Transition énergétique : Quelques chiffres et notions clés

Laurent Zimmer

▶ **To cite this version:**

Laurent Zimmer. Transition énergétique : Quelques chiffres et notions clés. Master. Transition énergétique : quelques chiffres et notions clés, Université Paris Saclay, France. 2022. ⟨hal-04955705⟩

HAL Id: hal-04955705

https://hal.science/hal-04955705v1

Submitted on 19 Feb 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

HAL Authorization

Transition énergétique :

Quelques chiffres et notions clés.

Laurent Zimmer CNRS, CentraleSupélec, Université Paris Saclay

16 novembre 2023

SOMMAIRE

Introduction

Quelques unités à comprendre

Quelques chiffres clés

Production d’énergie

Stockage d’énergie

Utilisation de l’énergie

Conclusions

Objectifs :

- Permettre de comprendre les unités utilisées en énergétique
- Avoir une connaissance sur les productions / consommations au niveau national, européen et mondial
- Comprendre le principe physique de fonctionnement des différentes sources d'énergie
- Comprendre les enjeux actuels et futurs
- Mieux cerner les problèmes futurs à résoudre

Energie :

Grandeur caractérisant un système physique, gardant la même valeur au cours de toutes les transformations internes du système (**loi de conservation**) et exprimant sa capacité à modifier l'état d'autres systèmes avec lesquels il entre en interaction. (Unité SI le **joule**.) (Larousse)

Energie :

Grandeur caractérisant un système physique, gardant la même valeur au cours de toutes les transformations internes du système (**loi de conservation**) et exprimant sa capacité à modifier l'état d'autres systèmes avec lesquels il entre en interaction. (Unité SI le **joule**.) (Larousse)

Caractère d'un système matériel capable de produire du **travail**. Les formes de l'énergie : **énergie mécanique, électrique, thermique, chimique, nucléaire**. Énergies renouvelables, provenant de sources naturelles non épuisables (soleil, vent, marée…). Énergies non renouvelables (ENR). Énergie verte : transformation de l'énergie solaire par les plantes. Énergies fossiles (charbon, gaz naturel, pétrole). (Le petit Robert)

Energie :

Grandeur caractérisant un système physique, gardant la même valeur au cours de toutes les transformations internes du système (**loi de conservation**) et exprimant sa capacité à modifier l'état d'autres systèmes avec lesquels il entre en interaction. (Unité SI le **joule**.) (Larousse)

Caractère d'un système matériel capable de produire du **travail**. Les formes de l'énergie : **énergie mécanique, électrique, thermique, chimique, nucléaire**. Énergies renouvelables, provenant de sources naturelles non épuisables (soleil, vent, marée…). Énergies non renouvelables (ENR). Énergie verte : transformation de l'énergie solaire par les plantes. Énergies fossiles (charbon, gaz naturel, pétrole). (Le petit Robert)

Capacité qu'a un corps, un système, de produire un travail. Les différentes formes d'énergie. Énergie mécanique, chimique, électrique, nucléaire. Le débit d'énergie des étoiles et des galaxies est principalement dû aux réactions thermonucléaires. Dans le système international, l'unité de mesure de l'énergie est le joule. Énergie cinétique, que peut fournir un corps, un système en mouvement, du fait même de ce mouvement. Énergie potentielle, qui est en puissance dans un système et peut être libérée par un changement d'état. Principe de conservation de l'énergie, principe selon lequel **l'énergie totale d'un système isolé reste constante.** (Dictionnaire de l'Académie Française)

Energie :

Dans le domaine de la vie

Energie :

Dans le domaine de la vie

Jean-Jacques HUBLIN, Traits de vie et contraintes énergétiques au cours de l'évolution humaine, cours du collège de France 2017-2018, *chaire de Paléoanthropologie*

Les contraintes **énergétiques** représentent un enjeu majeur pour l'adaptation des organismes qui doivent extraire de **l'énergie** de leur environnement en quantité suffisante, sous la forme de nourriture pour les animaux. Cette **énergie** doit ensuite être allouée aux différentes fonctions vitales. Le coût de ces fonctions varie selon les organes impliqués et d'une espèce à l'autre. L'acquisition des aliments et leur digestion elles-mêmes représentent un coût **énergétique** important.

Energie :

Dans le domaine de la vie

Jean-Jacques HUBLIN, Traits de vie et contraintes énergétiques au cours de l'évolution humaine, cours du collège de France 2017-2018, *chaire de Paléoanthropologie*

Les contraintes **énergétiques** représentent un enjeu majeur pour l'adaptation des organismes qui doivent extraire de **l'énergie** de leur environnement en quantité suffisante, sous la forme de nourriture pour les animaux. Cette **énergie** doit ensuite être allouée aux différentes fonctions vitales. Le coût de ces fonctions varie selon les organes impliqués et d'une espèce à l'autre. L'acquisition des aliments et leur digestion elles-mêmes représentent un coût **énergétique** important.

Dans la société

Energie :

Dans le domaine de la vie

Jean-Jacques HUBLIN, Traits de vie et contraintes énergétiques au cours de l'évolution humaine, cours du collège de France 2017-2018, *chaire de Paléoanthropologie*

Les contraintes **énergétiques** représentent un enjeu majeur pour l'adaptation des organismes qui doivent extraire de **l'énergie** de leur environnement en quantité suffisante, sous la forme de nourriture pour les animaux. Cette **énergie** doit ensuite être allouée aux différentes fonctions vitales. Le coût de ces fonctions varie selon les organes impliqués et d'une espèce à l'autre. L'acquisition des aliments et leur digestion elles-mêmes représentent un coût **énergétique** important.

Dans les sciences appliquées

Objectif du cours

Dans la société

05 janvier > 23 février 2022

Christian GOLLIER

CHAIRE AVENIR COMMUN DURABLE
(CHAIRE ANNUELLE 2021-2022)

Fin du mois et fin du monde :
comment concilier économie et écologie ?

Cours & séminaires

Les cours auront lieu les mercredis de 10 h 00 à 11 h 00.
Ils seront suivis par les séminaires de 11 h 15 à 12 h 15
Amphithéâtre Maurice Halbwachs

Les cours et séminaires sont gratuits, en accès libre, sans inscription préalable.
Passe sanitaire requis, masque obligatoire

05 janvier 2022
Du sang, des larmes et de la sueur :
les coûts de la transition énergétique

SOMMAIRE

Introduction

Quelques unités à comprendre

Quelques chiffres clés

Production d’énergie

Stockage d’énergie

Utilisation de l’énergie

Conclusions

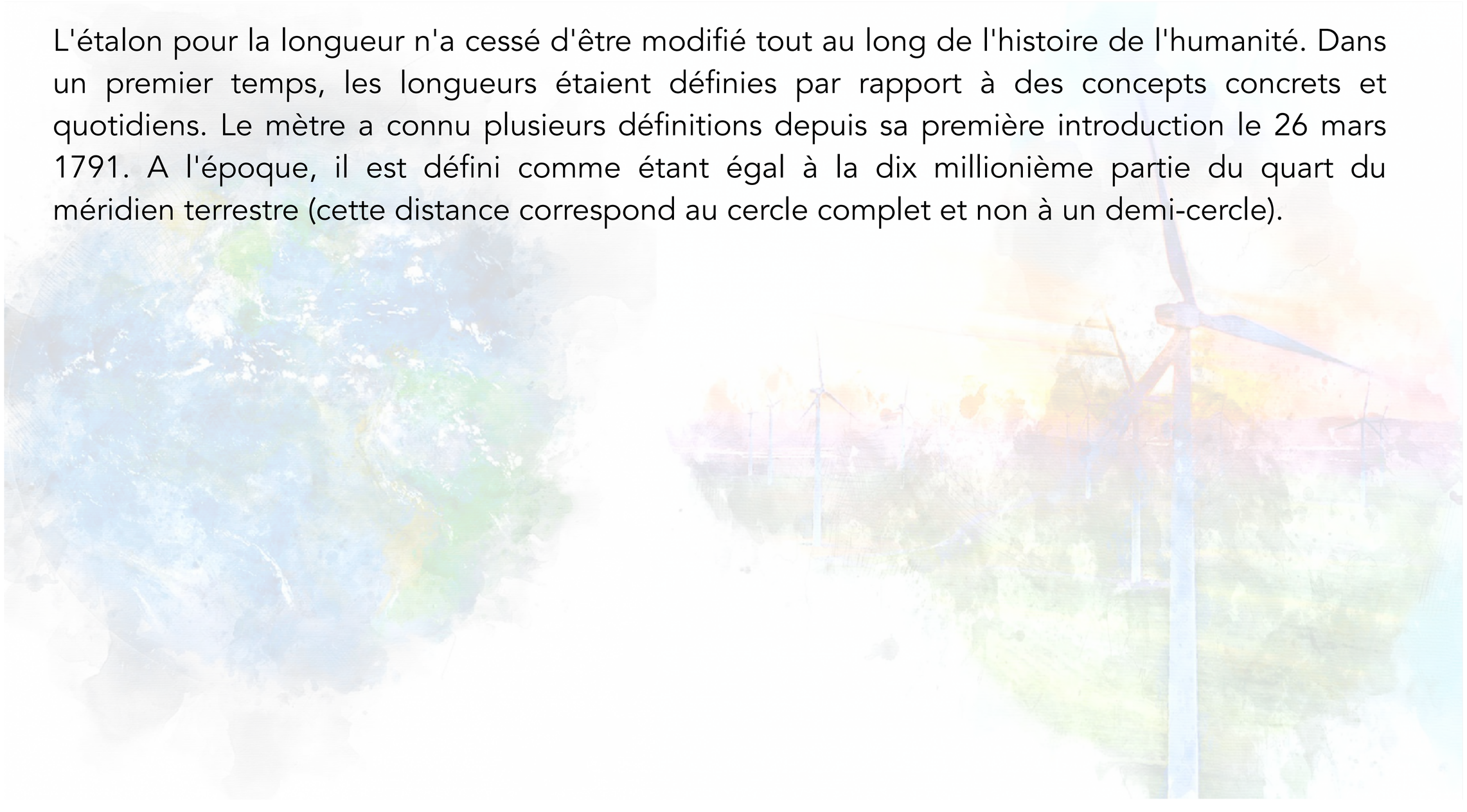
Quelques unités à comprendre

Unités de base

Longueur	m	mètre
Masse	kg	kilogramme
Durée	s	seconde
Température	K	Kelvin
Quantité de matière	mol	mole
Courant électrique	A	Ampère
Intensité lumineuse	cd	candela

Définition du mètre

L'étalon pour la longueur n'a cessé d'être modifié tout au long de l'histoire de l'humanité. Dans un premier temps, les longueurs étaient définies par rapport à des concepts concrets et quotidiens. Le mètre a connu plusieurs définitions depuis sa première introduction le 26 mars 1791. A l'époque, il est défini comme étant égal à la dix millionième partie du quart du méridien terrestre (cette distance correspond au cercle complet et non à un demi-cercle).



Définition du mètre

L'étalon pour la longueur n'a cessé d'être modifié tout au long de l'histoire de l'humanité. Dans un premier temps, les longueurs étaient définies par rapport à des concepts concrets et quotidiens. Le mètre a connu plusieurs définitions depuis sa première introduction le 26 mars 1791. A l'époque, il est défini comme étant égal à la dix millionième partie du quart du méridien terrestre (cette distance correspond au cercle complet et non à un demi-cercle).

Les dernières définitions sont relativement récentes et concernent moins des objets concrets et facilement concevables.

Définition du mètre

L'étalon pour la longueur n'a cessé d'être modifié tout au long de l'histoire de l'humanité. Dans un premier temps, les longueurs étaient définies par rapport à des concepts concrets et quotidiens. Le mètre a connu plusieurs définitions depuis sa première introduction le 26 mars 1791. A l'époque, il est défini comme étant égal à la dix millionième partie du quart du méridien terrestre (cette distance correspond au cercle complet et non à un demi-cercle).

Les dernières définitions sont relativement récentes et concernent moins des objets concrets et facilement concevables.

En 1960, il était défini comme étant fondé sur la transition entre les niveaux 2p_10 et 5d5 de l'atome de krypton 86.

Définition du mètre

L'étalon pour la longueur n'a cessé d'être modifié tout au long de l'histoire de l'humanité. Dans un premier temps, les longueurs étaient définies par rapport à des concepts concrets et quotidiens. Le mètre a connu plusieurs définitions depuis sa première introduction le 26 mars 1791. A l'époque, il est défini comme étant égal à la dix millionième partie du quart du méridien terrestre (cette distance correspond au cercle complet et non à un demi-cercle).

Les dernières définitions sont relativement récentes et concernent moins des objets concrets et facilement concevables.

En 1960, il était défini comme étant fondé sur la transition entre les niveaux 2p_10 et 5d5 de l'atome de krypton 86.

Actuellement, et ce depuis la 17ème Conférence Générale des Poids et Mesures (1983), il correspond à la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de 1/299792458 de seconde.

Définition du mètre

L'étalon pour la longueur n'a cessé d'être modifié tout au long de l'histoire de l'humanité. Dans un premier temps, les longueurs étaient définies par rapport à des concepts concrets et quotidiens. Le mètre a connu plusieurs définitions depuis sa première introduction le 26 mars 1791. A l'époque, il est défini comme étant égal à la dix millionième partie du quart du méridien terrestre (cette distance correspond au cercle complet et non à un demi-cercle).

Les dernières définitions sont relativement récentes et concernent moins des objets concrets et facilement concevables.

En 1960, il était défini comme étant fondé sur la transition entre les niveaux 2p_10 et 5d5 de l'atome de krypton 86.

Actuellement, et ce depuis la 17ème Conférence Générale des Poids et Mesures (1983), il correspond à la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de 1/299792458 de seconde.

On peut constater que cette définition n'est pas intrinsèque malheureusement, car elle fait apparaître la notion de temps

Autres définitions

En 1997, la **définition de la seconde** se réfère à un atome de Césium 133 non pertubé, $\Delta\nu$, à une température de 0 K, c'est-à-dire au zéro absolu. Sa fréquence est égale à 9 192 631 770 [Hz] pour déterminer la seconde de façon aisément reproductible et précisément mesurable. Cela nécessite donc la définition de la température pour avoir accès à une définition du temps. Le fait d'imposer une transition à 0 [K] souligne le fait qu'à 300 [K], la transition en question subit un déplacement par rapport à sa valeur théorique. Cette correction a été apportée aux étalons primaires de fréquence et donc au Temps atomique international (TAI) à partir de 1997, quand elle a cessé d'être négligeable par rapport aux autres sources d'incertitude.

Depuis le 20 mai 2019, le **kilogramme** est défini en fixant la valeur numérique de la constante de Planck, h, égale à $6{,}62607015 \times 10^{-34}$[J.s], unité égale à [kg.m^2 . s^{-1}]. Le mètre et la seconde doivent donc être définis auparavant. Il est intéressant de noter que quatre des sept unités de base du Système international sont définies par rapport au kilogramme, donc sa stabilité et sa définition sont importantes.

Depuis le 20 mai 2019, la valeur du **Kelvin** est définie en fixant la valeur numérique de la constante de Boltzmann à exactement $1{,}380649 \times 10^{-23}$ [J.K^{-1}].

Force en Newton [N]

Une force **F** est

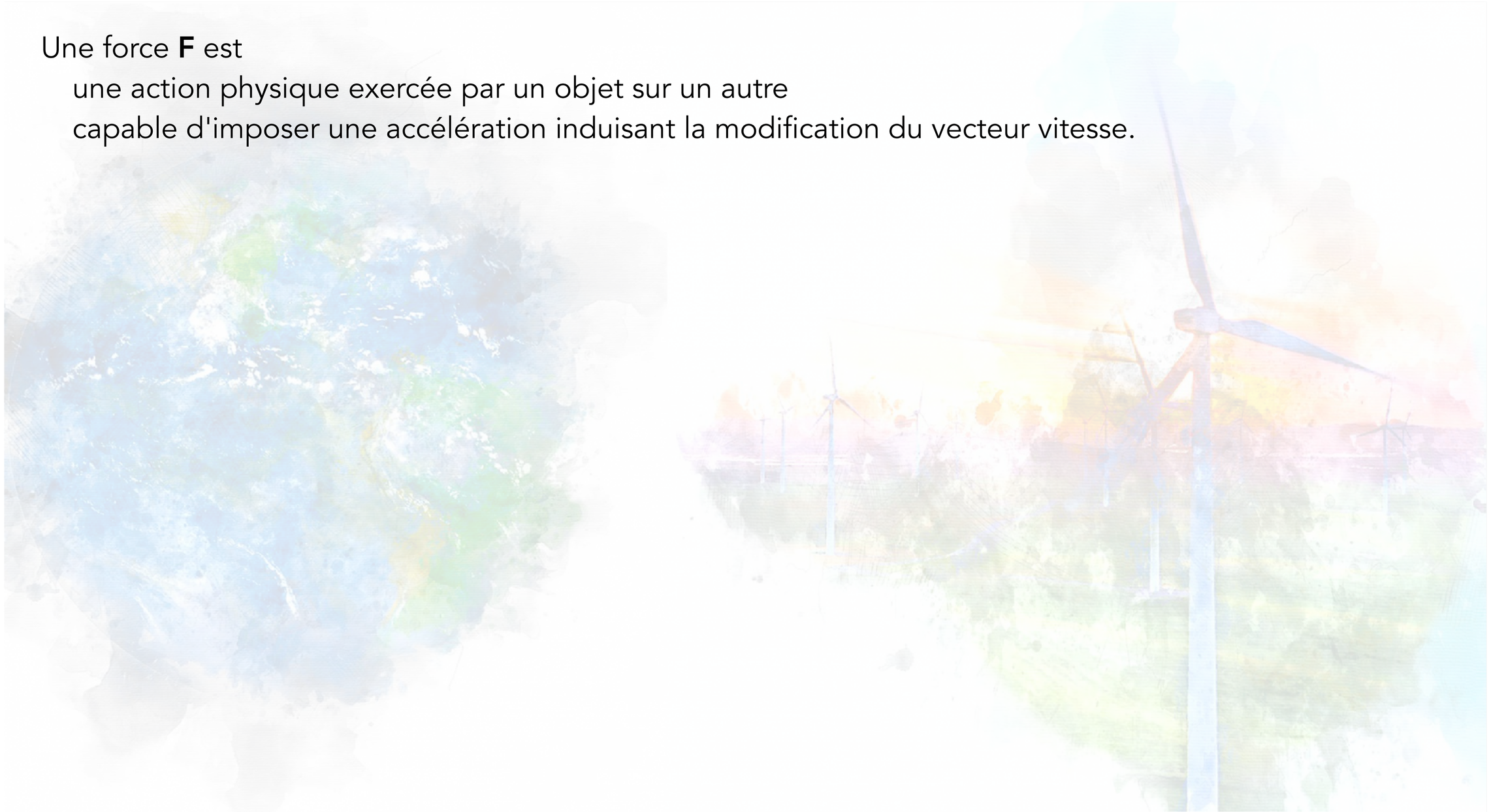
une action physique exercée par un objet sur un autre

Force en Newton [N]

Une force **F** est

une action physique exercée par un objet sur un autre

capable d'imposer une accélération induisant la modification du vecteur vitesse.



Force en Newton [N]

Une force **F** est

une action physique exercée par un objet sur un autre

capable d'imposer une accélération induisant la modification du vecteur vitesse.

Cette notion permet de relier directement la somme des forces exercées sur un objet et son accélération par le principe fondamental de la dynamique.

$$\sum \vec{F} = m \,.\, \vec{a}$$

où $\vec{a}$ correspond à l'accélération de l'objet étudié, de masse m.

Force en Newton [N]

Une force **F** est

une action physique exercée par un objet sur un autre

capable d'imposer une accélération induisant la modification du vecteur vitesse.

Cette notion permet de relier directement la somme des forces exercées sur un objet et son accélération par le principe fondamental de la dynamique.

$$\sum \vec{F} = m \,.\, \vec{a}$$

où $\vec{a}$ correspond à l'accélération de l'objet étudié, de masse m.

La grandeur de base de la force est ainsi une masse $\times$ une accélération.

Force en Newton [N]

Une force **F** est
une action physique exercée par un objet sur un autre
capable d'imposer une accélération induisant la modification du vecteur vitesse.

Cette notion permet de relier directement la somme des forces exercées sur un objet et son accélération par le principe fondamental de la dynamique.

$$\sum \vec{F} = m \,.\, \vec{a}$$

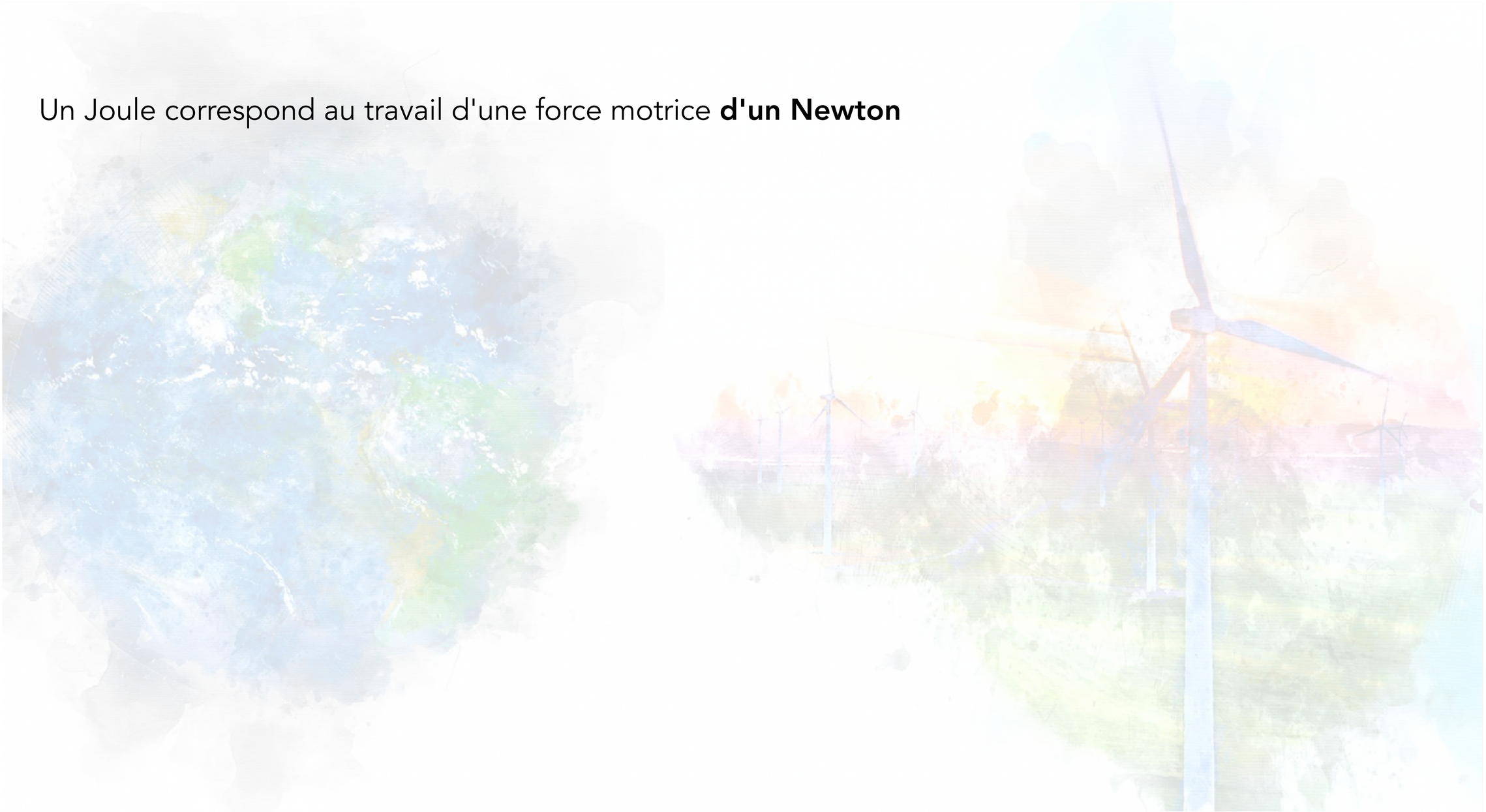
où $\vec{a}$ correspond à l'accélération de l'objet étudié, de masse m.

La grandeur de base de la force est ainsi une masse × une accélération.

Elle est donc homogène à des [kg.m.s^{-2}] et s'exprime en Newton [N].

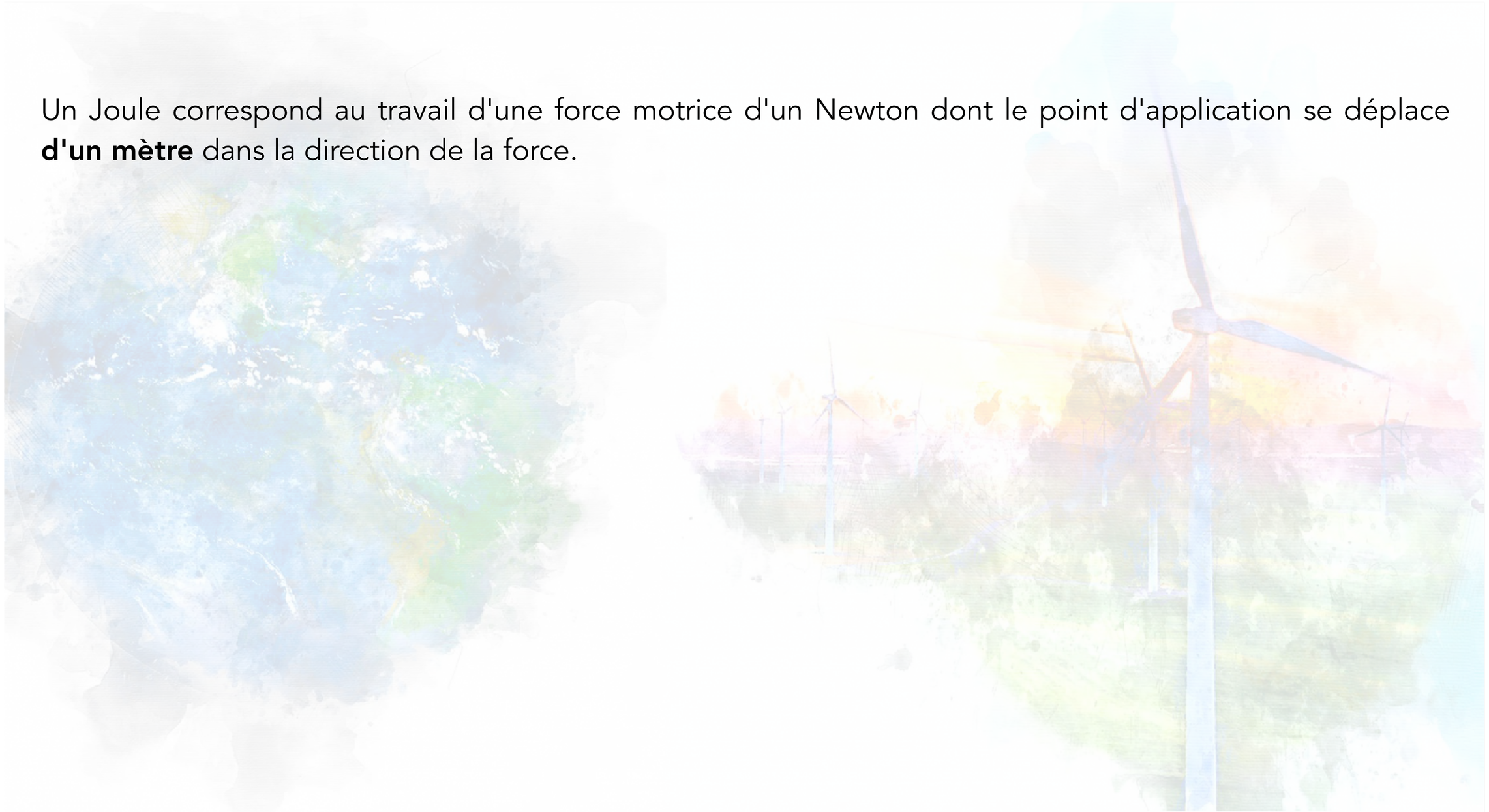
Energie en Joule [J]

Un Joule correspond au travail d'une force motrice **d'un Newton**



Energie en Joule [J]

Un Joule correspond au travail d'une force motrice d'un Newton dont le point d'application se déplace **d'un mètre** dans la direction de la force.



Energie en Joule [J]

Un Joule correspond au travail d'une force motrice d'un Newton dont le point d'application se déplace d'un mètre dans la direction de la force.

$$1\ [\mathrm{J}] = 1\ [\mathrm{N}] \times 1\ [\mathrm{m}]$$

Energie en Joule [J]

Un Joule correspond au travail d'une force motrice d'un Newton dont le point d'application se déplace d'un mètre dans la direction de la force.

$$1\ [\mathrm{J}] = 1\ [\mathrm{N}] \times 1\ [\mathrm{m}]$$

$$1\ [\mathrm{J}] = 1\ [\mathrm{kg.m.s^{-2}}] \times 1\ [\mathrm{m}]$$

Energie en Joule [J]

Un Joule correspond au travail d'une force motrice d'un Newton dont le point d'application se déplace d'un mètre dans la direction de la force.

$$1\ [\mathrm{J}] = 1\ [\mathrm{N}] \times 1\ [\mathrm{m}]$$

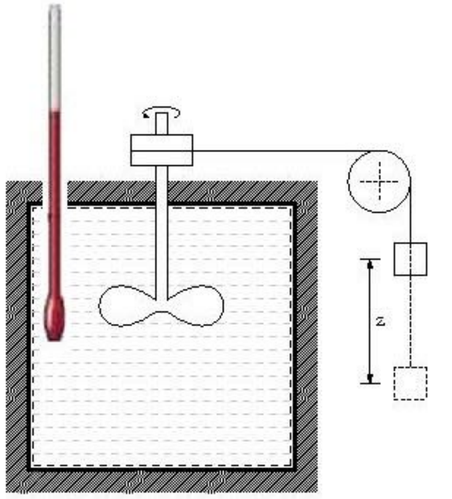
$$1\ [\mathrm{J}] = 1\ [\mathrm{kg.m.s^{-2}}] \times 1\ [\mathrm{m}]$$

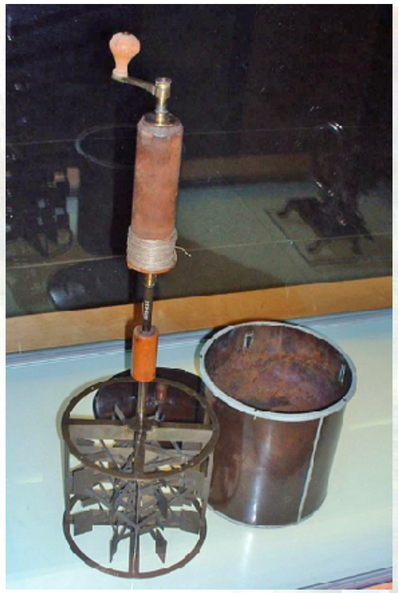
$$1\ [\mathrm{J}] = 1\ [\mathrm{kg.m^2 . s^{-2}}]$$

Expérience de Joule [J]

Le Joule a été utilisé en hommage à James Prescott JOULE (1818-1889) qui a démontré l'équivalence rigoureuse entre le travail mécanique (Force X longueur) et la chaleur.

L'expérience historique de Joule (1843) consiste à **chauffer de l'eau** dans une enceinte isolée thermiquement, par la **rotation d'une hélice**, entrainée par la chute d'un objet relié par un fil à une poulie. Un thermomètre permet de mesurer l'élévation de la température. Joule montra que la chaleur reçue par le liquide est égale, aux pertes près, au travail mécanique de la masse.





Energie en calorie [cal]

Auparavant, d'autres unités étaient utilisées pour déterminer des quantités d'énergie : la calorie.

Celle-ci ne s'intéressait qu'à une forme particulière de l'énergie : la chaleur (*calor*).

Energie en calorie [cal]

Auparavant, d'autres unités étaient utilisées pour déterminer des quantités d'énergie : la calorie.

Celle-ci ne s'intéressait qu'à une forme particulière de l'énergie : la chaleur (*calor*).

1 calorie correspond à l' énergie nécessaire à élever 1g d'eau de 14,5°C à 15,5°C.

1 cal= 4,1855 J

Energie en eV [eVl]

La valeur de l'électronvolt est définie comme étant l'énergie cinétique acquise par un électron accéléré depuis le repos par une différence de potentiel d'un volt

Symbole	Dénomination	Equivalence [J]	Domaine d'application usuelle
[ev]	électron-Volt	$1,602.10^{-19}$	Physique fondamentale.
[erg]	[erg]	10^{-7}	Unité d'énergie constitutive d'un système différent du Système international, appelé CGS (dont les unités de base sont le centimètre, le gramme et la seconde).

Puissance en Watt [W]

Un Watt correspond à l'utilisation d'une énergie de **1 Joule**

Puissance en Watt [W]

Un Watt correspond à l'utilisation d'une énergie de 1 Joule pendant **1 seconde**.

Puissance en Watt [W]

Un Watt correspond à l'utilisation d'une énergie de 1 Joule pendant 1 seconde.

$$1\ [\mathrm{W}] = \frac{1\ [\mathrm{J}]}{1\ [\mathrm{s}]}$$

Puissance en Watt [W]

Un Watt correspond à l'utilisation d'une énergie de **1 Joule** par seconde.

$$1\ [\mathrm{W}] = \frac{1\ [\mathrm{J}]}{1\ [\mathrm{s}]}$$

$$1\ [\mathrm{J}] = 1\ [\mathrm{kg.m^2\,.\,s^{-2}}]$$

Puissance en Watt [W]

Un Watt correspond à l'utilisation d'une énergie de **1 Joule** par seconde.

$$1\ [\mathrm{W}] = \frac{1\ [\mathrm{J}]}{1\ [\mathrm{s}]}$$

$$1\ [\mathrm{J}] = 1\ [\mathrm{kg.m^2\,.\,s^{-2}}]$$

$$1\ [\mathrm{W}] = 1\ [\mathrm{kg.m^2\,.\,s^{-3}}]$$

Ordres de grandeurs

yotta	**Y**	10^{24}	micro	**µ**	10^{-06}
zetta	**Z**	10^{21}	nano	**n**	10^{-09}
exa	**E**	10^{18}	pico	**p**	10^{-12}
péta	**P**	10^{15}	femto	**f**	10^{-15}
téra	**T**	10^{12}	atto	**a**	10^{-18}
giga	**G**	10^{09}	zepto	**z**	10^{-21}
méga	**M**	10^{06}	yocto	**y**	10^{-24}

D’autres unités usuelles d’énergie

- La tonne équivalent pétrole (TEP ou TOE en anglais) est une unité d'énergie définie comme la quantité d'énergie libérée par la combustion d'une tonne de pétrole brut.

D’autres unités usuelles d’énergie

- La tonne équivalent pétrole (TEP ou TOE en anglais) est une unité d'énergie définie comme la quantité d'énergie libérée par la combustion d'une tonne de pétrole brut.
  - 1 [toe] = 41,868 [GJ] (~100 g d’Uranium naturel ~ 0,7 % ^{235}U)

D’autres unités usuelles d’énergie

- La tonne équivalent pétrole (TEP ou TOE en anglais) est une unité d'énergie définie comme la quantité d'énergie libérée par la combustion d'une tonne de pétrole brut.
  - 1 [toe] = 41,868 [GJ] (~100 g d’Uranium naturel ~ 0,7 % ^{235}U)
- L’énergie dissipée par une puissance de 1 [kW] pendant 1 [h]

D’autres unités usuelles d’énergie

- La tonne équivalent pétrole (TEP ou TOE en anglais) est une unité d'énergie définie comme la quantité d'énergie libérée par la combustion d'une tonne de pétrole brut.
  - 1 [toe] = 41,868 [GJ] (~100 g d’Uranium naturel ~ 0,7 % ^{235}U)
- L’énergie dissipée par une puissance de 1 [kW] pendant 1 [h]
  - 1 [kWh] = 3,6 [MJ]

D’autres unités usuelles d’énergie

- La tonne équivalent pétrole (TEP ou TOE en anglais) est une unité d'énergie définie comme la quantité d'énergie libérée par la combustion d'une tonne de pétrole brut.
  - 1 [toe] = 41,868 [GJ] (~100 g d’Uranium naturel ~ 0,7 % ^{235}U)
- L’énergie dissipée par une puissance de 1 [kW] pendant 1 [h]
  - 1 [kWh] = 3,6 [MJ]
- Beaucoup de rapports récents utilisent le [TWh] comme unité de référence

D’autres unités usuelles d’énergie

- La tonne équivalent pétrole (TEP ou TOE en anglais) est une unité d'énergie définie comme la quantité d'énergie libérée par la combustion d'une tonne de pétrole brut.
  - 1 [toe] = 41,868 [GJ] (~100 g d’Uranium naturel ~ 0,7 % ^{235}U)
- L’énergie dissipée par une puissance de 1 [kW] pendant 1 [h]
  - 1 [kWh] = 3,6 [MJ]
- Beaucoup de rapports récents utilisent le [TWh] comme unité de référence
  - 1 [TWh] = 3,6 x 10^{15} [J]

D’autres unités usuelles d’énergie

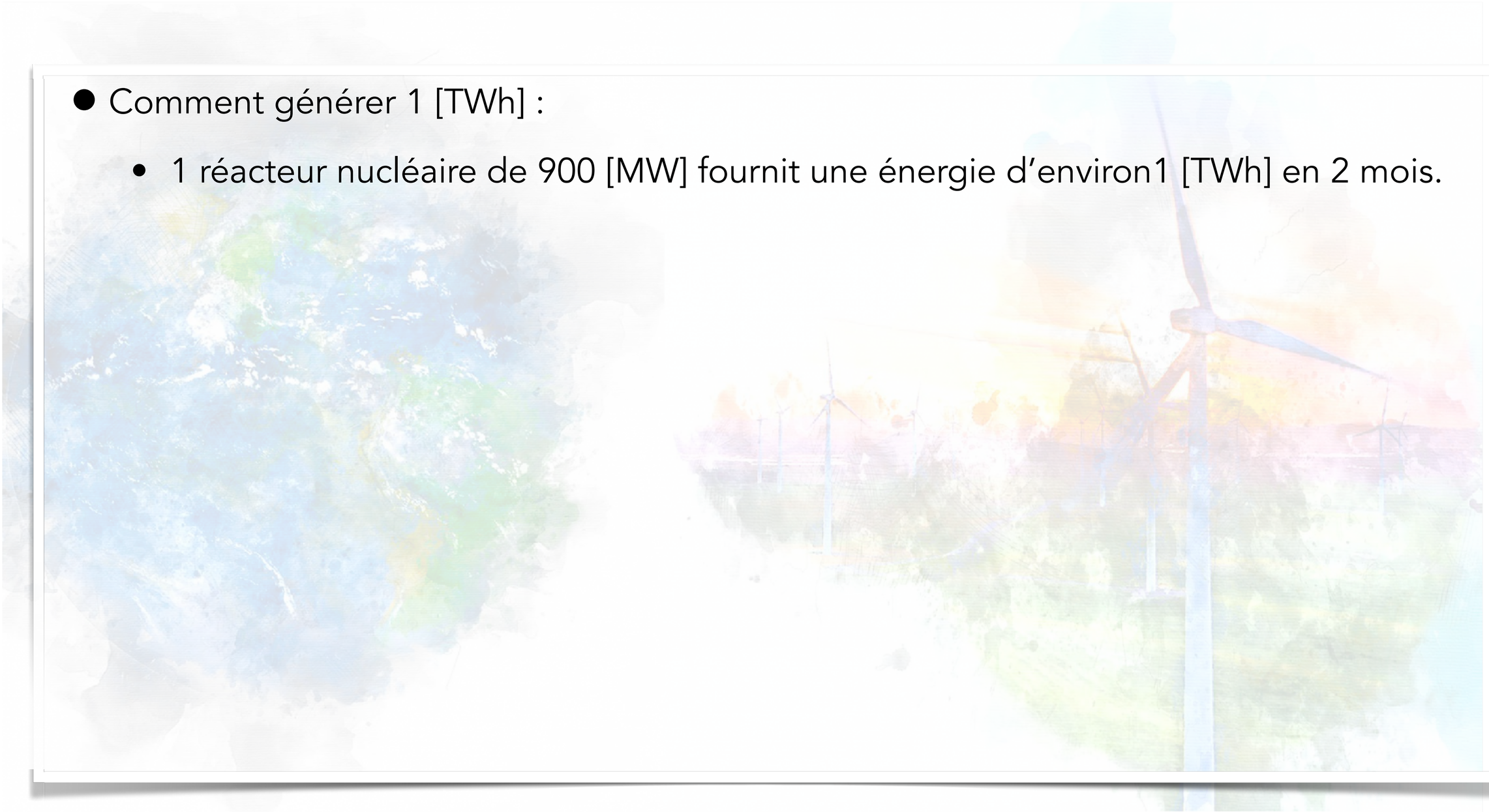
- La tonne équivalent pétrole (TEP ou TOE en anglais) est une unité d'énergie définie comme la quantité d'énergie libérée par la combustion d'une tonne de pétrole brut.
  - 1 [toe] = 41,868 [GJ] (~100 g d’Uranium naturel ~ 0,7 % ^{235}U)
- L’énergie dissipée par une puissance de 1 [kW] pendant 1 [h]
  - 1 [kWh] = 3,6 [MJ]
- Beaucoup de rapports récents utilisent le [TWh] comme unité de référence
  - 1 [TWh] = 3,6 x 10^{15} [J]
  - 1 [TWh] = 3,6 [PJ]

Que représente 1 [TWh] ?

- Comment générer 1 [TWh] :

Que représente 1 [TWh] ?

- Comment générer 1 [TWh] :
  - 1 réacteur nucléaire de 900 [MW] fournit une énergie d'environ1 [TWh] en 2 mois.



Que représente 1 [TWh] ?

- Comment générer 1 [TWh] :
  - 1 réacteur nucléaire de 900 [MW] fournit une énergie d'environ1 [TWh] en 2 mois.
  - 1 éolienne de 2 [MW] bien située fournit environ 4 [GWh] par an. Il faut donc 250 éoliennes de 2 [MW] pour générer 1 [TWh].

Que représente 1 [TWh] ?

- Comment générer 1 [TWh] :
  - 1 réacteur nucléaire de 900 [MW] fournit une énergie d'environ1 [TWh] en 2 mois.
  - 1 éolienne de 2 [MW] bien située fournit environ 4 [GWh] par an. Il faut donc 250 éoliennes de 2 [MW] pour générer 1 [TWh].
  - 1 installation photovoltaïque de taille moyenne produira annuellement 3 [MWh]. Il faudra donc 300 000 installations pour obtenir 1 [TWh].

Que représente 1 [TWh] ?

- Comment générer 1 [TWh] :
  - 1 réacteur nucléaire de 900 [MW] fournit une énergie d'environ1 [TWh] en 2 mois.
  - 1 éolienne de 2 [MW] bien située fournit environ 4 [GWh] par an. Il faut donc 250 éoliennes de 2 [MW] pour générer 1 [TWh].
  - 1 installation photovoltaïque de taille moyenne produira annuellement 3 [MWh]. Il faudra donc 300 000 installations pour obtenir 1 [TWh].
  - 1 milliard de mètre cube de gaz naturel (pression atmosphérique / 0 °C)

Que représente 1 [TWh] ?

- Comment générer 1 [TWh] :
  - 1 réacteur nucléaire de 900 [MW] fournit une énergie d'environ1 [TWh] en 2 mois.
  - 1 éolienne de 2 [MW] bien située fournit environ 4 [GWh] par an. Il faut donc 250 éoliennes de 2 [MW] pour générer 1 [TWh].
  - 1 installation photovoltaïque de taille moyenne produira annuellement 3 [MWh]. Il faudra donc 300 000 installations pour obtenir 1 [TWh].
  - 1 milliard de mètre cube de gaz naturel (pression atmosphérique / 0 °C)

    ~400 000 piscines olympiques

SOMMAIRE

Introduction

Quelques unités à comprendre

Quelques chiffres clés

Production d’énergie

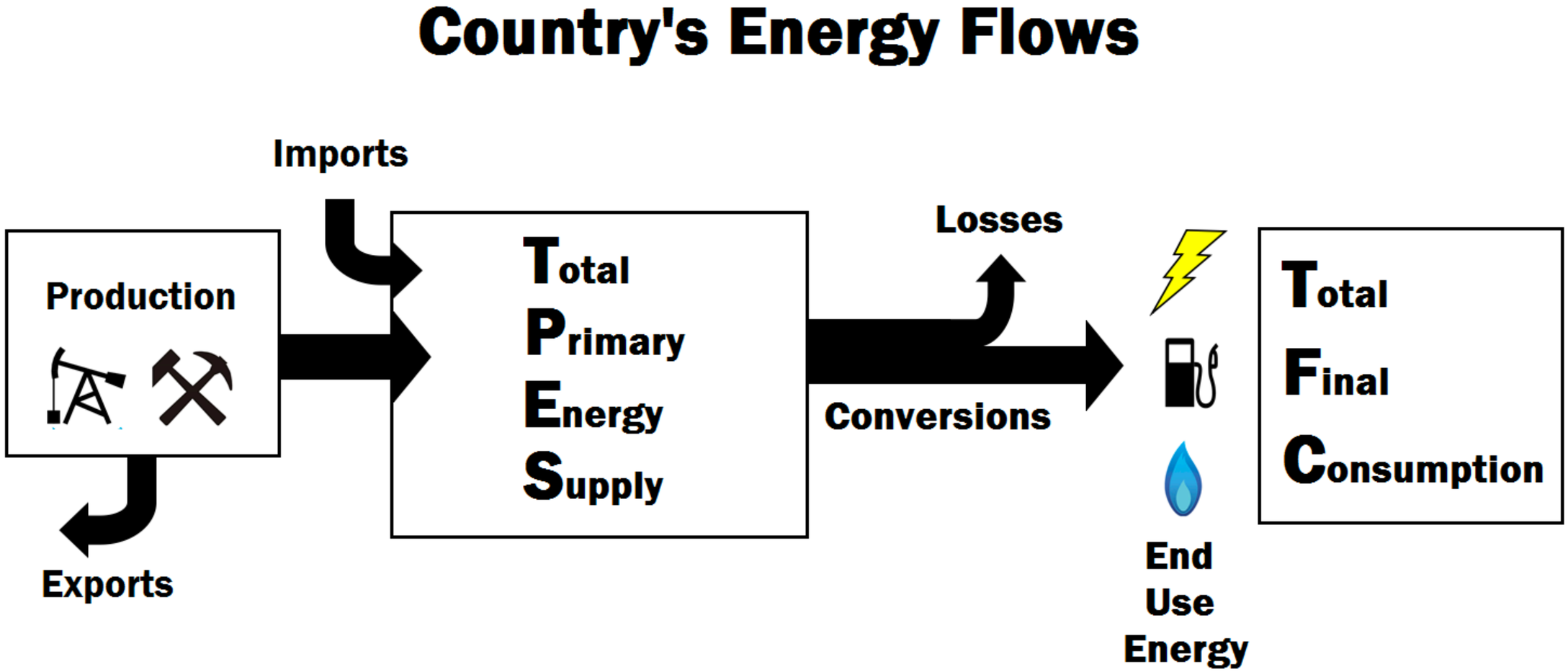
Stockage d’énergie

Utilisation de l’énergie

Conclusions

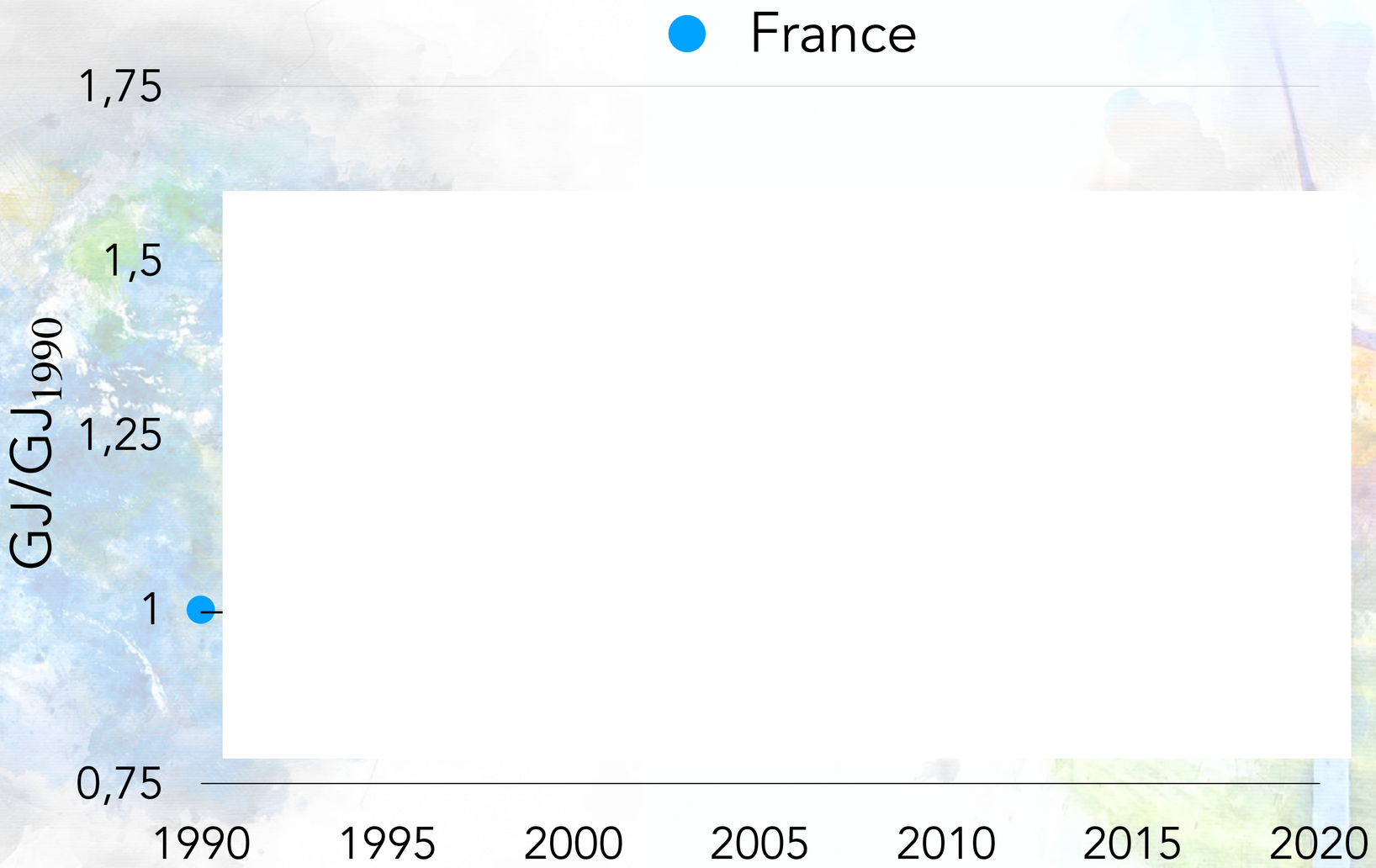
Quelques chiffres clés

Définitions



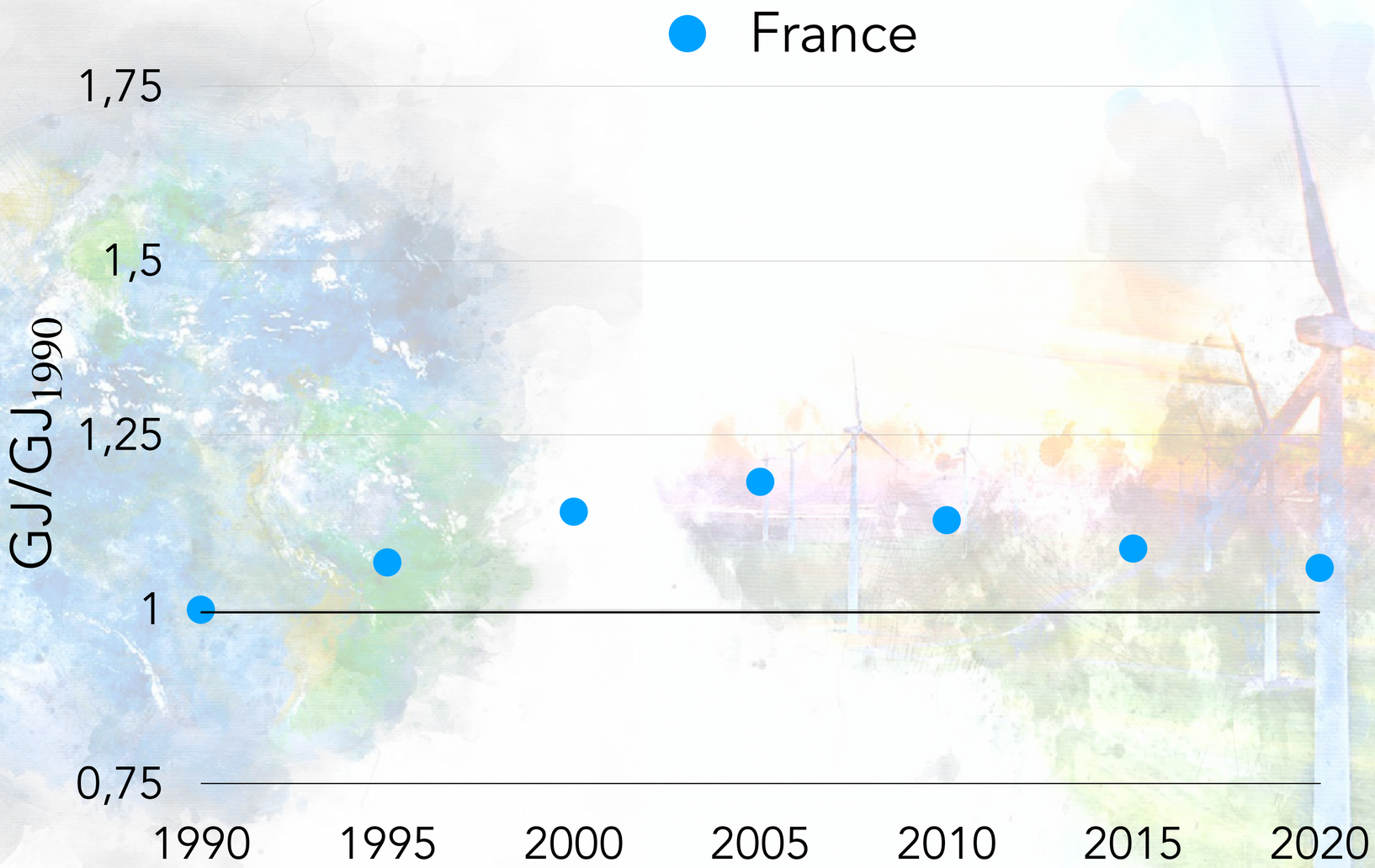
Le TPES représente donc l'ensemble des ressources énergétiques destinées à la **consommation intérieure.**

