

# Energie et soutenabilité\*

Bernard MULTON

(ex. enseignant-chercheur à l'ENS Rennes –dpt Mécatronique–  
et au laboratoire SATIE CNRS)

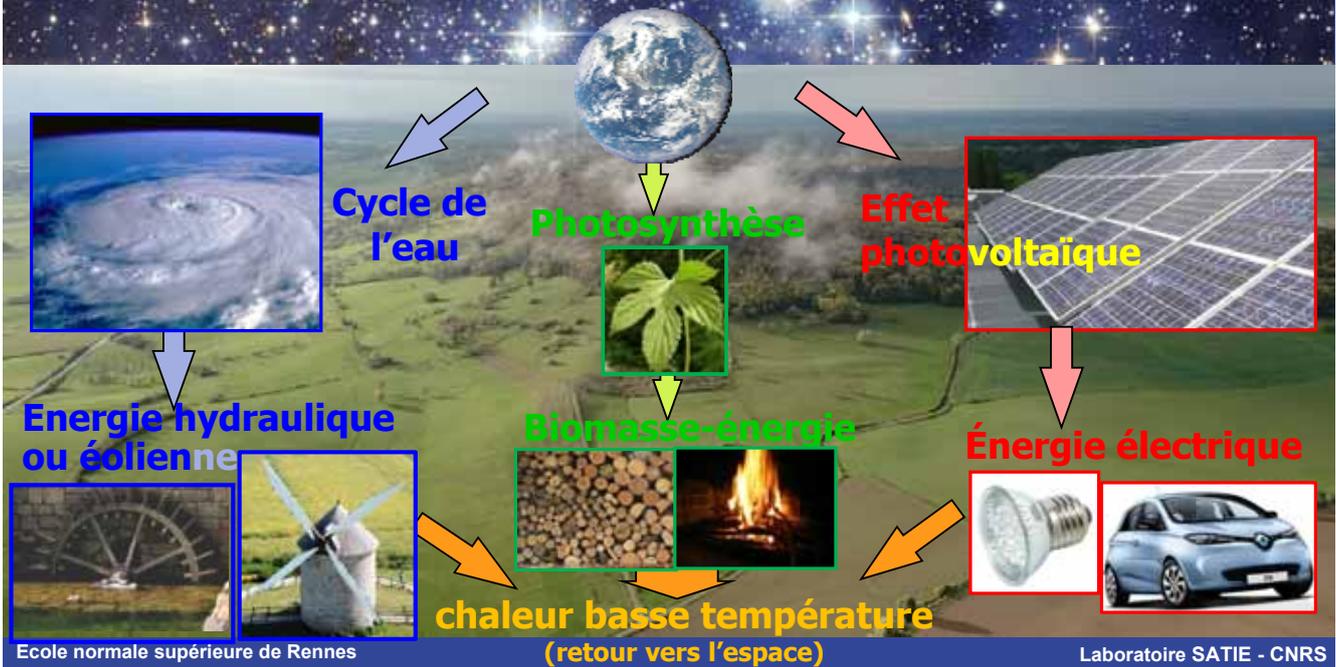
\*Soutenabilité au sens de « développement durable » ou « sustainable development »

## Vies et exemples transformations de l'énergie, vues des Homo Sapiens...

Réactions nucléaires de fusion d'hydrogène dans les étoiles

Rayonnement électromagnétique du soleil transmis dans l'espace

Une infime partie captée par la Terre



# Unités physiques de l'énergie et équivalences

L'unité du Système International, le **joule** : **J**

Autres unités et équivalences :

- **kilowattheure** : **kWh**

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ (millions de joules)}$$

**Térawattheure** : **TWh**

$$1 \text{ TWh} = 10^{12} \text{ Wh} = 1 \text{ milliard de kWh}$$

- **tonne équivalent pétrole** : **tep** (toe en anglais)

$$1 \text{ tep} \cong 11\,600 \text{ kWh}$$

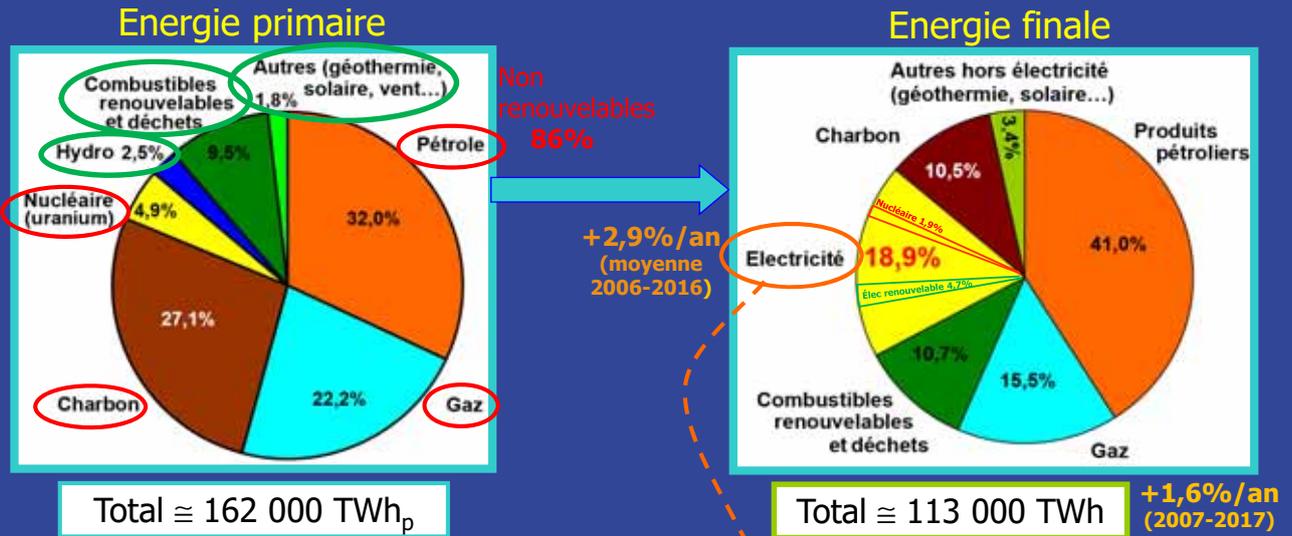
**Gigatep** : **Gtep**

$$1 \text{ Gtep} \cong 11\,600 \text{ TWh}$$

## Analyse énergétique planétaire

évolution de l'humanité  
et  
impacts sur la nature

# Décryptage de la consommation mondiale, place de l'électricité (année 2017)



Source des données : IEA, Key World Energy Statistics 2019 - traitement par l'auteur

$\approx$  65 000 TWh<sub>p</sub> ( $\approx$  40%) prélevés pour produire :  
**25 600 TWh<sub>e</sub>** d'électricité « primaire »

pour commercialiser :

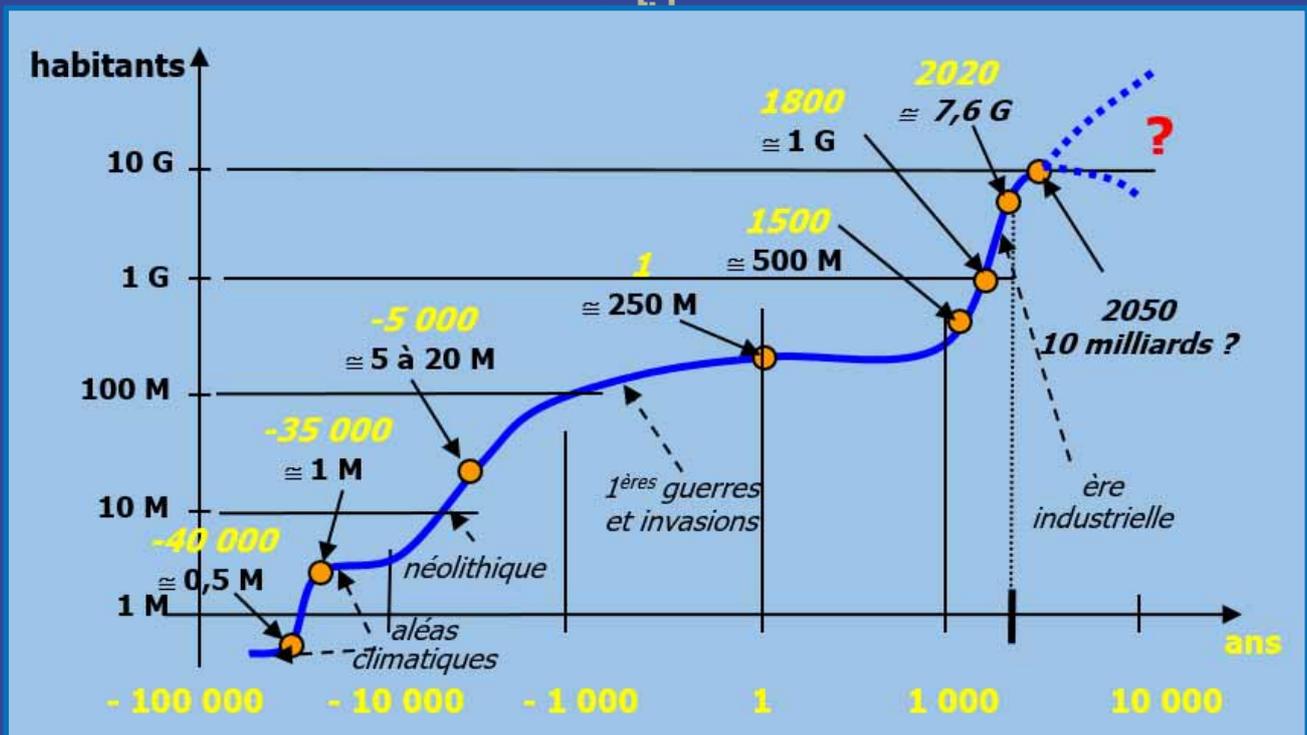
**21 300 TWh<sub>e</sub>** d'électricité « finale » (livrée aux compteurs)

La part de l'électricité croit : < 3% en 1940, 19% en 2018 et > 50% en 2050 ?

« Vraie » part du nucléaire : 4,9 % de l'énergie primaire

1,9 % de l'énergie finale car 10,4% de l'électricité est d'origine nucléaire ( $10,4\% \times 18,8\% = 1,9\%$ )

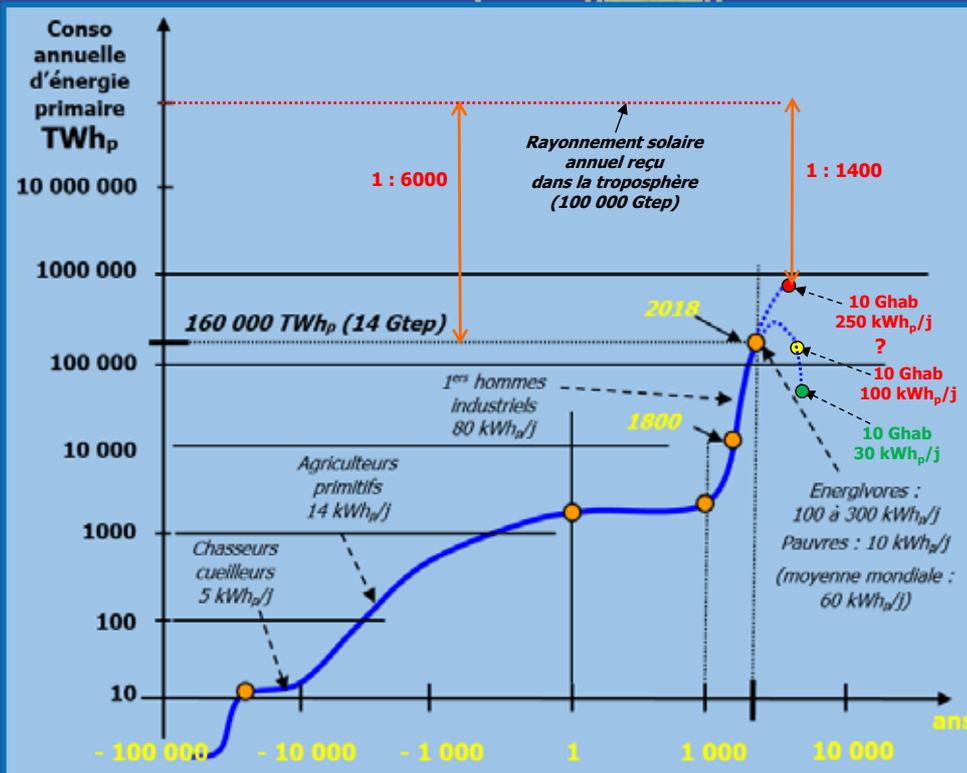
# Evolution de la population d'Homos Sapiens



Source : B Multon,

Origine des données, entre autres : J.N. Biraben, L'évolution du nombre des hommes, in Populations et Sociétés, n° 394, oct. 2003

# Evolution de la consommation d'énergie (primaire) de l'humanité



**Consommation d'énergie primaire :**  
(commerciale et hors biens importés)

- d'un Nord-Américain : 250 kWh<sub>p</sub>/j
- d'un Français : 120 kWh<sub>p</sub>/j
- d'un Chinois : 80 kWh<sub>p</sub>/j
- d'un Nigérien : 10 kWh<sub>p</sub>/j

---

**Moyenne mondiale :**  
60 kWh<sub>p</sub>/j

Source : B Multon

École normale supérieure de Rennes

TWh<sub>p</sub> / kWh<sub>p</sub> = térawattheure / kilowattheure d'énergie primaire

Laboratoire SATIE - CNRS

## Quelques constats concernant la soutenabilité du développement de l'humanité

Dès son arrivée dans la nature, Homo Sapiens a bouleversé les écosystèmes → **anthropocène**

La croissance rapide de sa population s'est accompagnée d'un impact considérable sur la nature.

