



# LES ALTERNATIVES AUX ÉNERGIES FOSSILES

---

Entretiens énergie-climat de Combloux

16 mars 2018

Maxence CORDIEZ

# PLAN

1. Définitions

2. Panorama des énergies bas-carbone

# 1. DÉFINITIONS



# ÉNERGIE PRIMAIRE VS ÉNERGIE FINALE

## Energie primaire

Source d'énergie disponible dans la nature avant toute transformation.

Exemples : charbon brut, uranium, pétrole brut, bois...

## Energie finale

Source d'énergie utilisable par les machines.

Exemples : électricité, essence, diesel, kérosène, briquettes de charbon ou pastilles de bois (pour chauffage)...

Consommation des producteurs et des transformateurs d'énergie

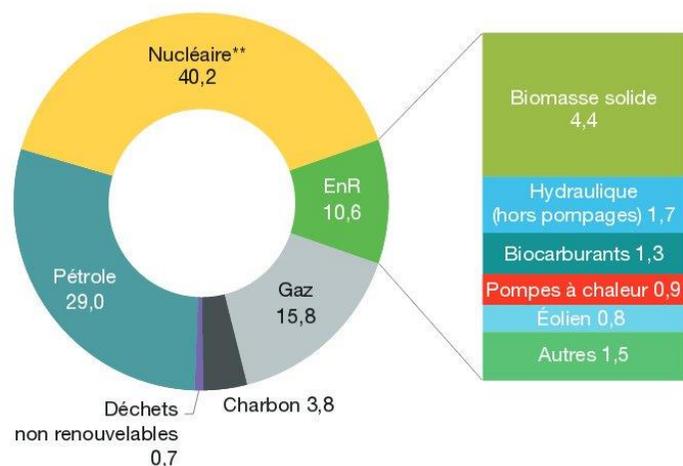


# ÉNERGIE PRIMAIRE VS ÉNERGIE FINALE

## RÉPARTITION DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE PRIMAIRE EN FRANCE MÉTROPOLITAINE

TOTAL : 250 MTEP EN 2017

En % (données corrigées des variations climatiques)



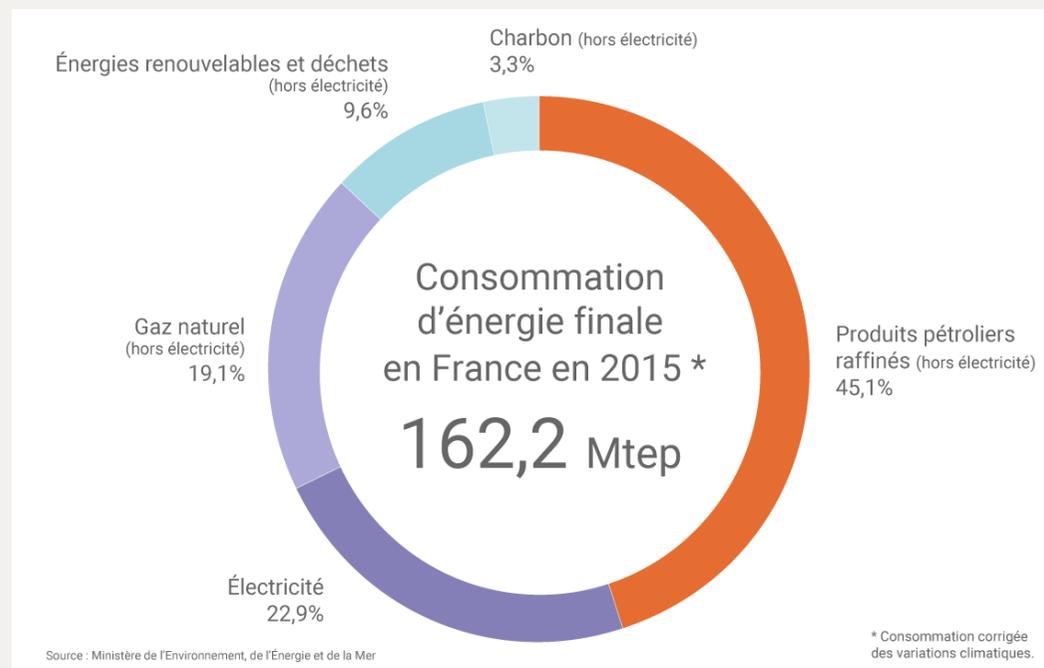
\* EnR : énergies renouvelables.

\*\* Correspond pour l'essentiel à la production nucléaire, déduction faite du solde exportateur d'électricité. On inclut également la production hydraulique issue des pompages réalisés par l'intermédiaire de stations de transfert d'énergie, mais cette dernière demeure marginale, comparée à la production nucléaire.

\*\*\* Hydraulique hors pompage.

Champ : métropole.

Source : calculs SDES, d'après les données disponibles par énergie

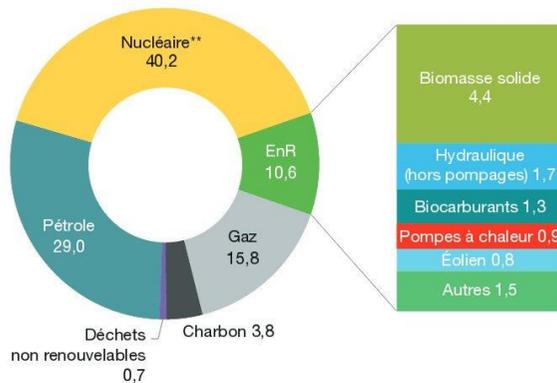


# TOUTE ÉNERGIE N'EST PAS ÉLECTRIQUE

## RÉPARTITION DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE PRIMAIRE EN FRANCE MÉTROPOLITAINE

TOTAL : 250 MTEP EN 2017

En % (données corrigées des variations climatiques)



\* EnR : énergies renouvelables.

\*\* Correspond pour l'essentiel à la production nucléaire, déduction faite du solde exportateur d'électricité. On inclut également la production hydraulique issue des pompages réalisés par l'intermédiaire de stations de transfert d'énergie, mais cette dernière demeure marginale, comparée à la production nucléaire.

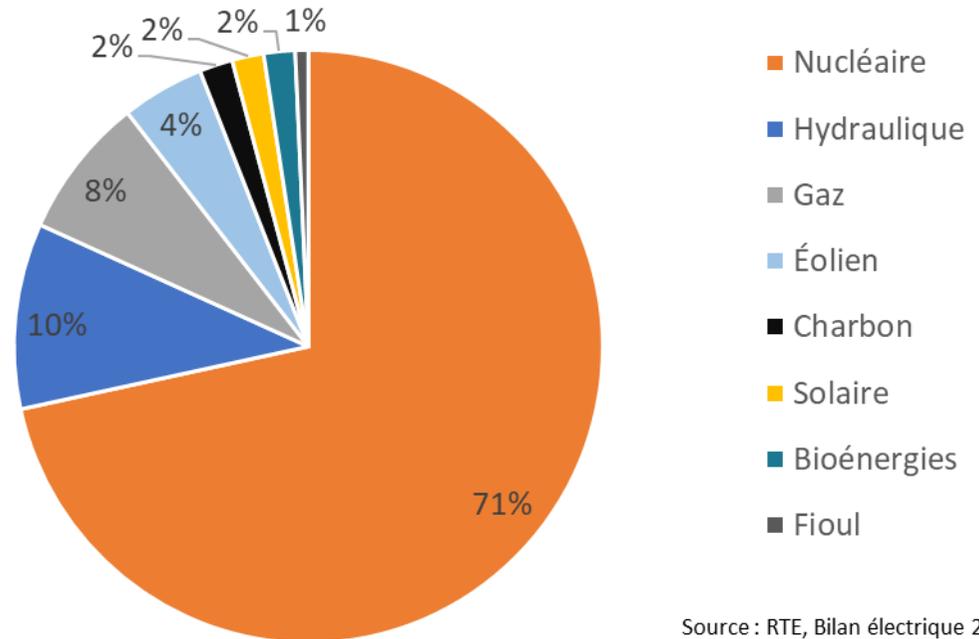
\*\*\* Hydraulique hors pompage.

Champ : métropole.

Source : calculs SDES, d'après les données disponibles par énergie



## Bouquet électrique français 2017



Source : RTE, Bilan électrique 2017



# PUISSANCE ET ÉNERGIE

**Puissance : c'est un débit d'énergie (variable instantanée).**

Unité : Watts (W)

**Énergie : c'est la somme de toutes les puissances sur une période.**

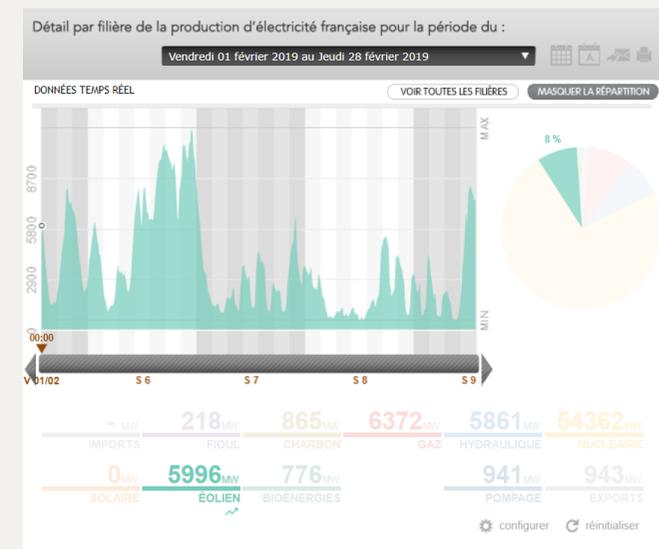
Unité : Watts.heure (Wh), Joules (J), tonne équivalent pétrole (tep)...

**Facteur de charge** = 
$$\frac{\text{Energie effectivement délivrée sur la période}}{\text{Energie qui aurait été produite à la puissance maximale sur la période}}$$

## Exemple

Lundi 11 février 2019 à 10h15, la puissance délivrée par les éoliennes en France était de 3376 MW, mais l'énergie générée en février était de 2461 GWh.

Facteur de charge sur le mois : 24%



# SOURCE FOSSILE D'ÉNERGIE

Définition : source d'énergie issue de la décomposition très lente d'organismes vivants (végétaux essentiellement) il y a plusieurs millions d'années.

