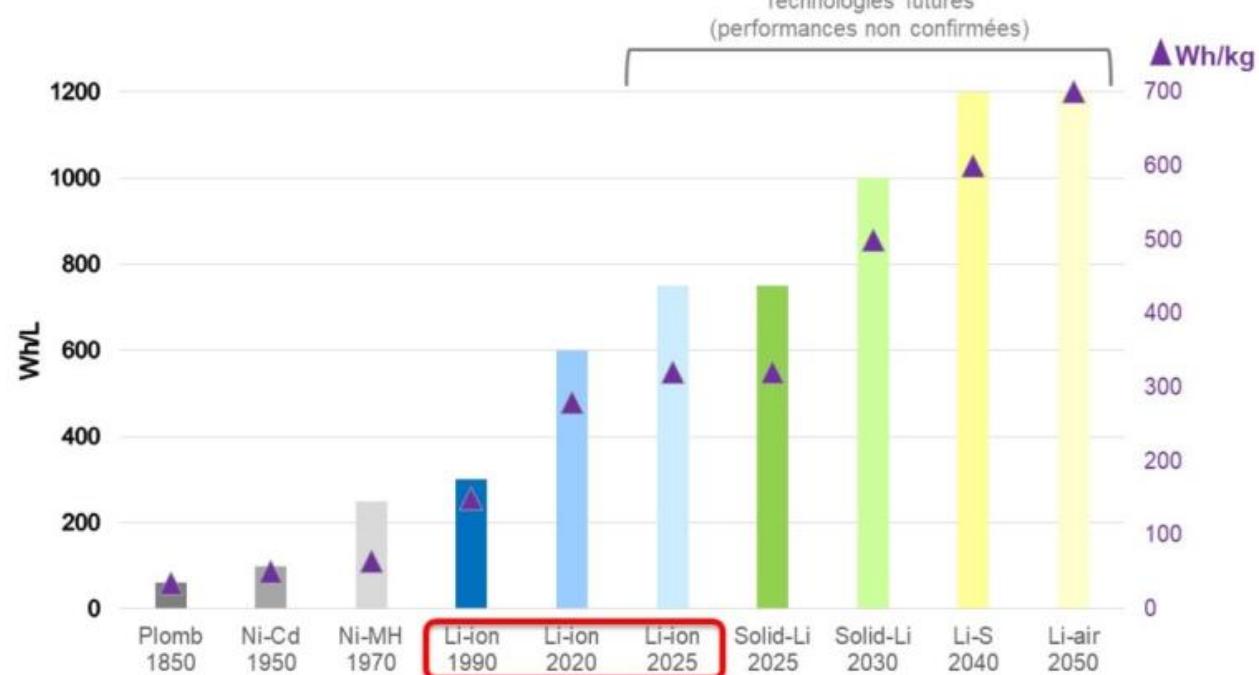
Production minière de lithium en 2016



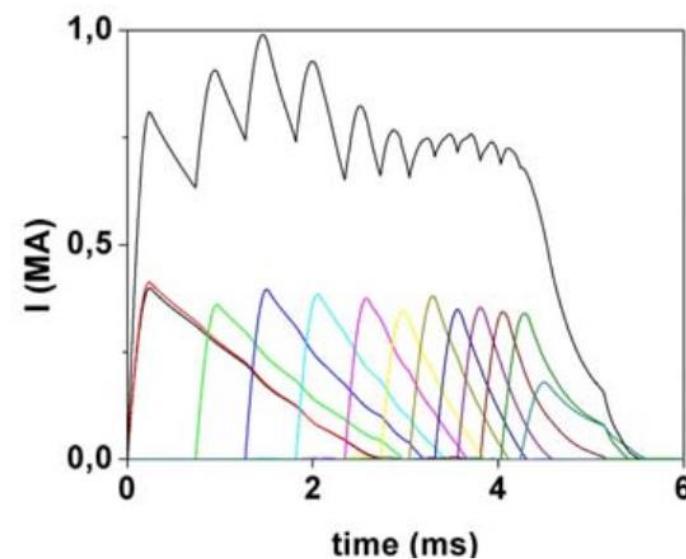
Répartition des ressources mondiales de lithium