GJ/GJ$_{1990}$

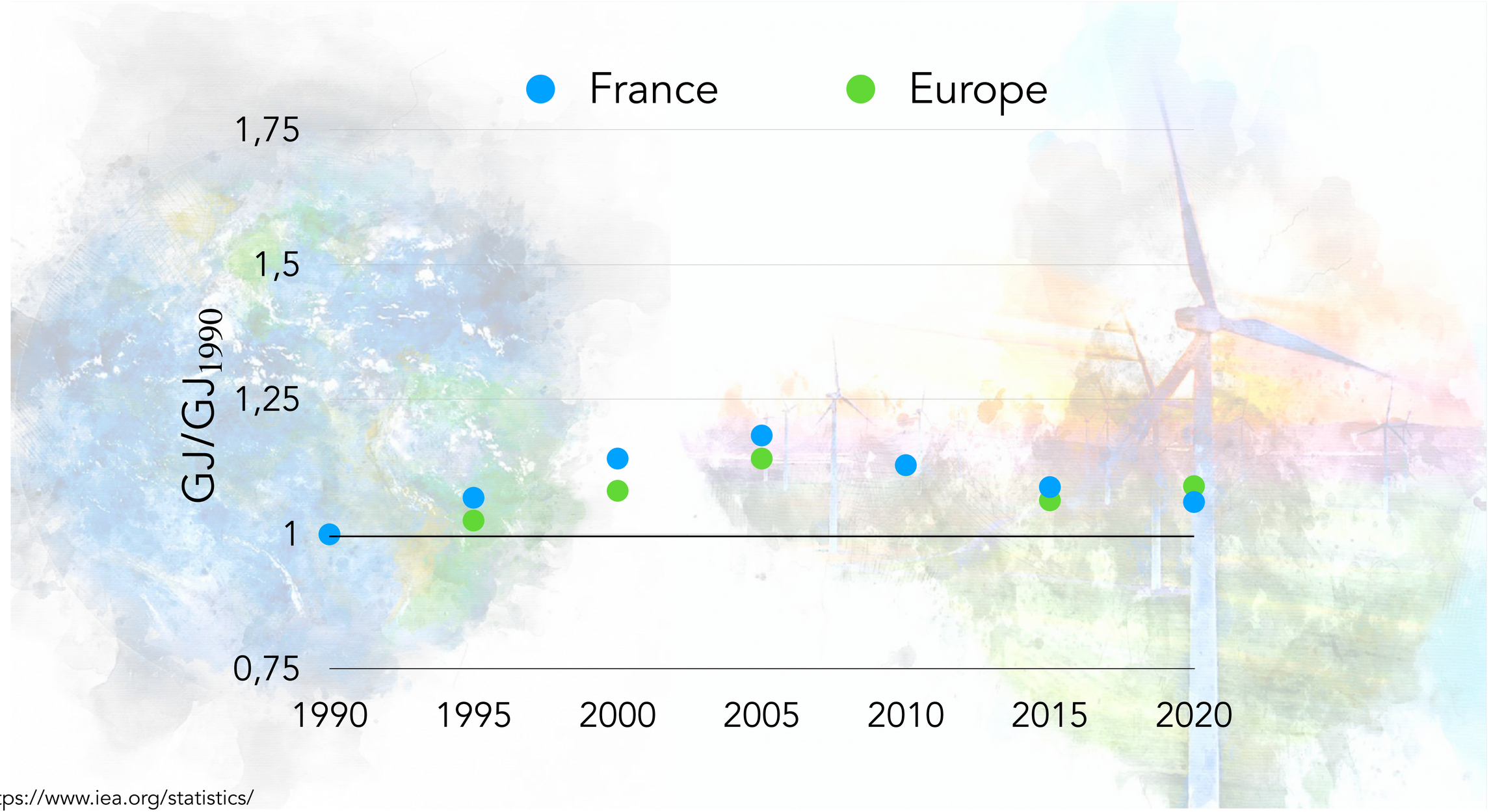


https://www.iea.org/statistics/

GJ/GJ$_{1990}$

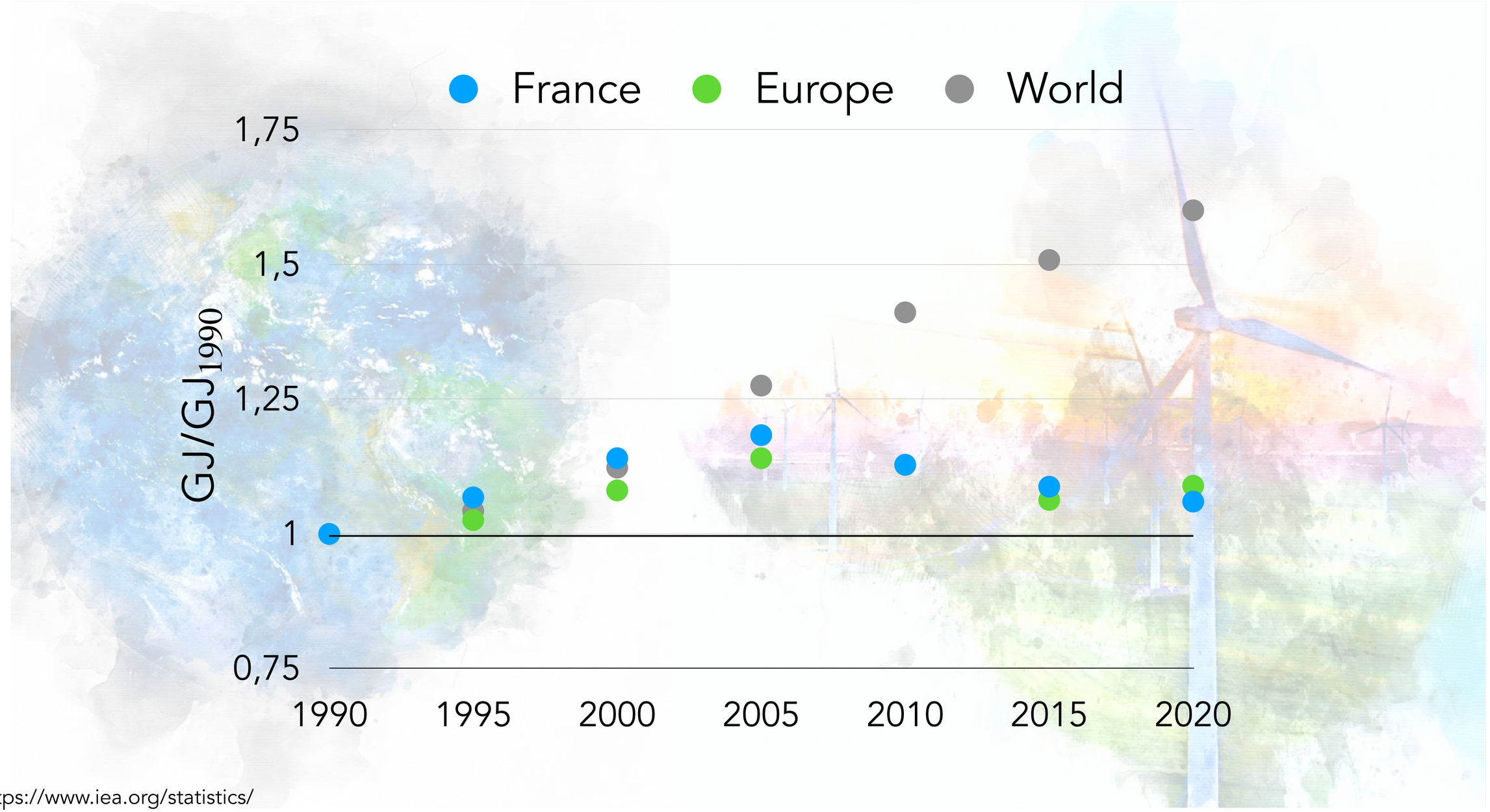


https://www.iea.org/statistics/



https://www.iea.org/statistics/

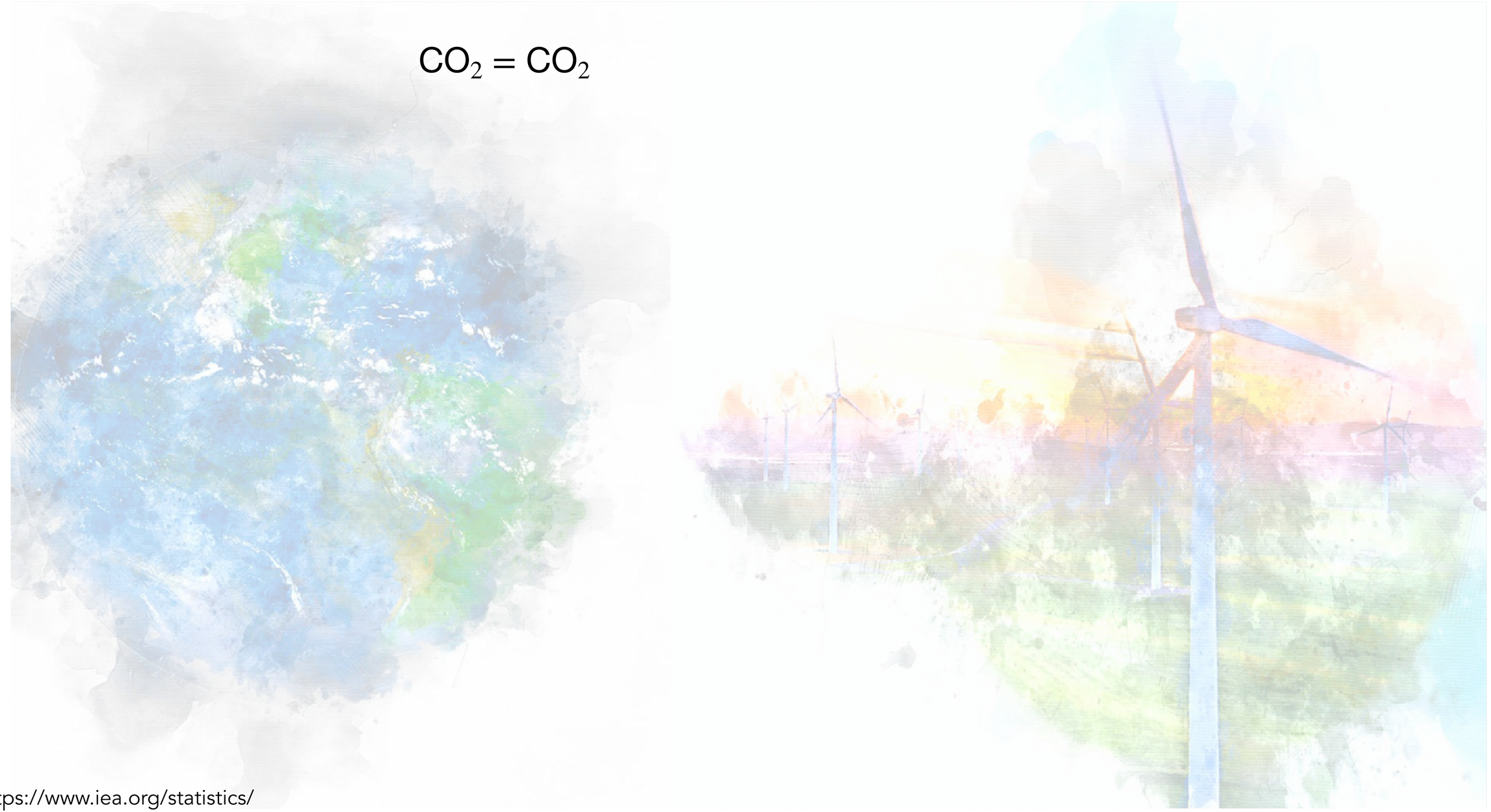
GJ/GJ_{1990}



https://www.iea.org/statistics/

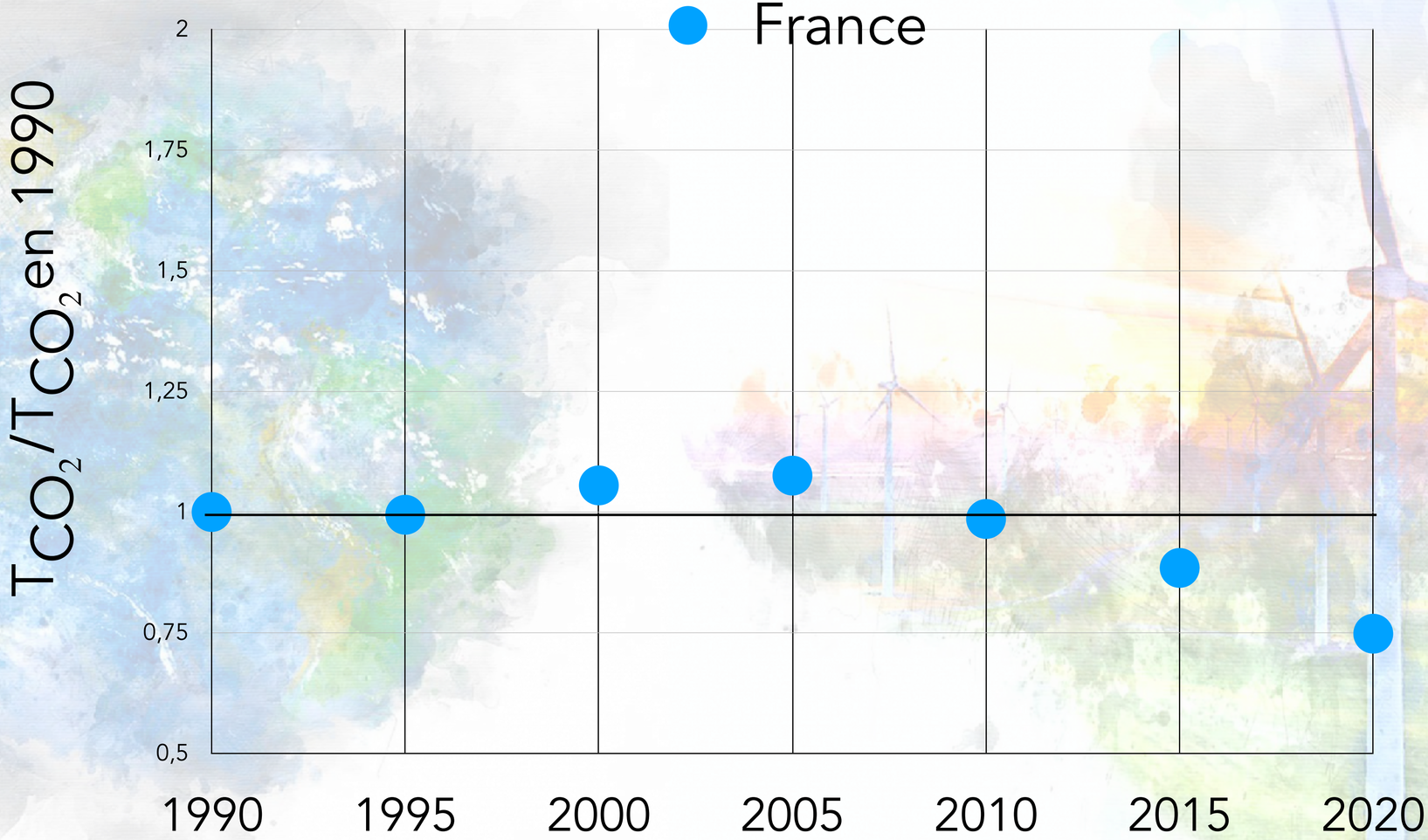
Première analyse

$$CO_2 = CO_2$$



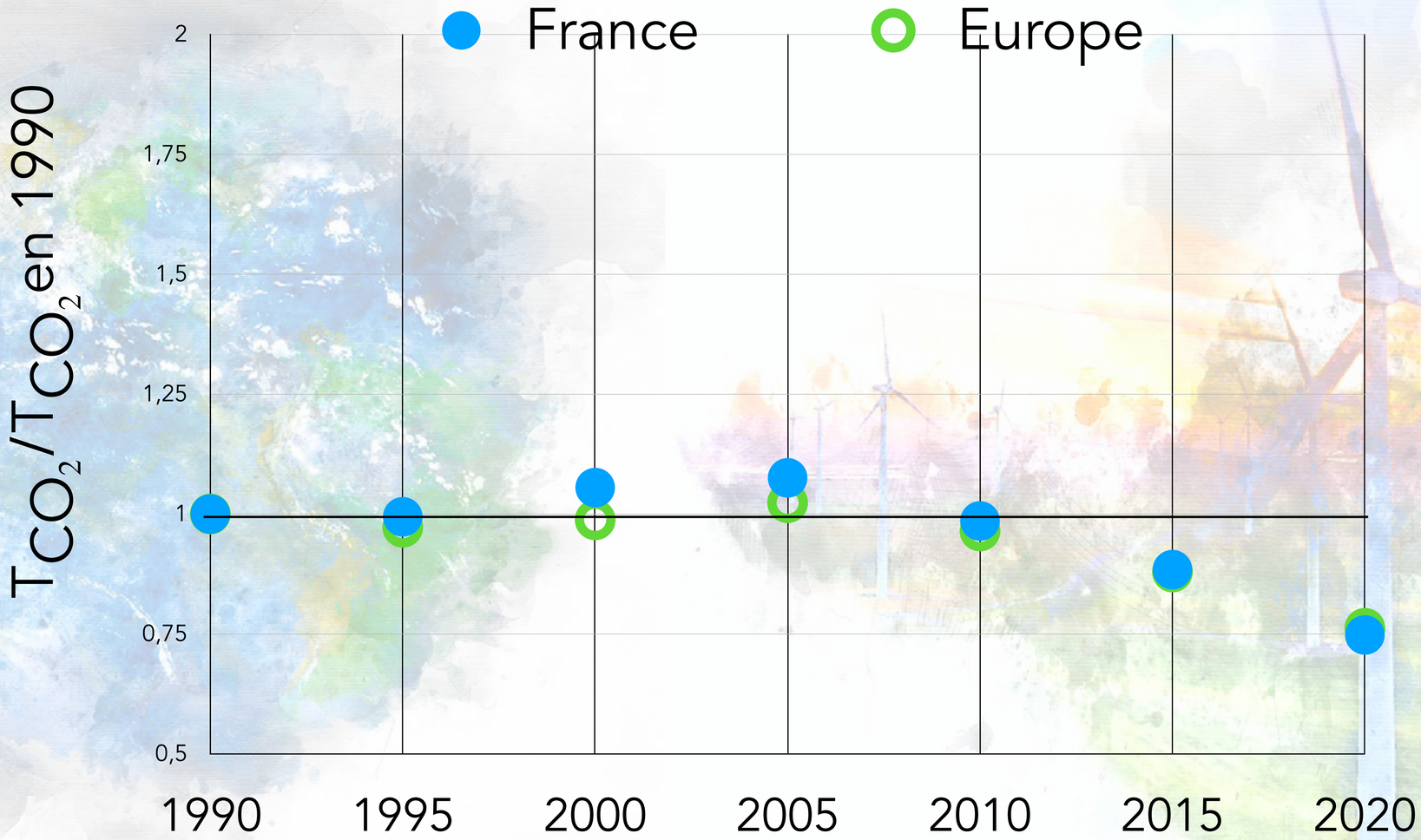
https://www.iea.org/statistics/

CO_2



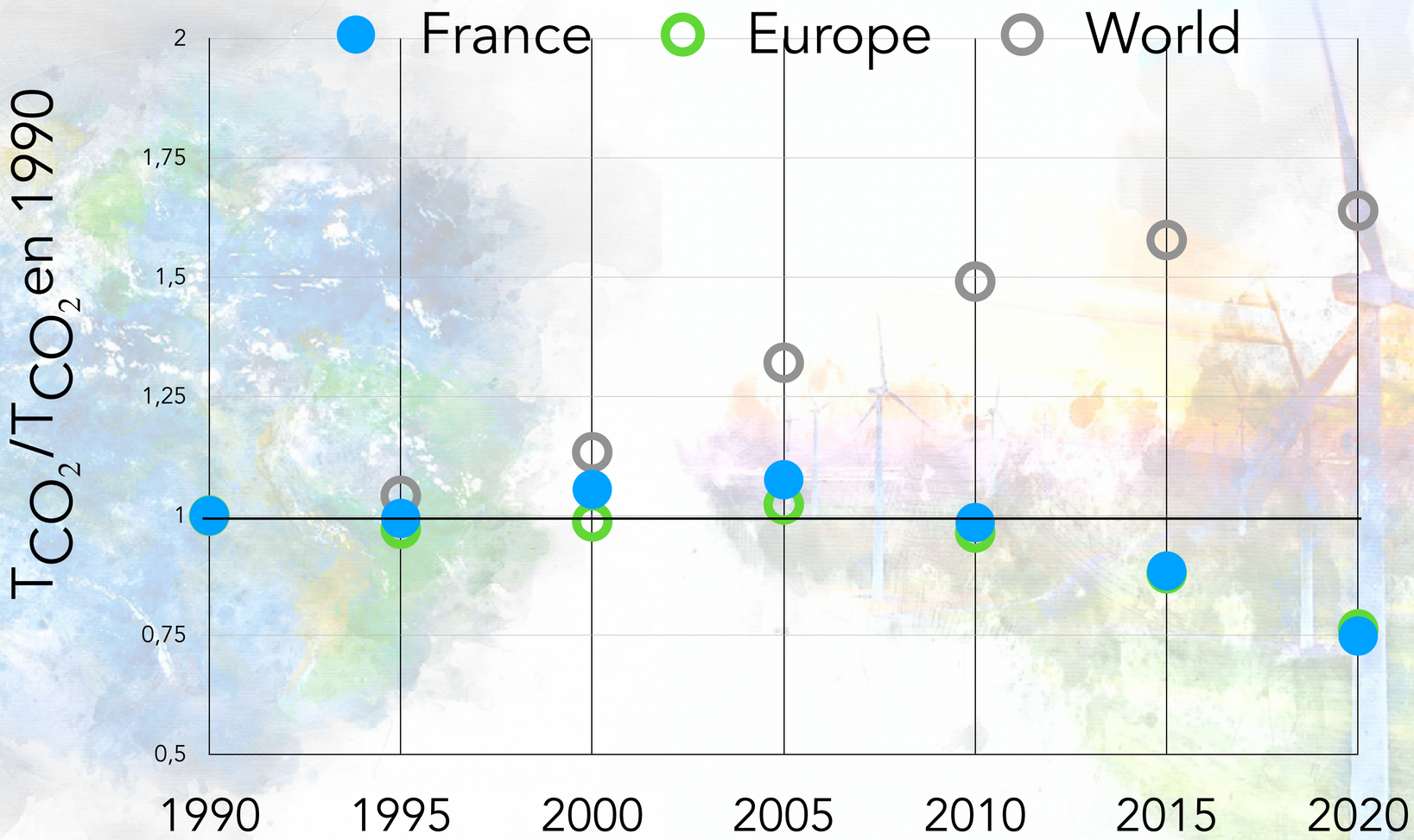
https://www.iea.org/statistics/

CO_2



https://www.iea.org/statistics/

CO_2

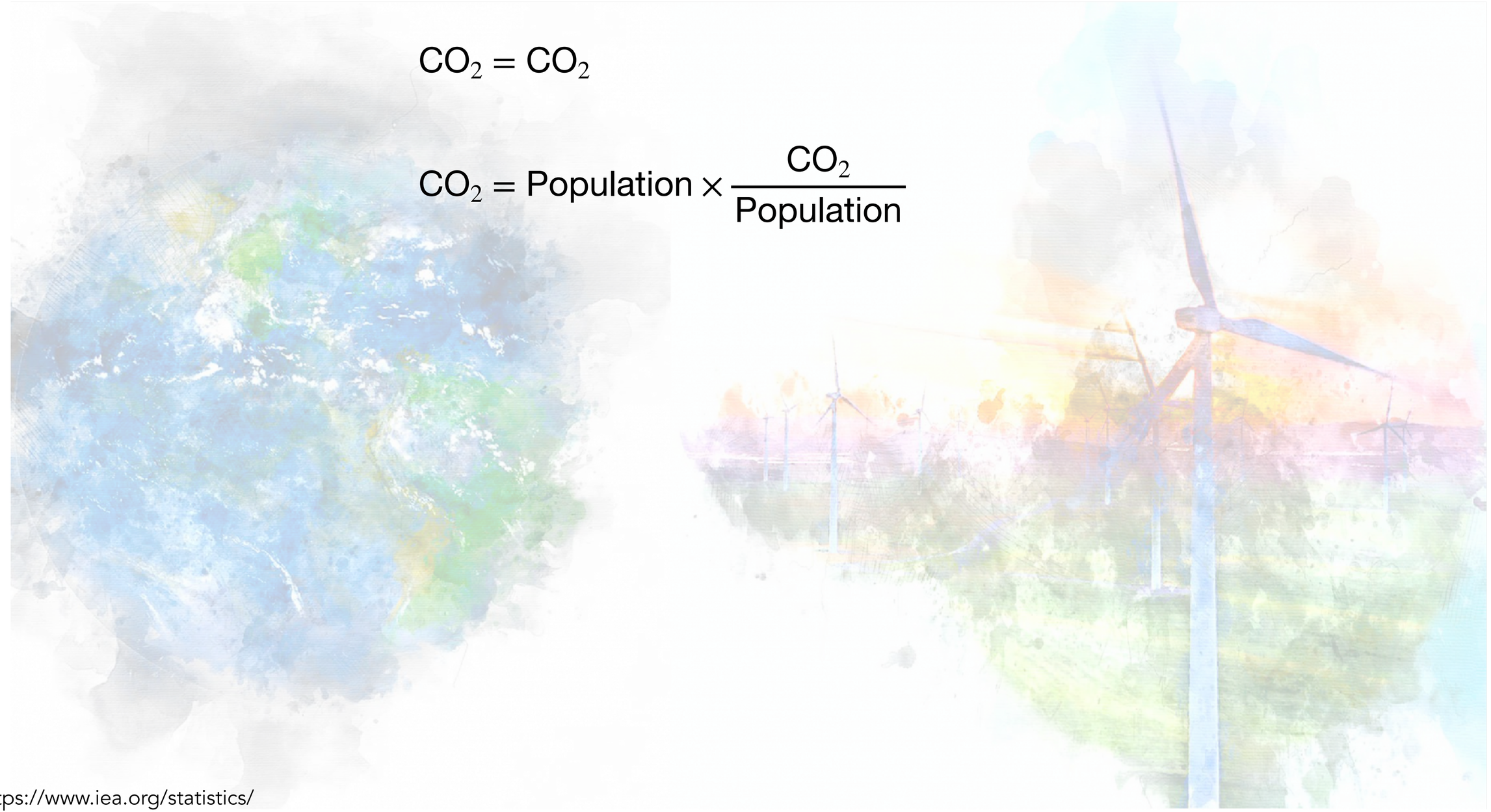


https://www.iea.org/statistics/

Seconde analyse

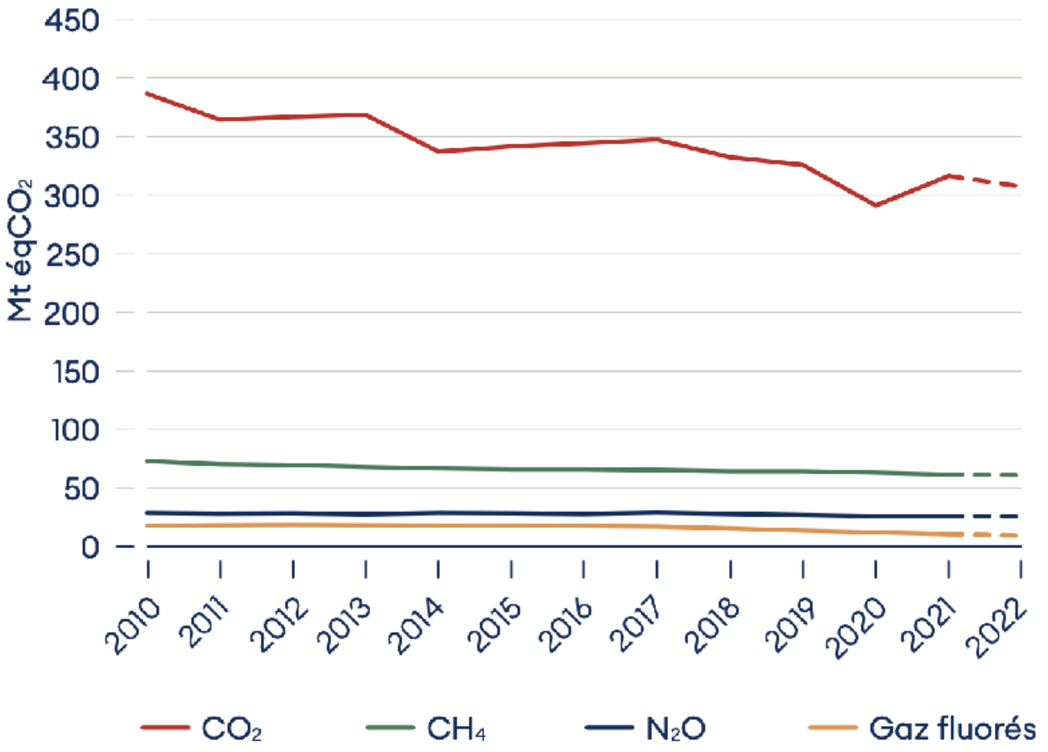
$$CO_2 = CO_2$$

$$CO_2 = \text{Population} \times \frac{CO_2}{\text{Population}}$$



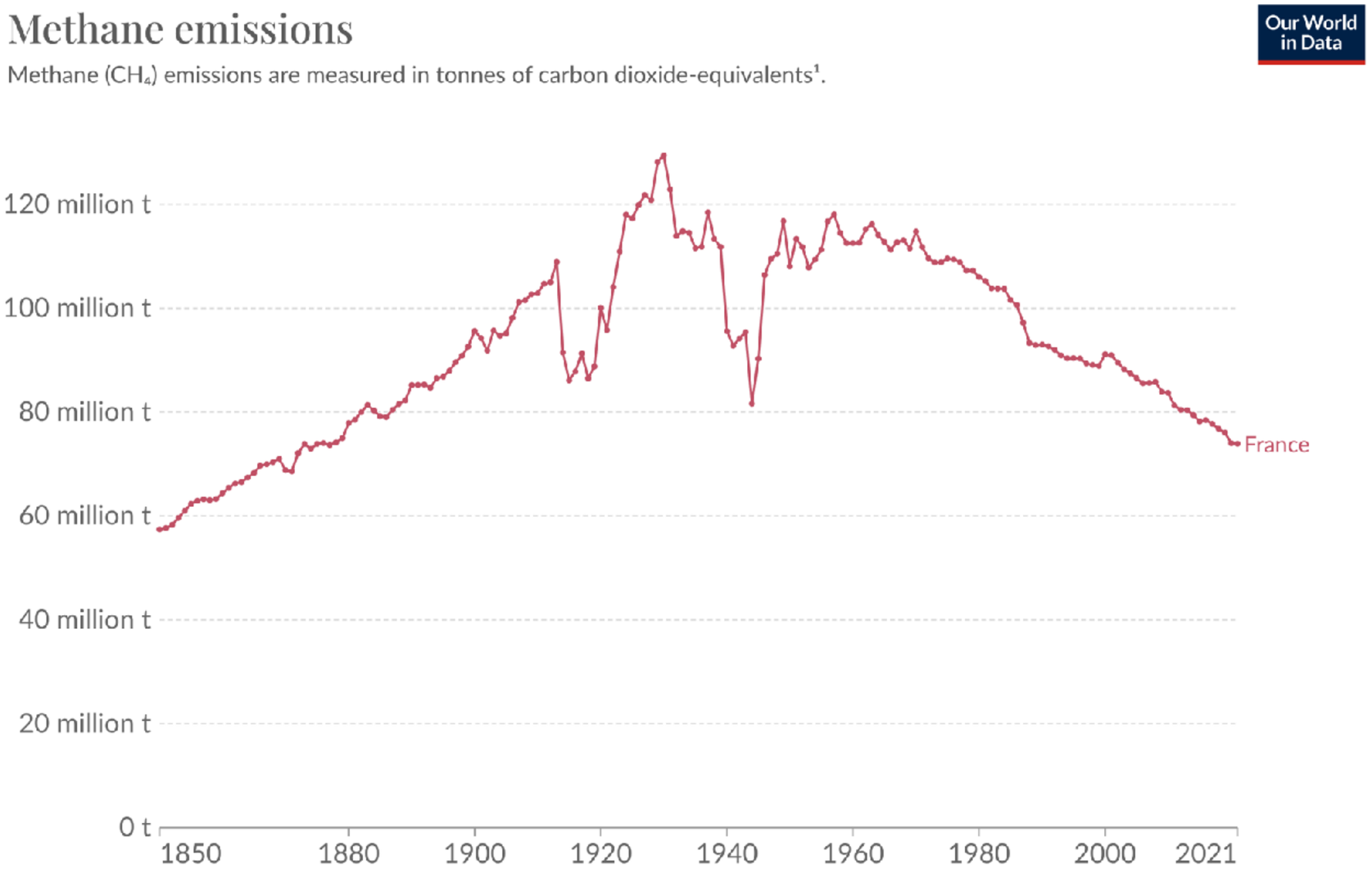
https://www.iea.org/statistics/

Figure 2.1e – Évolution par gaz des émissions de la France **depuis 2010 (hors UTCATF)**



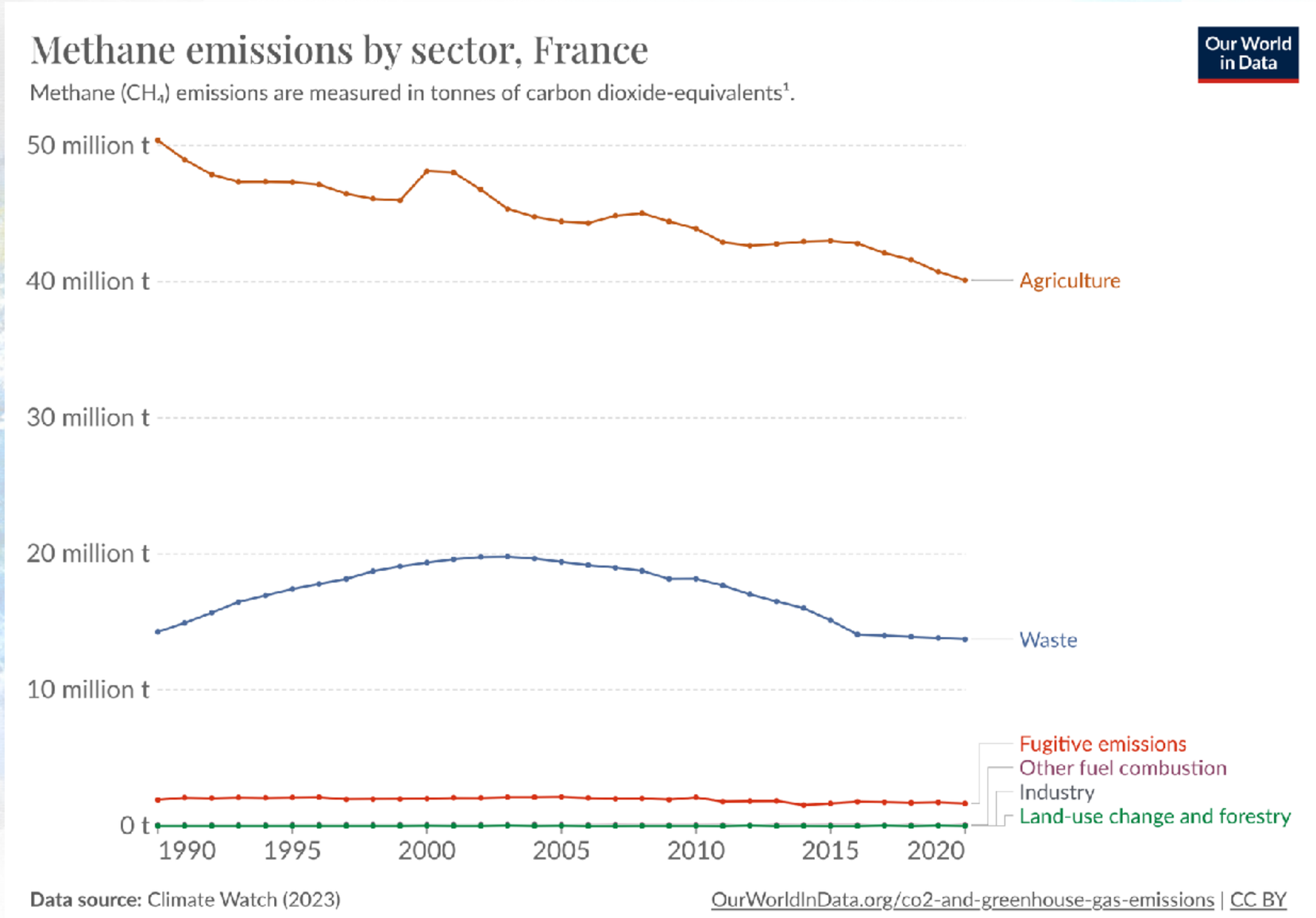
Notes : Les valeurs de pouvoir de réchauffement global utilisées par le Citepa pour son inventaire Secten 2023 sont celles de l'AR5 du GIEC, contrairement aux précédentes éditions du Secten qui utilisaient les valeurs de l'AR4. Les données d'émission pour 2022 sont provisoires.

Emissions de méthane (CH_4) (en CO_2 eq) en France

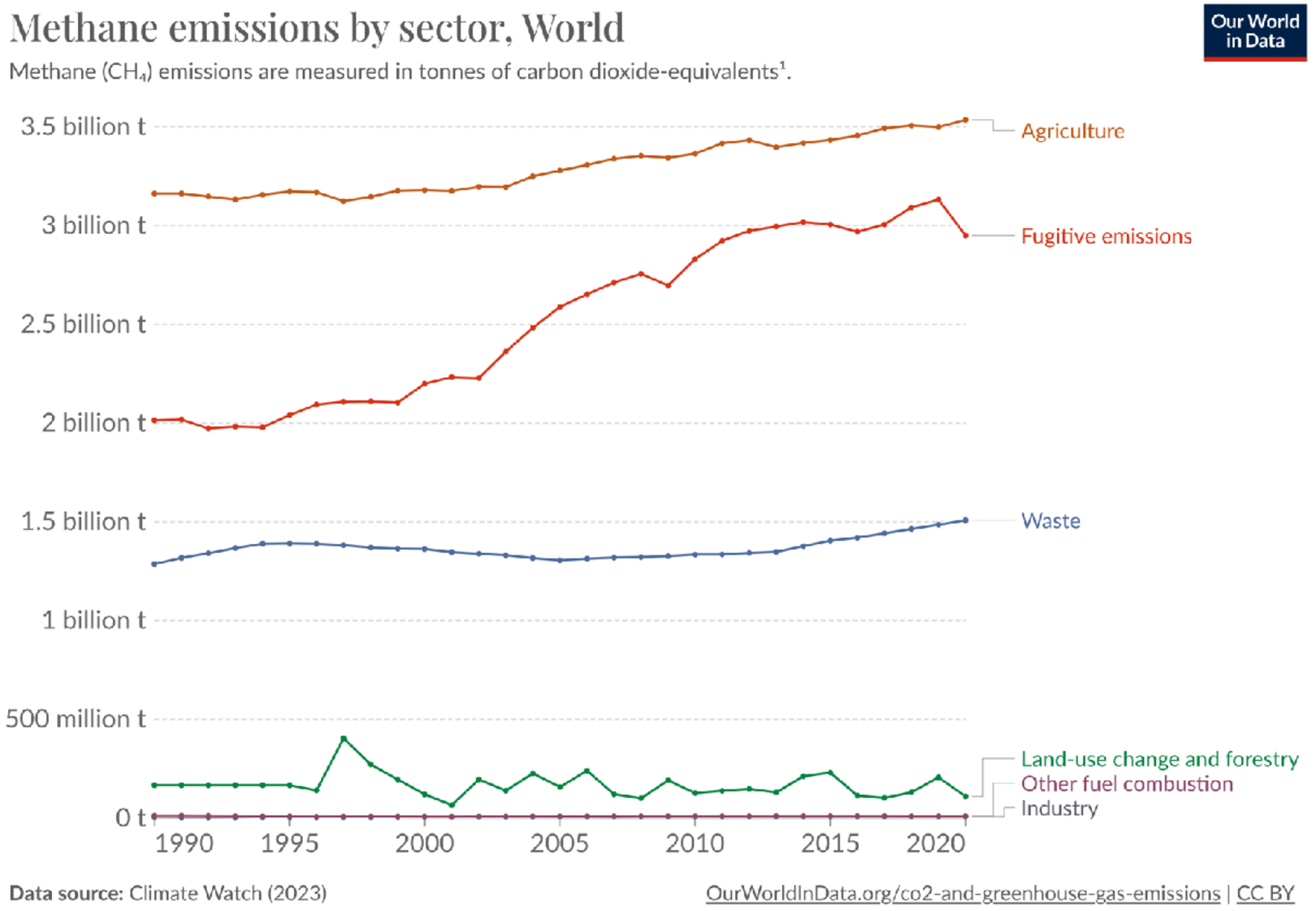


Quelle est l'origine des émissions de méthane (CH_4) ?

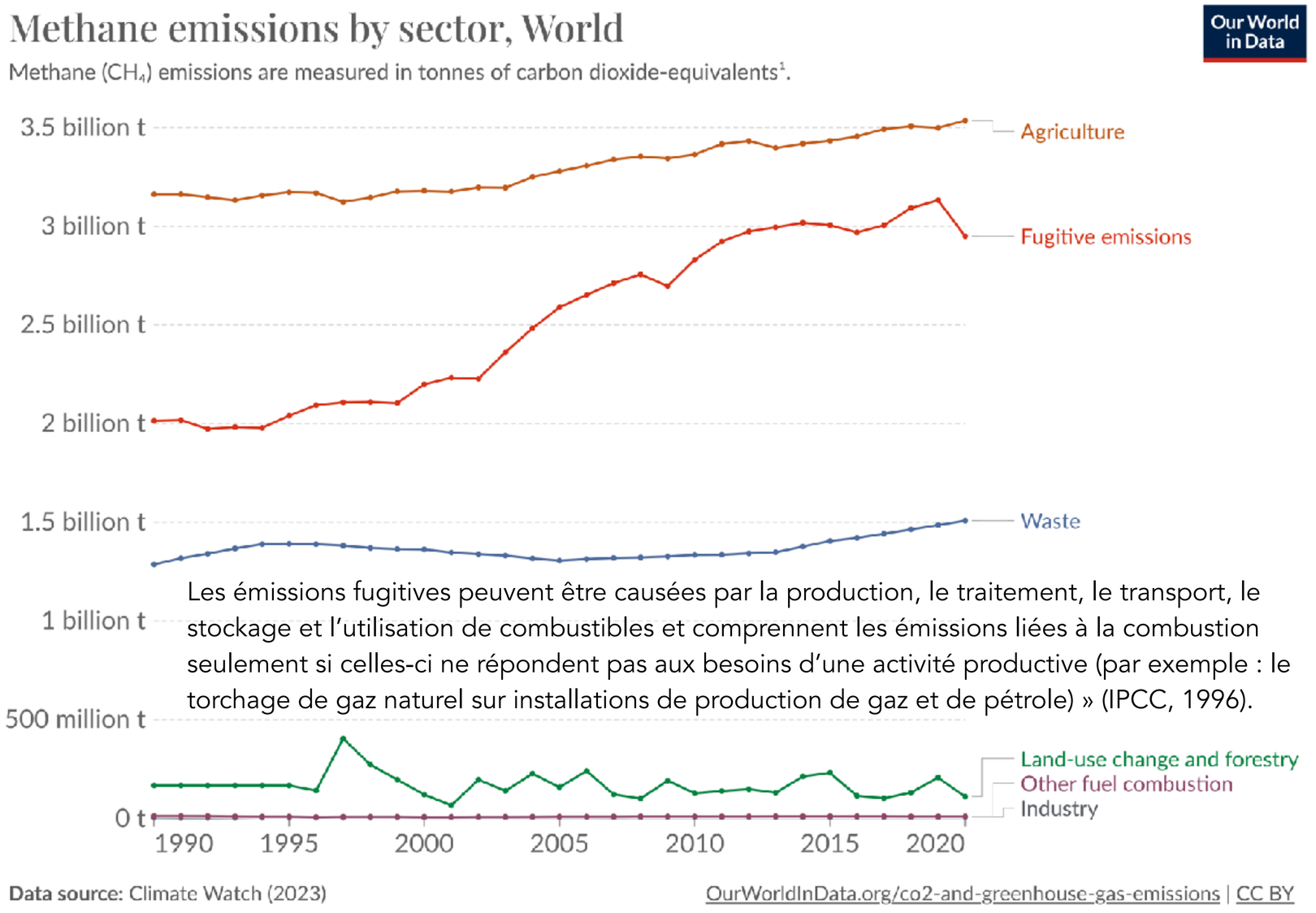
Quelle est l'origine des émissions de méthane (CH_4) ?



Quelle est l'origine des émissions de méthane (CH_4) ?

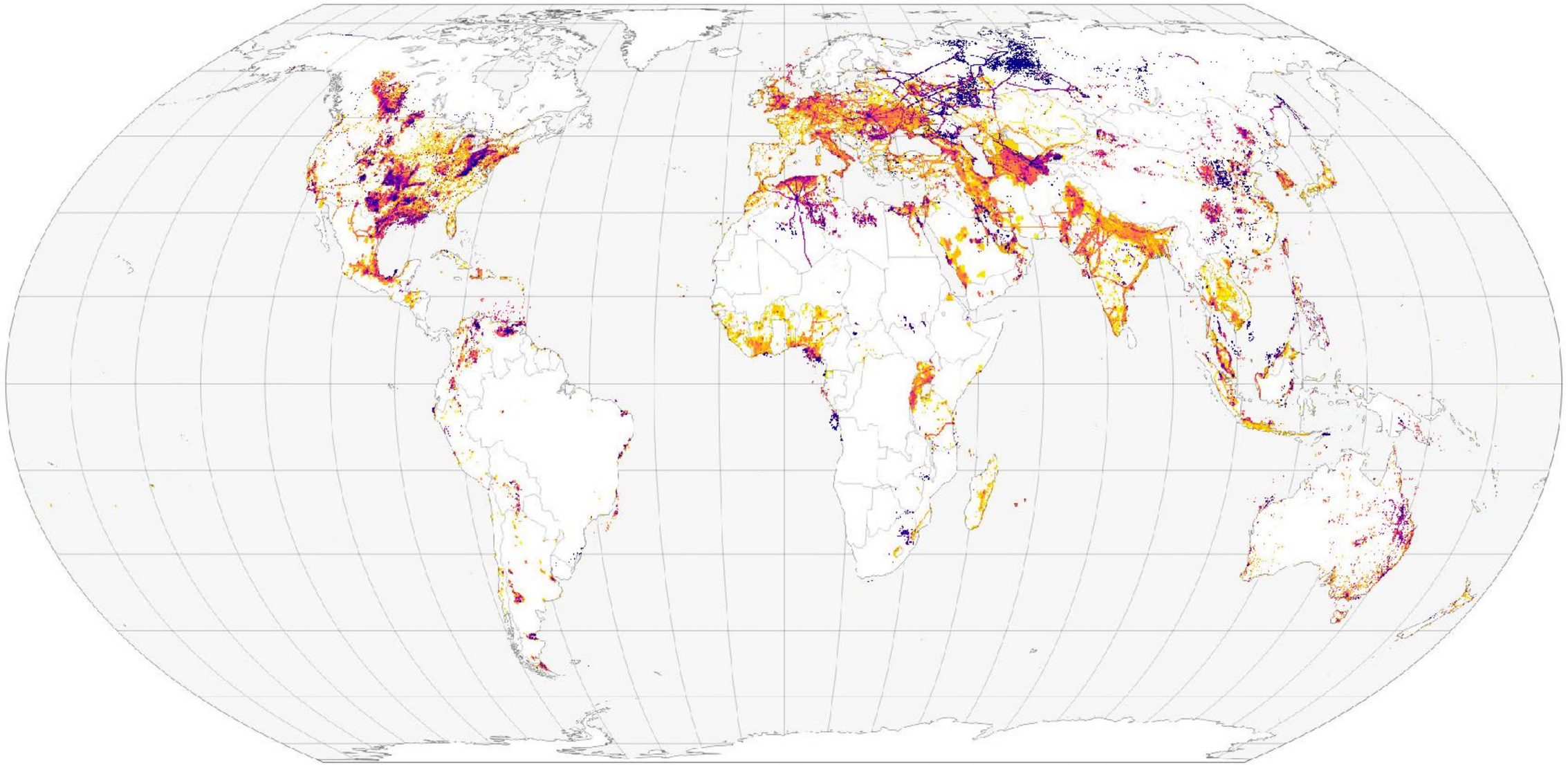


Quelle est l'origine des émissions de méthane (CH_4) ?



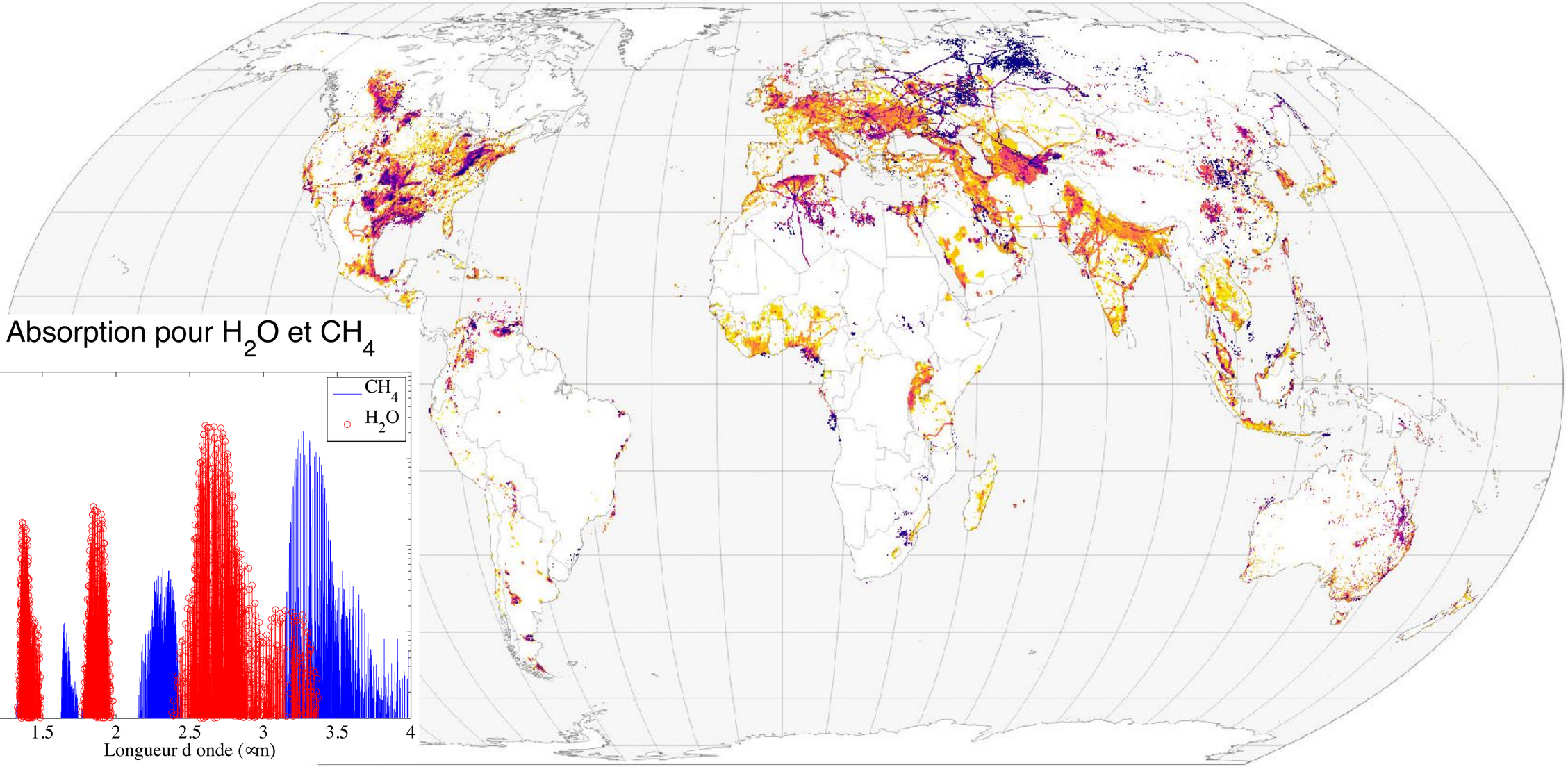
Les émissions fugitives peuvent être causées par la production, le traitement, le transport, le stockage et l'utilisation de combustibles et comprennent les émissions liées à la combustion seulement si celles-ci ne répondent pas aux besoins d'une activité productive (par exemple : le torchage de gaz naturel sur installations de production de gaz et de pétrole) » (IPCC, 1996).

Quelle est l'origine des émissions de méthane (CH_4) ?

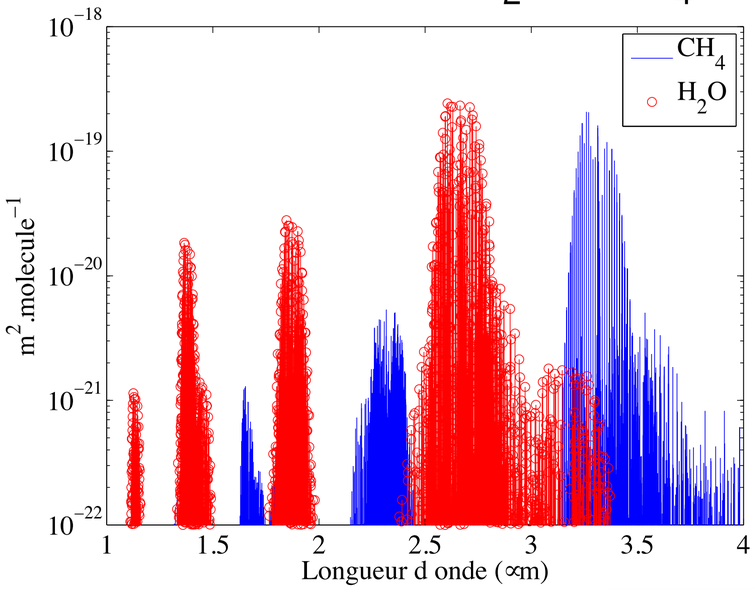


https://earthobservatory.nasa.gov/images/149374/mapping-methane-emissions-from-fossil-fuel-exploitation

Quelle est l'origine des émissions de méthane (CH_4) ?

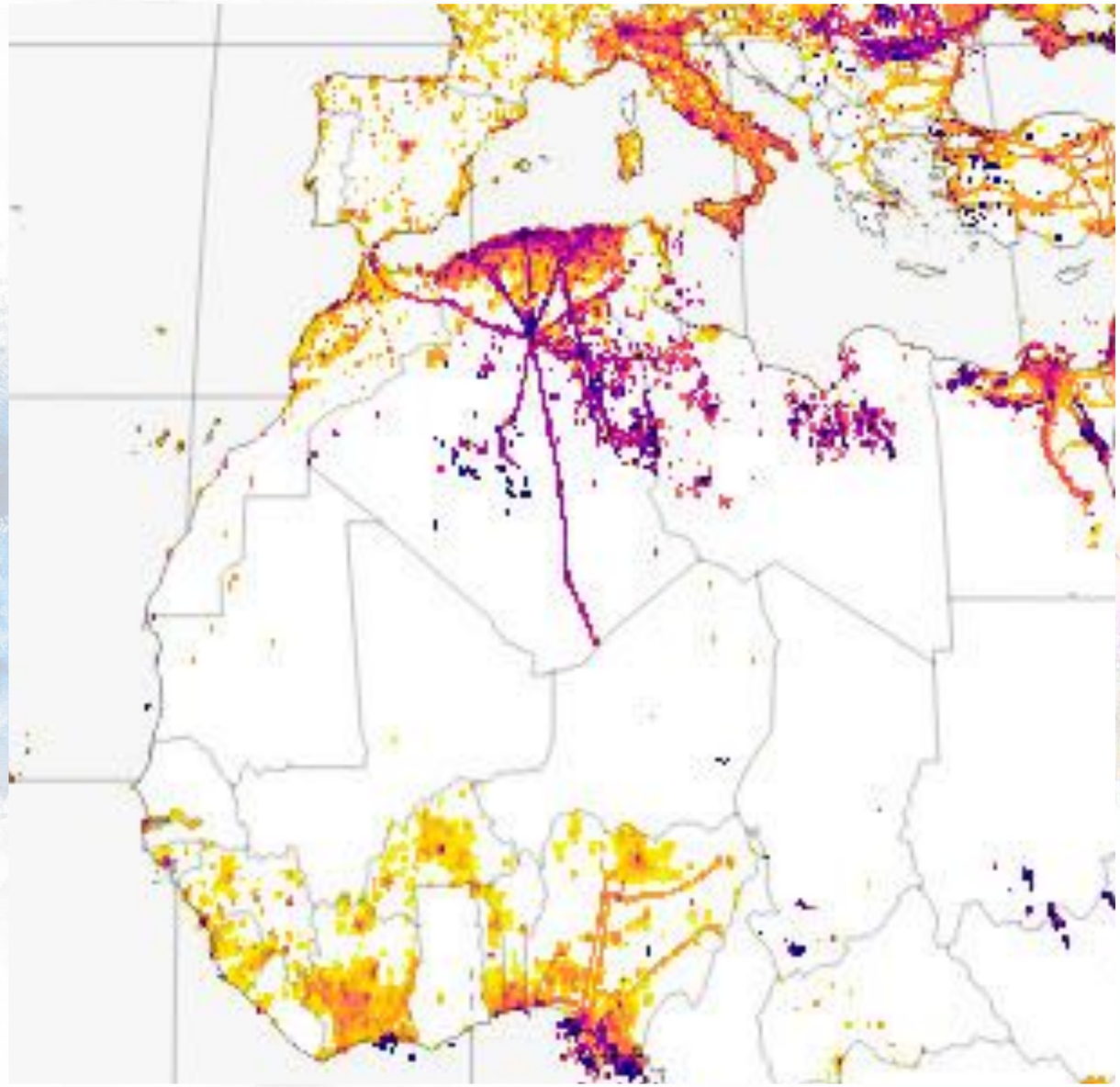


Absorption pour H_2O et CH_4

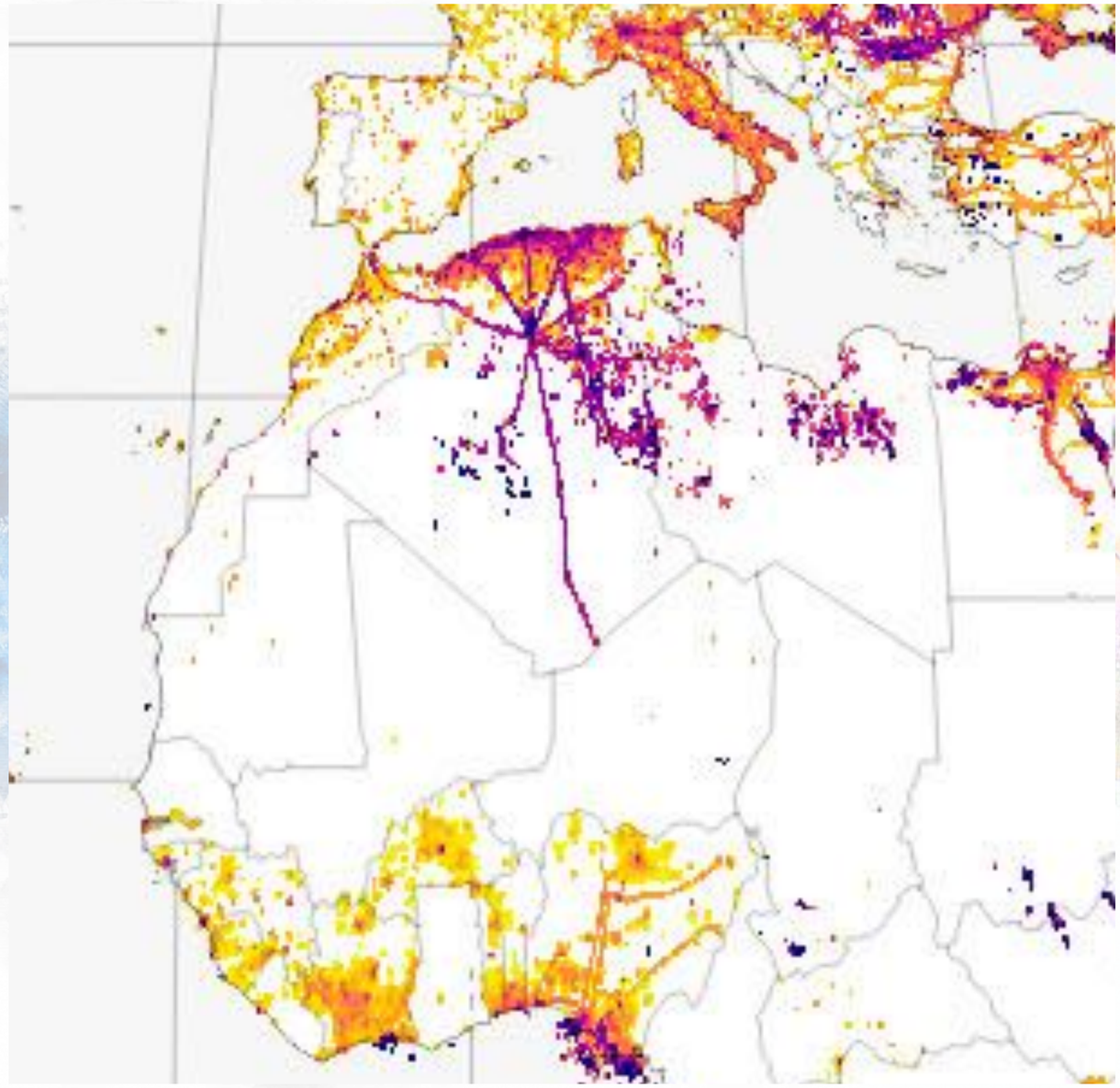


https://earthobservatory.nasa.gov/images/149374/mapping-methane-emissions-from-fossil-fuel-exploitation

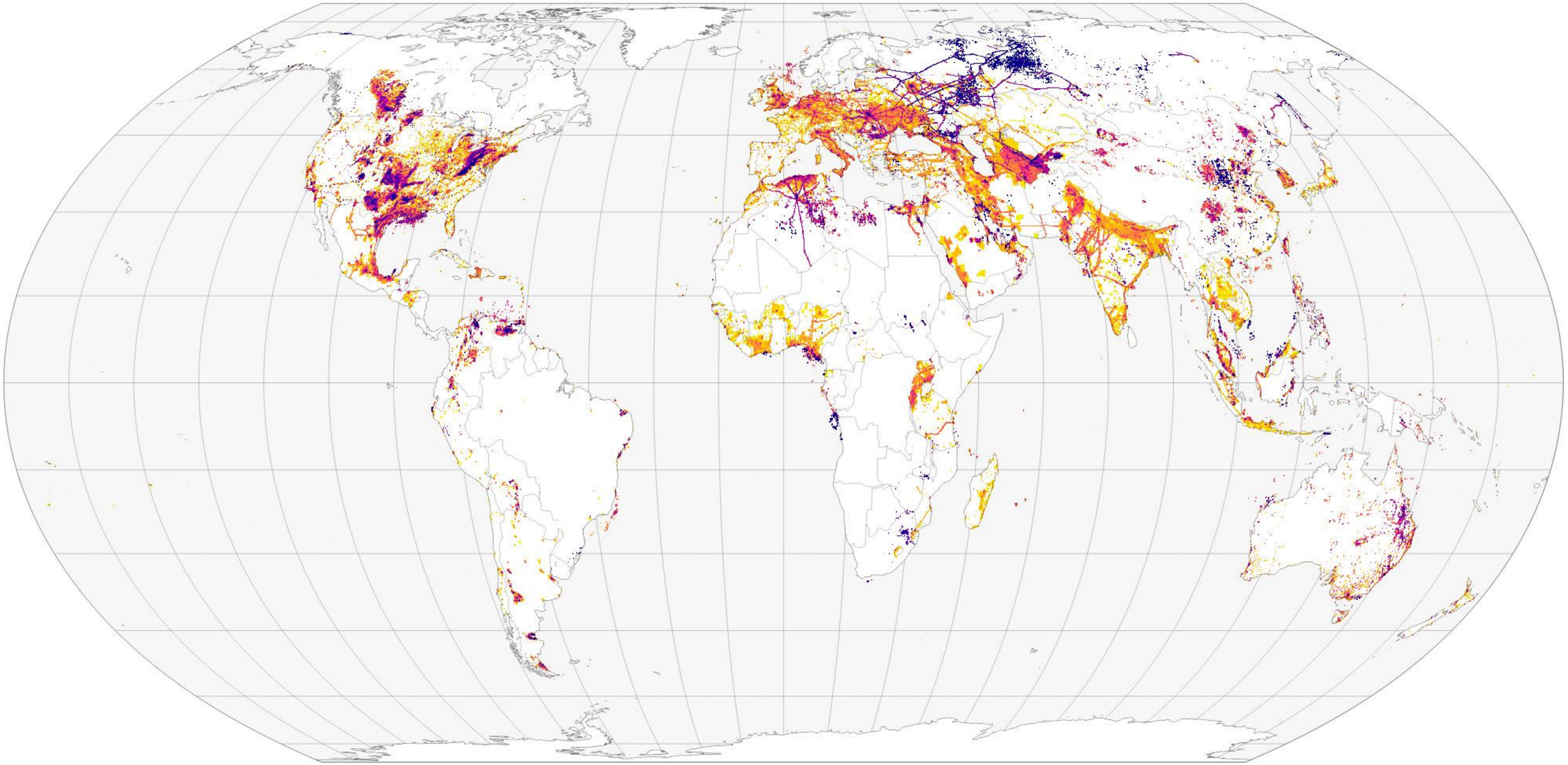
Quelle est l'origine des émissions de méthane (CH_4) ?



Quelle est l'origine des émissions de méthane (CH_4) ?

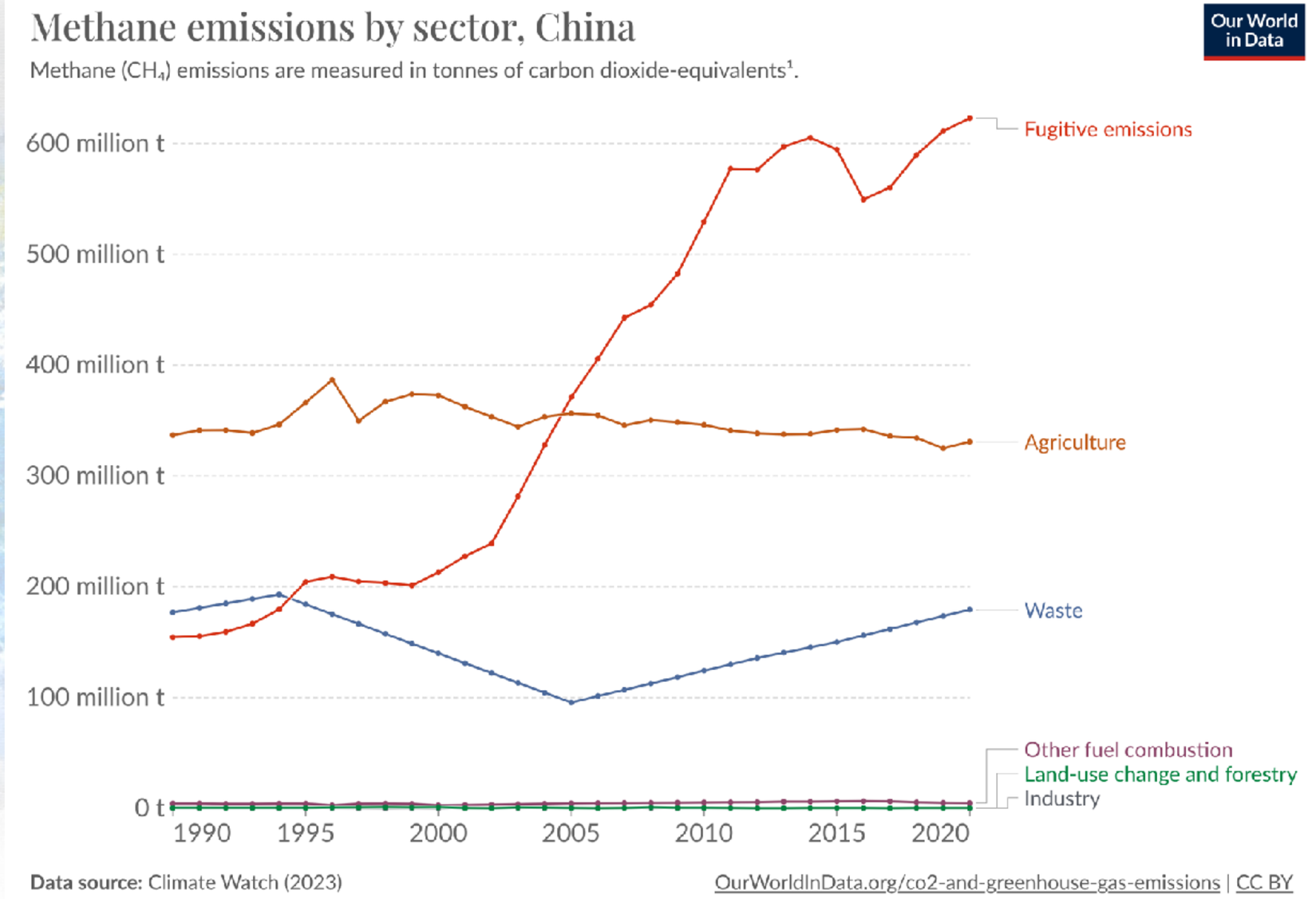


Quelle est l'origine des émissions de méthane (CH_4) ?

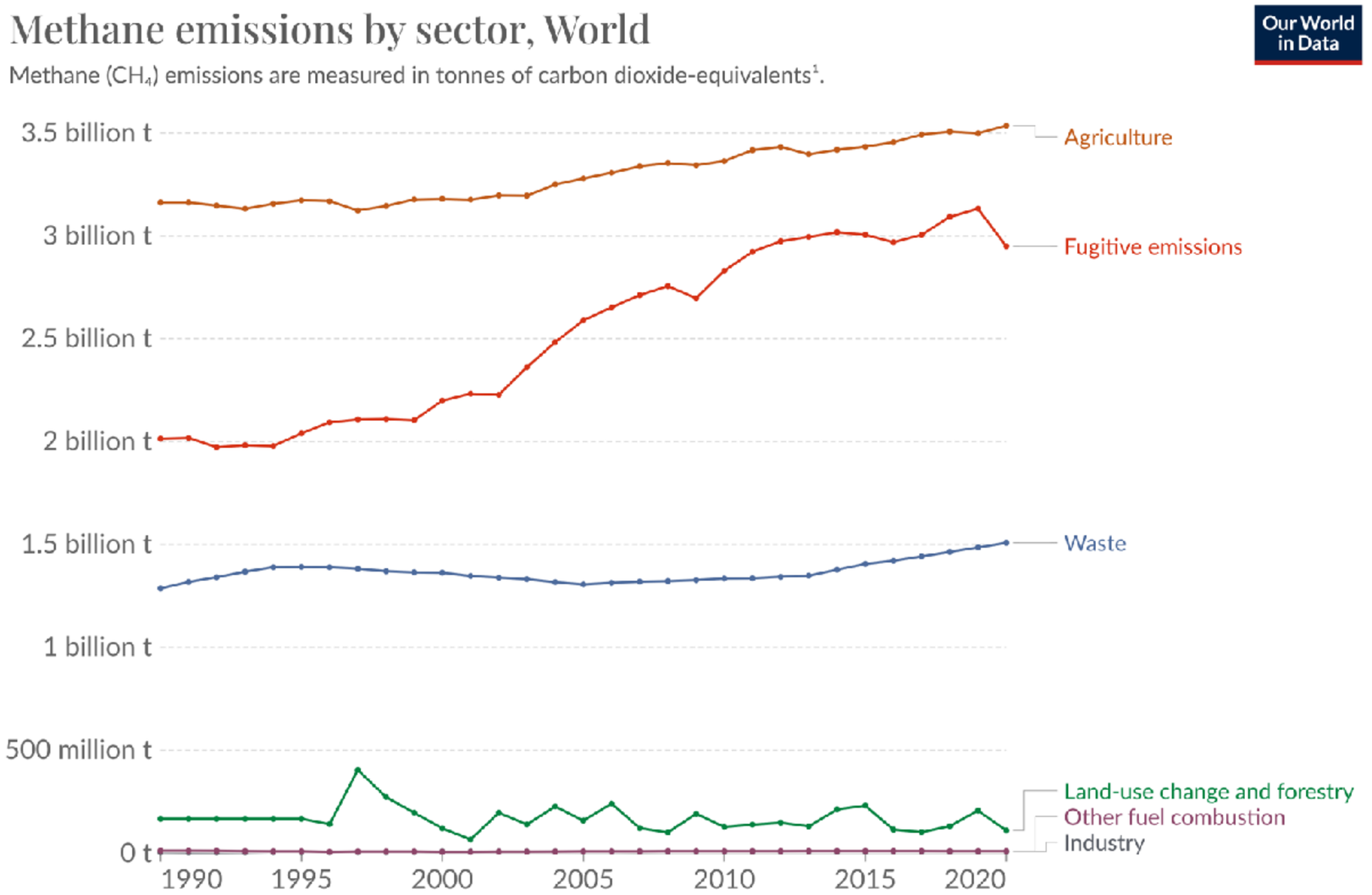


https://earthobservatory.nasa.gov/images/149374/mapping-methane-emissions-from-fossil-fuel-exploitation

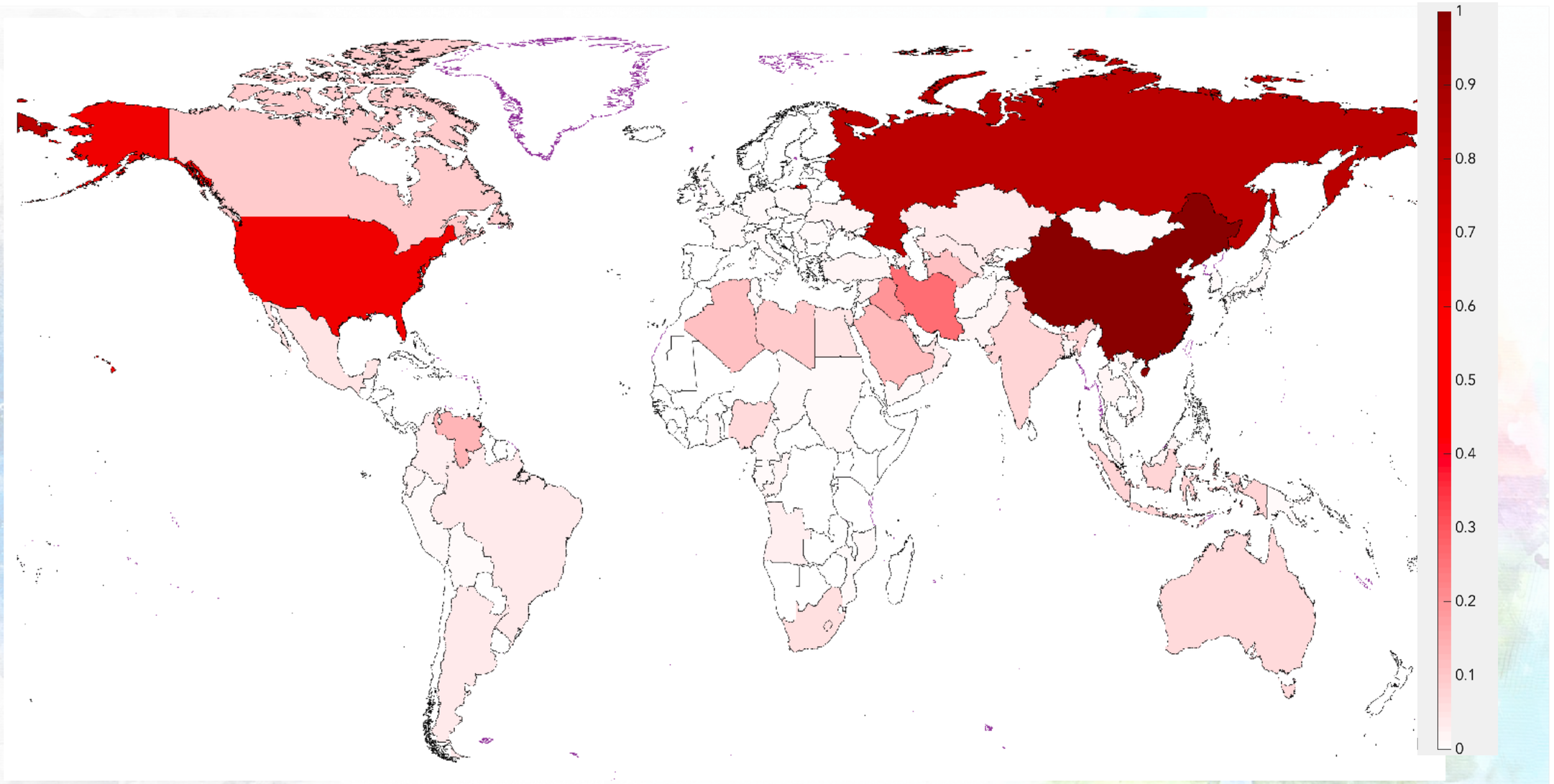
Quelle est l'origine des émissions de méthane (CH_4) ?



Quelle est l'origine des émissions de méthane (CH_4) ?

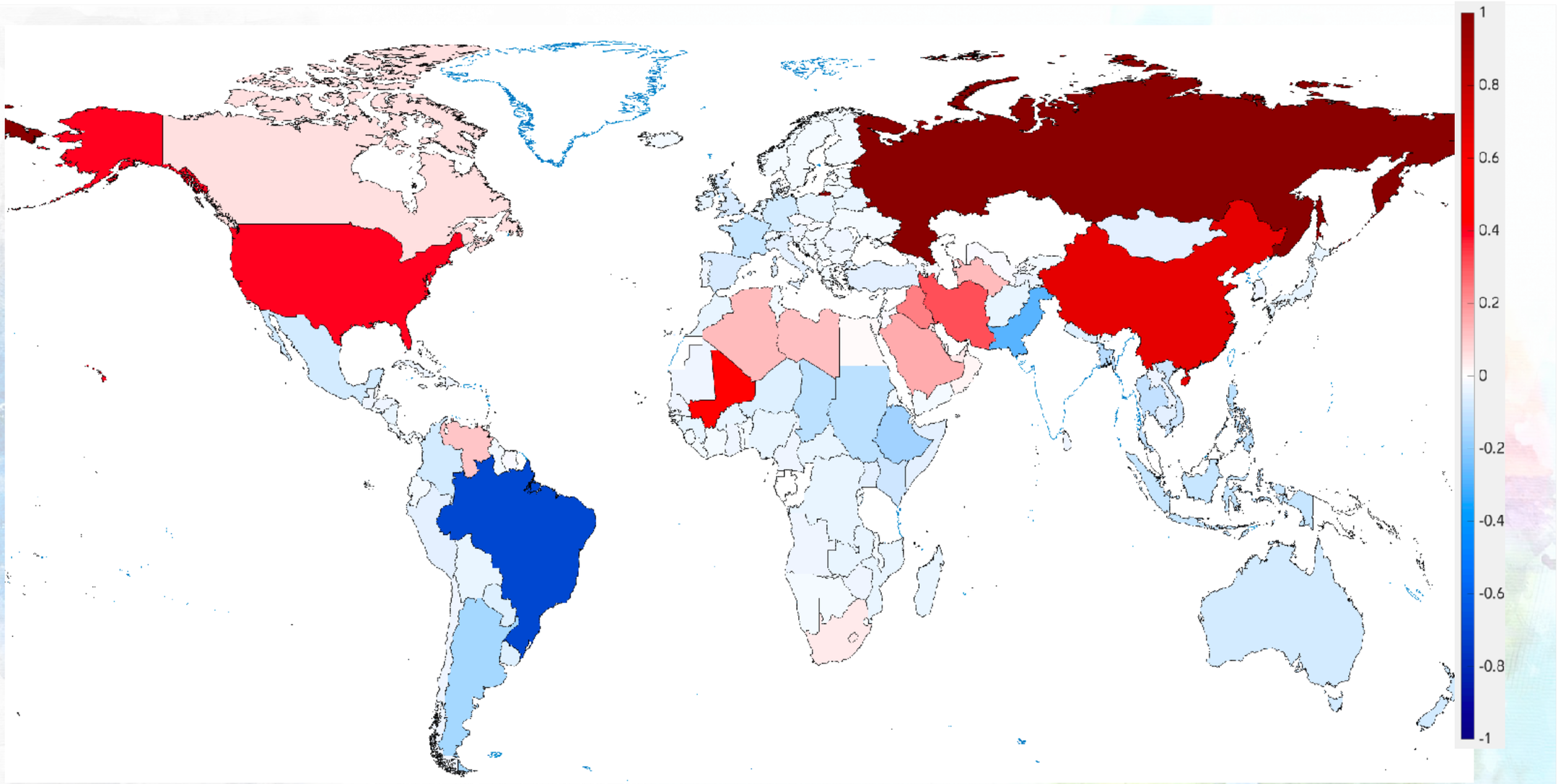


Quelle est l'origine des émissions de méthane (CH_4) ?



