

# Green Computing

## CM 1

Rappels des notions de physiques / GES / mix électrique / énergie pour l'ICT

Quentin Perez  
[quentin.perez@insa.fr](mailto:quentin.perez@insa.fr)  
4INFO  
2023-2024

# Petit QCM/QRU Wooclap



The image shows a QR code on the left side of a white rectangular card. To the right of the QR code, there are two sets of instructions in French, each with a numbered list and an icon. The top set of instructions, associated with a blue globe icon, says:

- 1 Allez sur [wooclap.com](https://wooclap.com)
- 2 Entrez le code d'événement dans le bandeau supérieur

To the right of these instructions is the text "Code d'événement" followed by the event code "LLAUKX" in blue capital letters.

The bottom set of instructions, associated with a yellow speech bubble icon, says:

- 1 Envoyez @LLAUKX au 06 44 60 96 62
- 2 Vous pouvez participer

# Notions de physiques

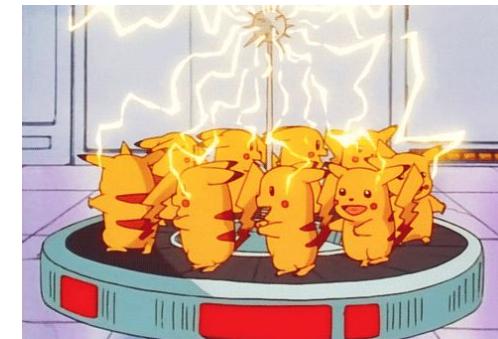
# Énergie

Définition Wikipédia

**“capacité d'un corps ou d'un système à produire du travail mécanique ou son équivalent”**

Différents types :

- Mécanique
- Potentielle
- Radiative
- **Chimique**
- **Électrique**
- ...



# Énergie - LIBRE ET INFINIE !!!...(non)



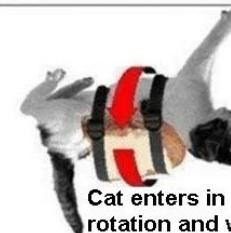
cats ever fall on its feet



the bread with butter always  
falls with the butter-side  
down



VIA 9GAG.COM  
tie a bread with butter  
on the back of a cat



Cat enters in  
rotation and will not  
fall



fit the cat-bread in a energy  
generator



now you have infinite energy

# Énergie

Définition physique (domaine électrique) :

$$E = P \times t$$

Énergie (E)  
En Joules (J)  
système SI

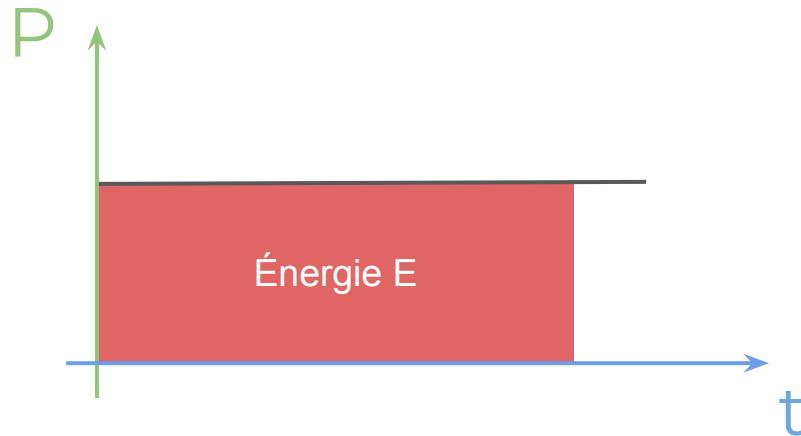
Aussi exprimé  
en Watt.heure  
(Wh)

Puissance (P)  
En Watt (W)

**1Wh = 3600J**

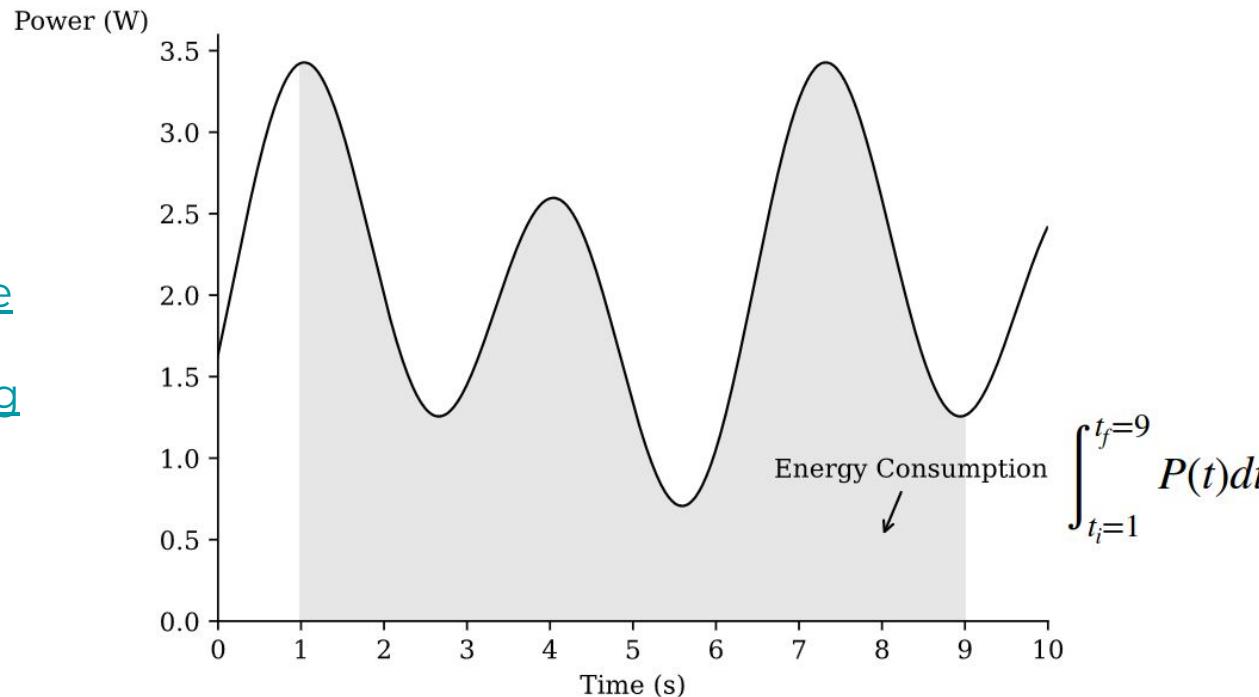
Temps (t)  
En secondes pour  
le SI pour E en  
joules

En h pour E en Wh



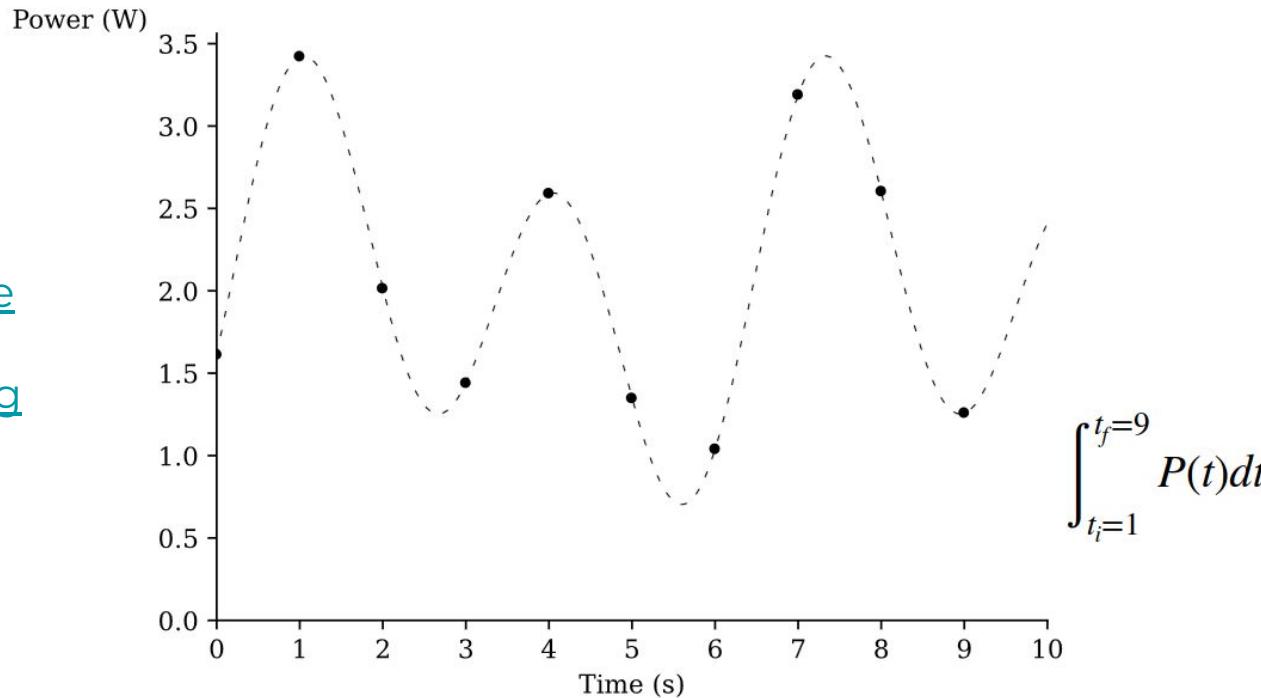
# Énergie

[[Luís Cruz](#),  
[Sustainable](#)  
[Software](#)  
[Engineering](#)  
[Course](#)]



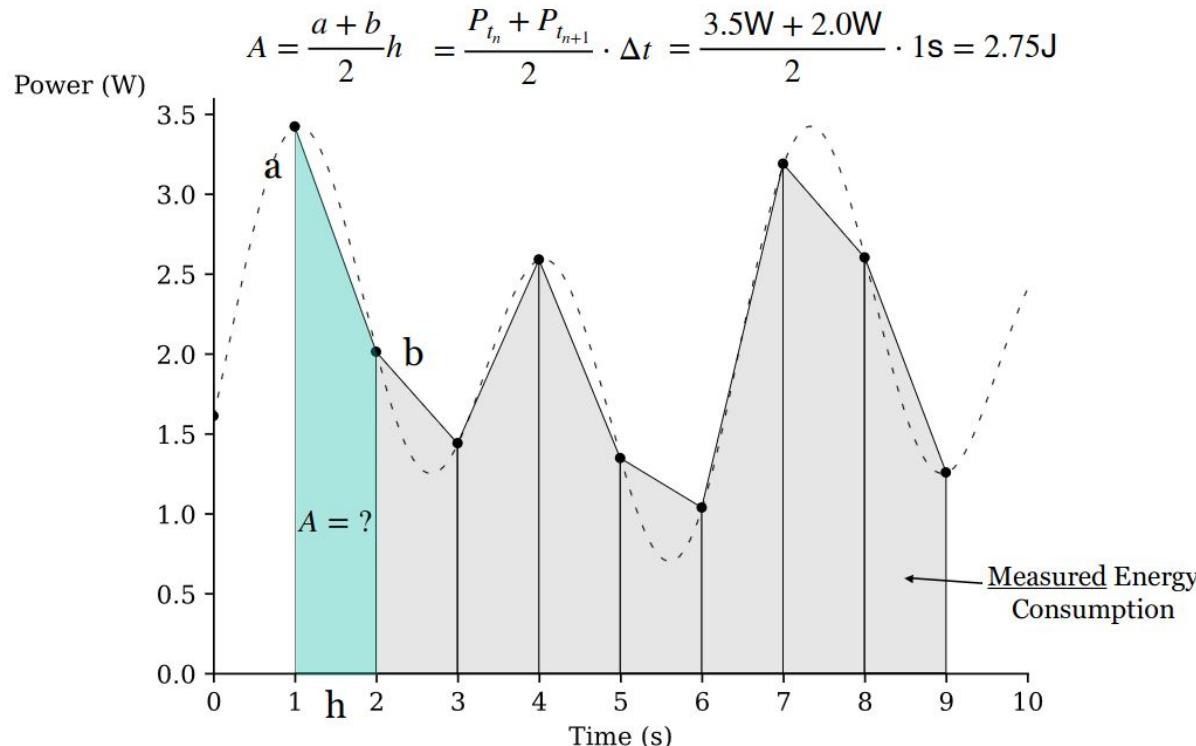
# Énergie

[[Luís Cruz](#),  
[Sustainable](#)  
[Software](#)  
[Engineering](#)  
[Course](#)]