Plus récemment, l'accès aux **ressources énergétiques fossiles** a « décuplé » ses capacités d'actions sur la nature :

- accès aux ressources minières,
- agriculture intensive,
- industrie ultra-productive,
- ...

→ **« société de consommation » débridée**

et... accélération de la croissance de la population, par effet d'amplification

## Les pollutions associées

### aux activités énergétiques

Emissions massives de gaz à effet de serre : CO<sub>2</sub> (combustibles fossiles), CH<sub>4</sub> (agriculture et élevage) et N<sub>2</sub>O (agriculture)

→ **Dérèglement climatique**

Et d'autres pollutions devenues massives et tout aussi délétères :

- chimiques (molécules toxiques, persistantes...)
- radioactives (taux de mutation)
- génétiques (dissémination d'espèces auxquelles la nature n'a pas le temps de s'adapter)

→ **Effondrement de la biodiversité**

**Nos « pratiques énergétiques » sont, in fine, responsables directement de plus de la moitié de notre empreinte écologique et indirectement d'une très grande part de l'autre moitié !**

## Alors comment concilier énergie et soutenabilité ?

Ne plus consommer de ressources non renouvelables

Minimiser l'extraction minière et améliorer les procédés miniers

Maximiser la réparabilité et la durée de vie de tous nos objets

Recycler toutes les matériaux

En somme réellement éco-concevoir nos objets

**Il n'est donc plus possible de poursuivre avec une économie fondée sur la folle idée que nos ressources sont infinies...**

# Changer profondément de système énergétique



## Ressources planétaires et renouvelables

## Ressources et réserves d'énergie primaire sur la planète Terre

### **COMBUSTIBLES FOSSILES** (charbons, pétroles, gaz naturel) :

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

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

### **URANIUM FISSIONNABLE<sup>(1)</sup>** :

**Ressources** : environ **150 Gtep** (avec réacteurs actuels)

**Réserves estimées** : **90 Gtep (7,6 Mt)** (30 Gtep en énergie finale)

**RAYONNEMENT SOLAIRE ET SOUS-PRODUITS AU SOL :**  
**100 000 Gtep... par an !**

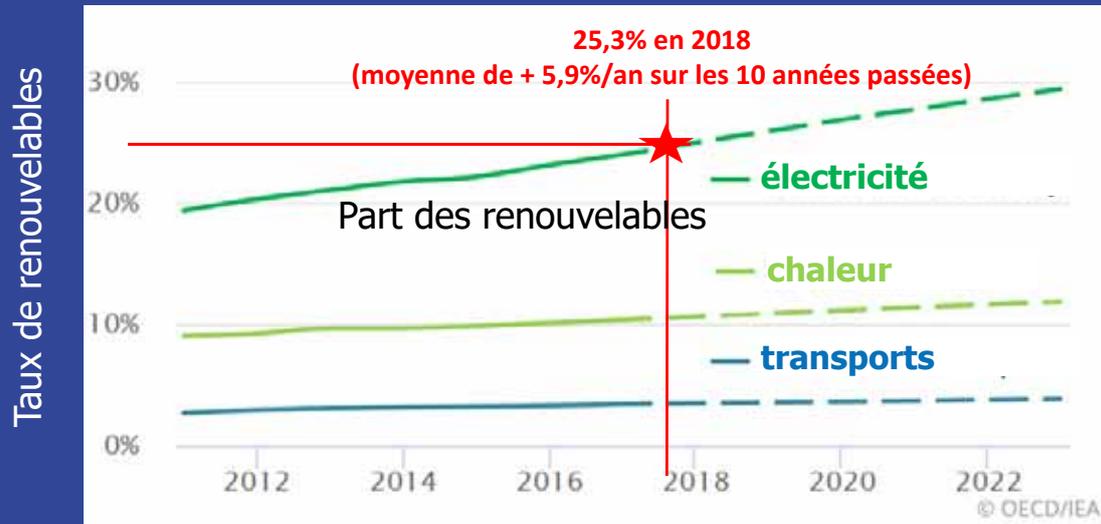
**plus de 6000 fois la conso d'énergie primaire (14 Gtep)**

(1) d'après « Uranium 2018 : Resources, Production and Demand » (NEA-IAEA).

**Réserves** ou « Identified resources, recoverable » ≈ 8 Mt à moins de 260 \$/kg (très faibles concentrations) dont la 50% dans la tranche 130 à 260 \$/kg.  
**Ressources** ≈ 24 Mt ("Identified resources": 10,6 Mt, "Prognosticated resources and speculative resources" : 7,5 Mt et "Reported undiscovered resources" : 5,9 Mt).  
Valeur énergétique (en chaleur primaire) d'une tonne d'uranium naturel ≈ 10 ktep => **Réserves** ≈ 75 Gtep et **Ressources** ≈ 240 Gtep

# Capacité des vecteurs énergétiques à convertir les ressources renouvelables

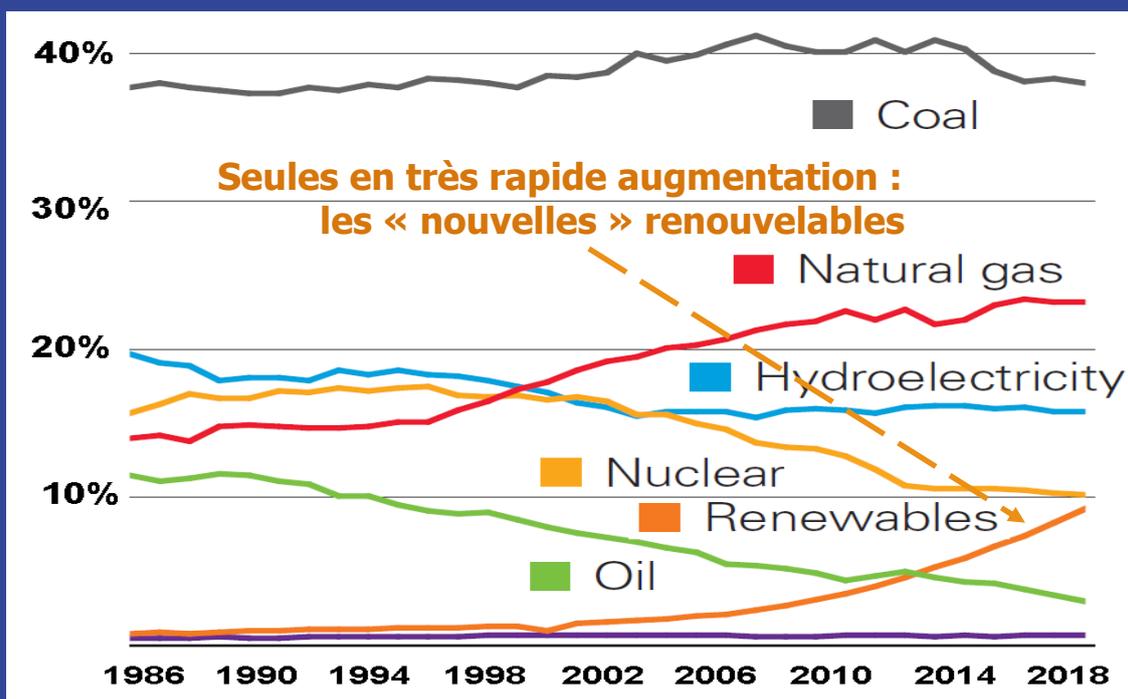
Observations et prévisions mondiales (2023) de l'AIE



Source : Renewables 2018 Market analysis and forecast from 2018 to 2023, IEA-OECD 2018

**L'électricité se démarque nettement des autres énergies finales**

# Evolution passée mondiale des sources de production d'électricité de 1985 à 2018

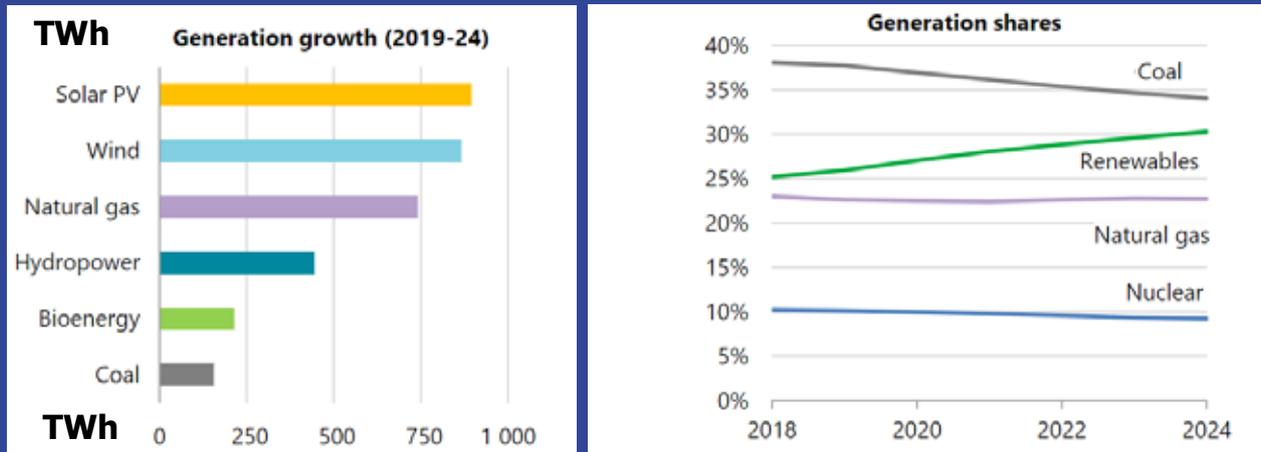


Source : BP Statistical Review 2019 (juin 2019)

Voir annexes pour les détails de la situation 2018 et de la dynamique passée

## Prévisions mondiales d'évolution (2018-2024) de la production d'électricité

D'après l'AIE (habituellement plutôt « conservatrice ») :



Source : H. Bahar, Renewables 2019, Market analysis and forecasts to 2024, IEA, Stanford University San Francisco, 9 Dec. 2019

**Les sources renouvelables (éolien et solaire) portent  
la plus grande part de la pénétration de l'électricité  
Et elles ont tout le potentiel pour le faire plus vite...  
à condition de lâcher les freins !**

## L'électricité pénètre (ou peut pénétrer) tous les secteurs

Production de combustibles de synthèse (E-fuels :  
hydrogène, méthane)

Les transports : véhicules à batteries et  
à combustibles de synthèse d'origine électrique

La chaleur (et le froid) surtout via les pompes à chaleur

**La majeure partie des secteurs pourraient  
être électrifiés avec une excellente efficacité...**

**et de façon à la fois centralisée (modèle du passé)  
et décentralisée (surtout grâce au solaire photovoltaïque)**

## Conclusion

Dans le monde entier, un **mouvement de fond** de déploiement  
des **sources électriques renouvelables et de l'électrification**  
(voir annexes)

Déjà des **scénarios très crédibles à très haute teneur en renouvelables**  
(voir annexes)

Avec **beaucoup de bénéfices** sur l'environnement, l'emploi,  
l'économie, la démocratie et, in fine, la **paix**

Mais soutenabilité possible seulement si **réduction drastique**  
**des consommations** de toute nature,  
via **la sobriété et l'efficacité**

**Nécessité d'un profond  
changement de modèle(s) de société...**

## Alors, faut-il sauver la planète ?!

**Ce n'est pas la planète qui a besoin d'être sauvée  
(elle en a vu d'autres), mais bien l'humanité !**



**Il y a du travail pour toutes les disciplines et  
vous pouvez jouer un rôle extrêmement important  
via la démarche scientifique.  
C'est dans l'ADN de votre école !**

**Normalien.en.s, voilà une belle occasion  
de donner plus de sens à vos vies !**

L'énergie et les ODD

Décryptage (suite) : énergies primaire, finale et utile

Détails sur les ressources renouvelables terrestres

Sources et dynamique de la production d'électricité en 2018 :

Monde, Chine, USA, Allemagne, France

Evolution des technologies éoliennes et disponibilité des matières premières

Effondrement des coûts de l'éolien et du photovoltaïque (Lazard Bank nov. 2019)

Scénarios d'électrification massive (Stanford Jacobson, IRENA)

Raisonnements sur cycle de vie

Critère soutenable de rentabilité énergétique ( $EROEI_{\text{sustainable}}$ )

Emissions de gaz à effet de serre des différentes filières

Traitement de la variabilité de la production PV et éolienne, stockage d'énergie, complémentarité saisonnière...