Carte mondiale des émissions fugitives relatives

Quelle est l'origine des émissions de méthane (CH_4) ?

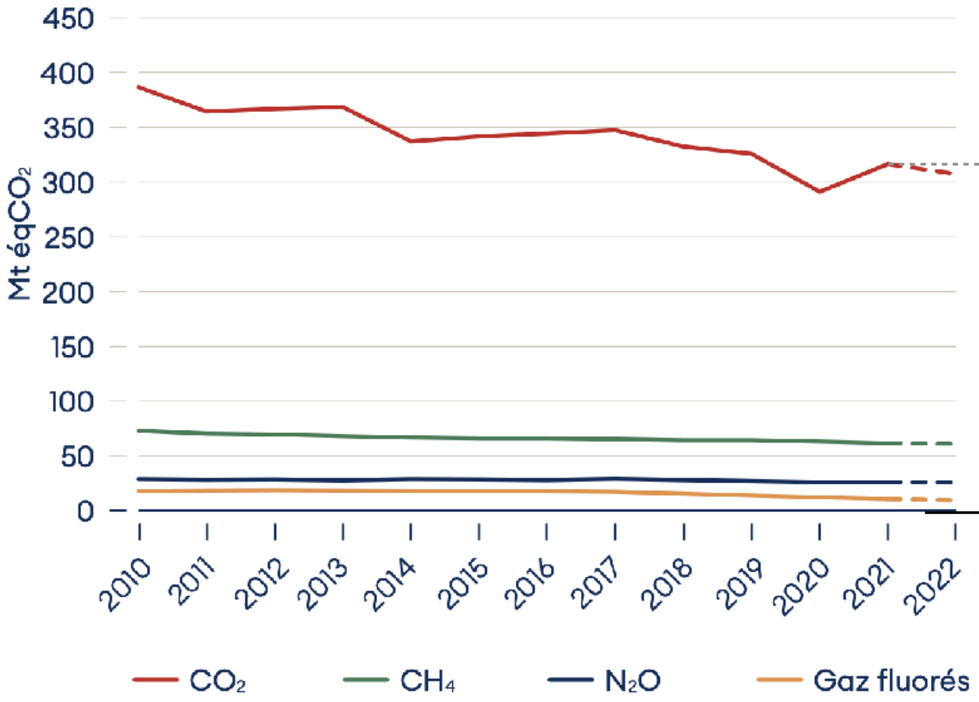


Relative difference between leaks of methane and methane produced by agriculture.
Red color means higher emissions induced by leakage than agriculture.

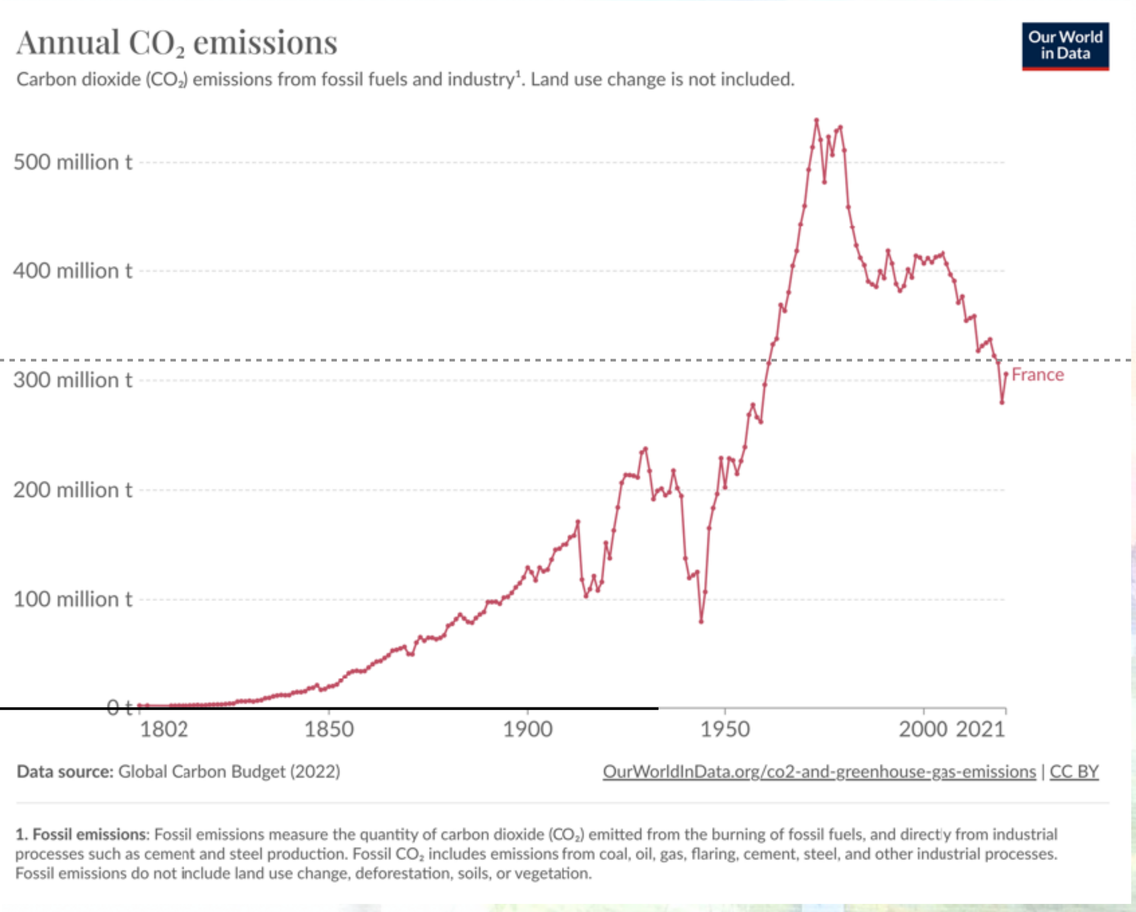
Quelle est l'origine des émissions de méthane (CH_4) ?

Retour en France…

Figure 2.1e – Évolution par gaz des émissions de la France **depuis 2010 (hors UTCATF)**

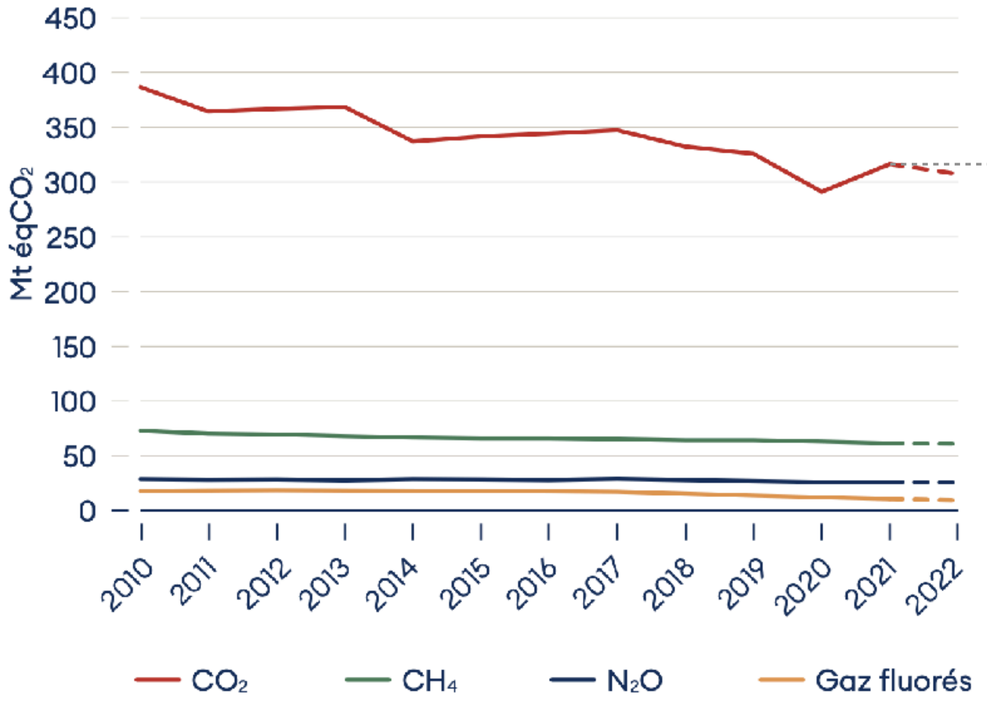


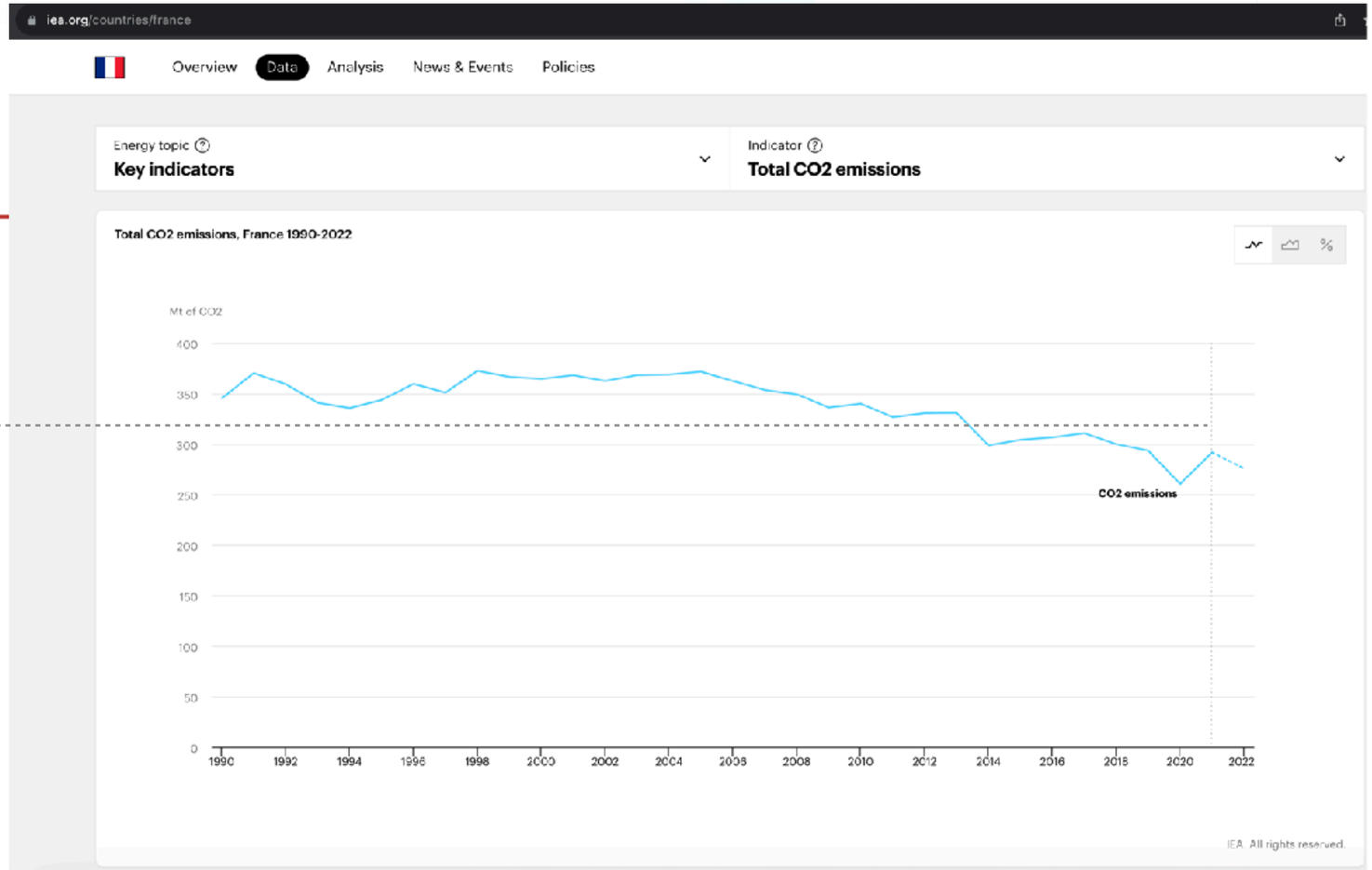
Notes : Les valeurs de pouvoir de réchauffement global utilisées par le Citepa pour son inventaire Secten 2023 sont celles de l'AR5 du GIEC, contrairement aux précédentes éditions du Secten qui utilisaient les valeurs de l'AR4. Les données d'émission pour 2022 sont provisoires.



RAPPORT ANNUEL 2023 DU HAUT CONSEIL POUR LE CLIMAT

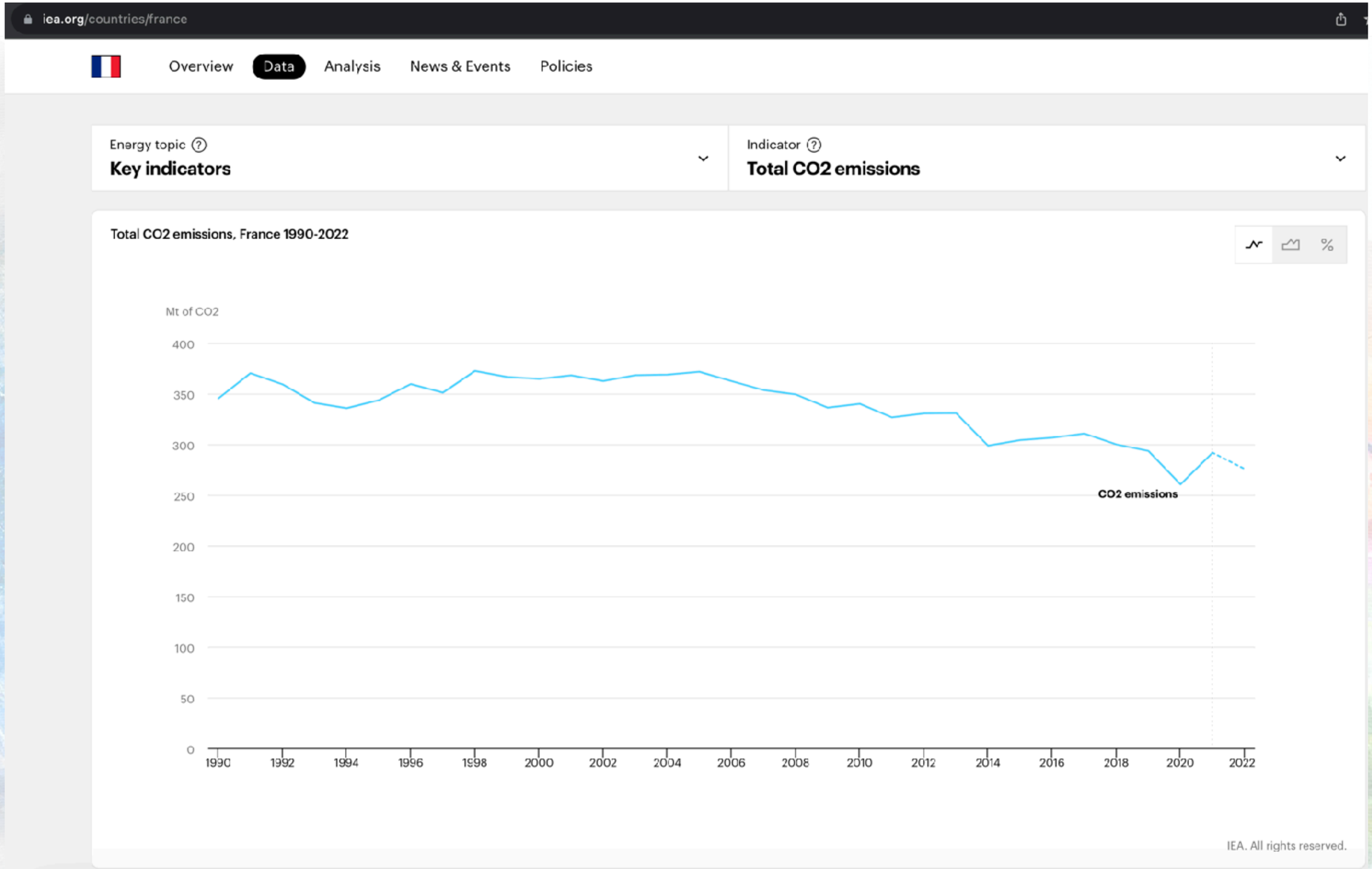
Figure 2.1e – Évolution par gaz des émissions de la France **depuis 2010 (hors UTCATF)**



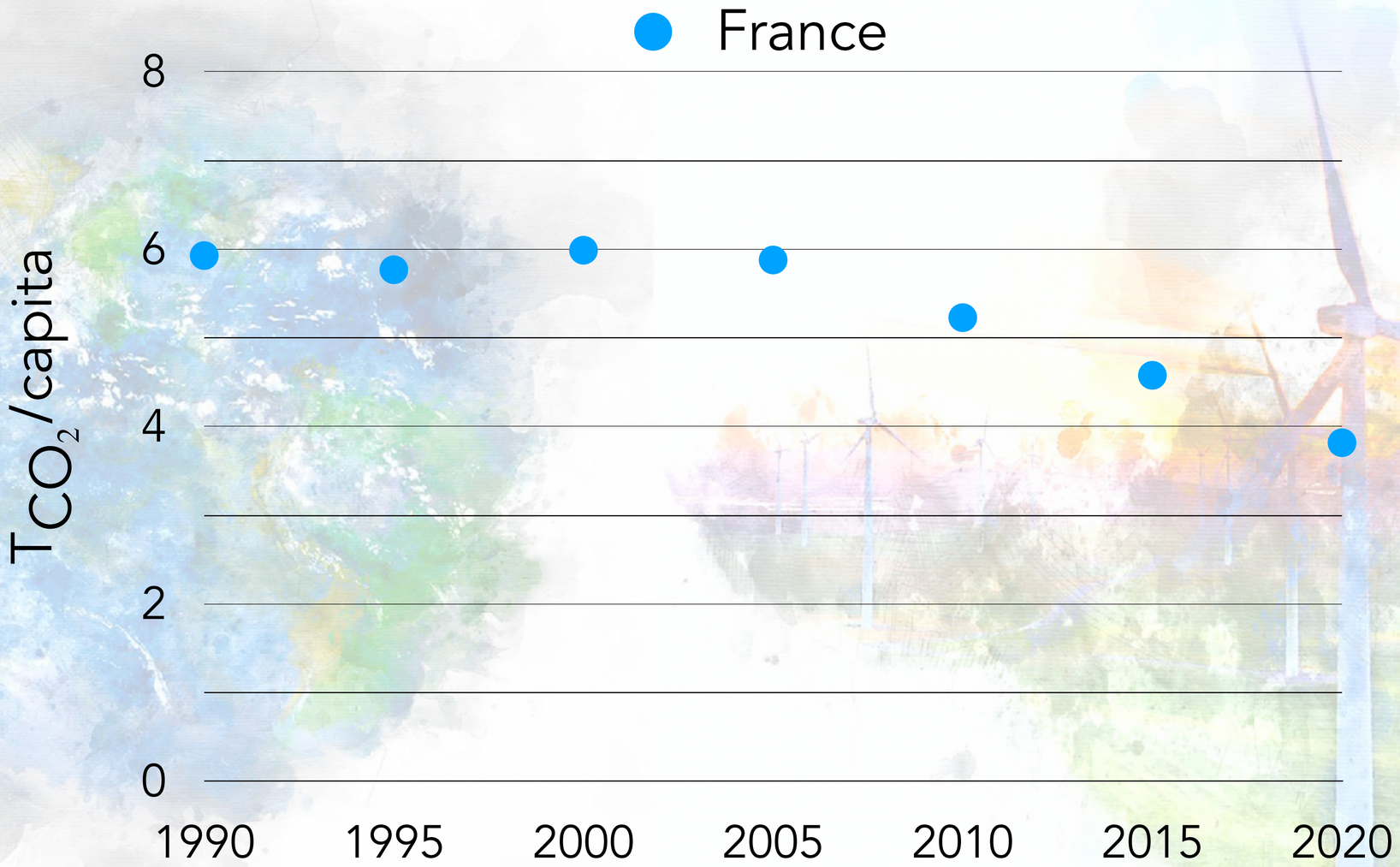


Notes : Les valeurs de pouvoir de réchauffement global utilisées par le Citepa pour son inventaire Secten 2023 sont celles de l'AR5 du GIEC, contrairement aux précédentes éditions du Secten qui utilisaient les valeurs de l'AR4. Les données d'émission pour 2022 sont provisoires.

RAPPORT ANNUEL 2023 DU HAUT CONSEIL POUR LE CLIMAT

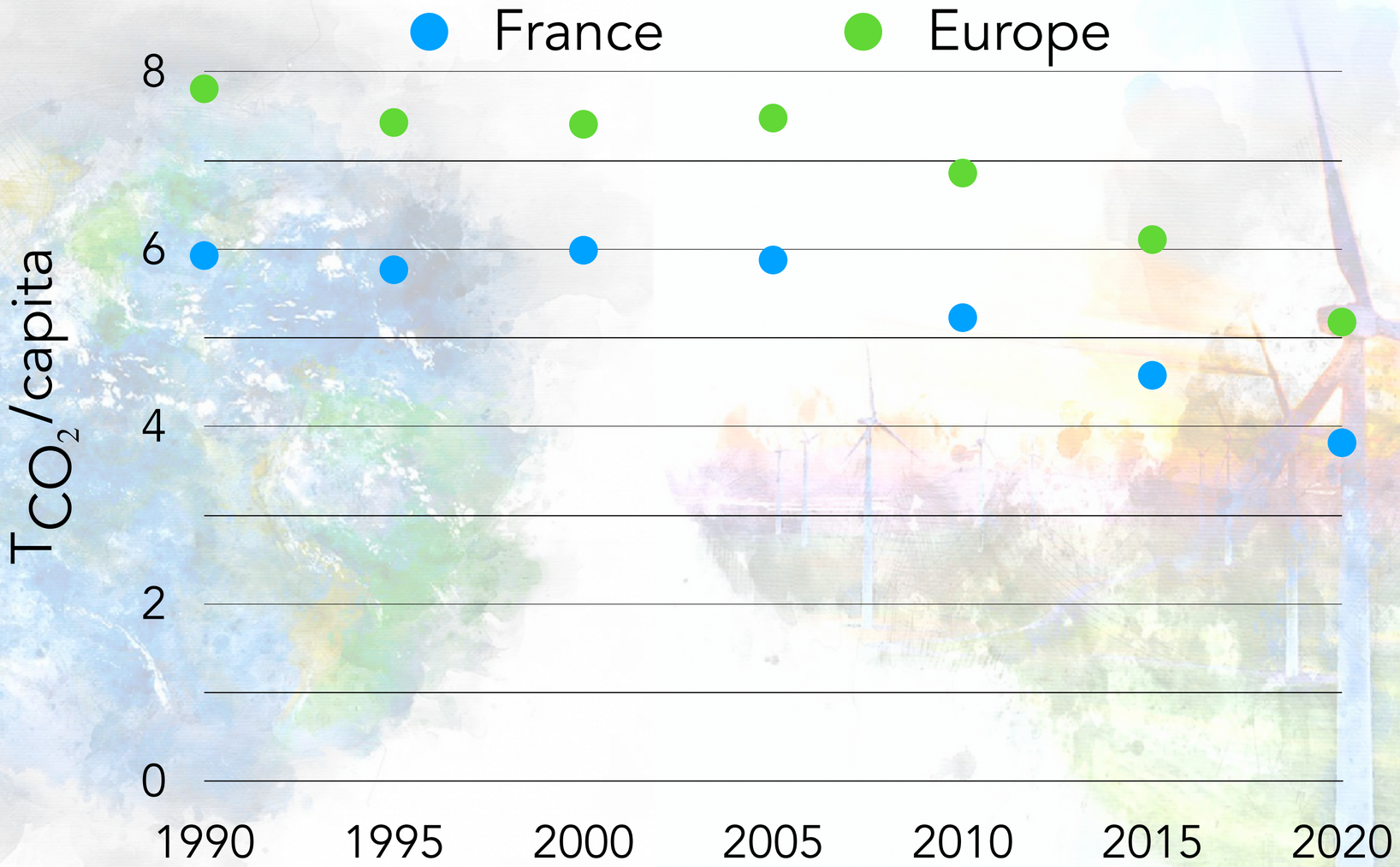

iea.org/countries/france
Overview
Data
Analysis
News & Events
Policies
Energy topic
Key indicators
Indicator
Total CO2 emissions
Total CO2 emissions, France 1990-2022
Mt of CO2
400
350
300
250
200
150
100
50
0
1990
1992
1994
1996
1998
2000
2002
2004
2006
2008
2010
2012
2014
2016
2018
2020
2022
CO2 emissions
IEA. All rights reserved.

$$CO_2 = \text{Population} \times \frac{CO_2}{\text{Population}}$$



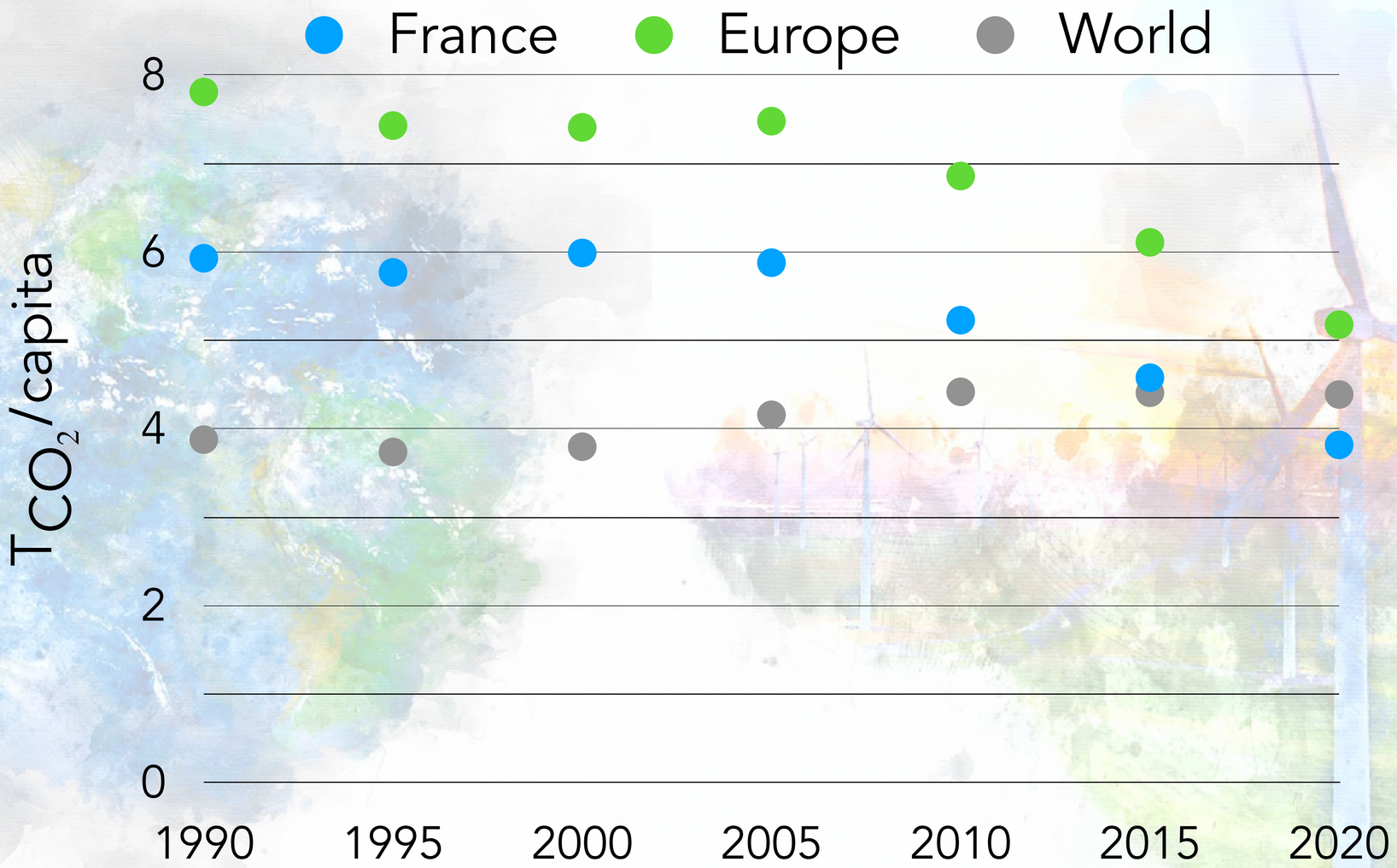
https://www.iea.org/statistics/

$$CO_2 = \text{Population} \times \frac{CO_2}{\text{Population}}$$



https://www.iea.org/statistics/

$$CO_2 = \text{Population} \times \frac{CO_2}{\text{Population}}$$

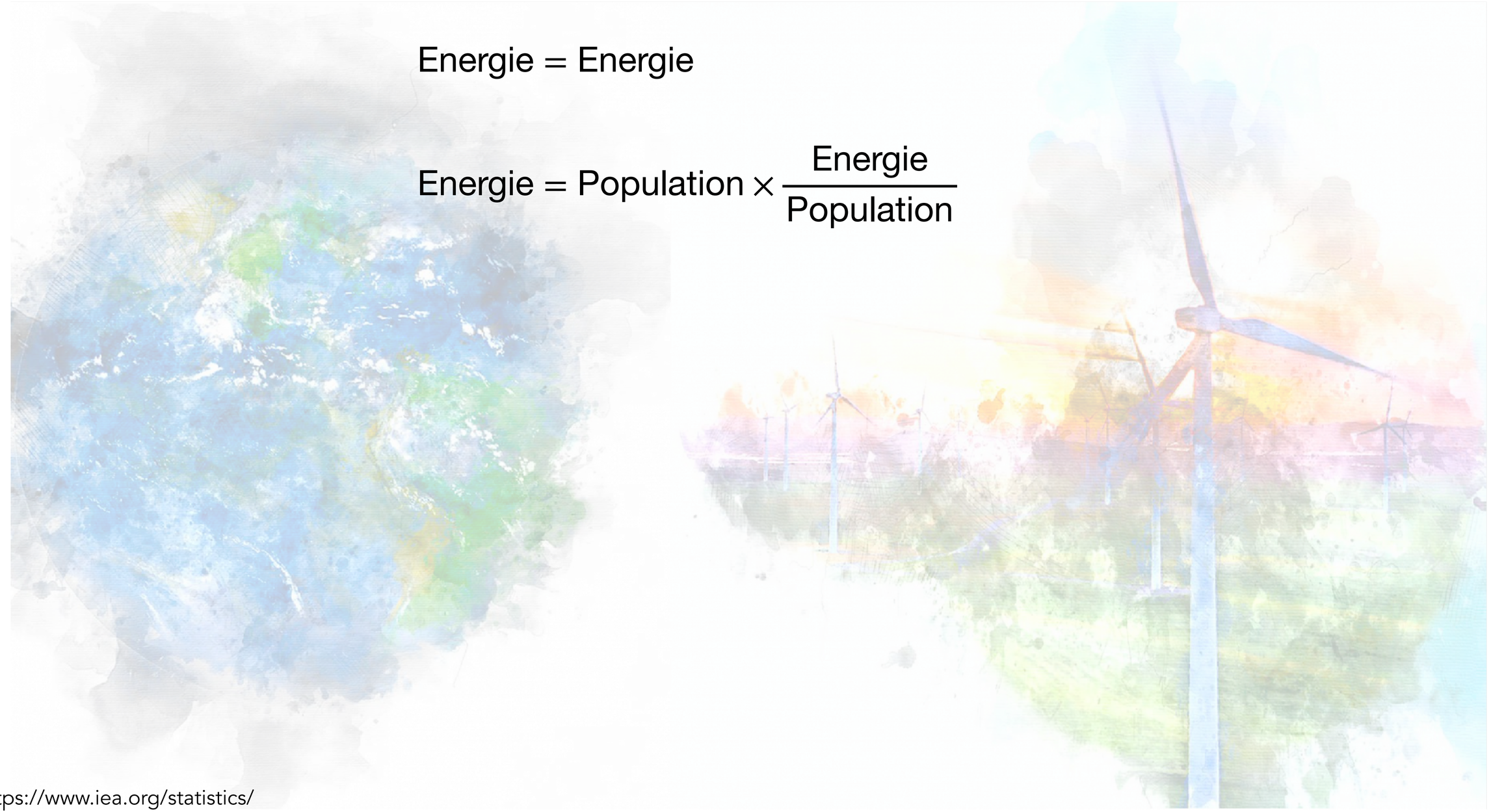


https://www.iea.org/statistics/

Seconde analyse

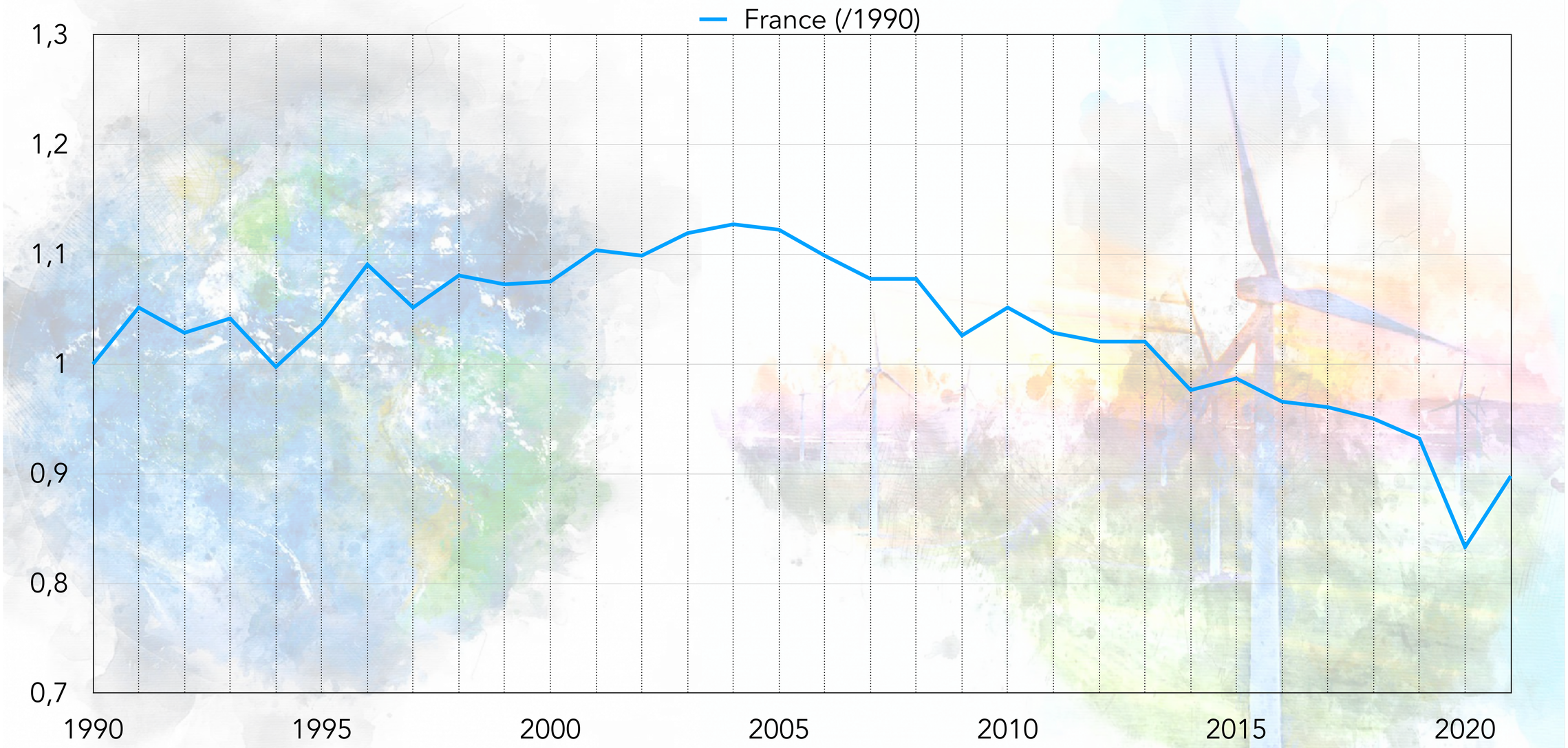
$$\text{Energie} = \text{Energie}$$

$$\text{Energie} = \text{Population} \times \frac{\text{Energie}}{\text{Population}}$$



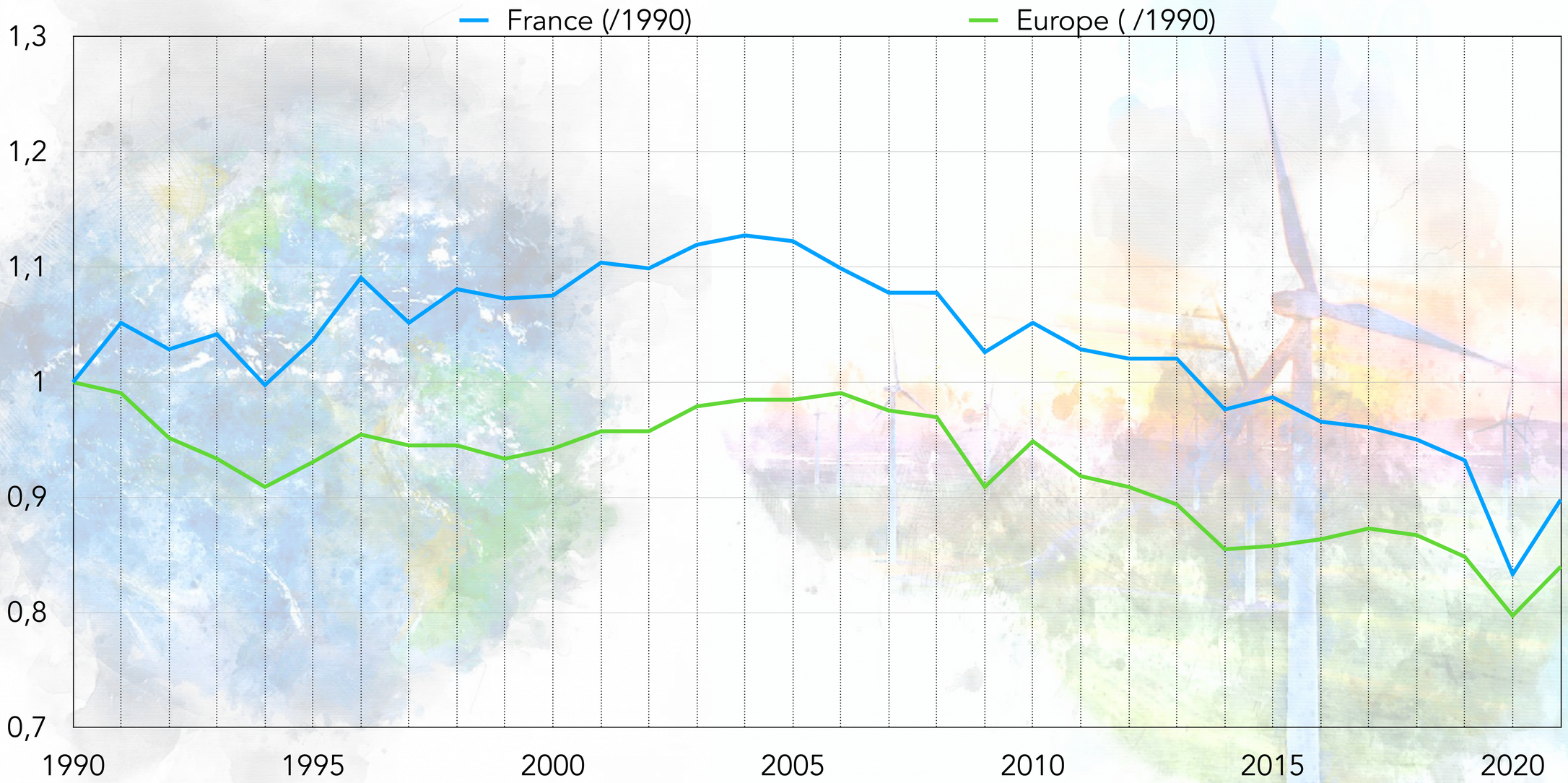
https://www.iea.org/statistics/

$\frac{\text{Energie}}{\text{Population}}$



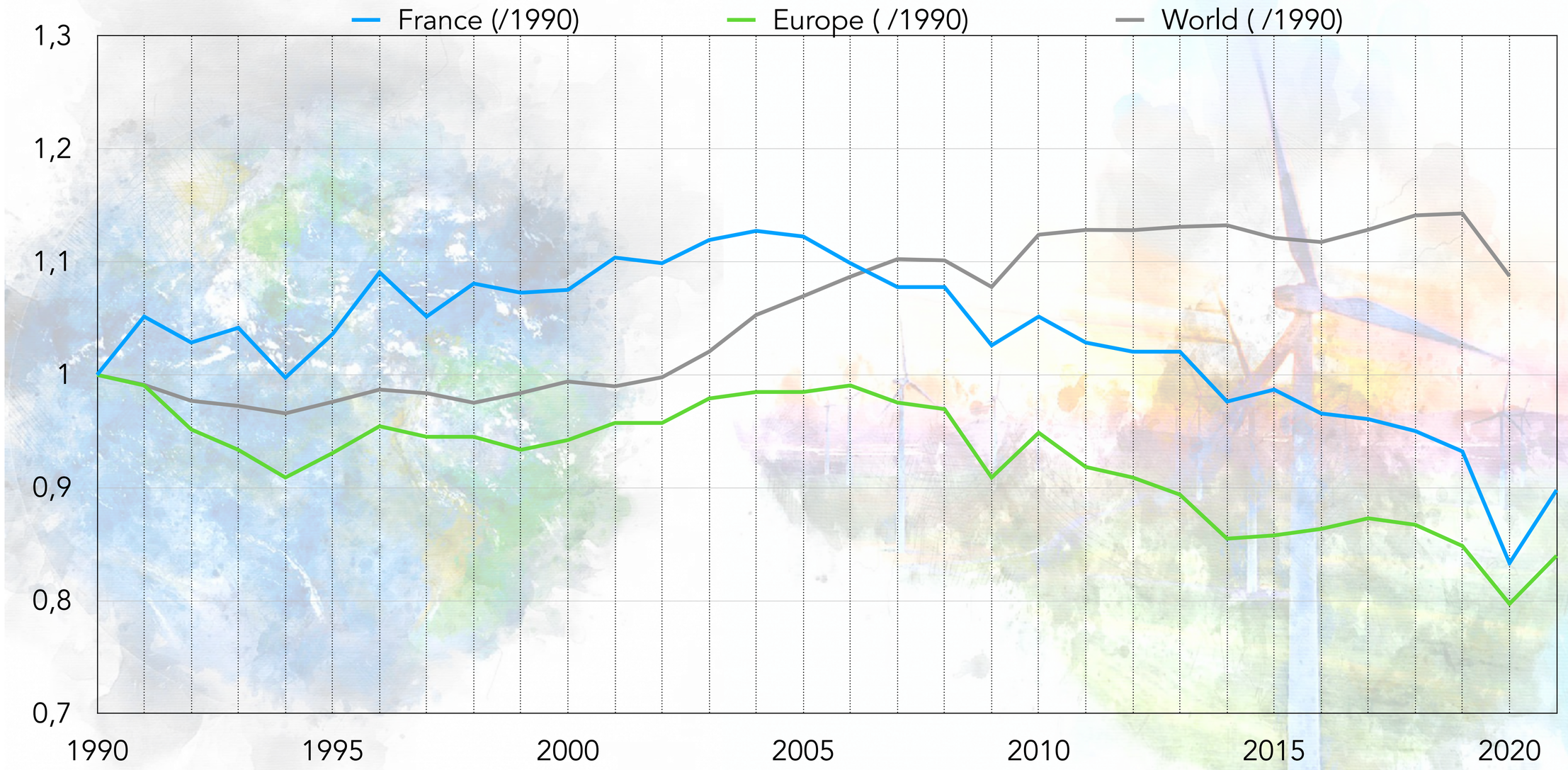
https://www.iea.org/statistics/

Energie / Population



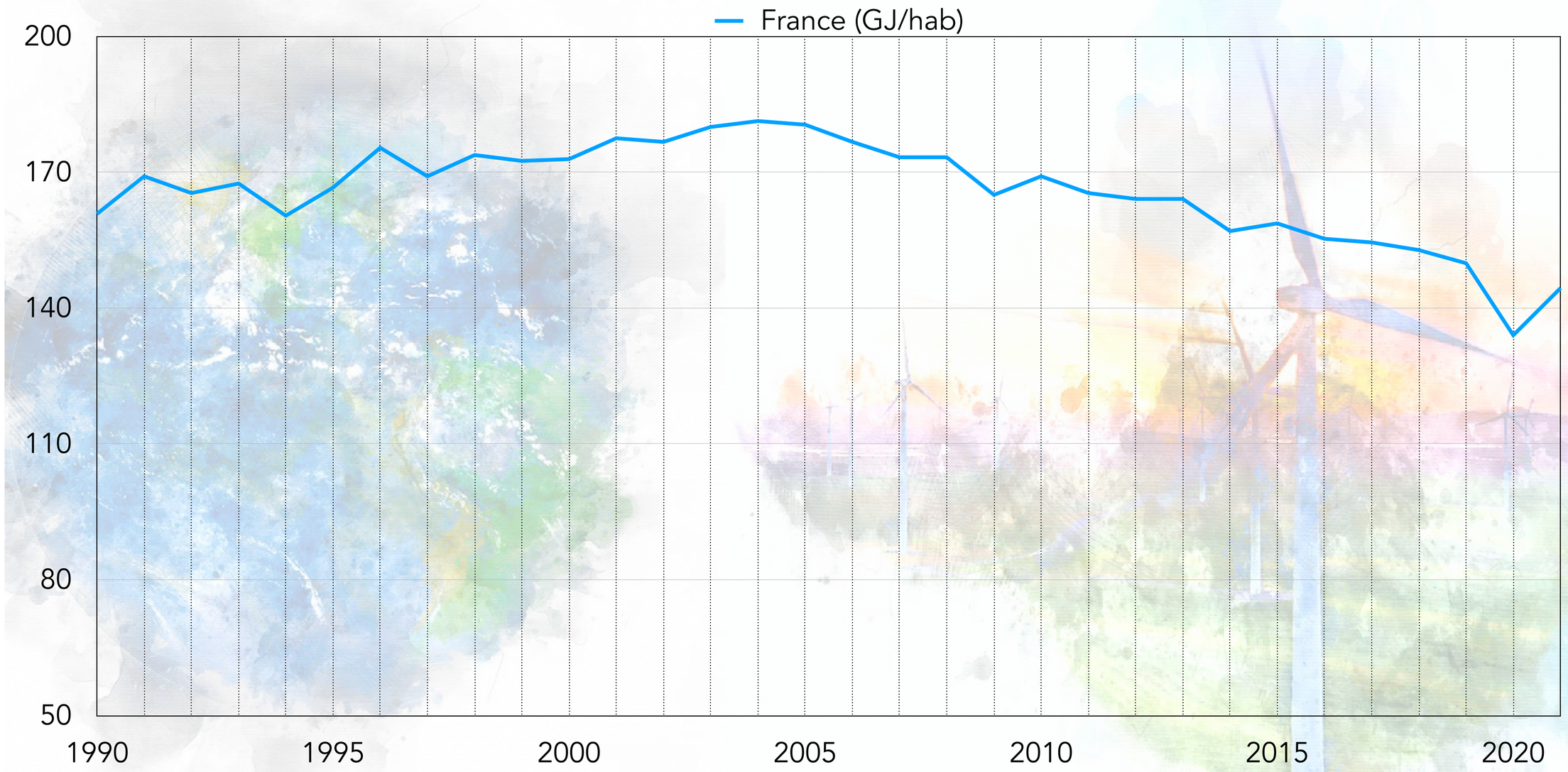
https://www.iea.org/statistics/

$\frac{\text{Energie}}{\text{Population}}$



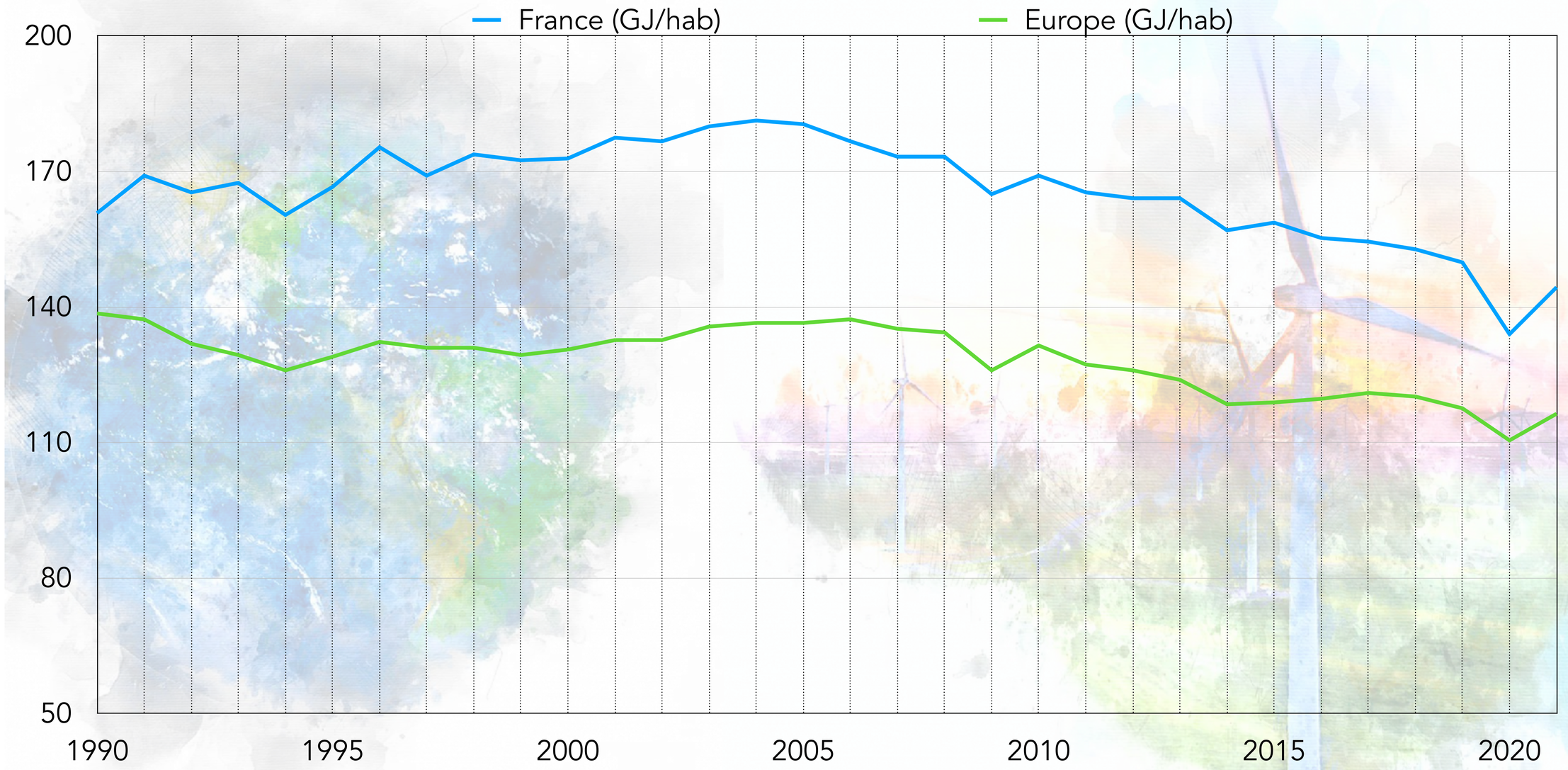
https://www.iea.org/statistics/

$\frac{\text{Energie}}{\text{Population}}$



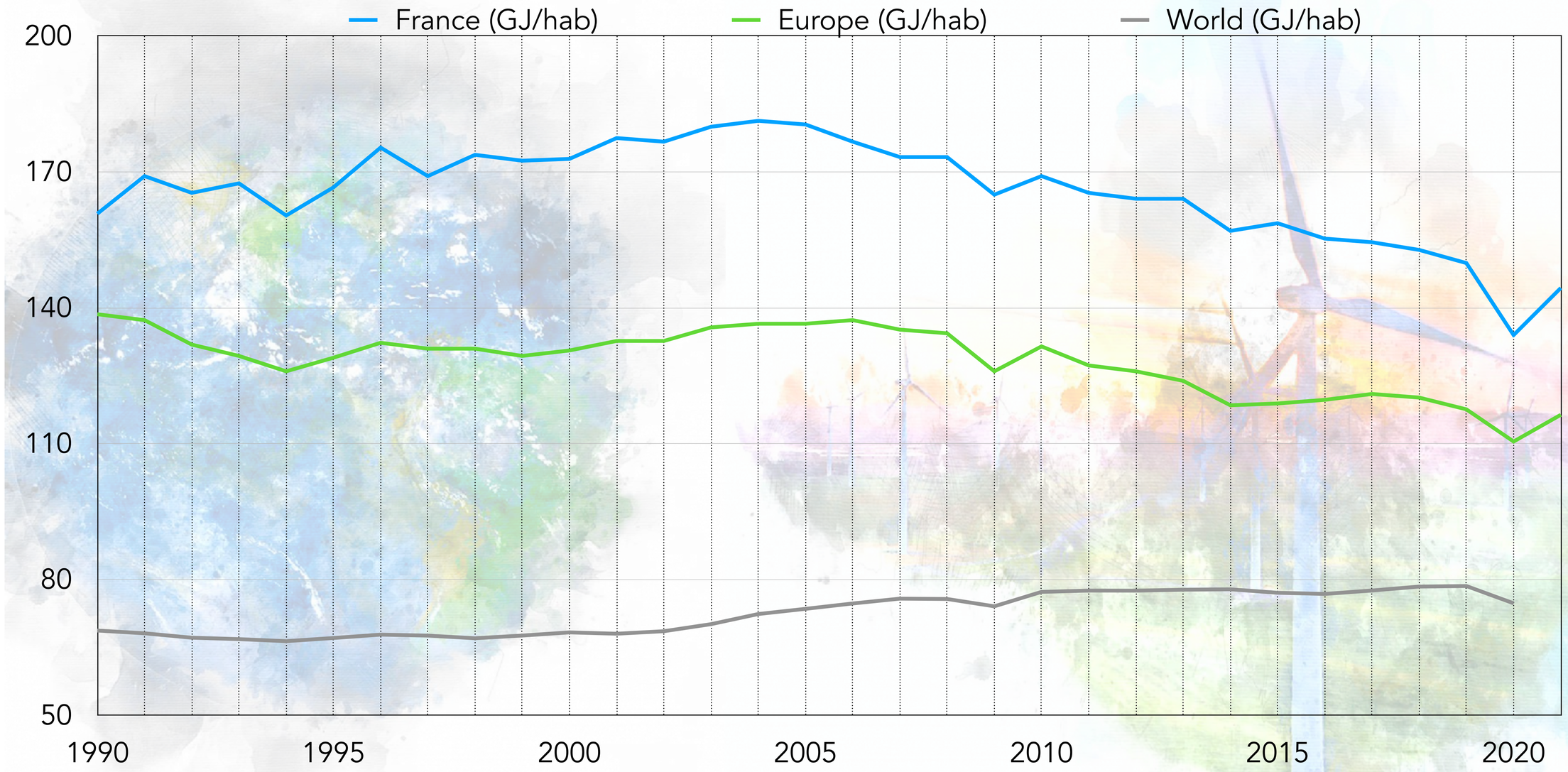
https://www.iea.org/statistics/

$\frac{\text{Energie}}{\text{Population}}$



https://www.iea.org/statistics/

$\frac{\text{Energie}}{\text{Population}}$



https://www.iea.org/statistics/

Troisième analyse

$$CO_2 = CO_2$$

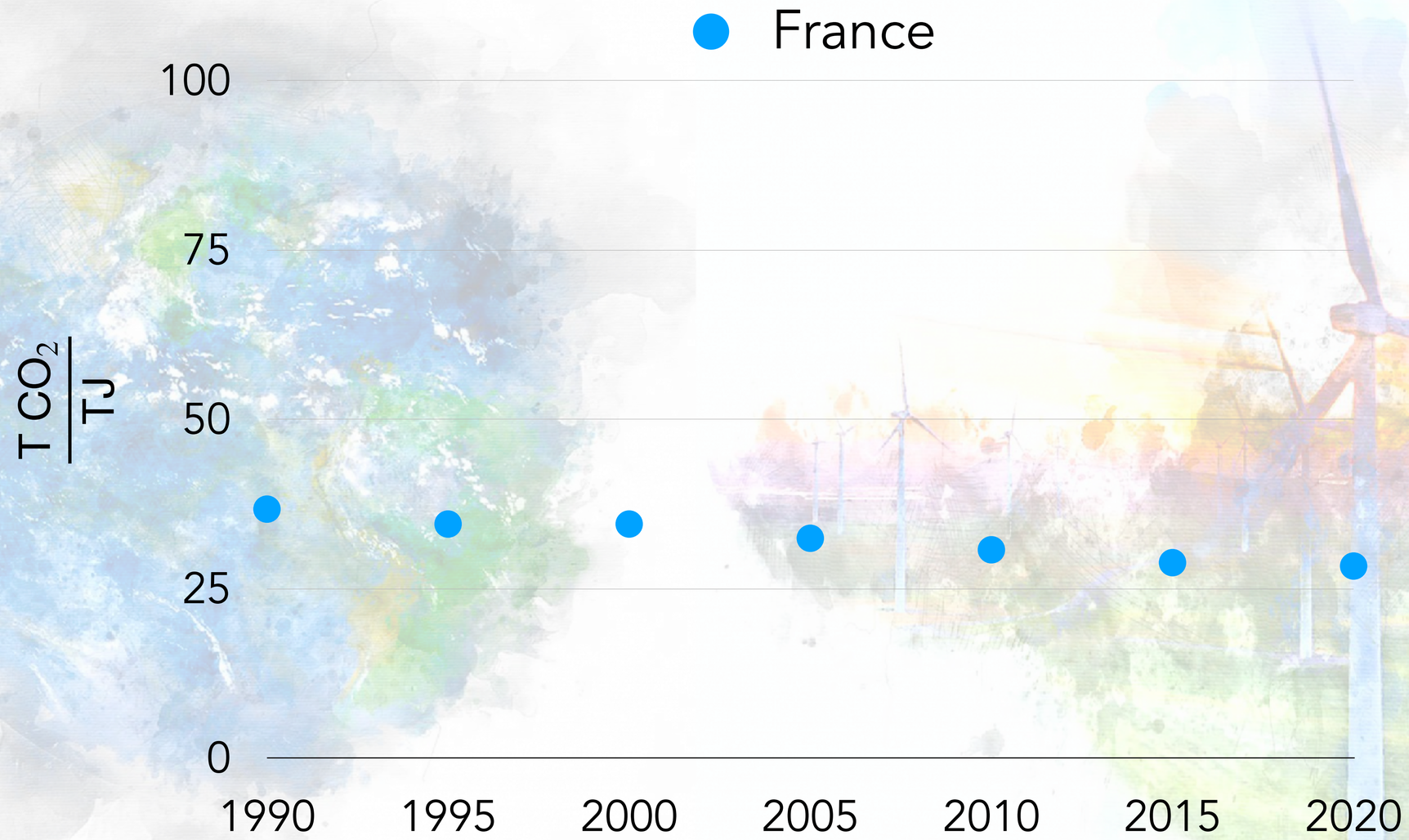
$$CO_2 = \text{Population} \times \frac{CO_2}{\text{Population}}$$

$$CO_2 = \text{Population} \times \frac{\text{Energie}}{\text{Population}} \times \frac{CO_2}{\text{Energie}}$$

Ce raport dépend uniquement d'aspect énergétique

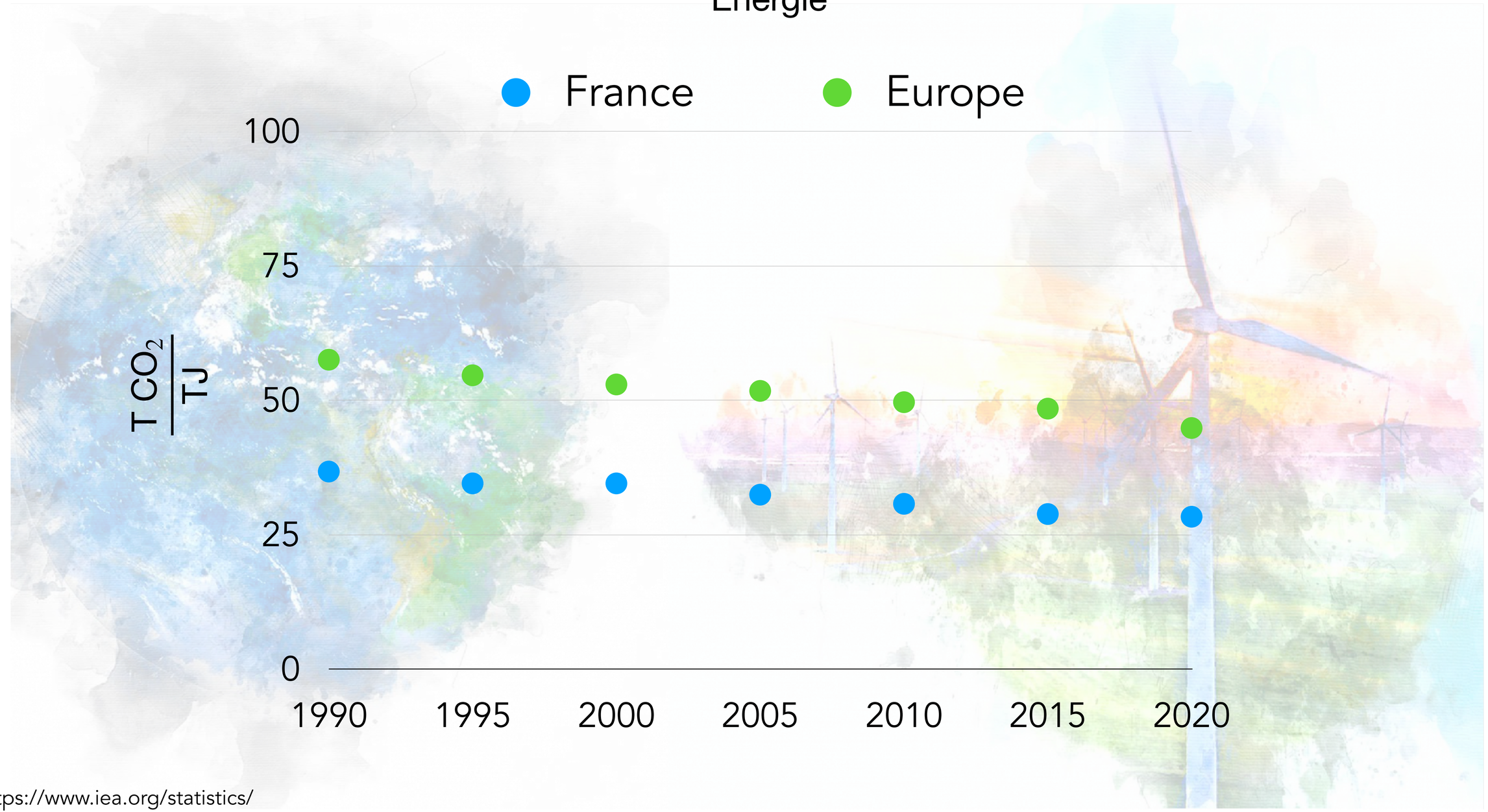
https://www.iea.org/statistics/

$\frac{T\ CO_2}{Energie}$



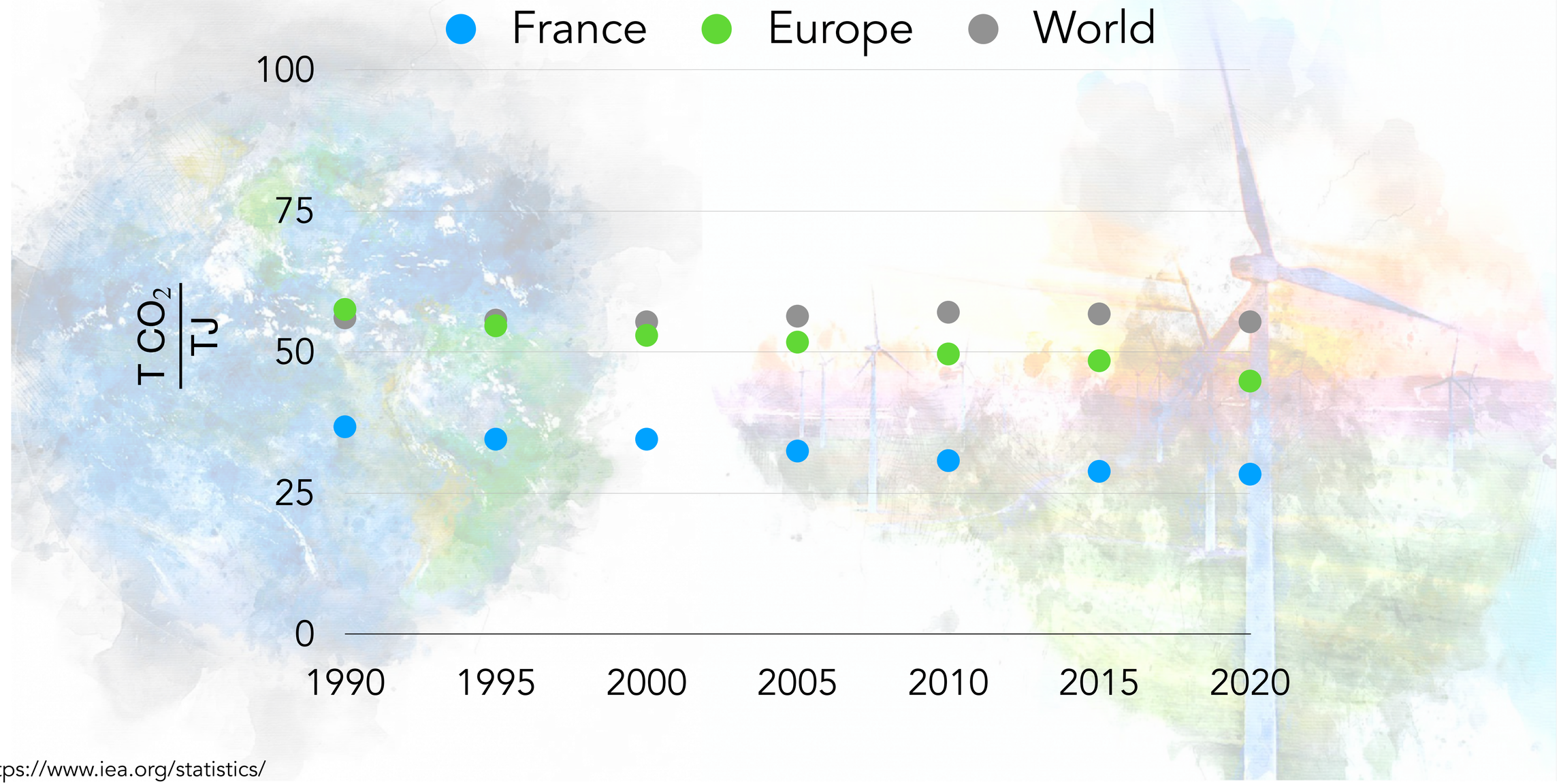
https://www.iea.org/statistics/

$$\frac{T\ CO_2}{Energie}$$



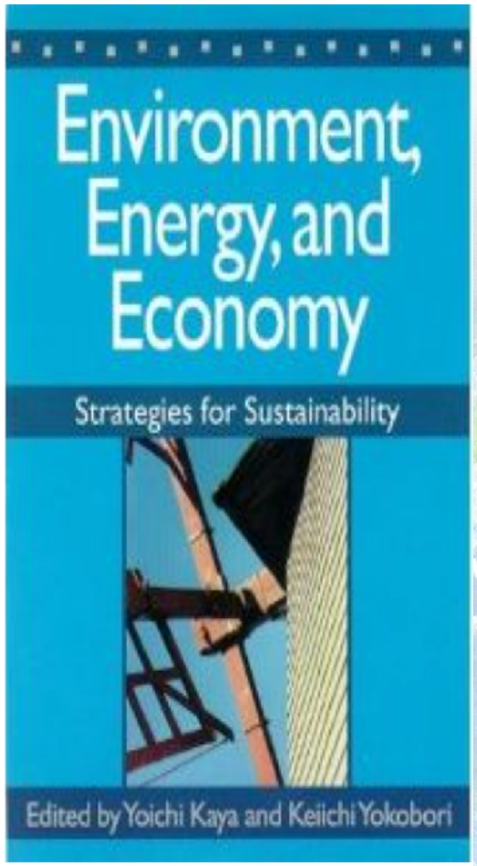
https://www.iea.org/statistics/

$\frac{T\ CO_2}{Energie}$



https://www.iea.org/statistics/

Equation de Kaya



$$CO_2 = CO_2$$

$$CO_2 = \text{Population} \times \frac{CO_2}{\text{Population}}$$

$$CO_2 = \text{Population} \times \frac{\text{Energie}}{\text{Population}} \times \frac{CO_2}{\text{Energie}}$$

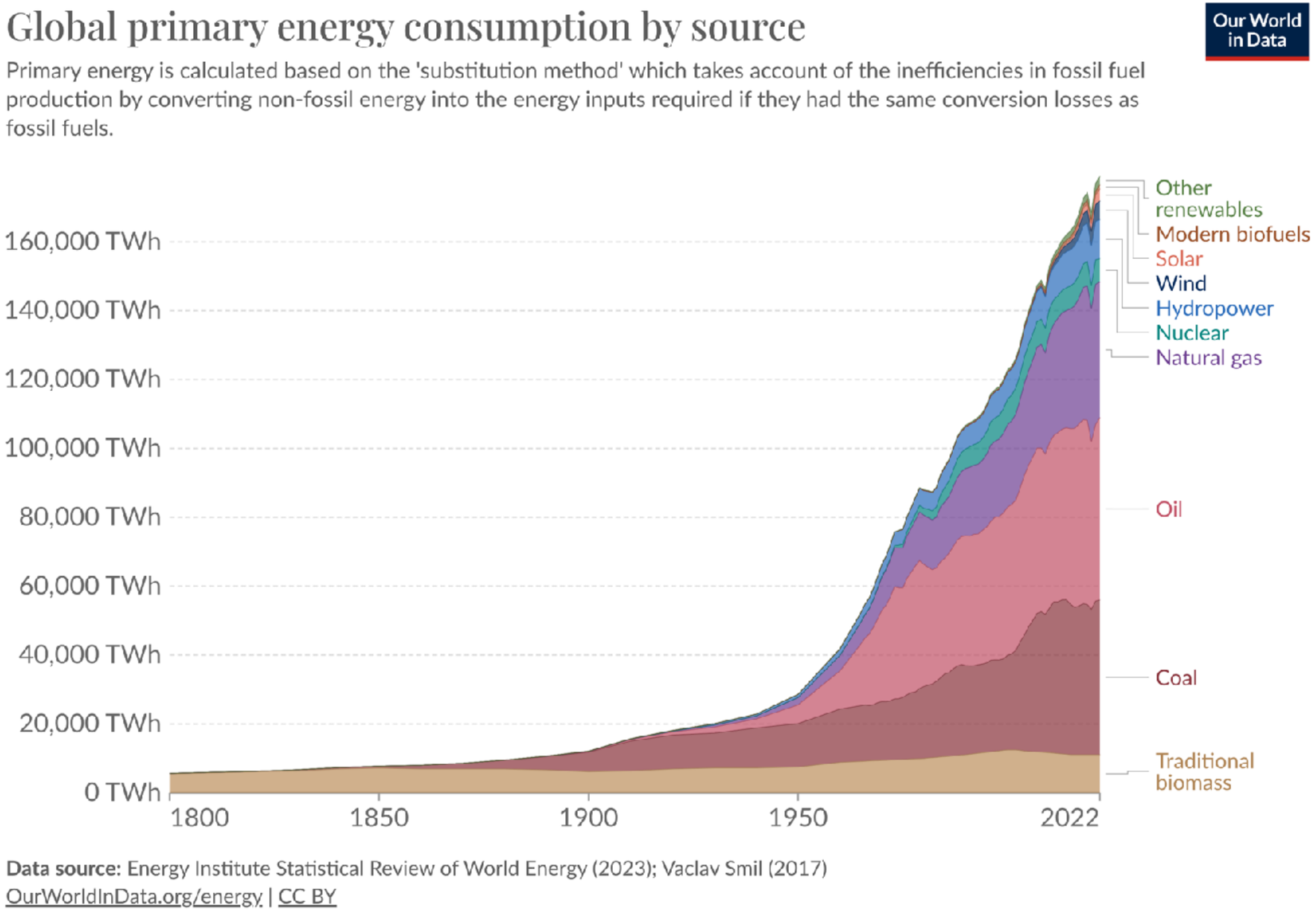
Ce rapport dépend uniquement d'aspect énergétique

$$CO_2 = \text{Population} \times \frac{\text{PIB}}{\text{Population}} \times \frac{\text{Energie}}{\text{PIB}} \times \frac{CO_2}{\text{Energie}}$$

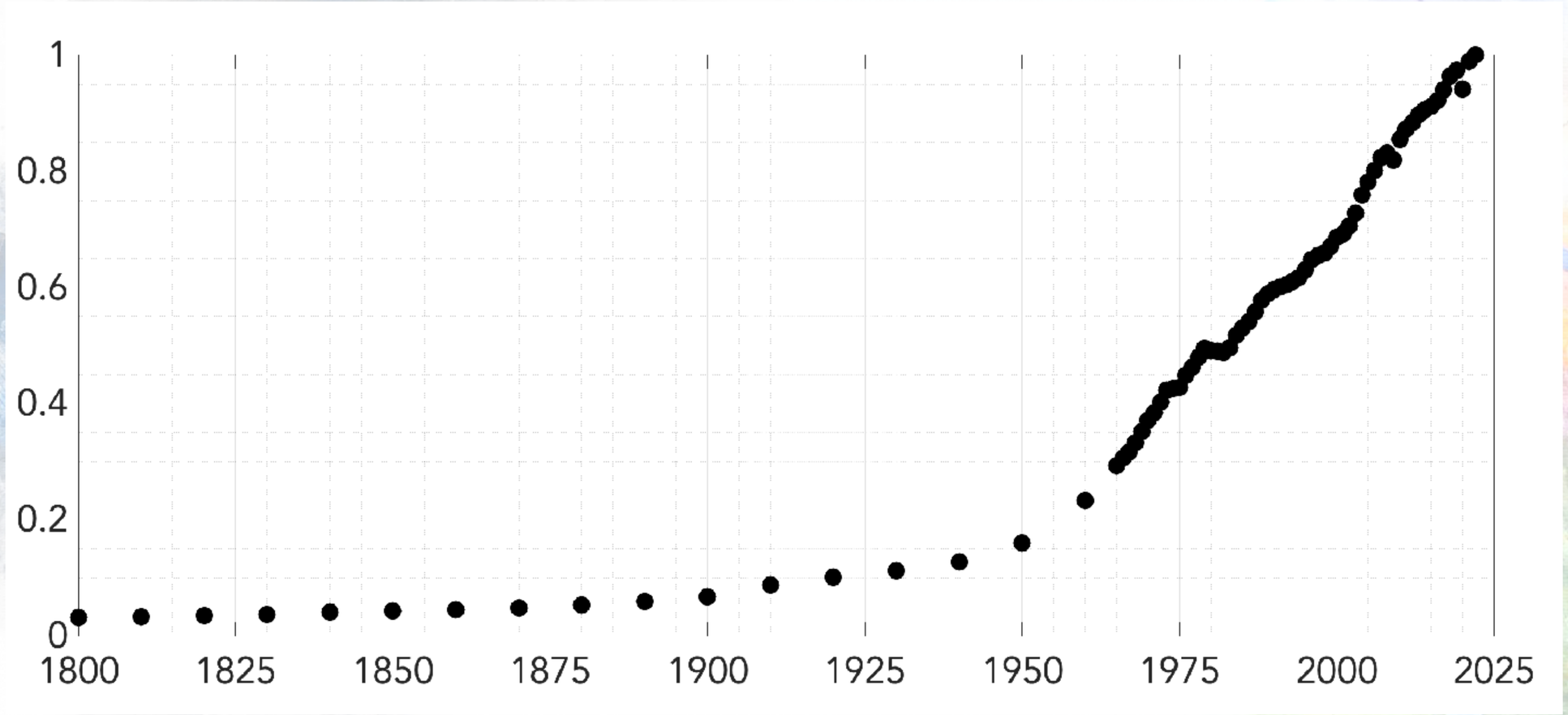
Equation de Kaya

Yamaji, K., Matsuhashi, R, Nagata, Y. Kaya. Y. (1991) "An integrated system for CO_2/energy/GNP analysis: Case studies on economic measures for CO_2 reduction in Japan." Paper presented at the Workshop on CO_2 Reduction and Removal: Measures for the Next Century, 19-21 March, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.