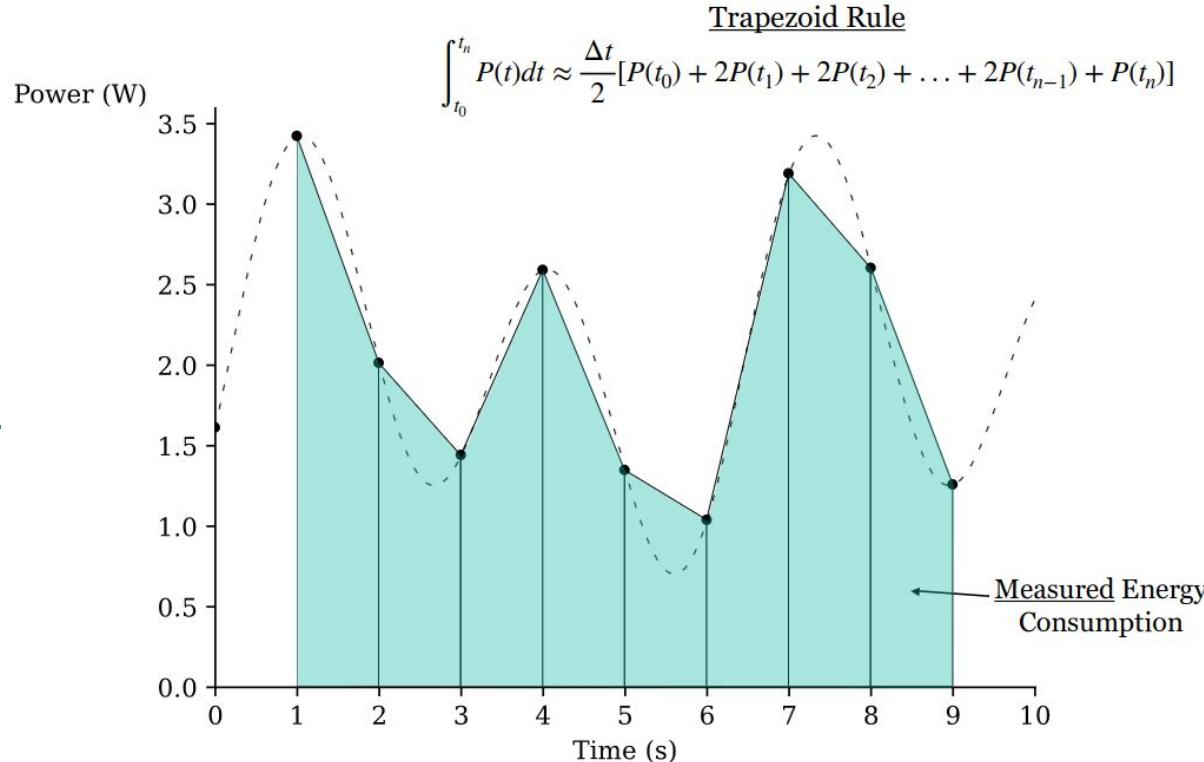
# Énergie

[[Luís Cruz](#),  
[Sustainable](#)  
[Software](#)  
[Engineering](#)  
[Course](#)]



# Énergie

[[Luís Cruz](#),  
[Sustainable](#)  
[Software](#)  
[Engineering](#)  
[Course](#)]



# Puissance électrique

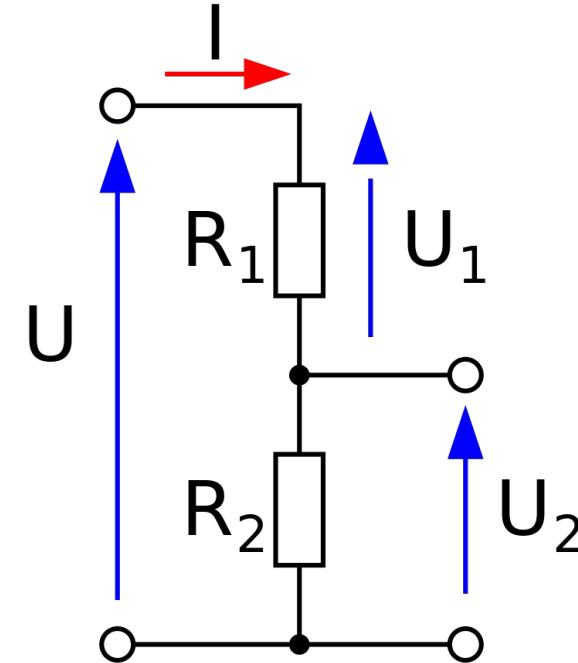
Définition physique :

$$P = U \times I$$

Puissance (P)  
En Watt (W)

Tension (U)  
en volt (V)

Intensité (I)  
En ampère (A)



# Charge électrique - Batterie

Définition physique :

$$\text{Cap} = t \times I$$

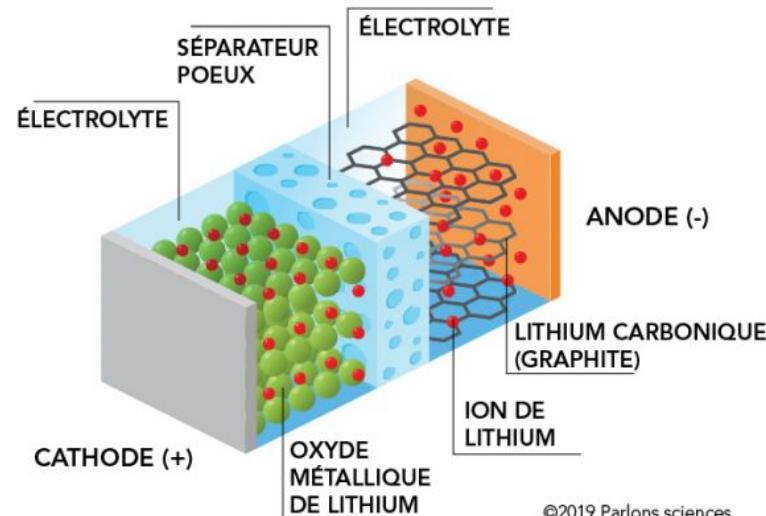
Capacité (Cap)  
En Coulomb  
dans le SI (C )  
aussi exprimée  
en  
Ampère.heure  
(Ah)

Temps de  
charge/décharge  
(t) en secondes  
ou heures

Intensité (I)  
En ampère (A)

$$1\text{Ah} = 3600\text{C}$$

## COMPOSANTS D'UNE BATTERIE LITHIUM-ION



©2019 Parlons sciences

# Charge électrique - Batterie

Définition physique :

$$\text{Cap} = t \times I$$

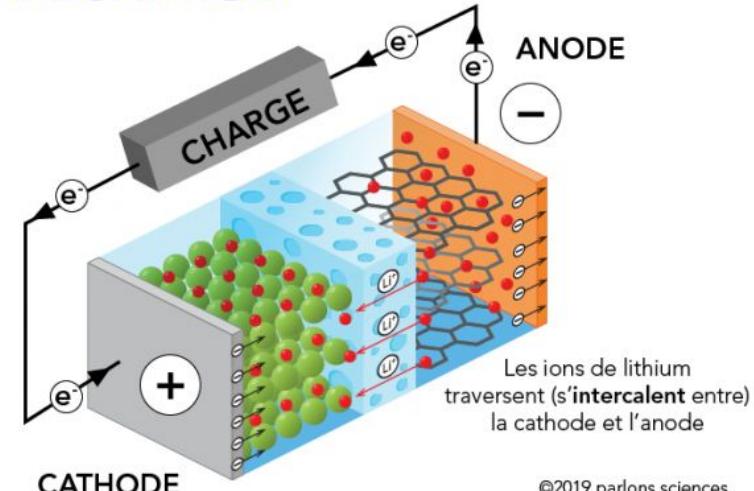
Capacité (Cap)  
En Coulomb  
dans le SI (C)  
aussi exprimée  
en  
Ampère.heure  
(Ah)

Temps de  
charge/décharge  
(t) en secondes  
ou heures

Intensité (I)  
En ampère (A)

$$1\text{Ah} = 3600\text{C}$$

## DÉCHARGE



©2019 parlons sciences

# Énergie électrique - Batterie

Définition physique :

$$E = \text{Cap} \times U$$

Énergie (E)

Capacité (Cap)

Tension (U)

Tension de la  
batterie

Batterie de Nintendo Switch: 3.7V et 4310mAh



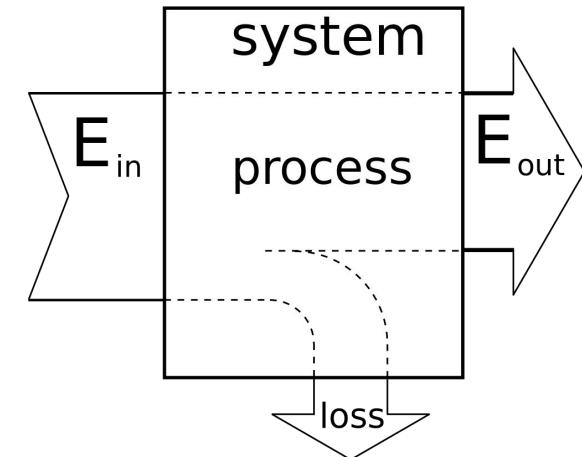
$$E = 3.7V \times 4.31Ah = 16Wh = 16Wh \times 3600 = 57600J$$

# Efficacité énergétique ou rendement

Rapport entre l'énergie introduite dans le système  
et l'**énergie utile en sortie**

Nombre sans dimension, ni unité et noté :

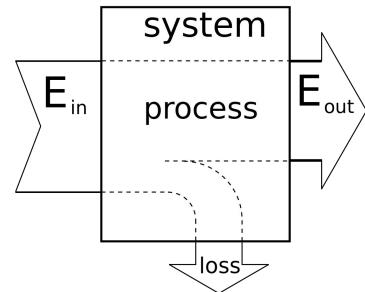
$$\eta = \frac{\text{Énergie utile sortie}}{\text{Énergie entrée}}$$
$$= \frac{(\text{Énergie entrée} - \text{Pertes})}{\text{Énergie entrée}}$$



# Efficacité énergétique ou rendement

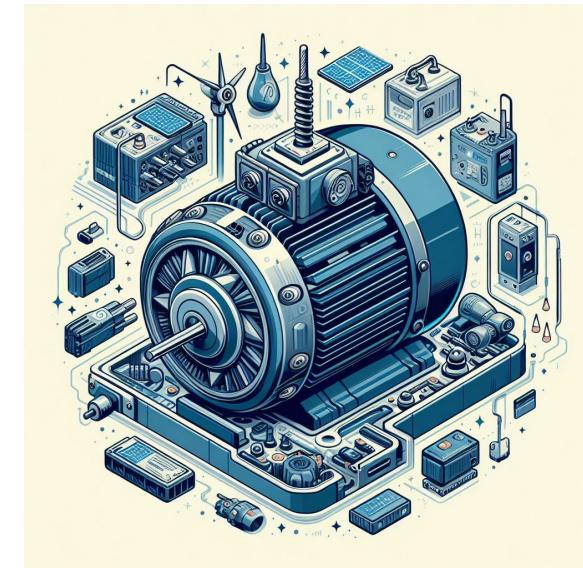
**Exemple:** Alimentation de 500W PC ATX à 100% de charge aura un rendement  $\eta = 0.82$

$$\eta = \text{500W utiles} / \text{610W en entrées} = 0.82$$



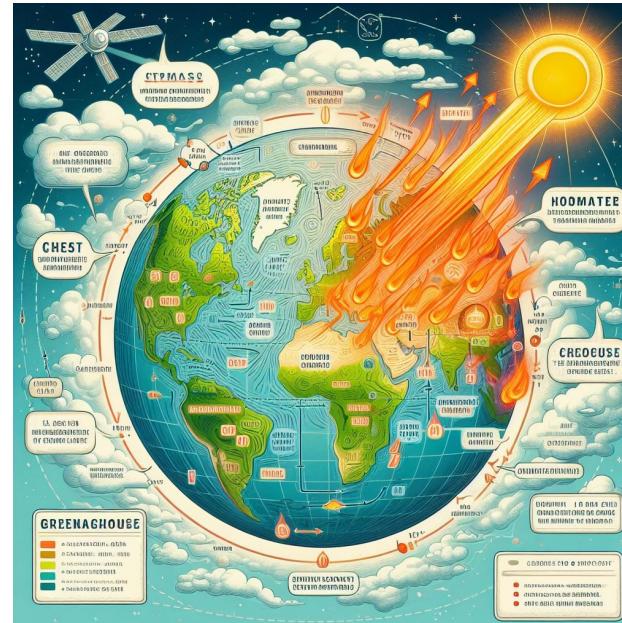
# Énergie / Puissance — quelques éléments de comparaison

- Moteur électrique à induction Tesla modèle Y : 148kW
- Four électrique : 2500W
- Consommation annuelle d'une box internet : 97kWh
- Consommation annuelle d'un lave-vaisselle (188 cycles) : 197kWh
- Batterie de Nintendo Switch : 4310mAh
- Rendement ampoule led : 0.85 - 0.90

