

Cours introductif sur l'énergie

Guillaume Roux, LPTMS, CNRS, Univ. Paris-Saclay

[Ecole ECOCLIM 2023](#), Orsay, 14 juin 2023

Menu

Economie (Parrique 2022) : organisation sociale de la satisfaction des besoins

Les activités humaines requièrent : ressources, **l'énergie**, machines, personnes, espace, temps, connaissances, finalités,...

Une classification possible : extraction, production, allocation, consommation, élimination

I. Physique et concepts techniques (plutôt neutre)

Chaîne de production de l'énergie

Conversions d'énergie

II. Aspects sociétaux (moins neutre)

Statistiques et mix énergétique

Effets socio-techniques

Impacts environnementaux

Scénarios (IEA, RTE, Ademe)

Lien avec les autres cours de la semaine

- Olivier Vidal : ressources et énergie
- Yves Marignac : scenarios
- Timothée Nicolas : ITER
- Marc Ernoult et Jacques Treiner : Nucléaire
- Sylvain Le Gall : photovoltaïque
- Jean-Paul Chabard : hydro STEP
- Loïc Assaud : Batteries
- Rachid Bennacer : Bâtiment

Quelques références utiles

MacKay, *Sustainable energy: without the hot air*, 2015, <https://www.withouthotair.com/>

Jeandel & Mosseri, *L'énergie à découvert*, CNRS éditions,

Jaffe & Taylor, *The Physics of Energy*, Cambridge University Press, 2018

Les livres de Smil et les cours de Jancovici

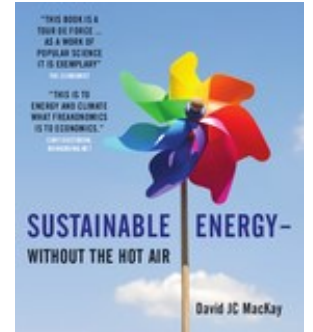
+ livres de physique et d'ingénierie

+ livres sur l'anthropocène

+ cours similaires donnés par de nombreux collègues **ici remerciés**:

G. Blanc, S. Bouneau, C. Even, D. Suchet, R. Lehoucq, A. Le Tiec, C. Marrache, O. Plantevin, J.-M. Rax, J. Treiner, G. Verley, L. Zimmer

+ wikipedia

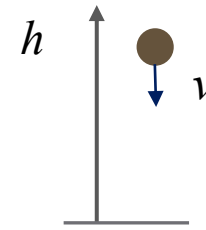


Physique & Chimie : la matière et ses transformations

Les systèmes sont décrits par des variables

L'énergie se conserve lors des transformations

=> **approche comptable** des transformations physiques



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

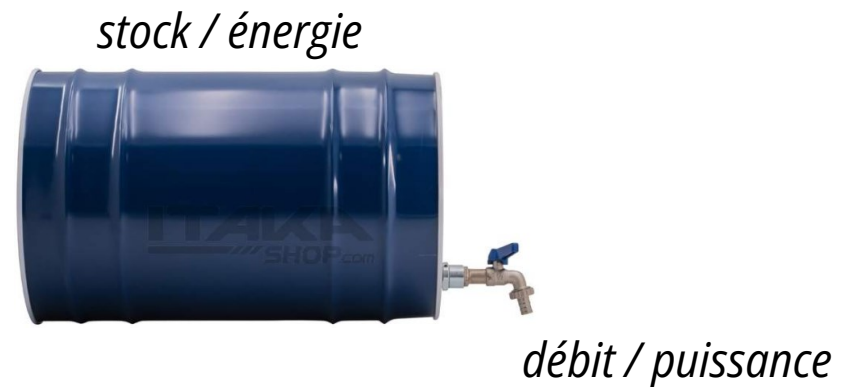
énergie potentielle énergie cinétique chaleur

Formes d'énergie : cinétique, potentielle, électrique, chimique, radiation, chaleur (Q),...