La transition énergétique en Allemagne : désintox (données 2019) !

Scénario négaWatt 2017 (sobriété, efficacité, renouvelables) pour 2050

## La place de l'énergie au sein des 17 ODD\*

(définis par l'ONU en 2016)

\* ODD = objectif de développement durable



# Décodage énergétique :

## énergies primaire, finale, utile...

**Energies primaires**  
Disponibles dans la nature  
(« naturelles »)

**Non renouvelables**

**fossiles**

(charbons, pétroles, gaz naturel)

**fissiles**

(uranium, thorium)

**Renouvelables**

rayonnement solaire et sous-produits :  
hydro, vent, houle (voire biomasse)

chaleur géothermique

interaction gravitationnelle terre-lune-soleil (marées)

Combinaison des sources

**Energie finale**  
Commercialisable,  
directement utilisable

**Combustibles liquides**

essence, gasoil, kérosène, éthanol, biodiesel...

**Combustibles gazeux**

gaz naturel livré au compteur, biogaz, hydrogène...

**Combustibles solides**

charbon conditionné, plaquettes et granulés de bois

**Chaleur**

(distribuée dans les réseaux de chaleur)

**Electricité**

Livrée au compteur

**Energie utile**  
Services énergétiques

Éclairage

Froid

Chaleur

(basse et haute températures)

Mobilité

(terrestre, navale, aérienne)

Force motrice

(ventilation, pompage, divers processus...)

Procédés

Industriels (physico-chimiques)

Traitement

de l'information

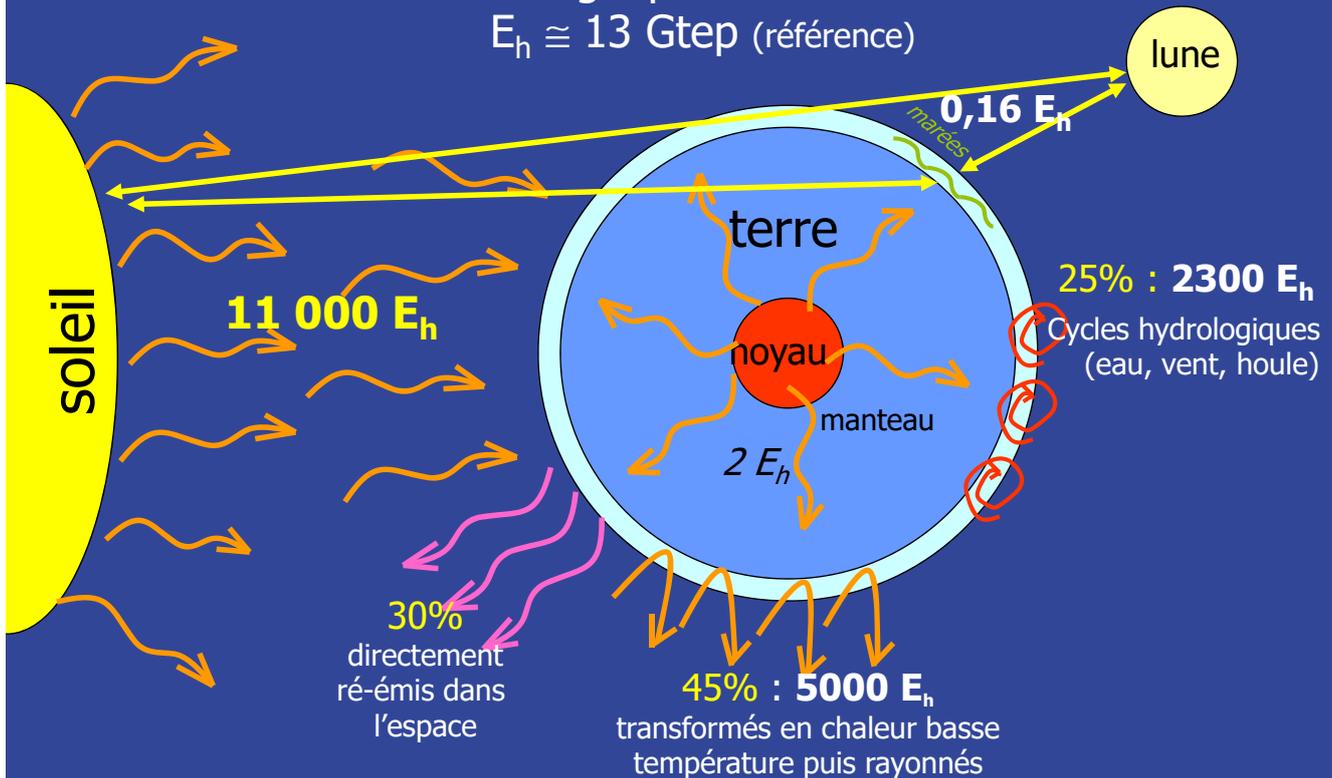
**Pertes**  
de transformation,  
de distribution...

**Pertes**  
de conversion

# Ressources renouvelables :

valeurs ramenées à la consommation annuelle d'énergie primaire de l'humanité :

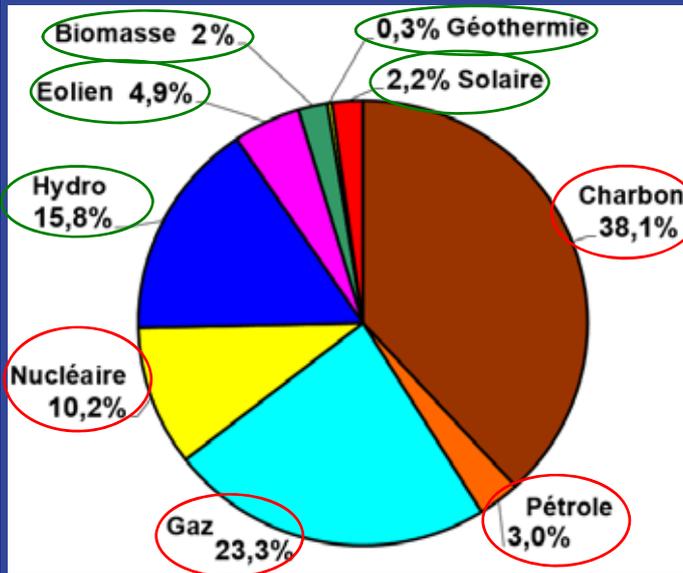
$$E_h \cong 13 \text{ Gtep (référence)}$$



# Production mondiale d'électricité en 2018

Sources primaires et tendances :

**26 500 TWh (+2,7%/an sur 2008-2018)**

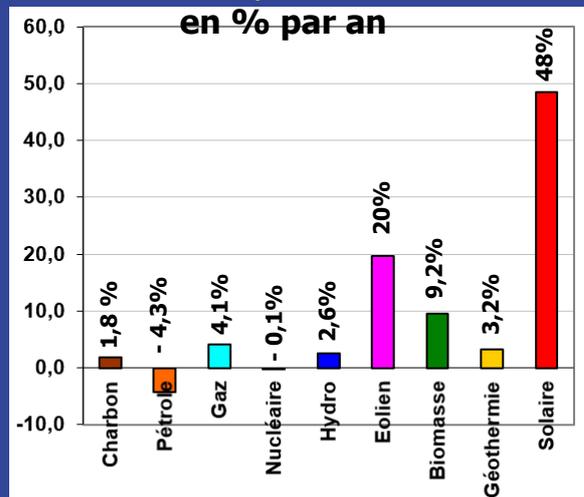


**74,7% non renouvel. : + 1,8% /an sur 10 ans**

**25,3 % renouvel. : + 5,9% /an**

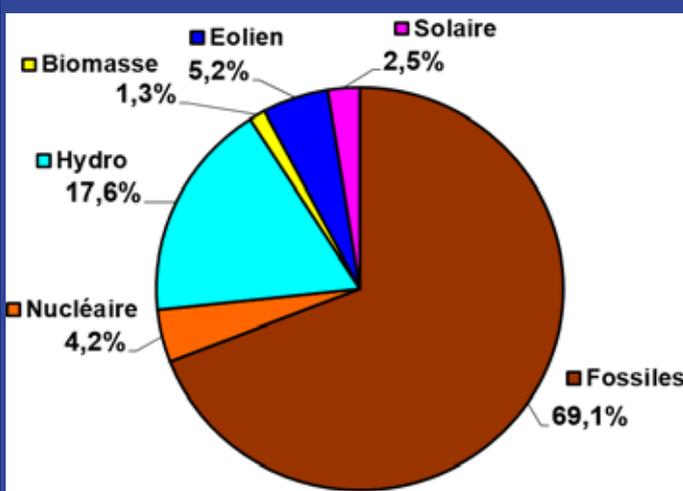
sur 10 ans

Evolution moyenne sur 10 ans



# Production électrique Chine en 2018

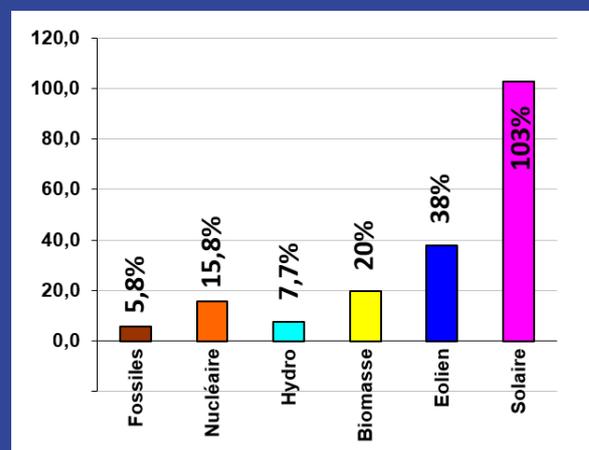
Production totale : 6993 TWh (7,4%/an moyenne 10 ans)



73,3% d'origine non renouvelable  
 + 6,2% par an sur 10 ans  
 69,7% fossile (+ 5,8% par an sur 10 ans)  
 3,9% fissile (+ 15,8% par an ----- )

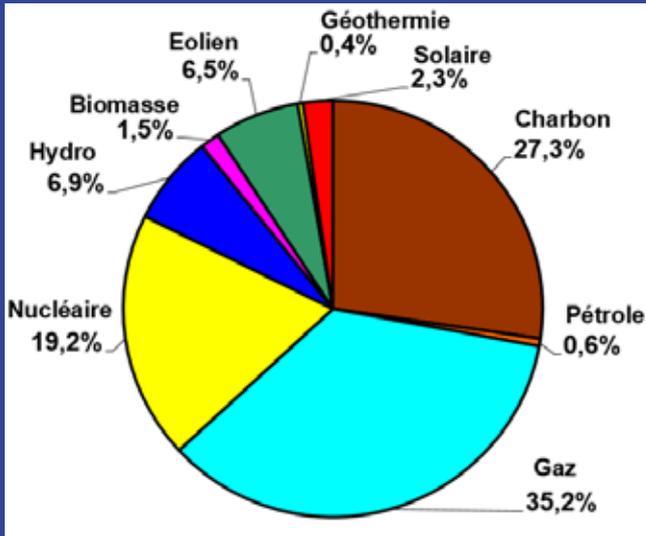
26,7 % d'origine renouvelable :  
 + 11,7% par an sur 10 ans

Taux de croissance 2008-2018 : %/an



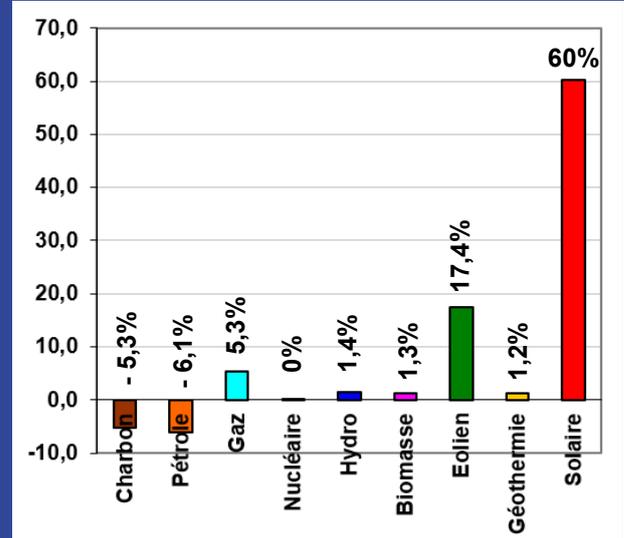
## Production électrique nette USA en 2018

Production nette totale : 4200 TWh (0,2 %/an moyenne 10 ans)