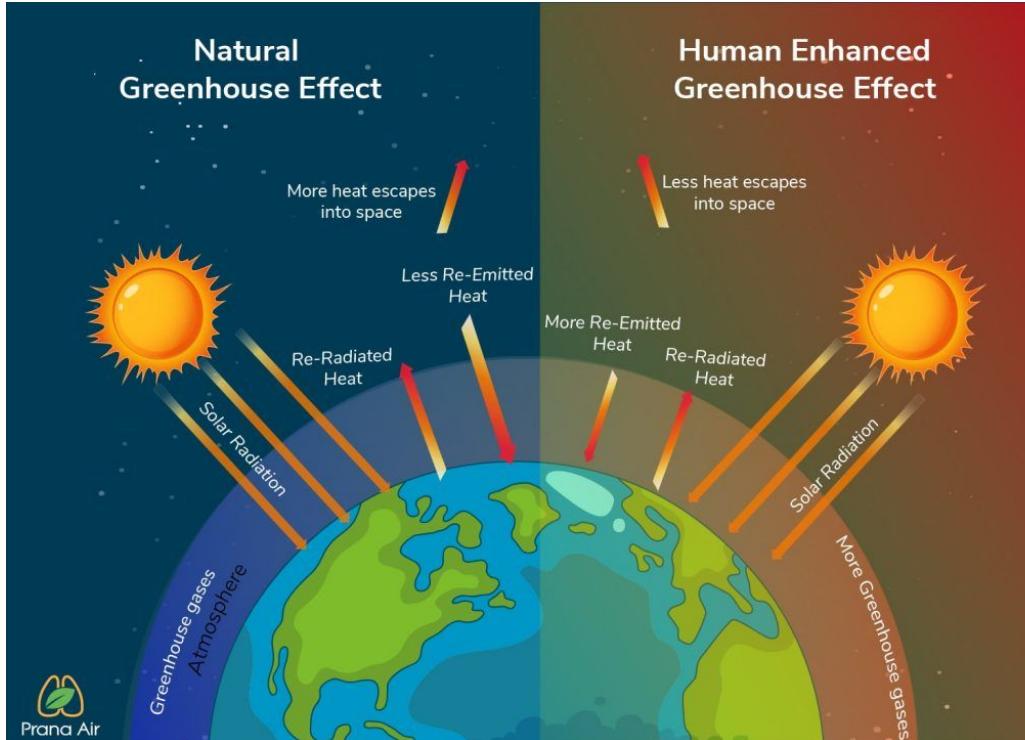


# Effet de serre - Gaz à effet de serre

# Effet de serre - Gaz à effet de serre (par Dall-E)



# Effet de serre



# Effet de serre - types de gaz

7 Types de gaz à effet de serre définis par le **protocole de Kyoto, signé en 1997**

**Comment comparer ces gaz et leurs effets sur le réchauffement climatique ?**

	Gaz	Origine
	CO2 (dioxyde de carbone)	Combustion d'énergie fossile, production industriel et déforestation/incendies
	CH4 (Méthane)	Décharges, agriculture, élevage et procédés industriels
	N2O (Protoxyde d'azote)	Agriculture, procédés industriels, utilisation d'engrais
Gaz Fluorés	HFCs (hydrofluocarbures, famille composée de différentes molécules)	Sprays, réfrigération, procédés industriels, transformateur électrique
	PFCs (perfluorocarbures, famille composée de différentes molécules)	
	SF6 (hexafluorure de soufre)	
	NF3 (trifluorure d'azote)	Nettoyage de composants électroniques en silicium

# Unité Équivalent Dioxyde de Carbone (CO2-eq)

Convertir les gaz à effet de serre dans une unité de comparaison unique en calculant leur poids par rapport au CO<sub>2</sub>

**1kg de Méthane (CH<sub>4</sub>) est estimé 21 fois plus “impactant” que 1kg de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) sur une période de 100 ans (100-global-warming potential (GWP-100))**

**CO<sub>2</sub>-eq est exprimé en kgCO<sub>2</sub>-eq**

Gaz	GWP-100
Dioxyde de Carbone (CO <sub>2</sub> )	1
Méthane (CH <sub>4</sub> )	21
Protoxyde d'azote (NO <sub>2</sub> )	310
trifluorure d'azote (NF <sub>3</sub> )	17200
hexafluorure de soufre (SF <sub>6</sub> )	23900

# Unité Équivalent Dioxyde de Carbone (CO2-eq)

Exemple : l'utilisation d'un système logiciel nécessite : 1000Kg de CO<sub>2</sub>, 20Kg de CH<sub>4</sub> et 5Kg de N<sub>2</sub>O

$$\begin{aligned}\text{CO2eq} &= 1 \times 1000 + 21 \times 20 + 5 \times 310 \\ &= 2970 \text{ kgCO2eq}\end{aligned}$$

Gaz	GWP-100
Dioxyde de Carbone (CO <sub>2</sub> )	1
Méthane (CH <sub>4</sub> )	21
Protoxyde d'azote (NO <sub>2</sub> )	310
trifluorure d'azote (NF <sub>3</sub> )	17200
hexafluorure de soufre (SF <sub>6</sub> )	23900

# Unité Équivalent Dioxyde de Carbone (CO<sub>2</sub>-eq)

Attention, le GWP-100 n'est qu'une estimation !

Il existe également le GWP-20 et le GWP-500

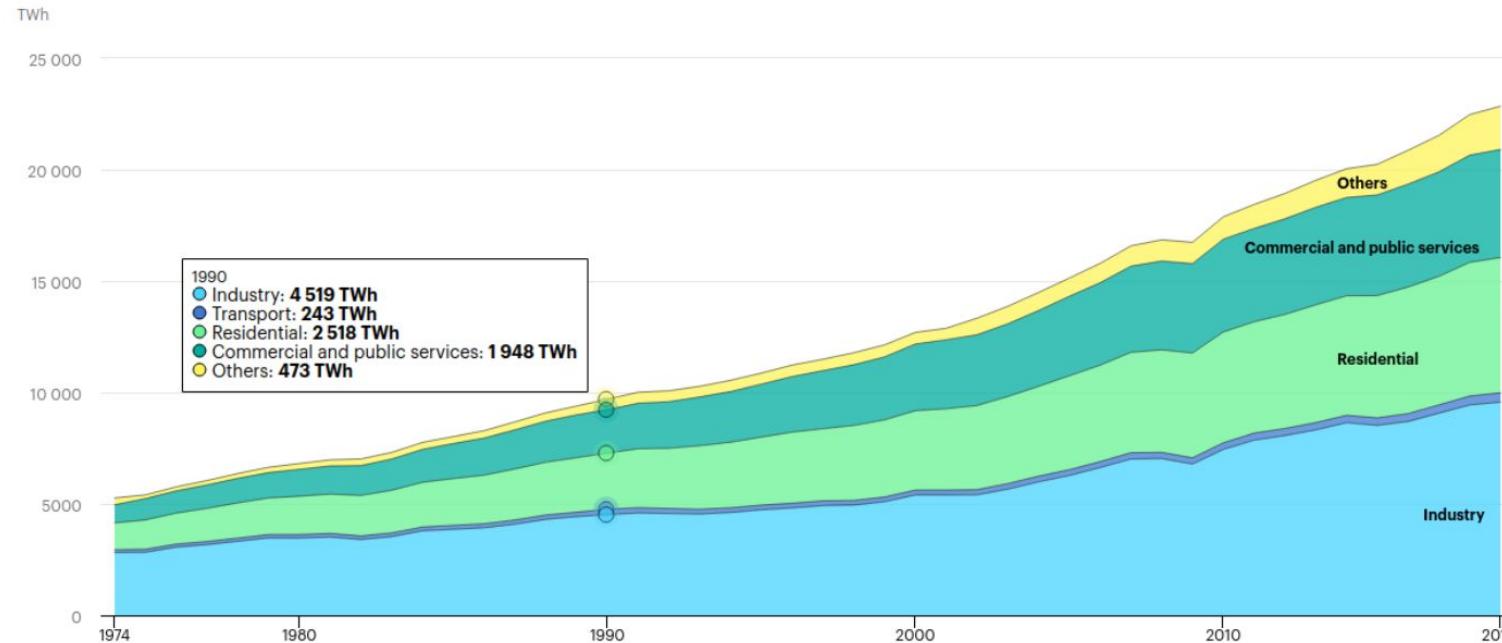
**Les valeurs données dans ici sont issues de l'étude de Foster et al.,  
Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing, 2007**

**<https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter2.pdf>**

# Consommation d'énergie mondiale et mix électrique

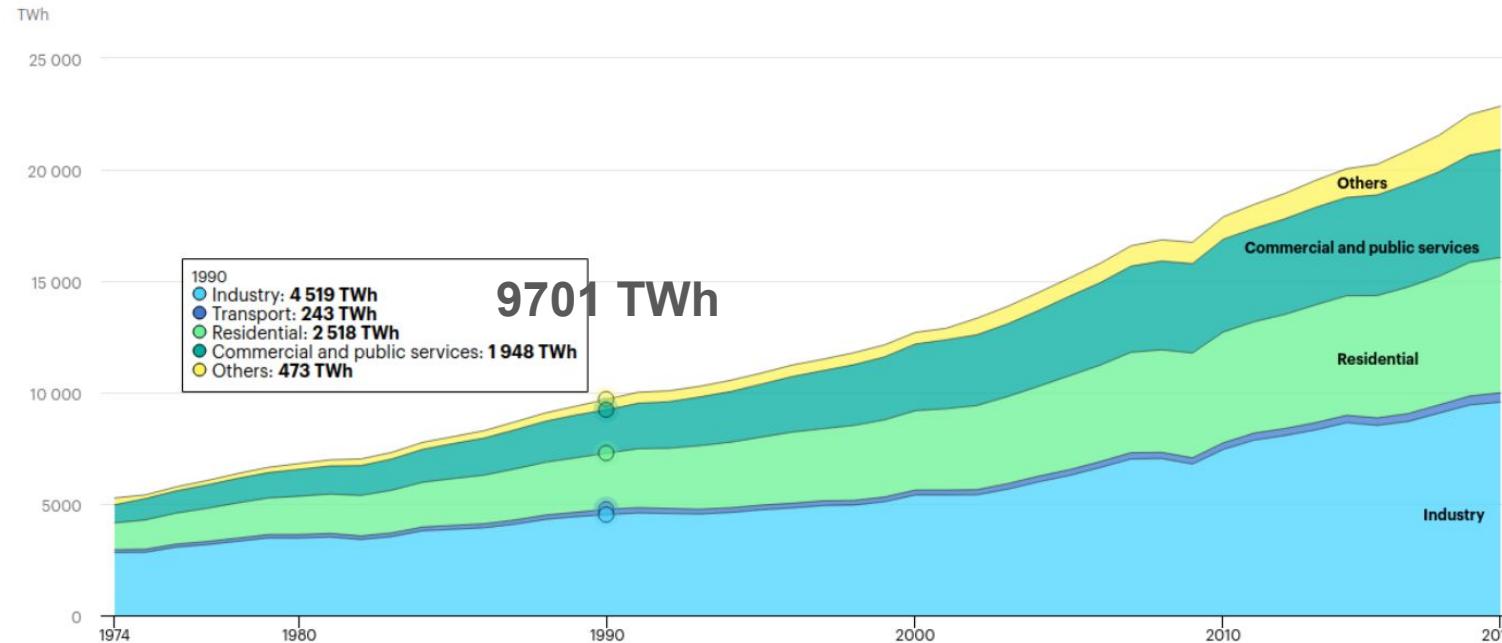
# Consommation d'énergie électrique mondiale

World electricity final consumption by sector, 1974-2019



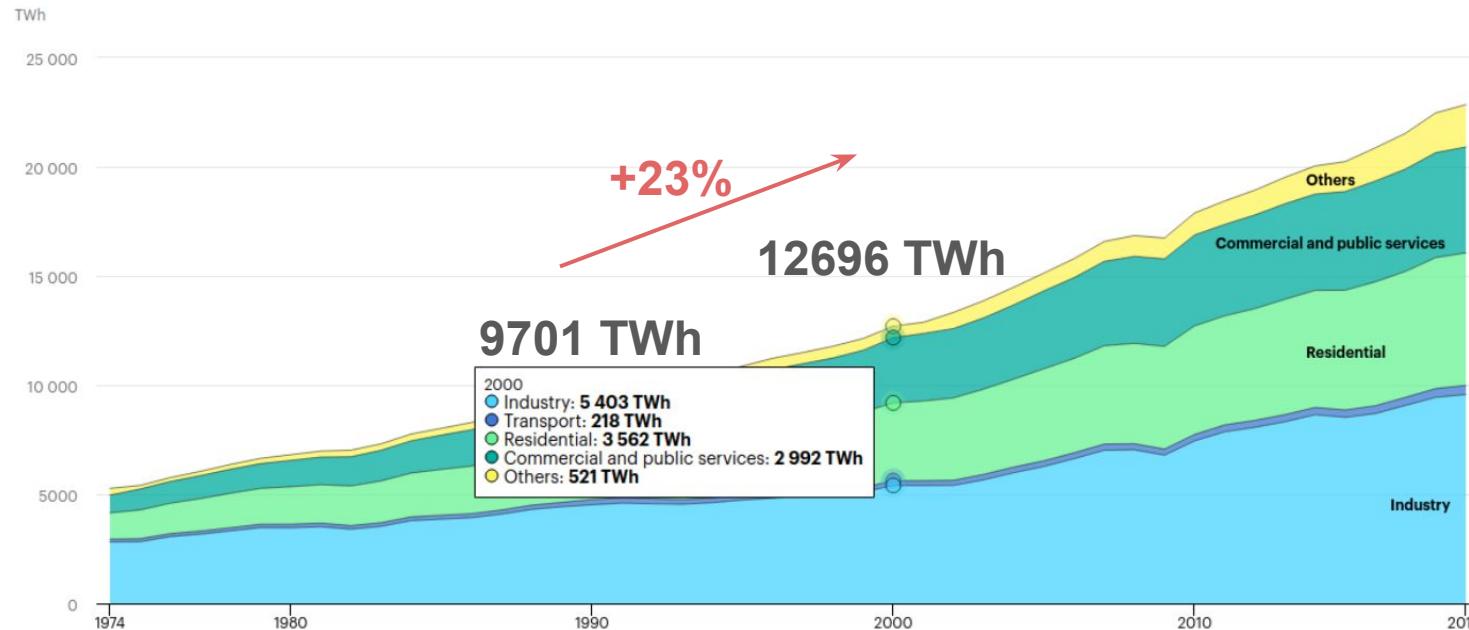
# Consommation d'énergie électrique mondiale