Exemples : pétrole, tourbe, lignite (charbon brun), houille (charbon noir), gaz naturel



# SOURCE RENOUVELABLE D'ÉNERGIE

Définition : source d'énergie renouvelée naturellement.

Exemples : biomasse, hydroélectricité, soleil, vent, géothermie...



## Renouvelable ne signifie pas bas-carbone

- Exemple : biomasse bois



## Renouvelable ne signifie pas « absence d'impact sur l'environnement »

- Exemple : barrage hydroélectrique des Trois Gorges
- Ressources non énergétiques mobilisées



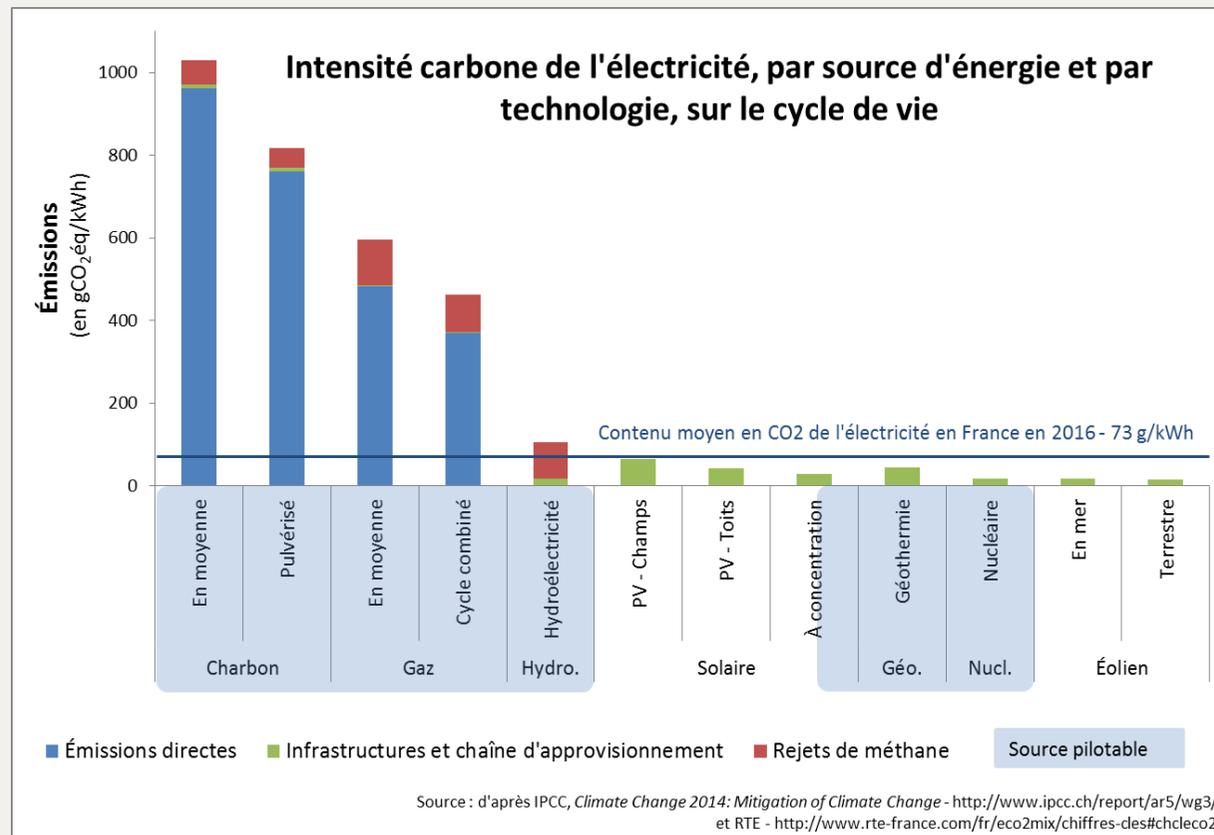
## La source d'énergie est renouvelable, pas les matériaux pour la collecter

- Ex. : 2-6 fois plus d'acier et 4-13 fois plus de cuivre par MW éolien *offshore* que par MW fossile<sup>1</sup>

<sup>1</sup> O. Vidal, H. le Boulzec, C. François, Modelling the material and energy costs of the transition to low-carbon energy, EPJ Web of Conferences 189, 00018 (2018)

# SOURCE D'ÉNERGIE BAS-CARBONE

Définition : source d'énergie qui émet peu de gaz à effet de serre sur son cycle de vie (extraction des matières, fabrication des équipements et construction des infrastructures, approvisionnement en combustible, combustion, démantèlement...).



# **1. PANORAMA DES ÉNERGIES BAS-CARBONE**

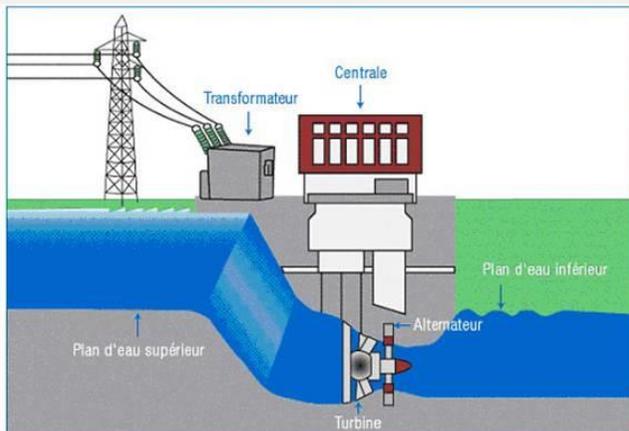


# HYDROÉLECTRICITÉ

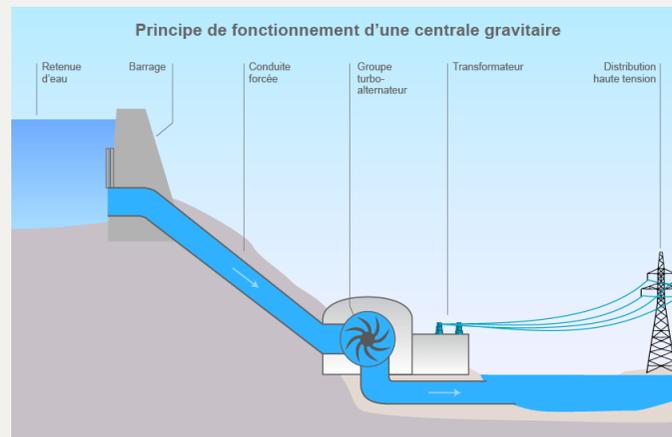
Électrique

Avantages	Inconvénients
Pilotable (et très réactif)	Contraintes géographiques
Durée de vie des infrastructures	Environnement
Potentiellement capacité de stockage (STEP)	Acceptabilité
	Très capitalistique
	Sensible aux précipitations
	Risque de rupture