Puissance = débit d'énergie ou $\frac{\text{énergie}}{\text{temps}}$

Unité : si conversion => <https://www.onlineconversion.com/energy.htm>

- Puissance : le **kW** (kiloWatt) = 1000 Joule / seconde
- Énergie : le **kWh** (kiloWatt-heure) = 3.6 Mega Joule



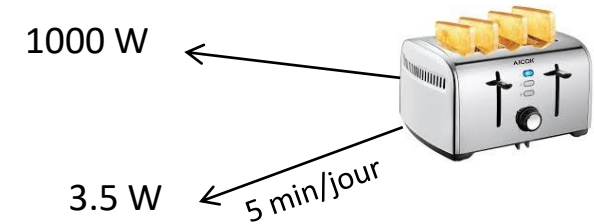
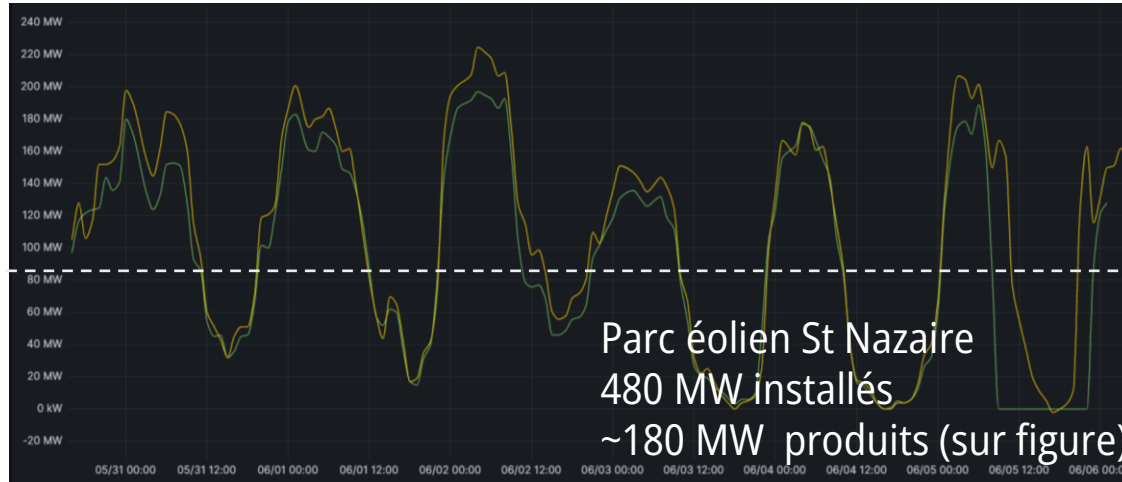
Rendement : pertes (énergie inutile ou irrécupérable / dissipation) lors de la transformation η

$$\eta = \text{rendement} = \frac{\text{récupérée}}{\text{disponible}}$$

et récupérée = disponible – perdue

Puissance instantanée et puissance moyenne

Intermittence de production et de consommation



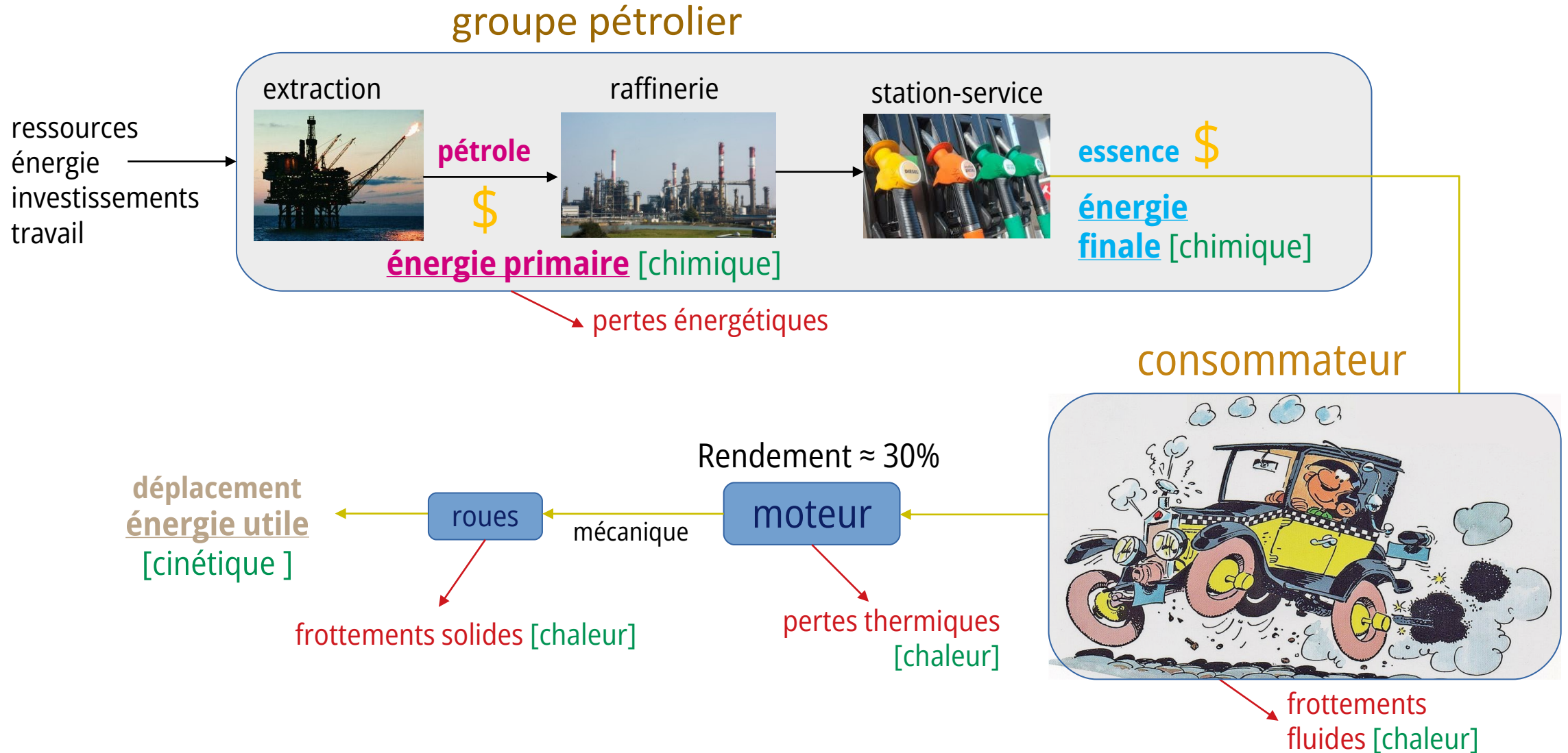
Energie électrique en France (2018)