World electricity final consumption by sector, 1974-2019



# Consommation d'énergie électrique mondiale

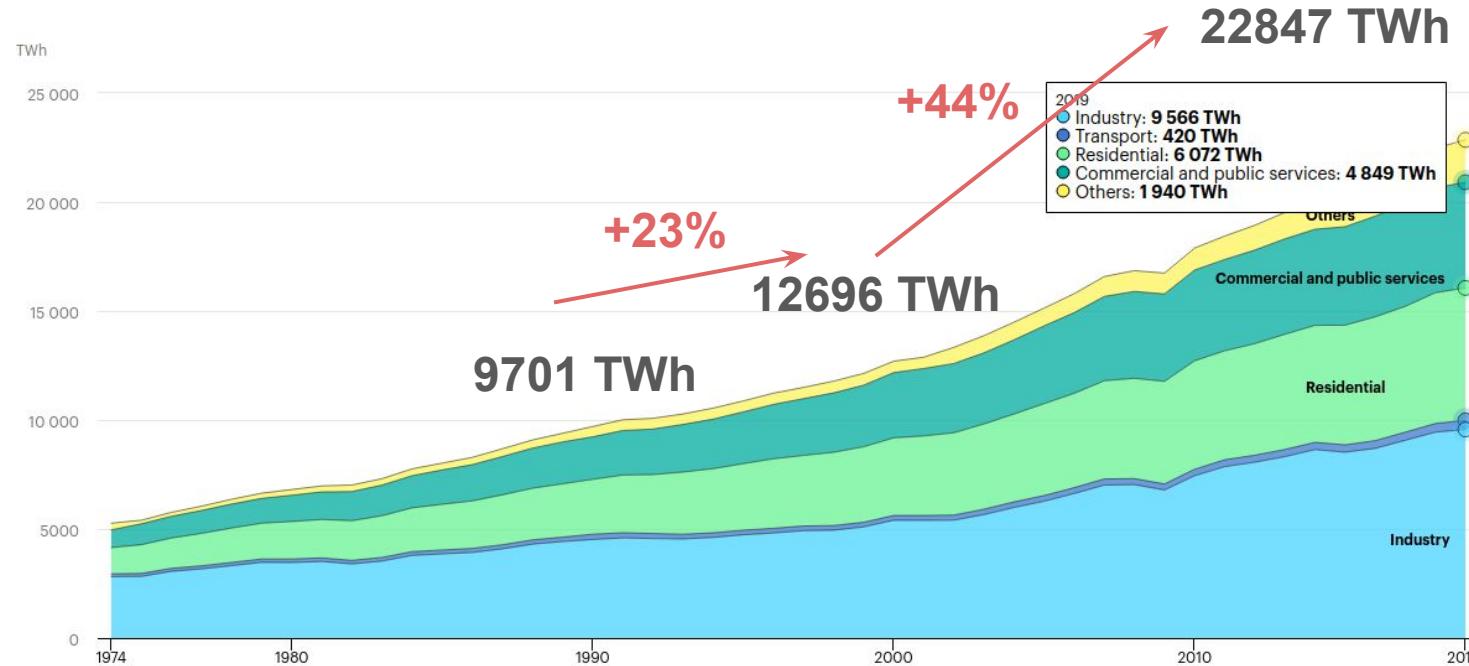
World electricity final consumption by sector, 1974-2019



<https://www.iea.org/reports/electricity-information-overview/electricity-consumption>

# Consommation d'énergie électrique mondiale

World electricity final consumption by sector, 1974-2019



<https://www.iea.org/reports/electricity-information-overview/electricity-consumption>

# Équivalents CO2 pour la production d'énergie électrique

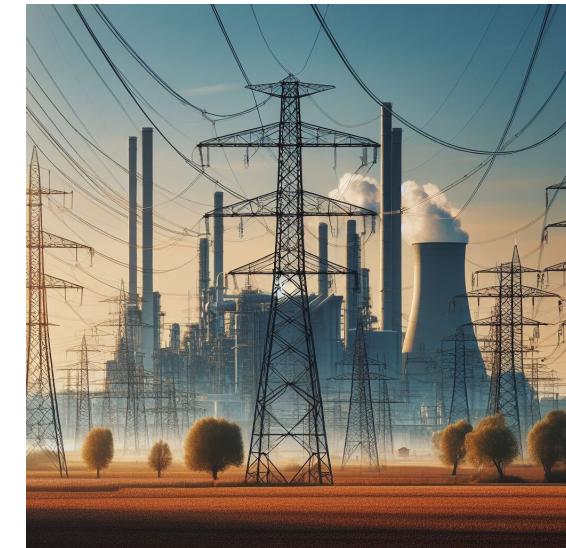
France 🚨👍 : 68 gCO2-eq/kWh [[Source](#)]

Europe : 251 gCO2-eq/kWh [[Source](#)]

USA : 192 gCO2-eq/kWh [[Source](#)]

Moyenne mondiale : 475gCO2-eq/kWh [[Source](#)]

On voit ici de grandes disparités entre les régions du monde ⇒ **Mix Électrique**



# Équivalents CO2 pour la production d'énergie électrique

France 🚨👍 : 68 gCO2-eq/kWh [[Source](#)]

Europe : 251 gCO2-eq/kWh [[Source](#)]

USA : 192 gCO2-eq/kWh [[Source](#)]

Moyenne mondiale : 475gCO2-eq/kWh [[Source](#)]



Pas mal non ? C'est français.

On voit ici de grandes disparités entre les régions  
du monde ⇒ Mix Électrique

# Équivalents CO2 pour la production d'énergie électrique

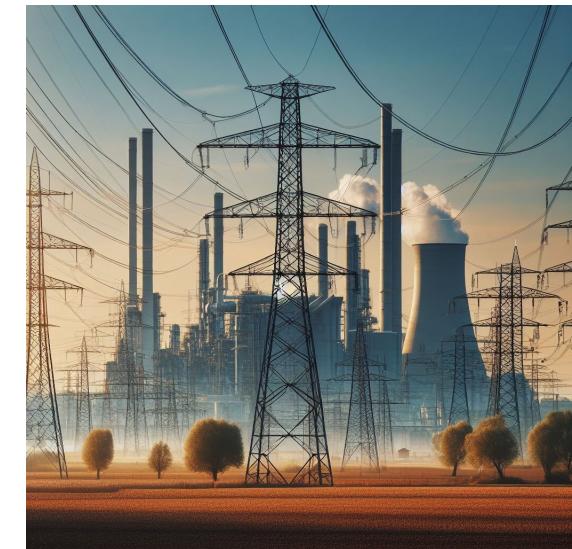
France 🚨👍 : **68 gCO2-eq/kWh** [[Source](#)]

Europe : 251 gCO2-eq/kWh [[Source](#)]

USA : 192 gCO2-eq/kWh [[Source](#)]

Moyenne mondiale : **475gCO2-eq/kWh** [[Source](#)]

On voit ici de grandes disparités entre les régions du monde ⇒ **Mix Électrique**



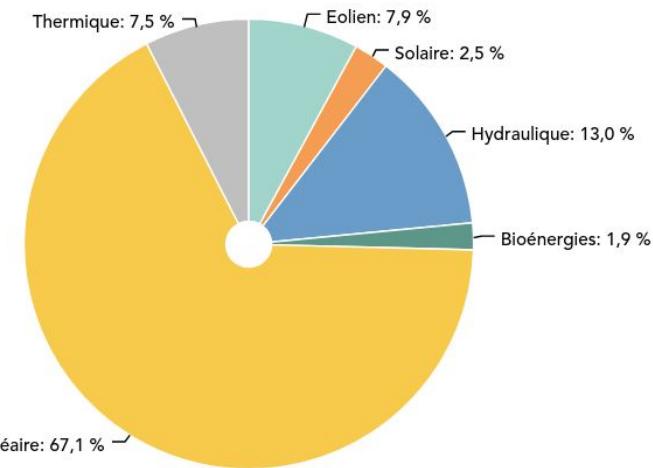
# Mix électrique

**Mix Électrique** = l'ensemble des moyens de production d'électricité à l'échelle d'une zone géographique.



**Mix Énergétique** = l'ensemble des sources d'énergies primaires utilisées à l'échelle d'une zone géographique (production électricité, transport, industrie, etc.).

Mix électrique en 2020 en France



[[Bilan Électrique RTE](#)]

# Énergies primaires utilisées en France VS production électrique

**Consommation d'énergie primaire en France en 2020 :**

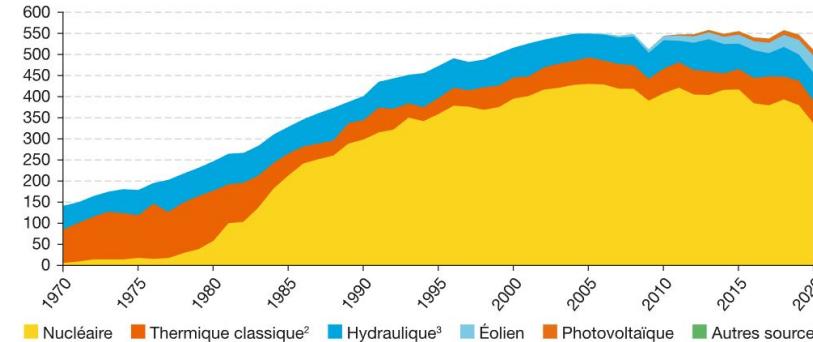
**2650 TWh**

**Production d'électricité en 2020 : 510 TWh**

## PRODUCTION NETTE D'ÉLECTRICITÉ

Total : 510 TWh en 2020

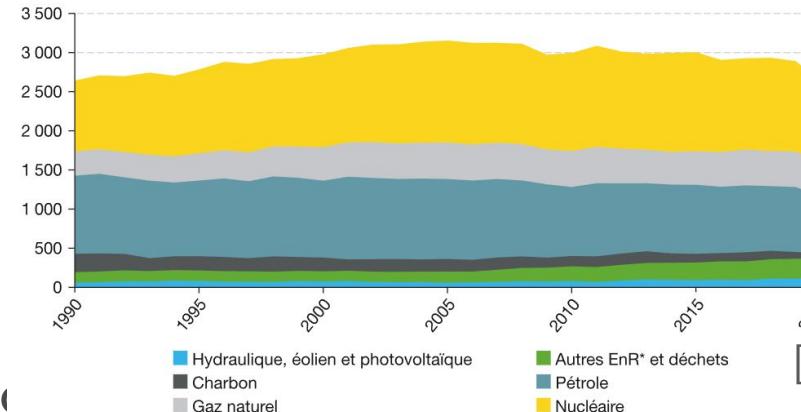
En TWh<sup>1</sup>



## CONSOMMATION D'ÉNERGIE PRIMAIRE PAR ÉNERGIE

Total : 2 650 TWh en 2020 (données corrigées des variations climatiques)

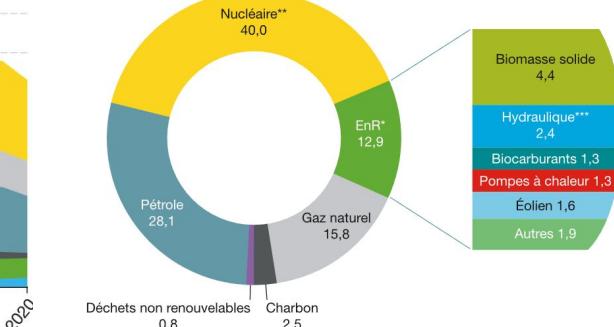
En TWh (données corrigées des variations climatiques)



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

Total : 2 571 TWh en 2020 (données non corrigées des variations climatiques)

En % (données non corrigées des variations climatiques)



[Données ministère de la transition écologique - Bilan énergétique]

# Mix électrique - Type d'énergies

**Énergies renouvelables** : énergies non limitées dont le renouvellement est suffisamment rapide à l'échelle du temps humain.

**Énergies non renouvelables** : énergies qui se renouvellent moins vite que ce que l'on ne les consomme à l'échelle du temps humain.

# Mix électrique - Type d'énergies

**Énergies renouvelables** ⇒ **Énergies**

**intermittentes** : la disponibilité du flux varie dans le temps sans possibilité de contrôle (vent, ensoleillement, marée, etc.)

**Non émettrices de CO<sub>2</sub>** (en production) et **renouvelables**, mais fort impact sur la gestion du réseau dû à **l'intermittence** ⇒ **Besoin de stockage ou d'adaptation des autres moyens de production** ⇒ **STEP**



# Mix électrique - Type d'énergies

**Énergies renouvelables** ⇒ **Énergies intermittentes** : la disponibilité du flux varie dans le temps sans possibilité de contrôle (vent, ensoleillement, marée, etc.)