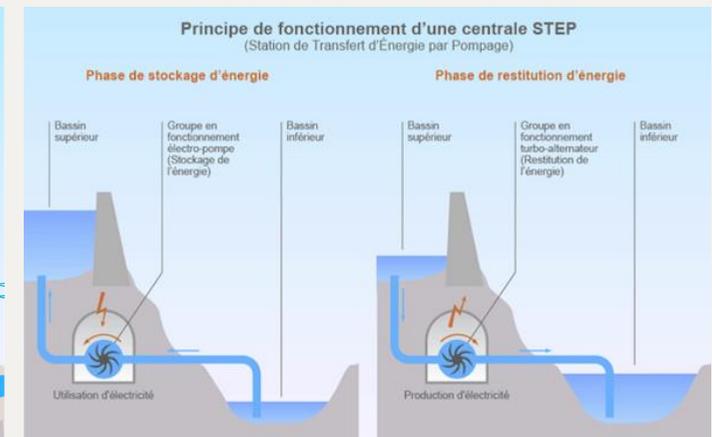
Fil de l'eau



Lac



STEP

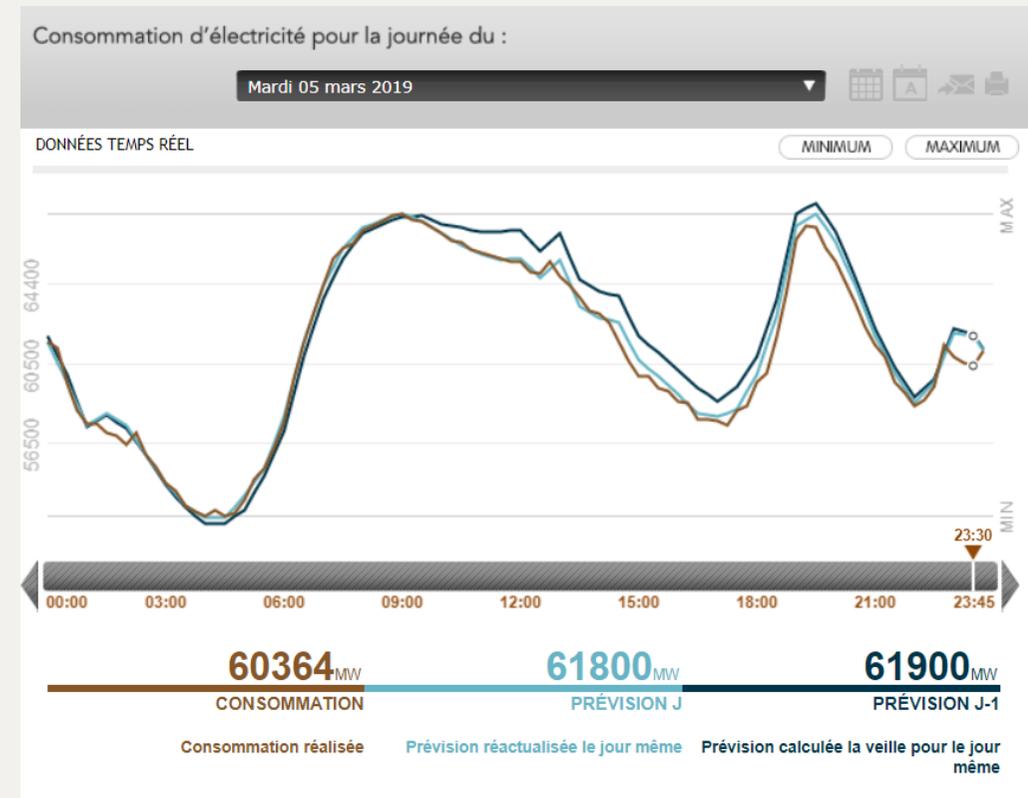
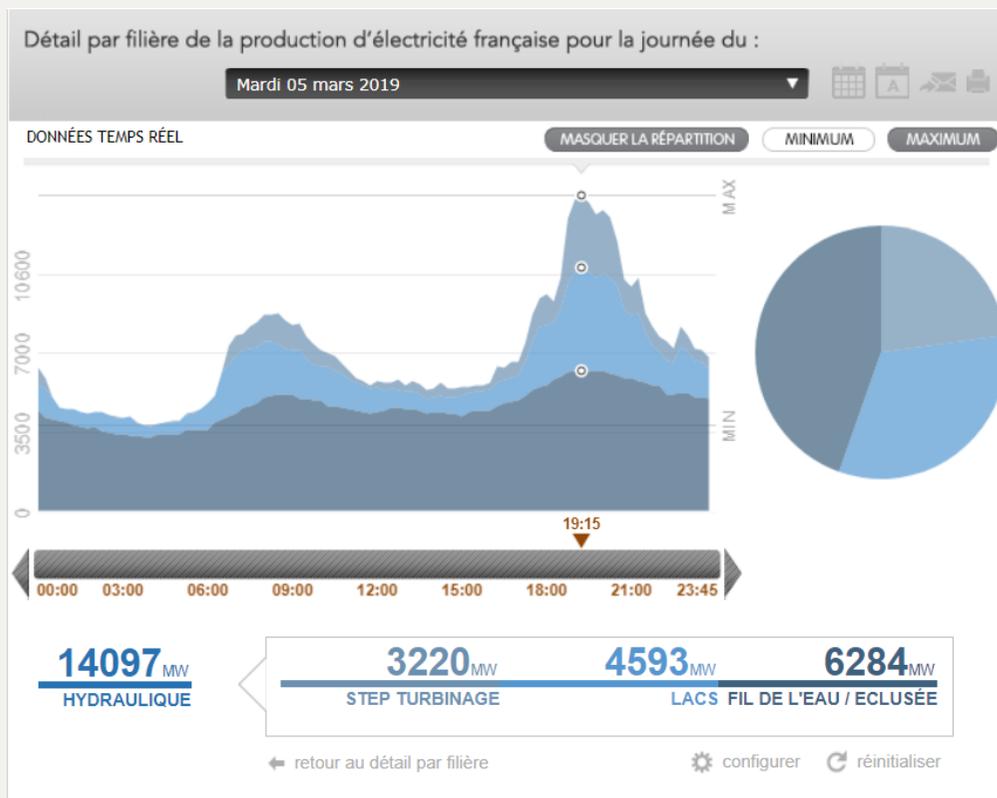


# HYDROÉLECTRICITÉ EN FRANCE

Puissance installée : 25 510 MW (soit 19% du parc électrogène installé)

Production 2018 : 68 TWh / 548 TWh soit 12% de la prod

Facteur de charge : 31% (faible car suivi de charge)



# HYDROÉLECTRICITÉ DANS LE MONDE

**1<sup>ère</sup> source d'énergie bas-carbone au niveau mondial !**



# HYDROÉLECTRICITÉ DANS LE MONDE

**1<sup>ère</sup> source d'énergie bas-carbone au niveau mondial !**

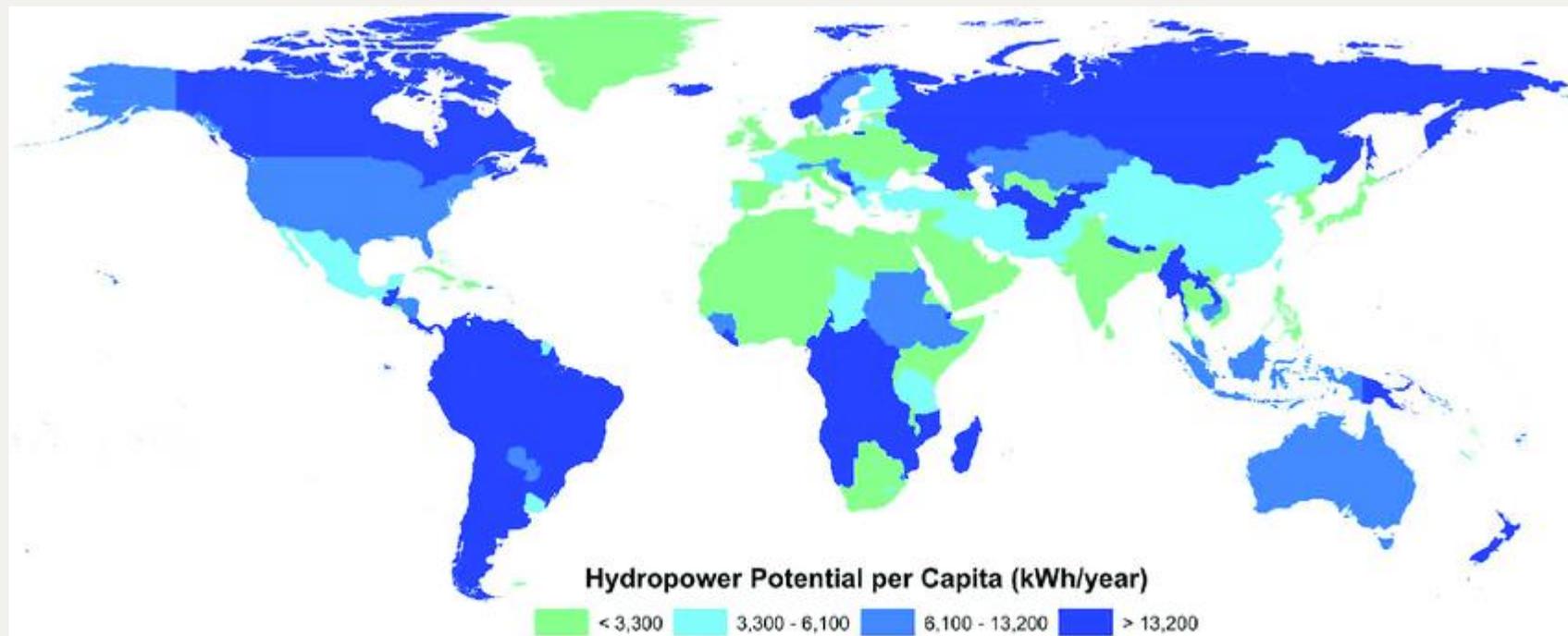
... 6,4% de l'énergie primaire consommée sur Terre en 2016



# HYDROÉLECTRICITÉ DANS LE MONDE

**1<sup>ère</sup> source d'énergie bas-carbone au niveau mondial !**

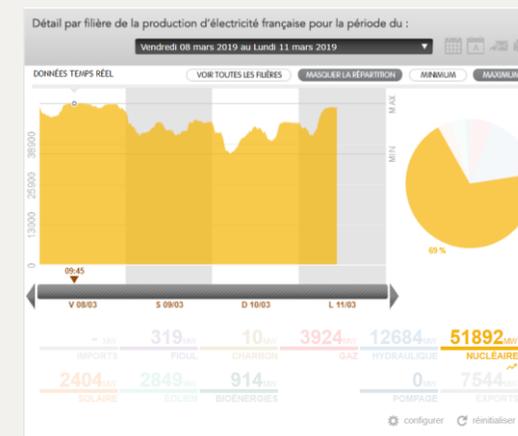
... 6,4% de l'énergie primaire consommée sur Terre en 2016



# NUCLÉAIRE

Électrique

Avantages	Inconvénients
Pilotable (jusqu'à 21 GW en 30min <sup>1</sup> )	Acceptabilité, peurs
Durée de vie des infrastructures	Risque de prolifération
Stocks stratégiques d'uranium	Risque d'accident (voir UNSCEAR)
Possibilité de développer des réacteurs à neutrons rapides	Très capitalistique
	Compétences (pays primo-accédants)
Réserves d'uranium (130 ans à conso actuelle) <sup>2</sup>	



1 [https://www.edf.fr/sites/default/files/contrib/groupe-edf/espaces-dedies/espace-medias/fiches\\_thematiques/20171005-fiche-presse-flexibilite-du-parc.pdf](https://www.edf.fr/sites/default/files/contrib/groupe-edf/espaces-dedies/espace-medias/fiches_thematiques/20171005-fiche-presse-flexibilite-du-parc.pdf)

2 OCDE/AEN et AIEA, Uranium 2018 Resources, Production and Demand 2018

# LE DÉBAT SUR LE NUCLÉAIRE...



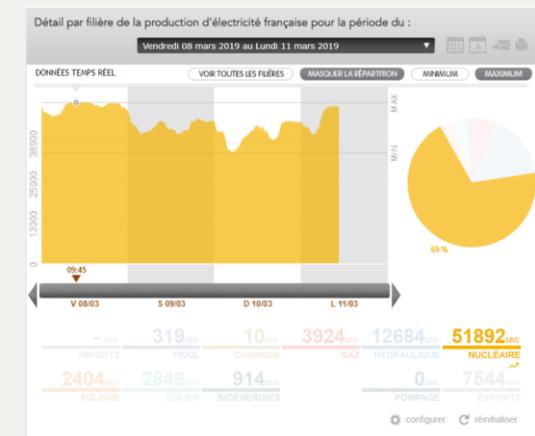
# NUCLÉAIRE

Électrique

Avantages	Inconvénients
Pilotable (jusqu'à 21 GW en 30min <sup>1</sup> )	Acceptabilité, peurs
Durée de vie des infrastructures	Risque de prolifération
Stocks stratégiques d'uranium	Risque d'accident (voir UNSCEAR)
Possibilité de développer des réacteurs à neutrons rapides	Très capitalistique
	Compétences (pays primo-accédants)
Réserves d'uranium (130 ans à conso actuelle) <sup>2</sup>	

Puissance installée : 63 130 MW (48% du parc installé)  
Production 2018 : 393 TWh / 548 TWh soit 72% de la prod.  
Facteur de charge : 71% (base + suivi de charge)