17,7 % d'origine renouvelable :  
+ 6,9% par an sur 10 ans

Taux de croissance 2008-2018 : %/an

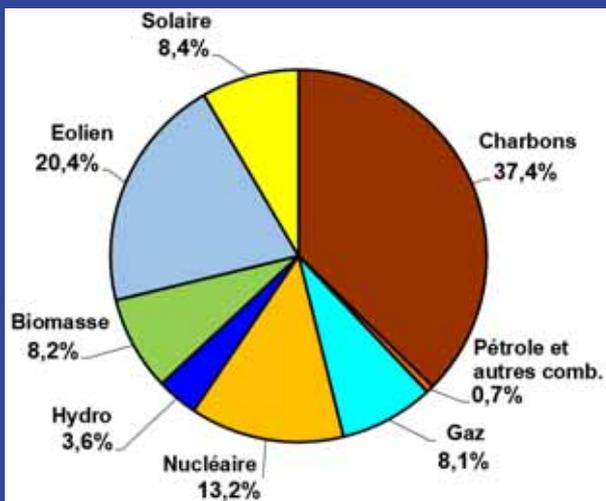


82,3% d'origine non renouvelable  
- 0,7% par an sur 10 ans  
63,1% fossile (- 0,9% par an sur 10 ans)  
19,2% fissile (0% par an ----- )

Source données : EIA (DoE)

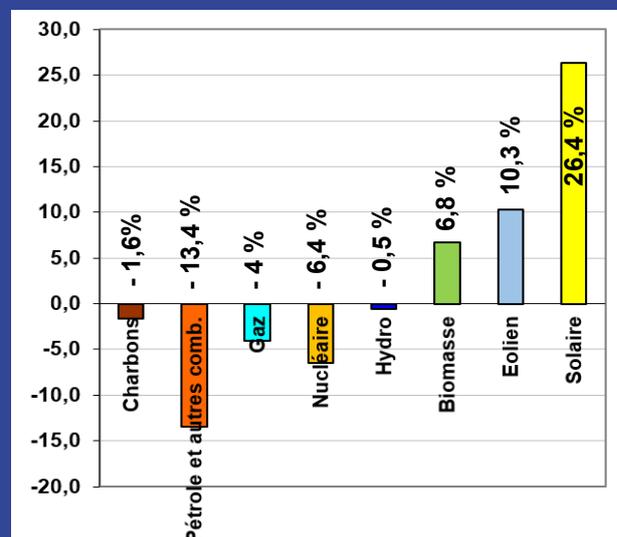
## Production électrique nette Allemagne en 2018

Production totale nette : 545 TWh (-0,1%/an moyenne 10 ans)



40,6 % d'origine renouvelable :  
+ 9,4% par an sur 10 ans

Taux de croissance 2008-2018 : %/an

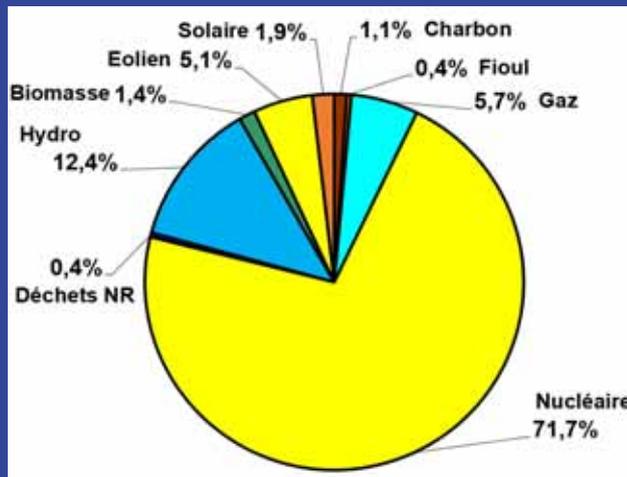


59,4% d'origine non renouvelable  
- 3,5% par an sur 10 ans  
44,2% fossile (- 2,4% par an sur 10 ans)  
13,2 % fissile (- 6,4% par an ----- )

Source données : Fraunhofer ISE juin 2019 : [https://www.energy-charts.de/energy\\_de.htm?source=all-sources&period=annual&year=all](https://www.energy-charts.de/energy_de.htm?source=all-sources&period=annual&year=all)

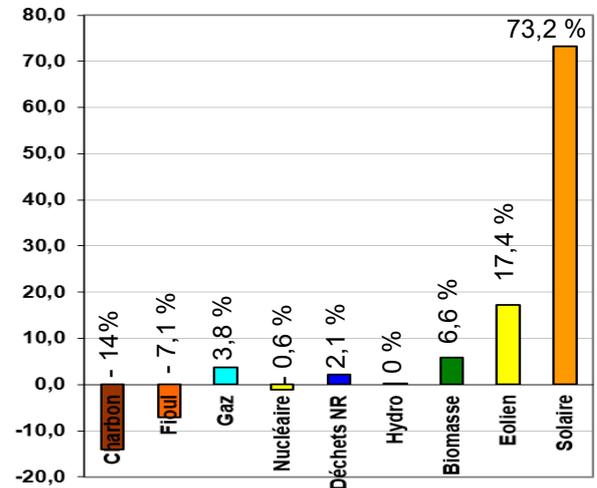
# Production électrique nette France en 2018

Production totale : 549 TWh (0%/an moyenne 10 ans)



20,8 % d'origine renouvelable :  
+ 3,9% par an sur 10 ans

Taux de croissance 2008-2018 : %/an

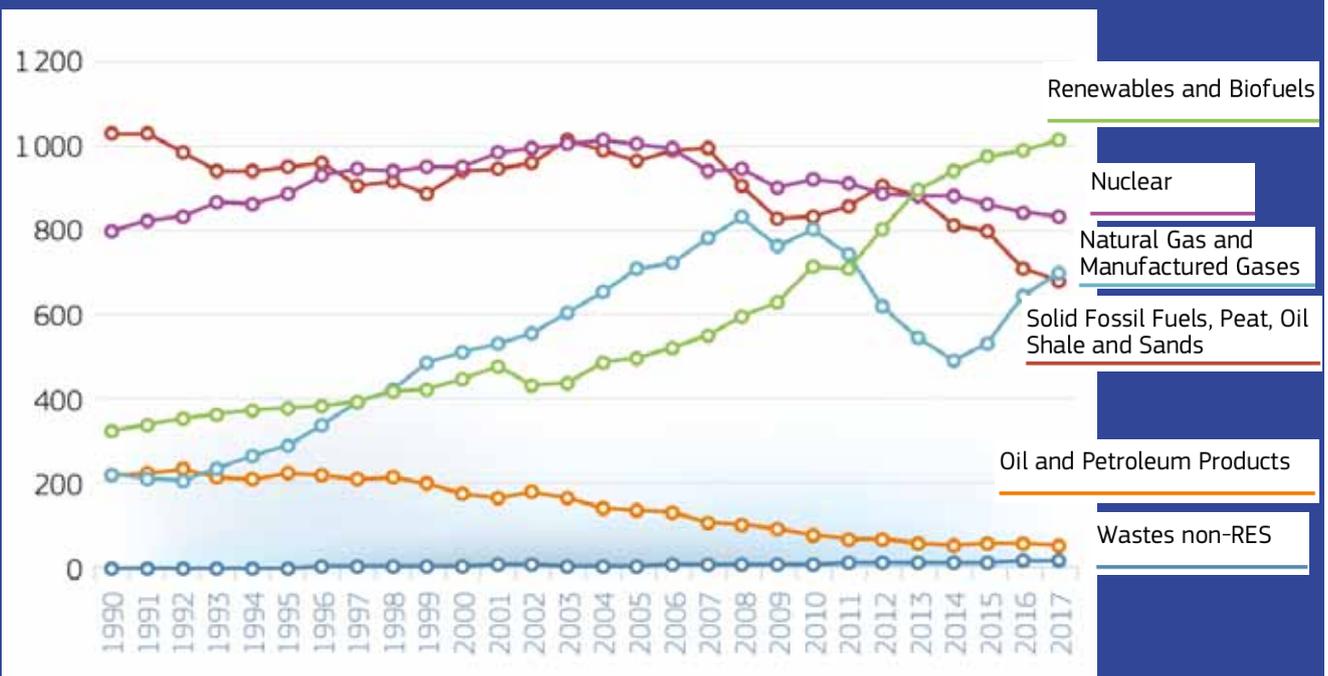


79,2% d'origine non renouvelable  
- 1,3% par an sur 10 ans

7,2% fossile (- 2,8% par an sur 10 ans)  
71,7% fissile (- 0,6% par an -----)

Source données : Datalab, Bilan énergétique de la France en 2018, avr. 2019

# Production électrique brute de l'UE 28 (avec UK)

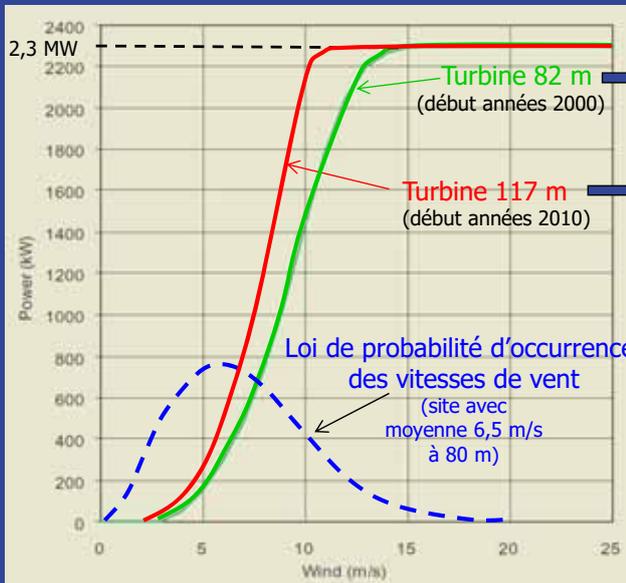


Source : European Commission <https://ec.europa.eu/energy/en/data-analysis/energy-statistical-pocketbook>

1 : renouvelables, 2 : Nucléaire, 3 : Gaz, 4 : Charbons, 5 : Pétroles, 6 : déchets non Ren

## La révolution silencieuse<sup>(1)</sup>

Accroissement du diamètre des turbines à même puissance nominale  
Comparaison de 2 machines de 2,3 MW<sub>e</sub>



productivité annuelle 5 GWh<sub>e</sub>  
2200 h<sub>epp</sub> (équivalent pleine puissance) par an

productivité annuelle 7,6 GWh<sub>e</sub>  
3300 h<sub>epp</sub> par an

Pour un surcoût d'investissement modeste :

- des machines beaucoup plus productives
- avec moins de variabilité
- des coûts de production en baisse : 5 à 8 c€/kWh<sub>e</sub>

(derniers tarifs d'achat France :  
8,2 c€/kWh<sub>e</sub> durant 10 ans,  
puis 2,8 à 8,2 durant 5 ans selon les sites)



Source : Nordex

<sup>(1)</sup> B. CHABOT, "2014: The Year When the Silent Onshore Wind Power Revolution Became Universal and Visible to All?" Jan. 2014,

<http://cf01.erneuerbareenergien.schluetersche.de/files/smfiledata/3/3/6/8/9/9/50will2014bevisiblewindrevolution.pdf>

# Eolien et matières premières

Même en cas de déploiement massif de la filière

(200 GW/an au lieu d'environ 50 actuellement),

des besoins relatifs de matières premières qui restent faibles,

eu égard à la demande mondiale

Matériaux	Cons. mondiale annuelle 2018 (mines et recyclage)	Besoins pour 200 GW/an et % de la cons. 2018	Réserves minières mondiales	Ressources minières mondiales
Béton	50 Gt	92 Mt – 0,2%	----	---
Acier et fer	1,6 Gt	24 Mt – 1,5%	50 Gt	230 Gt
Aluminium	75 Mt	680 kt - 0,9%	7,5 Gt	18 Gt
Cuivre	24 Mt	350 kt – 1,5%	790 Mt	2,1 Gt

Source : B. Multon, Développement mondial de l'éolien et criticité des matières premières, Encyclopédie de l'énergie, Echosciences, juin 2019.