**Non émettrices de CO<sub>2</sub>** (en production) et **renouvelables**, mais fort impact sur la gestion du réseau dû à **l'intermittence** ⇒ **Besoin de stockage ou d'adaptation des autres moyens de production** ⇒ **STEP**

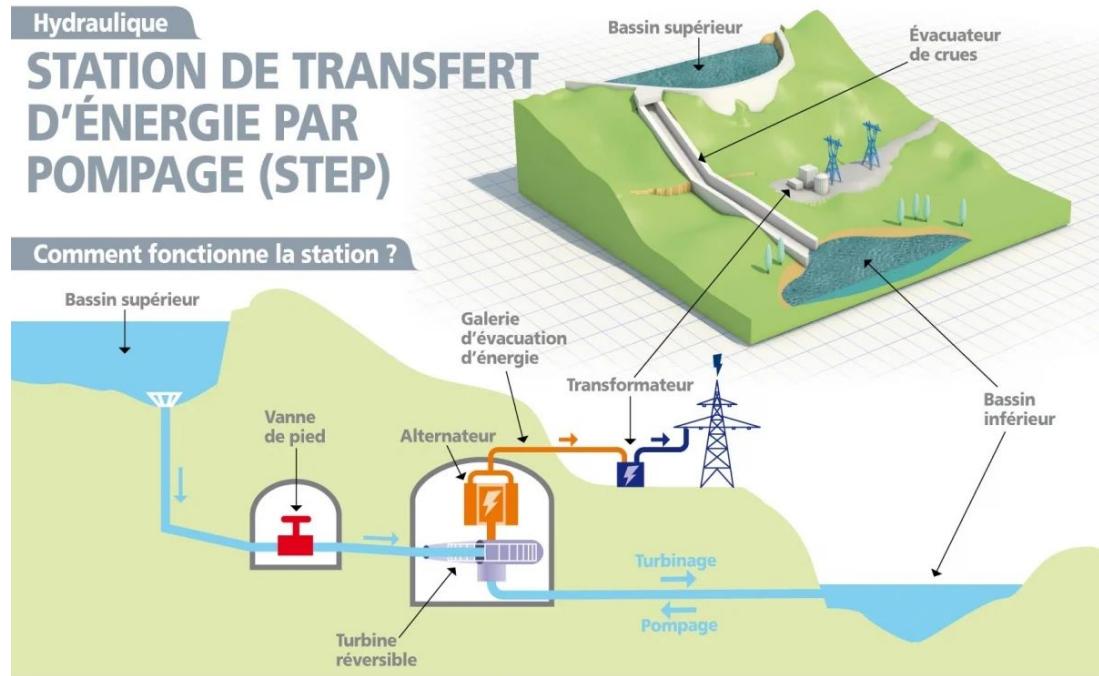
⚠ **EXCEPTION** : l'énergie hydraulique (barrage) et géothermique ⇒ outils de production renouvelables, non-intermittents et pilotables



# Mix électrique - Type d'énergies

**Énergies renouvelables** ⇒

**Non émettrices de CO<sub>2</sub>** (en production) et **renouvelables** mais fort impact sur la gestion du réseau dû à **l'intermittence**  
⇒ **Besoin de stockage ou d'adaptation des autres moyens de production** ⇒ **Station de Transfert d'Énergie par Pompage-Turbinage (STEP)**



# Mix électrique - Type d'énergies

**Énergies renouvelables** ⇒

**Non émettrices de CO<sub>2</sub>** (en production) et **renouvelables**, mais fort impact sur la gestion du réseau dû à **l'intermittence**  
⇒ **Besoin de stockage ou d'adaptation des autres moyens de production** ⇒ **Station de Transfert d'Énergie par Pompage-Turbinage (STEP)**



STEP de Revin dans les Ardennes en France

# Mix électrique - Type d'énergies

**Énergies non renouvelables :** ⇒ **Énergies pilotables** : la disponibilité du flux est fixée et peut-être pilotée en fonction de la demande (charbon, gaz, nucléaire, fioul, etc.)

**Émettrices de CO<sub>2</sub>** (en production) et **non renouvelables**, mais permettent une gestion **pilotable et adaptable** de la production électrique

Centrale à gaz naturel / charbon de Saint Avold en France



Centrale nucléaire du Penly en France

# Mix électrique - Type d'énergies

**Énergies non renouvelables :** ⇒ **Énergies**

**pilotables** : la disponibilité du flux est fixée et peut-être pilotée en fonction de la demande

**Émettrices de CO<sub>2</sub>** (en production) et **non renouvelables**, mais permettent une gestion **pilotable et adaptable** de la production électrique

Centrale à gaz de Saint Avold en France



⚠ **EXCEPTION** : l'énergie nucléaire ☢ ⇒ outil de production non renouvelable, mais stocks d'uranium en grande quantité, dense, pilotable et décarbonée. Productrice de déchets liés à la fission mais recyclables pour partie en MOX



Centrale nucléaire du Penly en France

# Mix électrique - Facteur de charge

“Le **facteur de charge** est le rapport entre l'énergie électrique effectivement produite sur une période donnée et l'énergie qu'elle aurait produite si elle avait fonctionné à sa puissance nominale durant la même période.” Wikipedia

Facteur charge =  $F_c$

Énergie réellement produite =  $E_{pr}$

Énergie théoriquement produite à puissance nominale =  $E_{pn}$

$$F_c = E_{pr} / E_{pn}$$

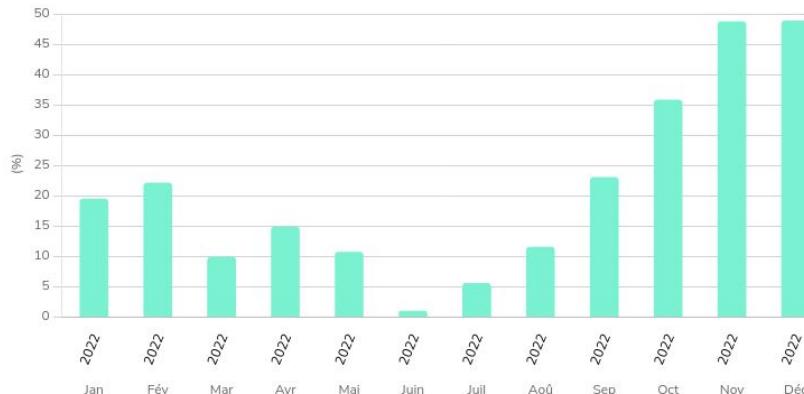
Centrale à gaz de Saint Avold en France



Centrale nucléaire du Penly en France

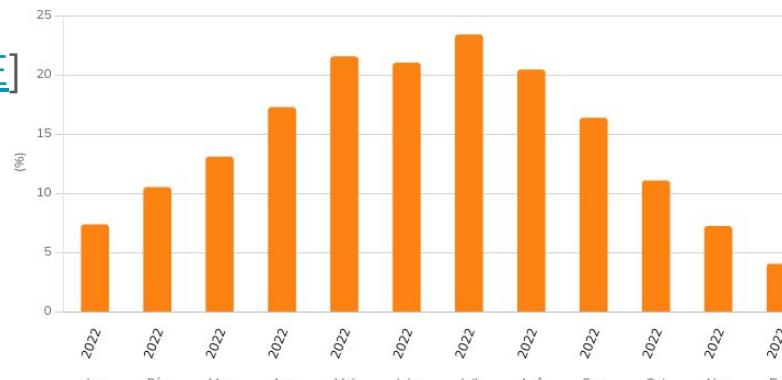
# Mix électrique - Facteur de charge

Facteur de charge du parc de production éolien en France



Dernière mise à jour le : 21 décembre 2023 à 17:12

Facteur de charge solaire



Dernière mise à jour le : 21 décembre 2023 à 17:12

Légende et filtres

Masquer

Annuel  MensuelEolien terrestre (évolution)  Eolien en mer (évolution)

Facteur de charge moyen

2023  2022  2021  2020  20192018  2017  2016

Voir plus

Légende et filtres

Masquer

Annuel  Mensuel

Facteur de charge moyen

2023  2022  2021  2020  20192018  2017  2016

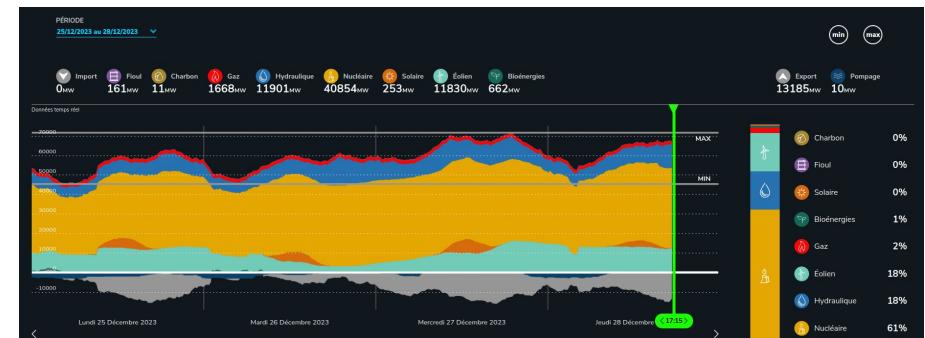
Voir plus

# Gestion de la production électrique

Produire de l'électricité à grande échelle n'est pas simple, car **la production doit suivre au plus près la demande d'énergie, et ce**, sous les contraintes suivantes :

- produire du 230V / 50Hz stable
- éviter l'effondrement du réseau électrique et minimiser les coupures
- s'adapter aux productions intermittentes des EnR
- s'adapter à une consommation non-régulière dans la journée

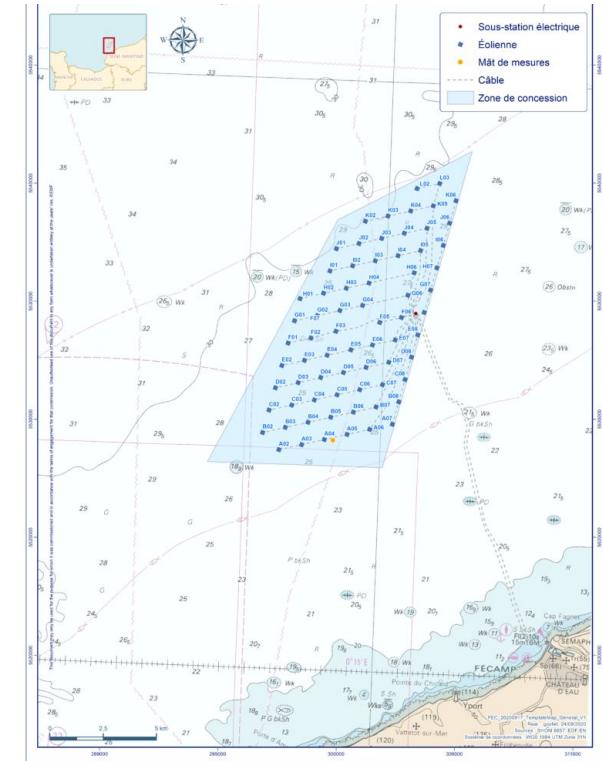
[Démonstration avec le site éCO2mix de RTE]



## Mix électrique 100% EnR, une utopie ? - Exemple avec l'emprise au sol

Parc Éolien de Fécamp :

- 71 éoliennes offshore
- Éolienne de 7MW Siemens SWT-7.0-154 [[fiche technique](#)]
- Puissance totale 497MW
- Surface globale 60km<sup>2</sup> [[Site du parc Éolien](#)]



## Mix électrique 100% EnR, une utopie ? - Exemple avec l'emprise au sol

Centrale nucléaire de Cattenom :

- 4 Réacteurs à eau pressurisée de 1300MW chacun (palier P'4)
- Surface globale de 415 hectares soit  $4,15\text{km}^2$  [[Site EDF](#)]
- Un des plus grands sites de production nucléaire de France



Centrale nucléaire de Cattenom en France

## Mix électrique 100% EnR, une utopie ? - Exemple avec l'emprise au sol

Centrale nucléaire de Cattenom  : Parc Éolien de Fécamp  :

- $P = 4 * 1300 \text{MW} = 5200 \text{MW}$
- $S = 4,15 \text{km}^2$
- $P = 497 \text{MW}$
- $S = 60 \text{km}^2$

## Mix électrique 100% EnR, une utopie ? - Exemple avec l'emprise au sol

Centrale nucléaire de Cattenom  : Projet Éolien de Fécamp  :

- $P = 4 * 1300 \text{ MW} = 5200 \text{ MW}$
- $S = 4,15 \text{ km}^2$
- $P = 497 \text{ MW}$
- $S = 60 \text{ km}^2$

$P_{\text{Surfacique}} = P/S$

$$= 5200 \text{ MW} / 4,15 \text{ km}^2$$

$$= \mathbf{1253 \text{ MW/km}^2}$$

## Mix électrique 100% EnR, une utopie ? - Exemple avec l'emprise au sol

Centrale nucléaire de Cattenom  : Projet Éolien de Fécamp  :