Sources d'énergie au niveau mondial (1800-2022)



Quelques chiffres clés



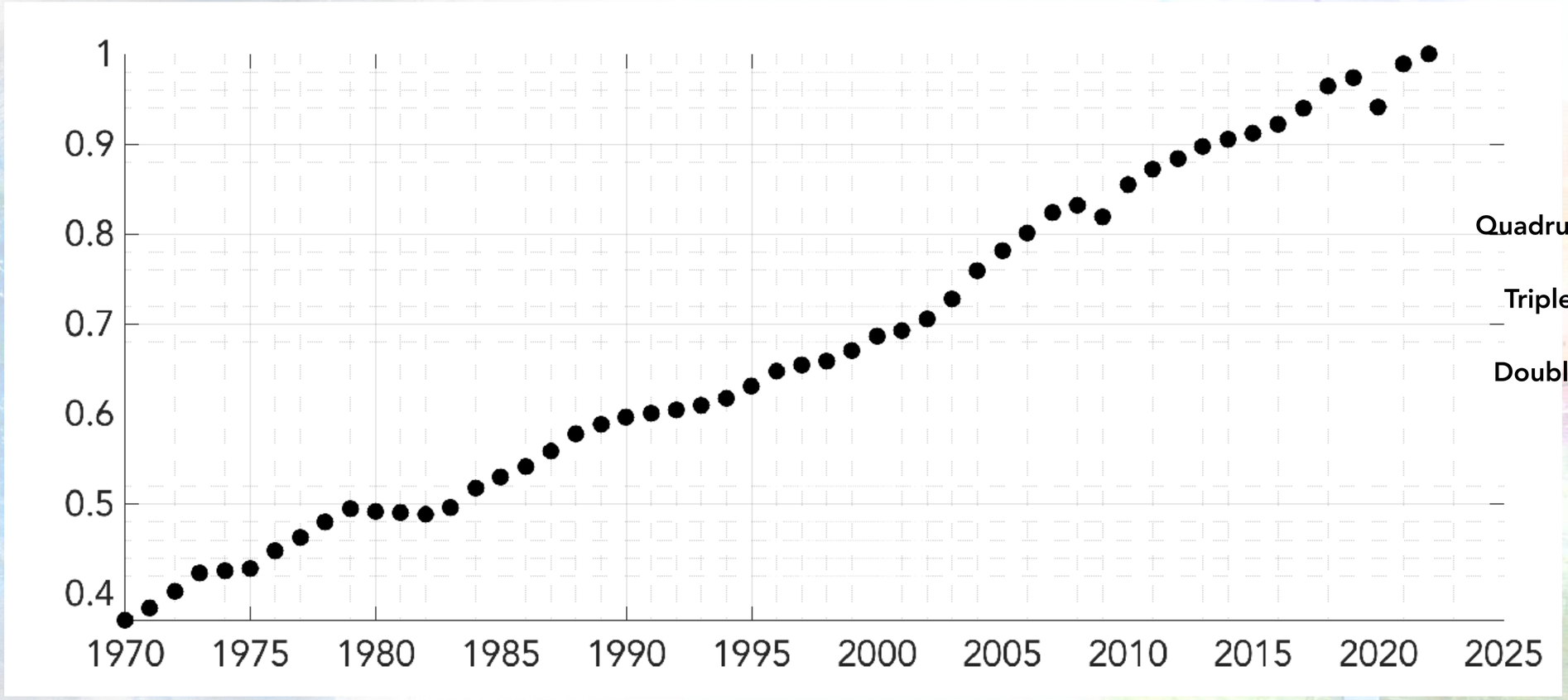
Quadruplement depus 1960

Triplement depuis 1967

Doublement depuis 1979

Vaclav Smil (2017). Energy Transitions: Global and National Perspectives. & BP Statistical Review of World Energy, ISBN 144085324X

Quelques chiffres clés



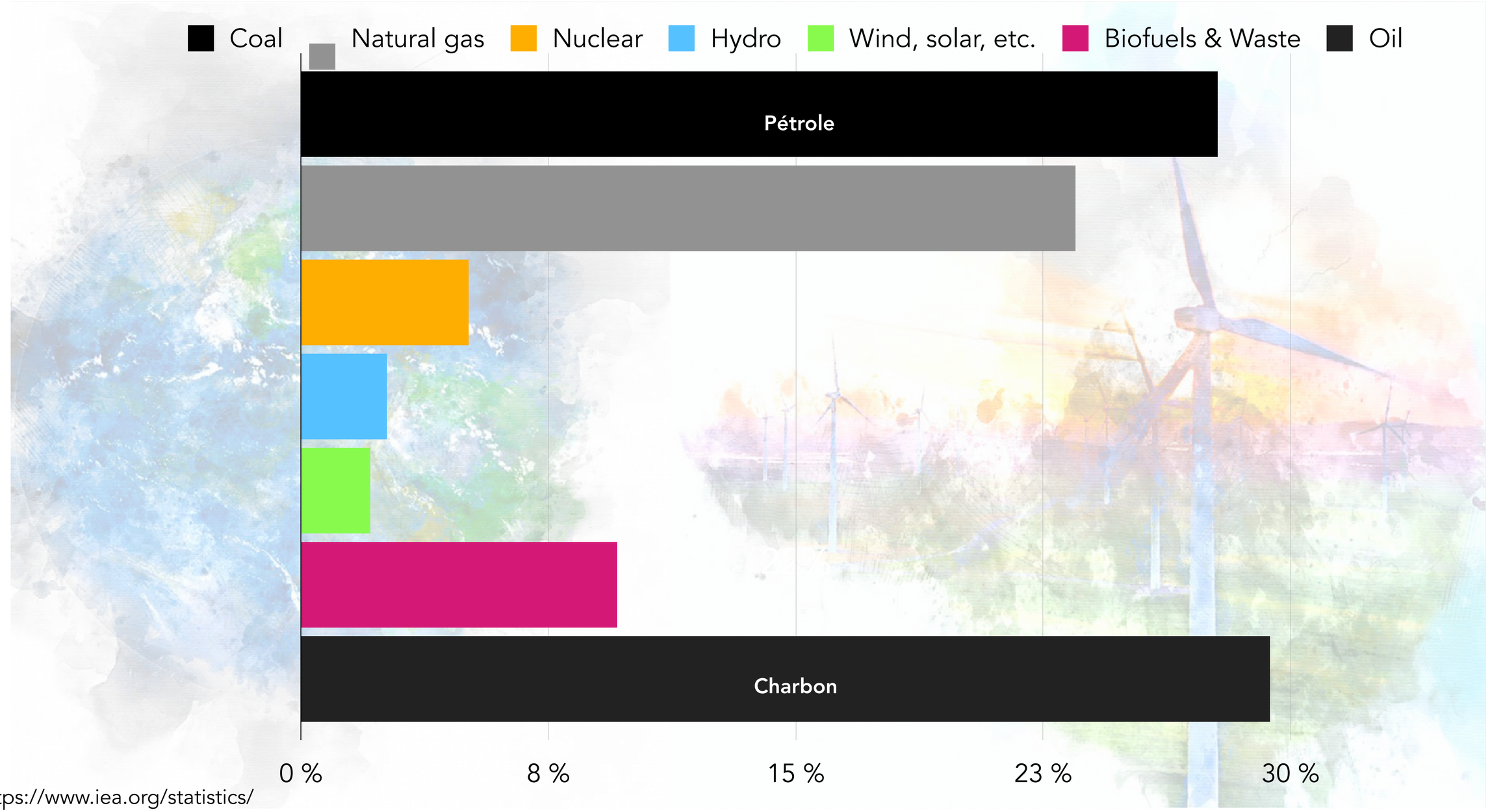
Quadruplement depus 1960

Triplement depuis 1967

Doublement depuis 1979

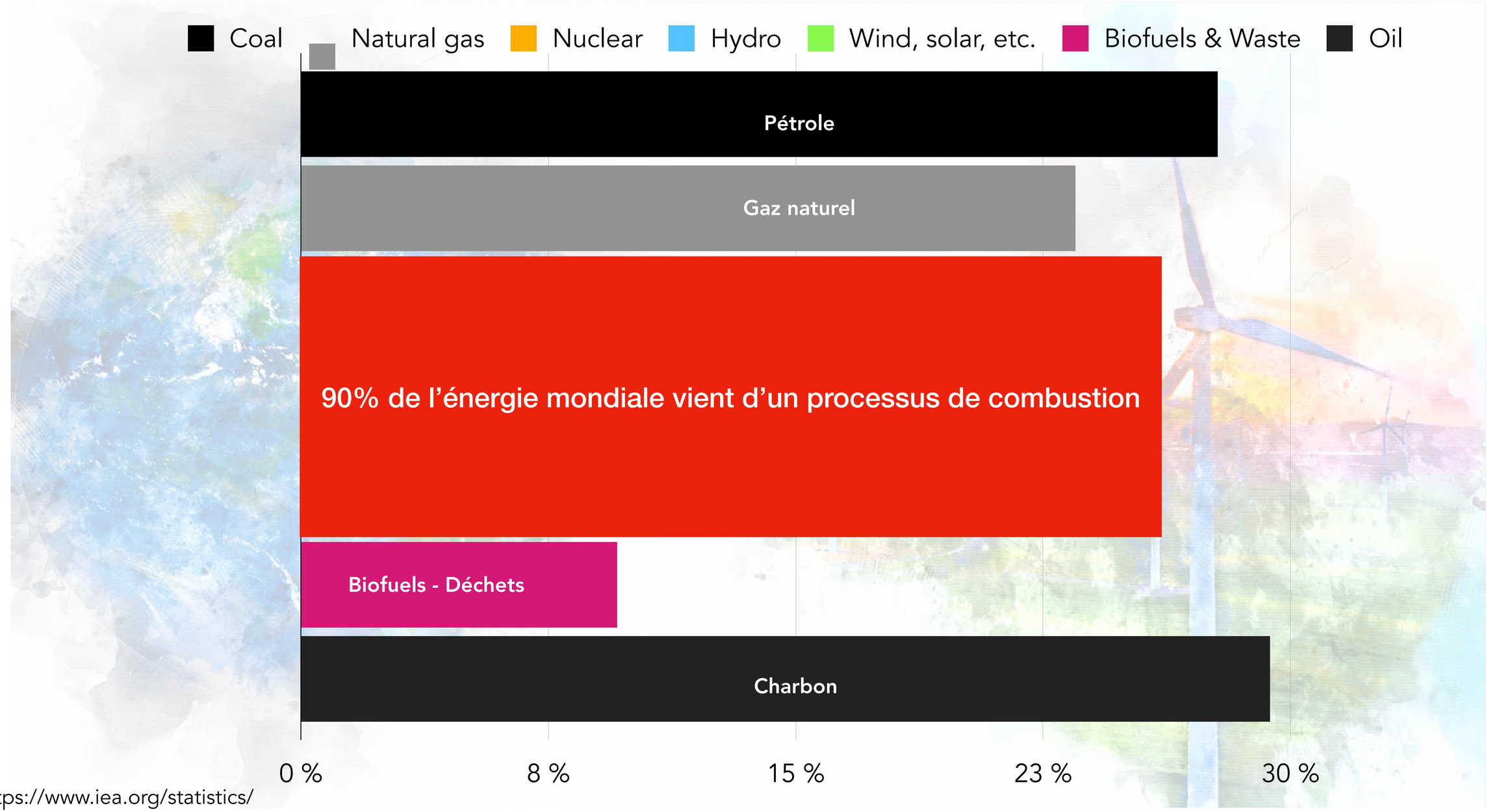
Vaclav Smil (2017). Energy Transitions: Global and National Perspectives. & BP Statistical Review of World Energy, ISBN 144085324X

Sources d'énergie au niveau mondial (2019)



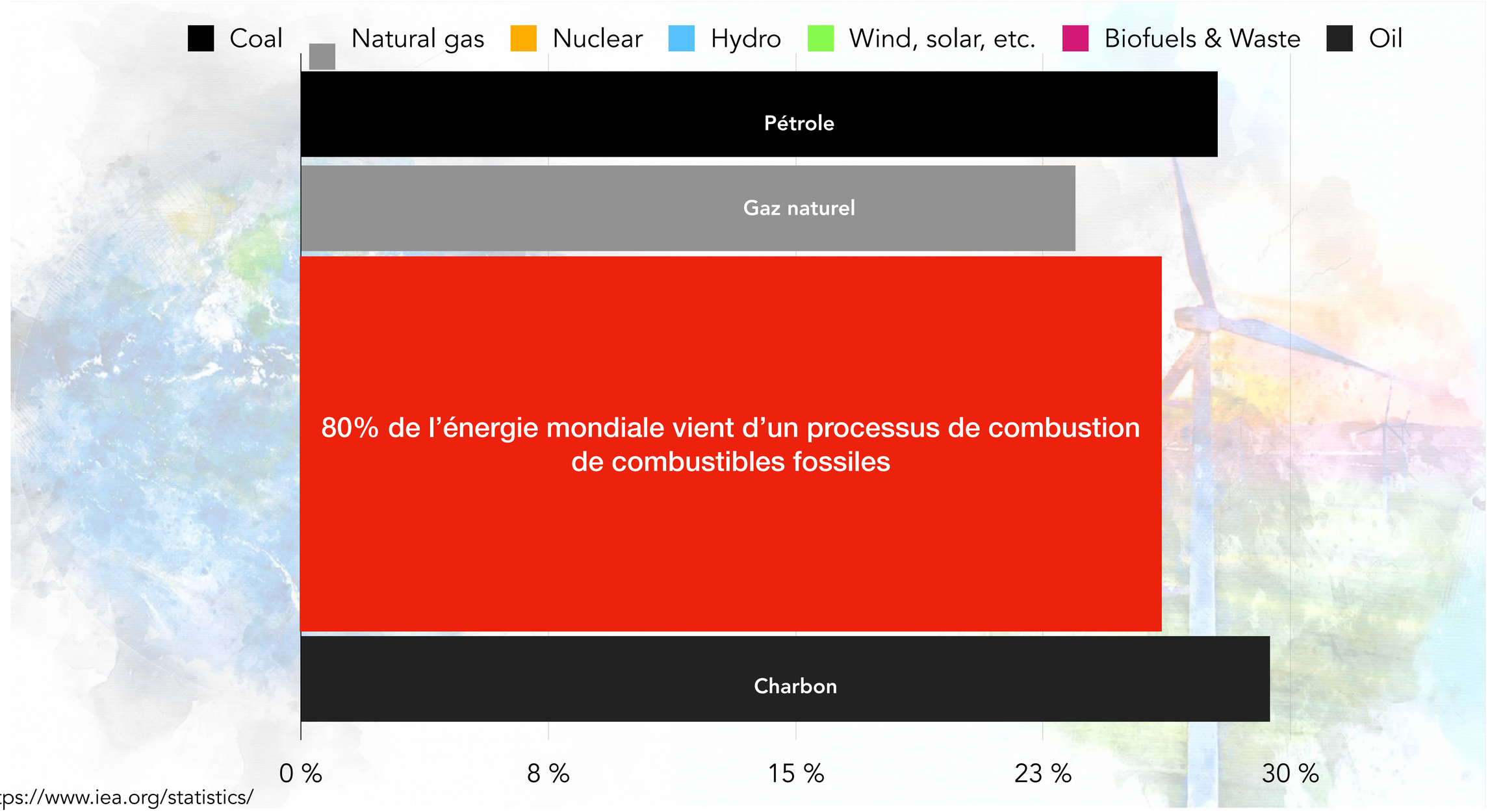
https://www.iea.org/statistics/

Sources d'énergie au niveau mondial (2019)



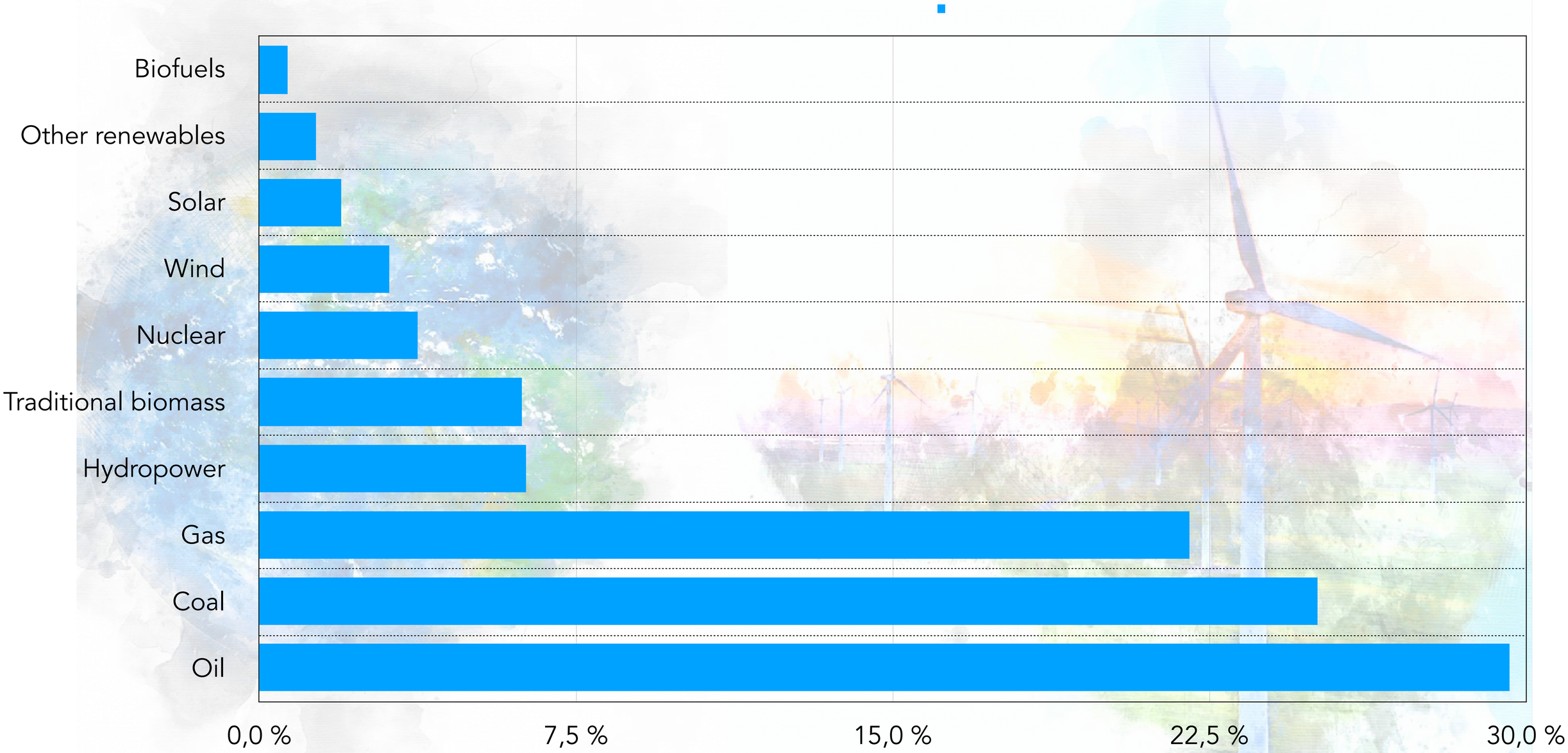
https://www.iea.org/statistics/

Sources d'énergie au niveau mondial (2019)



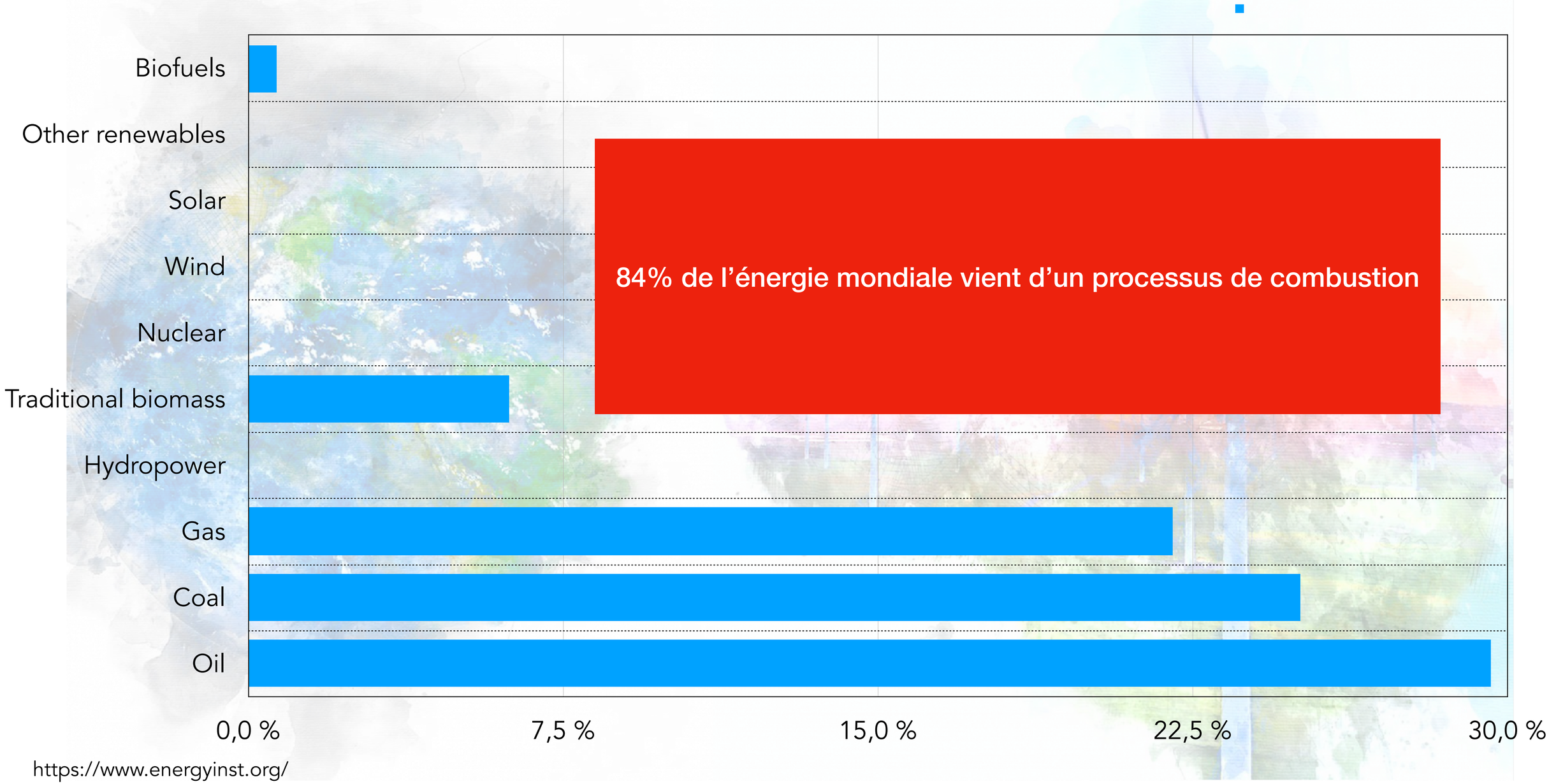
https://www.iea.org/statistics/

Sources d'énergie au niveau mondial (2022)



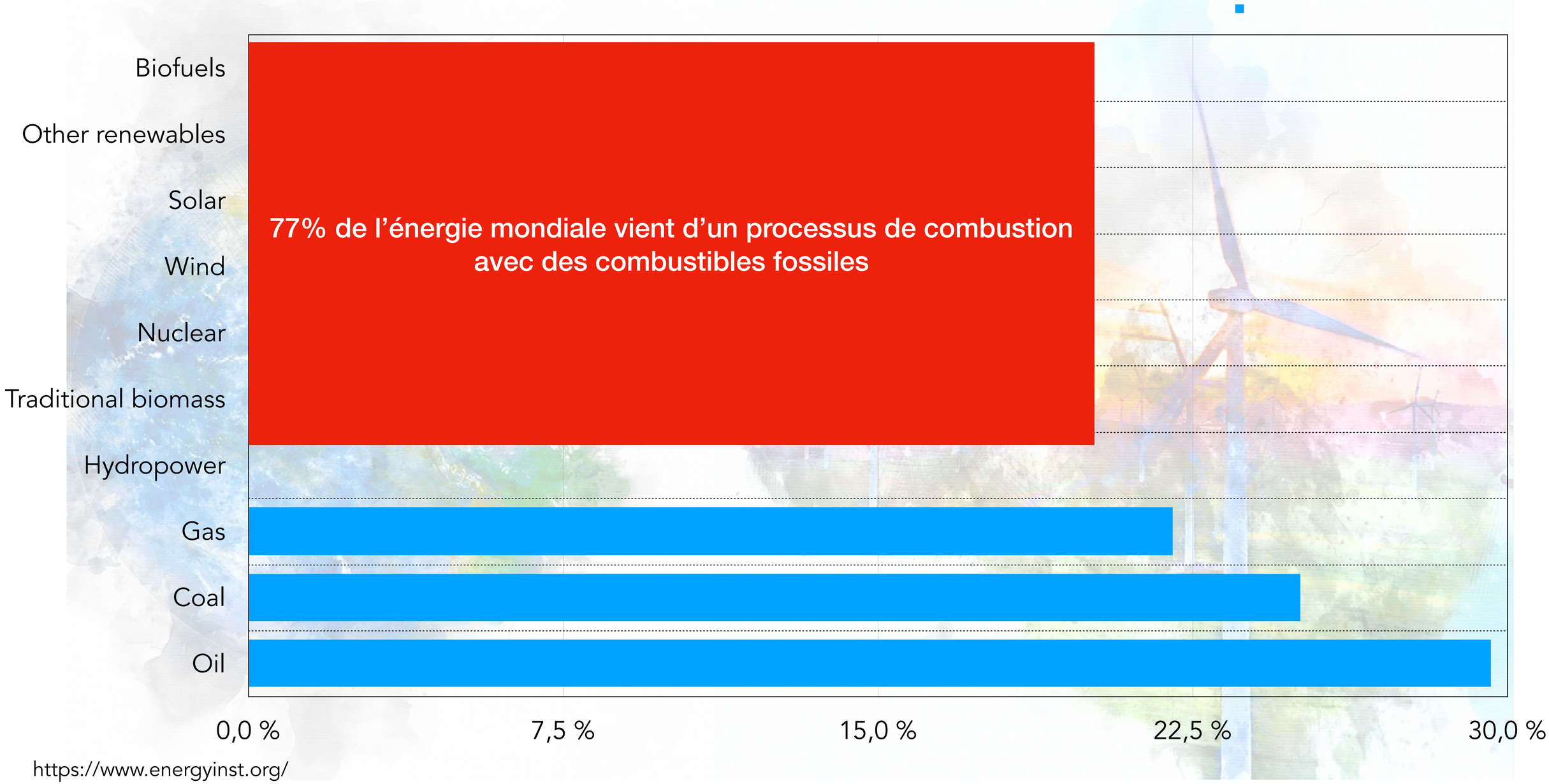
https://www.energyinst.org/

Sources d'énergie au niveau mondial (2022)



https://www.energyinst.org/

Sources d'énergie au niveau mondial (2022)



https://www.energyinst.org/

Sources d'énergie au niveau français (2018)

https://www.iea.org/statistics/

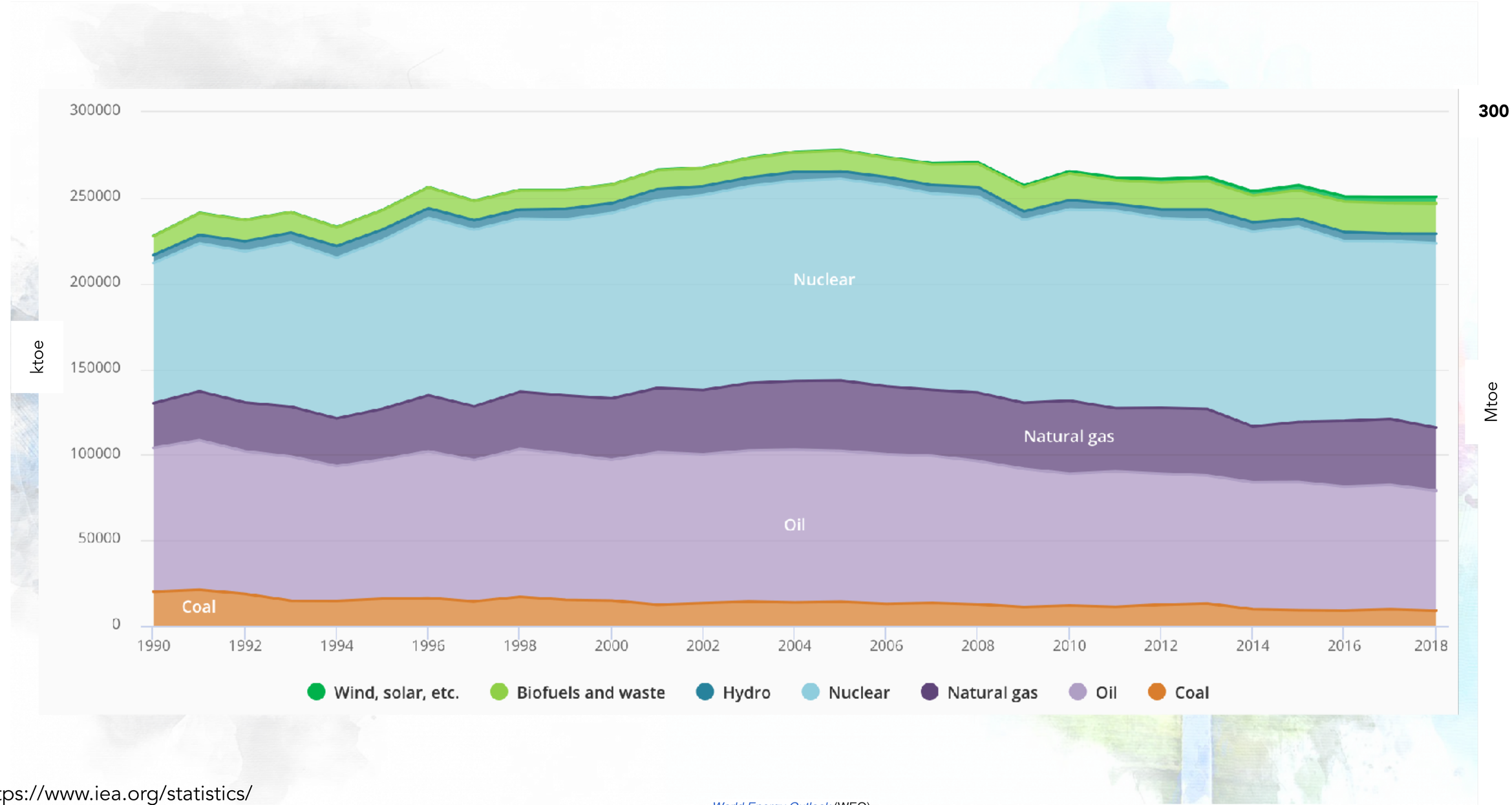
World Energy Outlook (WEO)

Sources d'énergie au niveau français (2018)

https://www.iea.org/statistics/

World Energy Outlook (WEO)

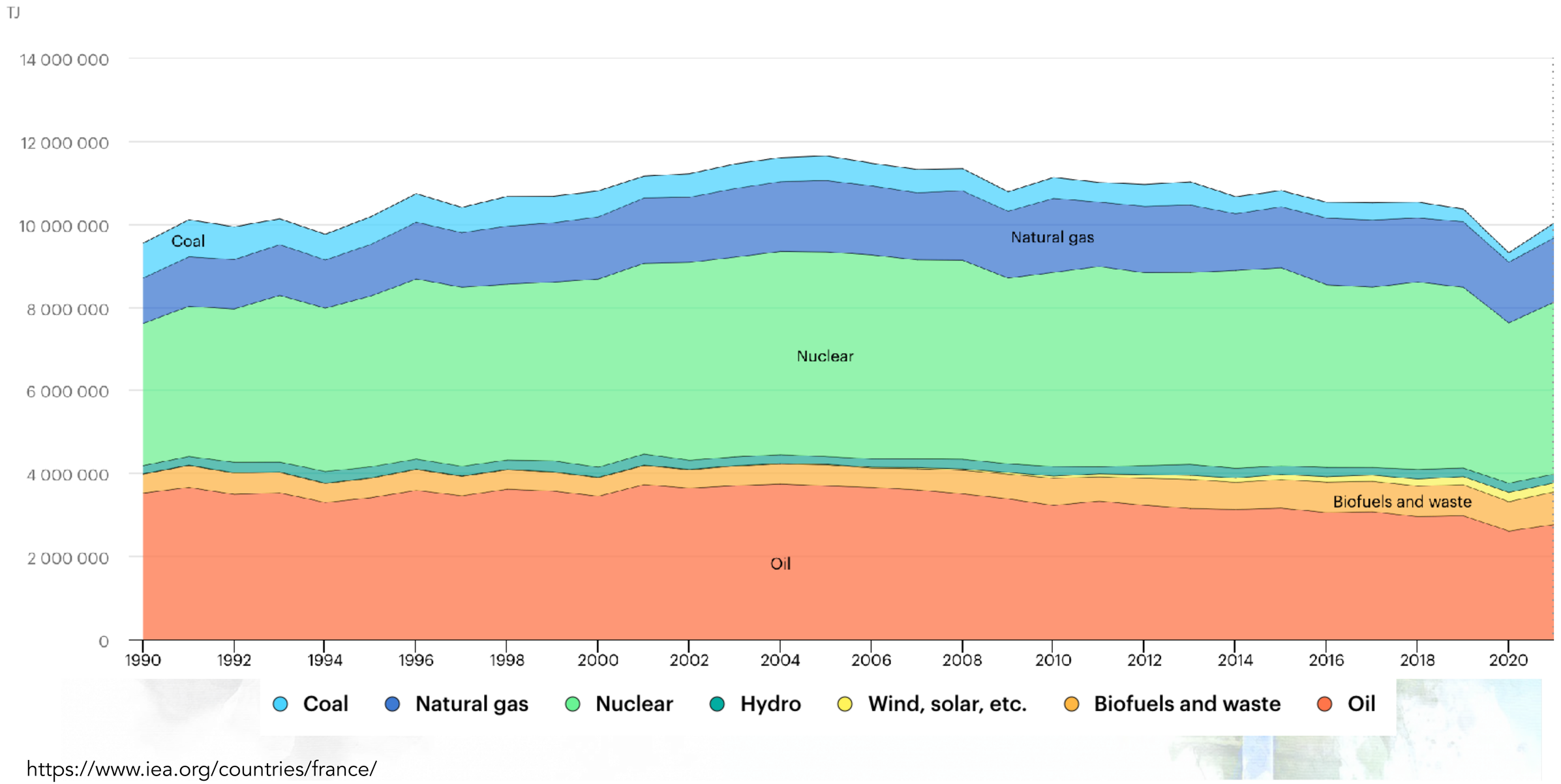
Sources d'énergie au niveau français (2018)



https://www.iea.org/statistics/

World Energy Outlook (WEO)

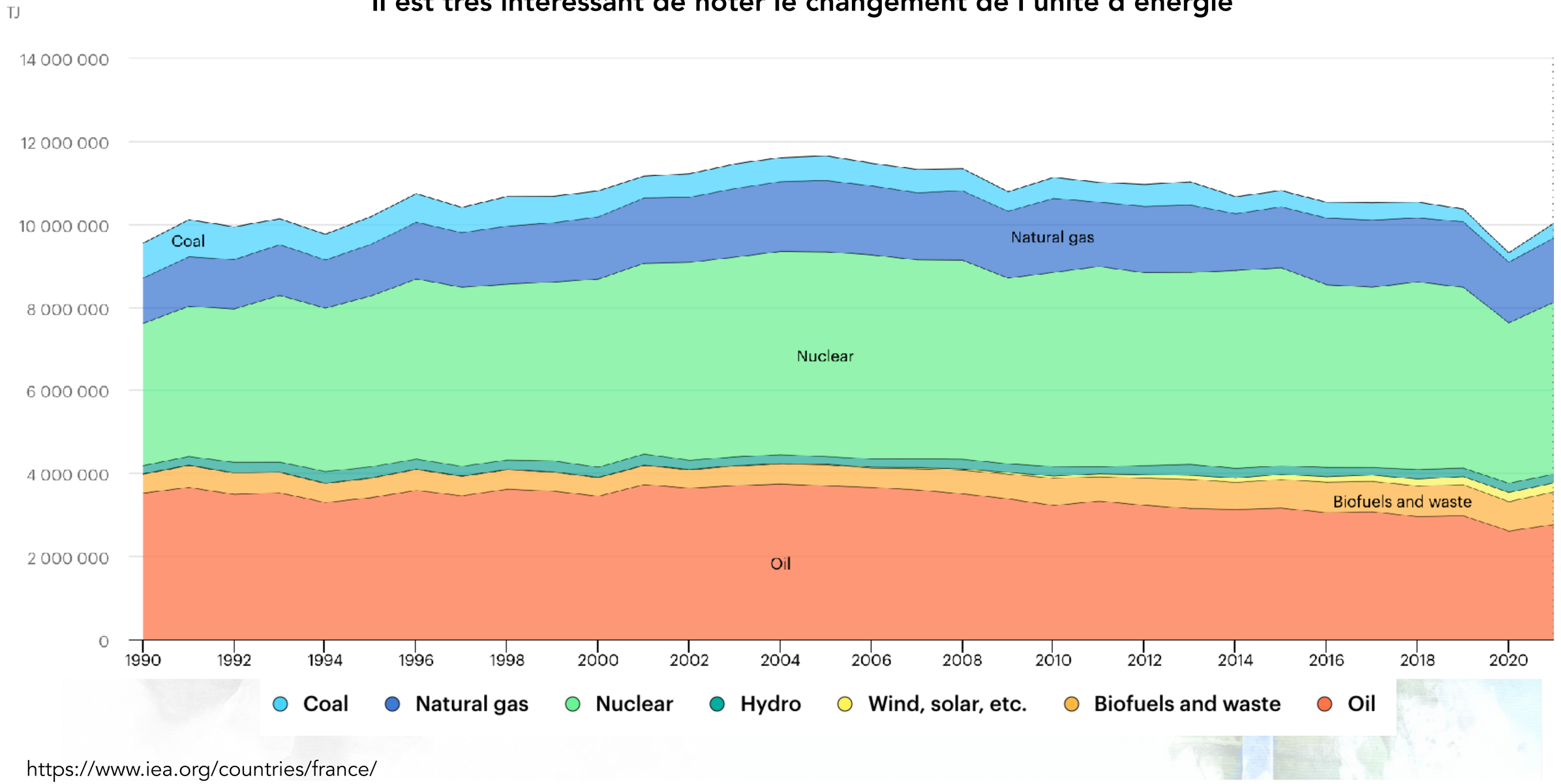
Sources d'énergie au niveau français (2020)



https://www.iea.org/countries/france/

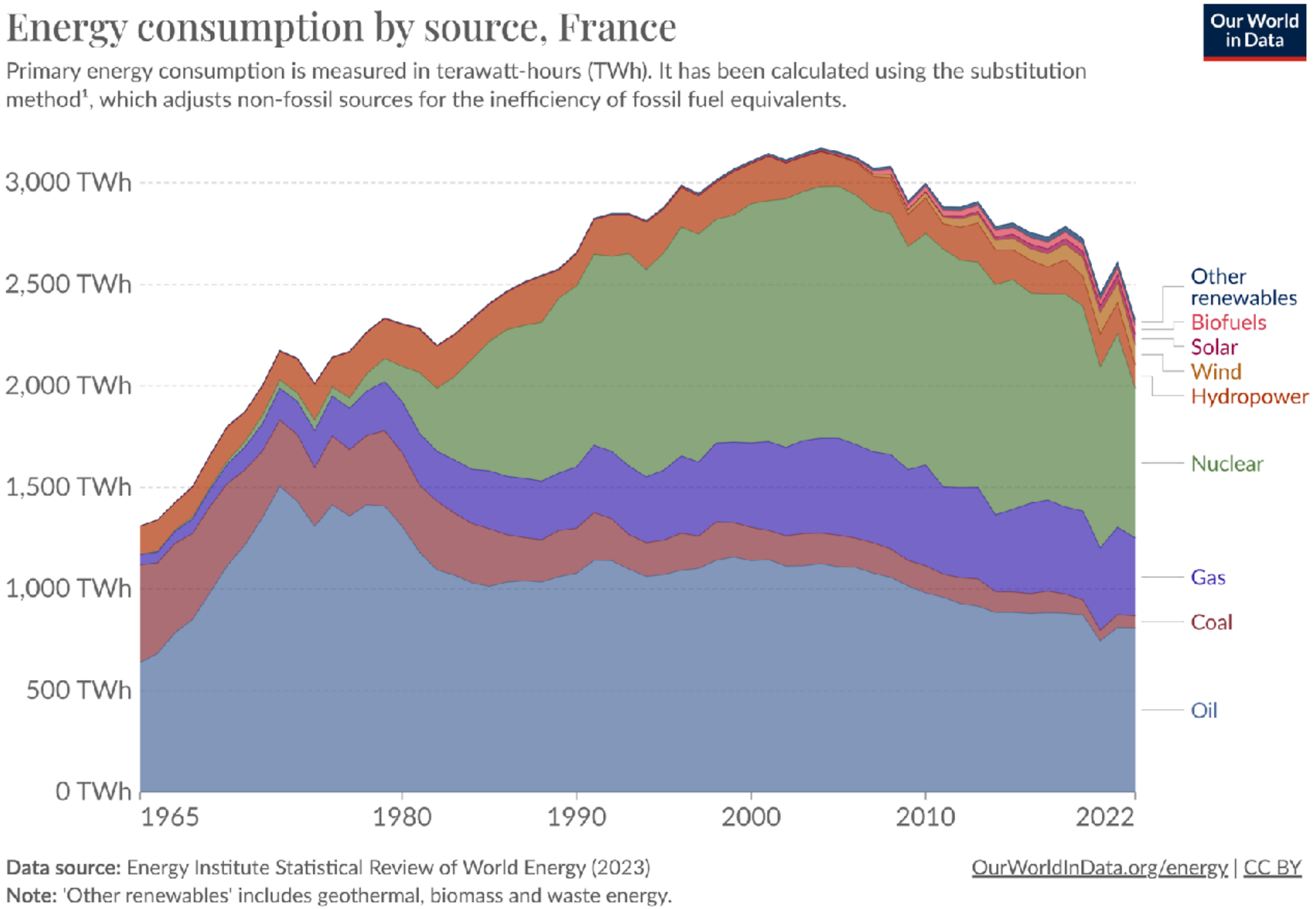
Sources d'énergie au niveau français (2020)

Il est très intéressant de noter le changement de l'unité d'énergie



https://www.iea.org/countries/france/

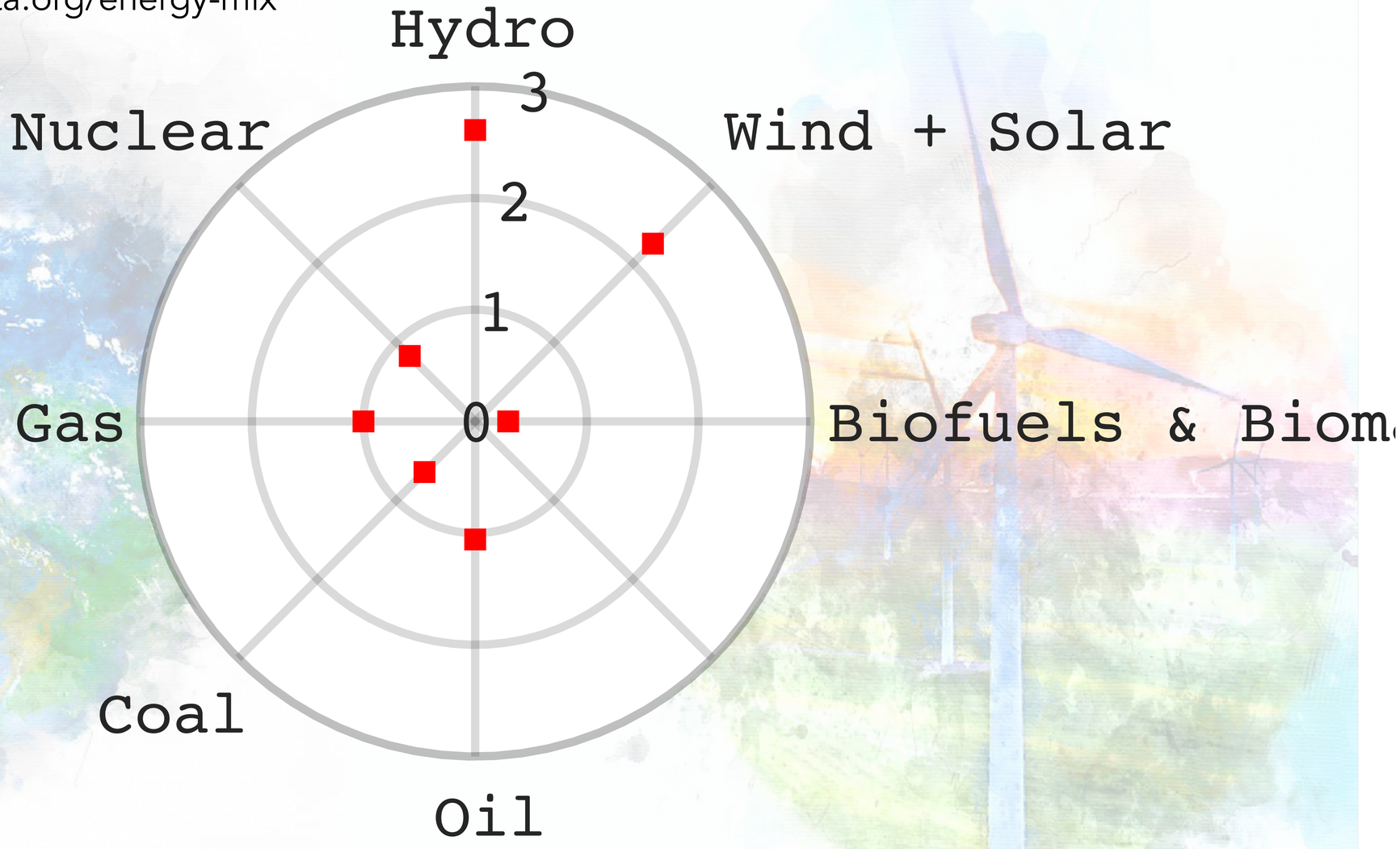
Sources d'énergie au niveau français (2020)



https://ourworldindata.org/energy-mix

Sources d'énergie au niveau français (2020)

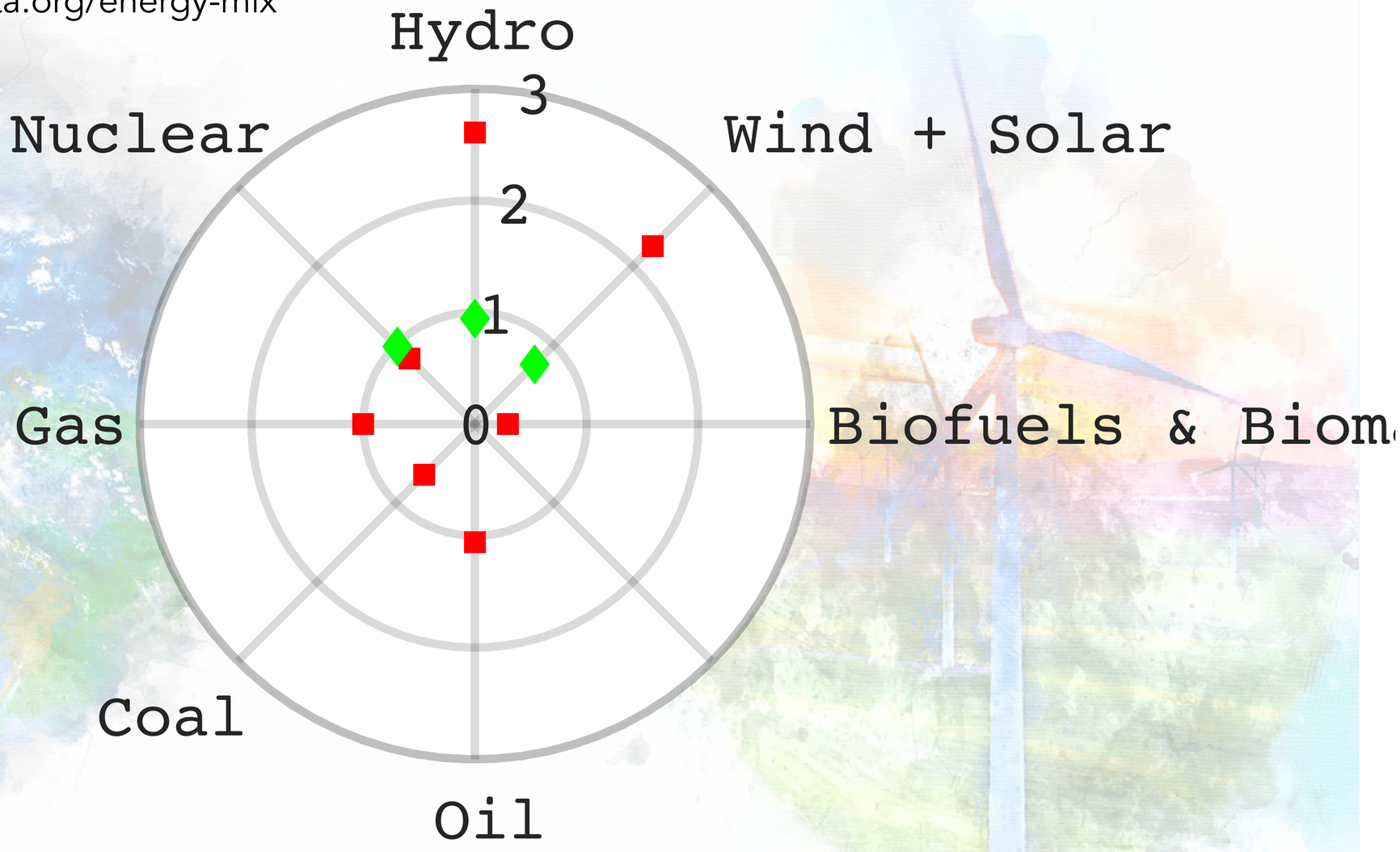
https://ourworldindata.org/energy-mix



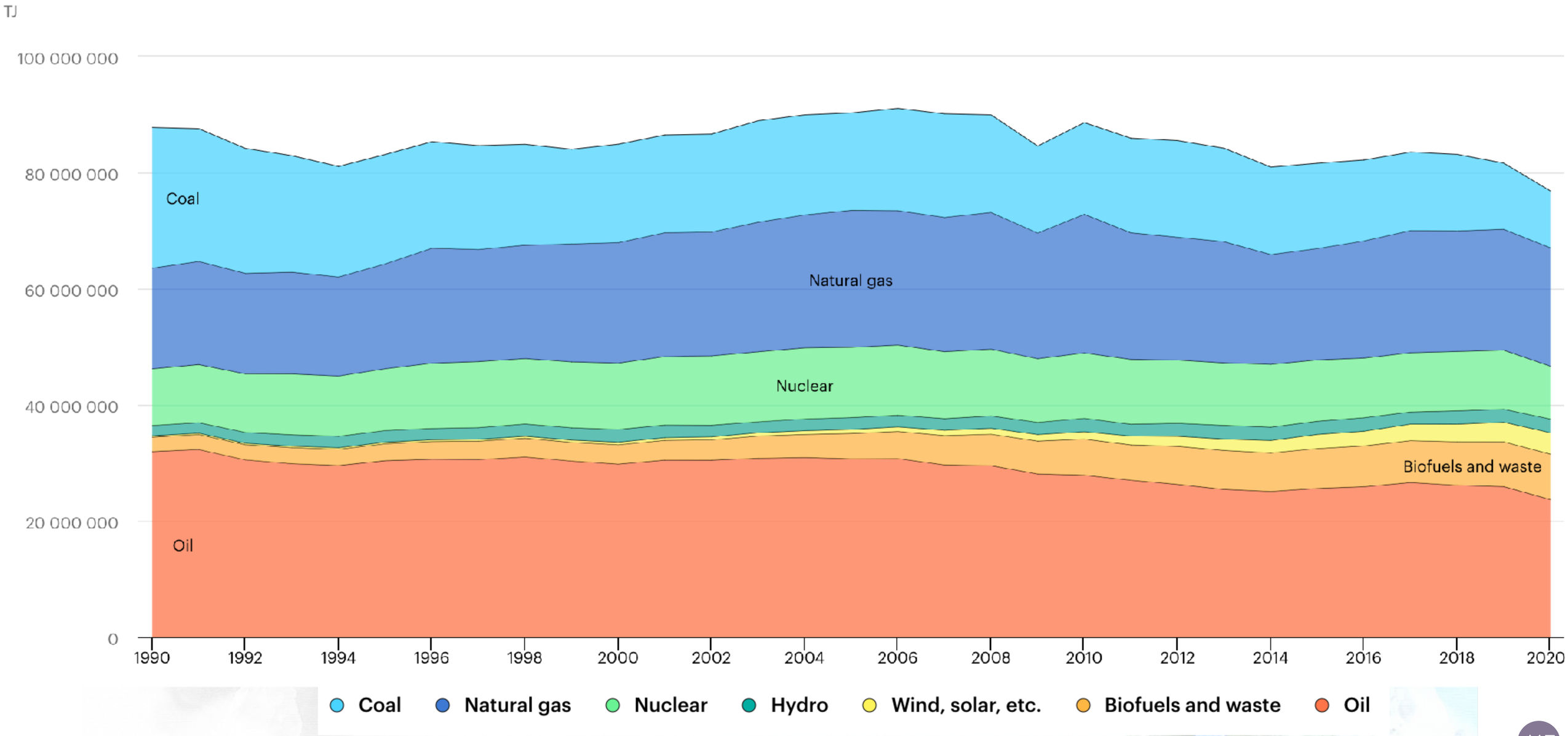
Sources d'énergie au niveau français (2020)