- Puissance installée : 133 GW \Rightarrow 2 kW / habitant
- Puissance moyenne produite : 63 GW \Rightarrow **1 kW / habitant**
- Puissance moyenne consommée : 54 GW \Rightarrow 0.8 kW / habitant

Consommation annuelle d'électricité : **474 TWh** \Rightarrow (7300 kWh | 1500 € TTC | 16 kgCO₂e) / habitant

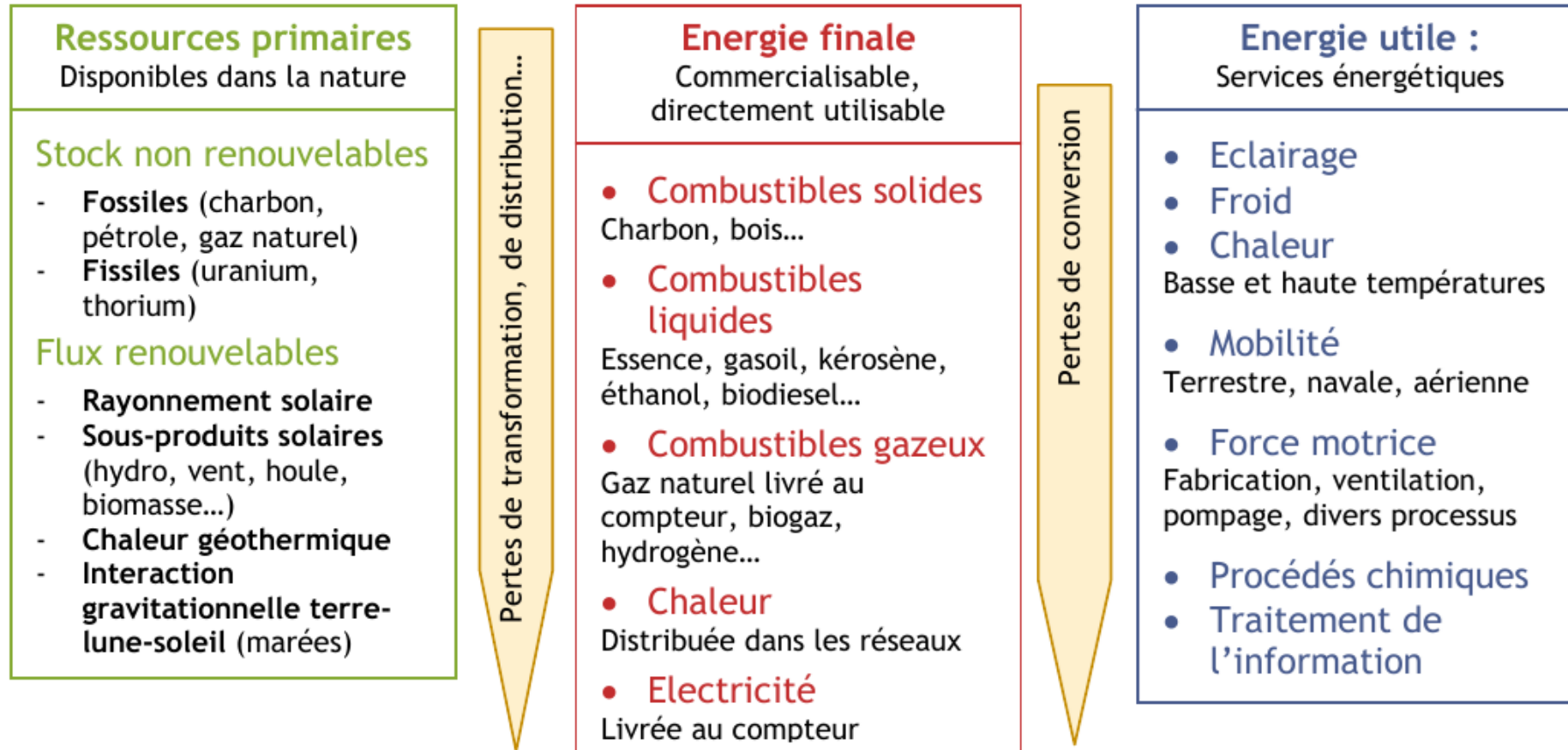
Remarque : il existe également des seuils de puissance (fracturation, décollage d'un avion, grillades,...)