**2<sup>e</sup> source d'énergie bas-carbone au niveau mondial !**  
... 4,2% du total en 2016



<sup>1</sup> [https://www.edf.fr/sites/default/files/contrib/groupe-edf/espaces-dedies/espace-medias/fiches\\_thematiques/20171005-fiche-presse-flexibilite-du-parc.pdf](https://www.edf.fr/sites/default/files/contrib/groupe-edf/espaces-dedies/espace-medias/fiches_thematiques/20171005-fiche-presse-flexibilite-du-parc.pdf)

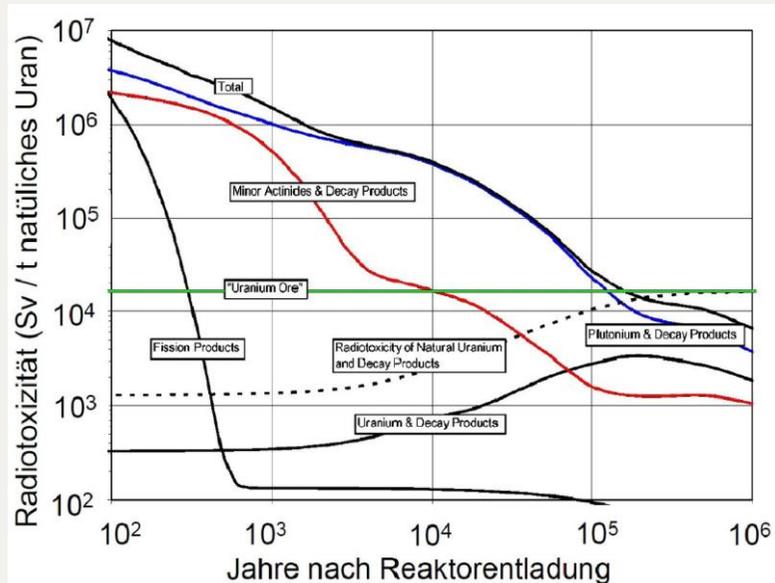
<sup>2</sup> OCDE/AEN et AIEA, Uranium 2018 Resources, Production and Demand 2018

# DÉCHETS NUCLÉAIRE

Par comparaison, le volume d'une piscine olympique vaut 3750 m<sup>3</sup>

## ► RÉPARTITION DU VOLUME TOTAL DE DÉCHETS PAR SECTEUR ÉCONOMIQUE ET PAR CATÉGORIE

Volume à fin 2016 (m <sup>3</sup> )	Électronucléaire	Recherche	Défense	Industrie non-électronucléaire	Médical	
HA	Haute activité	3 250	161	232	-	-
MA-VL	Moyenne act. vie longue	27 900	10 700	6 300	161	2
FA-VL	Faible activité vie longue	38 300	13 900	18 000	20 300	-
FMA-VC	F. et M. act. vie courte	592 000	232 000	63 100	22 200	8 410
TFA	Très faible activité	243 000	170 000	56 500	12 100	88
Total		~ 905 000	~ 427 000	~ 144 000	~ 54 700	~ 8 500



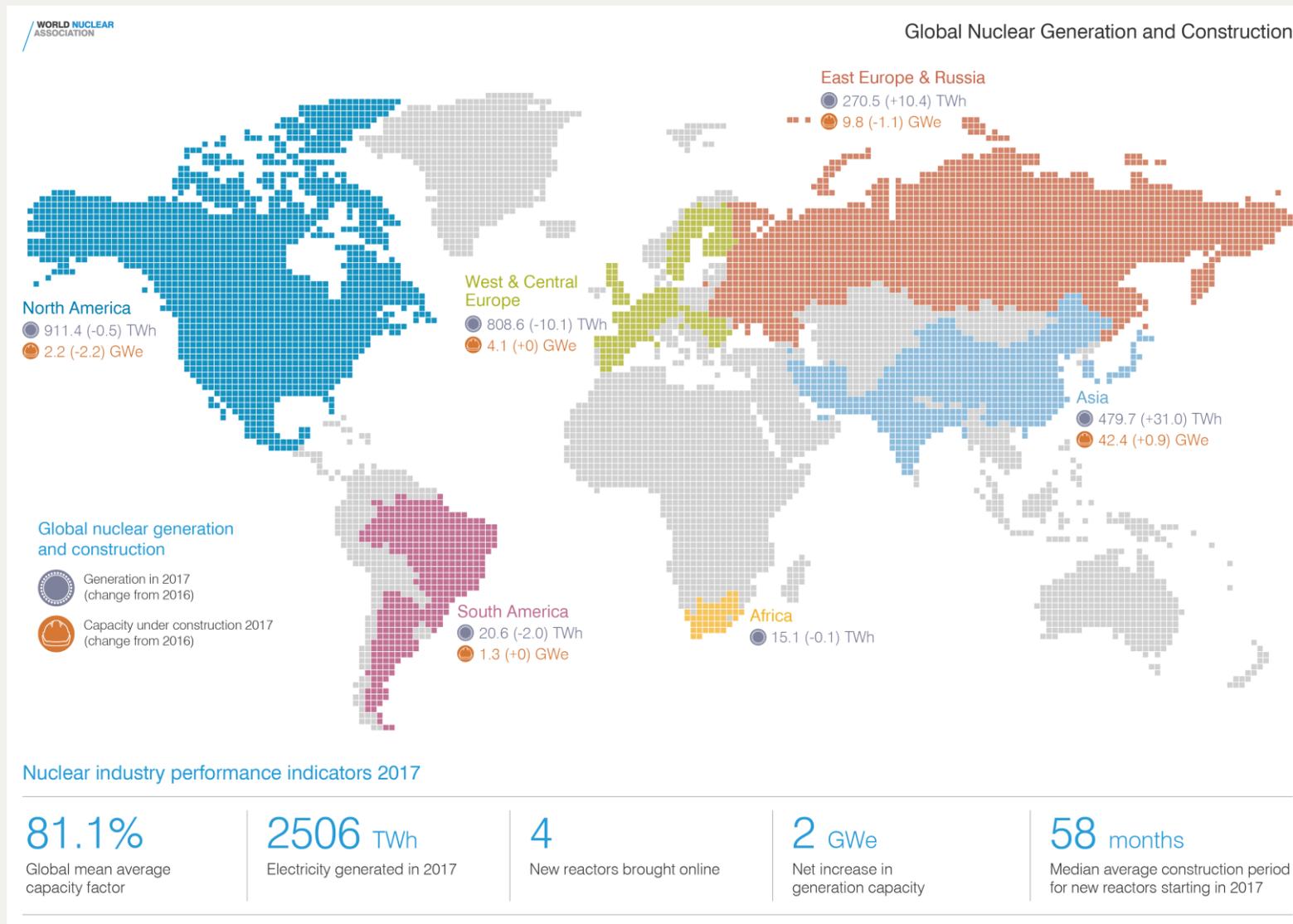
# DÉCHETS NUCLÉAIRES

## Explications (car sujet non traité lors de la conférence)

Les déchets de haute activité (HA) proviennent des combustibles usagés et retraités. 96% de la matière (uranium et plutonium) est récupérée pour refaire du combustible et 4% (actinides mineurs et produits de fission) est vitrifiée dans des fûts en acier inoxydable (voir photo). La photo de droite représente les suremballages en acier noir pour les fûts en inox.

Le plutonium est le contributeur majeur à la radiotoxicité de long-terme des combustibles usagés. Sans lui, les verres de déchets HA retrouvent une activité équivalente à celle du minerai (naturel) d'uranium au bout de 10 000 ans (au lieu de plus de 100 000 ans en l'absence de retraitement). Cette durée de 10 000 ans est longue, mais le verre est une matière très stable chimiquement. Par exemple, le bracelet en photo a environ 2500 ans et a été retrouvé dans la Marne (alors qu'il n'a ni été conçu pour durer, ni été stocké à 500 m sous terre dans une couche d'argile étanche, ce qui sera le cas des verres de déchets HA).

# NUCLÉAIRE DANS LE MONDE



# ÉOLIEN

Électrique

Avantages	Inconvénients
Facteur de charge > solaire	Intermittence
Source d'énergie renouvelable	Besoins en matériaux
	Acceptabilité (bruit, aspect...)
	Coût + financement hors-marché
	Géographique (régime de vents)
	Réseau et déséquilibre production

Puissance installée : 15 108 MW (11% du parc installé)

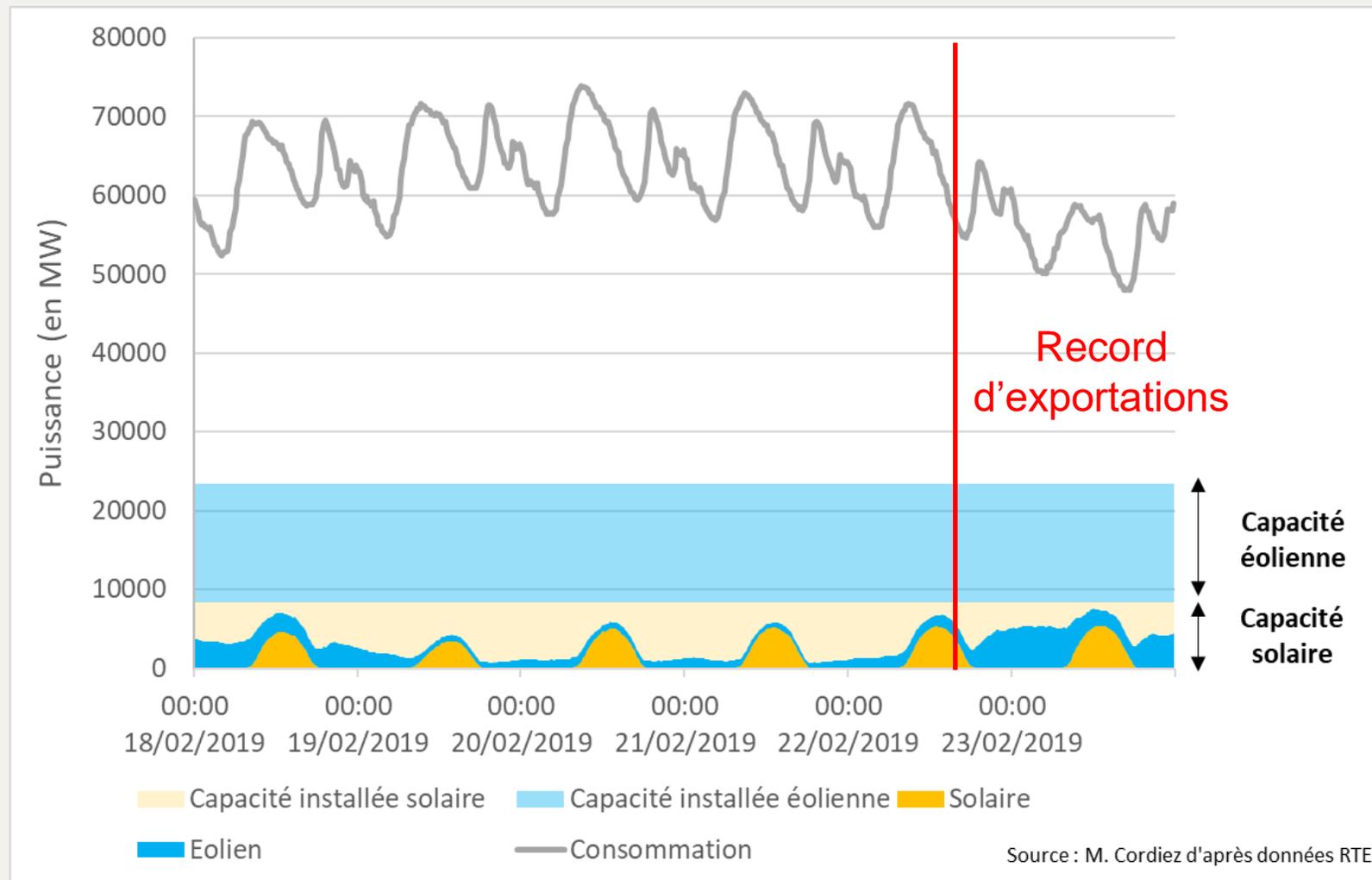
Production 2018 : 28 TWh / 548 TWh soit 5% de la production