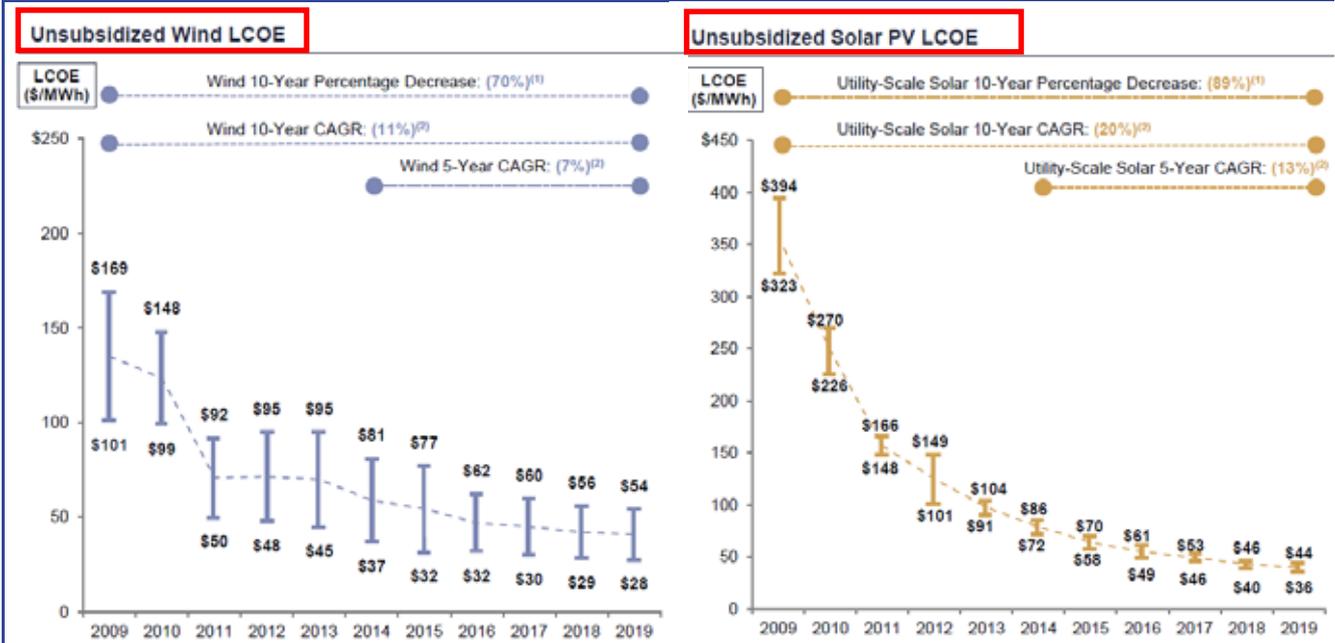
<https://www.echosciences-grenoble.fr/articles/xcx>

Et pas de matières critiques indispensables, ce sont les « lois du marché » qui conduisent à l'exploitation de terres rares, mais on peut parfaitement s'en passer !

# Eolien et solaire PV : effondrement des coûts de production

Rapport banque Lazard pour les USA (nov. 2019)

LCOE = Levelized Cost of Electricity



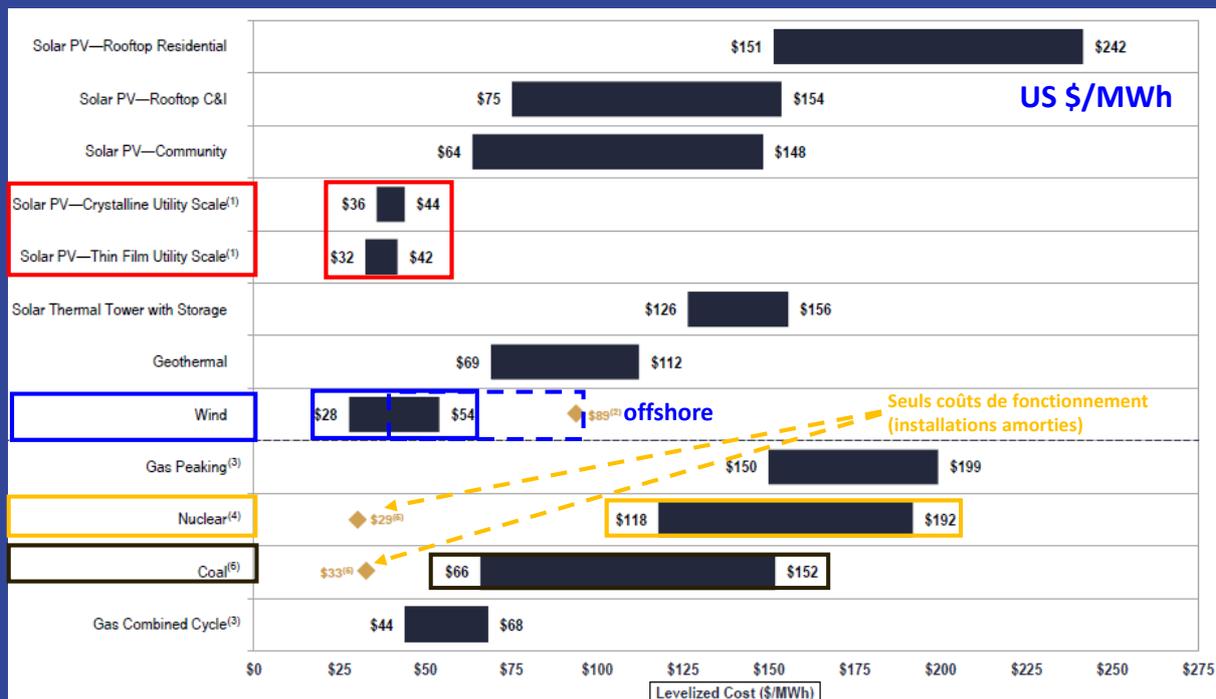
Source : Lazard's leveled cost of energy analysis - Version 13.0 nov. 2019

<https://www.lazard.com/media/451086/lazards-leveled-cost-of-energy-version-130-vf.pdf>

# Eolien et solaire PV : désormais compétitifs

Rapport banque Lazard pour les USA (nov. 2019)

LCOE = Levelized Cost of Electricity

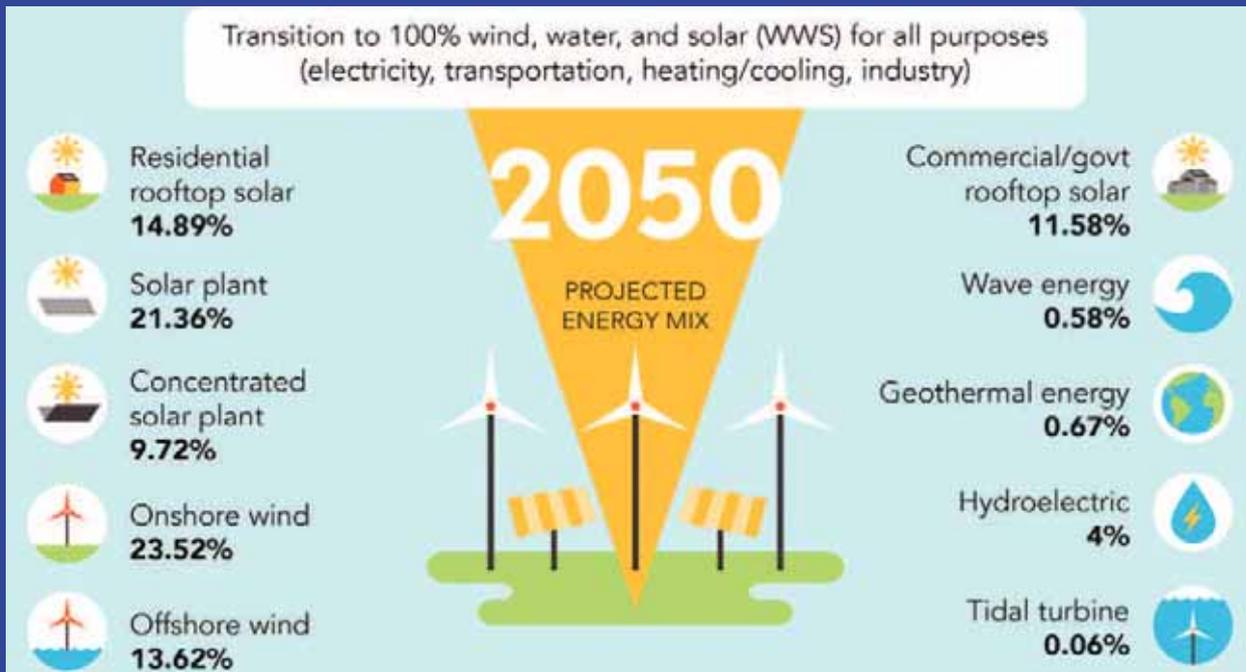


Source : Lazard's leveled cost of energy analysis - Version 13.0 nov. 2019

<https://www.lazard.com/media/451086/lazards-leveled-cost-of-energy-version-130-vf.pdf>

# Scénario d'électrification totale à l'échelle mondiale :

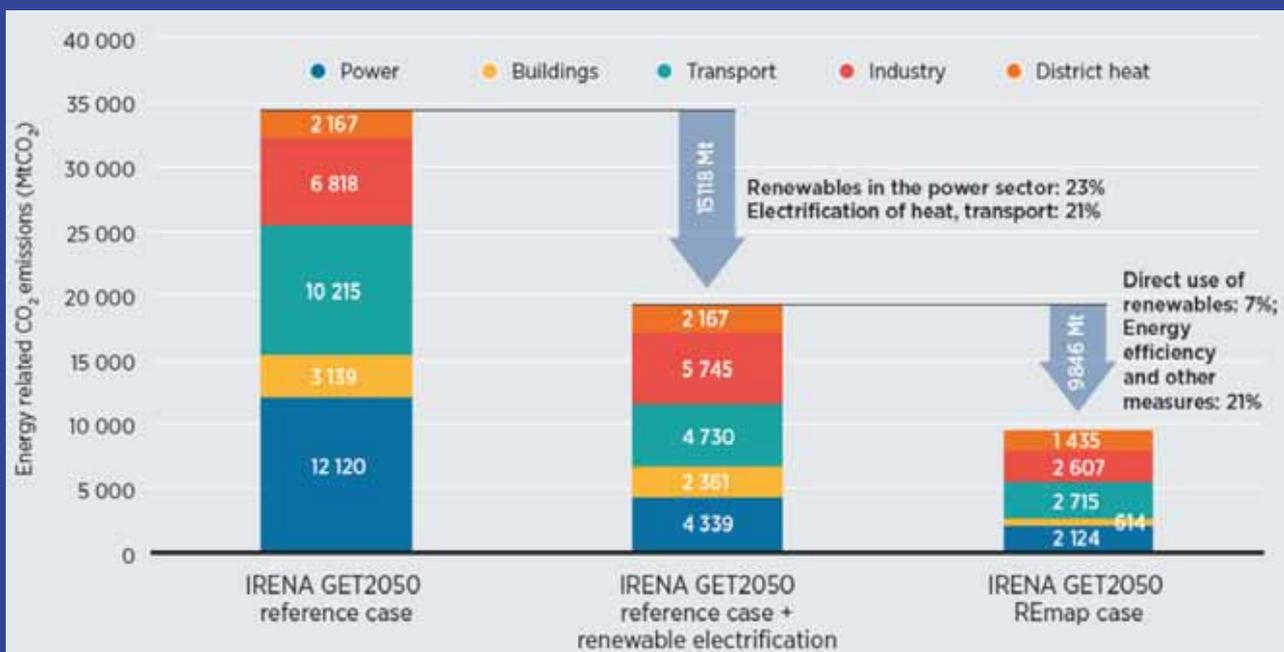
travaux de M. Jacobson, Univ. de Stanford



Source : Mark Z. Jacobson et al. JOULE Journal 2017  
 100% Clean and Renewable Wind, Water, and Sunlight All-Sector Energy Roadmaps for 139 Countries of the World  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.joule.2017.07.005>

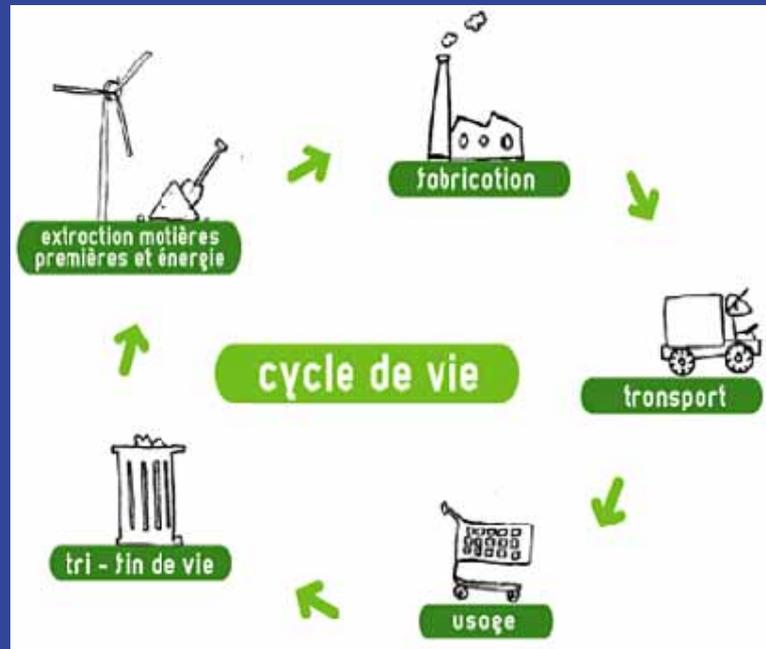
# Décarbonisation du secteur énergétique via les renouvelables à l'échelle mondiale :

State Grid Corporation of China and International Renewable Energy Agency



Source : State Grid Corporation of China and International Renewable Energy Agency (IRENA),  
 Electrification with Renewable. Driving the transformation of energy services, feb. 2019  
[https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Jan/IRENA\\_RE-Electrification\\_SGCC\\_2019\\_preview.pdf](https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Jan/IRENA_RE-Electrification_SGCC_2019_preview.pdf)