https://ourworldindata.org/energy-mix

EDF

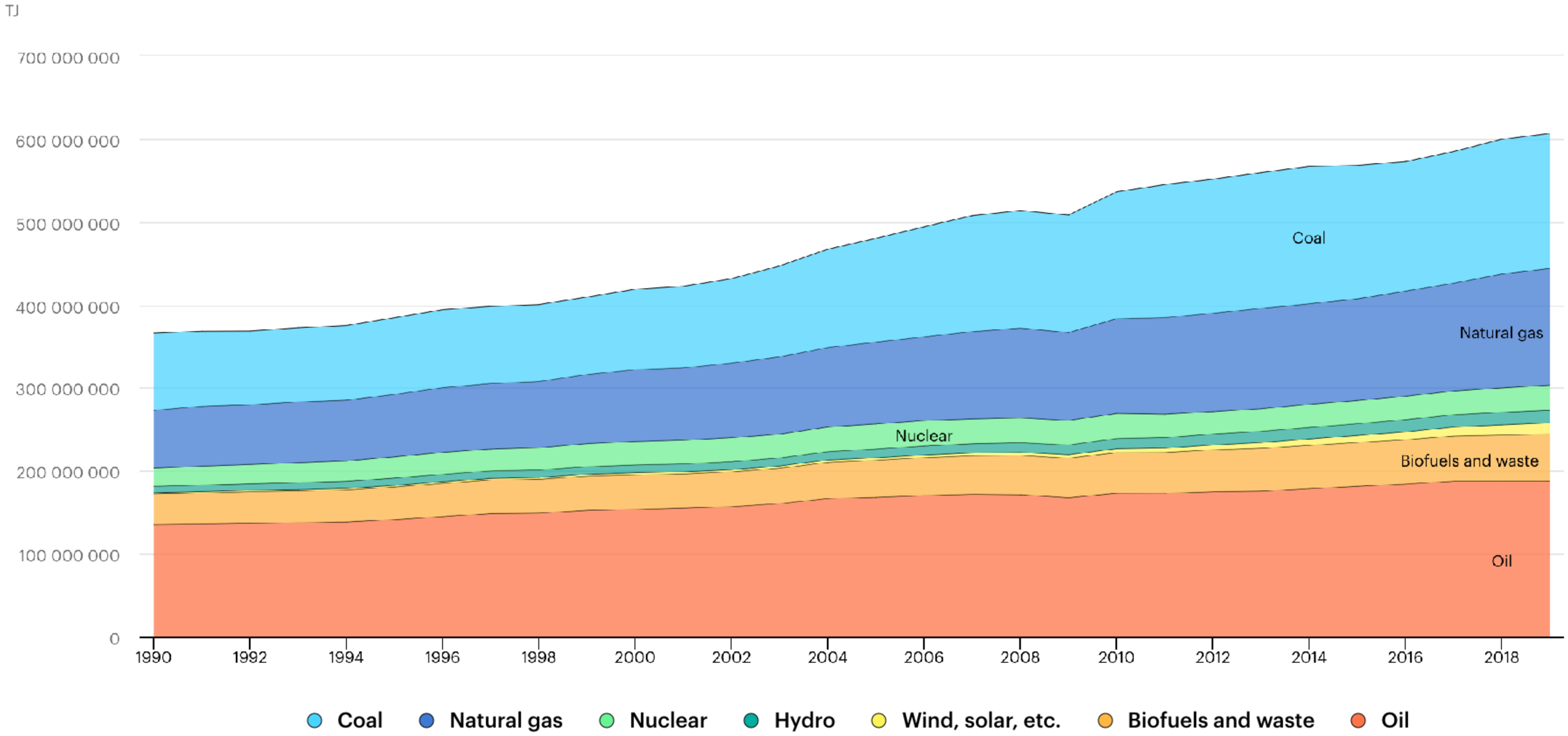


Sources d'énergie au niveau européen



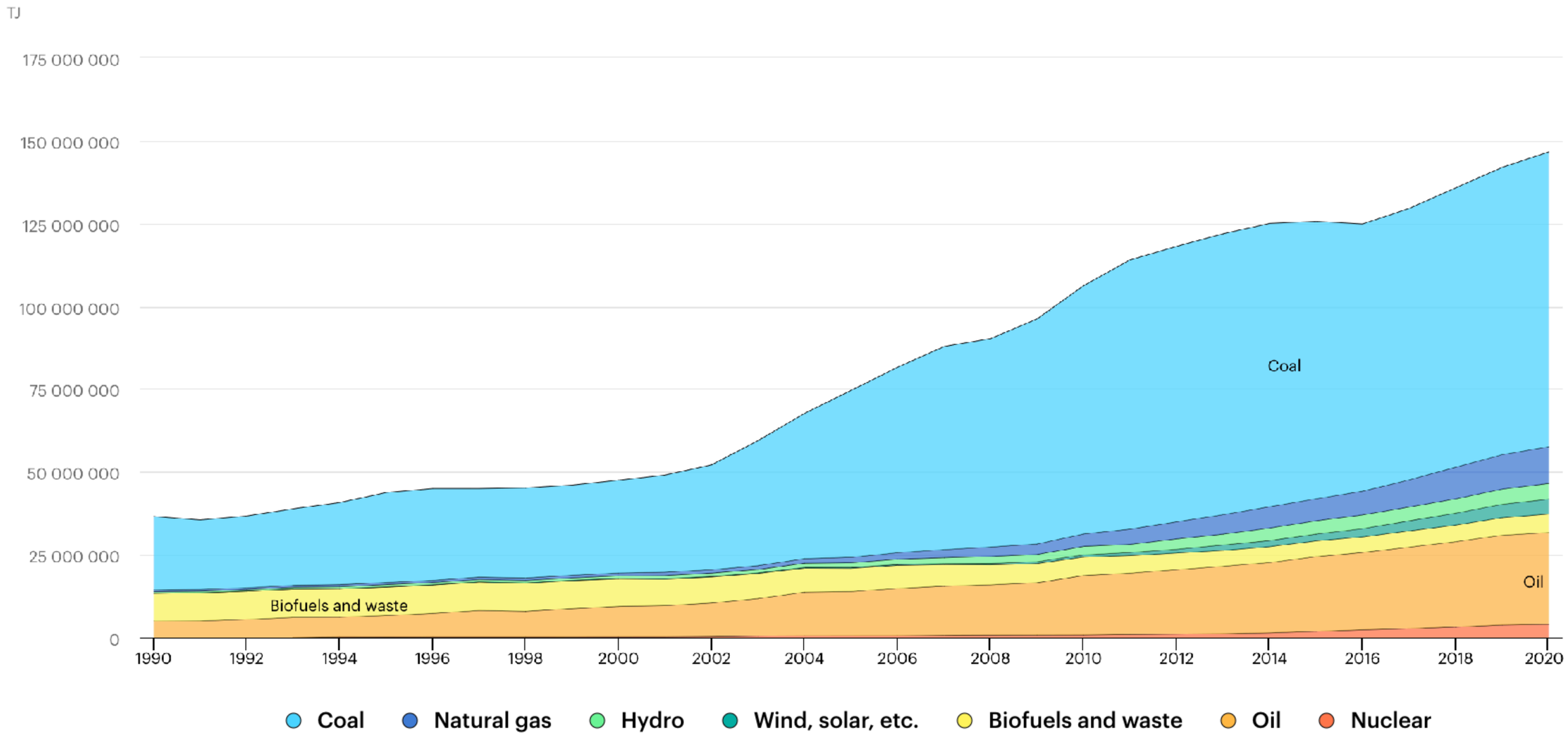
https://www.iea.org/regions/europe

Sources d'énergie au niveau mondial



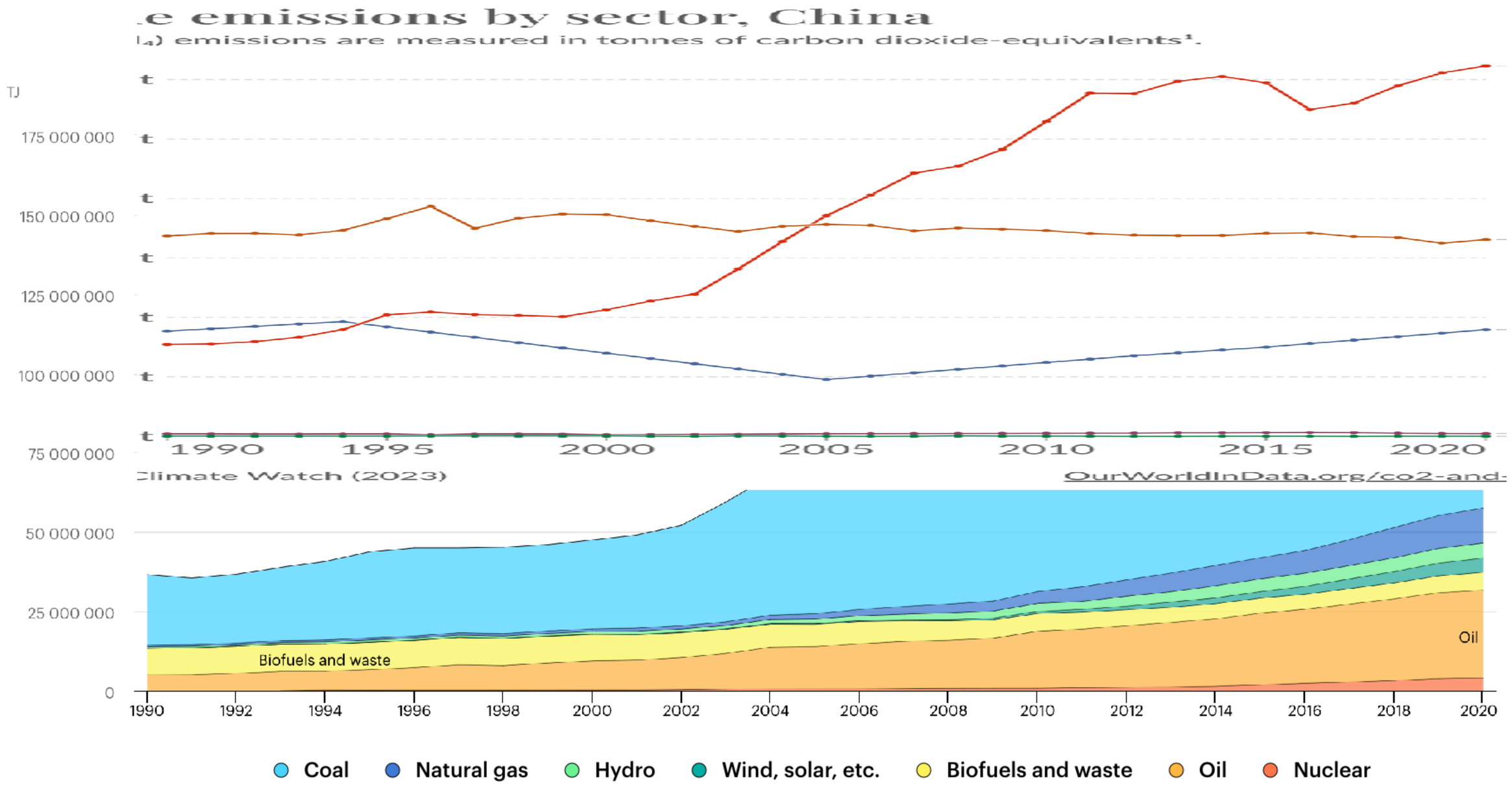
https://www.iea.org/statistics/

Sources d'énergie au niveau de la Chine



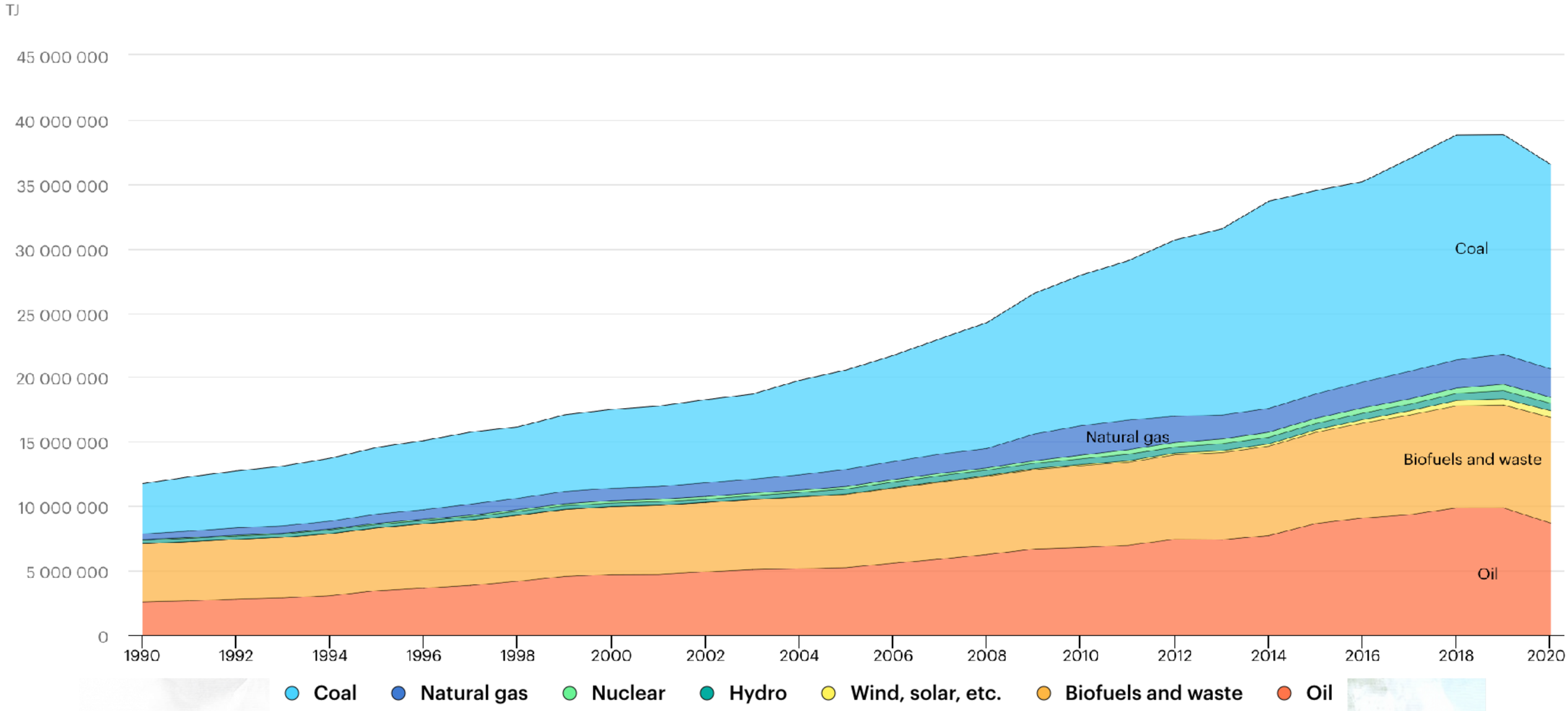
https://www.iea.org/statistics/

Sources d'énergie au niveau de la Chine



https://www.iea.org/statistics/

Sources d'énergie au niveau de l'Inde



https://www.iea.org/countries/india

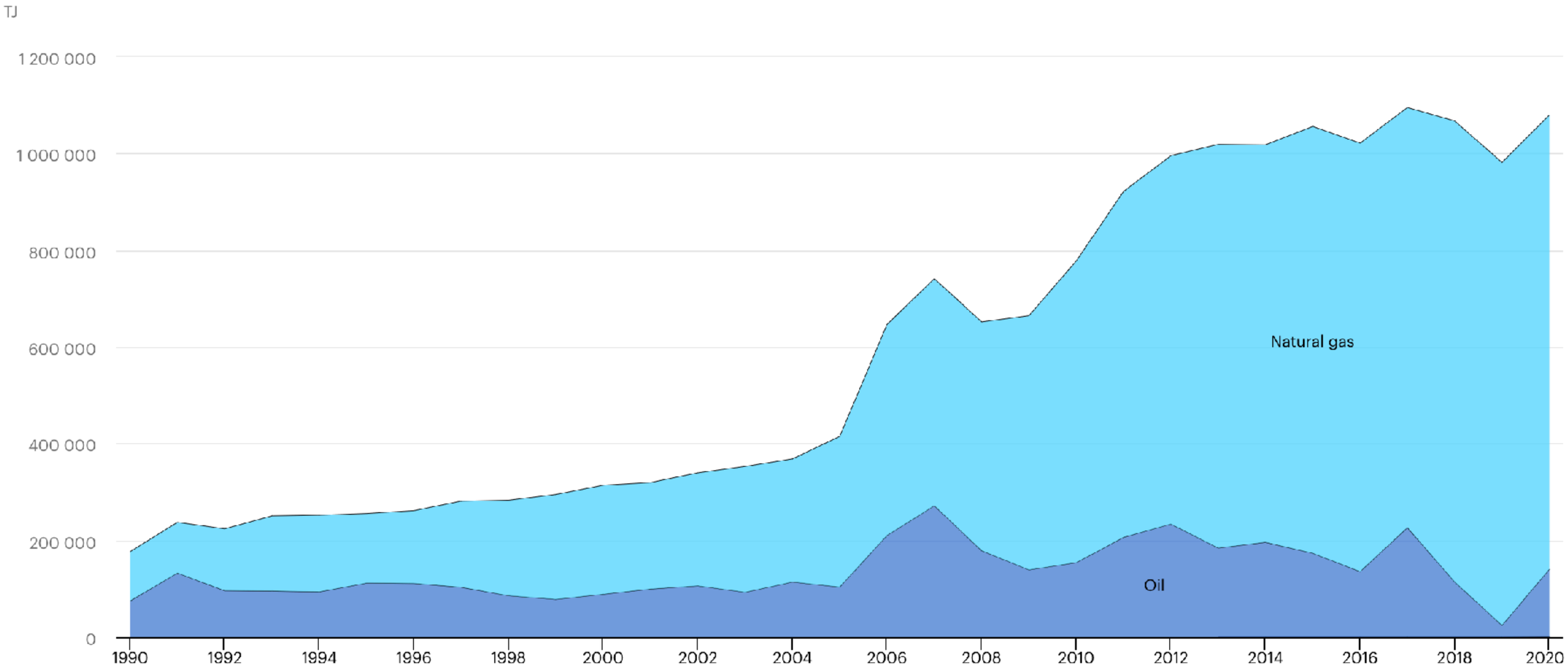
World Energy Outlook (WEO)

Sources d'énergie au niveau d'Oman

https://www.iea.org/countries/oman

World Energy Outlook (WEO)

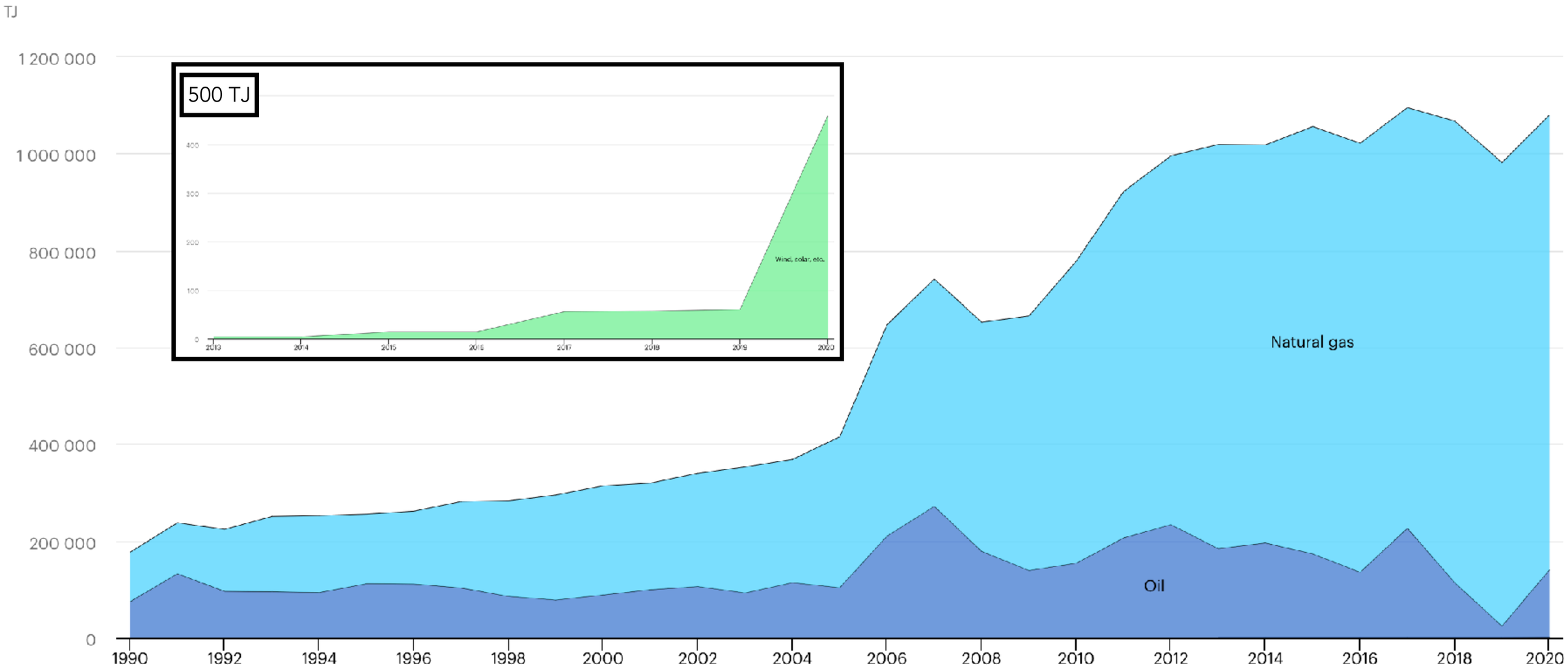
Sources d'énergie au niveau d'Oman



https://www.iea.org/countries/oman

World Energy Outlook (WEO)

Sources d'énergie au niveau d'Oman



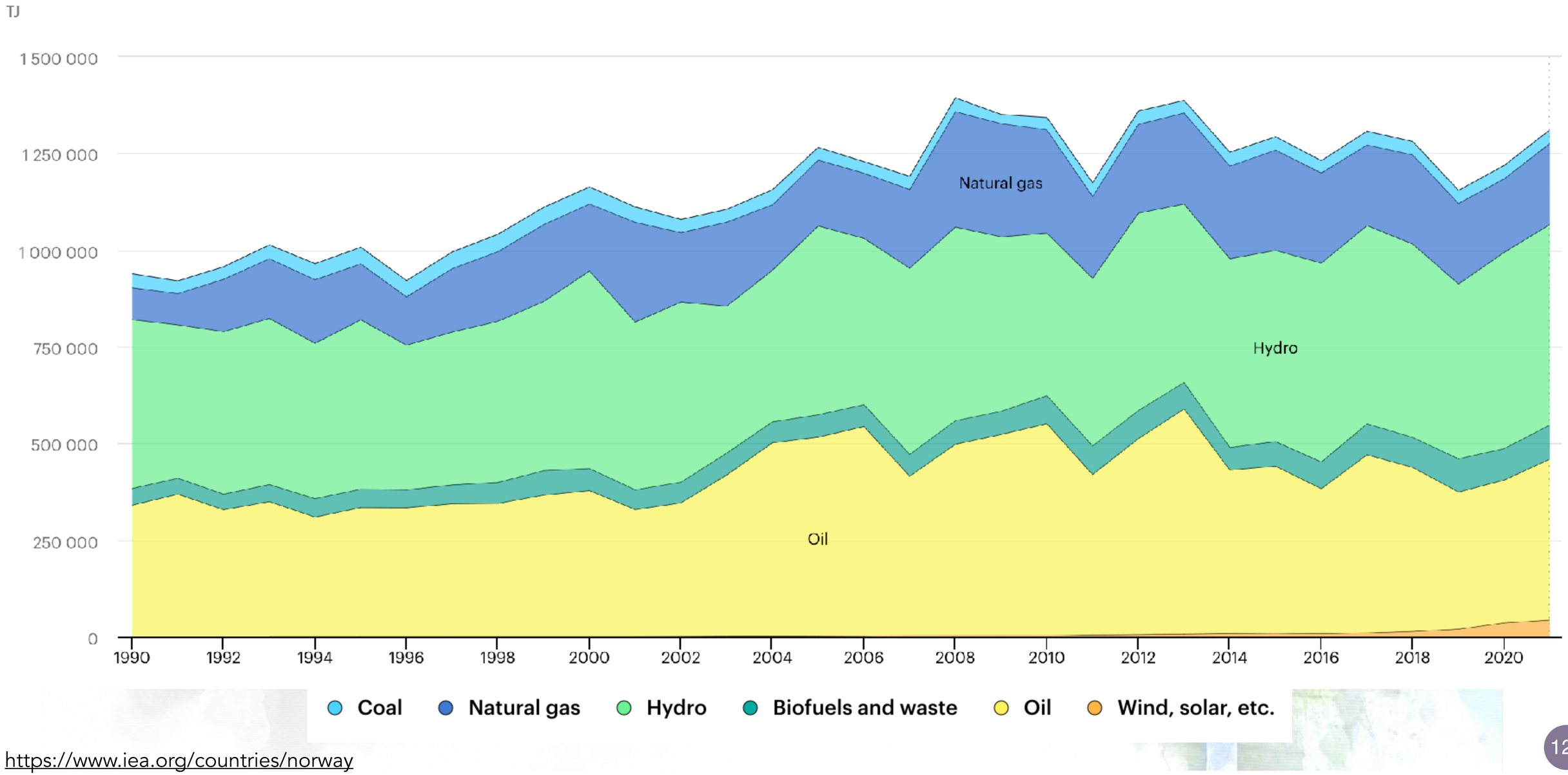
https://www.iea.org/countries/oman

World Energy Outlook (WEO)

Sources d'énergie au niveau de la Norvège

https://www.iea.org/countries/norway

Sources d'énergie au niveau de la Norvège

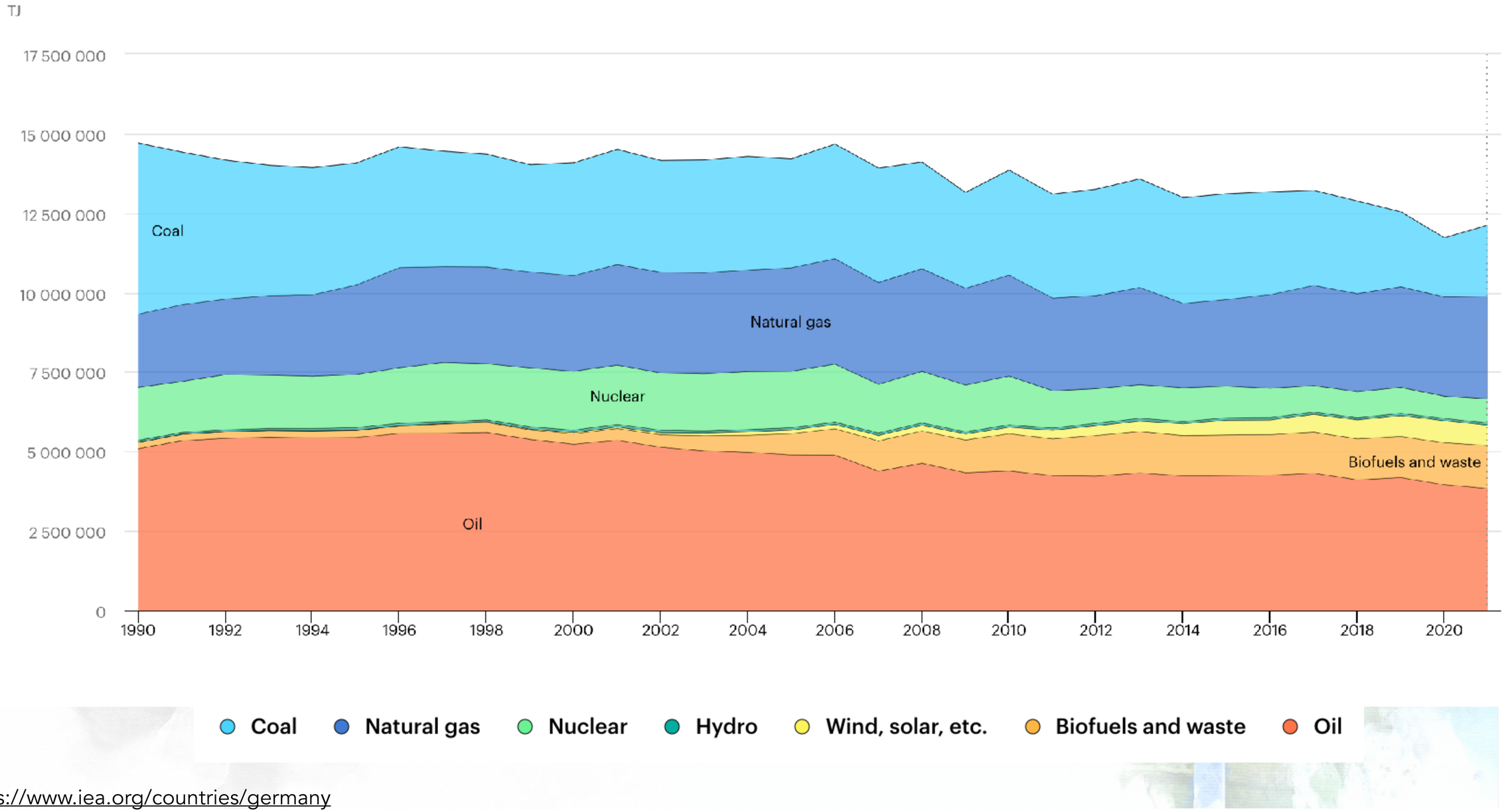


https://www.iea.org/countries/norway

Sources d'énergie au niveau de l'Allemagne

https://www.iea.org/countries/germany

Sources d'énergie au niveau de l'Allemagne

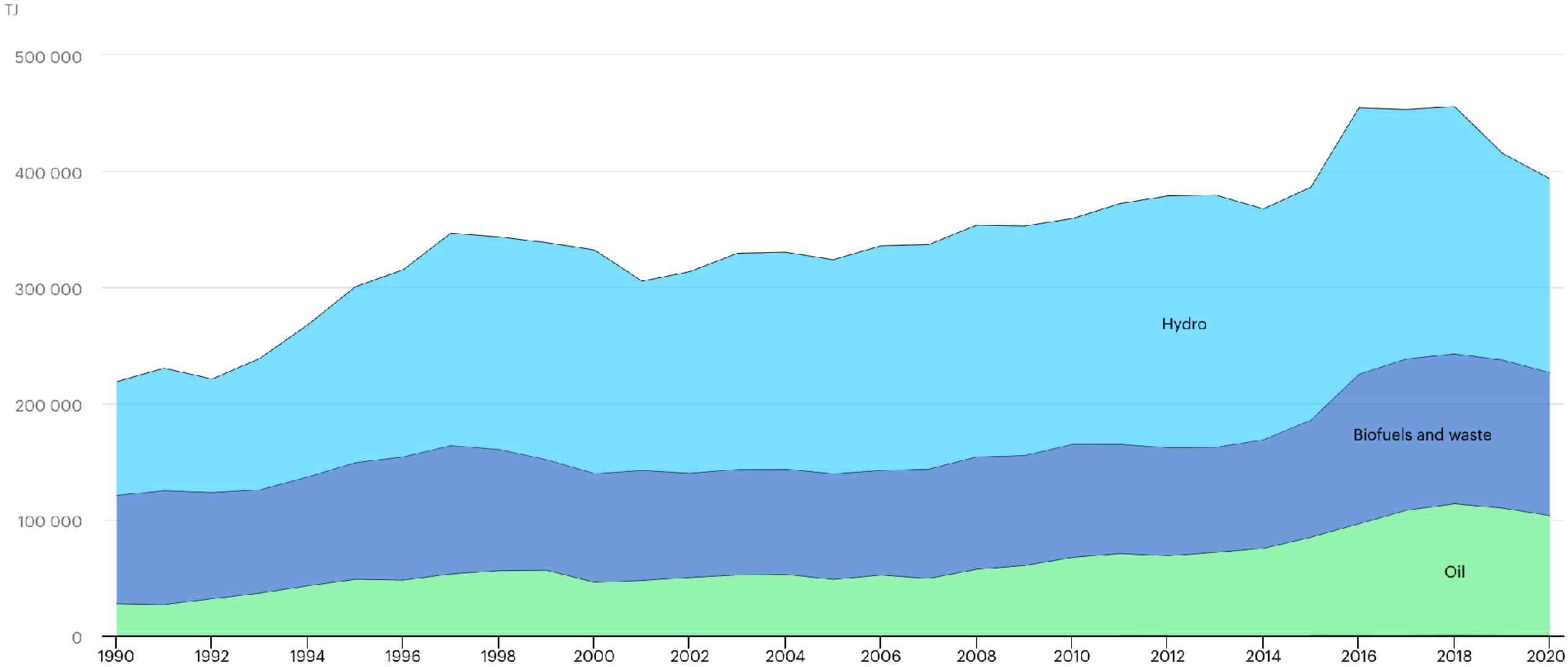


https://www.iea.org/countries/germany

Sources d'énergie au niveau du Paraguay

https://www.iea.org/countries/paraguay

Sources d'énergie au niveau du Paraguay



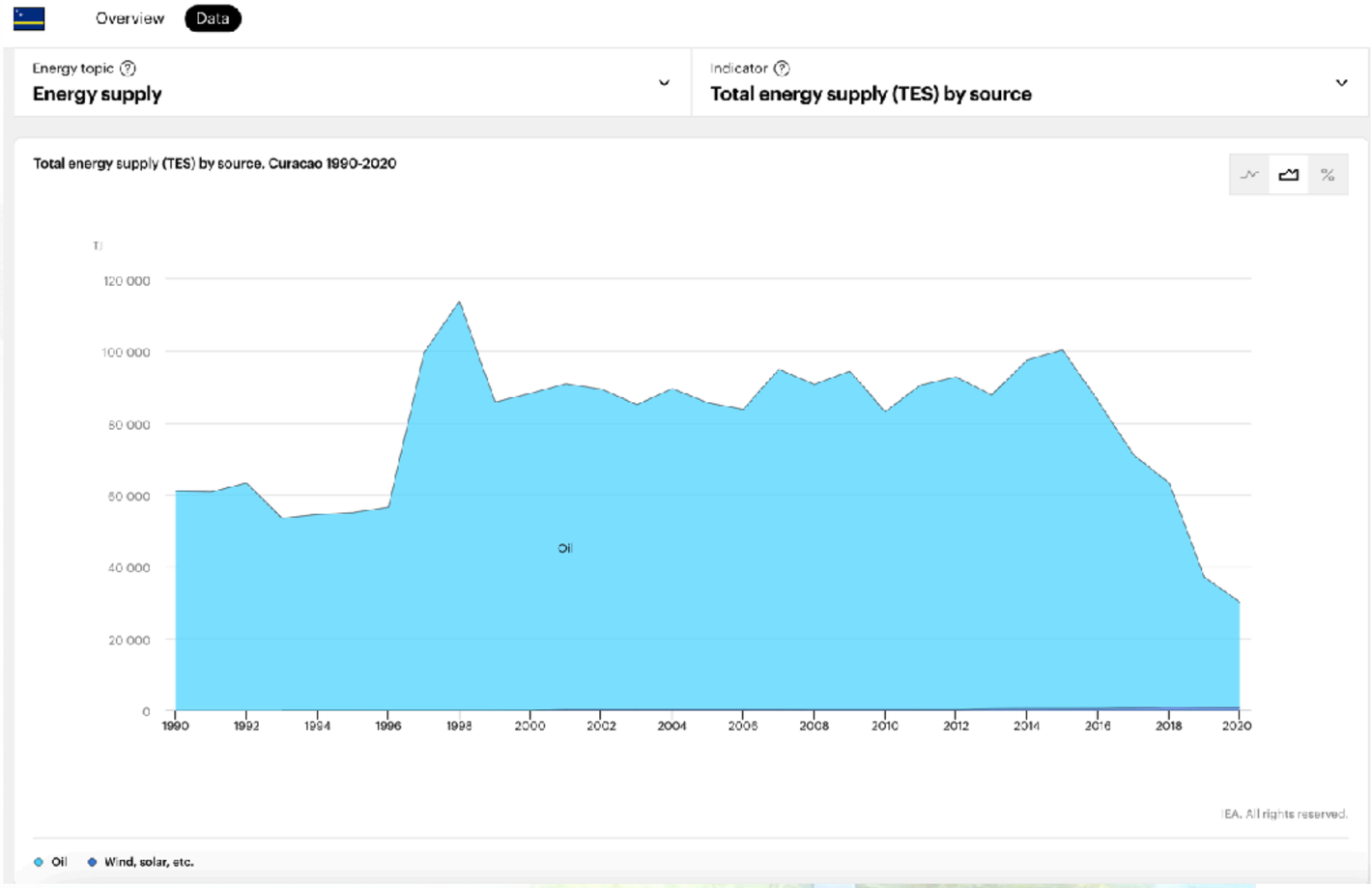
https://www.iea.org/countries/paraguay

Pour la prochaine séance

(jeudi 23 novembre)

1. Préparer l'évolution énergétique du pays de votre choix

2. Lors du début de la première séance, vous me l'envoyer et j'essaye de trouver le pays en question



https://www.iea.org/countries/XXXXX

Pour la prochaine séance

Energy topic ⓘ
Energy supply

Indicator ⓘ
Total energy supply (TES) by source

Country or region
France

https://www.iea.org/statistics/

World Energy Outlook (WEO)

SOMMAIRE

Introduction

Quelques unités à comprendre

Quelques chiffres clés

Production d'énergie

Stockage d'énergie

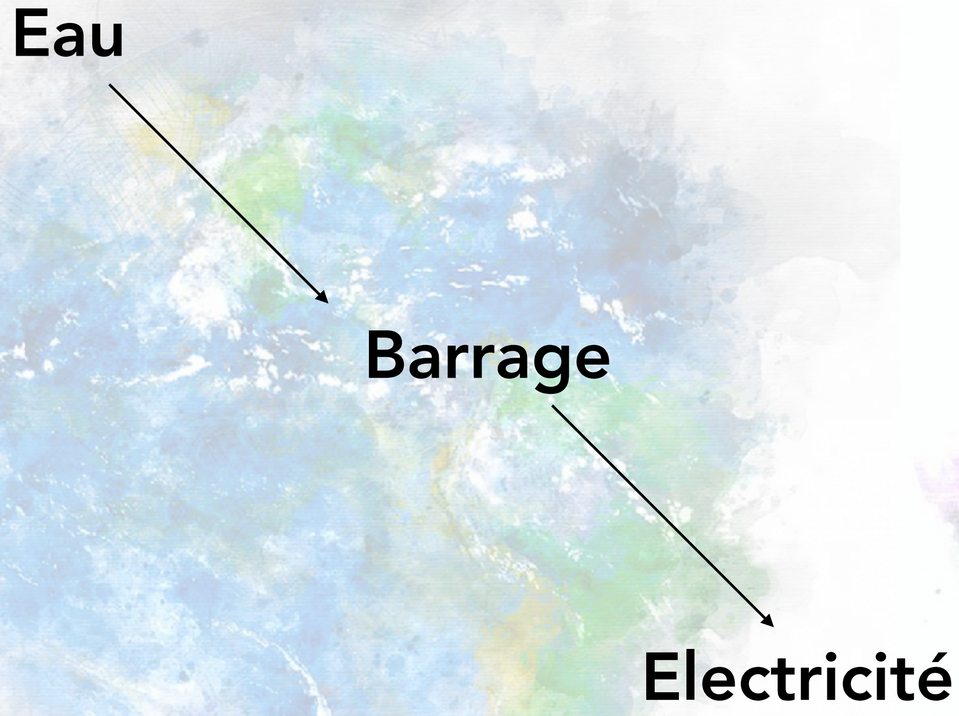
Utilisation de l'énergie

Conclusions

Energie hydro-électrique

Principe de fonctionnement

Transformation d'une **énergie potentielle** en énergie électrique

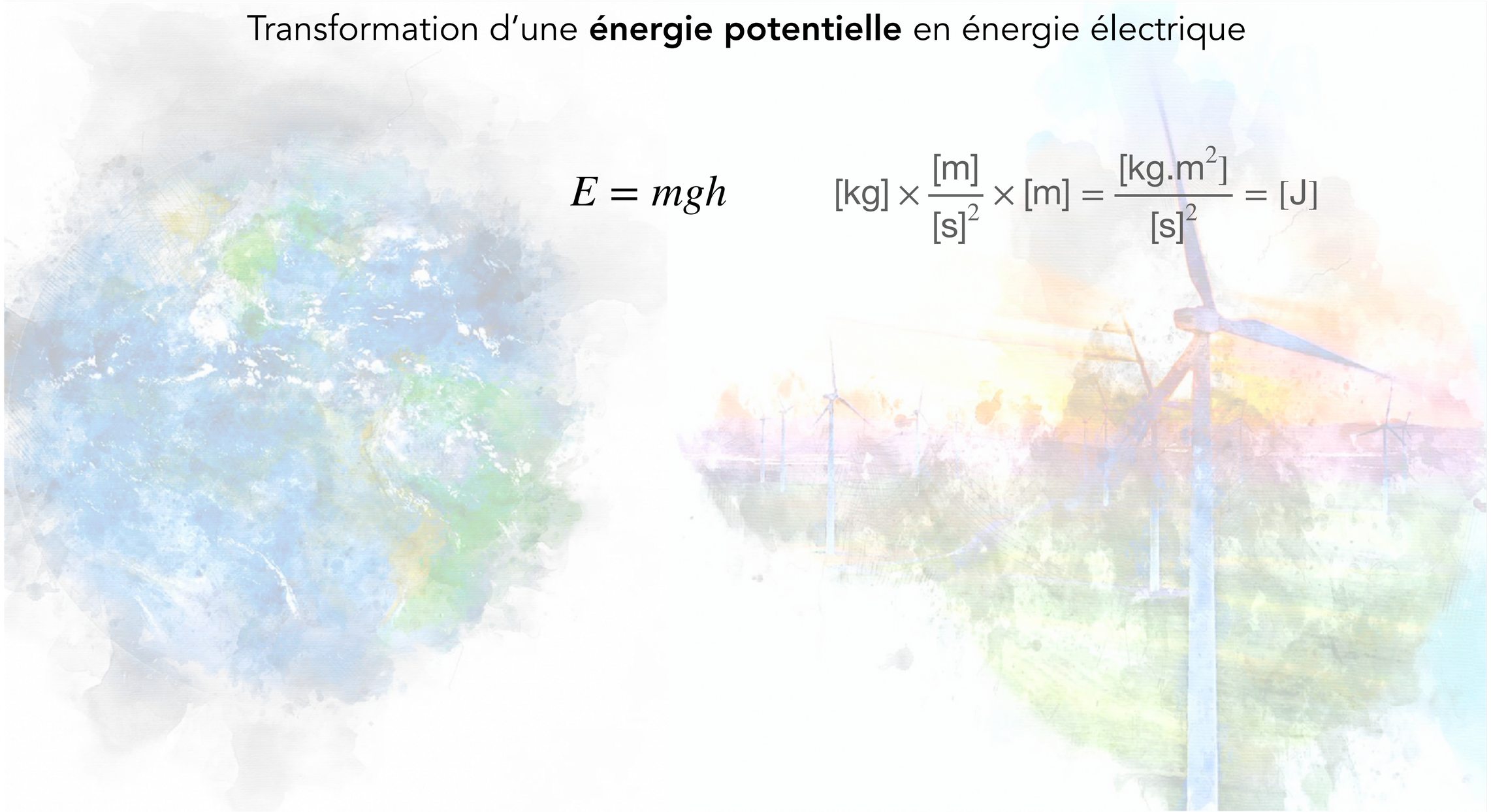


Principe de fonctionnement

Transformation d'une **énergie potentielle** en énergie électrique

$$E = mgh$$

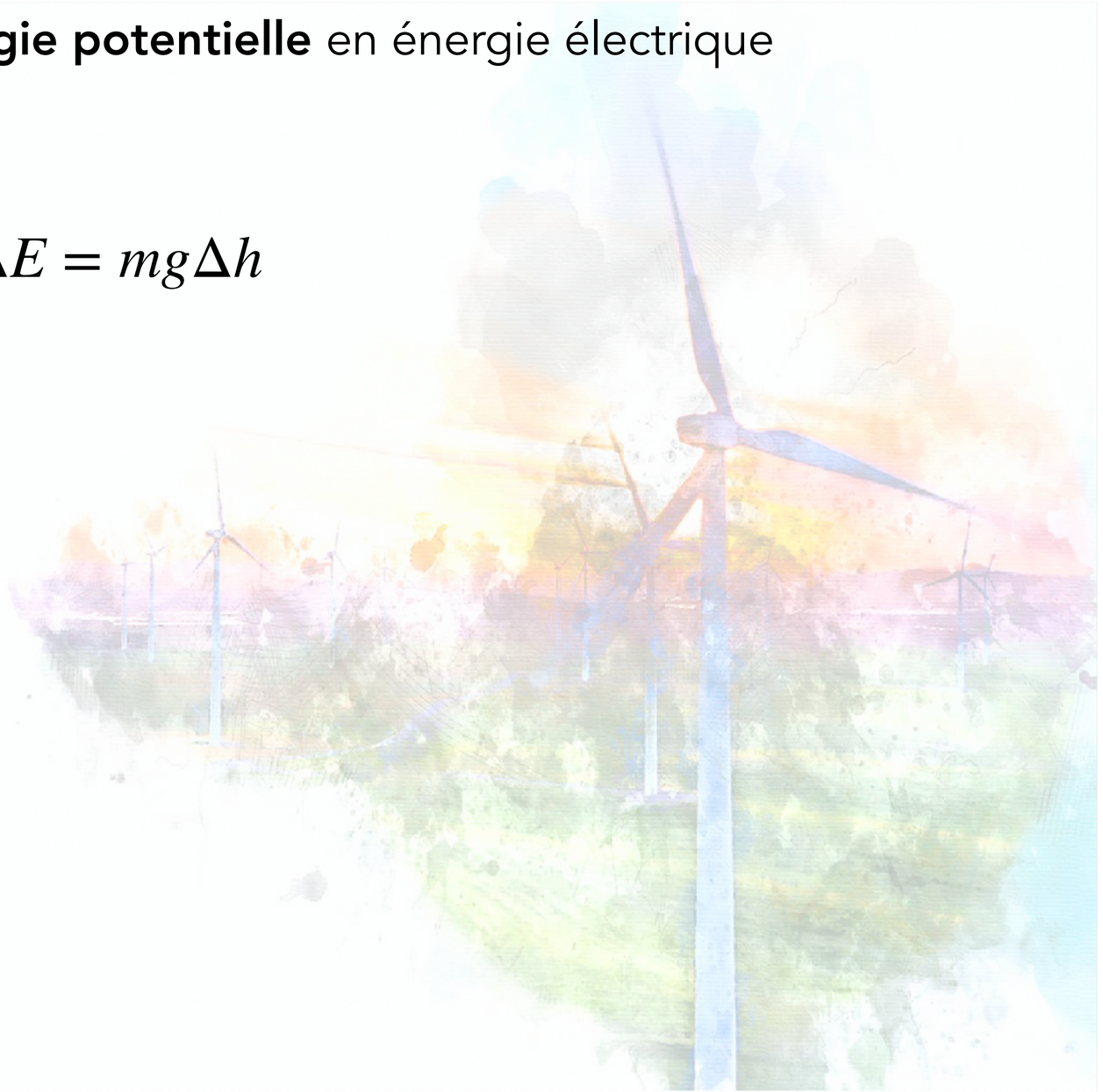
$$[\text{kg}] \times \frac{[\text{m}]}{[\text{s}]^2} \times [\text{m}] = \frac{[\text{kg.m}^2]}{[\text{s}]^2} = [\text{J}]$$



Principe de fonctionnement

Transformation d'une **énergie potentielle** en énergie électrique

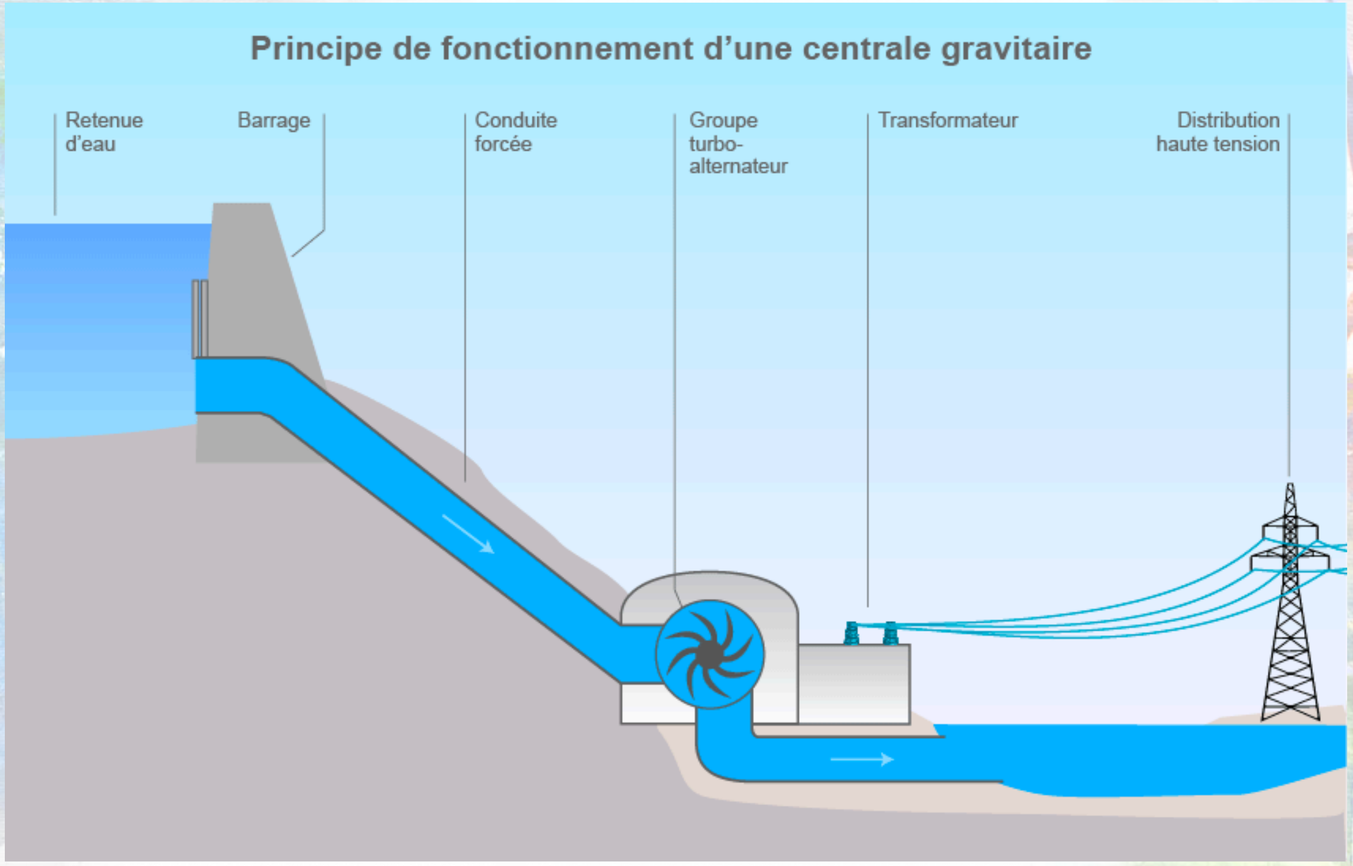
$$\Delta E = mg\Delta h$$



Principe de fonctionnement

Transformation d'une **énergie potentielle** en énergie électrique

$$\Delta E = mg\Delta h$$

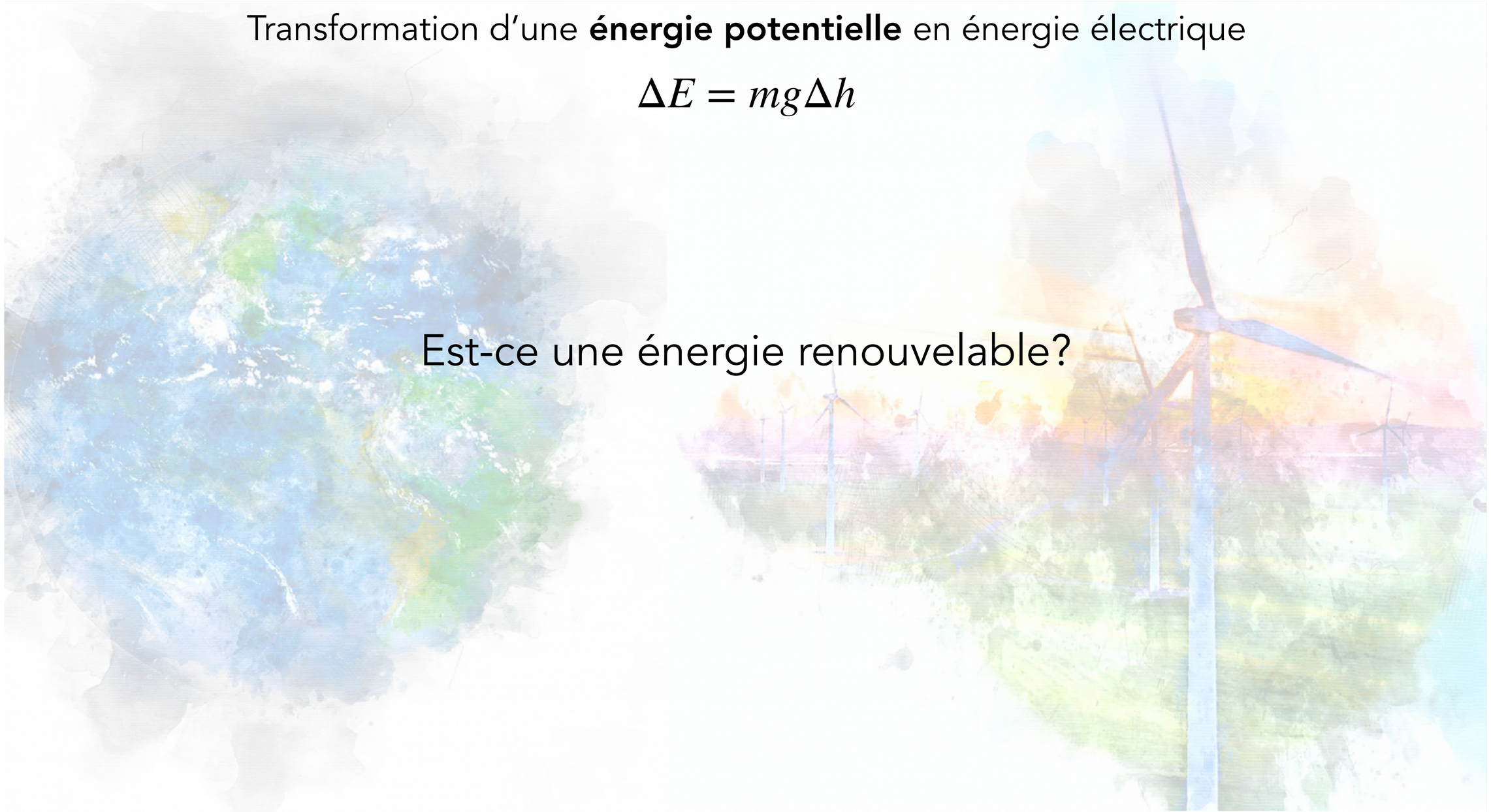


Principe de fonctionnement

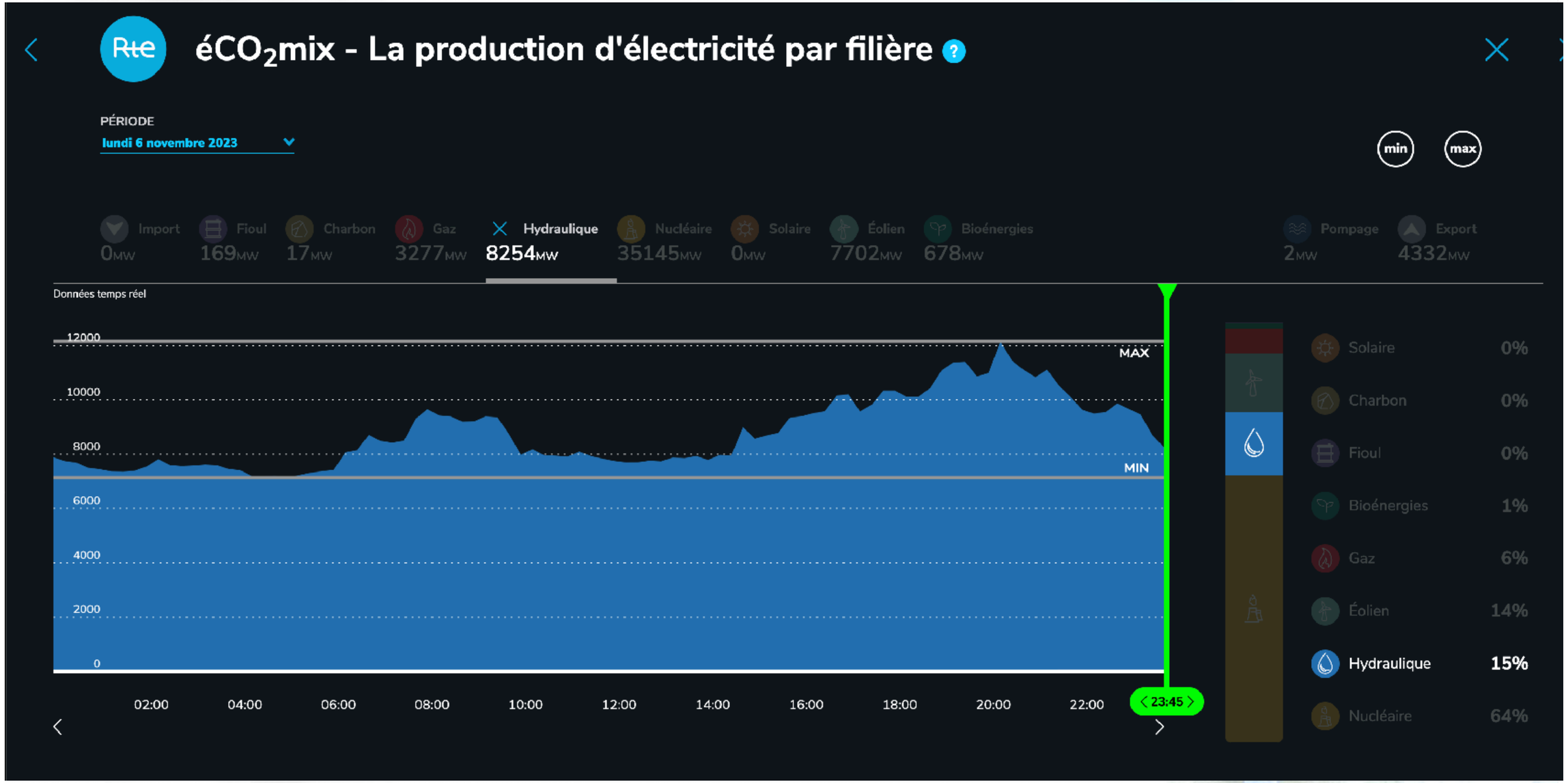
Transformation d'une **énergie potentielle** en énergie électrique

$$\Delta E = mg\Delta h$$

Est-ce une énergie renouvelable?

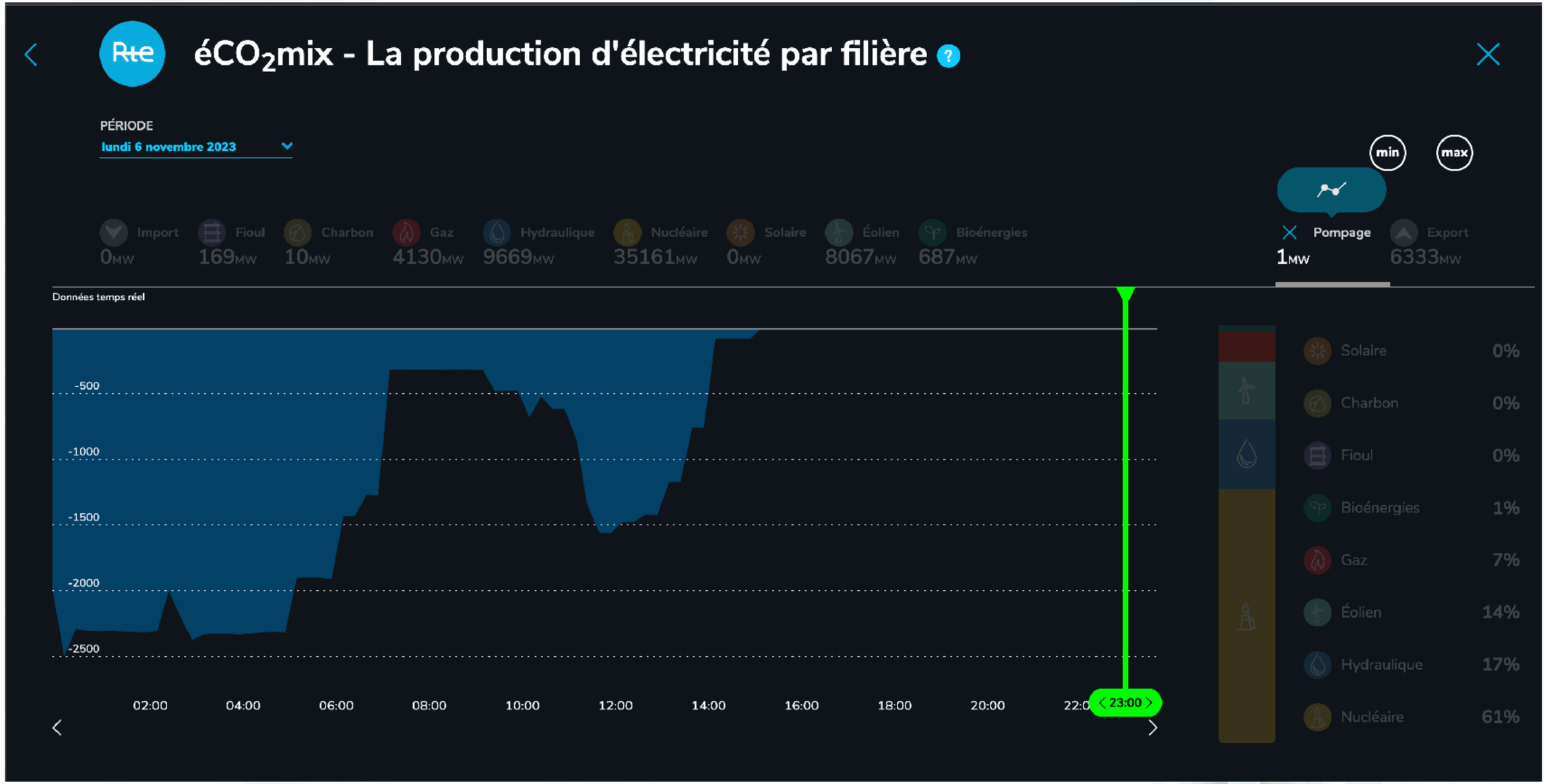


Principe de fonctionnement



https://www.rte-france.com/eco2mix/la-production-delectricite-par-filiere#

Principe de fonctionnement

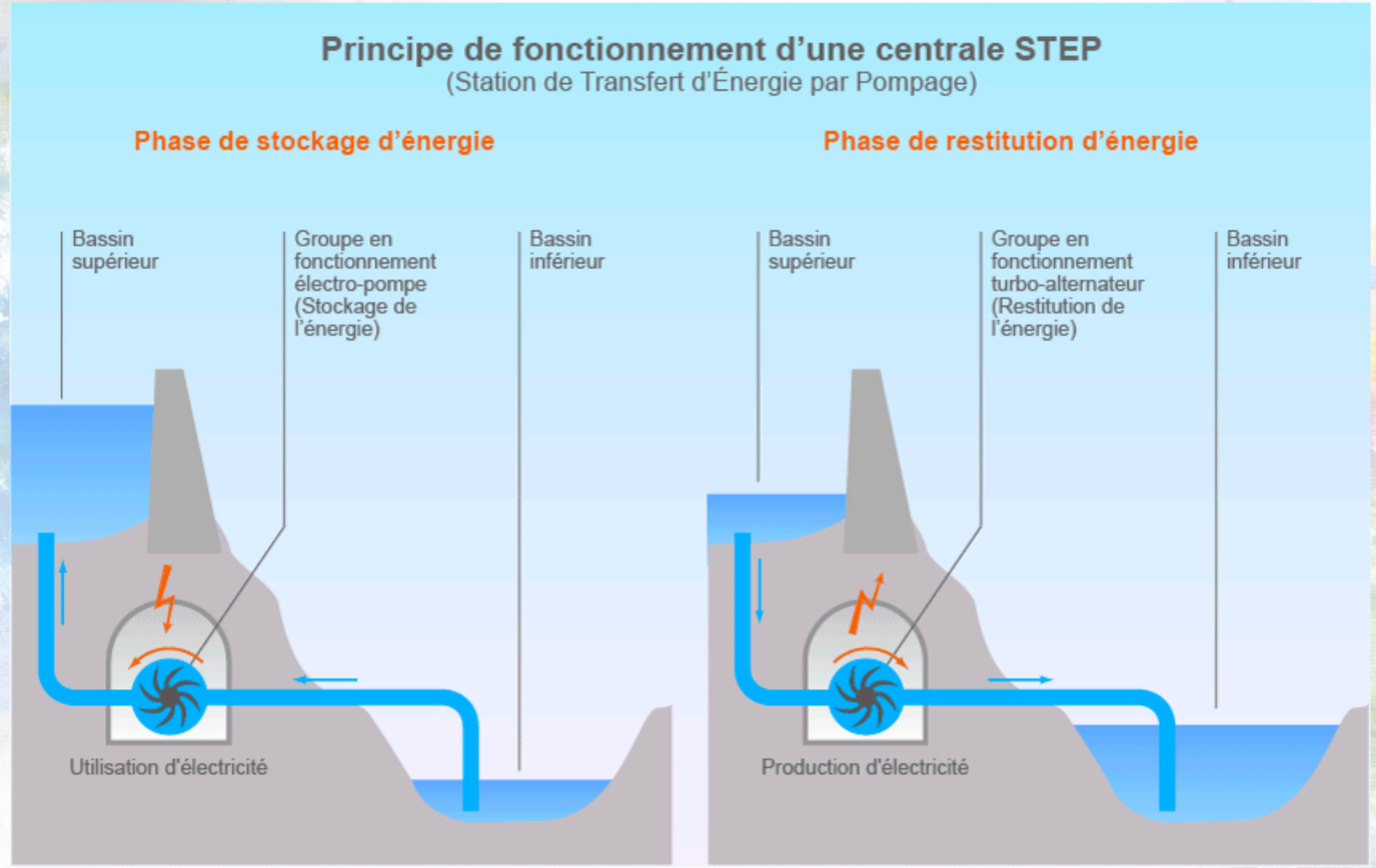


https://www.rte-france.com/eco2mix/la-production-delectricite-par-filiere#

Principe de fonctionnement

Transformation d'une **énergie potentielle** en énergie électrique

$$\Delta E = mg\Delta h$$



Principe de fonctionnement

Transformation d'une **énergie potentielle** en énergie électrique

$$\Delta E = mg\Delta h$$

Barrage des Trois Gorges, Chine

Principe de fonctionnement

Transformation d'une **énergie potentielle** en énergie électrique

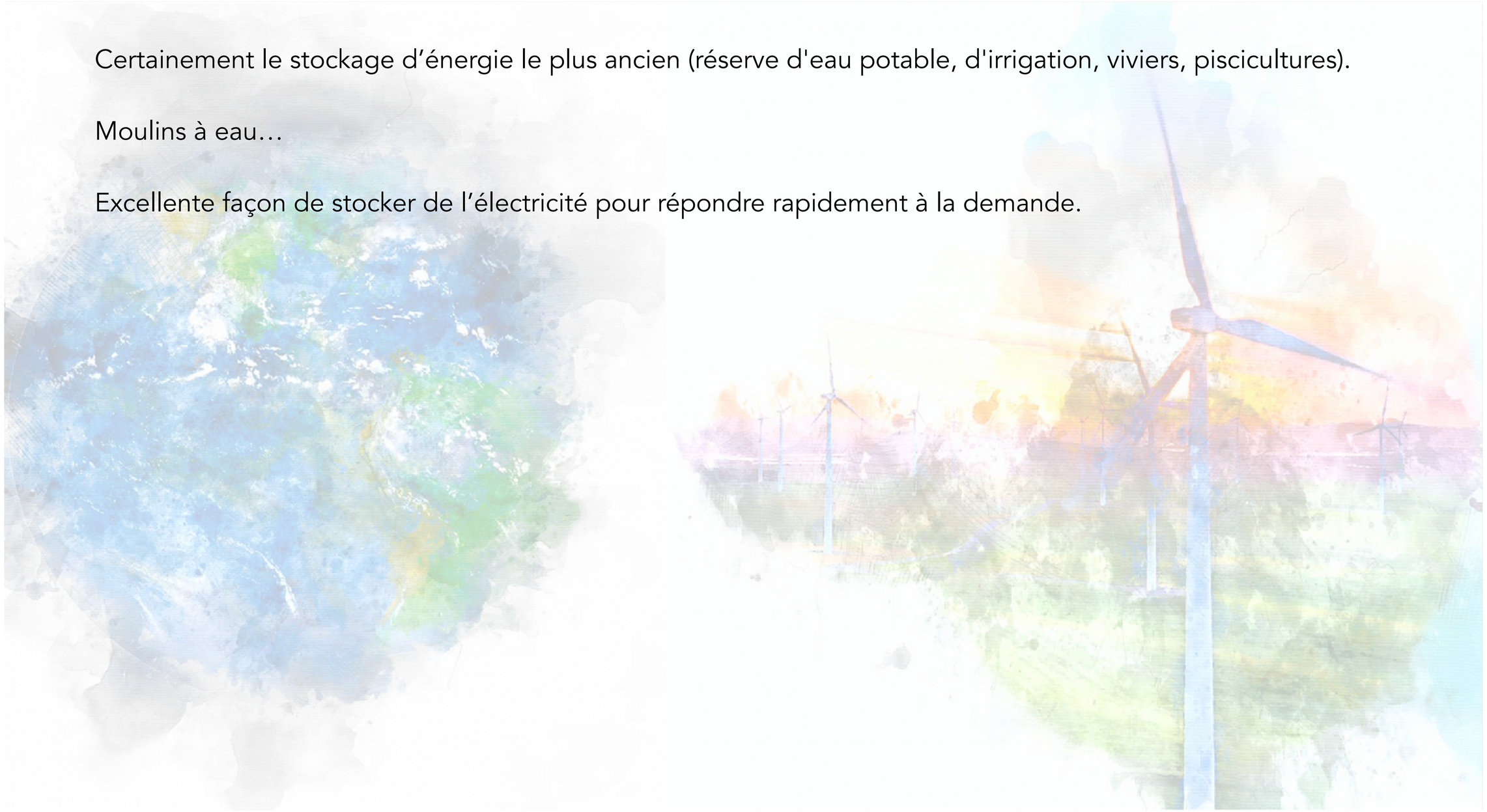
Barrage de Kembs (*1932*)

Energie hydraulique

Certainement le stockage d’énergie le plus ancien (réserve d'eau potable, d'irrigation, viviers, piscicultures).

Moulins à eau…

Excellente façon de stocker de l’électricité pour répondre rapidement à la demande.



Energie hydraulique

Certainement le stockage d'énergie le plus ancien (réserve d'eau potable, d'irrigation, viviers, piscicultures).

Moulins à eau…

Excellente façon de stocker de l'électricité pour répondre rapidement à la demande.

Problématiques actuelles

Matériaux utilisés ?