- $P = 4 * 1300 \text{MW} = 5200 \text{MW}$
- $S = 4,15 \text{km}^2$

$$P_{\text{Surfacique}} = P/S$$

$$= 5200 \text{MW} / 4,15 \text{ km}^2$$

$$= \mathbf{1253 \text{MW/km}^2}$$

- $P = 497 \text{MW}$
- $S = 60 \text{km}^2$

$$P_{\text{Surfacique}} = P/S$$

$$= 497 \text{MW} / 60 \text{km}^2$$

$$= \mathbf{8,28 \text{MW/km}^2}$$

## Mix électrique 100% EnR, une utopie ? - Exemple avec l'emprise au sol

Centrale nucléaire de Cattenom  : Projet Éolien de Fécamp  :

- $P = 4 * 1300 \text{ MW} = 5200 \text{ MW}$
- $S = 4,15 \text{ km}^2$

$$P_{\text{Surfacique}} = P/S$$

$$= 5200 \text{ MW} / 4,15 \text{ km}^2$$

$$= 1253 \text{ MW/km}^2$$

- $P = 497 \text{ MW}$
- $S = 60 \text{ km}^2$

$$P_{\text{Surfacique}} = P/S$$

$$= 497 \text{ MW} / 60 \text{ km}^2$$

$$= 8,28 \text{ MW/km}^2$$

Rapport de 151

## Mix électrique 100% EnR, une utopie ? - Exemple avec l'emprise au sol

Centrale nucléaire de Cattenom

- $P = 4 * 1300 \text{ MW} =$
- $S = 4,15 \text{ km}^2$

$P_{\text{Surfacique}} = P/S$

$$= 5200 \text{ MW/km}^2$$

$$= 1253 \text{ MW/km}^2$$



de Fécamp :

W

P/S

$$= 497 \text{ MW} / 60 \text{ km}^2$$

$$= 8,28 \text{ MW/km}^2$$

Rapport de 151  
OOF

## Mix électrique 100% EnR, une utopie ? - Exemple avec l'emprise au sol

Centrale nucléaire de Cattenom :  de l'écoCamp :

- $P = 4 * 1300 \text{ MW} =$
- $S = 4,15 \text{ km}^2$

$$P_{\text{Surfacique}} = P/S$$

$$= 5200 \text{ MW}$$

$$= 1253 \text{ MW/km}^2$$

$$= 497 \text{ MW / } 60 \text{ km}^2$$

$$= 8,28 \text{ MW/km}^2$$

Rapport de 151

Mix électrique 100% EnR, une utopie ? - Exemple avec l'énergie sur 1 an en tenant compte **du facteur de charge**

Centrale nucléaire de Cattenom  : Parc Éolien de Fécamp  :

- $P = 4 * 1300 \text{MW} = 5200 \text{MW}$
- $S = 4,15 \text{km}^2$
- $Fc = 68,3\%$  [[Wikipedia](#)]
- $P = 497 \text{MW}$
- $S = 60 \text{km}^2$
- $Fc = 21,9\%$  (Fc moyen offshore France 2022) [[RTE](#)]

$$E = P * 365 * 24 * Fc$$

$$= 5200 \text{MW} * 365 * 24 * 0,683$$

$$= 31,1 \text{TWh}$$

$$E = P * 365 * 24 * Fc$$

$$= 497 \text{MW} * 365 * 24 * 0,219$$

$$= 0.95 \text{TWh}$$

**Rapport de 33**

Mix électrique 100% EnR, une utopie ? - Exemple avec l'énergie sur 1 an en tenant compte **du facteur de charge**

Centrale nucléaire de Cattenom  : Parc Éolien de Fécamp  :

- $P = 4 * 1300 \text{ MW}$
- $S = 4,15 \text{ km}^2$
- $Fc = 68,3\%$

**Pour produire la même quantité d'énergie que celle produite en 1 ans sur  $4,15 \text{ km}^2$  il faut  $1980 \text{ km}^2$  d'éoliennes ( $33 * 60 \text{ km}^2$ )**

c moyen offshore  
[[RTE](#)]

$$E = P * 365 * 24 * Fc$$

$$= 5200 \text{ MW} * 365 * 24 * 0,683$$

$$= 31,1 \text{ TWh}$$

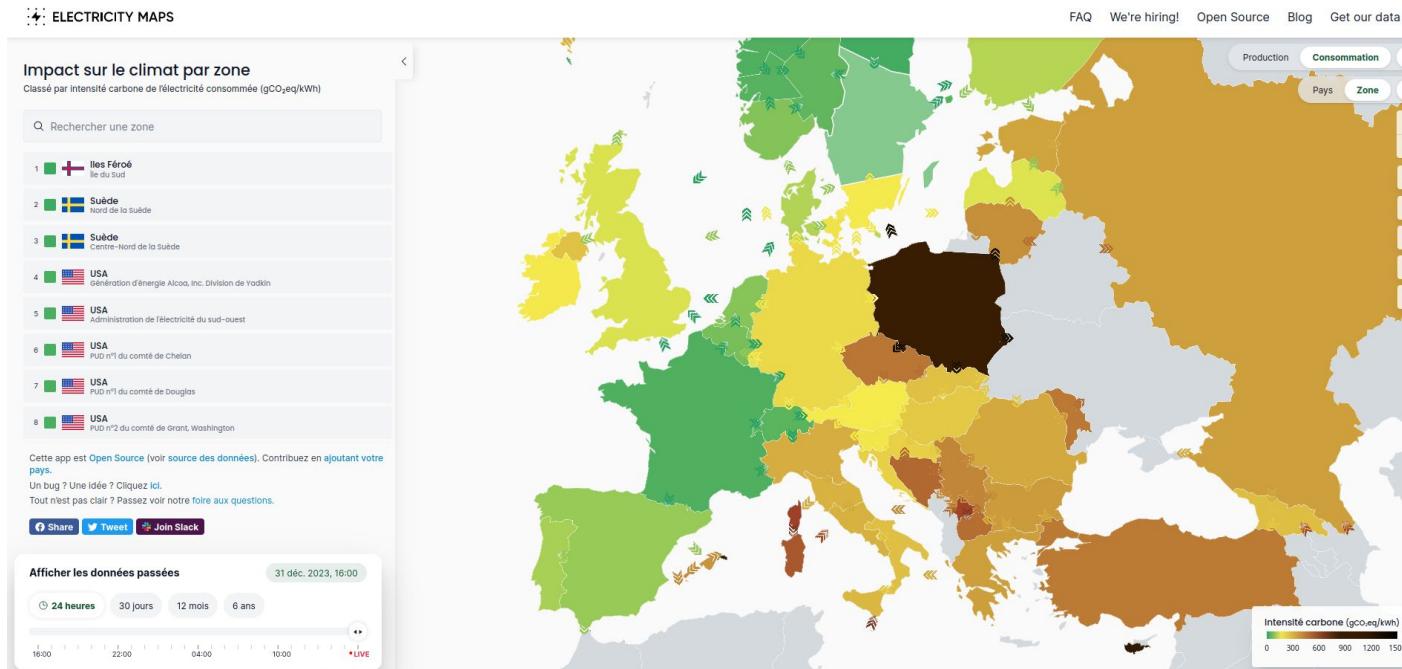
$$E = P * 365 * 24 * Fc$$

$$= 497 \text{ MW} * 365 * 24 * 0,219$$

$$= 0.95 \text{ TWh}$$

**Rapport de 33**

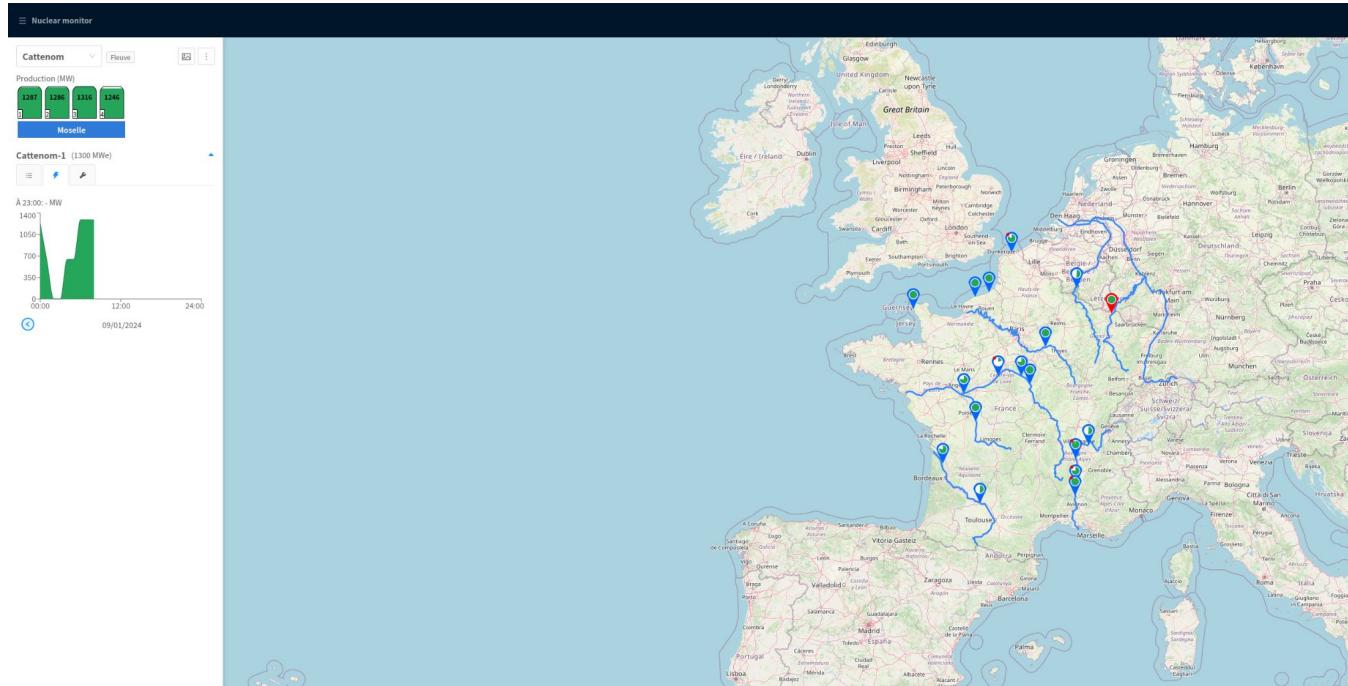
# Visualiser le mix électrique et les émissions de CO2 dans le monde: Electricity Map



<https://app.electricitymaps.com/map>

Dispose d'une API  
(payante)

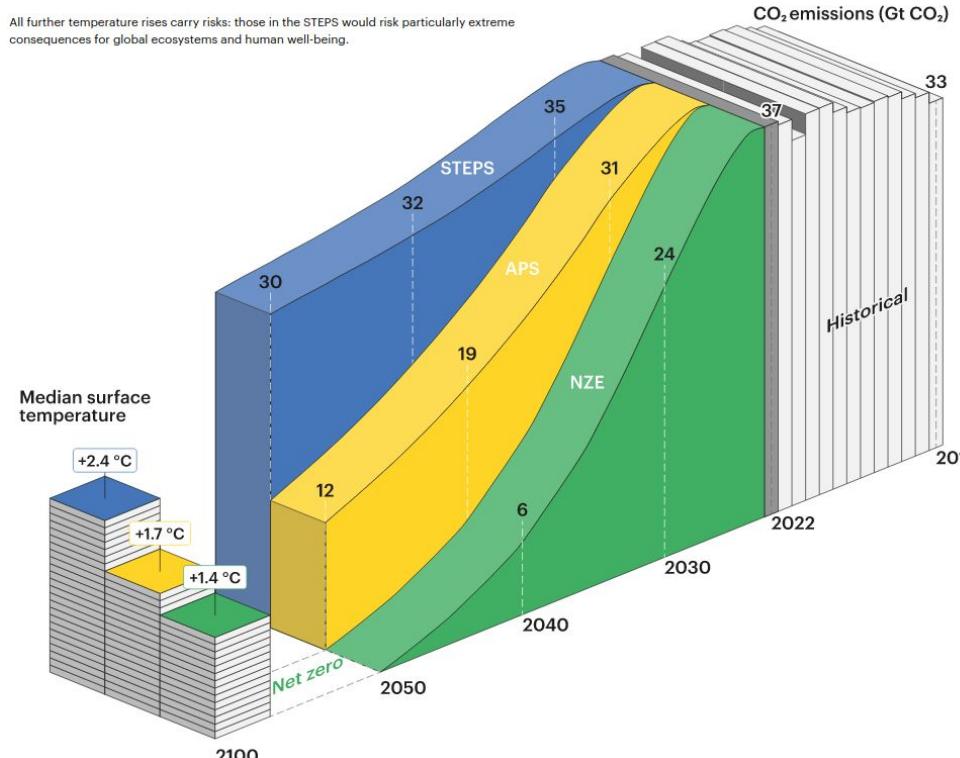
# Visualiser les réacteurs nucléaires en France et leurs productions : Nuclear Monitor



[https://nuclear-monit  
or.fr/](https://nuclear-monitor.fr/)