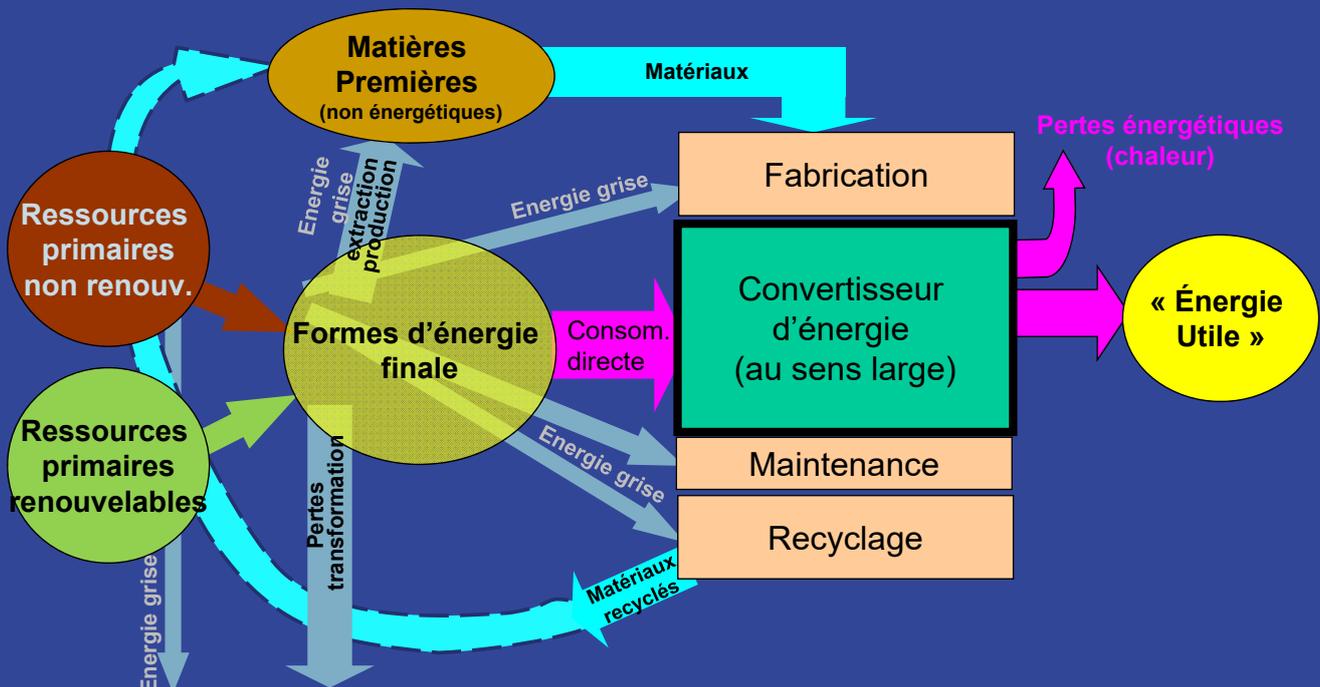
# Considérations sur l'ensemble du cycle de vie des systèmes énergétiques



Crédit : Association HESPUL  
<http://www.hespul.org/>

## Cycle de vie d'un convertisseur d'énergie

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



# Convertisseurs d'énergie primaire : critères de rentabilité énergétique

## L'EROEI (Energy Returned On Energy Invested)

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

« 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

C'est pourquoi 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 toute la vie :

$$\text{EROEI}_{\text{sust}} = \frac{\text{Energie récupérée sur la vie}}{\text{Energie non renouvelable prélevée sur la vie}}$$

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

## Application $\text{EROEI}_{\text{classic}}$ et $\text{EROEI}_{\text{sust}}$ à la production électronucléaire

### Réacteur nucléaire

**Productivité** : 1 GW x 7000 h = 7 TWh x 40 ans = **280 TWh<sub>e</sub>**

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

Extraction minière de l'uranium : 0,58 TWh<sub>p</sub>

Transformation en combustible fissile : 5,1 TWh<sub>p</sub>

Construction et démantèlement : 9,3 TWh<sub>p</sub>

Stockage déchets : 0,43 TWh<sub>p</sub>

**Total énergie grise : 15,4 TWh<sub>p</sub>**

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



**Prise en compte de la soutenabilité** : énergie primaire non renouvelable sur le cycle de vie : avec un rendement de production électrique de 33% :

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

$$\text{EROEI}_{\text{sust}} = \frac{280}{855} = 0,33$$

⇒ Pas soutenable (< 1)

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

# Application EROEI<sub>classic</sub> et EROEI<sub>sust</sub> à la production photovoltaïque en toiture

Pour produire **7 TWh<sub>e</sub> /an** avec un rayonnement de **1000 kWh<sub>p</sub>/m<sup>2</sup>/an** (1000 h @ 1 kW/m<sup>2</sup>)



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

Puissance nominale : **9,3 GW<sub>c</sub>** (7 TWh<sub>e</sub> / (1000 h x 0,75) )

soit **58 km<sup>2</sup>** (9,3 GW<sub>c</sub> / (1000 W/m<sup>2</sup>) / 0,16)

(en France : environ 6000 km<sup>2</sup> de toitures)



Fabrication des modules + montage en toiture + onduleur

fourchette de données (voir source) : 280 à 730 kWh<sub>p</sub>/(m<sup>2</sup> PV)

**Énergie grise : 16 à 42 TWh<sub>p</sub>**

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

sur 40 ans (1 renouvellement au bout de 20 ans) **E<sub>pNR</sub> ≈ 2 x (16 à 42) = 32 à 84 TWh<sub>p</sub>**

Production d'énergie sur 40 ans :

**E<sub>u</sub> ≈ 2 x 20 x 7 = 280 TWh<sub>e</sub>**

$$\text{EROEI}_{\text{classic}} = \text{EROEI}_{\text{sust}} = \frac{280}{32 \text{ à } 84} = 3,3 \text{ à } 8,7$$

⇒ **Soutenable (> 1)**

+ énergie grise en baisse

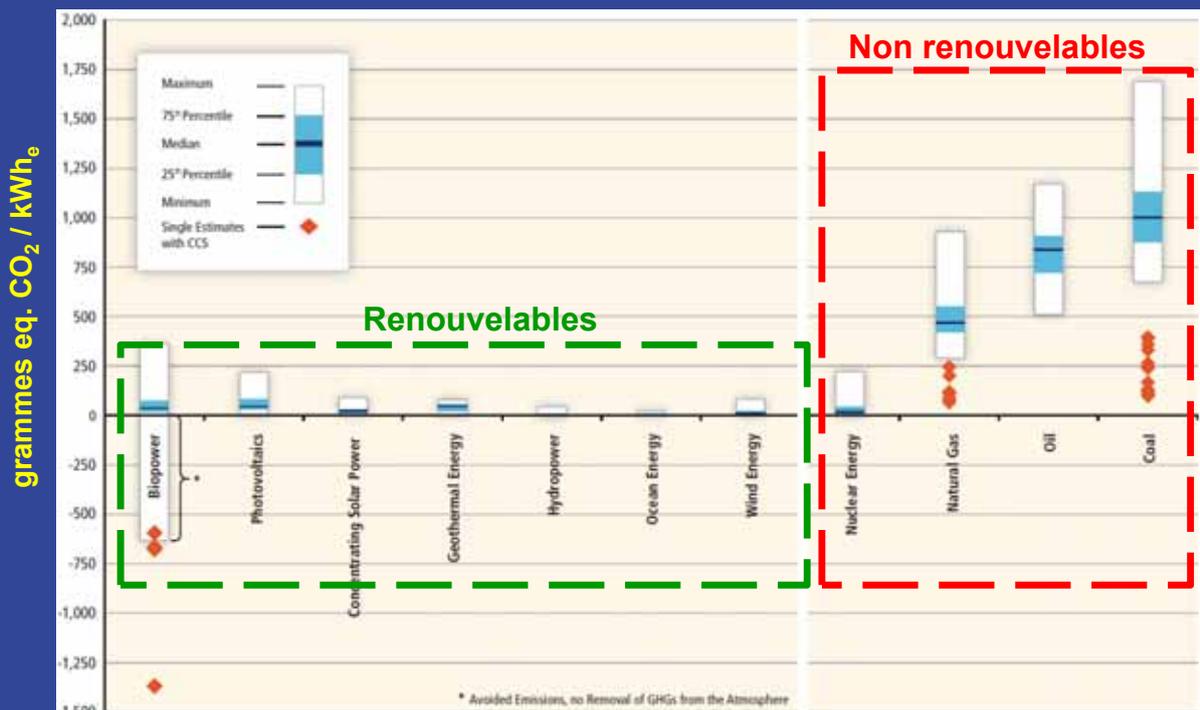
+ matériaux recyclables

et beaucoup moins de déchets toxiques

Source : Koppelaar Imperial College

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

# Emissions de gaz à effet de serre sur le cycle de vie



Source : IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, 2011  
Ch. 9 : Renewable Energy in the Context of Sustainable Development

## Premiers constats :

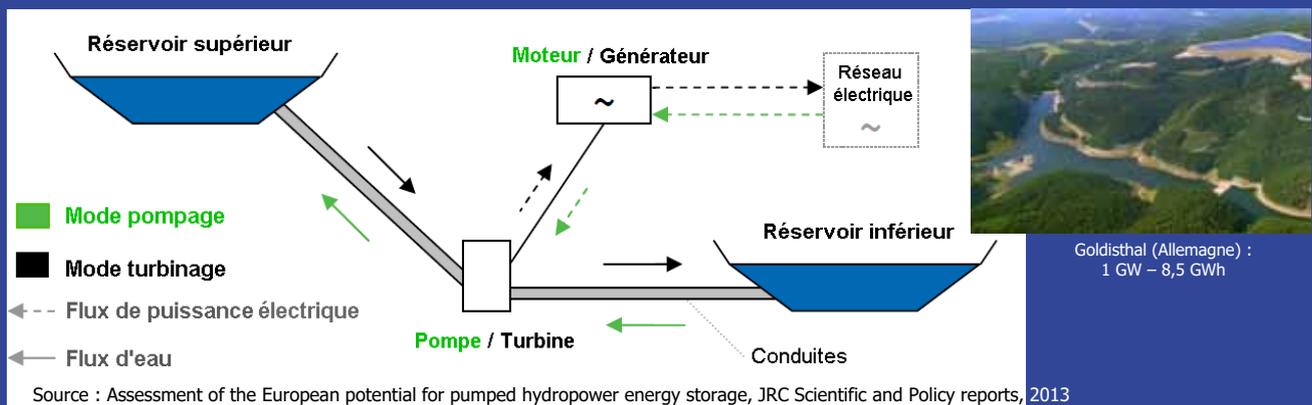
Les ressources les plus massivement disponibles  
et les moins impactantes sont  
le rayonnement solaire et le vent

L'électricité est la forme d'énergie la plus facile  
à convertir à partir des renouvelables variables  
écologiquement et économiquement.

**Mais comment faire pour régler  
le problème de la variabilité ?**

## L'énergie électrique se stocke

**Pompage - turbinage (STEP : stations de transfert d'énergie par pompage) :**  
**solution la plus répandue pour le stockage de masse**



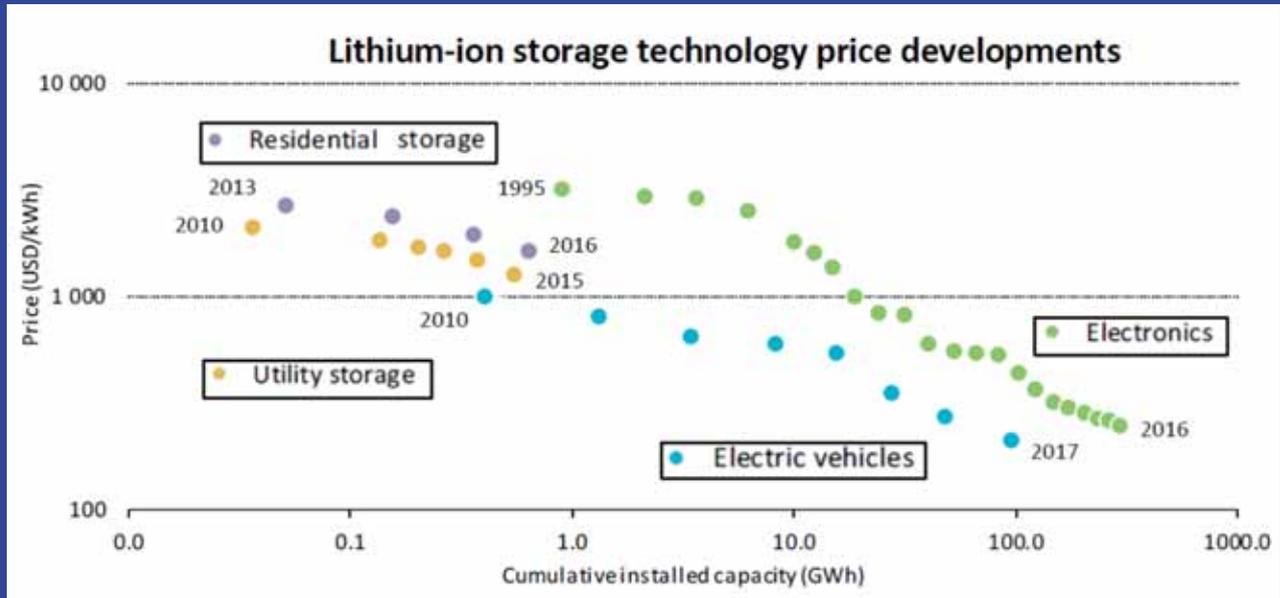
Goldisthal (Allemagne) :  
1 GW – 8,5 GWh

Puissance et capacité énergétique très élevées  
durant quelques heures à quelques jours  
Rendement élevé : jusqu'à 85 % (sur cycle complet de stockage-déstockage)

Possibilités de conversion de barrages existants en STEP.