Chaîne de conversion de l'énergie : la voiture



Définitions comptables de l'énergie

Elles correspondent à la fois à des étapes de transformations physiques/chimiques et des transactions économiques
=> **suivi comptable pour les économistes : statistiques, scénarios, marchés de l'énergie**



Vecteur énergétique : une forme intermédiaire d'énergie qui se transporte, qui sert à transférer de l'énergie (électricité, hydrogène, réseau de chaleur, air comprimé,...)

Conversions d'énergies

machines, convertisseurs,... pour « produire, stocker, consommer »
exemples historiques et actuels, individuel ou collectif, ordres de grandeur

Force et puissance humaines

L'Homme est limité en force et en puissance. Typiquement

- Thermique : $P_{th} \approx 100 \text{ W}$
- Jambes : $F \approx 500 \text{ Newton (50 kg)}$. $P \approx 100\text{-}200 \text{ W}$



2.5 kWh / jour



100 W

Force et puissance humaines

L'Homme est limité en force et en puissance. Typiquement

- Thermique : $P_{th} \approx 100 \text{ W}$
- Jambes : $F \approx 500 \text{ Newton (50 kg)}$. $P \approx 100\text{-}200 \text{ W}$
- Bras : $F \approx 100 \text{ Newton (10 kg)}$, $P \approx 50 \text{ W}$

Limite en énergie : le temps... 10h à 100W = **1 kWh / jour**

En mécanique

Travail (énergie) = Force x distance

Puissance = Force x vitesse



Force et puissance humaines

L'Homme est limité en force et en puissance. Typiquement

- Thermique : $P_{th} \approx 100 \text{ W}$
- Jambes : $F \approx 500 \text{ Newton (50 kg)}$. $P \approx 100\text{-}200 \text{ W}$
- Bras : $F \approx 100 \text{ Newton (10 kg)}$, $P \approx 50 \text{ W}$