Energie éolienne

Principe de fonctionnement

Transformation d'une **énergie cinétique** en énergie électrique

Vent

Structure

Electricité

Quelques explications « mécanique » rapide

*L'explication complète sera donnée lors de la première session du cours…**le 23 novembre à 13h30***

L'énergie « cinétique » du vent est représentée par

$$E_c = \frac{1}{2} m \times v^2 \text{ [J]}$$

$m =$ masse

$v =$ vitesse

Quelques explications « mécanique » rapide

*L'explication complète sera donnée lors de la première session du cours…**le 23 novembre à 13h30***

L'énergie « cinétique » du vent est représentée par

$$E_c = \frac{1}{2} m \times v^2 \text{ [J]}$$

$m =$ masse $\qquad\qquad$ $v =$ vitesse

En utilisant la masse volumique ρ [kg/m^3] et le lien entre débit et vitesse

débit = vitesse [m/s] X section [m^2]

$$P_c = \frac{1}{2} \rho \times S \times v^3 \text{ [W]}$$

Quelques explications « mécanique » rapide

*L'explication complète sera donnée lors de la première session du cours…**le 23 novembre à 13h30***

L'énergie « cinétique » du vent est représentée par

$$E_c = \frac{1}{2} m \times v^2 \text{ [J]}$$

$m =$ masse $\qquad\qquad$ $v =$ vitesse

En utilisant la masse volumique ρ [kg/m^3] et le lien entre débit et vitesse
débit = vitesse [m/s] X section [m^2])

$$P_c = \frac{1}{2} \rho \times S \times v^3 \text{ [W]}$$

$$\frac{[\text{kg}]}{[\text{m}]^3} \times [\text{m}]^2 \times \frac{[\text{m}]^3}{[\text{s}]^3} = \frac{[\text{kg.m}^2]}{[\text{s}^2 \times \text{s}]} = \frac{[\text{J}]}{[\text{s}]}$$

Quelques explications « mécanique » rapide

*L'explication complète sera donnée lors de la première session du cours…**le 23 novembre à 13h30***

L'énergie « cinétique » du vent est représentée par

$$E_c = \frac{1}{2} m \times v^2 \text{ [J]}$$

$m =$ masse $\qquad\qquad$ $v =$ vitesse

En utilisant la masse volumique ρ [kg/m^3] et le lien entre débit et vitesse
débit = vitesse [m/s] X section [m^2])

$$P_c = \frac{1}{2} \rho \times S \times v^3 \text{ [W]}$$

$$\frac{[\text{kg}]}{[\text{m}]^3} \times [\text{m}]^2 \times \frac{[\text{m}]^3}{[\text{s}]^3} = \frac{[\text{kg.m}^2]}{[\text{s}^2 \times \text{s}]} = \frac{[\text{J}]}{[\text{s}]}$$

P_c correspond ainsi à la puissance du vent

Quelques explications « mécanique » rapide

*L'explication complète sera donnée lors de la première session du cours…**le 23 novembre à 13h30***

Localement, la pression est influencée par la présence des pâles et la valeur est différente de la pression amont et la puissance réelle fournie par le vent s'exprime sous la forme

$$P_r = \frac{1}{2}\rho \times S \times \left(v_1^2 - v_2^2\right) \frac{(v_1 + v_2)}{2} \text{ [W]}$$

$$r = \frac{P_r}{P_c}$$ le rendement théorique maximum de l'éolienne

Quelques explications « mécanique » rapide

*L'explication complète sera donnée lors de la première session du cours…**le 23 novembre à 13h30***

Localement, la pression est influencée par la présence des pâles et la valeur est différente de la pression amont et la puissance réelle fournie par le vent s'exprime sous la forme

$$P_r = \frac{1}{2}\rho \times S \times \left(v_1^2 - v_2^2\right) \frac{(v_1 + v_2)}{2} \text{ [W]}$$

$$r = \frac{P_r}{P_c}$$ le rendement théorique maximum de l'éolienne

Maximum du rendement théorique pour $\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3}$

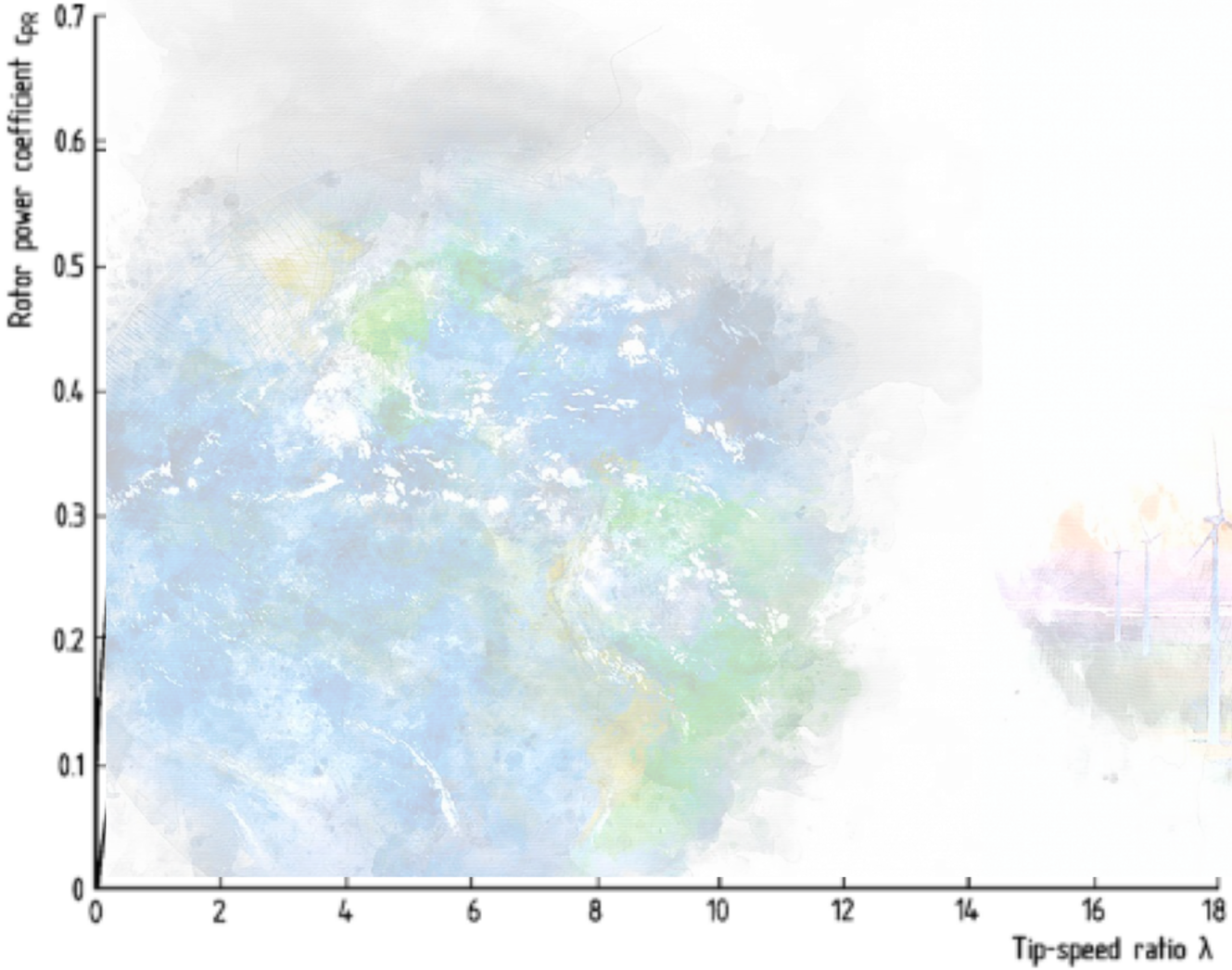
$$r = \frac{16}{27}$$

On ne pourra pas faire mieux….à moins d'introduire des discontinuités locales dans l'air

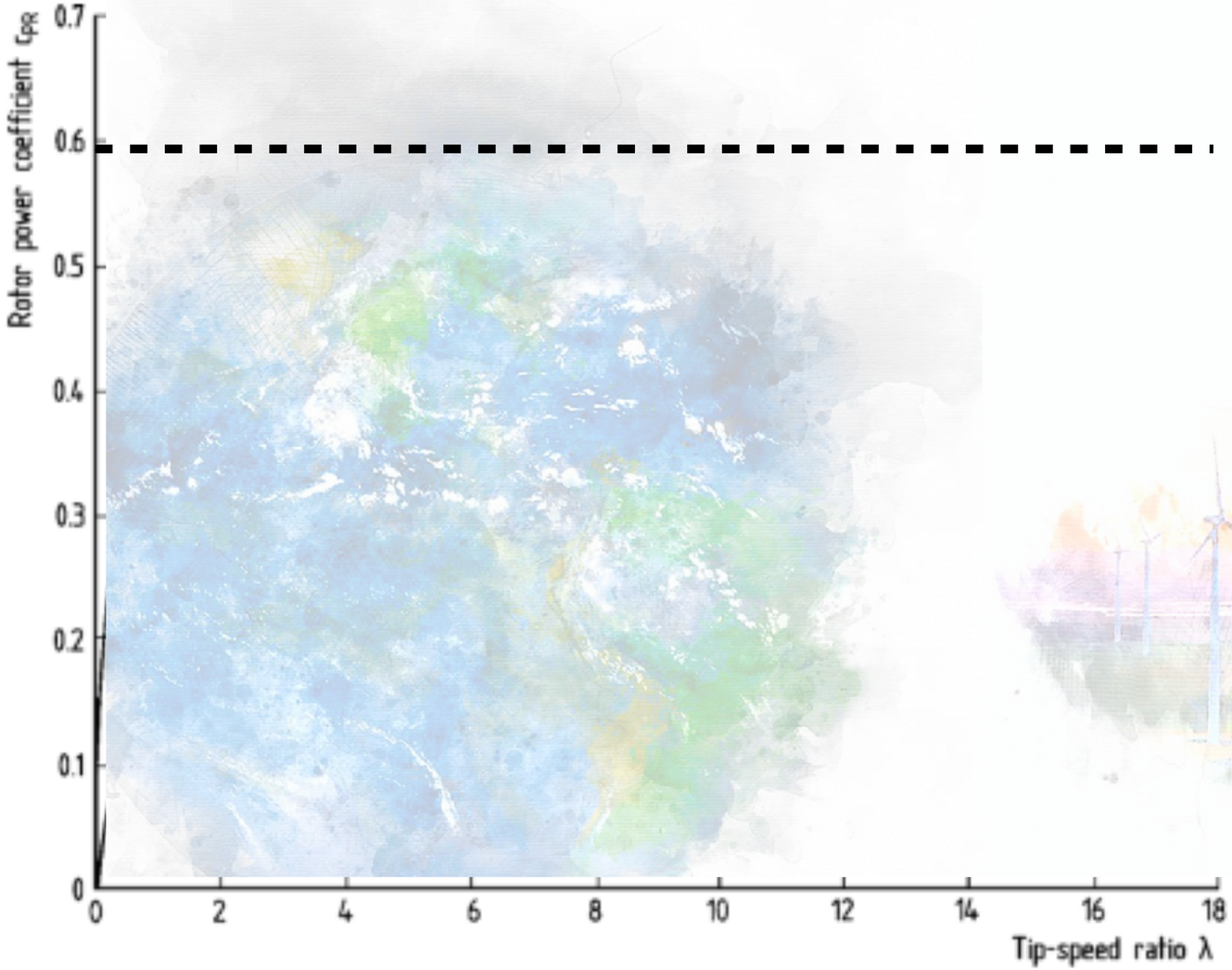
Limite de Betz ~60%

Quelques chiffres clés du secteur éolien

Quelques chiffres clés du secteur éolien

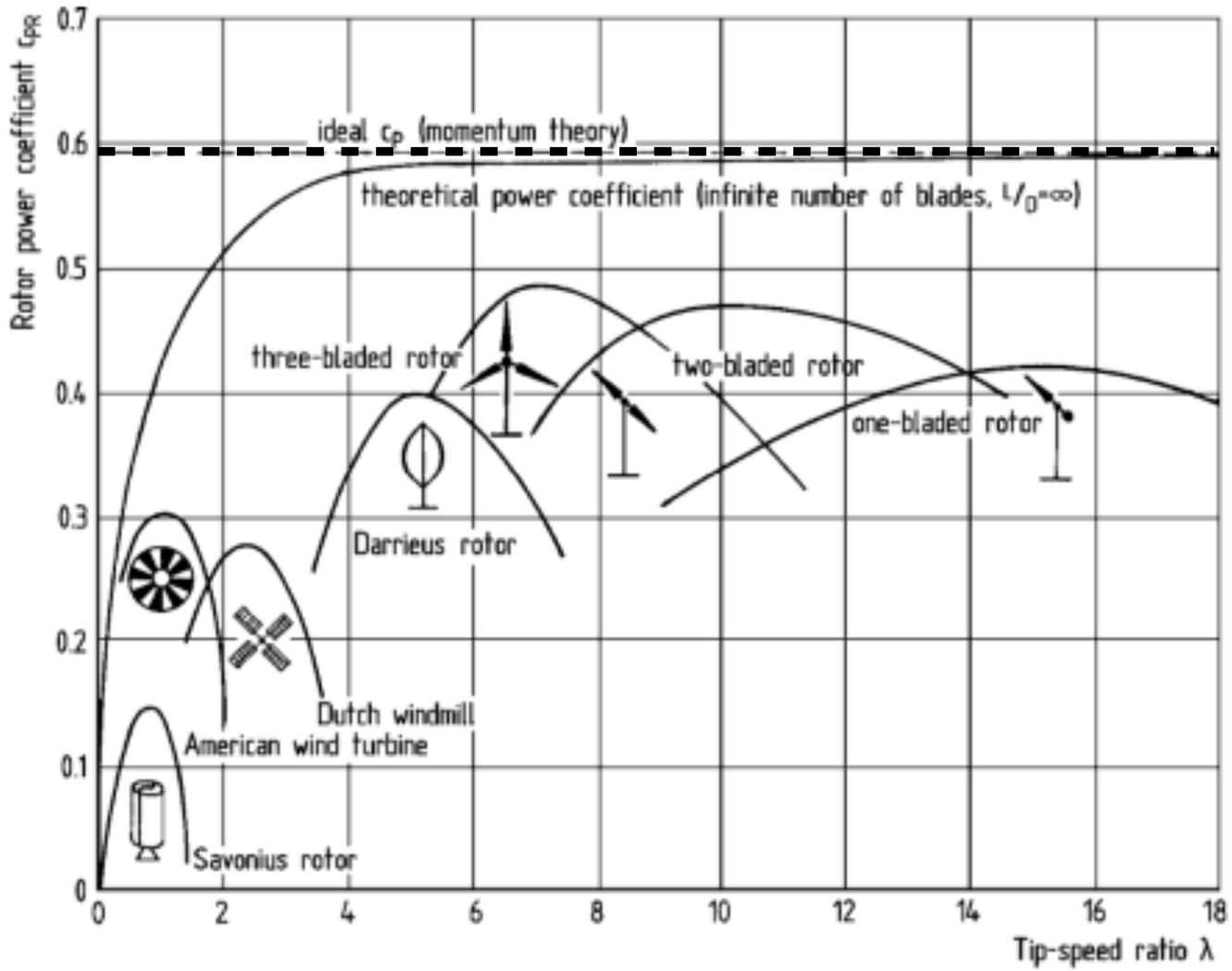


Quelques chiffres clés du secteur éolien



Limite de Betz

Quelques chiffres clés du secteur éolien



Limite de Betz

Quelques chiffres clés du secteur éolien

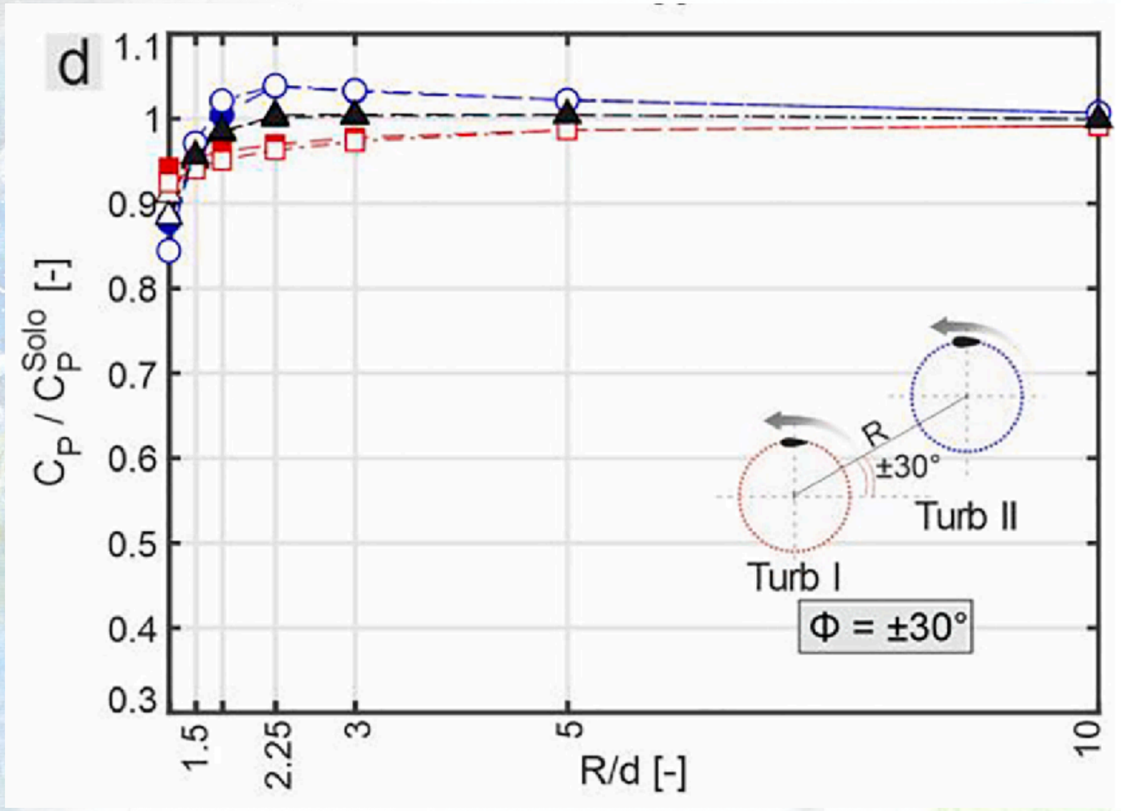
En pratique, il y a rarement 1 éolienne isolée mais plutôt un parc.

Quelques chiffres clés du secteur éolien

Même si l'efficacité est moins bonne, les éoliennes à axe vertical sont une alternative intéressante en milieu urbain

Quelques chiffres clés du secteur éolien

Dans certaines conditions, deux éoliennes placées judicieusement produisent plus d'énergie que prises séparément.



S. Sahebzadeh, A. Rezaeiha, H. Montazeri, *Towards optimal layout design of vertical-axis wind-turbine farms: Double rotor arrangements*, Energy Conversion and Management, Volume 226, 2020, 113527, ISSN 0196-8904

Problématiques actuelles

Matériaux utilisés

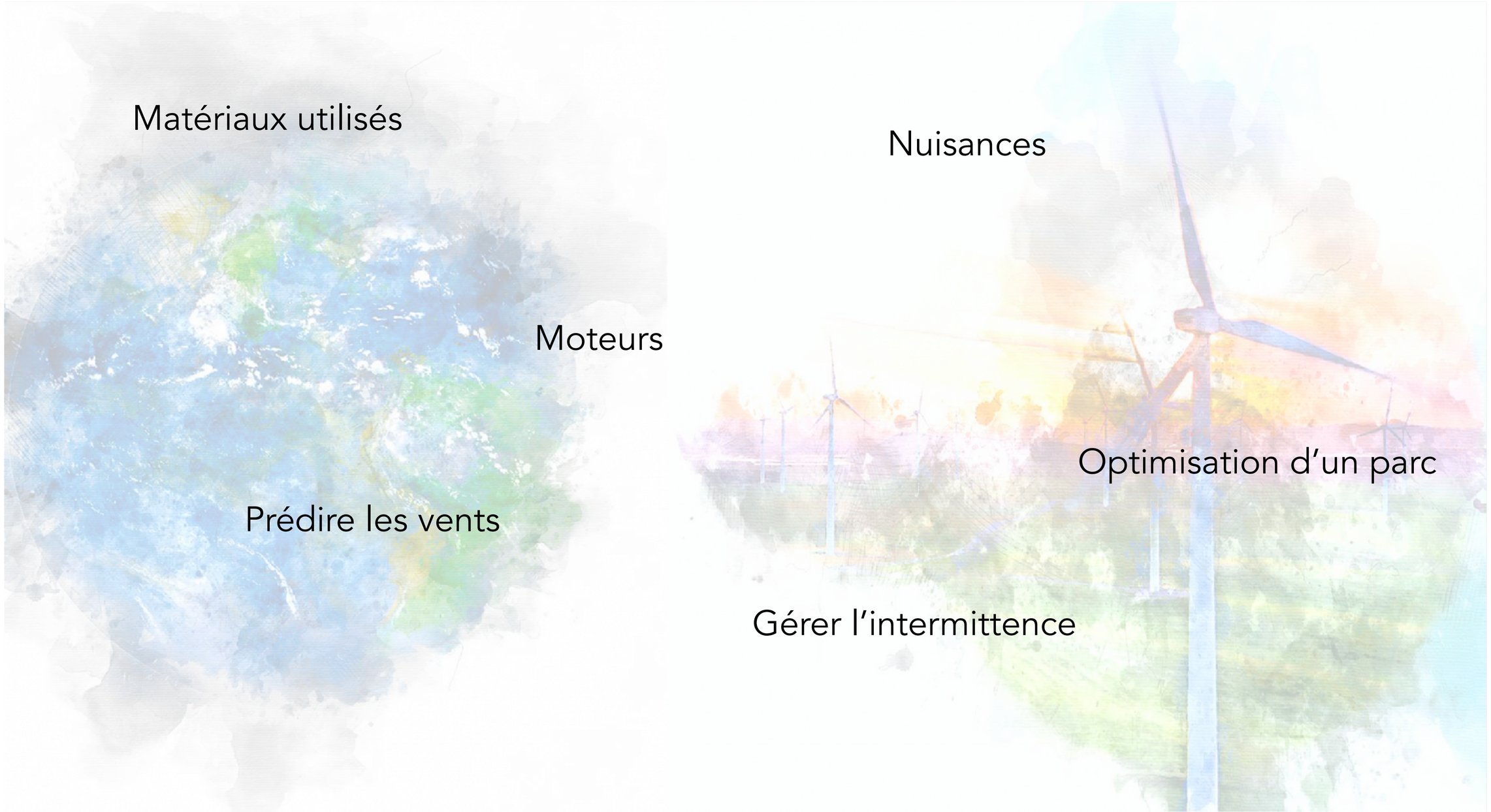
Nuisances

Moteurs

Optimisation d'un parc

Prédire les vents

Gérer l'intermittence

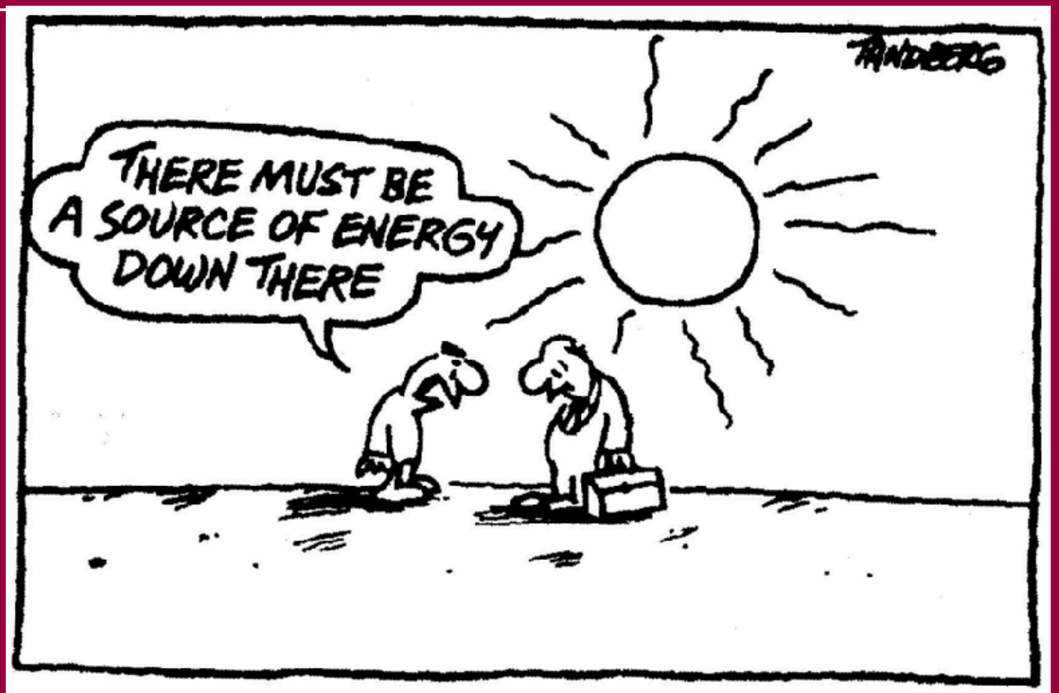


Eolienne / hydro-electrique

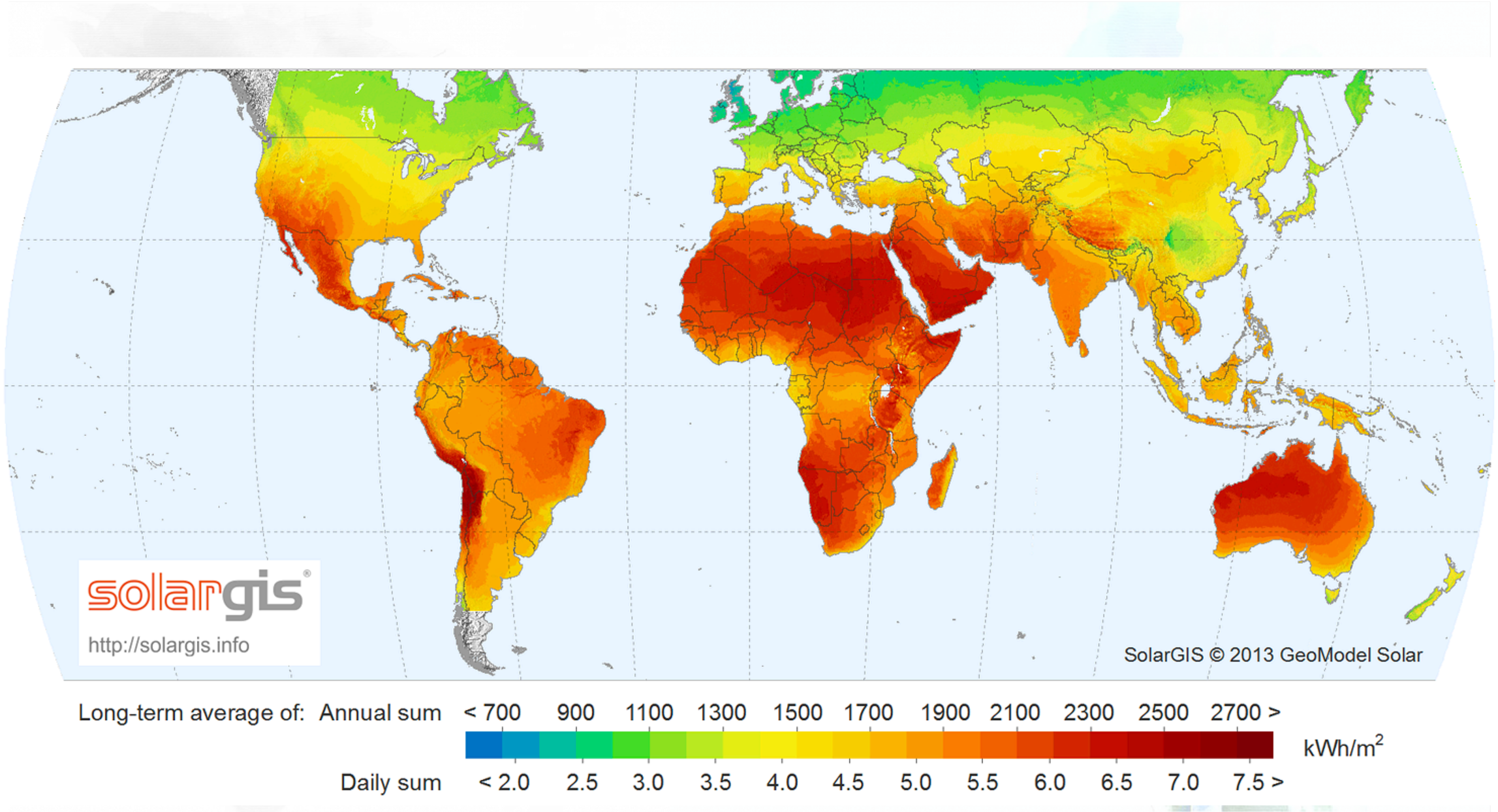
$$E = mgh + \frac{1}{2}mv^2$$

Energie mécanique = Energie potentielle + Energie cinétique

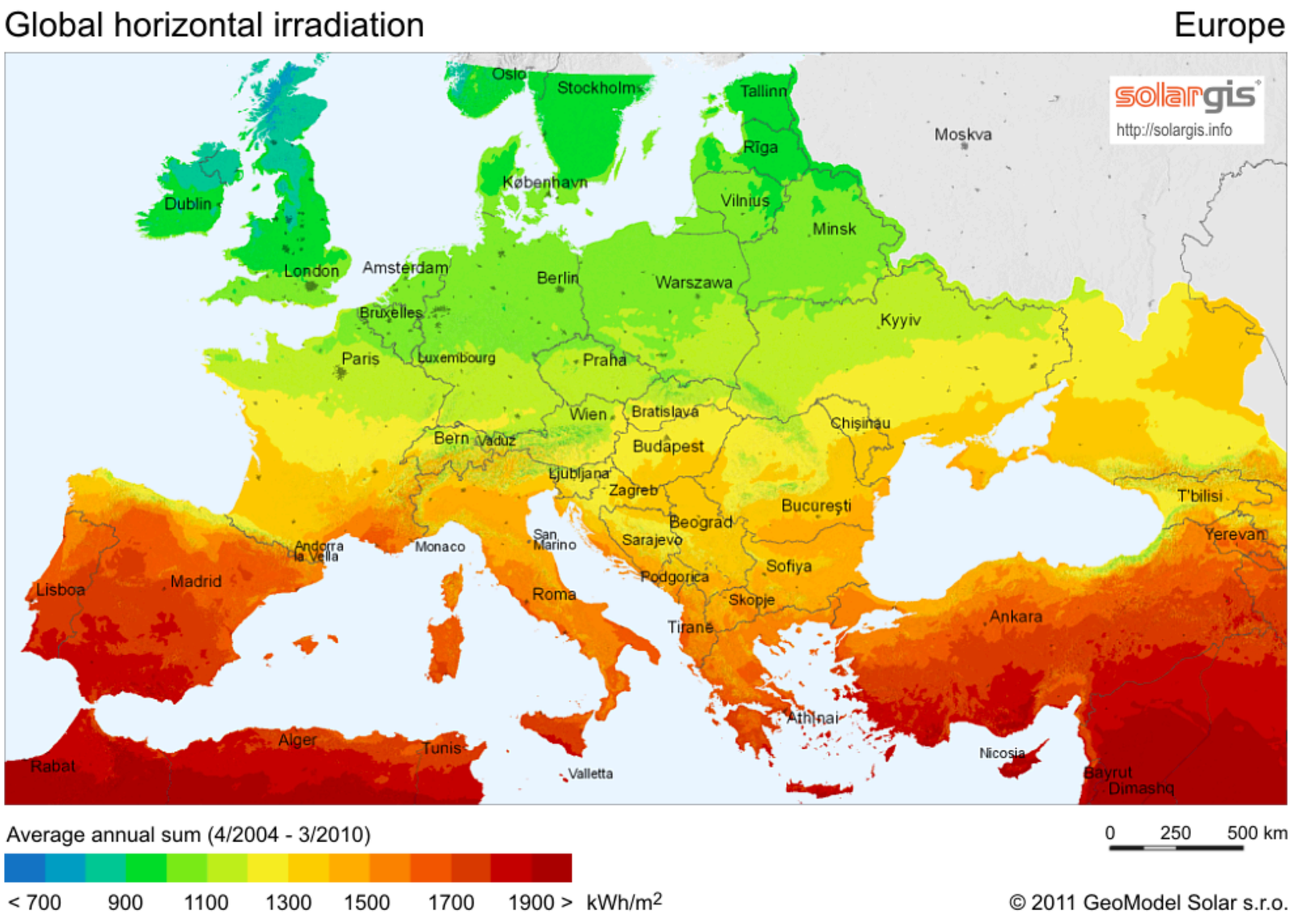
Energie solaire



Carte mondiale de l'énergie solaire reçue au sol



Carte européenne de l'énergie solaire reçue au sol



Principe de fonctionnement

*L'explication complète sera donnée lors de la troisième session du cours…**le 14 décembre à 13h30***

Caractéristiques des ondes électro-magnétiques

Term	**Symbol**	**Units**
Wavelength	λ	Å, nm, μm (1 Å = 10^{-8}cm = 0.1 nm)
Frequency	ν	s^{-1}, Hz, MHz, GHz, THz
Wavenumber	$\bar{\nu}$, $\bar{\omega}$	cm^{-1}, mK (10^{-3} cm^{-1} = 1 milliKayser)
Energy	E, ΔE	J, cm^{-1}, ergs, eV (all per photon); kcal/mole

Spectral region	Wavelength
X-ray	< 10 nm
UV	10 – 400 nm
Visible	400 – 700 nm
IR	0.7 – 100 μm Near IR 0.7 – 2 μm Mid IR 2 – 10 μm Far IR 10 – 100 μm
μwave	0.1 mm – 10 cm (ν = 3 GHz at λ = 10 cm)
RF	0.1 m – 10 m (ν = 30 MHz at λ = 10 m)

Principe de fonctionnement

*L'explication complète sera donnée lors de la troisième session du cours…**le 14 décembre à 13h30***

Caractéristiques des ondes électro-magnétiques

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \ [\mathrm{s}^{-1}]$$

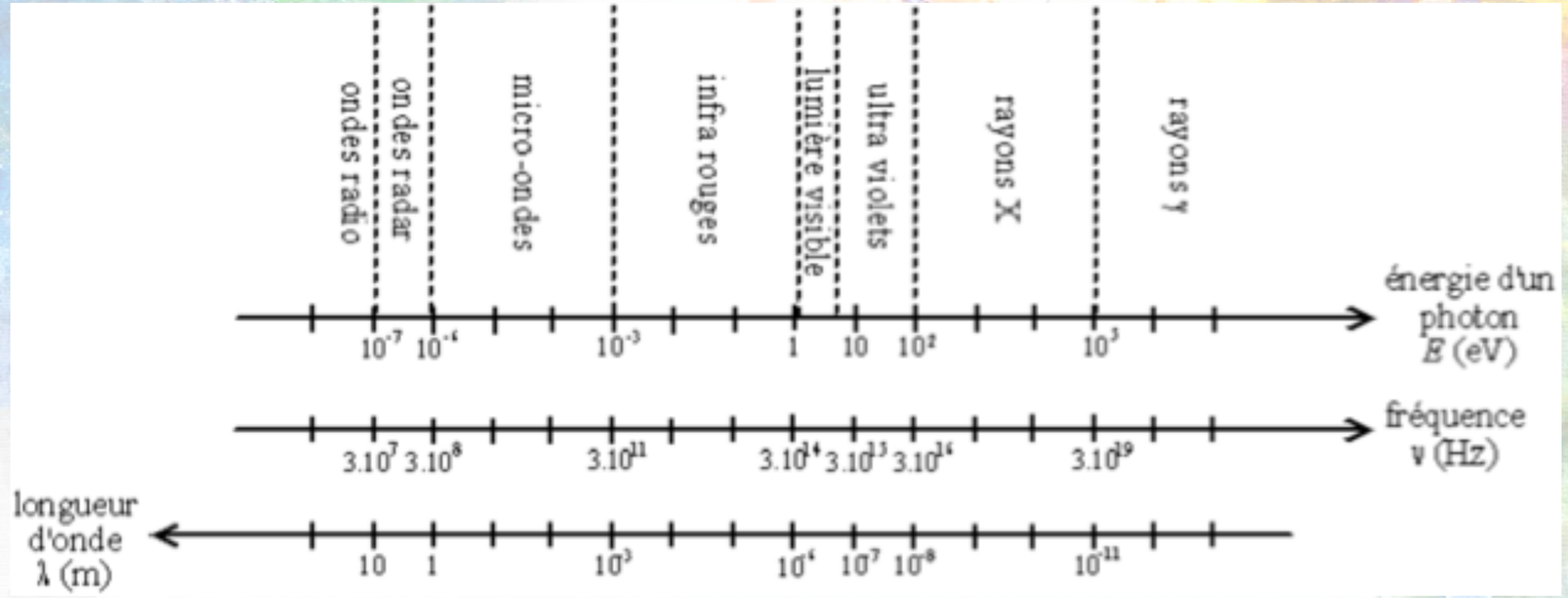
λ est la longueur d'onde [m]

ν est la fréquence [s^{-1}]

$$E = h \cdot \nu$$

h est la constante de Planck

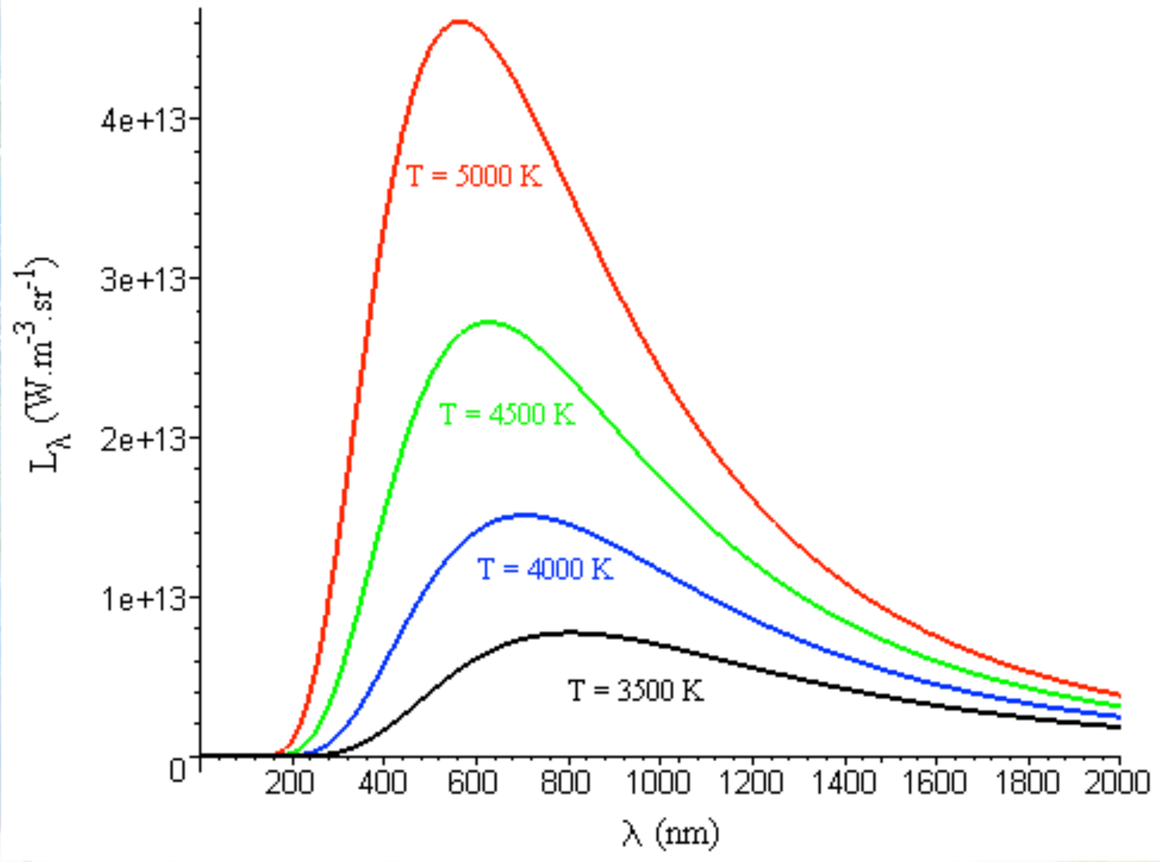
$$h = 6,62607015 \cdot 10^{-34} \ [\mathrm{J.s}]$$



Principe de fonctionnement

*L'explication complète sera donnée lors de la troisième session du cours…**le 14 décembre à 13h30***

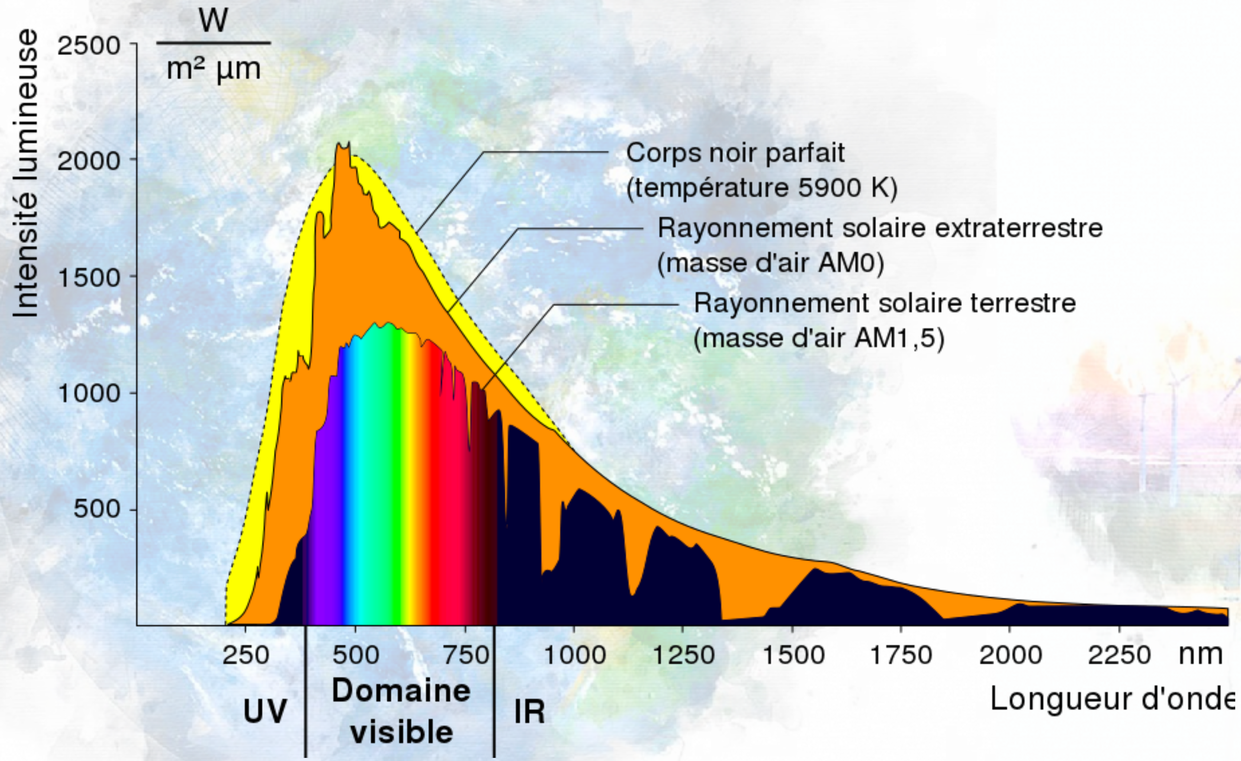
Caractéristiques des corps noirs



Principe de fonctionnement

*L'explication complète sera donnée lors de la troisième session du cours…**le 14 décembre à 13h30***

Emission du soleil

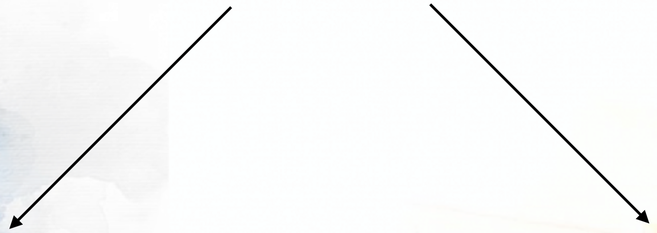


$$L_\lambda^0 = \frac{2hc_0^2\lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{hc_0}{\lambda kT}\right) - 1}$$

Principe de fonctionnement

*L'explication complète sera donnée lors de la troisième session du cours…**le 14 décembre à 13h30***

Rayonnement solaire



Electron

Photo-Voltaïque

Chaleur

Thermique

Principe de fonctionnement

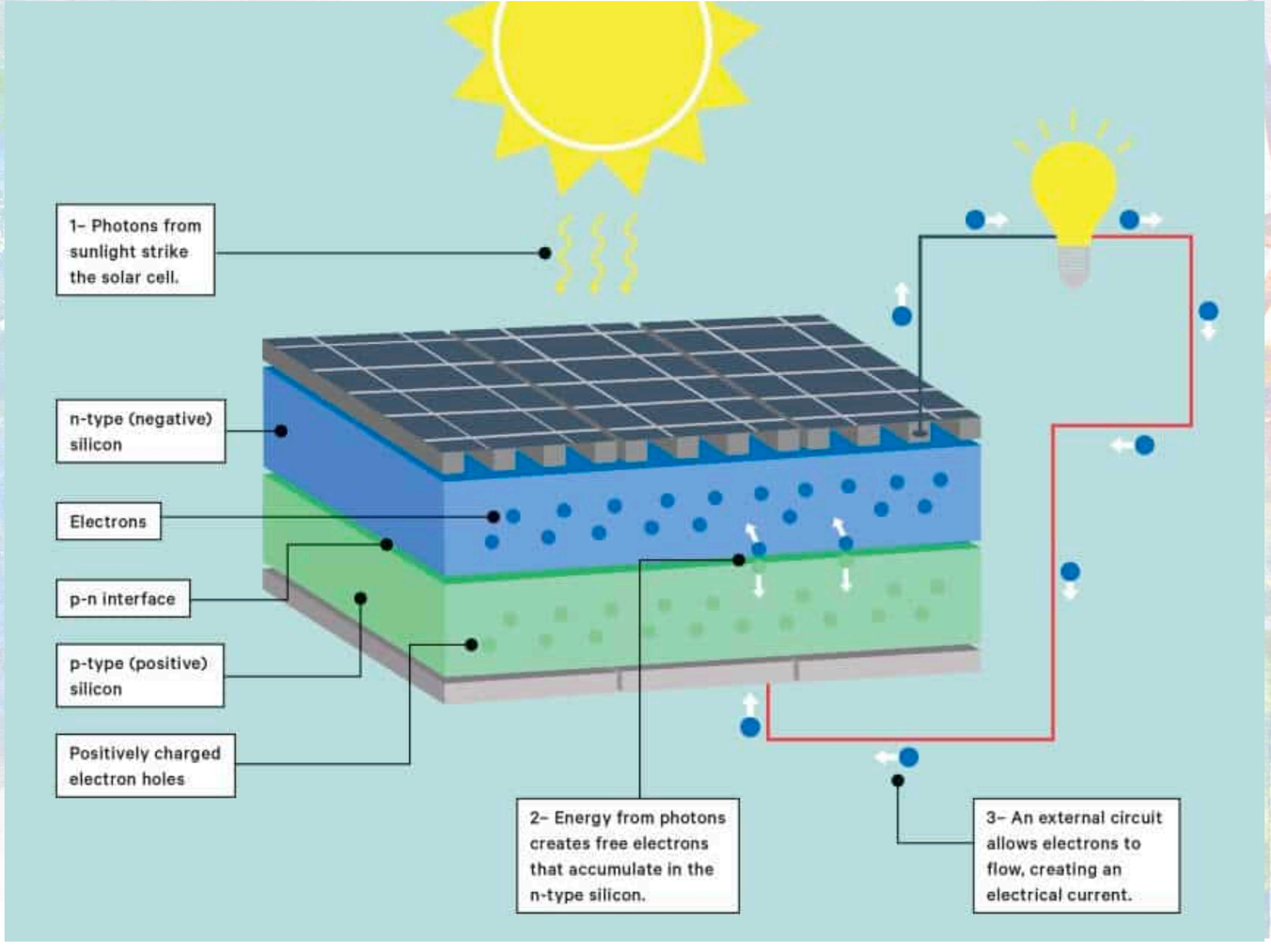
*L'explication complète sera donnée lors de la troisième session du cours…**le 14 décembre à 13h30***

Principe de fonctionnement

*L'explication complète sera donnée lors de la troisième session du cours…**le 14 décembre à 13h30***

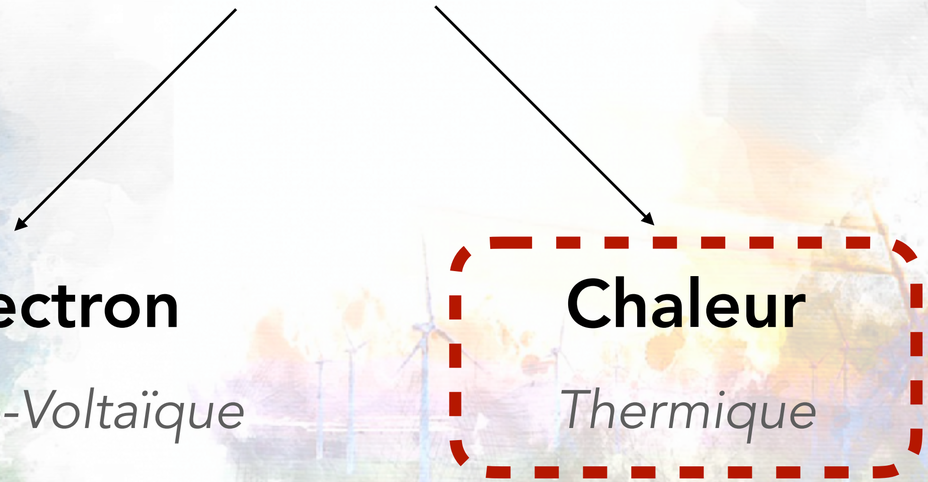
Panneau photo-voltaïque

Photon -> électron



Principe de fonctionnement

*L'explication complète sera donnée lors de la troisième session du cours…**le 14 décembre à 13h30***



Principe de fonctionnement

*L'explication complète sera donnée lors de la troisième session du cours…**le 14 décembre à 13h30***

Effets thermiques

Après avoir quantifier les écoulements, l'objectif est ici de regarder plus en détail les transferts de chaleur uniquement.

Il y a trois modes de transferts thermiques

1) Conduction (nécessite un contact)

2) Convection (nécessite une matière mobile, généralement un fluide)

3) **Rayonnement** (les photons vont transporter de l'énergie électromagnétique entre deux objets)

Principe de fonctionnement

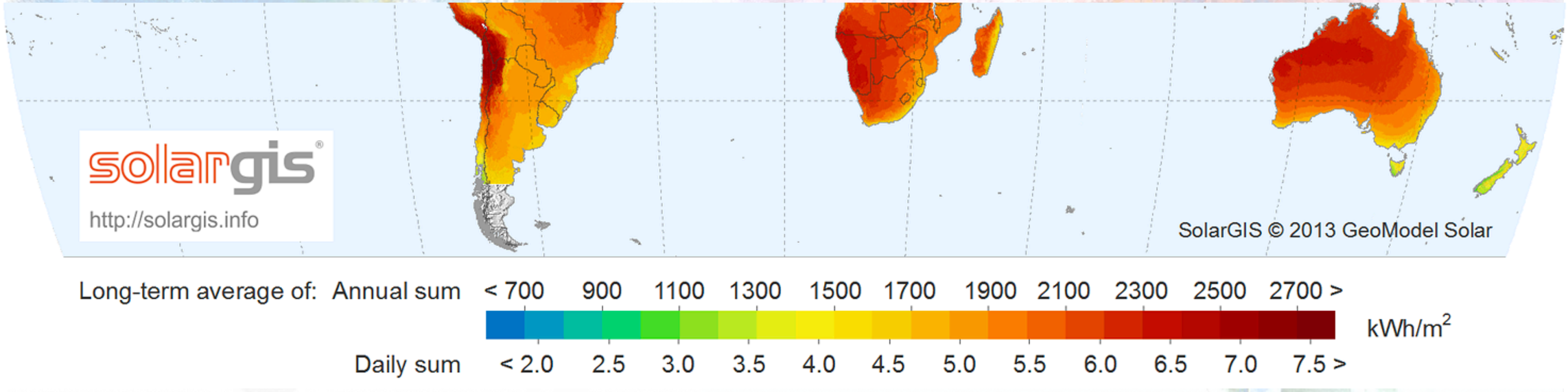
*L'explication complète sera donnée lors de la troisième session du cours…**le 14 décembre à 13h30***

Effets thermiques

Parmi les 3 modes de transferts énergétiques, c'est le plus compliqué à quantifier car il dépend de la géométrie des objets et de leurs distances.

Tous les corps échangent (envoient et reçoivent) en permanence de l'énergie par rayonnement.

Le soleil, se situant à 149 598 600 kilomètres nous réchauffent grâce à ses rayons…



Principe de fonctionnement

*L'explication complète sera donnée lors de la troisième session du cours…**le 14 décembre à 13h30***

Effets thermiques

$$Q = m \times C_p \times \Delta T \text{ [J]}$$

Energie sous forme de quantité de chaleur

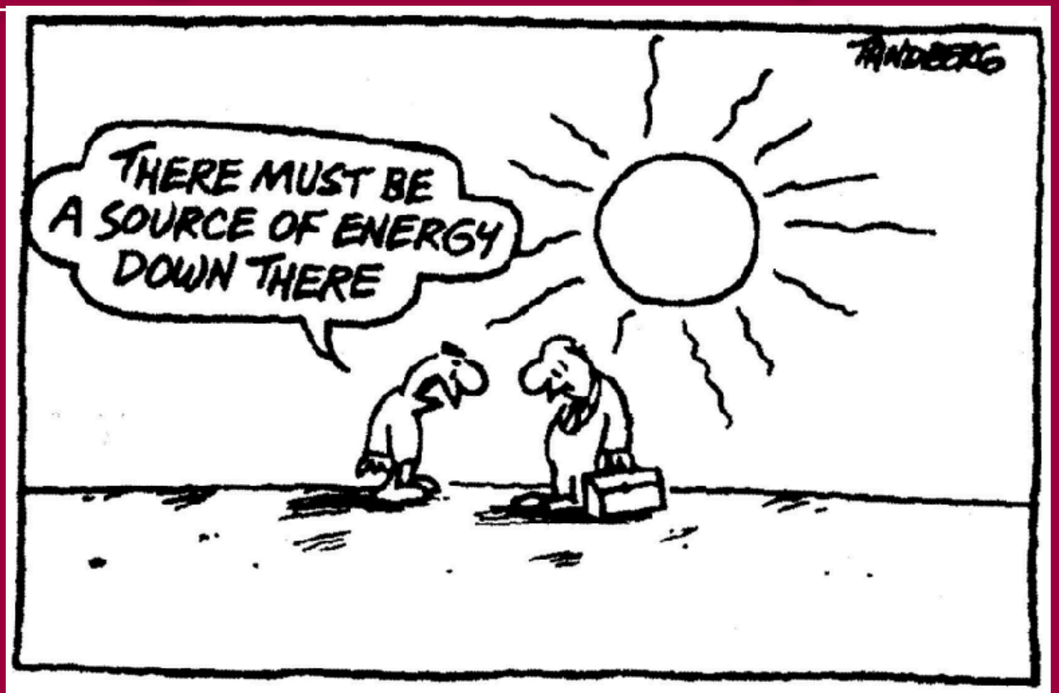
m : masse [kg]

C_p : capacité calorifique du fluide [J/kg/K]

ΔT : écart de température [K]

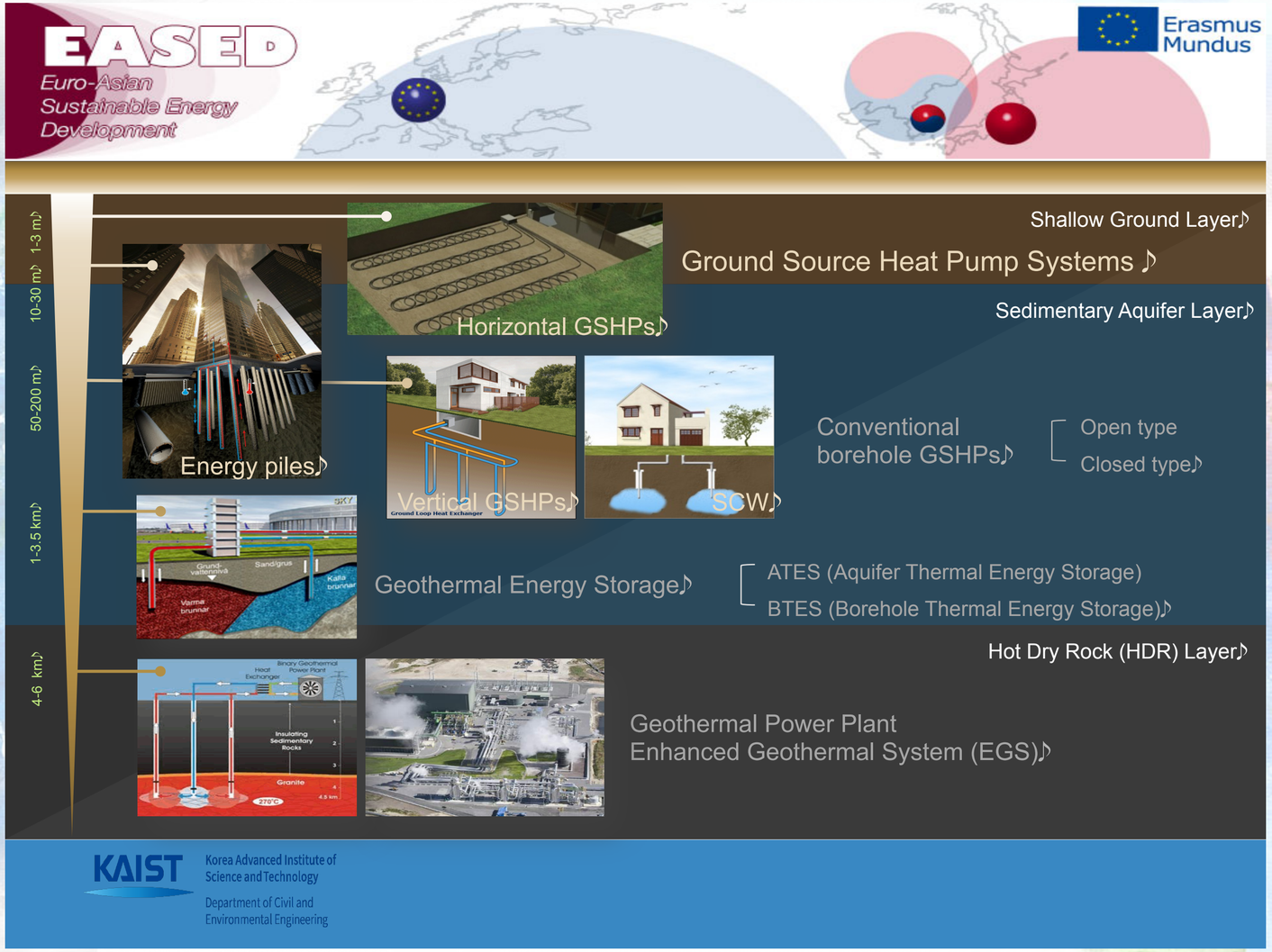
C_p(eau liquide) = 4186 [J/kg/K] = 1 [kcal/kg/K]

Energie géo-thermique



Principe de fonctionnement

*L'explication complète sera donnée lors de la troisième session du cours…**le 14 décembre à 13h30***



SR Lee, Efficiency Improvement of Geothermal Utilization Systems for Heating and Cooling Applications, EM-EASED conference, Madrid, June 15-16 (2017)

Principe de fonctionnement

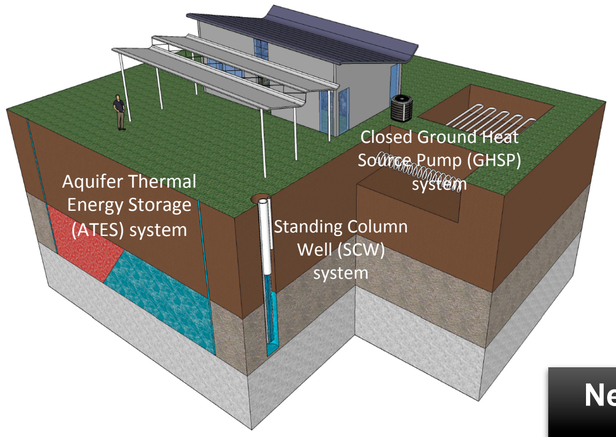
*L'explication complète sera donnée lors de la troisième session du cours…**le 14 décembre à 13h30***

EASED
Euro-Asian Sustainable Energy Development

Erasmus Mundus

How efficienty can we use the geothermal energy ?

➡ Use of GSHPs and geothermal energy storage



Need to evaluate the performance efficiency and affecting factors for each system
: Ground condition, GHE type, environment, etc.

KAIST Korea Advanced Institute of Science and Technology
Department of Civil and Environmental Engineering

SR Lee, Efficiency Improvement of Geothermal Utilization Systems for Heating and Cooling Applications, EM-EASED conference, Madrid, June 15-16 (2017)

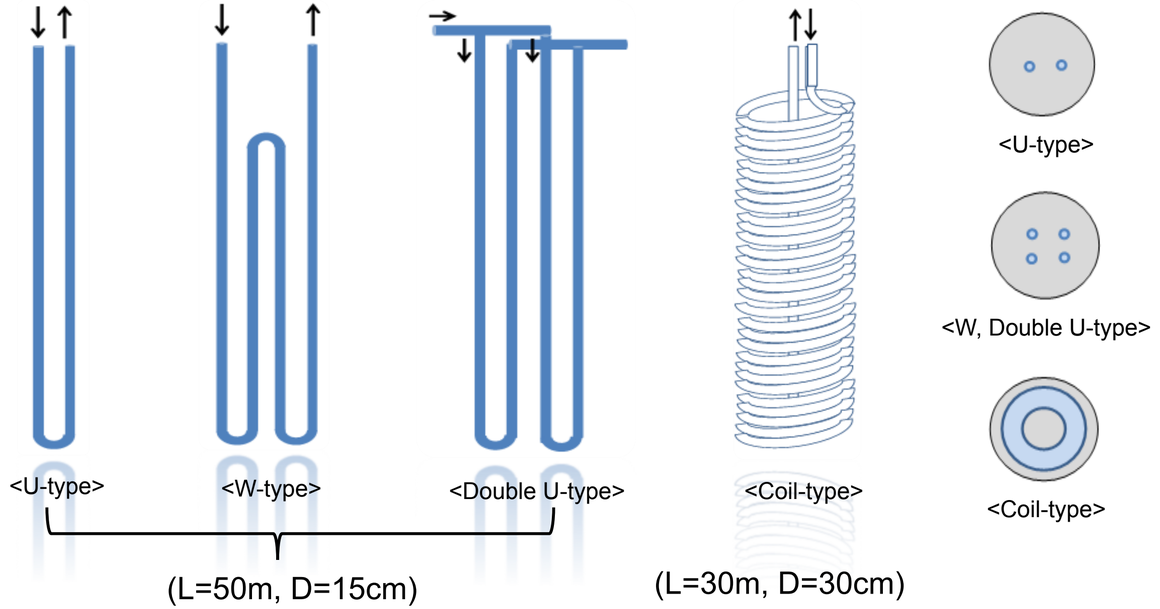
Principe de fonctionnement

*L'explication complète sera donnée lors de la troisième session du cours…**le 14 décembre à 13h30***

EASED
Euro-Asian Sustainable Energy Development

Erasmus Mundus

2.1 VERTICAL/ENERGY PILE GROUND HEAT EXCHANGER



KAIST Korea Advanced Institute of Science and Technology
Department of Civil and Environmental Engineering

SR Lee, Efficiency Improvement of Geothermal Utilization Systems for Heating and Cooling Applications, EM-EASED conference, Madrid, June 15-16 (2017)

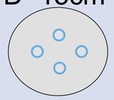
Principe de fonctionnement

*L'explication complète sera donnée lors de la troisième session du cours…**le 14 décembre à 13h30***

EASED Euro-Asian Sustainable Energy Development

Erasmus Mundus

4.3 ECONOMICAL ANALYSIS FOR INCHEON INT' AIRPORT♪

		U-type	W-type	Spiral coil	Remark
type		D=15cm 100m assumption	D=15cm  85m assumption	D=30cm 45m assumption	From 100 hours from the results of Thermal Response Test ***Assumption*** Soil : 0m~40m Rock : 40m~100m
Drilling cost	Standard of construction estimate	X	X	X	
	Cost estimate	35.6 $/m (Soil) 53.4 $/m (Rock) = **4625 $**	**3825 $**	106.7 $/m (Soil) = **4800 $**	Cost estimate was determined for more than 50 holes Drilling : Grout : Pipe = 80% : 10% : 10% .
GROUTING			Almost similar with U type GHE	**1.6~1.7 times** than U type GHE	
Pipe cost			**Twice** than U type GHE	**3~4 times** than U, W type GHEs	

➢ W type GHE showed the highest heat exchange based on construction cost

KAIST Korea Advanced Institute of Science and Technology
Department of Civil and Environmental Engineering

SR Lee, Efficiency Improvement of Geothermal Utilization Systems for Heating and Cooling Applications, EM-EASED conference, Madrid, June 15-16 (2017)

Energie solaire / géothermique

$$\Delta T \Longleftrightarrow Q$$

Energie par combustion

Principe de fonctionnement

Transformation d'une **énergie potentielle** chimique

Molécules

↓

Réactions exo-thermiques

↓

Molécules de plus basses énergies

Principe de fonctionnement

Transformation d'une énergie potentielle chimique

Molécules

Réactions exo-thermiques

Molécules de plus basses énergies

Energie interne U [kJ]
Enthalpie H [kJ]

Energie interne molaire U [kJ/mol]
Enthalpie molaire H [kJ/mol]

Energie interne spécifique U [kJ/kg]
Enthalpie spécifique H [kJ/kg]

*L'explication complète sera donnée lors de la quatrième session du cours…**le 21 décembre***

Principe de fonctionnement

Transformation d'une énergie potentielle chimique

Energie interne / Enthalpie (initiale)

↓

Réactions exo-thermiques

↓

EnthEnergie interne / Enthalpie (finale)

*L'explication complète sera donnée lors de la quatrième session du cours…**le 21 décembre***

Premier principe de la thermodynamique

L'énergie ne peut donc pas être produite ***ex nihilo*** ;
elle est en quantité invariable dans la nature.