**Et bien d'autres solutions, notamment électrochimiques**

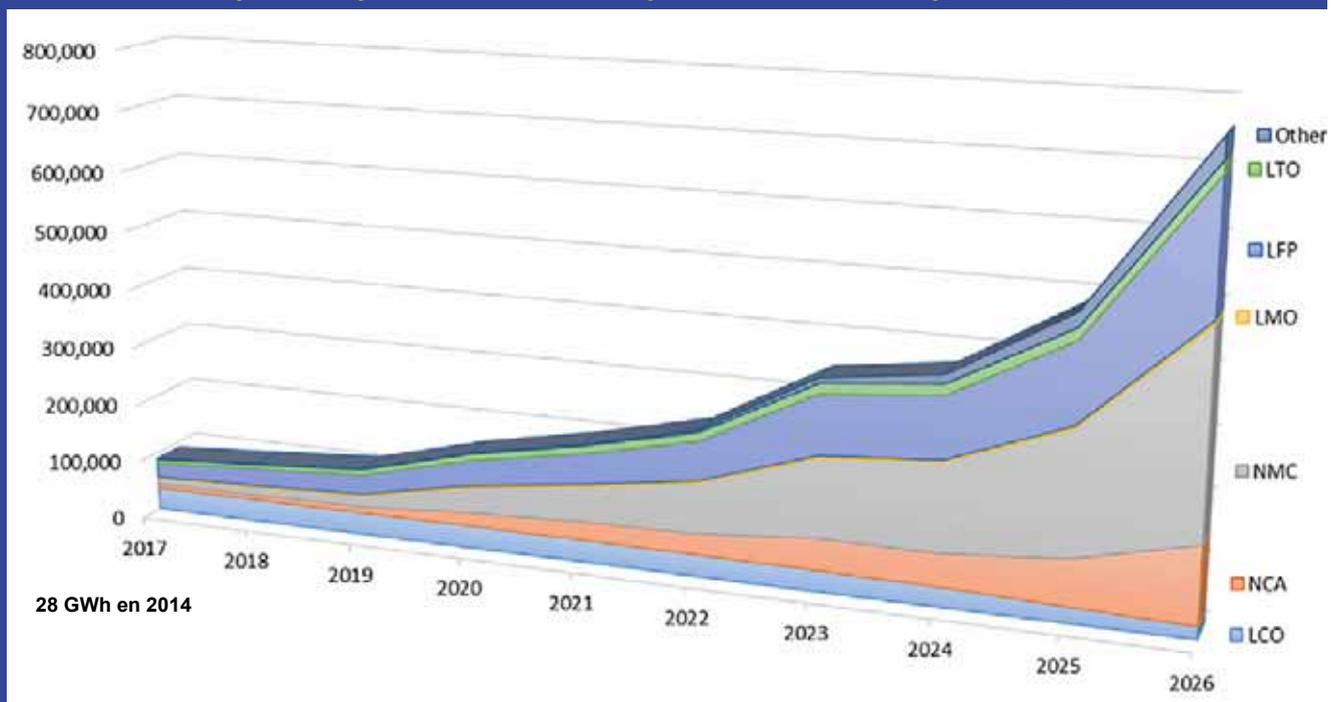
## Le coût des batteries électrochimiques décroît rapidement



Source : Global EV Outlook 2018 <https://doi.org/10.1787/9789264302365-en> ISBN : 9789264302365 © OECD/IEA 2018

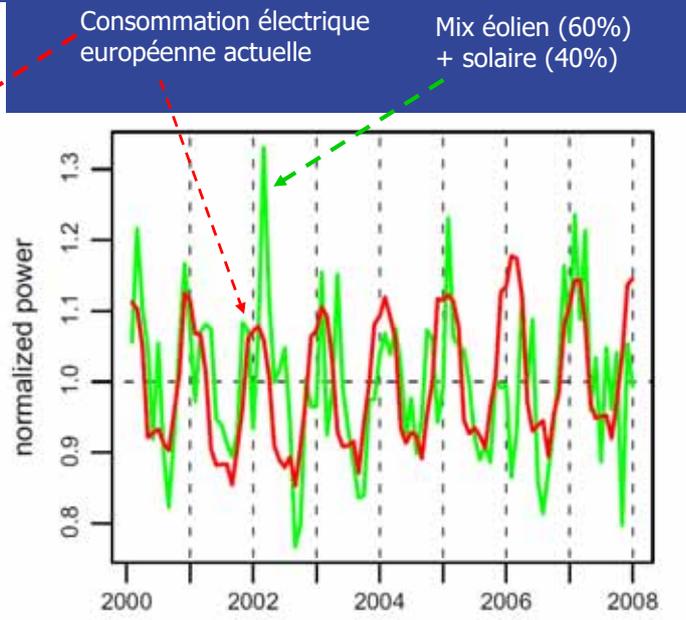
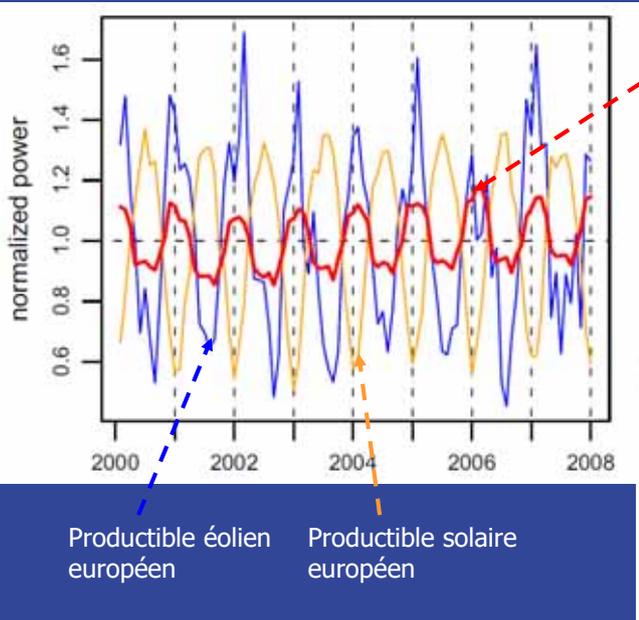
# Evolution et prévision de la production mondiale de batteries au lithium selon les chimies

## Global Battery Industry Growth Forecasts by Electrode Chemistry, in MWh, 2017–2026



Source : Sam Jaffe CairnERA "Vulnerable Links in the Lithium-Ion Battery Supply Chain", revue JOULE oct 2017

# Eolien solaire : complémentarité à l'échelle de l'Europe

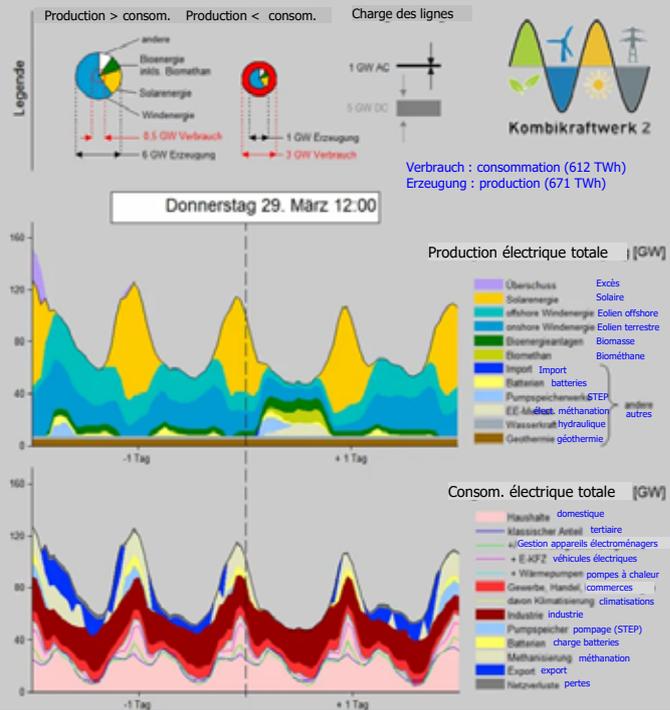
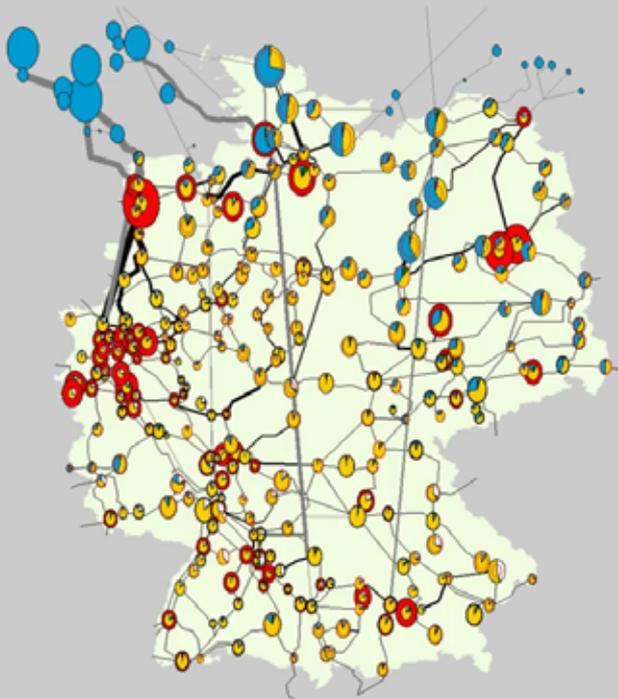


Source : D. HEIDE et al. « Seasonal optimal mix of wind and solar power in a future highly renewable Europe », Renew. Energy, Elsevier 2010.

## Exemple allemand, le projet Kombikraftwerk

### Simulation à l'échelle de toute l'Allemagne, sur une année complète

Production, consommation, transport à partir d'une énergie électrique 100% renouvelable