Facteur de charge : 21% (faible)

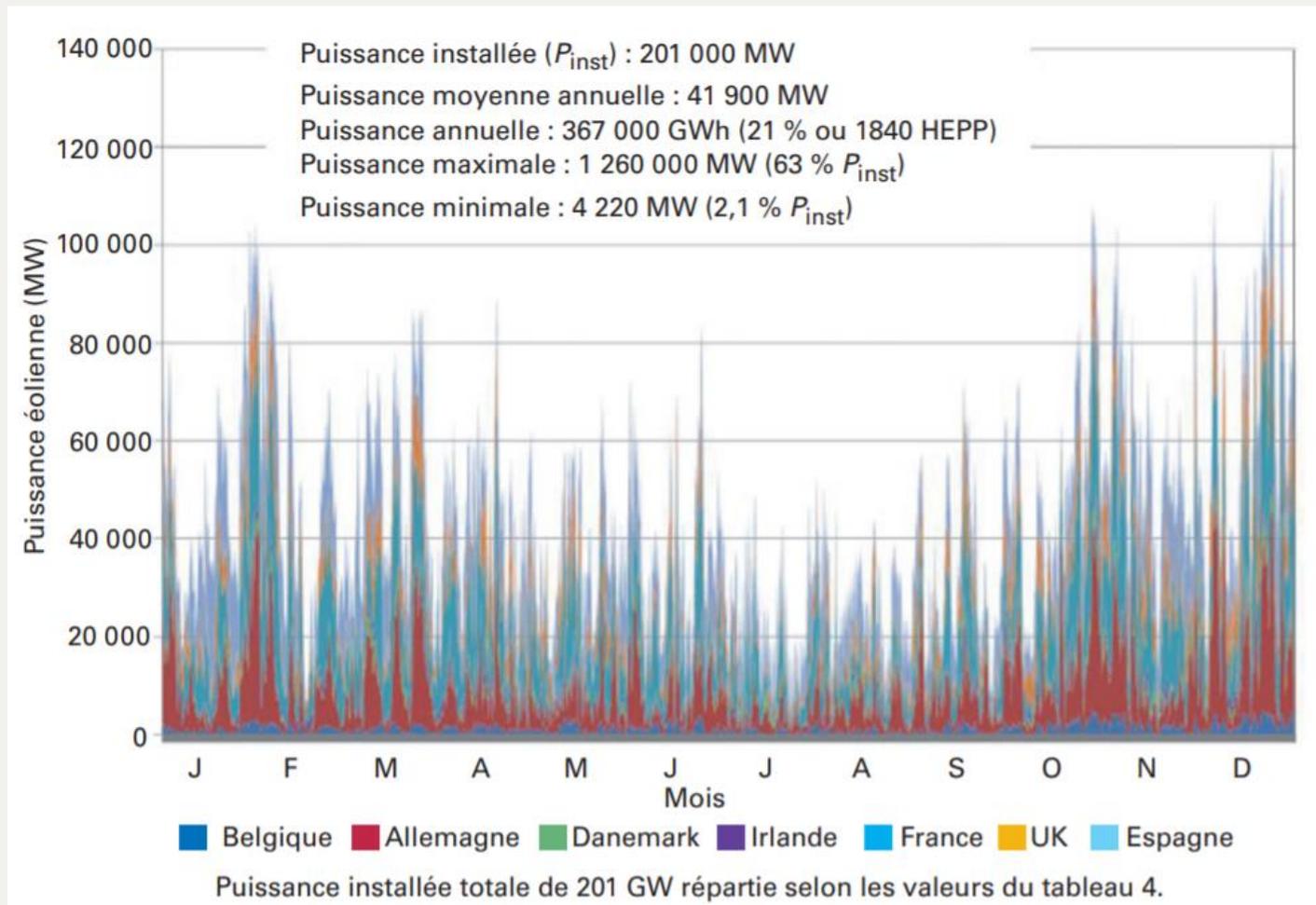
**3<sup>e</sup> source d'énergie bas-carbone au niveau mondial !**

... 1,5% du total en 2016

# ÉOLIEN - INTERMITTENCE



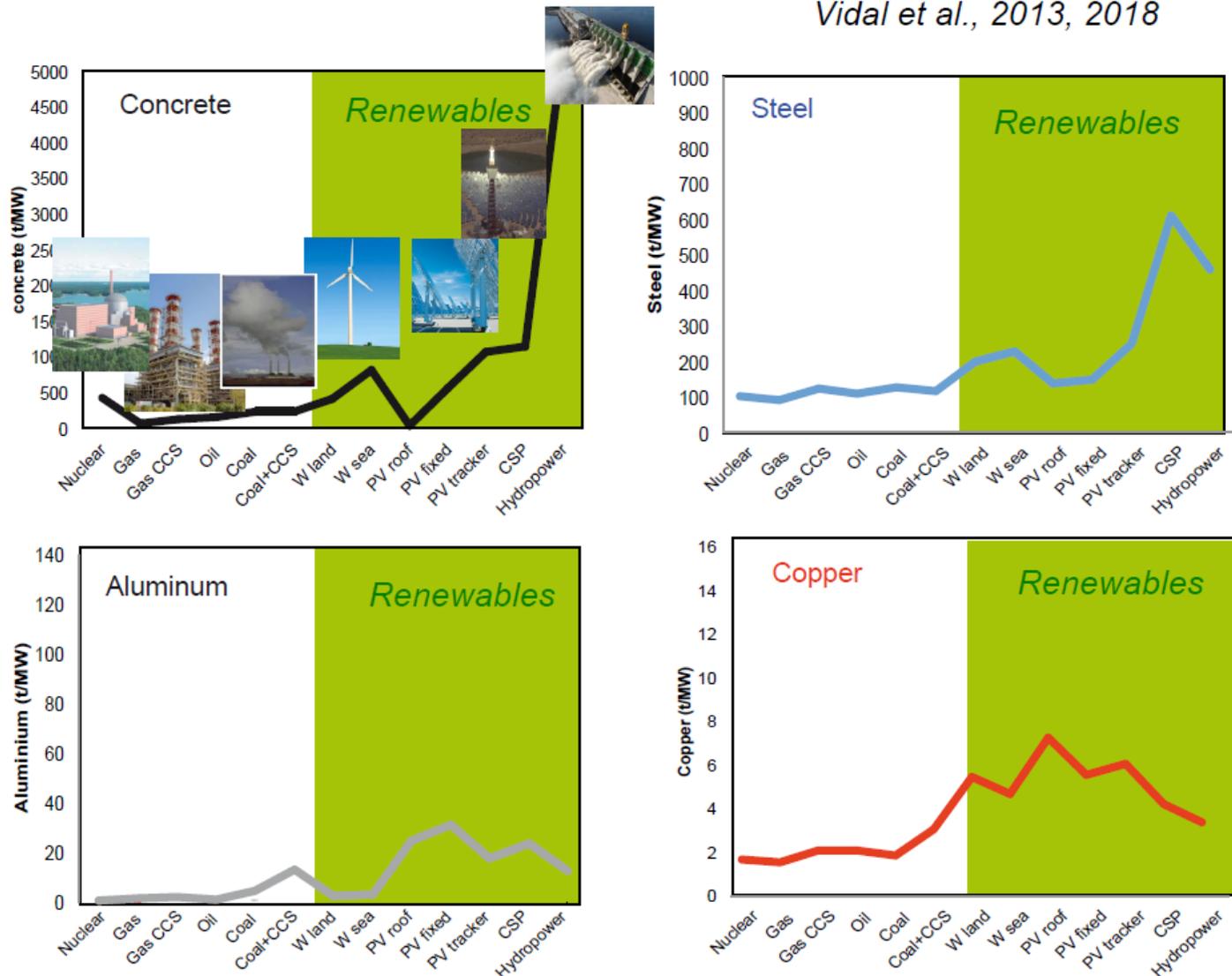
# ÉOLIEN - FOISONNEMENT



Puissance éolienne horaire en 2025/2030, extrapolée à partir des données horaires réelles 2013

# ÉOLIEN - RESSOURCES

Vidal et al., 2013, 2018



# SOLAIRE

Électrique

Avantages	Inconvénients
Production +/- prévisible	Intermittence et faible facteur de charge
Source d'énergie renouvelable	Besoins en matériaux
	Décalage production / consommation
	Emprise au sol
	Coût + financement hors-marché
	Géographique (ensoleillement)

Puissance installée : 8 527 MW (6% du parc installé)