Technologies futures
(performances non confirmées)

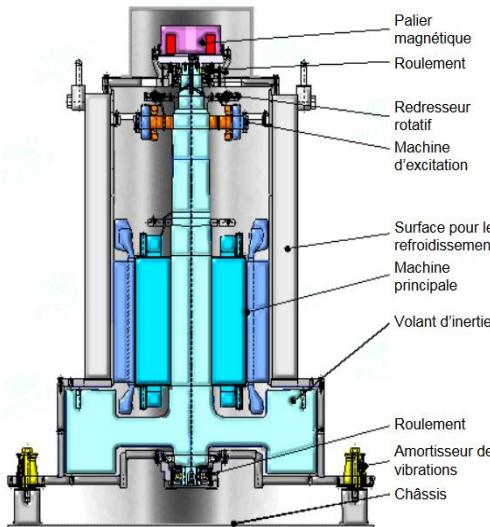


SMES



Volant d'inertie

Principe :



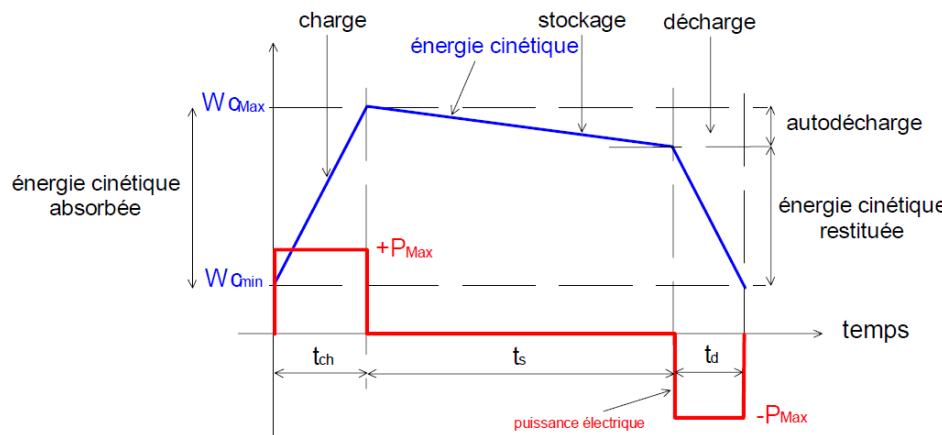
Elément de stockage : volant d'inertie

Elément de conversion : le moteur/générateur

Energie cinétique d'une masse tournante

$$E_r = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2$$

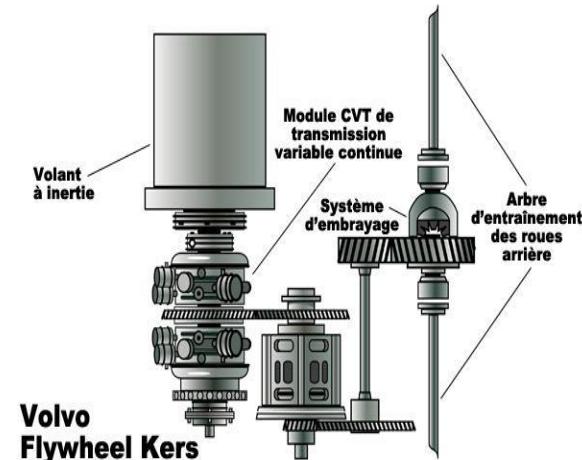
ω vitesse angulaire
I moment d'inertie



Volant d'inertie

Matériau	Fibre de carbone 60% & résine	Fibre d'aramide 60% & résine	Fibre de verre 60% & résine	Acier trempé 30NCD16	Titane TA6V	Aluminium 7075 T6
Masse volumique ρ (kg/m ³)	1500	1 350	2 000	7 800	4 500	2 700
Masse du volant (kg)	42,4	38,2	56,5	220,5	127,2	76,3
Résistance à la rupture σ (MN/m ²)	4 200	2 880	2 600	1 000	800	500
Vitesse périphérique maximale v_{max} (m/s)	2 366	2 066	1 612	506	596	609
Vitesse de rotation maximale (tr/min)	90 400	78 900	61 600	19 300	22 800	23 200
Énergie cinétique (kWh)	26,719	18,322	16,541	6,362	5,089	3,181
Densité d'énergie (Wh/kg)	638	486	296	29	40	42

Volant d'inertie : Applications



Rotterdam : « Sur une section plate, un **Citadis** muni d'un volant de 325 kW stockant 4 kWh peut parcourir 2 km avec une vitesse de pointe de 50 km/h .

- masse en fibres de carbone tournant à 22 000 tours par minute.
- durée de vie de trente ans - équivalente à celle d'un tramway –

Métro de Rennes : 230 MWh par an récupéré, soit :

- 11 jours de consommation électrique du métro
- consommation de 150 foyers

Investissement de 260k€ (HT).

Économie de 25k€ par an d'électricité.

Suisse (Bas- Valais) :

- Capacité : 5 à 10 kWh
- Puissance : 1 à 20 MW
- Forte puissance, faible énergie

Volant d'inertie relié à l'essieu arrière

- volant en fibre de carbone, 6kg, D = 20 cm
- volant + V4, même performance qu'un V6
- 25 % d'économie de carburant

Volant d'inertie : Applications



StephenTown (NY)

Bilan du projet

200 volants d'inertie de 0.1 MW chacun

- doit lisser le réseau New-Yorkais en cas de coupure
- 10% des demandes de régulation du réseau New-Yorkais