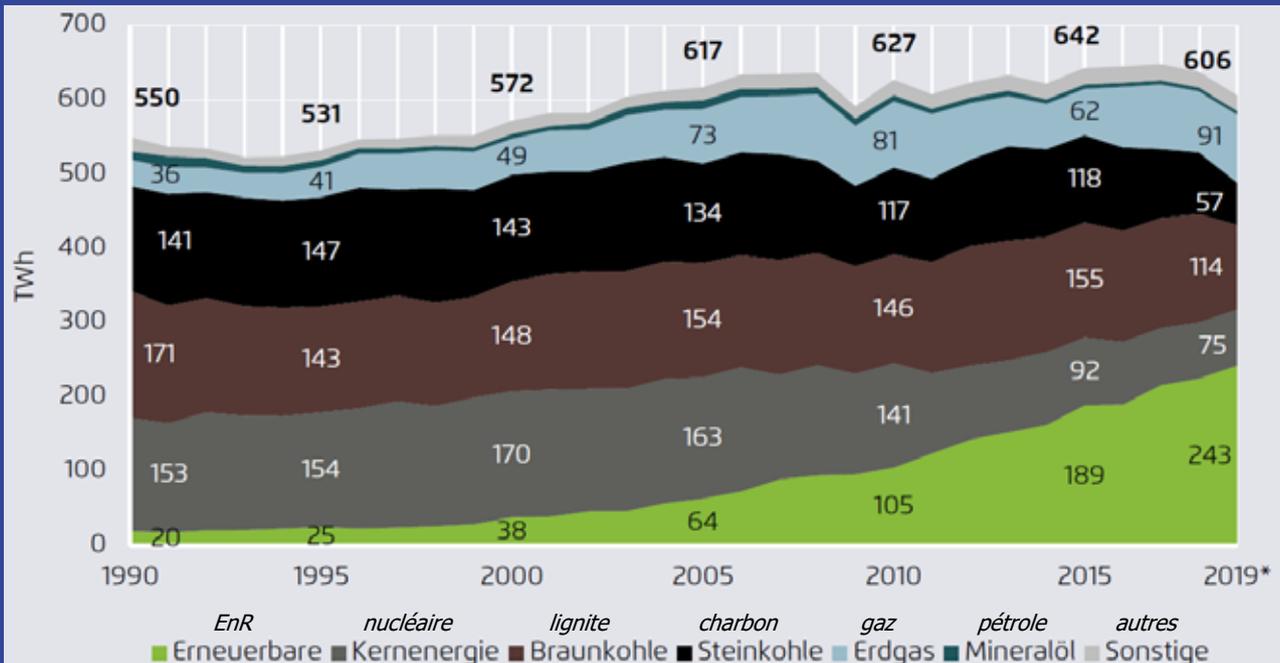


Source : <http://www.kombikraftwerk.de/100-prozent-szenario.html>

# Transition énergétique en Allemagne

## Production électrique 1990 – 2019

Forte surproduction, mais **baisse très sensible de l'électricité carbonée**



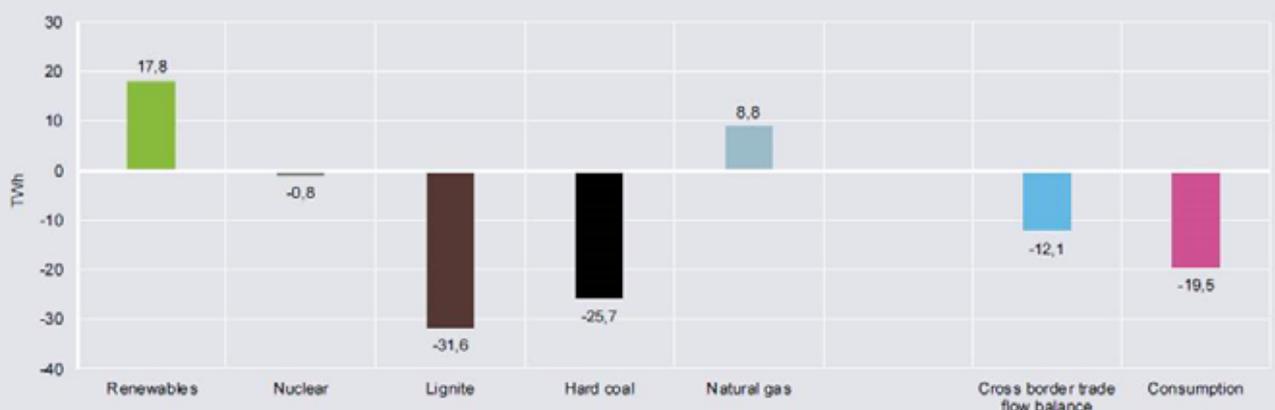
Source : Agora Energiewende, «Die Energiewende im Stromsektor: Stand der Dinge 2019 », jan. 2020

[https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2019/Jahresauswertung\\_2019/171\\_A-EW\\_Jahresauswertung\\_2019\\_WEB.pdf](https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2019/Jahresauswertung_2019/171_A-EW_Jahresauswertung_2019_WEB.pdf)

# Transition énergétique en Allemagne

La production d'électricité au lignite et au charbon diminue vraiment et, l'arrêt pour 2038 sera sans doute tenu...

Changes in the electricity sector 2019 vs. 2018

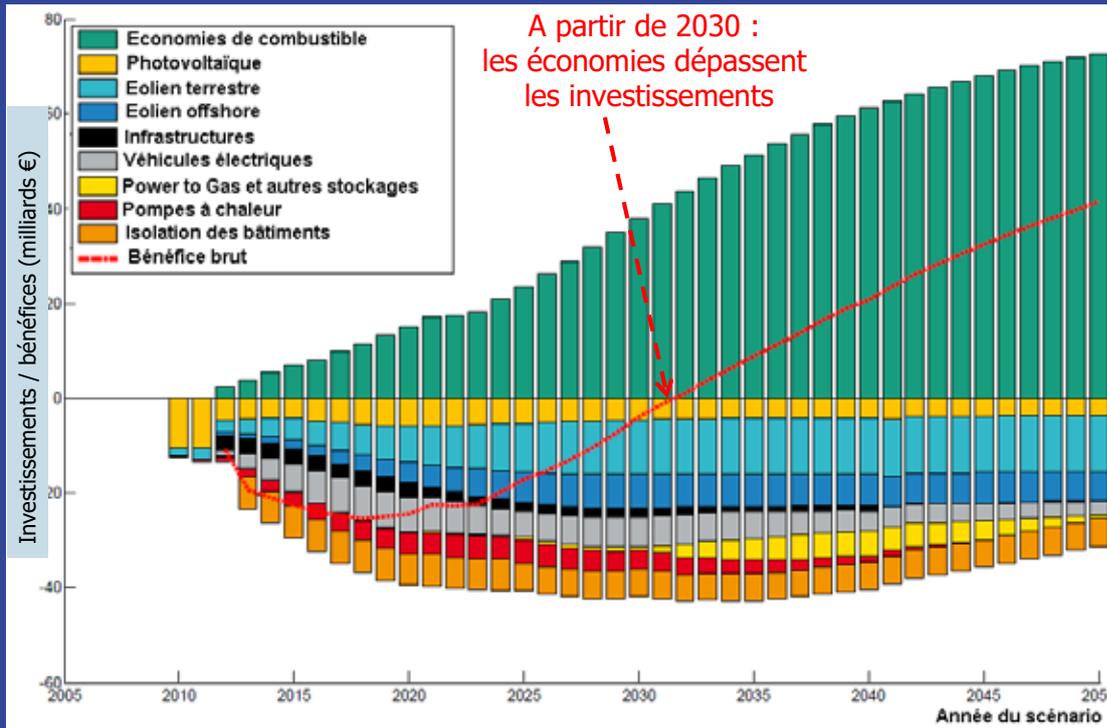


Source : Agora Energiewende, The Energy Transition in the Power Sector: State of Affairs in 2019", jan. 2020

[https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2019/Jahresauswertung\\_2019/2020-01-09-Energy-Transition-in-Power-Sector-2019\\_Summary\\_Slide-Deck.pdf](https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2019/Jahresauswertung_2019/2020-01-09-Energy-Transition-in-Power-Sector-2019_Summary_Slide-Deck.pdf)

# Transition énergétique en Allemagne

## Scénario économique



Source : Fraunhofer IWES, « Geschäftsmodell Energiewende. Eine Antwort auf das „Die-Kosten-der-Energiewende“ Argument », jan. 2014  
[https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/forschungsthemen/energie/Studie\\_Energiewende\\_Fraunhofer-IWES\\_20140-01-21.pdf](https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/forschungsthemen/energie/Studie_Energiewende_Fraunhofer-IWES_20140-01-21.pdf)

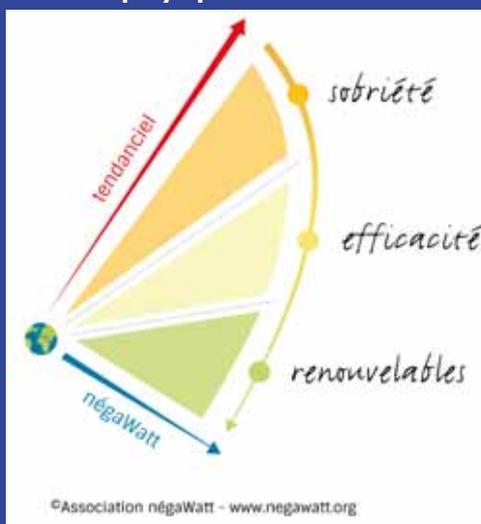
# Scénario négaWatt 2017-2050

## pour la France

Il intègre tous les besoins énergétiques et il est couplé à l'agriculture, la forêt, la nourriture...

Il évalue, entre autres, les bénéfices la qualité de l'air, sur la santé, l'emploi, etc...

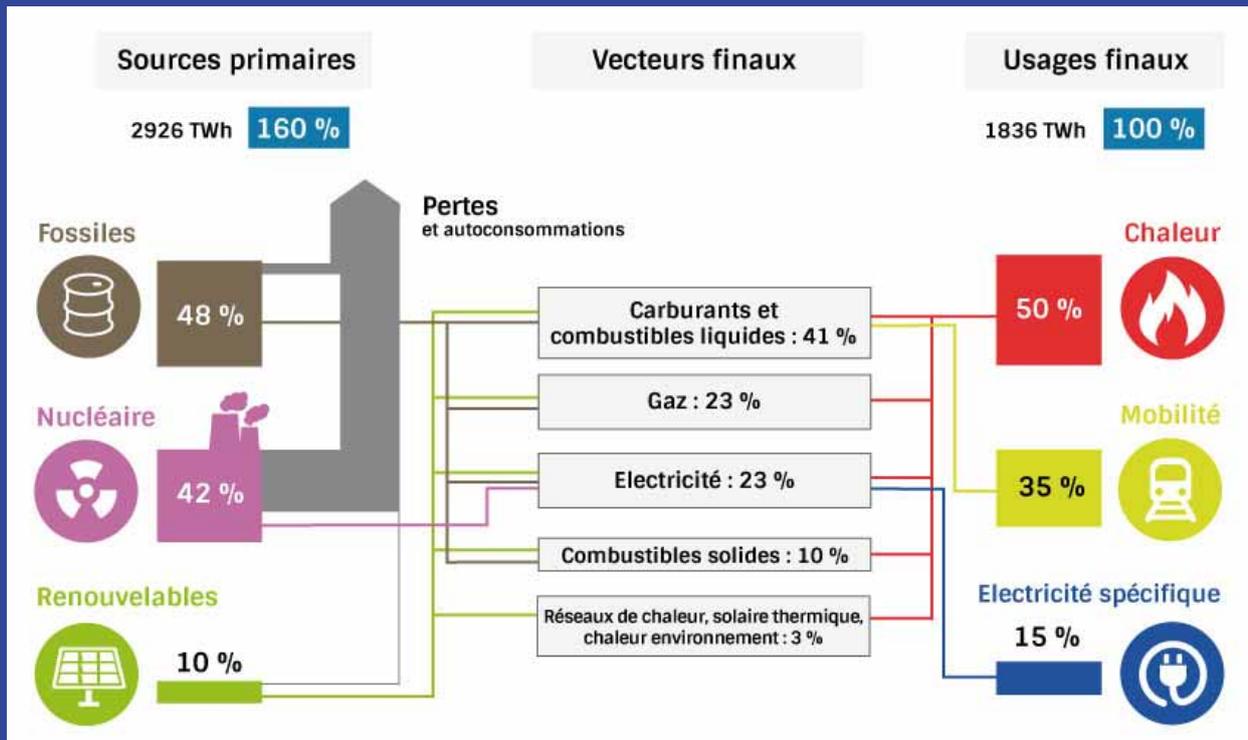
Le triptyque nW :



Slogan :

Léguer des bienfaits et des rentes aux générations futures plutôt que des fardeaux et des dettes

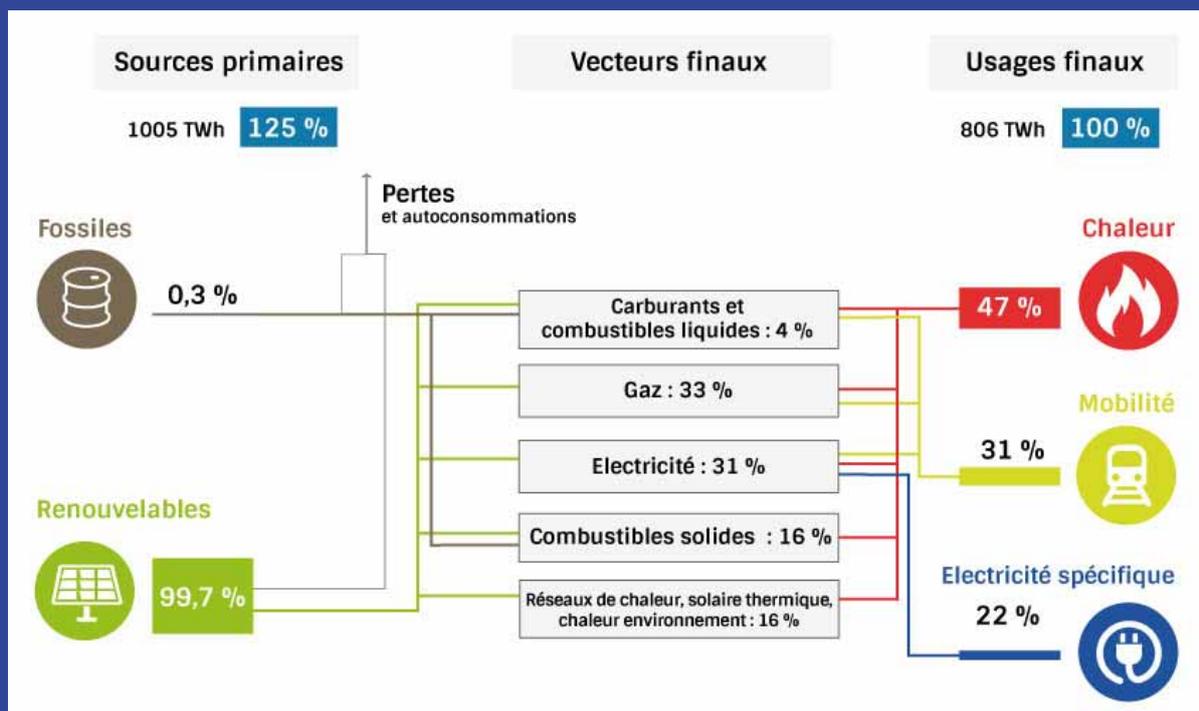
## Situation en 2015 :



<https://negawatt.org/scenario/>

## Arrivée en 2050 avec 72 Mhabitants :

30 kWh<sub>ef</sub>/j/hab



<https://negawatt.org/scenario/>