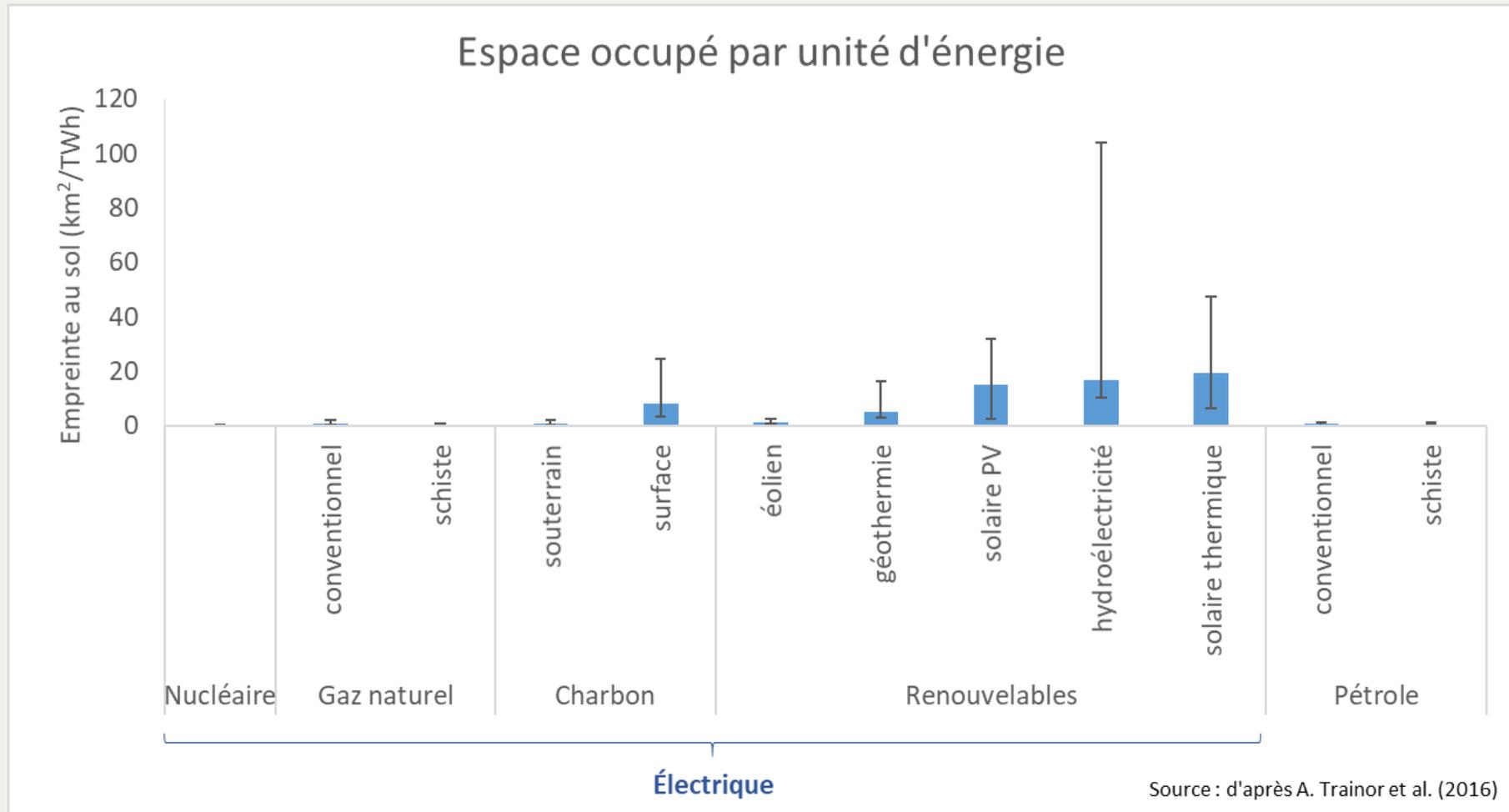
Production 2018 : 10 TWh / 548 TWh < 2% de la production

Facteur de charge : 13% (faible)

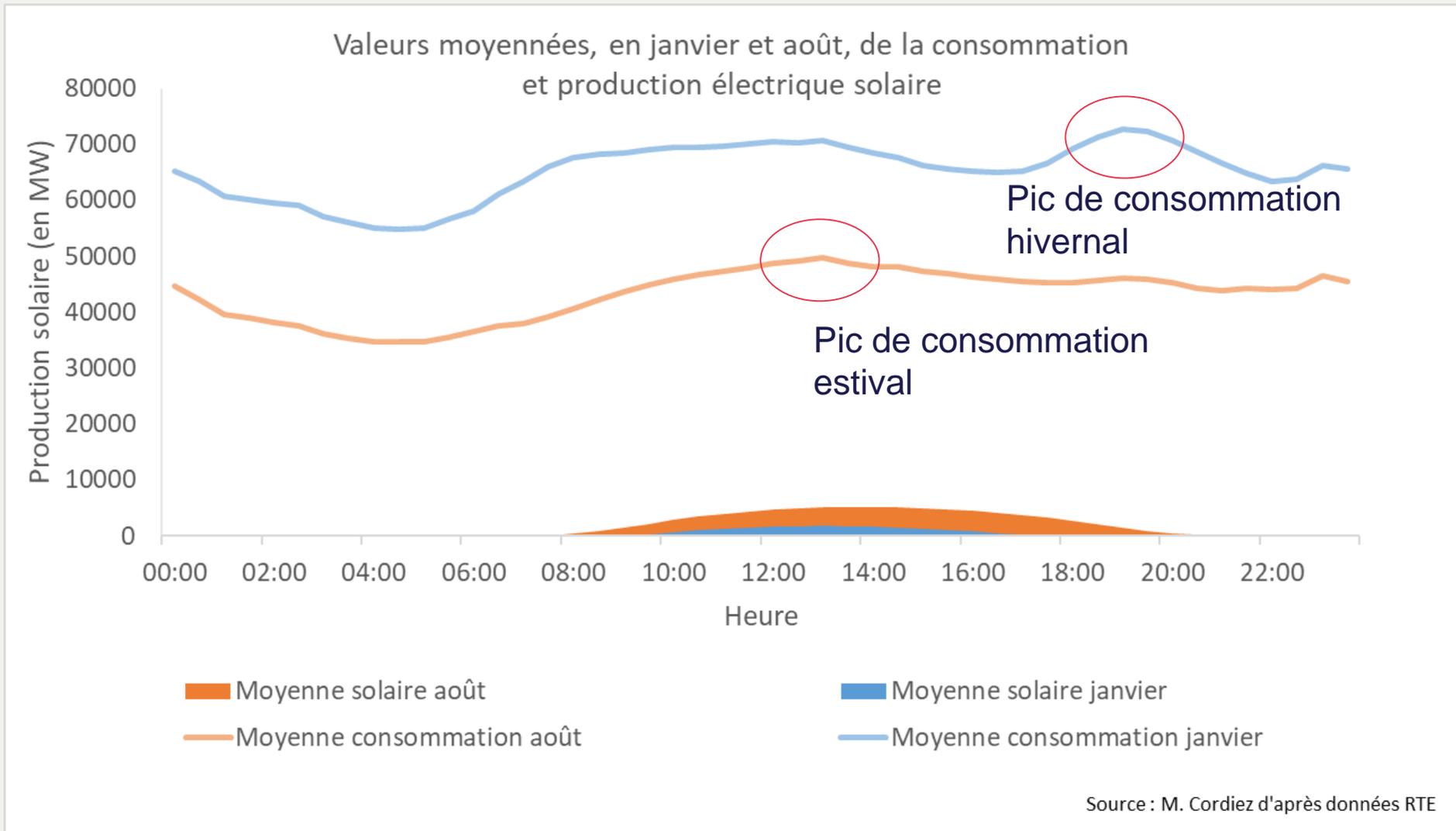
**4<sup>e</sup> source d'énergie bas-carbone au niveau mondial !**

... 0,5% du total en 2016

# SOLAIRE – EMPRISE AU SOL



# SOLAIRE – PRODUCTION VS CONSO



# BIOMASSE

Électrique

Chaleur

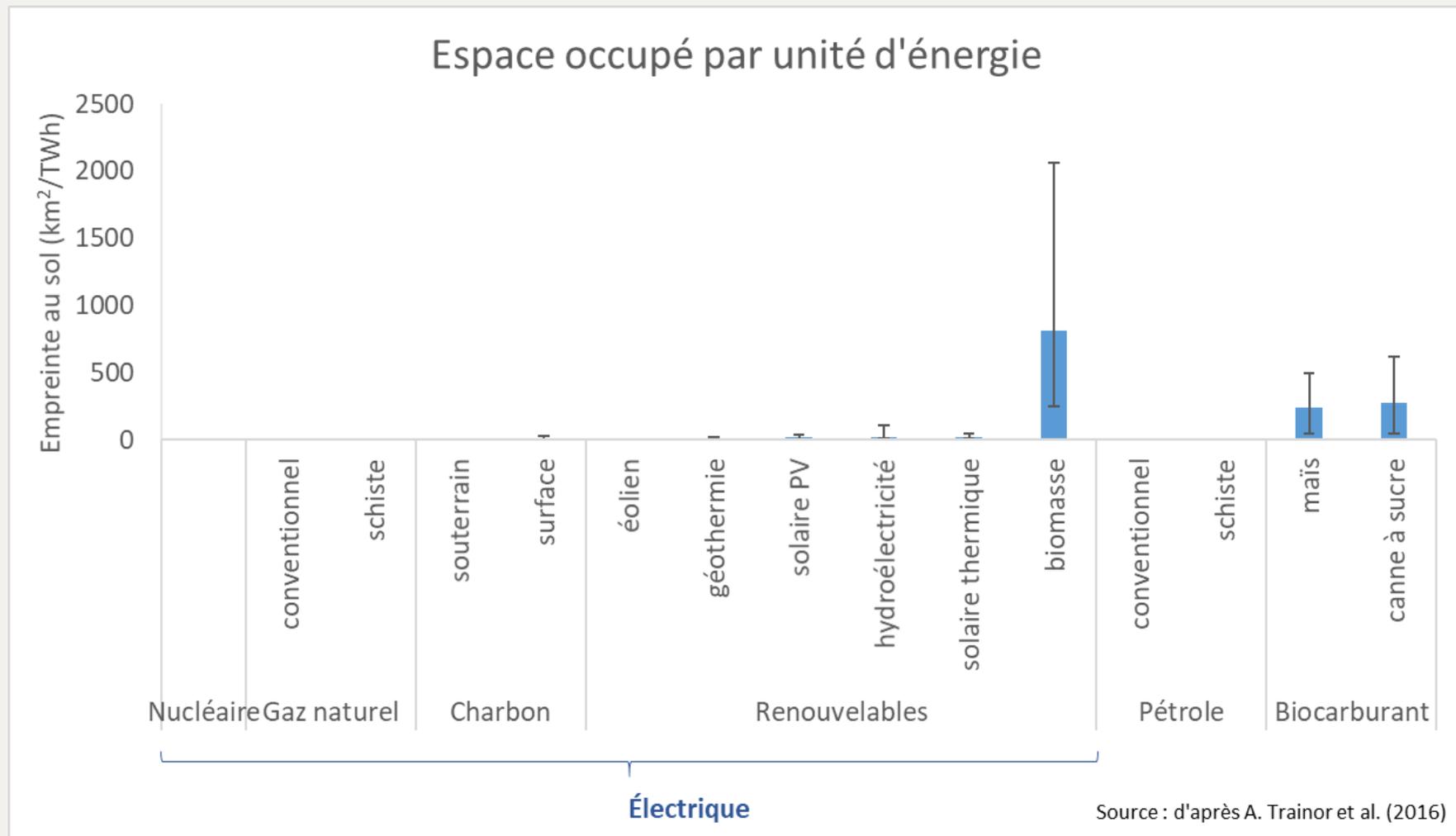
Avantages	Inconvénients
Production pilotable	Artificialisation des sols
Source d'énergie qui peut être renouvelable	Biodiversité
	Emissions de gaz à effet de serre*
	Emprise au sol
	Financement hors-marché
	Géographique (ressource)
	Risque de déforestation*