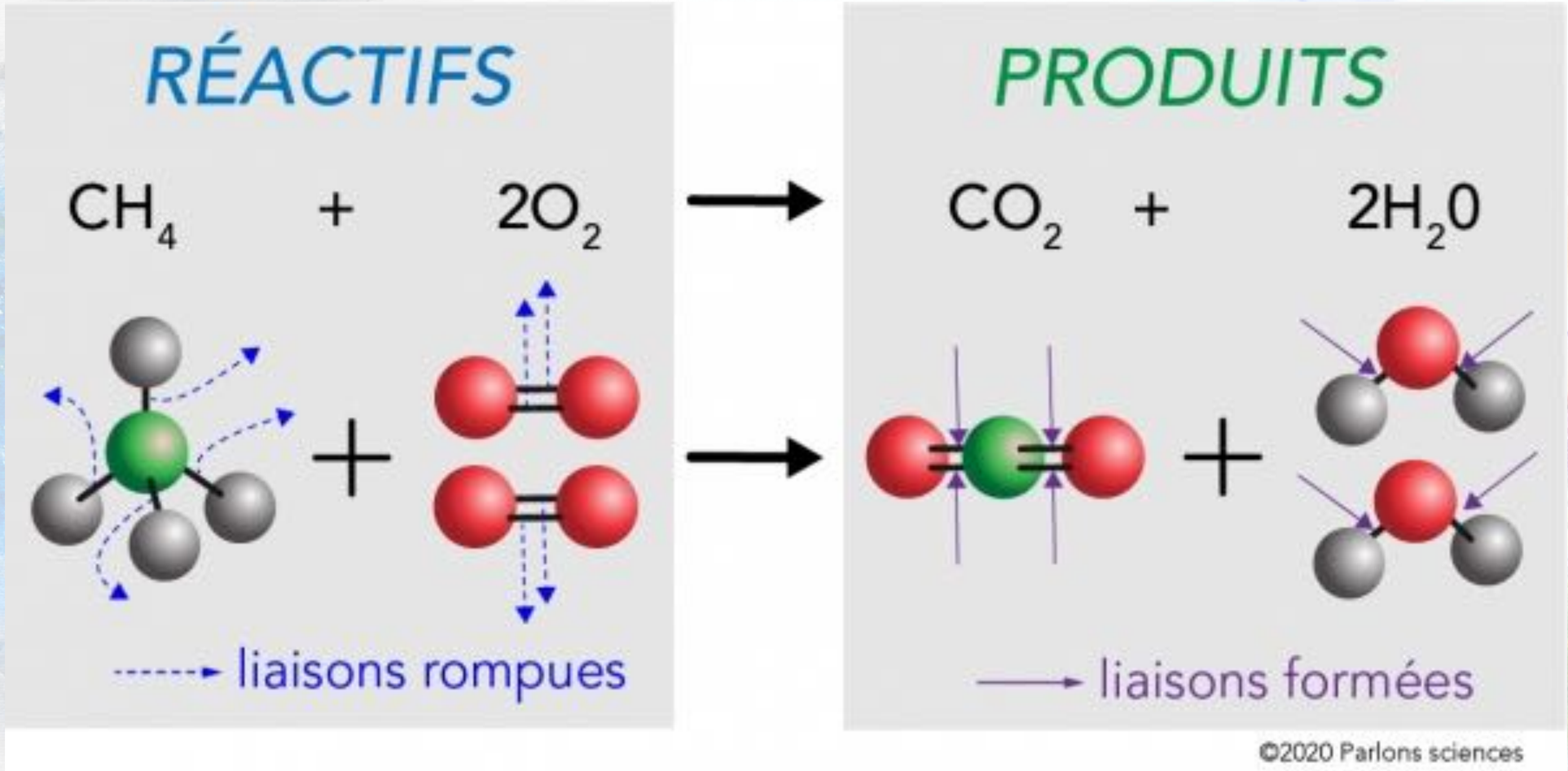
$$\Delta U + \Delta E_m = W + Q$$

Energie interne [J] Energie mécanique [J] Travail [J] Chaleur [J]

*L'explication complète sera donnée lors de la quatrième session du cours…**le 21 décembre***

Principe de fonctionnement

Transformation d'une énergie potentielle chimique



*L'explication complète sera donnée lors de la quatrième session du cours…**le 21 décembre***

Principe de fonctionnement

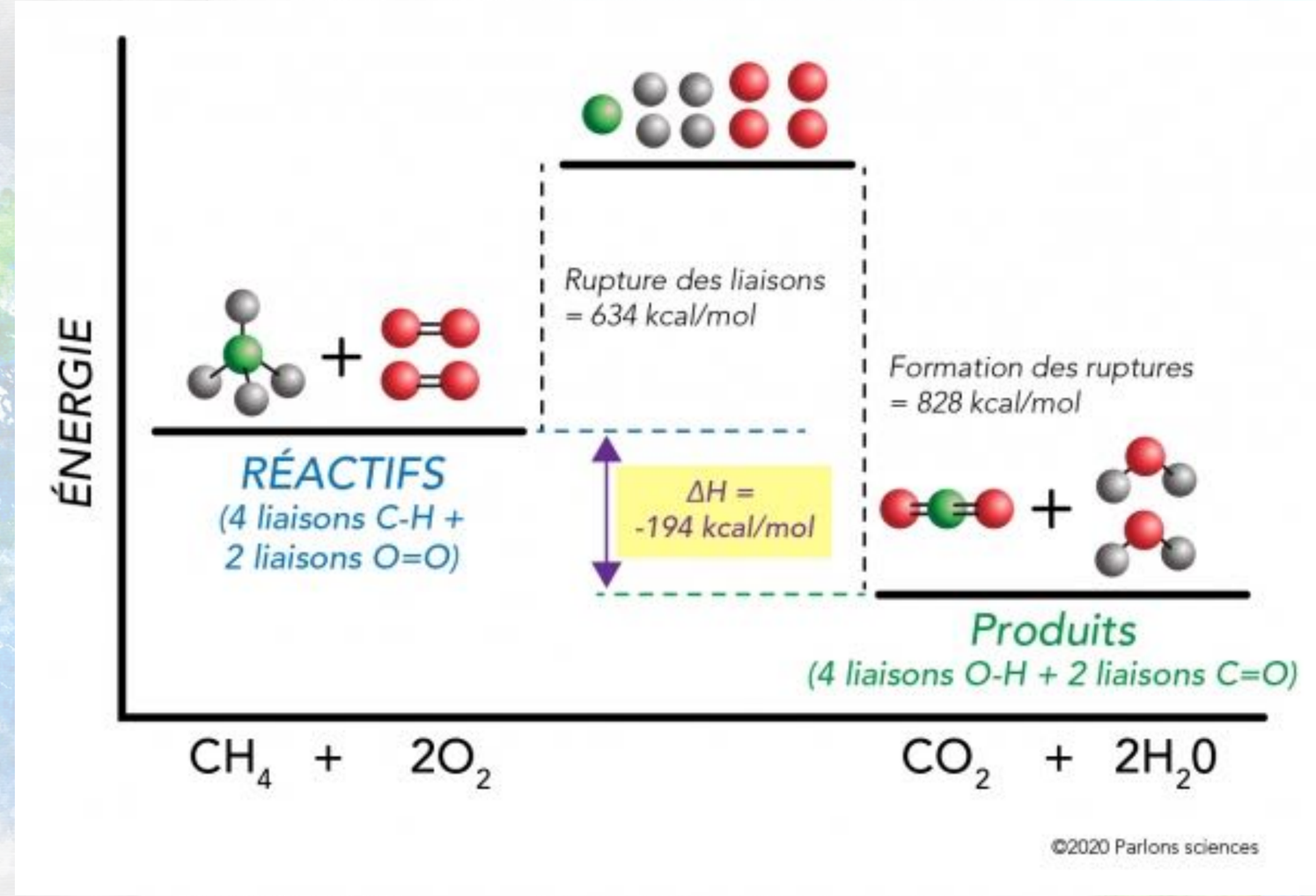
Transformation d'une énergie potentielle chimique

	Energie moyenne des liaisons	Nombre de liaisons	[kcal/mol]
O = O	119 [kcal/mol]	2	238
C – H	99 [kcal/mol]	4	396
Etat initial			634
O – H	111 [kcal/mol]	2 x 2	444
C = O	192 [kcal/mol]	2	384
Etat final			828

*L'explication complète sera donnée lors de la quatrième session du cours…**le 21 décembre***

Principe de fonctionnement

Transformation d'une énergie potentielle chimique



L'explication complète sera donnée lors de la quatrième session du cours… ***le 21 décembre***

Principe de fonctionnement

Transformation d'une énergie potentielle chimique

	Pouvoir calorifique supérieur [MJ/kg]
$4NH_3 + 3O_2 \rightarrow 6H_2O + 2N_2$	18,6
Charbon	34
Kérosène	47
$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_20$	55
$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$	142

*L'explication complète sera donnée lors de la quatrième session du cours…**le 21 décembre***

Principe de fonctionnement

En pratique, les réactions sont beaucoup plus complexes

Propane-Air Reaction Mechanism Rate Coefficients in the Form $k_f = AT^\beta \exp(-E/RT)$.
Units are moles, cubic centimeters, seconds, Kelvins and calories/mole.

	REACTION	A	β	E
68.	$CH_2CO + H \rightleftharpoons CH_3 + CO$	7.000E12	0.0	3000.
69.	$CH_2CO + O \rightleftharpoons CHO + CHO$	1.800E12	0.0	1340.
70.	$CH_2CO + OH \rightleftharpoons CH_2O + CHO$	1.000E13	0.0	0.
71.	$CH_2CO + M' \rightleftharpoons CH_2 + CO + M'$	1.000E16	0.0	59330.
72.	$C_2H_3 + H \rightleftharpoons H_2 + C_2H_2$	2.000E13	0.0	0.
73.	$C_2H_3 + O \rightleftharpoons CH_2CO + H$	3.000E13	0.0	0.
74.	$C_2H_3 + O_2 \rightarrow CH_2O + CHO$	1.500E12	0.0	0.
75.	$C_2H_3 \rightleftharpoons C_2H_2 + H$	1.600E32	-5.5	46290.
76.	$CH_3CO + H \rightleftharpoons CH_2CO + H_2$	2.000E13	0.0	0.
77.	$CH_3CO + O \rightleftharpoons CH_3 + CO_2$	2.000E13	0.0	0.
78.	$CH_3CO + CH_3 \rightleftharpoons C_2H_6 + CO$	5.000E13	0.0	0.
79.	$CH_3CO \rightleftharpoons CH_3 + CO$	2.300E26	-5.0	17990.
80.	$C_2H_4 + H \rightleftharpoons C_2H_3 + H_2$	1.500E14	0.0	10215.
81.	$C_2H_4 + O \rightarrow CH_3CO + H$	1.600E09	1.2	740.
82.	$C_2H_4 + OH \rightleftharpoons C_2H_3 + H_2O$	3.000E13	0.0	3000.
83.	$C_2H_4 + CH_3 \rightleftharpoons C_2H_3 + CH_4$	4.200E11	0.0	11120.
84.	$C_2H_4 + M' \rightleftharpoons C_2H_2 + H_2 + M'$	2.500E17	0.0	76500.
85.	$CH_3CHO + H \rightleftharpoons CH_3CO + H_2$	4.000E13	0.0	4210.
86.	$CH_3CHO + O \rightleftharpoons CH_3CO + OH$	5.000E12	0.0	1790.
87.	$CH_3CHO + OH \rightleftharpoons CH_3CO + H_2O$	8.000E12	0.0	0.
88.	$CH_3CHO + HO_2 \rightleftharpoons CH_3CO + H_2O_2$	1.700E12	0.0	10720.
89.	$CH_3CHO + CH_2 \rightleftharpoons CH_3CO + CH_3$	2.500E12	0.0	3800.
90.	$CH_3CHO + CH_3 \rightleftharpoons CH_3CO + CH_4$	8.500E10	0.0	6000.
91.	$CH_3CHO \rightleftharpoons CH_3 + CHO$	2.000E15	0.0	79190.
92.	$C_2H_5 + H \rightleftharpoons CH_3 + CH_3$	3.000E13	0.0	0.
93.	$C_2H_5 + O \rightleftharpoons CH_3CHO + H$	5.000E13	0.0	0.
94.	$C_2H_5 + O_2 \rightleftharpoons HO_2 + C_2H_4$	2.000E12	0.0	5000.
95.	$C_2H_5 + CH_3 \rightleftharpoons C_3H_8$	7.000E12	0.0	0.
96.	$C_2H_5 + C_2H_5 \rightleftharpoons C_2H_4 + C_2H_6$	1.400E12	0.0	0.
97.	$C_2H_5 \rightleftharpoons C_2H_4 + H$	1.300E19	-2.0	41480.
98.	$C_2H_6 + H \rightleftharpoons H_2 + C_2H_5$	5.400E02	3.5	5215.
99.	$C_2H_6 + O \rightleftharpoons OH + C_2H_5$	3.000E07	2.0	5120.
100.	$C_2H_6 + OH \rightleftharpoons H_2O + C_2H_5$	6.300E06	2.0	645.
101.	$C_2H_6 + HO_2 \rightleftharpoons H_2O_2 + C_2H_5$	6.000E12	0.0	19420.
102.	$C_2H_6 + CH_3 \rightleftharpoons C_2H_5 + CH_4$	5.500E-01	4.0	8300.
103.	$C_2H_6 + CH_2 \rightleftharpoons CH_3 + C_2H_5$	2.200E13	0.0	8680.
104.	$C_2H_6 + CH \rightleftharpoons H + C_3H_6$	1.100E14	0.0	-260.

TABLE II

Propane-Air Reaction Mechanism Rate Coefficients in the Form $k_f = AT^\beta \exp(-E/RT)$.
Units are moles, cubic centimeters, seconds, Kelvins and calories/mole.

REACTION	A
$O_2 + H \rightleftharpoons OH + O$	2.000E14
$H_2 + O \rightleftharpoons OH + H$	5.060E04
$H_2 + OH \rightleftharpoons H_2O + H$	1.000E08
$OH + OH \rightleftharpoons H_2O + O$	1.500E09
$H + H + M' \rightleftharpoons H_2 + M'$	1.800E18
$H + OH + M' \rightleftharpoons H_2O + M'$	2.200E22
$O + O + M' \rightleftharpoons O_2 + M'$	2.900E17
$H + O_2 + M' \rightleftharpoons HO_2 + M'$	2.300E18
$HO_2 + H \rightleftharpoons OH + OH$	1.500E14
$HO_2 + H \rightleftharpoons H_2 + O_2$	2.500E13
$HO_2 + H \rightleftharpoons H_2O + O$	3.000E13
$HO_2 + O \rightleftharpoons OH + O_2$	1.800E13
$HO_2 + OH \rightleftharpoons H_2O + O_2$	6.000E13
$HO_2 + HO_2 \rightarrow H_2O_2 + O_2$	2.500E11
$OH + OH + M' \rightleftharpoons H_2O_2 + M'$	3.256E22
$H_2O_2 + H \rightleftharpoons H_2 + HO_2$	1.700E12
$H_2O_2 + H \rightleftharpoons H_2O + OH$	1.000E13
$H_2O_2 + O \rightleftharpoons OH + HO_2$	2.800E13
$H_2O_2 + OH \rightleftharpoons H_2O + HO_2$	5.400E12
$CO + OH \rightleftharpoons CO_2 + H$	4.400E06
$CO + HO_2 \rightleftharpoons CO_2 + OH$	1.500E14
$CO + O + M' \rightleftharpoons CO_2 + M'$	7.100E13
$CO + O_2 \rightleftharpoons CO_2 + O$	2.500E12
$CH + O \rightleftharpoons CO + H$	4.000E13
$CH + O_2 \rightleftharpoons CHO + O$	3.000E13
$CH + CO_2 \rightarrow CHO + CO$	3.400E12
$CHO + H \rightleftharpoons CO + H_2$	2.000E14
$CHO + O \rightleftharpoons CO + OH$	3.000E13
$CHO + O \rightleftharpoons CO_2 + H$	3.000E13
$CHO + OH \rightleftharpoons CO + H_2O$	1.000E14
$CHO + O_2 \rightleftharpoons CO + HO_2$	3.000E12
$CHO + M' \rightleftharpoons CO + H + M'$	7.100E14

Species for a Propane-Air Flame

C_3H_8	$N*C_3H_7$	$I*C_3H_7$	C_3H_6	C_2H_6
CH_3CHO	C_2H_4	CH_3CO	C_2H_3	CH_2CO
C_2HO	C_2H	CH_4	CH_3	CH_2O
CHO	CH	CO_2	CO	H_2O_2
H_2	HO_2	OH	H	O_2
N_2	NO	N		

Propane-Air Reaction Mechanism Rate Coefficients in the Form $k_f = AT^\beta \exp(-E/RT)$.
Units are moles, cubic centimeters, seconds, Kelvins and calories/mole.

	REACTION	A	β	E
105.	$C_3H_8 + H \rightleftharpoons N*C_3H_7 + H_2$	1.300E14	0.0	9710.
106.	$C_3H_8 + H \rightleftharpoons I*C_3H_7 + H_2$	1.000E14	0.0	8350.
107.	$C_3H_8 + O \rightleftharpoons N*C_3H_7 + OH$	3.000E13	0.0	5765.
108.	$C_3H_8 + O \rightleftharpoons I*C_3H_7 + OH$	2.600E13	0.0	4470.
109.	$C_3H_8 + OH \rightleftharpoons N*C_3H_7 + H_2O$	6.300E06	2.0	645.
110.	$C_3H_8 + OH \rightleftharpoons I*C_3H_7 + H_2O$	1.200E08	1.46	-190.
111.	$C_3H_8 + HO_2 \rightleftharpoons N*C_3H_7 + H_2O_2$	6.000E12	0.0	19420.
112.	$C_3H_8 + HO_2 \rightleftharpoons I*C_3H_7 + H_2O_2$	2.000E12	0.0	17000.
113.	$C_3H_8 + CH_3 \rightleftharpoons N*C_3H_7 + CH_4$	7.500E12	0.0	14950.
114.	$C_3H_8 + CH_3 \rightleftharpoons I*C_3H_7 + CH_4$	4.300E12	0.0	13280.
115.	$N*C_3H_7 + H \rightleftharpoons C_3H_8$	2.000E13	0.0	0.
116.	$I*C_3H_7 + H \rightleftharpoons C_3H_8$	2.000E13	0.0	0.
117.	$N*C_3H_7 + O_2 \rightleftharpoons C_3H_6 + HO_2$	1.000E12	0.0	5000.
118.	$I*C_3H_7 + O_2 \rightleftharpoons C_3H_6 + HO_2$	1.000E12	0.0	2990.
119.	$N*C_3H_7 \rightleftharpoons C_3H_6 + H$	1.000E14	0.0	37340.
120.	$I*C_3H_7 \rightleftharpoons C_3H_6 + H$	2.000E14	0.0	38730.
121.	$N*C_3H_7 \rightleftharpoons C_2H_4 + CH_3$	3.000E14	0.0	33250.
122.	$C_3H_6 + O \rightleftharpoons CH_3CO + CH_3$	5.000E12	0.0	450.
123.	$C_3H_6 + OH \rightarrow C_2H_2 + CH_3 + H_2O$	2.000E13	0.0	3060.
124.	$N_2 + O \rightleftharpoons N + NO$	0.136E15	0.0	76400.
125.	$N + O_2 \rightleftharpoons O + NO$	0.267E11	0.72	7080.
126.	$N + OH \rightleftharpoons H + NO$	0.280E14	0.0	0.

Third body efficiencies for M' : $\alpha(O_2) = 0.4$, $\alpha(N_2) = 0.4$, $\alpha(CO) = 0.75$, $\alpha(CO_2) = 1.5$, $\alpha(H_2O) = 6.5$, $\alpha(C_3H8) = 3$.

TABLE II (continued)

Propane-Air Reaction Mechanism Rate Coefficients in the Form $k_f = AT^\beta \exp(-E/RT)$.
seconds, Kelvins and calories/mole.

A	β	E
4.000E13	0.0	0.
8.000E13	0.0	0.
6.500E12	0.0	1500.
6.500E12	0.0	1500.
2.500E13	0.0	4000.
3.500E13	0.0	3490.
3.000E13	0.0	1200.
1.000E12	0.0	8000.
1.000E11	0.0	6100.
1.400E17	0.0	76550.
1.800E14	0.0	15070.
7.000E13	0.0	0.
9.000E14	0.0	15500.
8.000E12	0.0	0.
1.500E13	0.0	28710.
7.470E52	-11.9	19190.
1.000E16	0.0	90910.
1.000E16	0.0	32060.
4.000E13	0.0	0.
2.200E04	3.0	8760.
1.200E07	2.1	7630.
1.600E06	2.1	2460.
4.000E12	0.0	19425.
3.200E34	-6.0	109450.
1.300E13	0.0	9545.
3.000E13	0.0	-400.
1.000E13	0.0	0.
1.100E13	0.0	2870.
5.000E13	0.0	1500.
3.000E13	0.0	0.
1.000E14	0.0	0.
4.100E08	1.5	1700.
4.300E14	0.0	12130.
1.000E13	0.0	7000.
3.600E16	0.0	106700.

L'explication complète sera donnée lors de la quatrième session du cours… ***le 21 décembre***

Energie par combustion

$$\Delta H$$

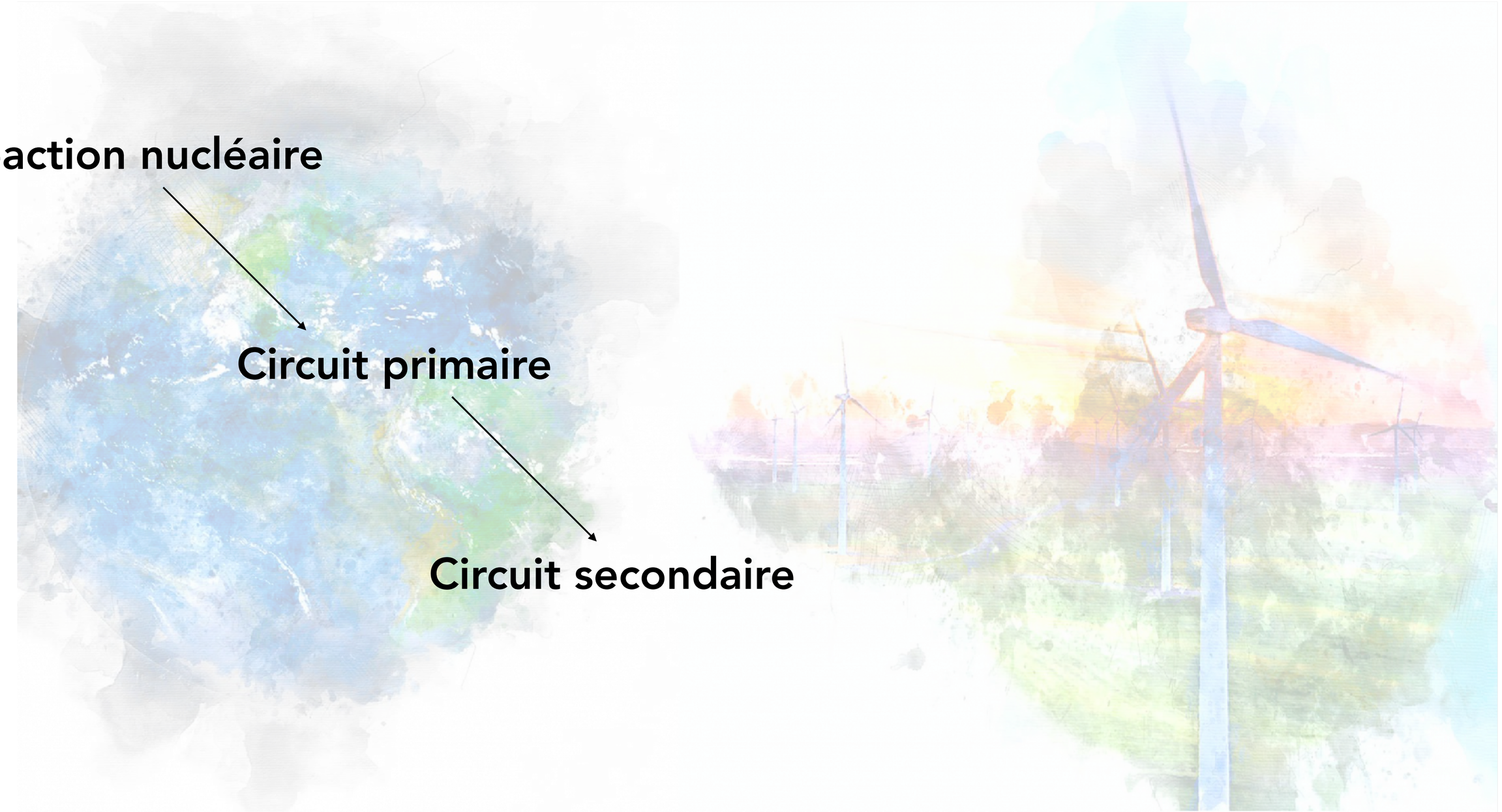
Energie nucléaire

Principe de fonctionnement

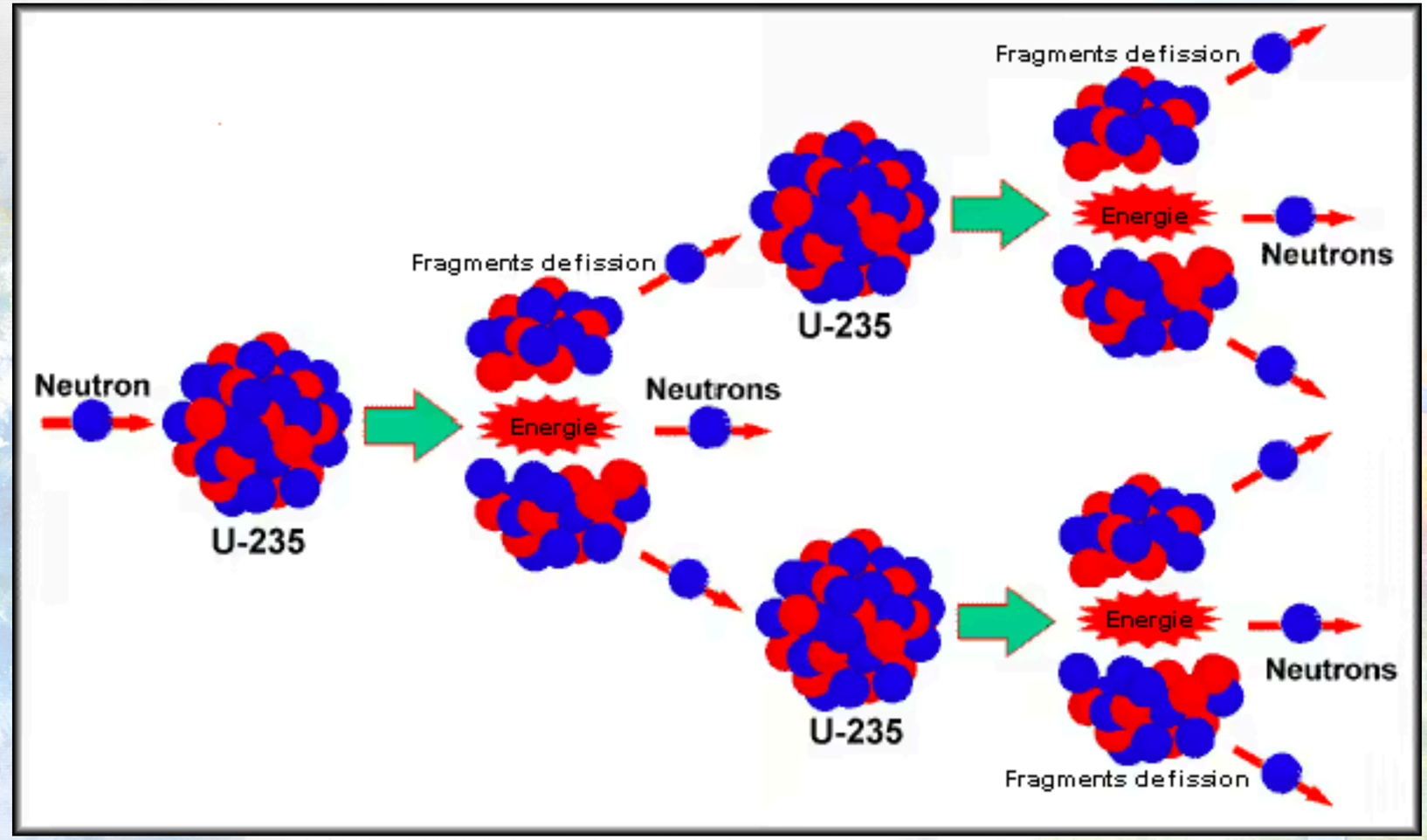
Réaction nucléaire

Circuit primaire

Circuit secondaire

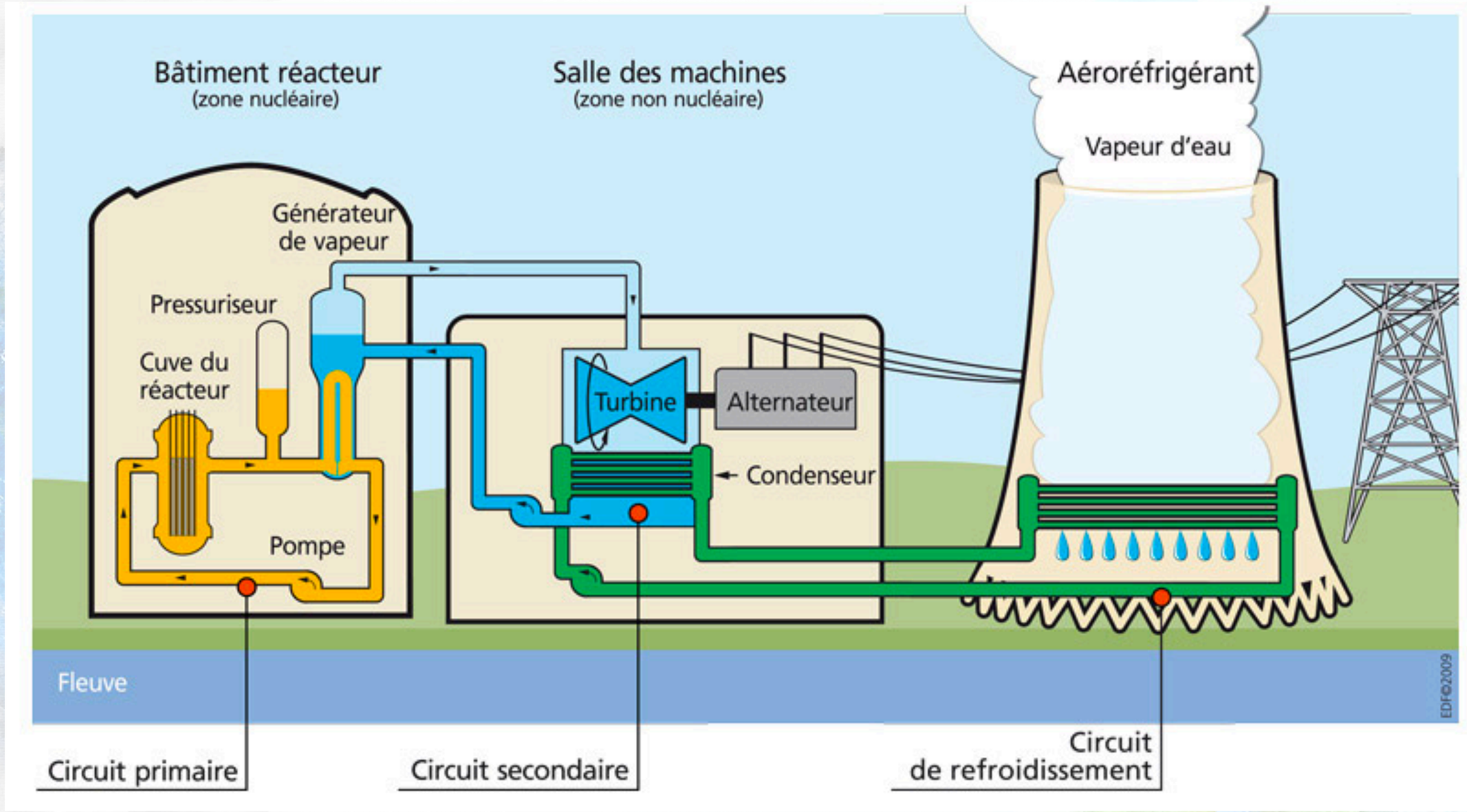


Réaction nucléaire



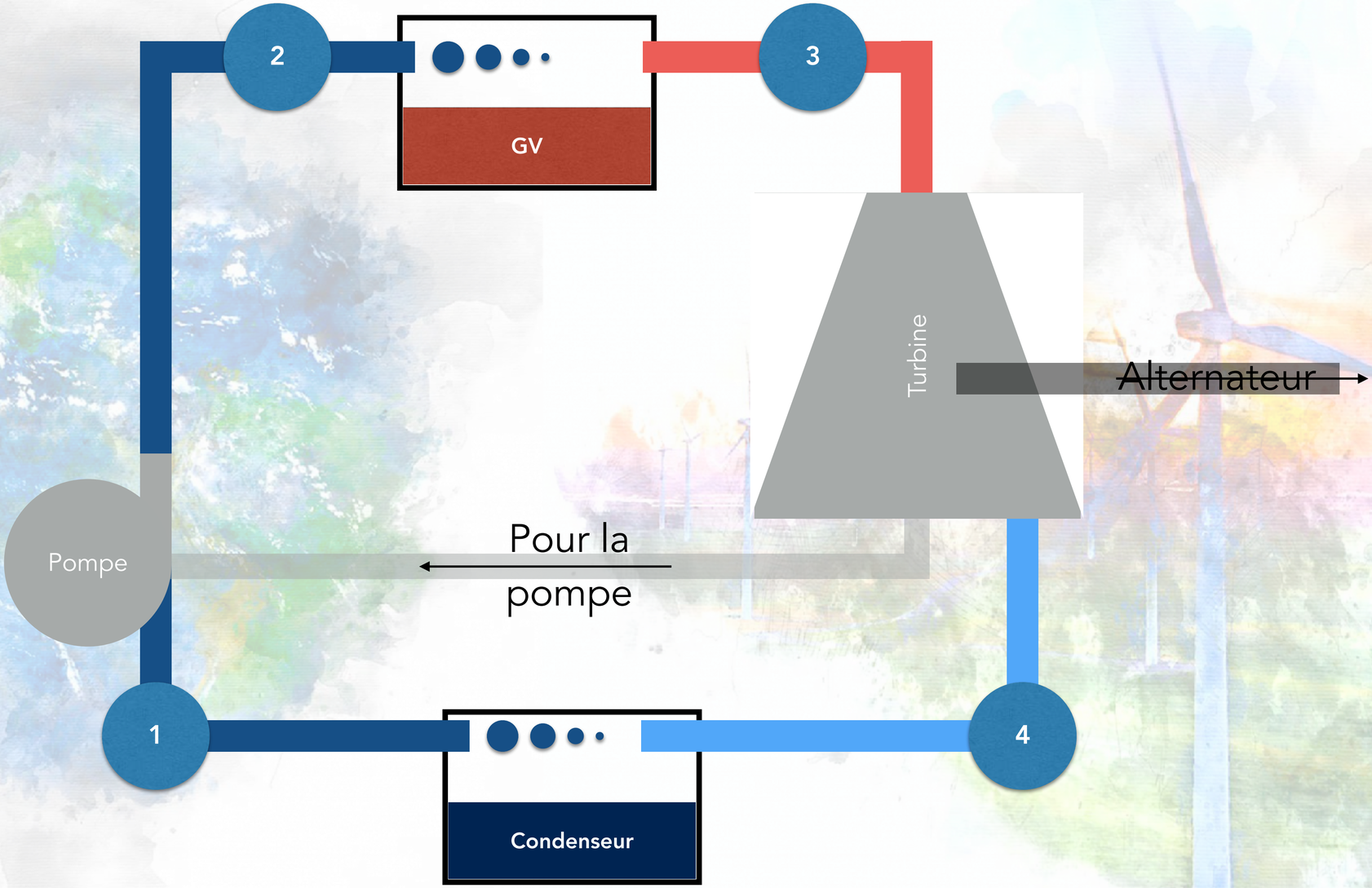
$$E = mc^2$$

Centrale nucléaire



Cycle de Rankine

*L'explication complète sera donnée lors de la cinquième session du cours…**le 11 janvier à 13h30***



Cycle de Rankine

p-T	h [kJ/kg]
1 [bar] - 20 [°C]	42,1
1 [bar] - 50 [°C]	84
1 [bar] - 99,61 [°C]	417,5
1 [bar] - 100 [°C]	2675,8

L'augmentation de température correspond à une augmentation de l'énergie cinétique des molécules

Cycle de Rankine

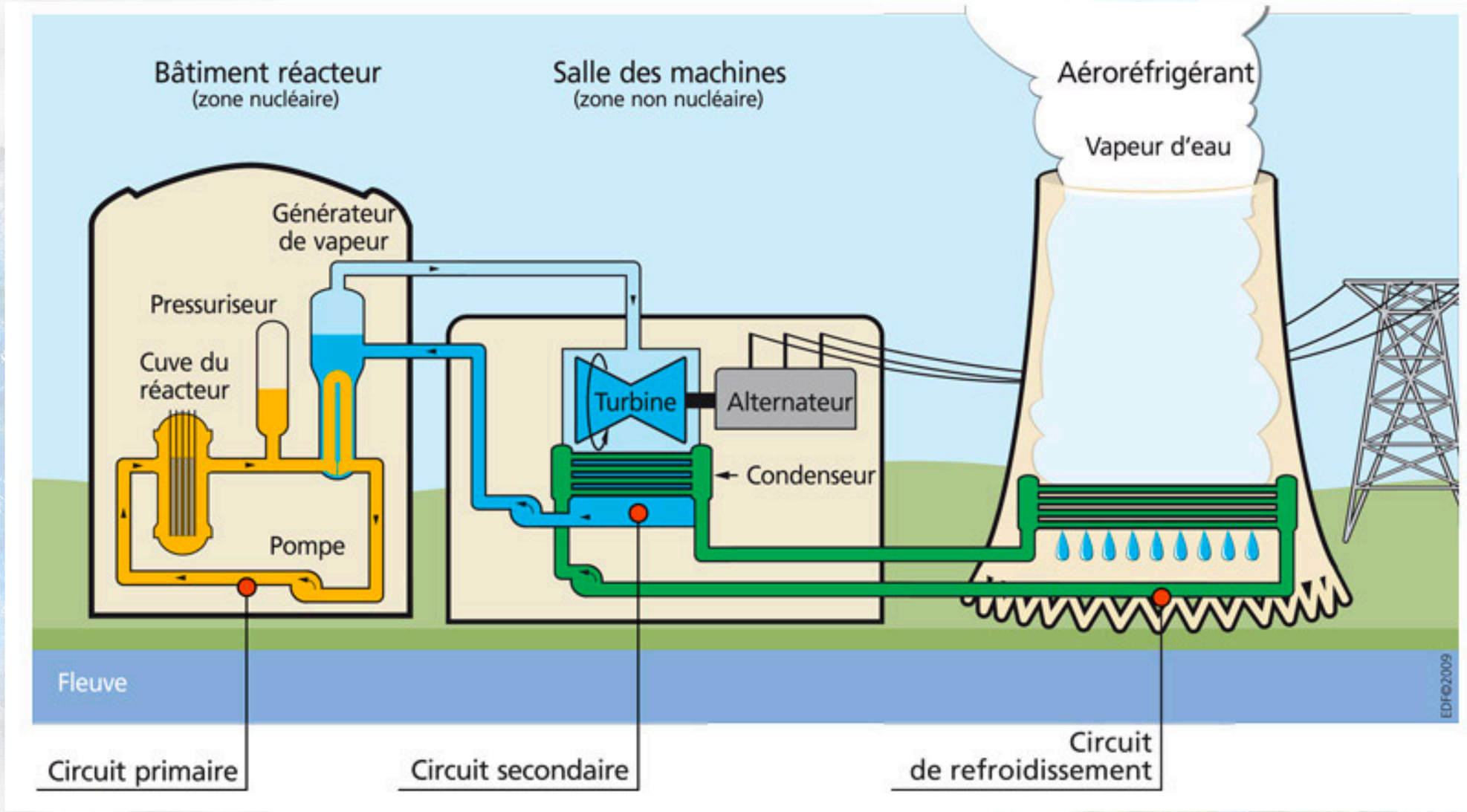
Abaque n°3 : Propriétés de l'eau pure aux points de saturation, triées par pression.

MPa	°C	kJ kg^{-1}			kJ kg^{-1}			kJ K^{-1} kg^{-1}			m^3 kg^{-1}	
p_{sat}	T_{sat}	u_L	u_V	u_{LV}	h_L	h_V	h_{LV}	s_L	s_V	s_{LV}	v_L	v_V
611,657Pa	0,01	[0]				2 500,9	2 500,9	[0]	9,1555	9,1555	0,001	205,991
0,001	6,97	29,3	2 384,5	2 355,2	29,3	2 513,7	2 484,4	0,1059	8,9749	8,869	0,001	129,178
0,002	17,5	73,4	2 398,9	2 325,5	73,4	2 532,9	2 459,4	0,2606	8,7226	8,462	0,001001	66,987
0,003	24,05	100,9	2 407,9	2 307,1	100,9	2 544,8	2 444	0,3539	8,5773	8,2234	0,001003	45,841
0,004	28,96	121,4	2 414,5	2 293,2	121,4	2 553,7	2 432,3	0,4224	8,4734	8,051	0,001004	34,791
0,005	32,87	137,7	2 419,8	2 282	137,8	2 560,7	2 423	0,4762	8,3938	7,9176	0,001005	28,185
0,006	36,16	151,5	2 424,2	2 272,7	151,5	2 566,6	2 415,2	0,5208	8,329	7,8082	0,001006	23,733

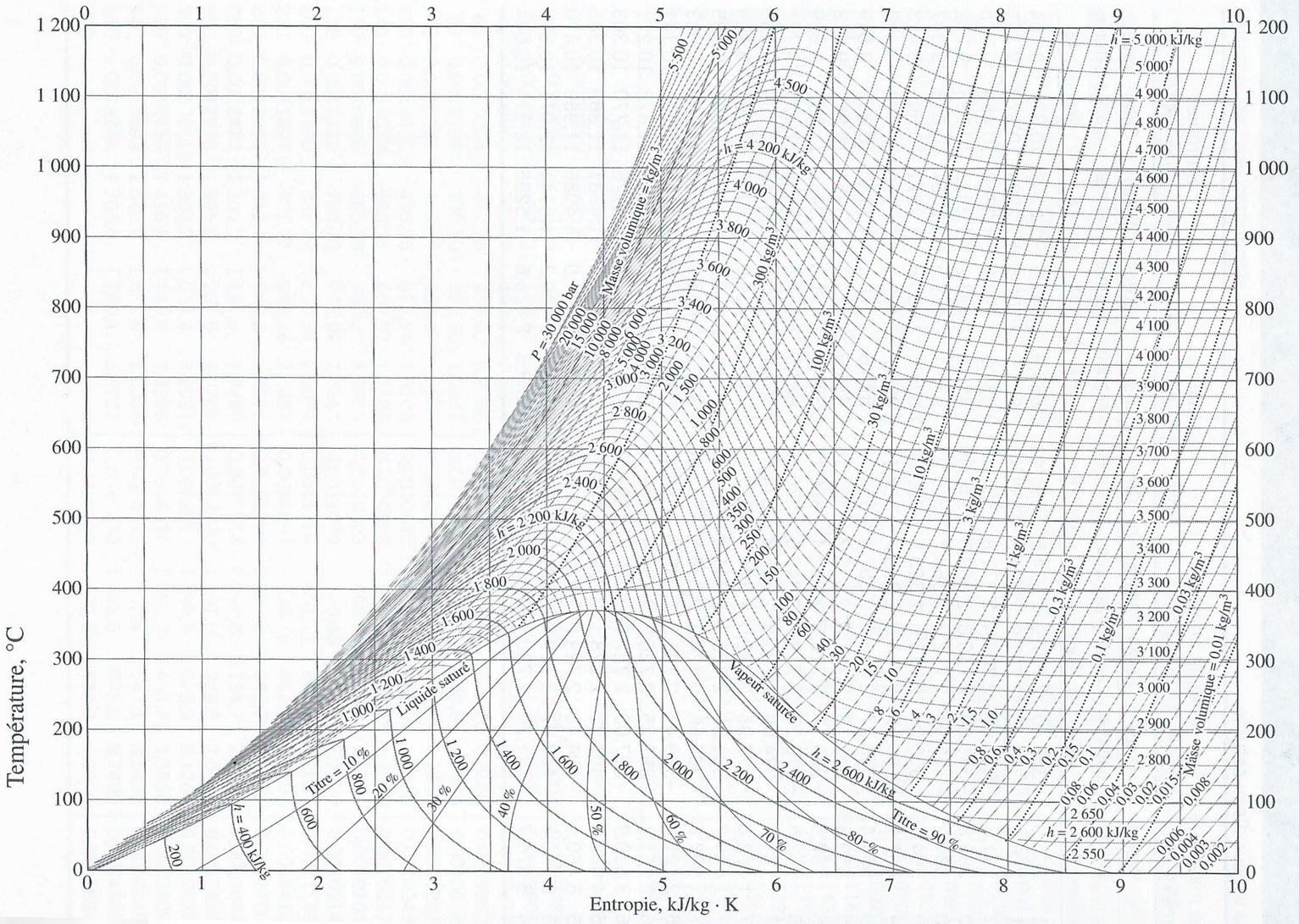
Energie interne **Enthalpie** **Entropie**

L'augmentation de température correspond à une augmentation de l'énergie cinétique des molécules

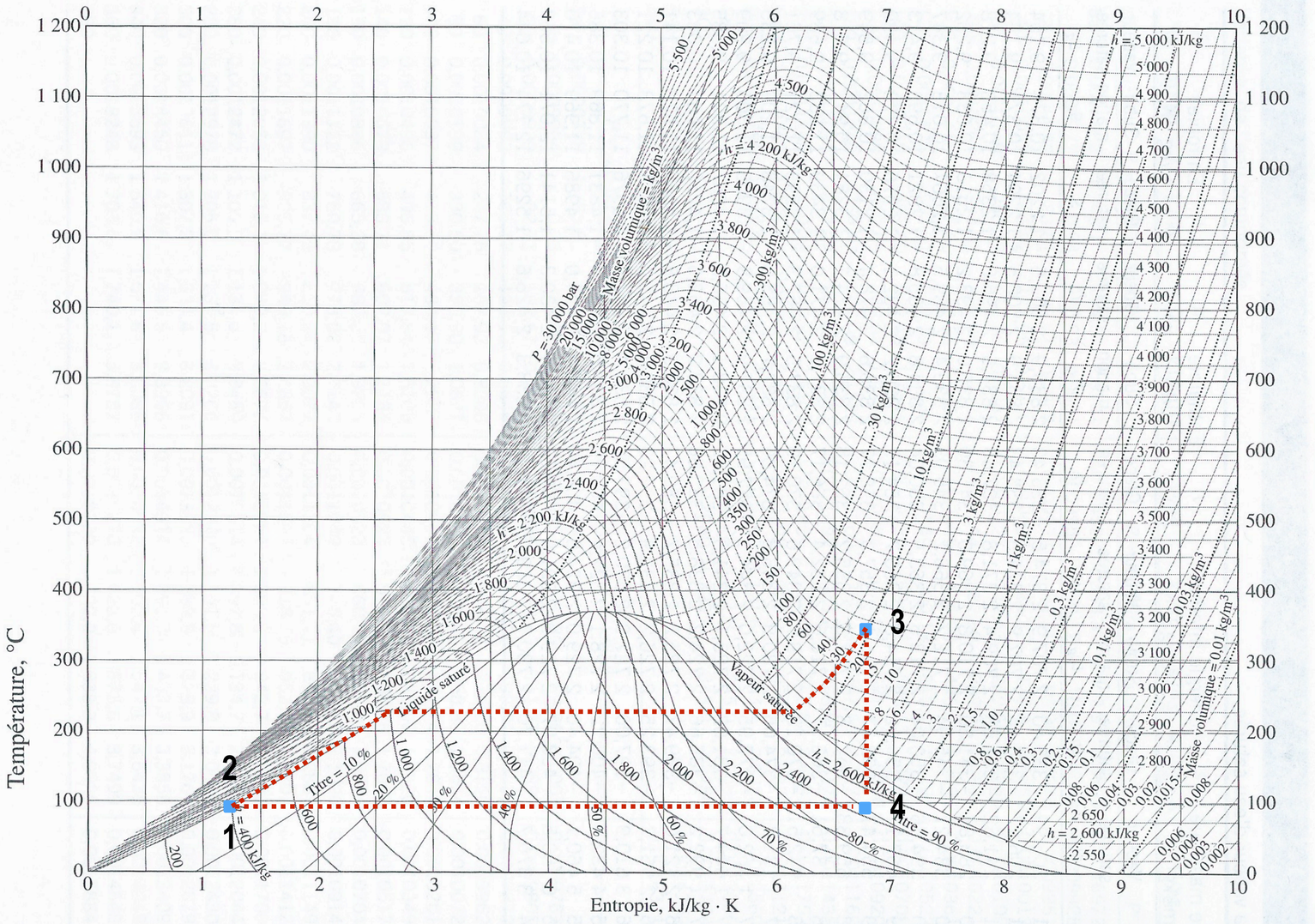
Centrale nucléaire



Cycle de Rankine



Cycle de Rankine



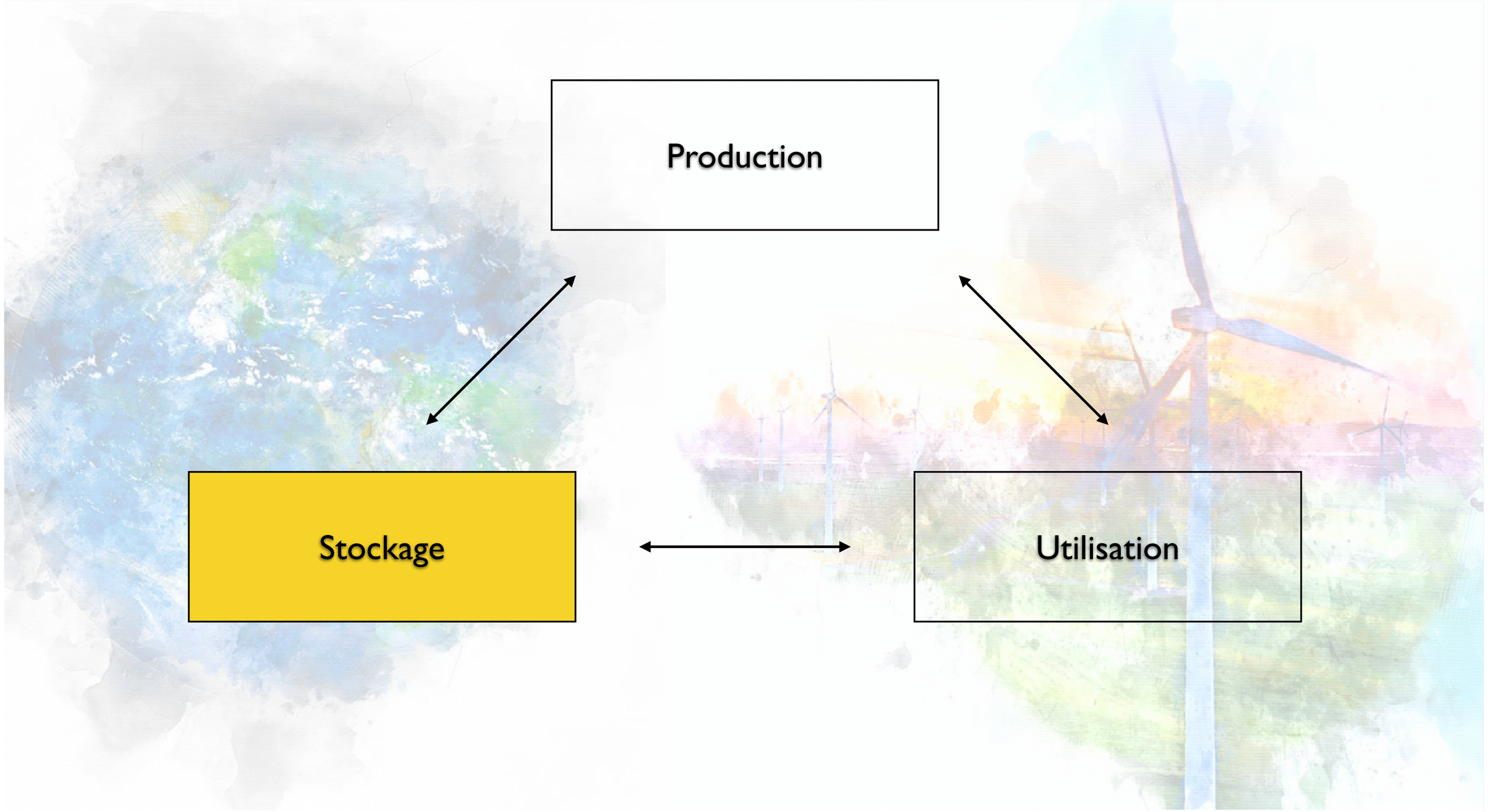
Energie nucléaire

$$\Delta E = \Delta mc^2 \rightarrow \Delta H$$

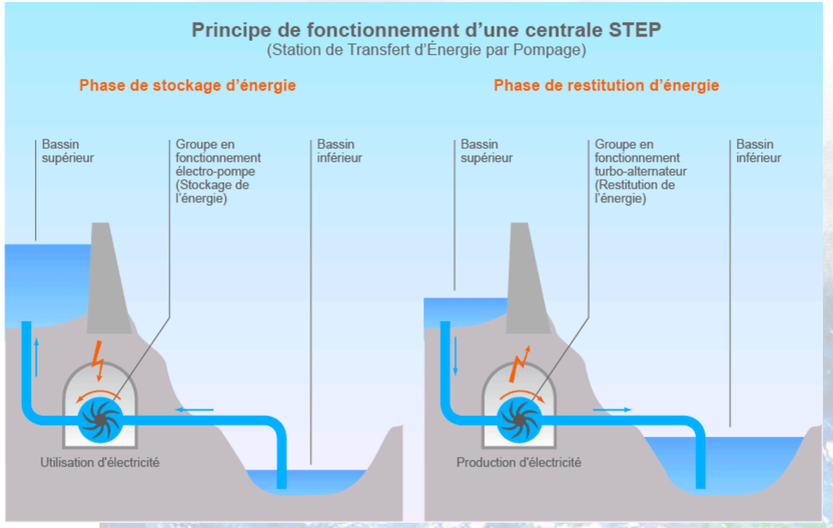
Energie sous forme de variation d'enthalpie d'un fluide caloporteur

Stockage

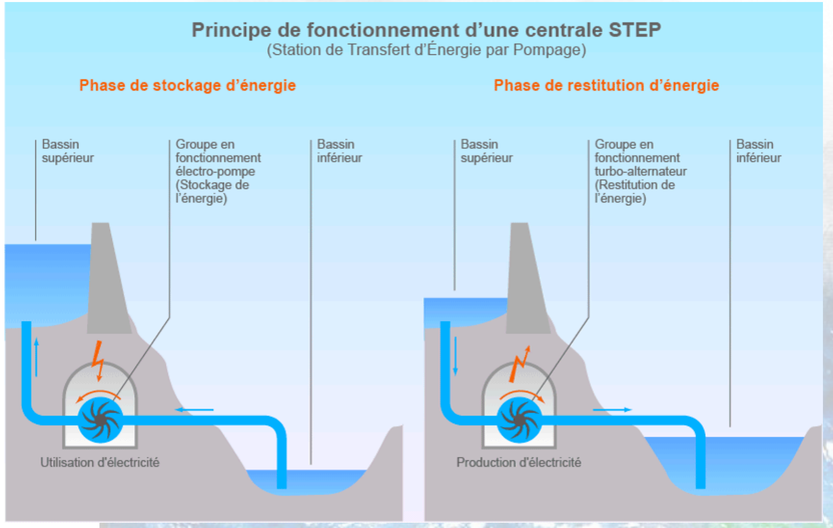
Stockage

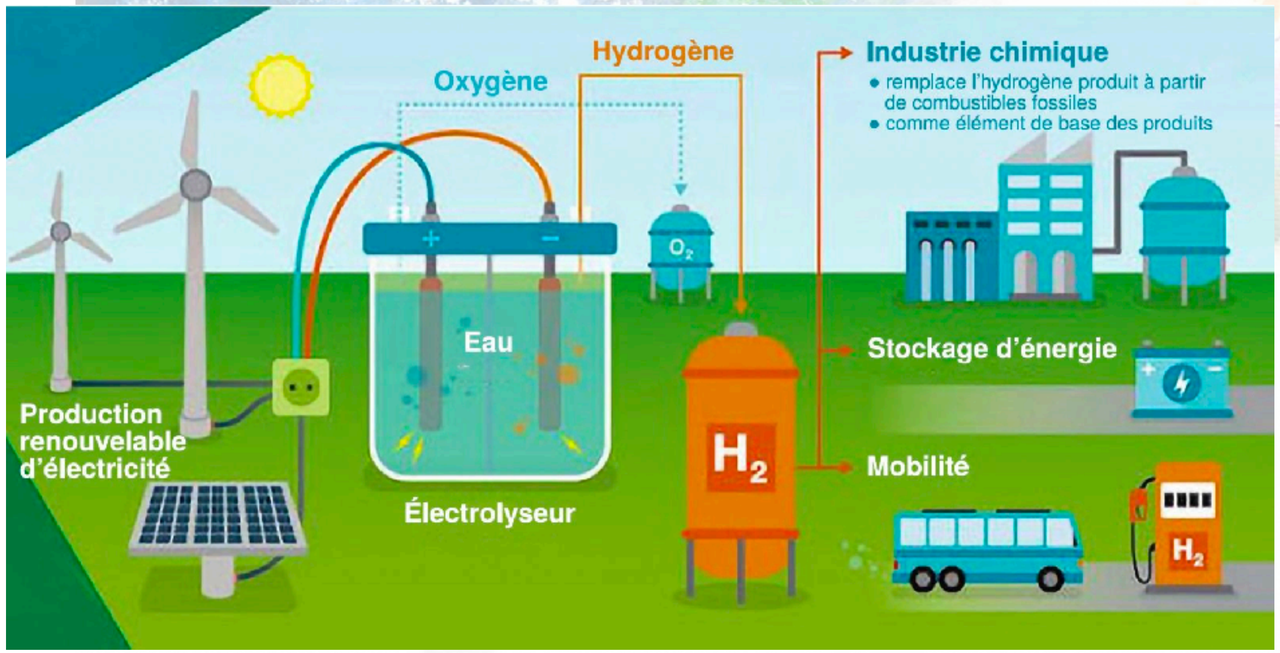


Stockage

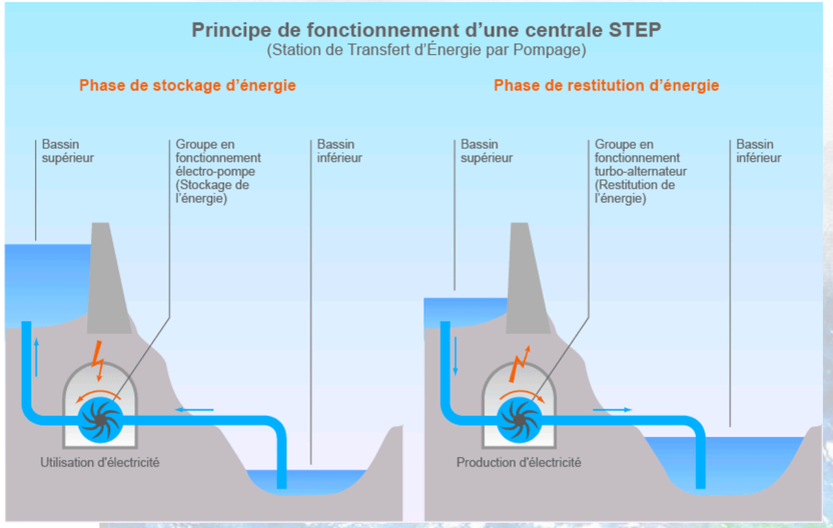

Principe de fonctionnement d'une centrale STEP
(Station de Transfert d'Énergie par Pompage)
Phase de stockage d'énergie
Phase de restitution d'énergie
Bassin supérieur
Groupe en fonctionnement électro-pompe (Stockage de l'énergie)
Bassin inférieur
Utilisation d'électricité
Bassin supérieur
Groupe en fonctionnement turbo-alternateur (Restitution de l'énergie)
Bassin inférieur
Production d'électricité

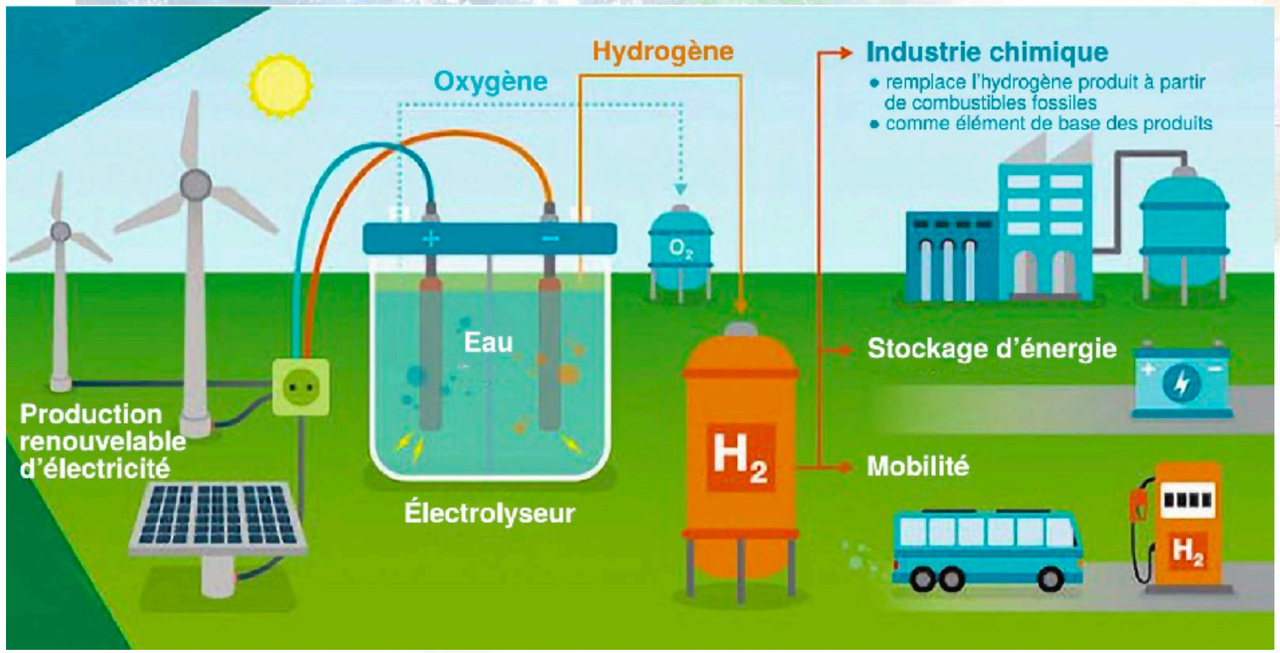
Stockage


Principe de fonctionnement d'une centrale STEP
(Station de Transfert d'Énergie par Pompage)
Phase de stockage d'énergie
Phase de restitution d'énergie
Bassin supérieur
Groupe en fonctionnement électro-pompe (Stockage de l'énergie)
Bassin inférieur
Utilisation d'électricité
Bassin supérieur
Groupe en fonctionnement turbo-alternateur (Restitution de l'énergie)
Bassin inférieur
Production d'électricité


Hydrogène
Oxygène
Industrie chimique
• remplace l'hydrogène produit à partir de combustibles fossiles
• comme élément de base des produits
Eau
Production renouvelable d'électricité
Électrolyseur
Stockage d'énergie
Mobilité

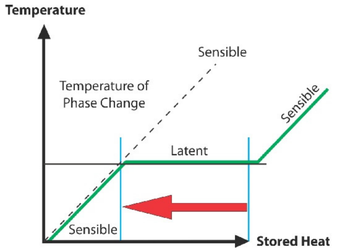
Stockage





PCMs: features

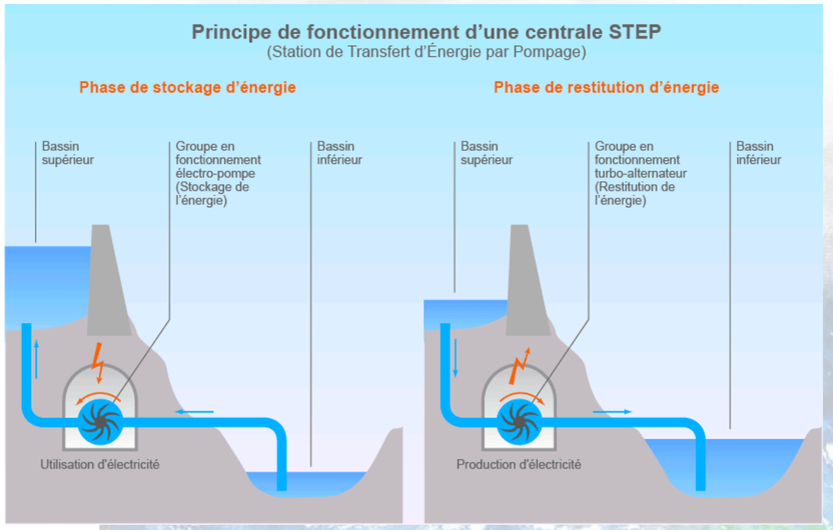
- Phase Change Materials exploit the Latent Heat of the solid/liquid phase transition to store or release a large amount of heat barely changing the temperature
- Example: melting $1\,kg$ *ice* at 0° : $\Delta H = 333\,k\,J$.
  Same energy to heat $1\,kg$ *water* from 0° to 80°
- Hundredths known: organic (paraffins, non-paraffins), inorganic (salt hydrates, metallics), eutectics
  - Paraffin waxes: stable with melting points within room temperatures

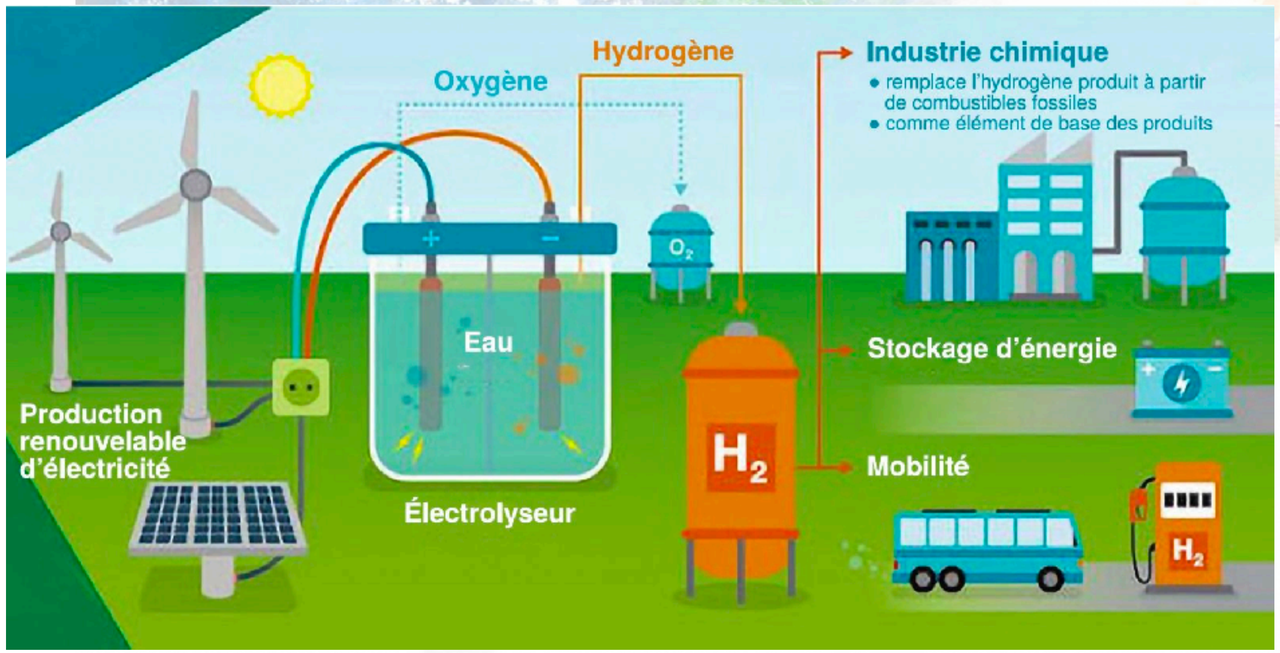


Heat transfer performance and dynamics of Phase Change Materias

S Madruga, Heat transfer performance of a phase change material, EMEASED conference, Madrid, June 15-16 (2017)

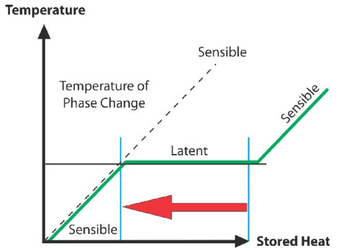
Stockage





PCMs: features

- Phase Change Materials exploit the Latent Heat of the solid/liquid phase transition to store or release a large amount of heat barely changing the temperature
- Example: melting $1\,kg$ *ice* at 0° : $\Delta H = 333k\,J$.
  Same energy to heat $1\,kg$ *water* from 0° to 80°
- Hundredths known: organic (paraffins, non-paraffins), inorganic (salt hydrates, metallics), eutectics
  - Paraffin waxes: stable with melting points within room temperatures



Heat transfer performance and dynamics of Phase Change Materias

S Madruga, Heat transfer performance of a phase change material, EMEASED conference, Madrid, June 15-16 (2017)