Volant d'inertie : Avantages/Inconvénients

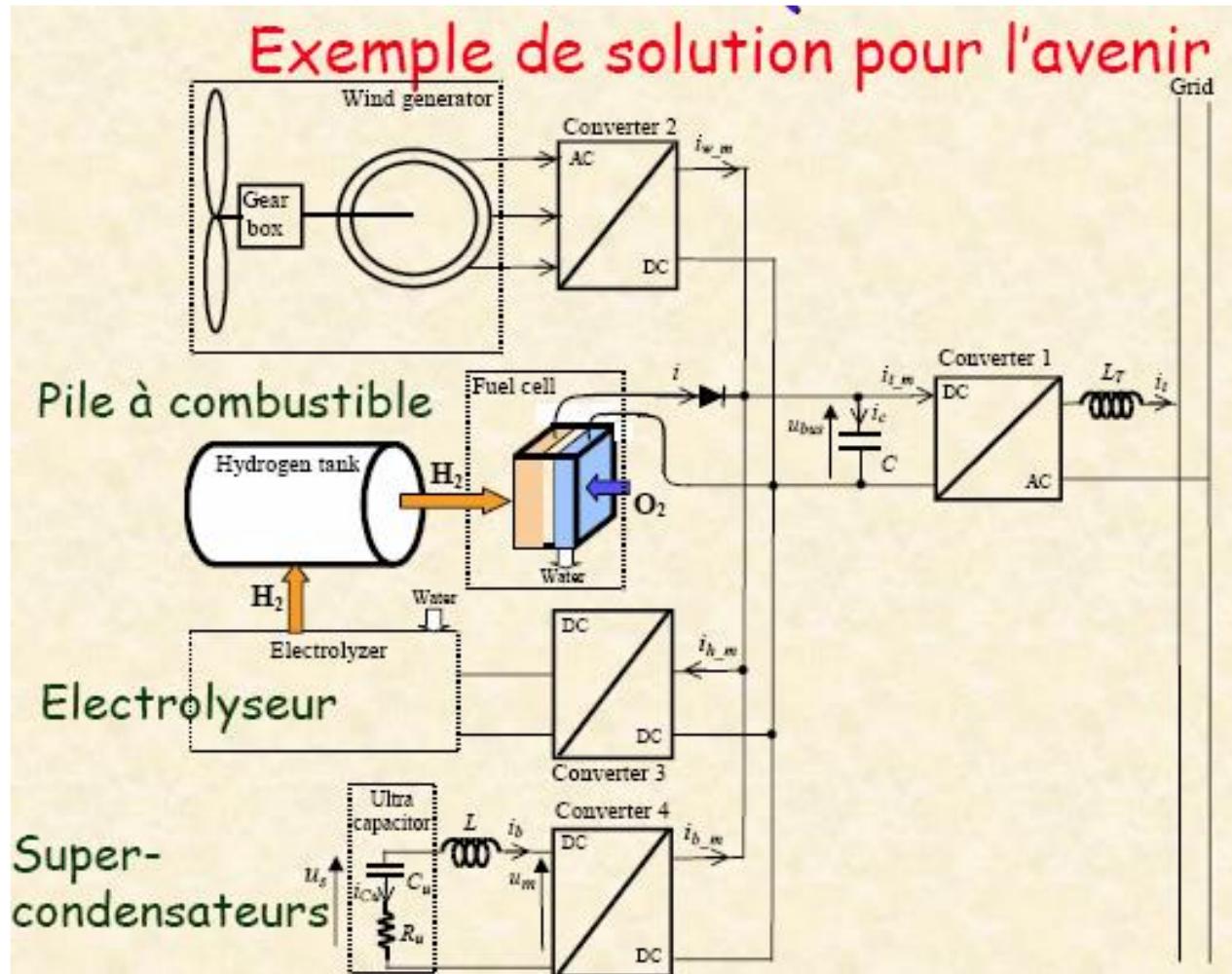
Avantages :

- Haut rendement (80% - 90%)
- Bonne puissance (1 ~ 20 MW)
- Phase de stockage rapide
- Temps de réponse très court (ms ~ s)
- Énergie propre
- Peu de maintenance
- Durée de vie élevée (25 ans, 10^5 cycles)

Inconvénients :

- Temps de stockage limité (15-30 minutes)
- Faible énergie (~5 à 10 kWh)
- Matériaux coûteux

Exemple d'association énergie renouvelable/stockage



Bilan de la première partie

1. Des **solutions techniques existent** pour produire de **l'électricité « soutenable » avec des moyens associés de stockage**
2. Des **investissements très importants devront être faits quelque soit le scénario choisi (nucléaire, éolien ...)**
3. **Le réseau électrique devra s'adapter ...**