Puissance installée : 634 MW (0,4% du parc installé)

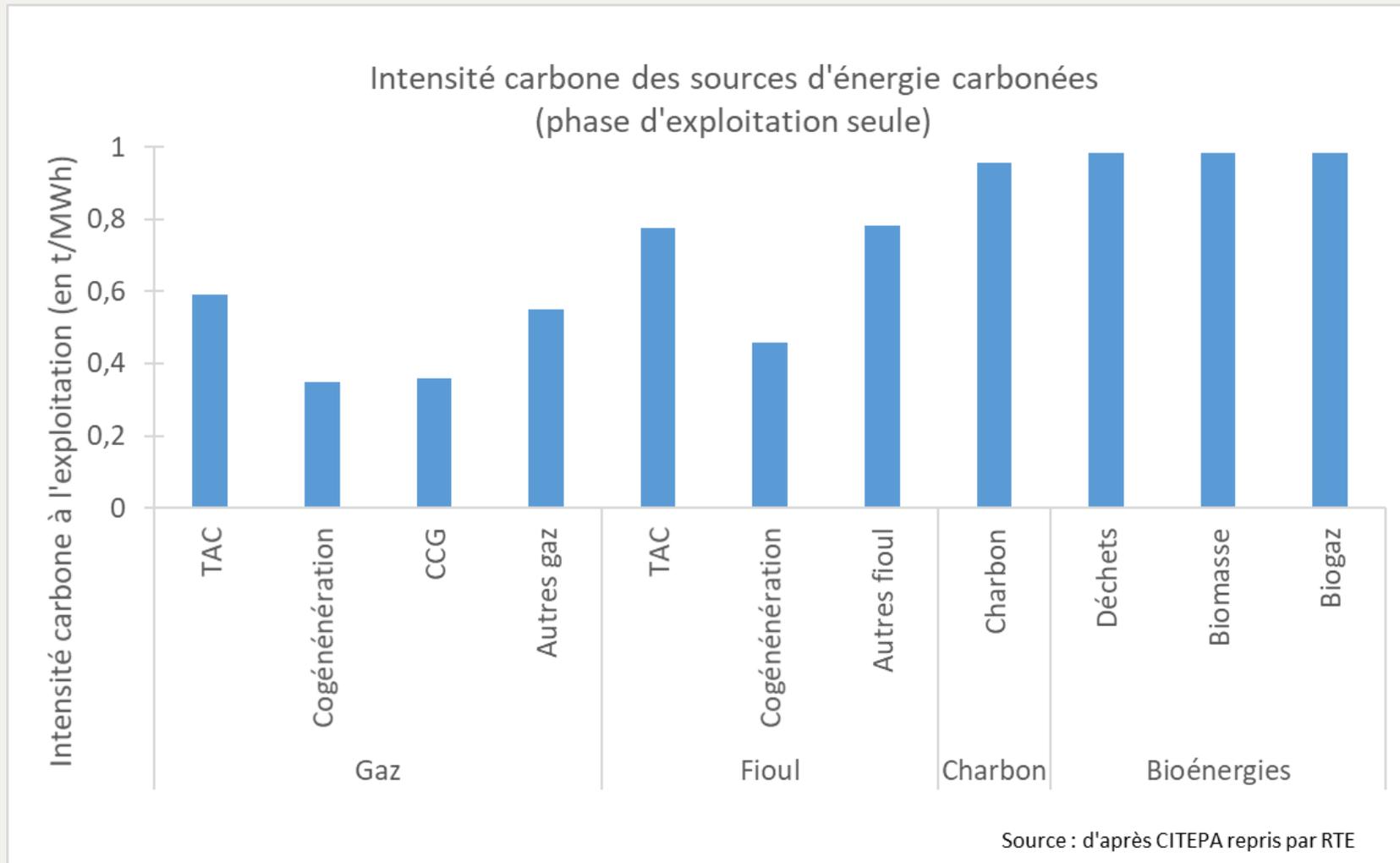
Production 2018 : 2,8 TWh / 548 TWh soit 0,5 % de la production

Facteur de charge : 50%

# BIOMASSE – EMPRISE AU SOL

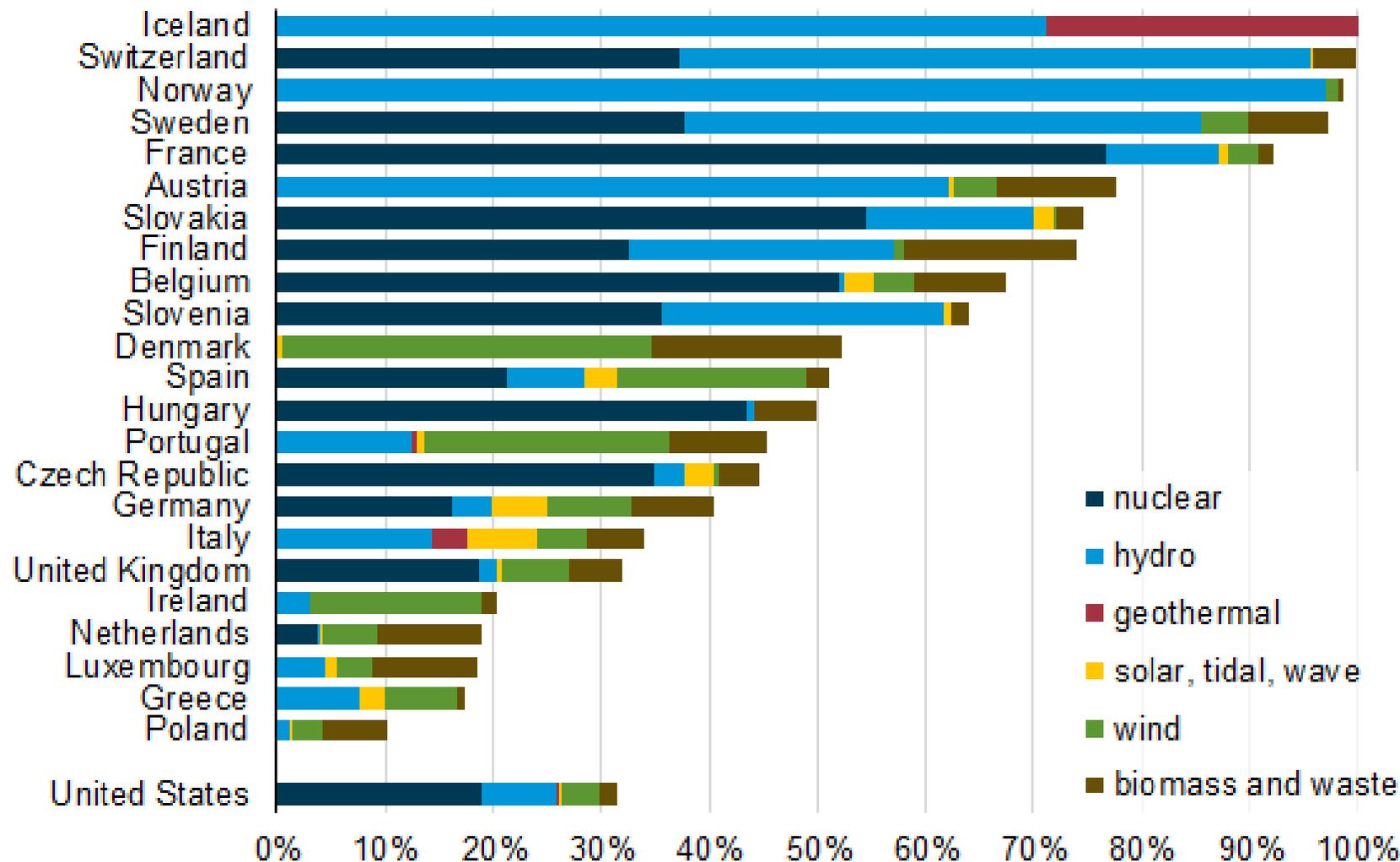


# BIOMASSE – INTENSITÉ CARBONE



# PRODUCTION ÉLECTRIQUE BAS-CARBONE

No-carbon electricity generation share in Europe and the United States (2012)  
percent of total generation



# BIOGAZ

Chaleur

Avantages	Inconvénients
Production domestique	Coût
Source d'énergie essentiellement renouvelable	Biodiversité, artificialisation des sols si cultures dédiées
Stockage de carbone et lutte contre l'érosion dans le cas de cultures intermédiaires	Risque de compétition avec cultures alimentaires (cultures dédiées)
	Potentiel très inférieur aux besoins en gaz
Origine des intrants	