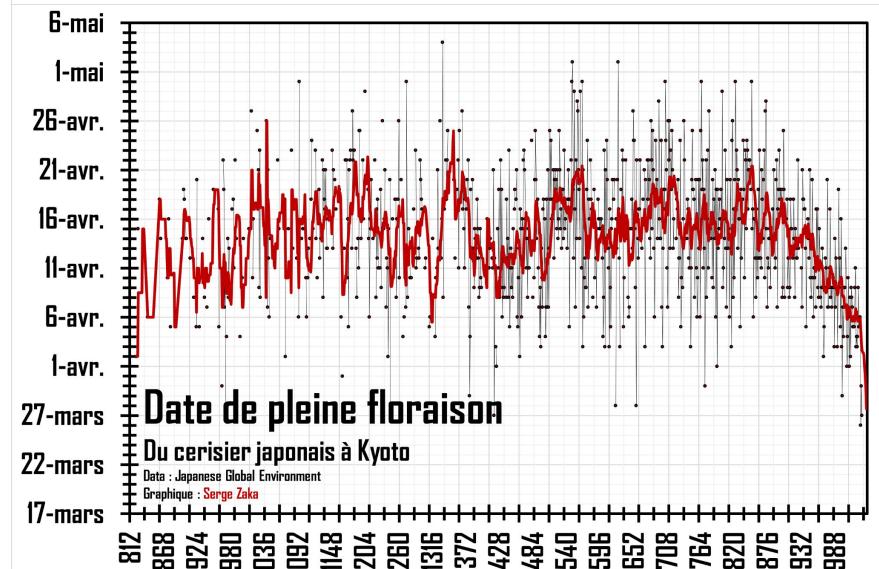
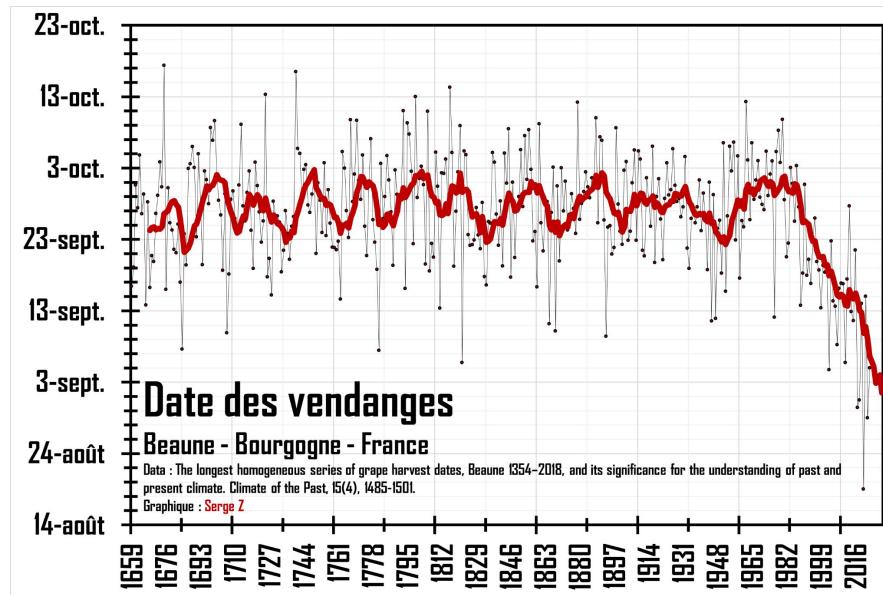
# Transition écologique - trajectoires possibles

All further temperature rises carry risks: those in the STEPS would risk particularly extreme consequences for global ecosystems and human well-being.



[[World Energy Outlook 2023](#),  
[IEA](#)]

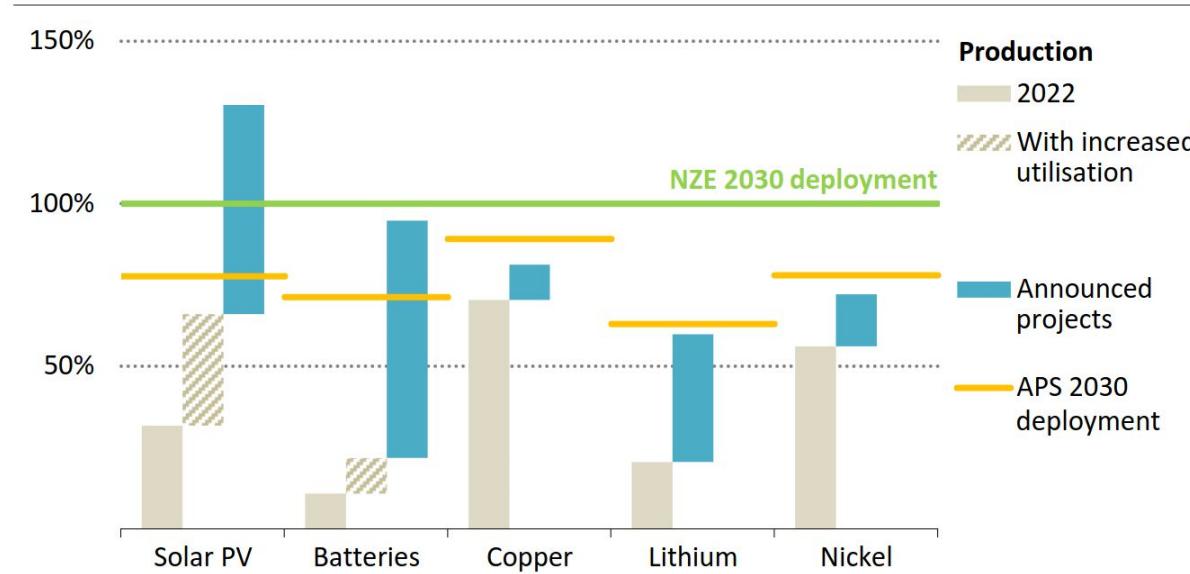
# Conséquences du réchauffement climatique sur la floraison



[[Graphiques de Serge Zaka](#)]

# Transition écologique - Incertitudes géopolitiques et supply-chain

**Figure 4.18 ▷ Announced project throughput, and deployment and supply needs for key clean energy technologies and minerals in 2030**

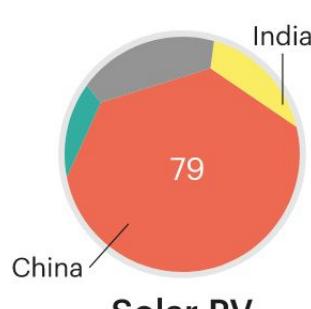


[[World Energy Outlook 2023](#),  
[IEA](#)]

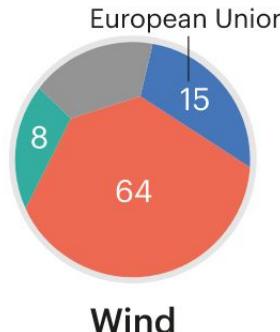
IEA. CC BY 4.0.

## Transition écologique - Incertitudes géopolitiques et supply-chain

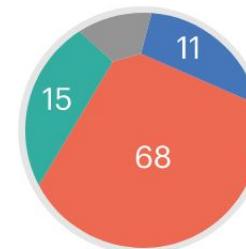
Clean technology supply chain geography in 2030



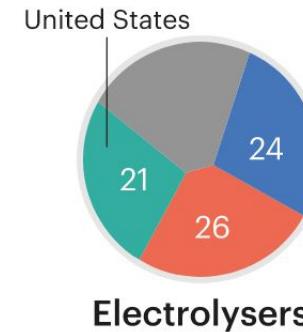
Solar PV



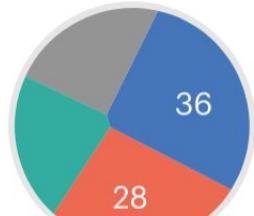
Wind



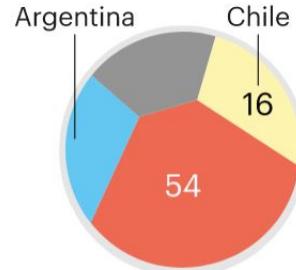
Batteries



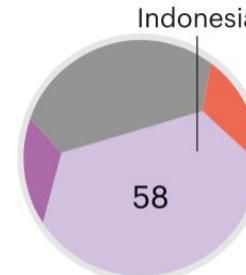
Electrolysers



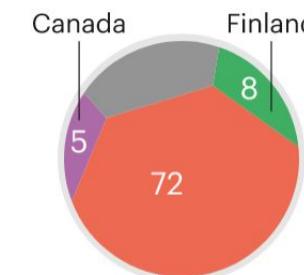
Heat pumps



Lithium chemical



Refined nickel



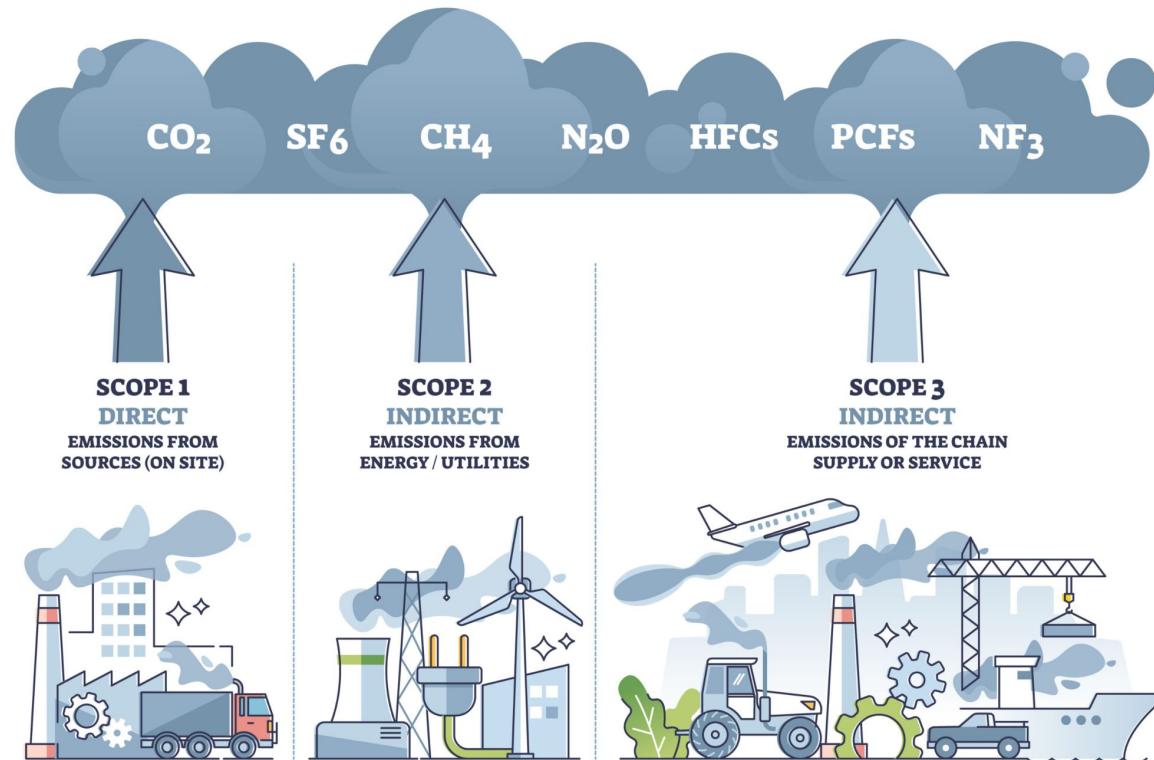
Refined cobalt

[[World Energy Outlook 2023, IEA](#)]

# Consommation d'énergie des *Information and Communication Technologies*

# Bilan carbone des ICTs : les scopes

## SCOPES OF EMISSIONS



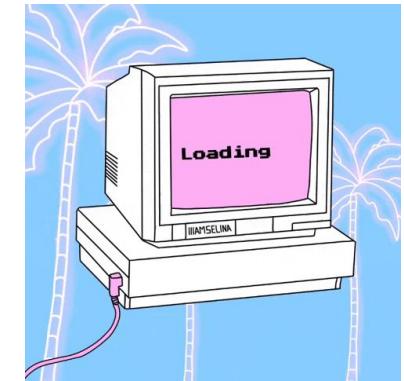
# Consommation d'énergie des ICTs

Consommation d'énergie mondiale : 22848 TWh en 2019  
(chiffre de l'IEA)

- ⇒ +1.7% par rapport à 2018
- ⇒ +44% par rapport à 2000

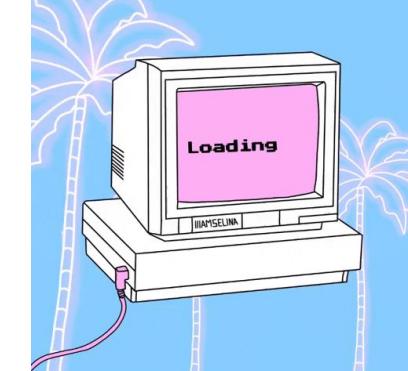
**Émissions de CO<sub>2</sub> des ICTs : 1,8% à 3,9% des émissions mondiale de CO<sub>2</sub>**

Les chiffres donnés ici sont issus de la publication de Freitag et al., “*The real climate and transformative impact of ICT: A critique of estimates, trends, and regulations*”, 2021 [[Freitag2021](#)]



# Consommation d'énergie des ICTs

Émissions de CO2 des ICTs : **1,8% à 3,9%** des émissions mondiale de CO2 [[Freitag2021](#)]