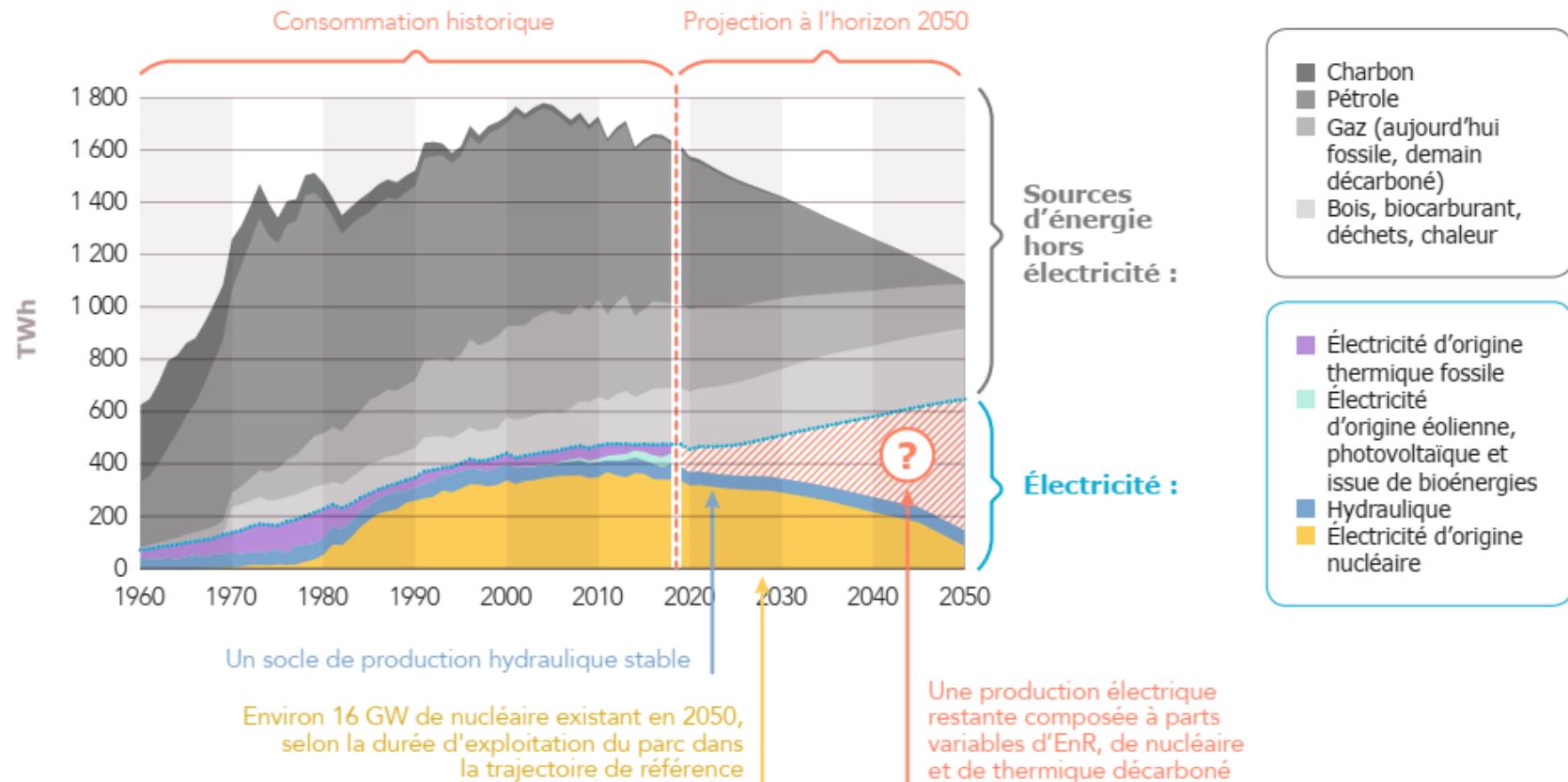


Comprendre le réseau électrique et ses contraintes

Bilan de la première partie

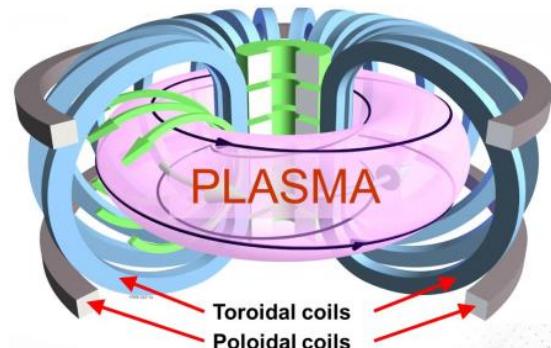
Figure 3

Évolution de la consommation totale d'électricité et de la consommation d'énergie finale pour les autres énergies en France



Et à très long terme : Fusion ?

La fusion une solution propre pour nos besoins en énergie ?



Représentation du Tokamak

ITER
Mise en service expérimentale : 2025