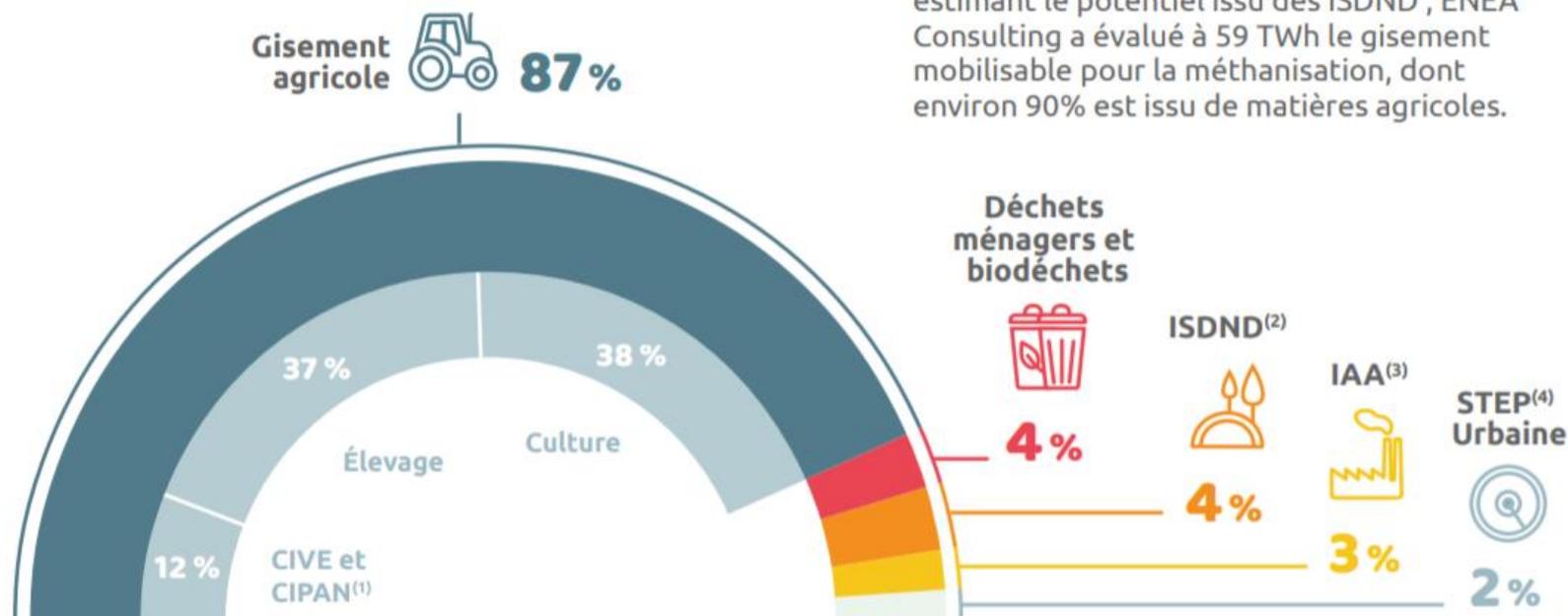
Coût de production : 95 €/MWh, racheté 120 €/MWh contre un prix de marché de 17 €/MWh<sup>1</sup>

# BIOGAZ – ORIGINE DES INTRANTS

## Le gisement agricole, principal contributeur de la production de biométhane en 2030

Estimation de la répartition en énergie du potentiel injectable à horizon 2030

En analysant les études de gisement réalisées pour le compte de l'ADEME B.11 et B.12, et en estimant le potentiel issu des ISDND, ENEA Consulting a évalué à 59 TWh le gisement mobilisable pour la méthanisation, dont environ 90% est issu de matières agricoles.



(1) CIVE : culture intermédiaire à vocation énergétique. CIPAN : culture intermédiaire pièges à nitrates.

(2) ISDND : installation de stockage des déchets non dangereux.

(3) IAA : industrie Agro Alimentaire.

(4) STEP : station d'épuration.

# POMPES À CHALEUR

Chaleur

Avantages	Inconvénients
Peut remplacer du fioul/gaz de chauffage	Coût du dispositif
Source d'énergie essentiellement renouvelable	Efficacité diminue avec la température (pointe de consommation électrique...)
	Besoin d'une alimentation électrique (ou gaz)

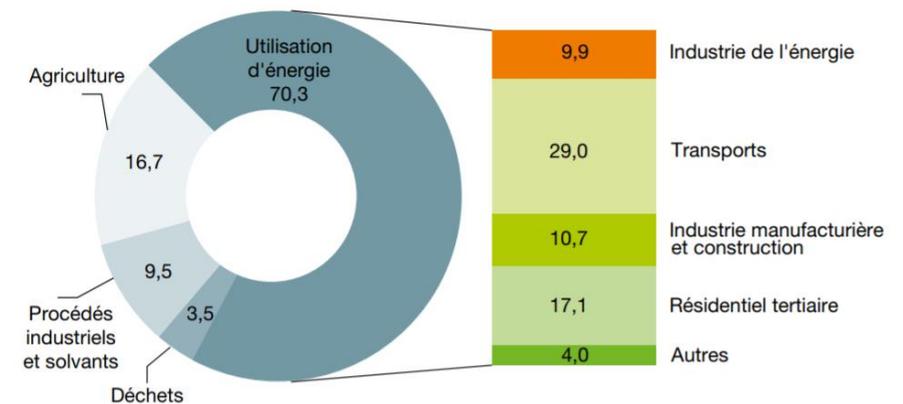
Source de chaleur : air extérieur, sous-sol (géothermie)

Entre 3 et 4 kWh d'énergie thermique renouvelable extraite du milieu extérieur pour chaque kWh électrique.

L'idéal pour remplacer les chaudières à fioul et à gaz mais installation potentiellement onéreuse

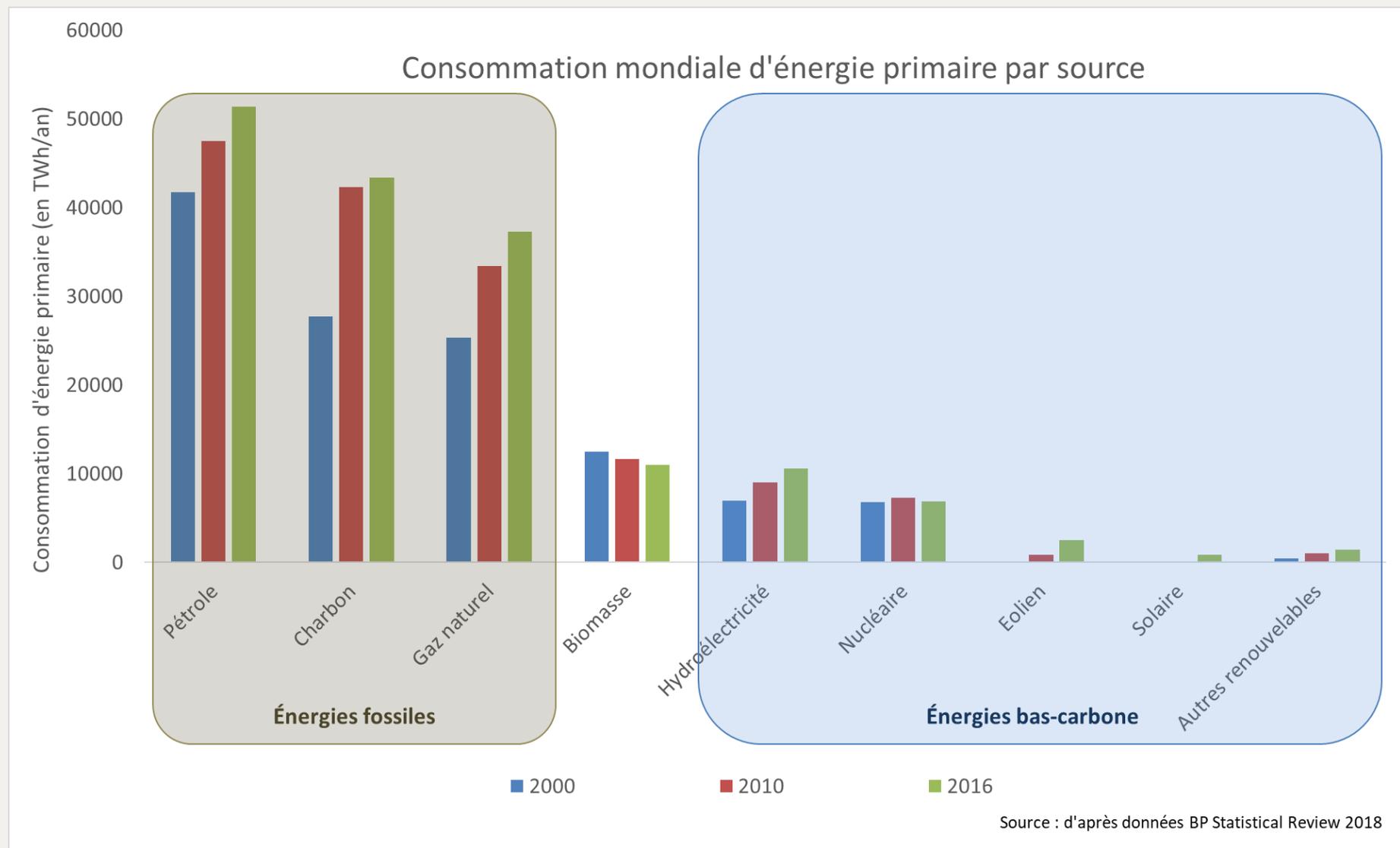
RÉPARTITION PAR SOURCE DES ÉMISSIONS DE GES (HORS UTCATF) EN FRANCE EN 2016

En %



Source : AEE, 2018

# LE CHANGEMENT CLIMATIQUE



# CONCLUSION

Sujets complexes, non binaires. Pas d'énergie propre ni verte  
**Attention aux annonces de solutions miracles...**

Ne pas mélanger les sujets (ni EnR Vs fossiles, ni EnR Vs nucléaire)  
**Énergies bas-carbone Vs fossiles !**

Les sources d'énergie bas-carbone n'ont pas le potentiel de remplacer les  
fossiles  
**La transition sera surtout de la sobriété !**

Merci pour votre attention