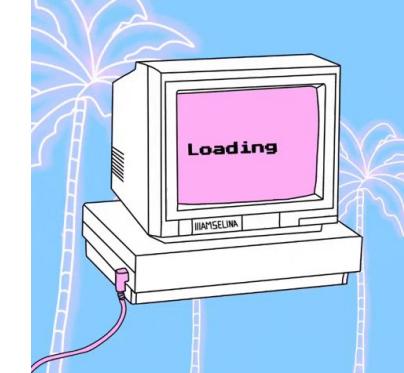
Émissions de CO2 de l'aviation en 2018 : **2,4%**

[[Lee et al., "The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018". 2018](#)]



# Consommation d'énergie des ICTs

Émissions de CO2 des ICTs : **1,8% à 3,9%** des émissions mondiale de CO2 [[Freitag2021](#)]



Émissions de CO2 de l'aviation en 2018 : **2,4%**

[[Lee et al., “The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018”, 2018](#)]

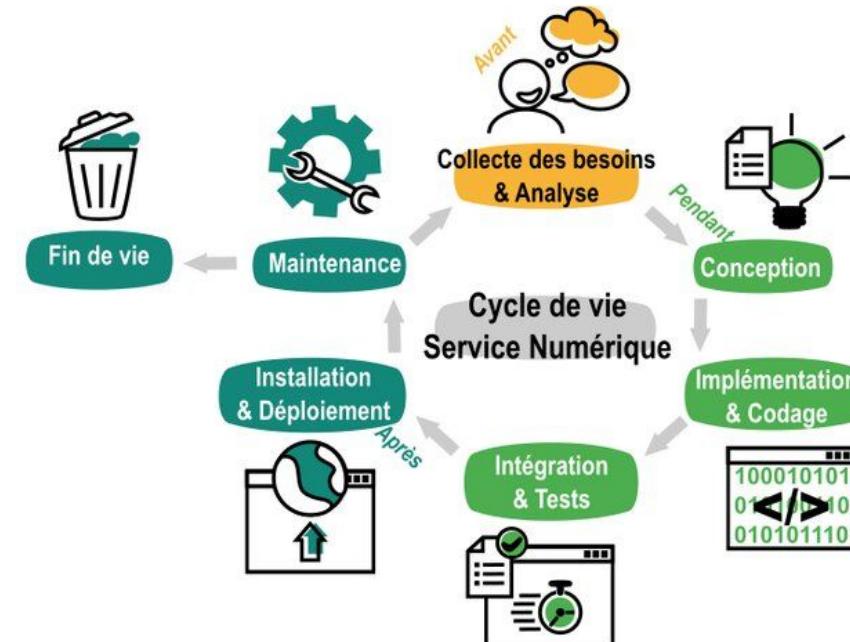


Les émissions des ICTs sont très difficiles à estimer “précisément”

# Quantification de la consommation d'énergie des ICTs

**Les émissions des ICTs sont très difficiles à estimer “précisément”**

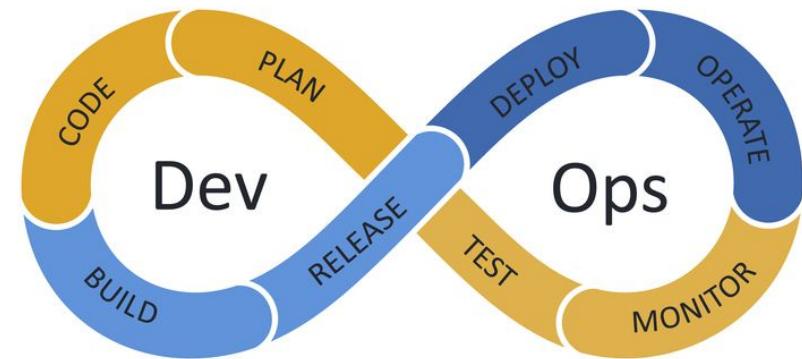
- Frontière considérée : software, périphériques, utilisateurs, réseaux, charge d'utilisation du matériel, etc...
- Part du cycle de vie matériel considéré : fabrication, utilisation, recyclage, réutilisation, etc...
- Part du cycle de vie logiciel également
- Mix électrique



# Quantification de la consommation d'énergie des ICTs

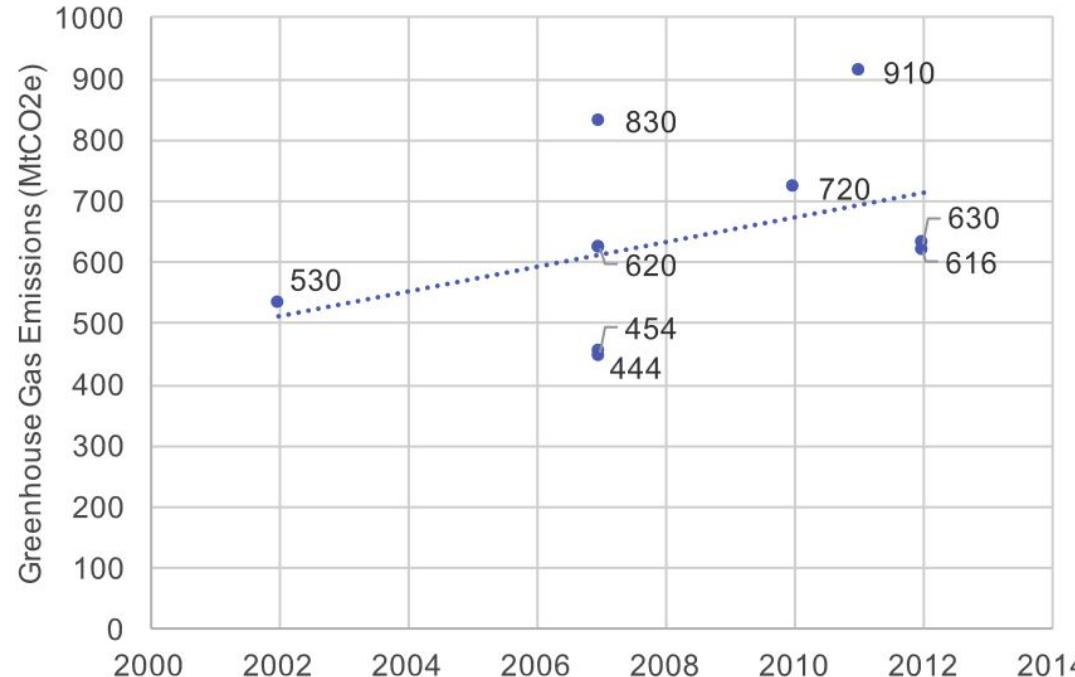
Les émissions des ICTs sont très difficiles à estimer “précisément”

- Frontière considérée : software, périphériques, utilisateurs, réseaux, charge d'utilisation du matériel, etc...
- Part du cycle de vie matériel considéré : fabrication, utilisation, recyclage, réutilisation, etc...
- Part du cycle de vie logiciel également
- Mix électrique
- **Cycle itératif et incrémental complexifie le calcul**



# Émissions de CO<sub>2</sub> des ICTs, estimations et incertitudes

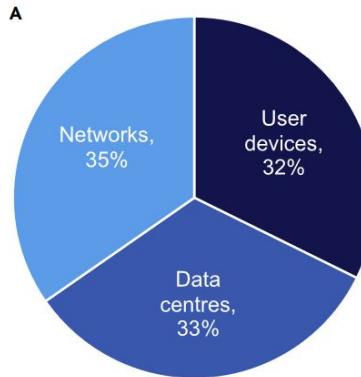
[Freitag2021]



# Contribution aux émissions de CO<sub>2</sub> des ICTs (TV exclue)

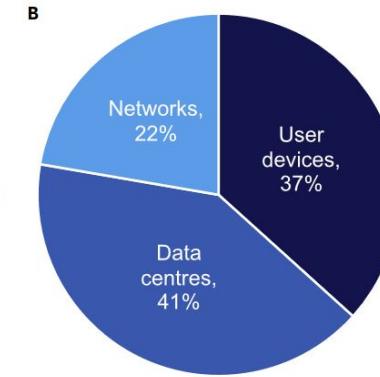
(A) [Andrae and Edler](#)

(2015): 2020 best case (total of 623 MtCO<sub>2</sub>e)



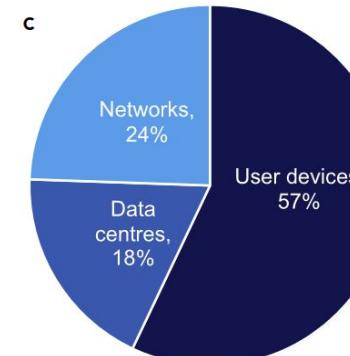
(B) [Belkhir and Elmeliqi](#)

(2018): 2020 average (total of 1,207 MtCO<sub>2</sub>e)



(C) Malmodin (2020):

2020 estimate (total of 690 MtCO<sub>2</sub>e)

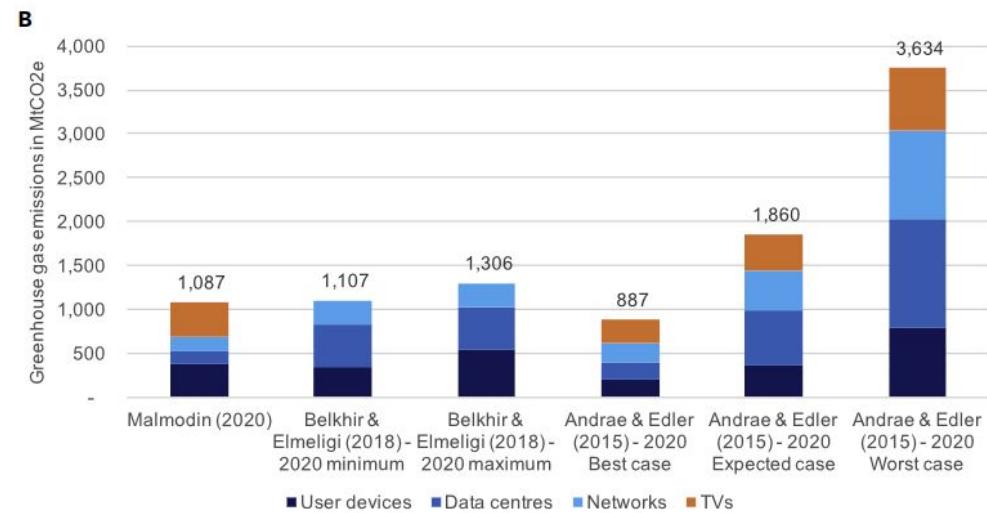
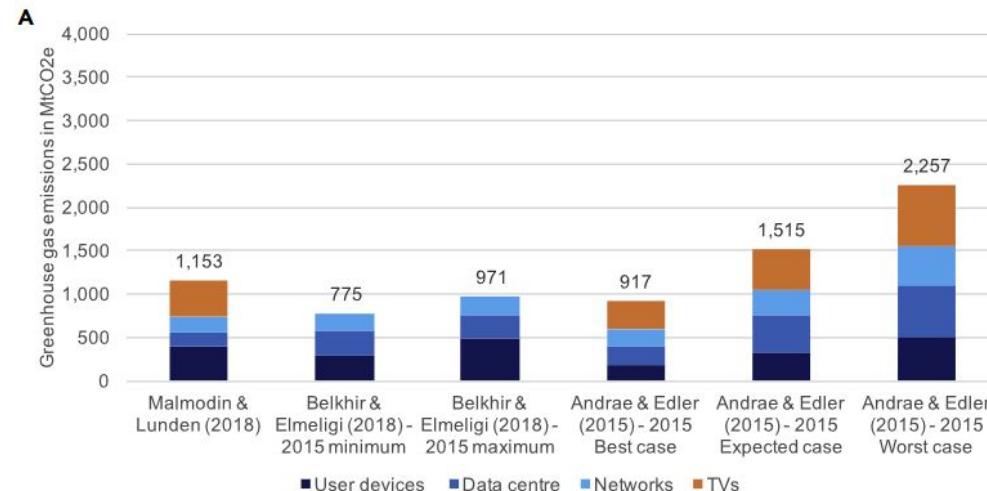


[Freitag2021]

# Émissions de CO<sub>2</sub> des ICTs, estimations et incertitudes

Estimations des  
émissions des ICTs en  
2015 (A) et 2020 (B)

[Freitag2021]



# Augmentation de l'utilisation des ICTs

[Agence  
Internationale  
de l'énergie -  
Data Centres  
and Data  
Transmission  
Networks]

	2015	2022	Change
Internet users	3 billion	5.3 billion	+78%
Internet traffic	0.6 ZB	4.4 ZB	+600%
Data centre workloads	180 million	800 million	+340%
Data centre energy use (excluding crypto)	200 TWh	240-340 TWh	+20-70%
Crypto mining energy use	4 TWh	100-150 TWh	+2300-3500%
Data transmission network energy use	220 TWh	260-360 TWh	+18-64%

## Conclusion

- **Augmentation très forte du besoin en énergie depuis 1980**
- Nécessité de réduire nos émissions afin de **tendre vers une réduction la plus importante possible des GES**
- Incertitude sur l'approvisionnement et les technologies de transition écologique
- Pas de solution unique pour réduire les émissions de la production électrique ⇒ mixité à trouver dans les sources décarbonées / pilotables et non pilotables
- **Forte augmentation de l'utilisation des ICTs**
- Incertitudes sur les estimations des ICTs et donc un **besoin de quantifier, évaluer** pour avoir des **leviers d'actions**