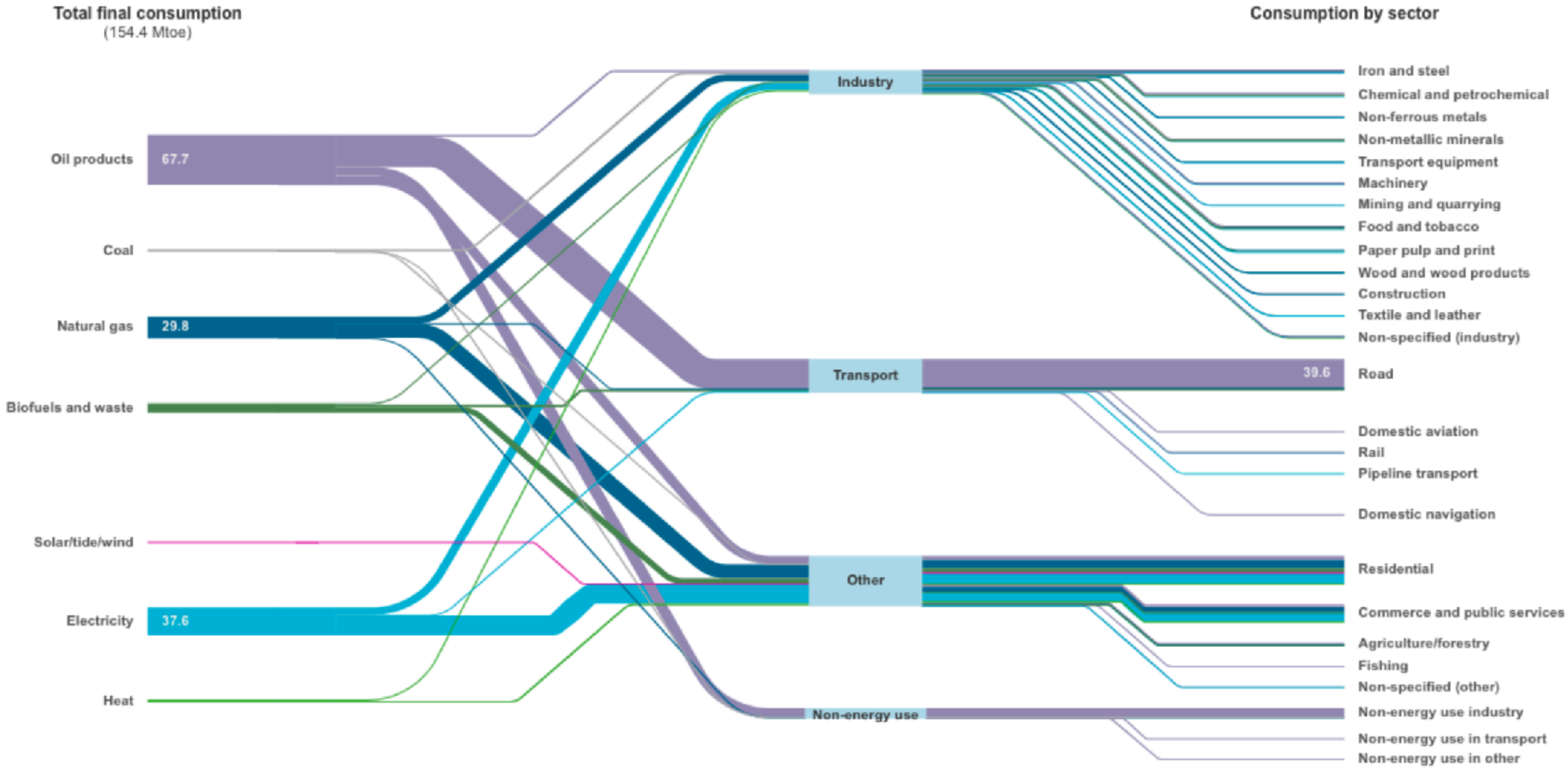
Utilisations

Utilisations de l'énergie

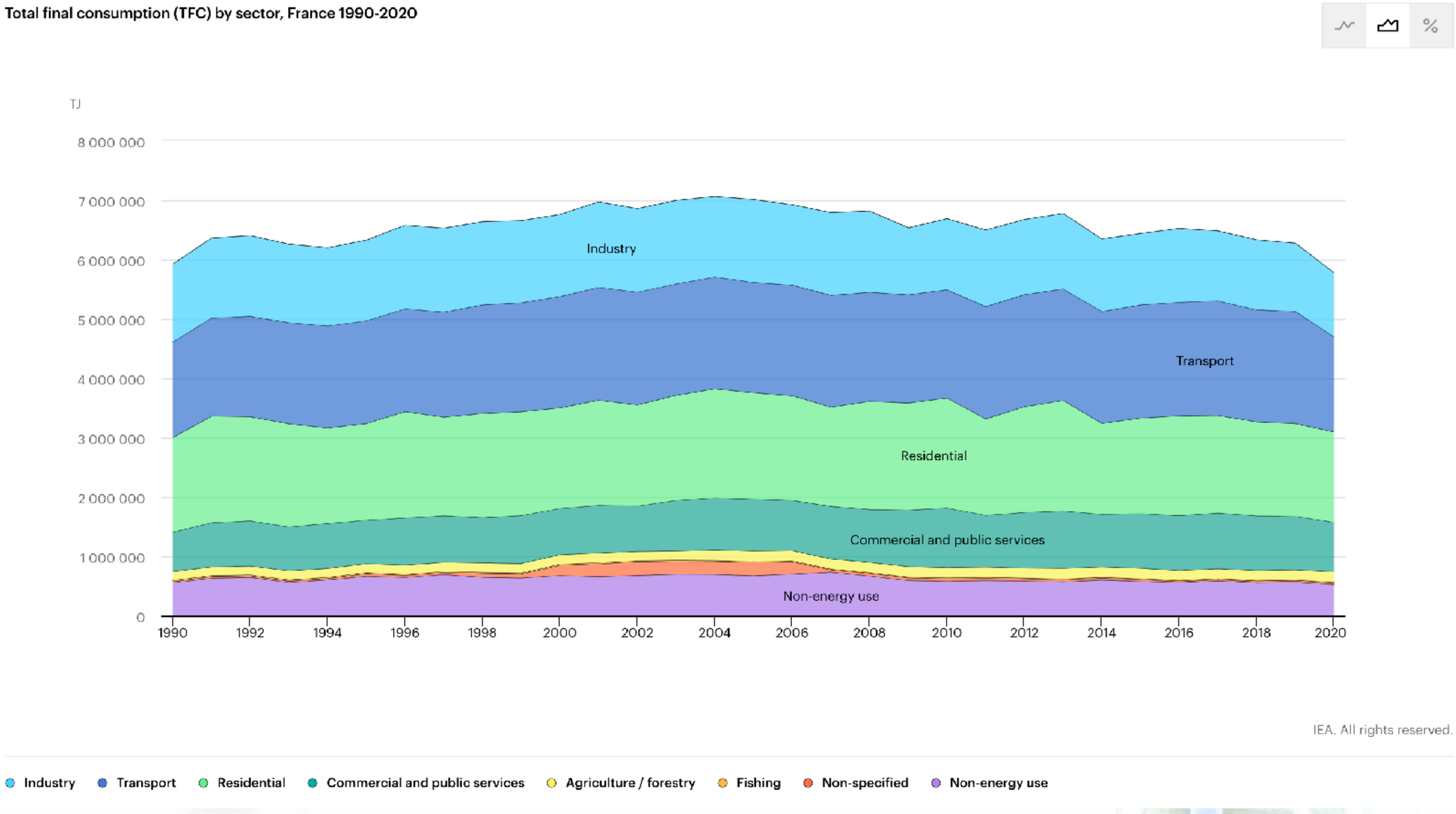
France

FINAL CONSUMPTION (2017)

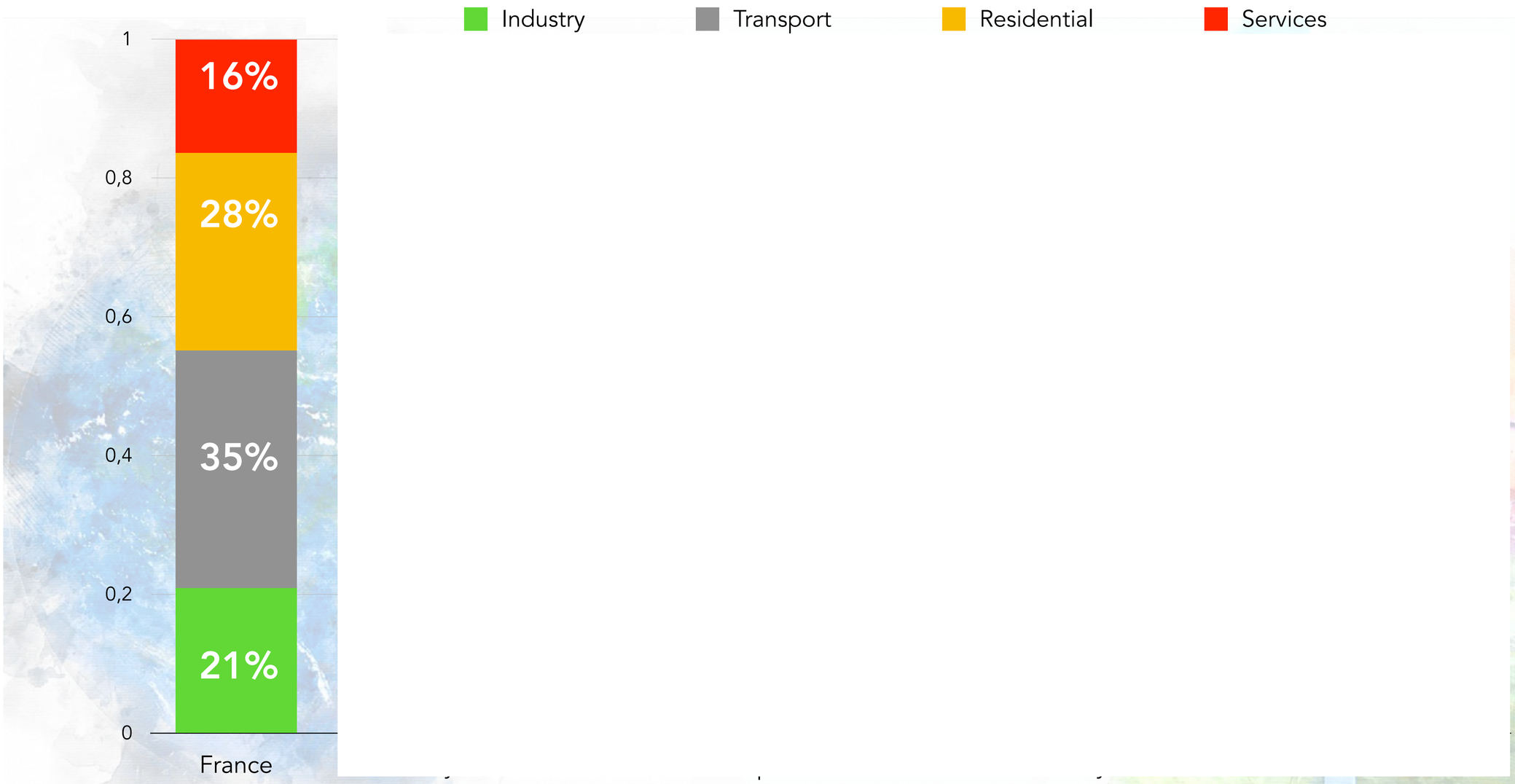
Millions of tonnes of oil equivalent



Quelques éléments d'analyse de l'utilisation énergétique

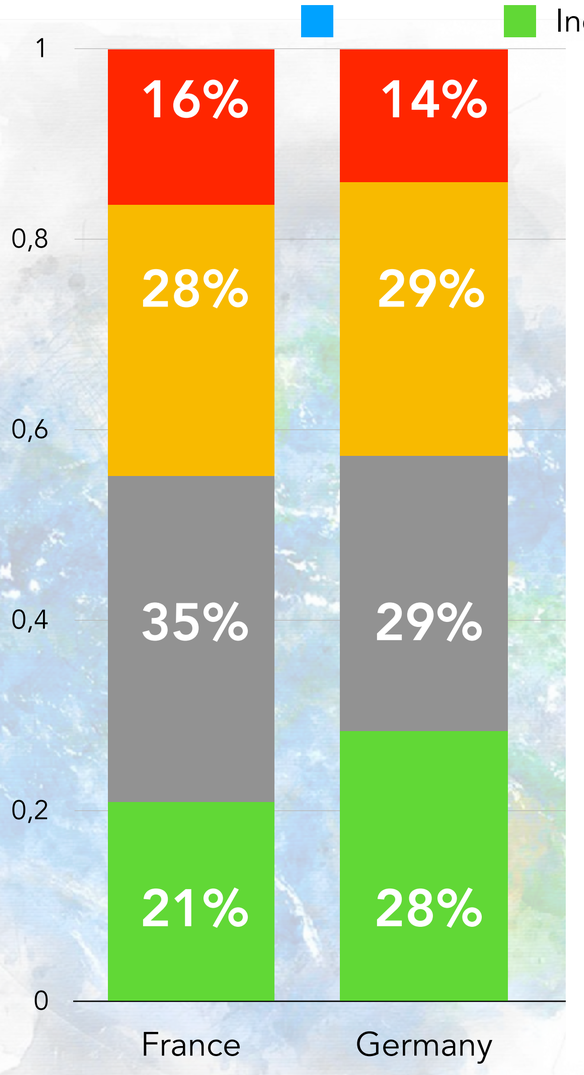


Quelques éléments d'analyse de l'utilisation énergétique



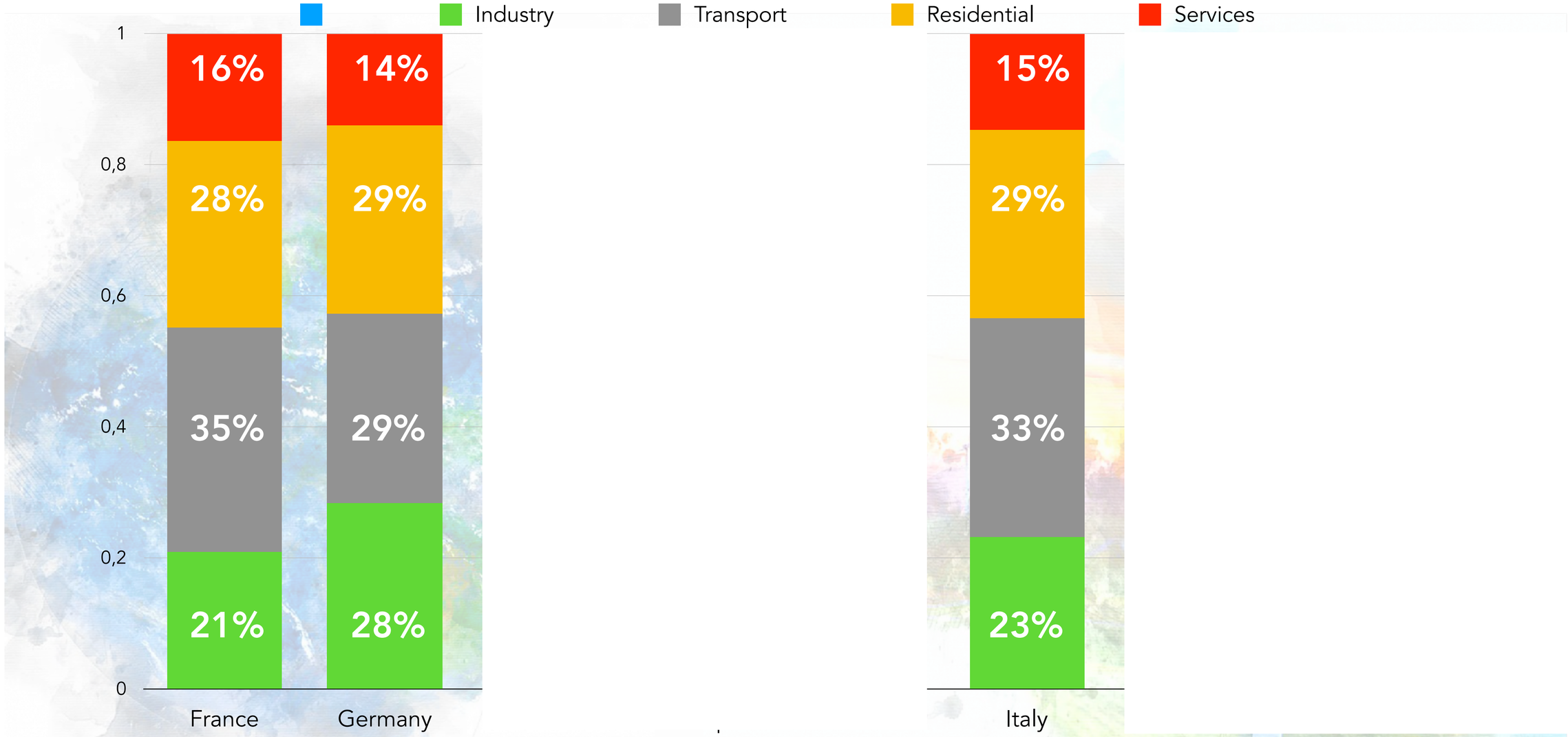
D'après www.iea.org pour l'année 2019

Quelques éléments d'analyse de l'utilisation énergétique



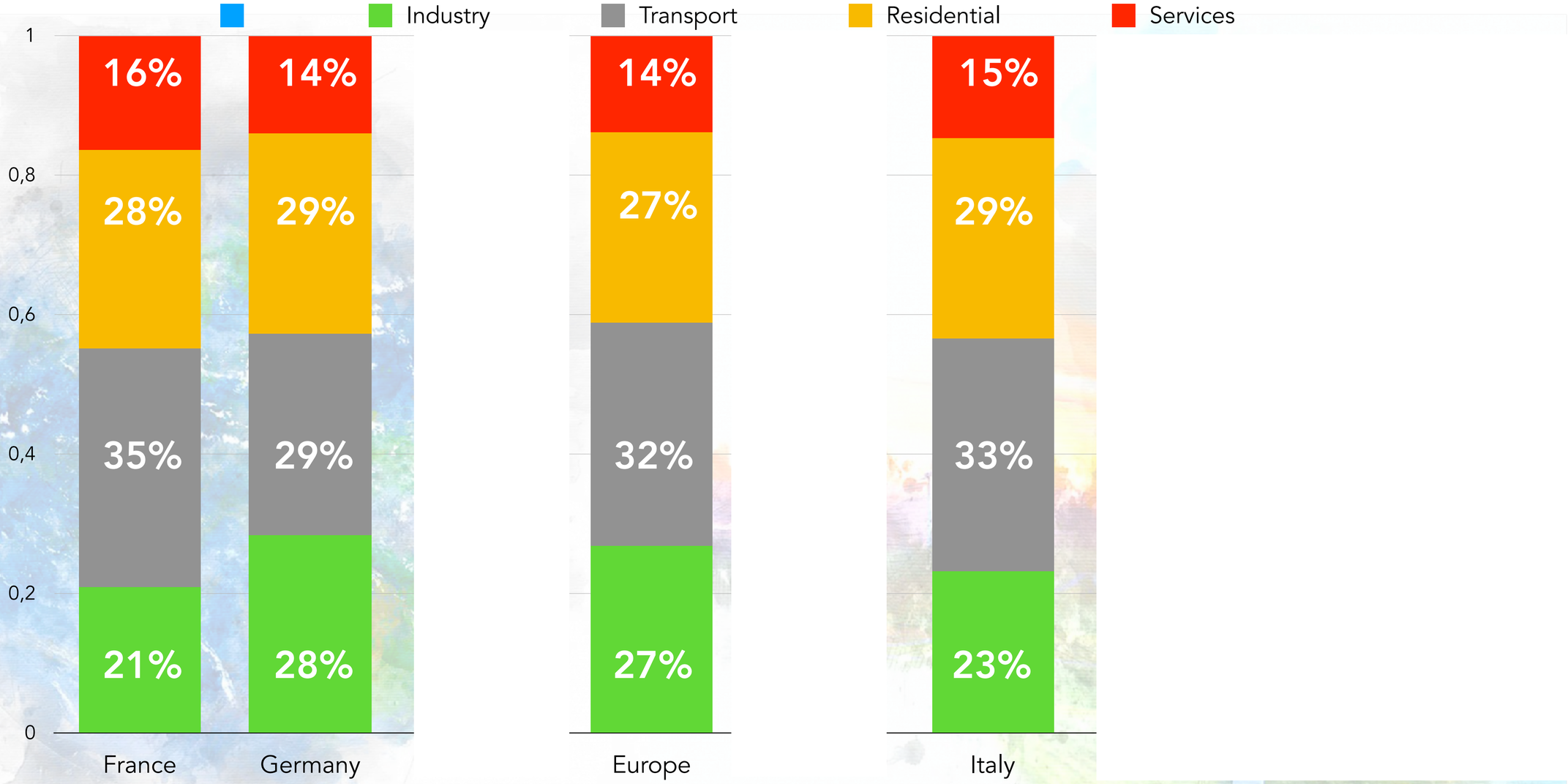
D'après www.iea.org pour l'année 2019

Quelques éléments d'analyse de l'utilisation énergétique



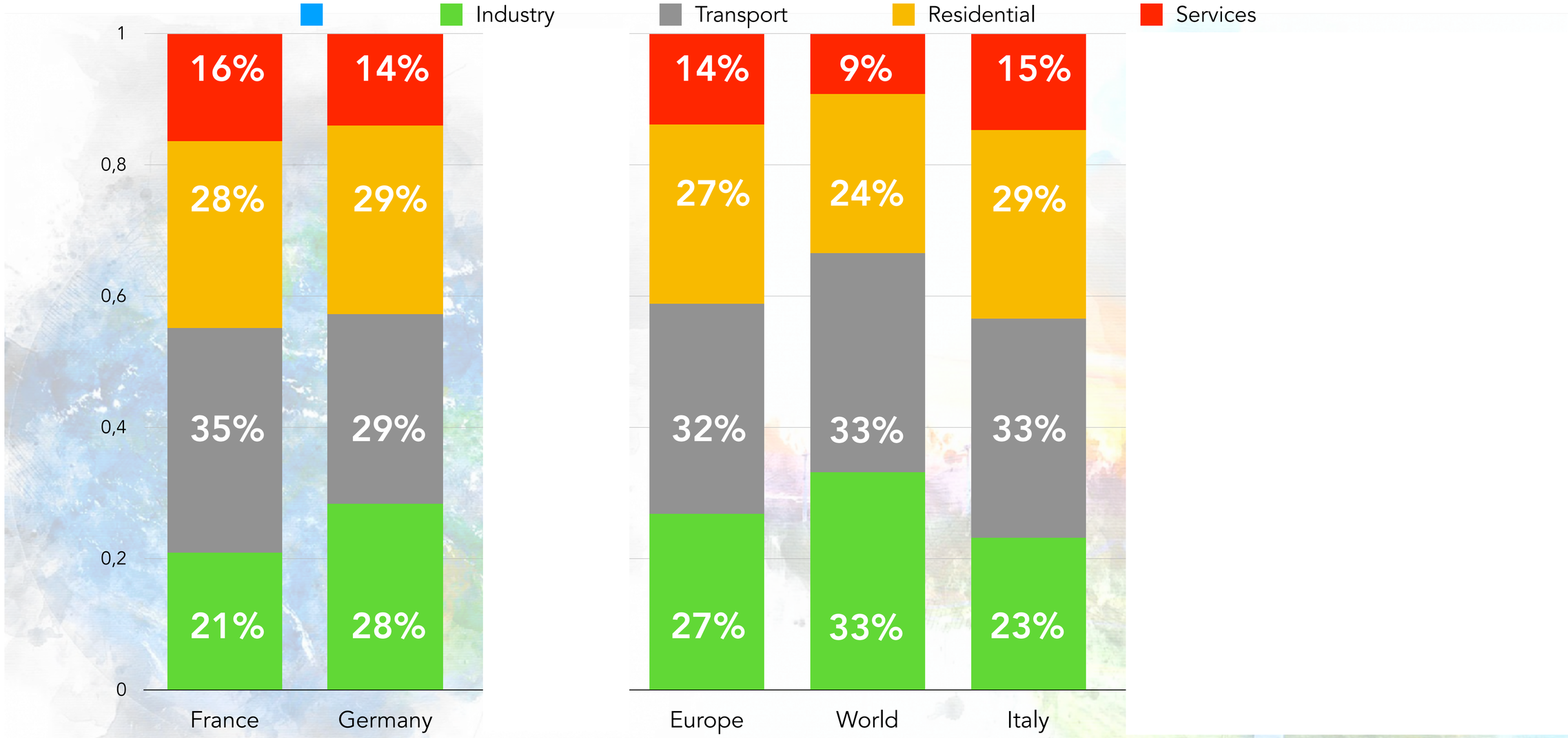
D'après www.iea.org pour l'année 2019

Quelques éléments d'analyse de l'utilisation énergétique



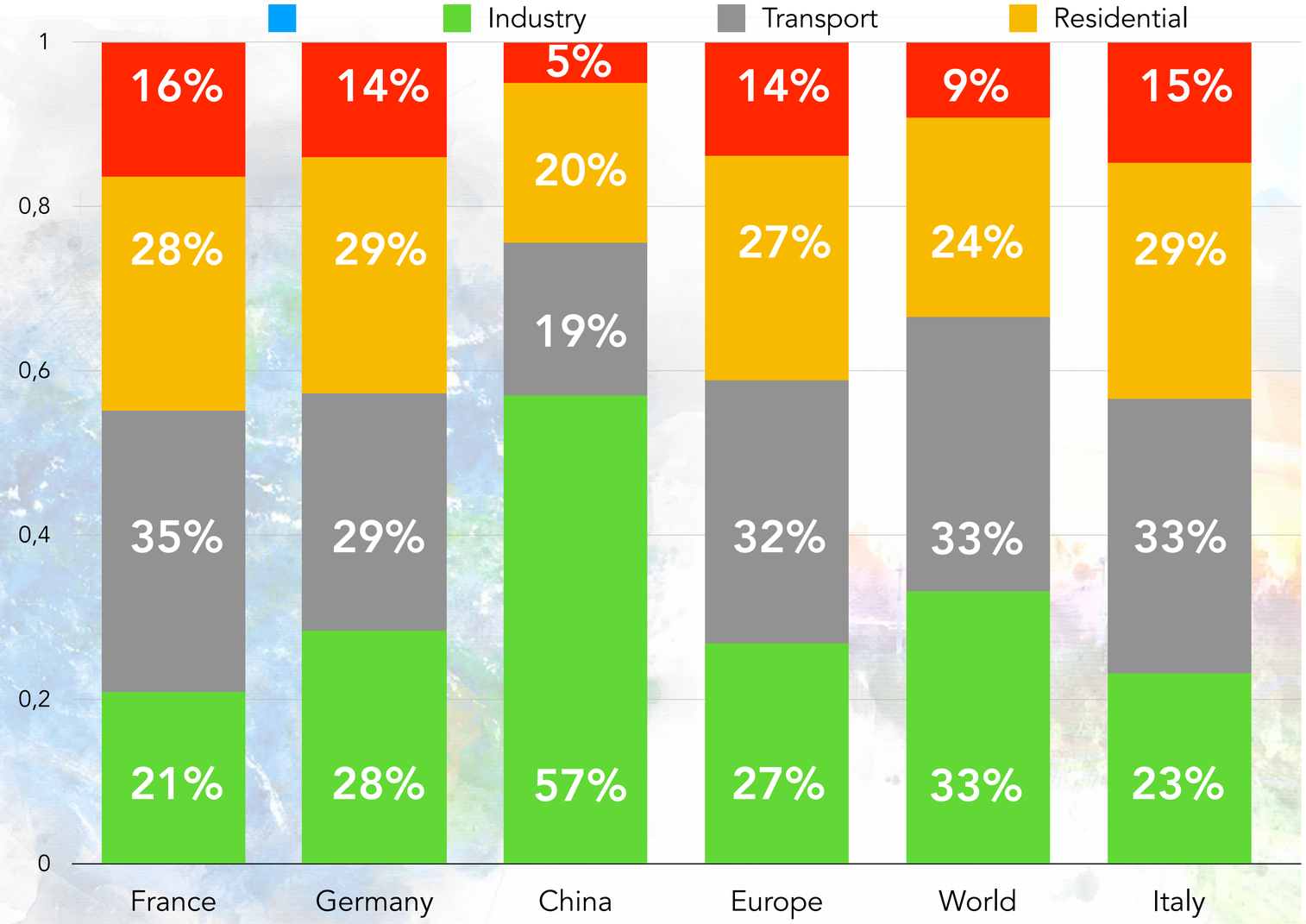
D'après www.iea.org pour l'année 2019

Quelques éléments d'analyse de l'utilisation énergétique



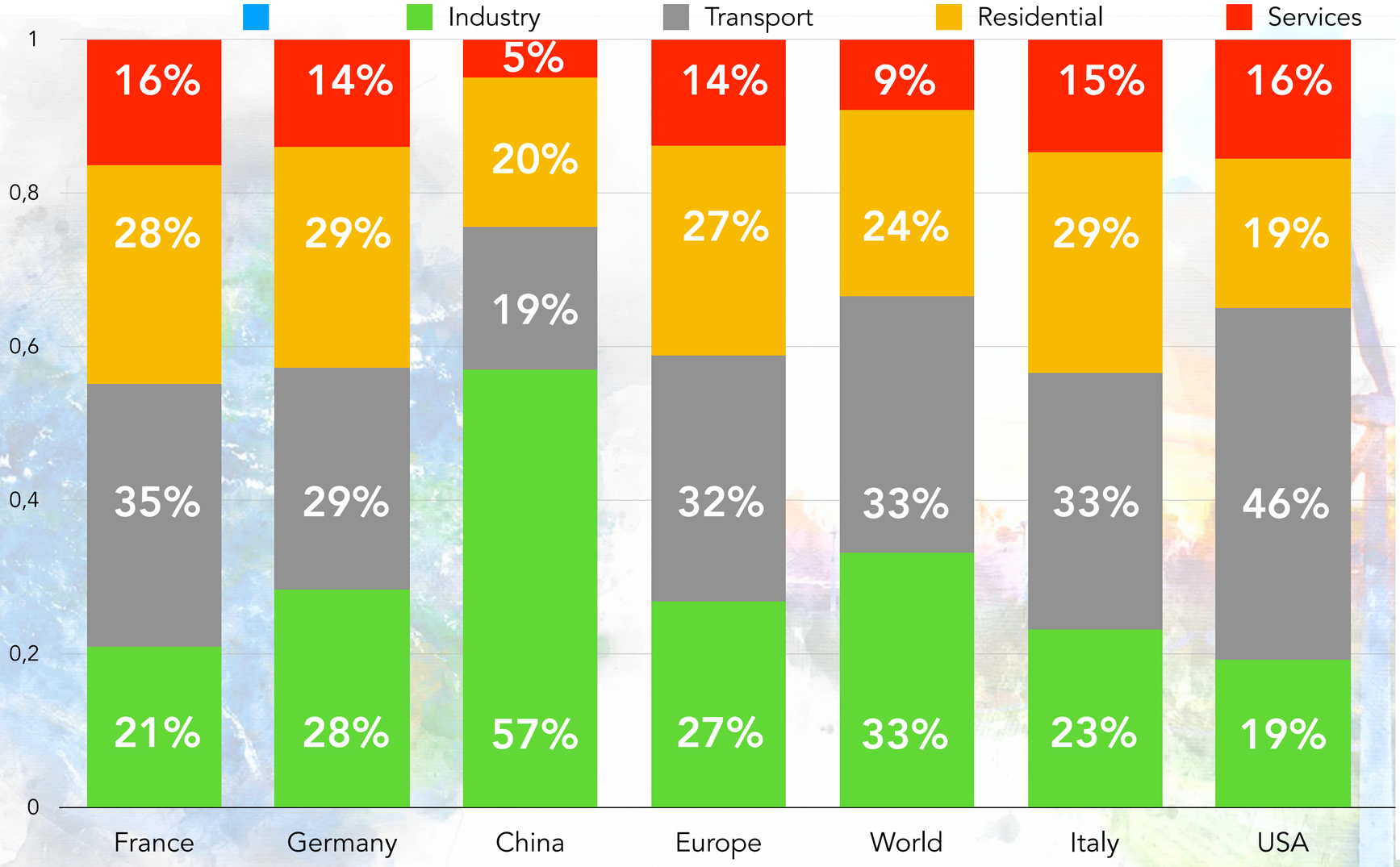
D'après www.iea.org pour l'année 2019

Quelques éléments d'analyse de l'utilisation énergétique



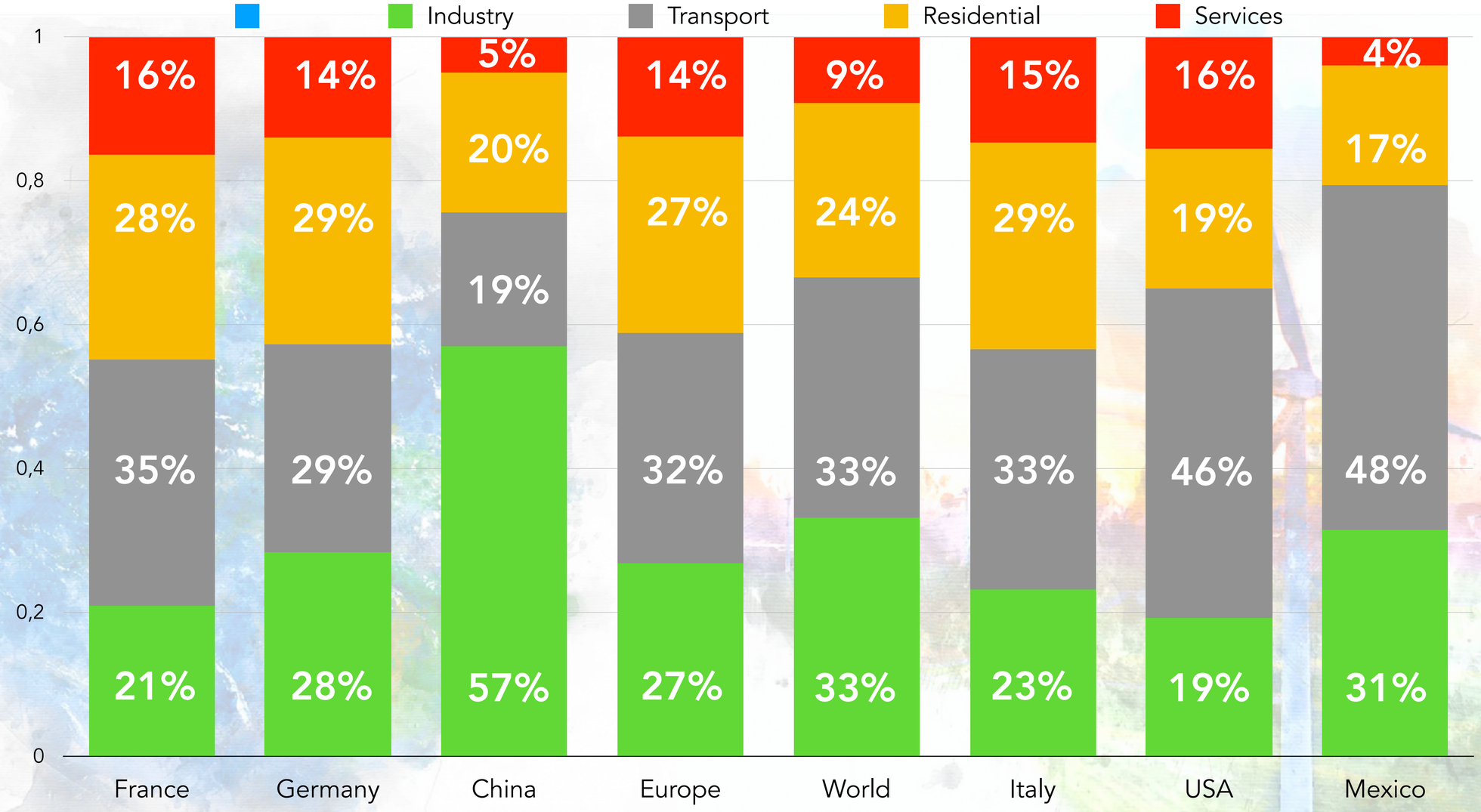
D'après www.iea.org pour l'année 2019

Quelques éléments d'analyse de l'utilisation énergétique



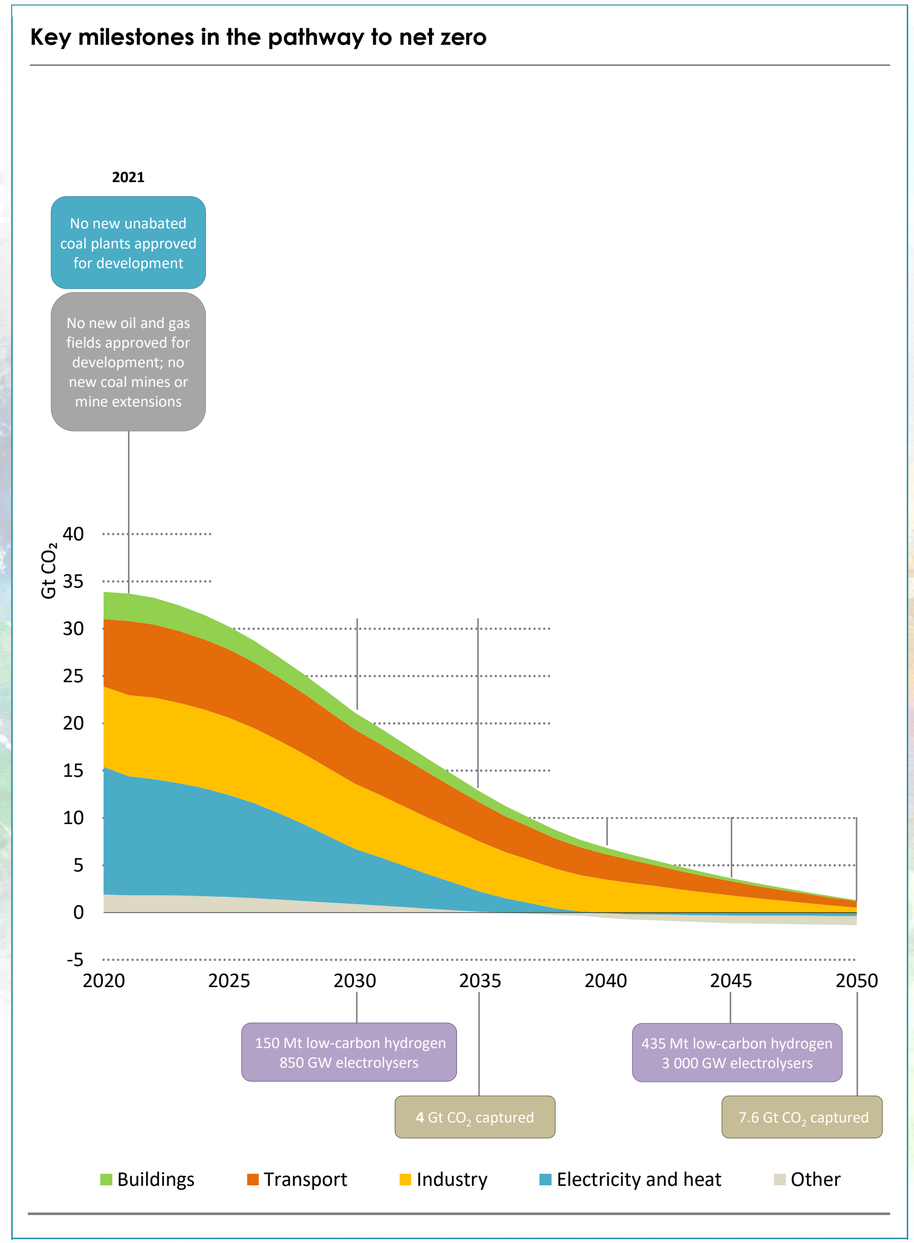
D'après www.iea.org pour l'année 2019

Quelques éléments d'analyse de l'utilisation énergétique



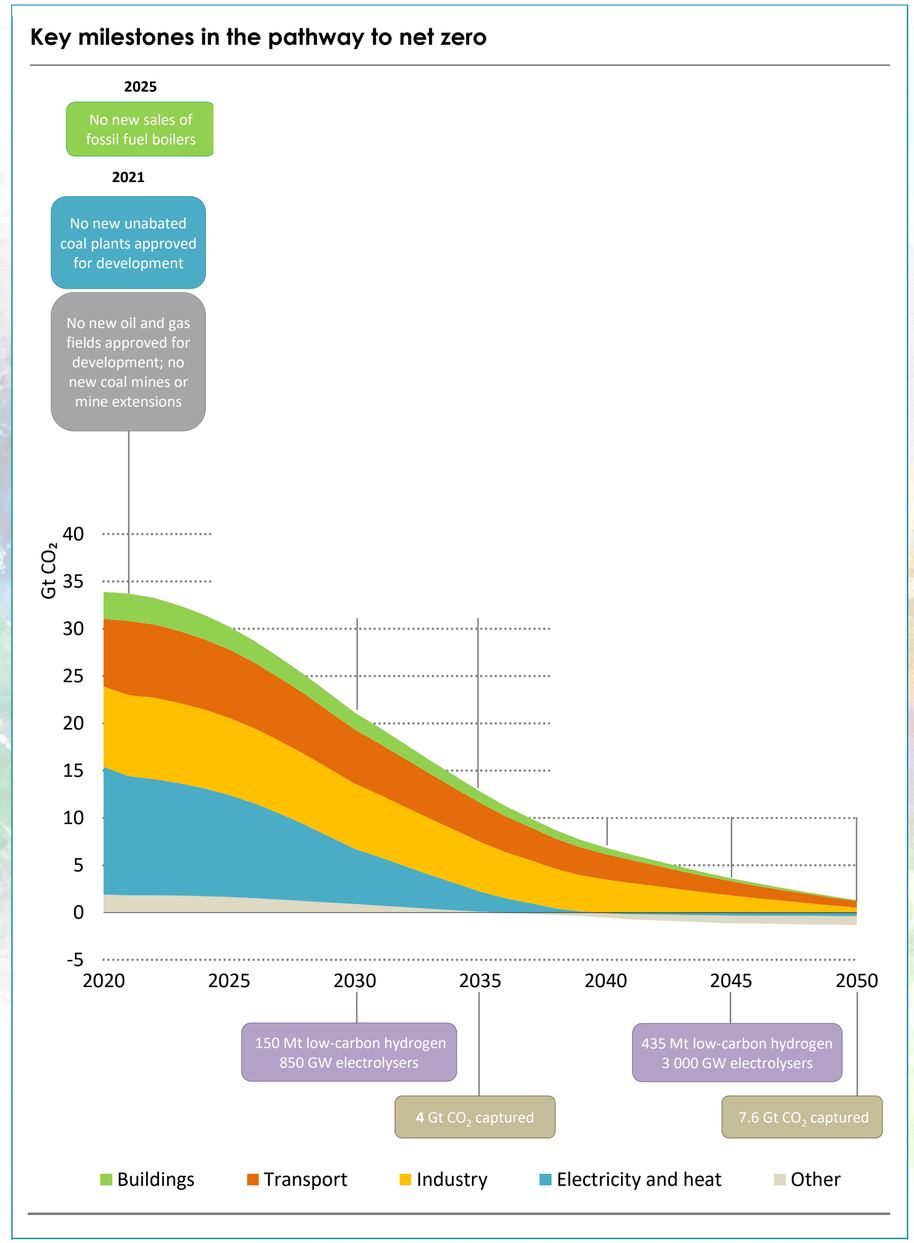
D'après www.iea.org pour l'année 2019

Quelques éléments d'analyse de l'utilisation énergétique



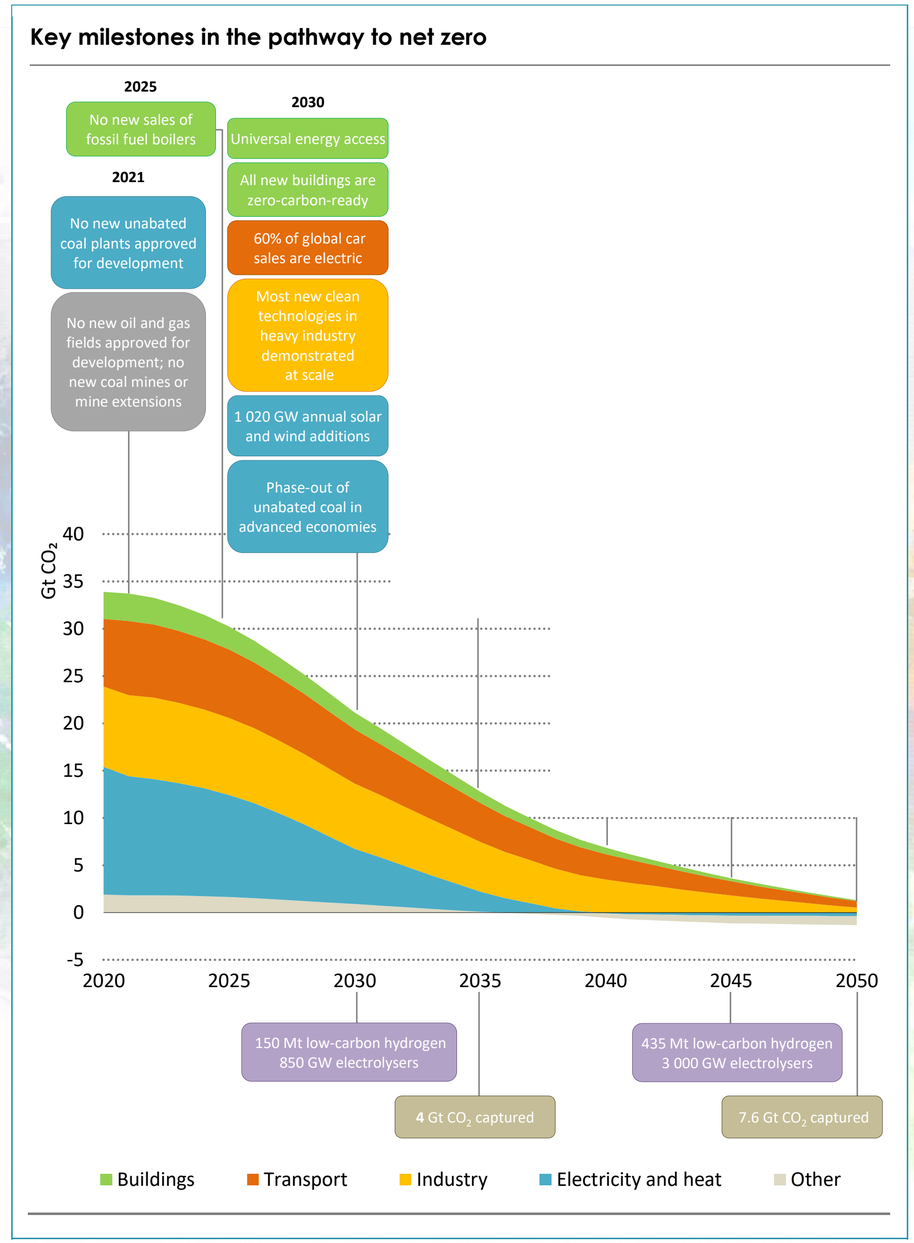
D'après Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector www.iea.org (*octobre 2021*)

Quelques éléments d'analyse de l'utilisation énergétique



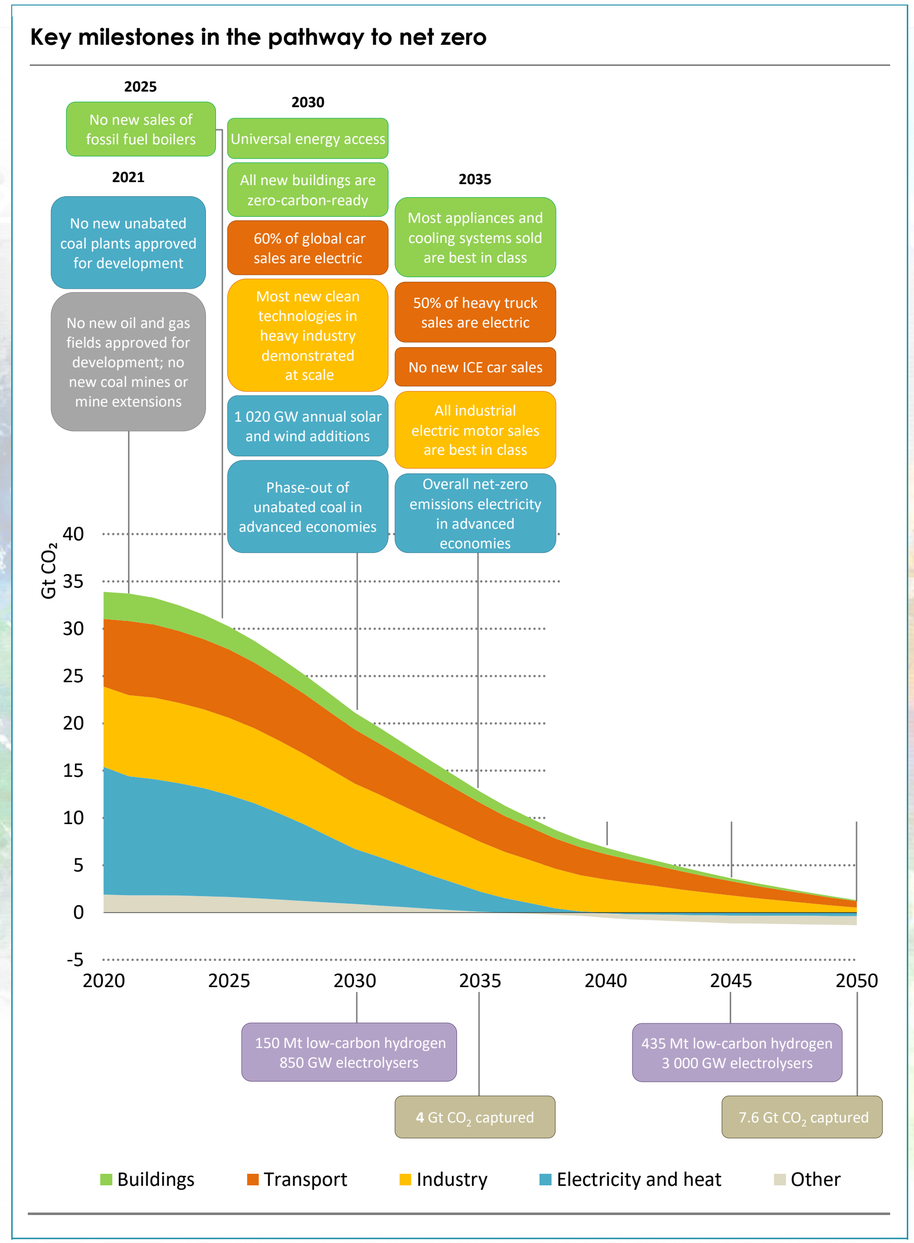
D'après Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector www.iea.org (*octobre 2021*)

Quelques éléments d'analyse de l'utilisation énergétique



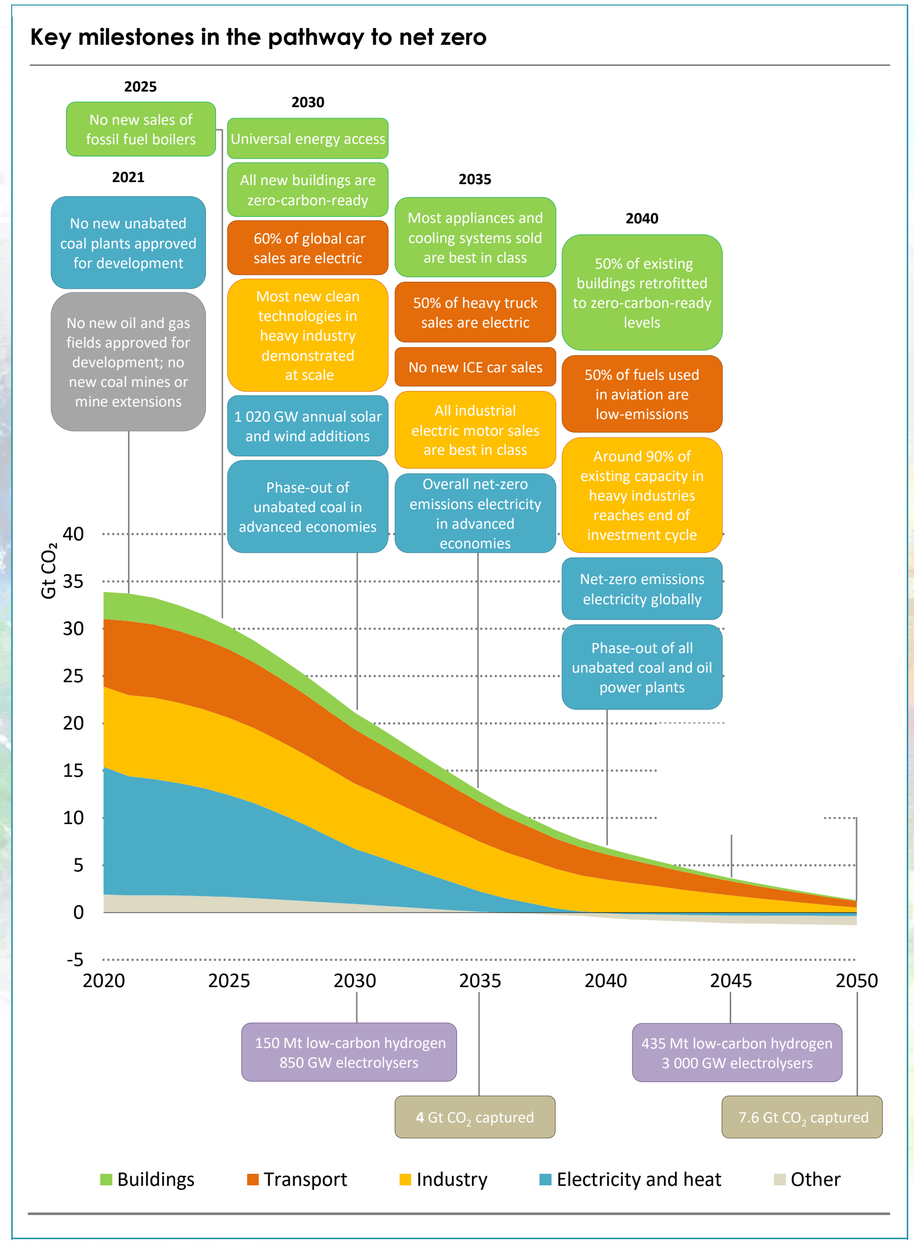
D'après Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector www.iea.org (*octobre 2021*)

Quelques éléments d'analyse de l'utilisation énergétique



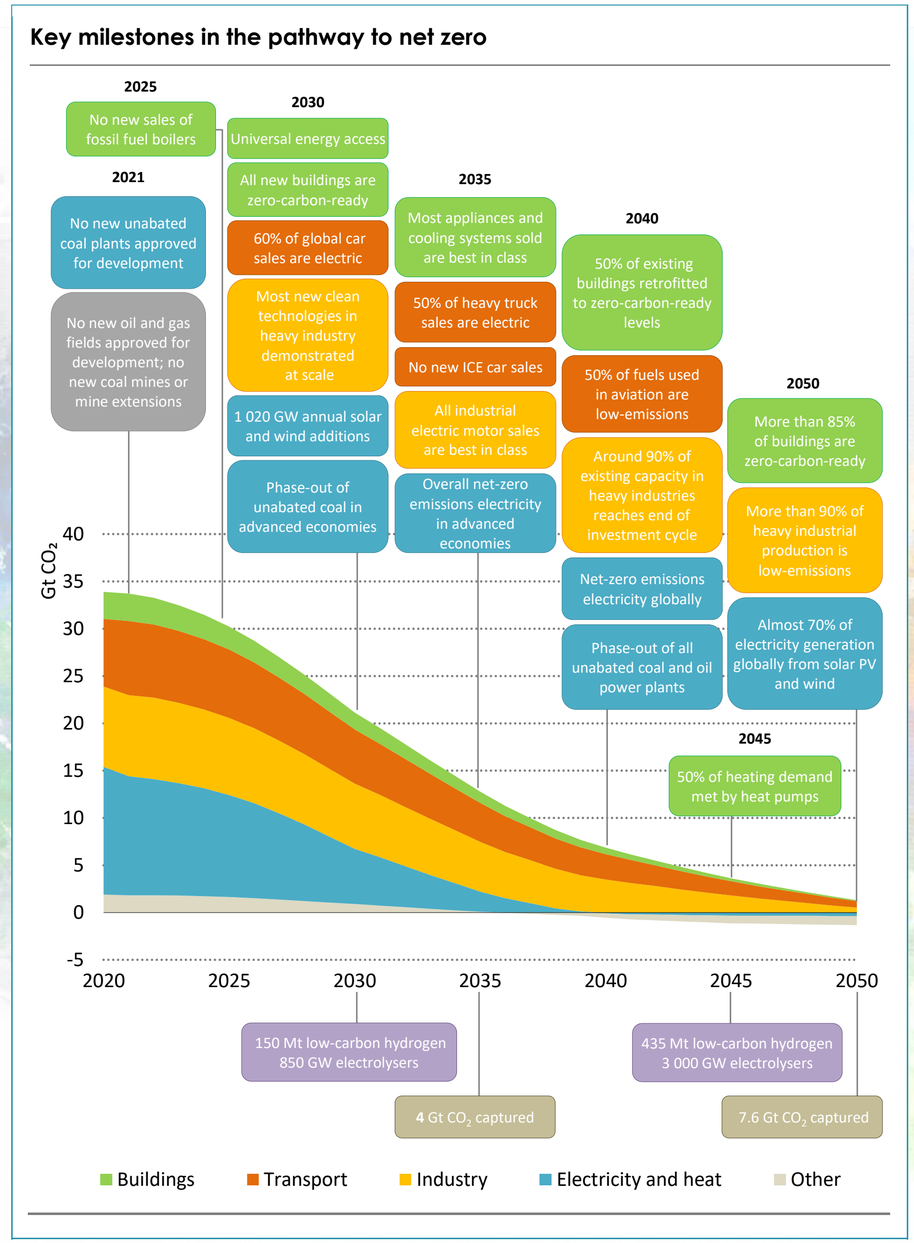
D'après Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector www.iea.org (*octobre 2021*)

Quelques éléments d'analyse de l'utilisation énergétique



D'après Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector www.iea.org (*octobre 2021*)

Quelques éléments d'analyse de l'utilisation énergétique



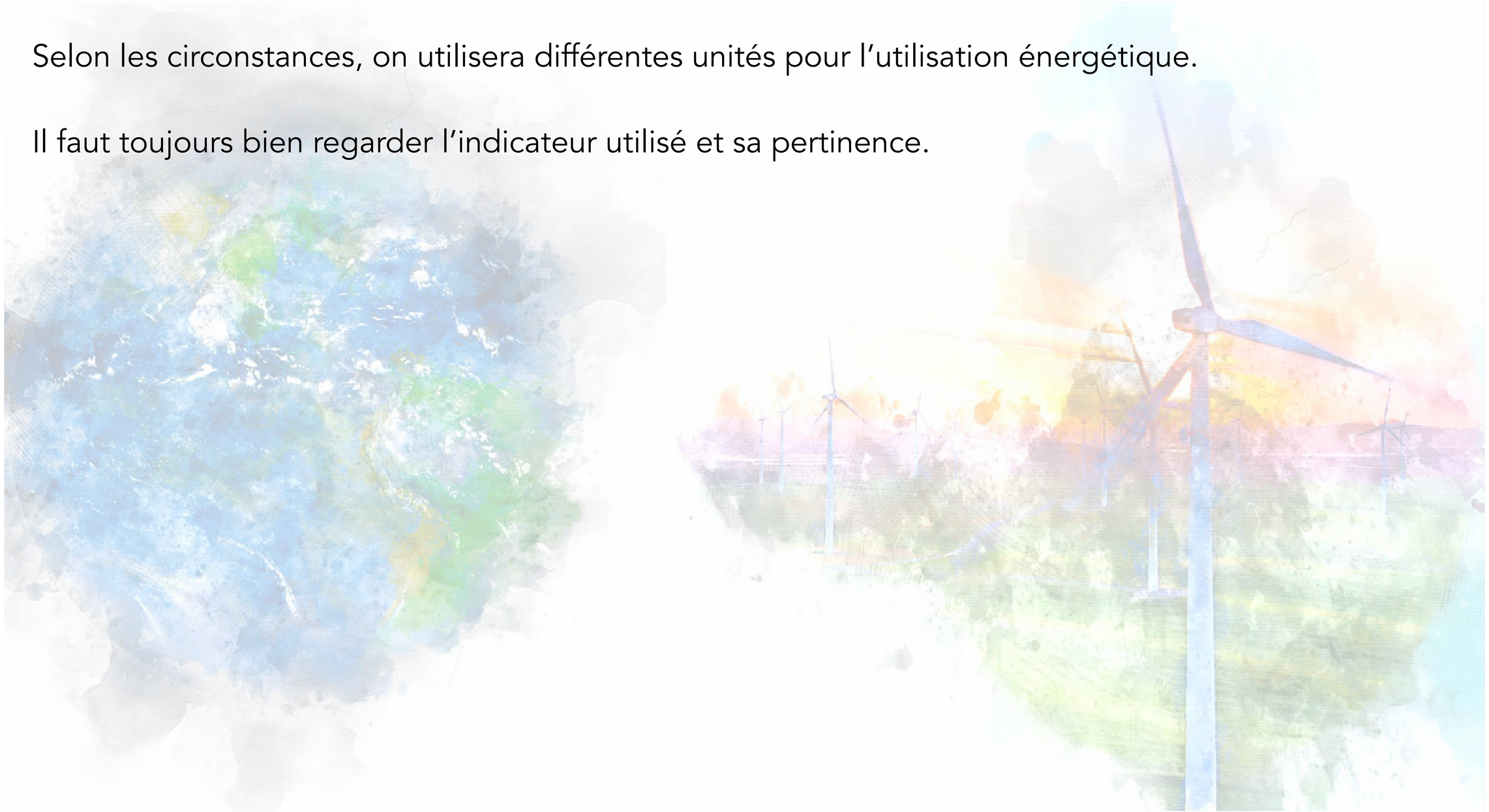
D'après Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector www.iea.org (*octobre 2021*)

Conclusions

Conclusions

Selon les circonstances, on utilisera différentes unités pour l'utilisation énergétique.

Il faut toujours bien regarder l'indicateur utilisé et sa pertinence.



Conclusions

Selon les circonstances, on utilisera différentes unités pour l'utilisation énergétique.

Il faut toujours bien regarder l'indicateur utilisé et sa pertinence.

Pour la suite du cours :

Jeudi 23 novembre	**Mécanique des fluides**	Eolienne	Hydraulique

Pétrole Biofuels & déchets Solaire, éolien Hydro Nucléaire Gaz naturel Charbon

Conclusions

Selon les circonstances, on utilisera différentes unités pour l'utilisation énergétique.

Il faut toujours bien regarder l'indicateur utilisé et sa pertinence.

Pour la suite du cours :

Jeudi 23 novembre	**Mécanique des fluides**	Eolienne	Hydraulique
Jeudi 14 décembre	**Transferts thermiques**	Solaire	Géothermie

Pétrole Biofuels & déchets Solaire, éolien Hydro Nucléaire Gaz naturel Charbon

Conclusions

Selon les circonstances, on utilisera différentes unités pour l'utilisation énergétique.

Il faut toujours bien regarder l'indicateur utilisé et sa pertinence.

Pour la suite du cours :

Jeudi 23 novembre	**Mécanique des fluides**	Eolienne	Hydraulique
Jeudi 14 décembre	**Transferts thermiques**	Solaire	Géothermie
Jeudi 21 décembre	**Thermodynamique I**	Combustion	

Conclusions

Selon les circonstances, on utilisera différentes unités pour l'utilisation énergétique.

Il faut toujours bien regarder l'indicateur utilisé et sa pertinence.

Pour la suite du cours :

Jeudi 23 novembre	**Mécanique des fluides**	Eolienne	Hydraulique
Jeudi 14 décembre	**Transferts thermiques**	Solaire	Géothermie
Jeudi 21 décembre	**Thermodynamique I**	Combustion	
Jeudi 11 janvier	**Thermodynamique II**	Nucléaire	Electricité

Conclusions

Selon les circonstances, on utilisera différentes unités pour l'utilisation énergétique.

Il faut toujours bien regarder l'indicateur utilisé et sa pertinence.

Pour la suite du cours :

Jeudi 23 novembre	**Mécanique des fluides**	Eolienne	Hydraulique
Jeudi 14 décembre	**Transferts thermiques**	Solaire	Géothermie
Jeudi 21 décembre	**Thermodynamique I**	Combustion	
Jeudi 11 janvier	**Thermodynamique II**	Nucléaire	Electricité
Jeudi 18 janvier	**Electricité**		

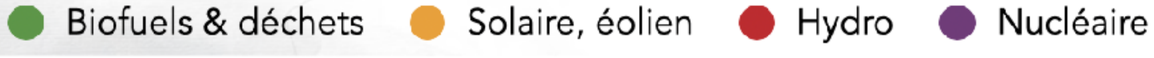
Conclusions

Selon les circonstances, on utilisera différentes unités pour l'utilisation énergétique.

Il faut toujours bien regarder l'indicateur utilisé et sa pertinence.

Pour la suite du cours :

Jeudi 23 novembre	**Mécanique des fluides**	Eolienne	Hydraulique
Jeudi 14 décembre	**Transferts thermiques**	Solaire	Géothermie
Jeudi 21 décembre	**Thermodynamique I**	Combustion	
Jeudi 11 janvier	**Thermodynamique II**	Nucléaire	Electricité
Jeudi 18 janvier	**Electricité**		
Jeudi 1 février	**Futurs énergétiques**	Nucléaire	Combustion



Conclusions

Selon les circonstances, on utilisera différentes unités pour l'utili

Il faut toujours bien regarder l'indicateur utilisé et sa pertinence.

Pour la suite du cours :

Jeudi 23 novembre	**Mécanique des fluides**	Eolienne	Hydraulique
Jeudi 14 décembre	**Transferts thermiques**	Solaire	Géothermie
Jeudi 21 décembre	**Thermodynamique I**	Combustion	
Jeudi 11 janvier	**Thermodynamique II**	Nucléaire	Electricité
Jeudi 18 janvier	**Electricité**		
Jeudi 1 février	**Futurs énergétiques**	Nucléaire	Combustion

Biofuels & déchets Solaire, éolien Hydro Nucléaire

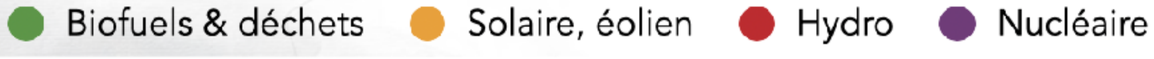
Conclusions

Selon les circonstances, on utilisera différentes unités pour l'utilisation énergétique.

Il faut toujours bien regarder l'indicateur utilisé et sa pertinence.

Pour la suite du cours :

Jeudi 23 novembre	**Mécanique des fluides**	Eolienne	Hydraulique
Jeudi 14 décembre	**Transferts thermiques**	Solaire	Géothermie
Jeudi 21 décembre	**Thermodynamique I**	Combustion	
Jeudi 11 janvier	**Thermodynamique II**	Nucléaire	Electricité
Jeudi 18 janvier	**Electricité**		
Jeudi 1 février	**Futurs énergétiques**	Nucléaire	Combustion
Jeudi 8 février	**Futurs énergétiques**	Solaire	Eolienne



Travail à faire

Pour la prochaine séance (jeudi 23 novembre)

1. Préparer l'évolution énergétique du pays de votre choix

2. Lors du début de la première séance, vous me l'envoyer et j'essaye de trouver le pays en question

https://www.iea.org/statistics/

FRANCE

https://www.iea.org/statistics/

World Energy Outlook (WEO)