Limite en énergie : le temps... 10h à 100W = **1 kWh / jour**

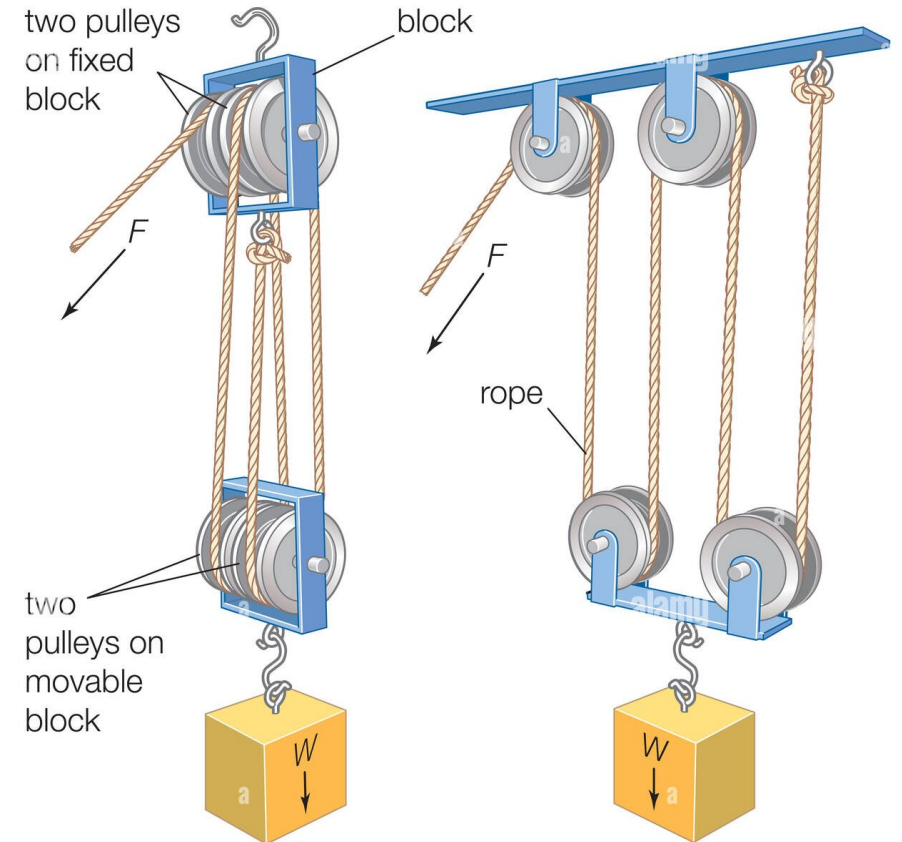
En mécanique

Travail (énergie) = Force x distance

Puissance = Force x vitesse

Comment porter 100 kg ?

Principe du palan : diviser la force et augmenter la distance



Puissance animale

humain => $P \approx 100 \text{ W}$, $F \approx 100\text{-}300 \text{ Newton}$

âne – mulet => force traction $\approx 200 - 300 \text{ Newton}$

bœufs - cheval => $P \approx 1000 \text{ W}$, force en traction $\approx 400\text{-}800 \text{ Newton}$

Données agricoles (~1860) Kander & Warde (2011)

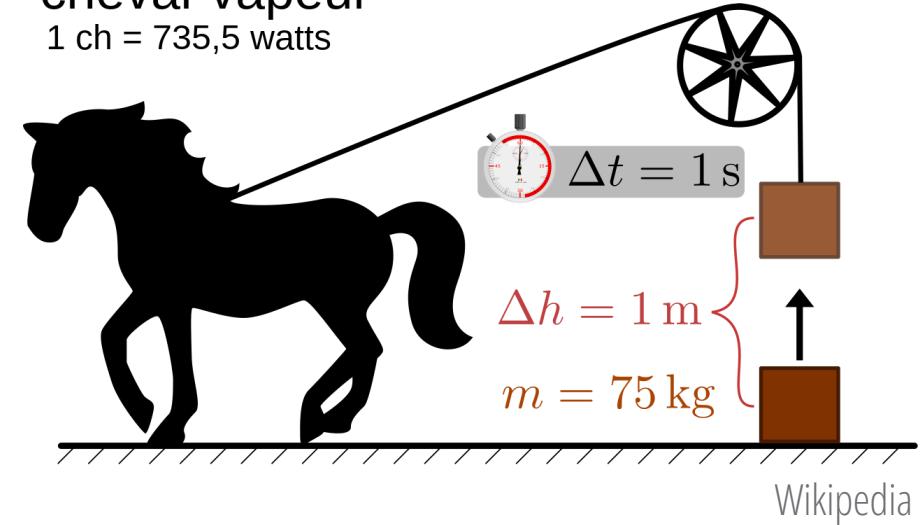
- France : 0.23 bœuf / ouvrier, 0.2 cheval / ouvrier
- Angleterre : 0.54 cheval / ouvrier

La notion d'esclaves énergétiques est trompeuse...

...nous avons toujours utilisé des animaux et du bois

cheval-vapeur

1 ch = 735,5 watts



bon feu => 10 kW = 100 esclaves ??!

Importance de la rotation dans l'énergie

Un grand nombre de machines fonctionnent avec de la **rotation autour d'un axe** !

Energie cinétique de rotation $= \frac{1}{2} J \omega^2$

J : moment d'inertie

ω : vitesse de rotation

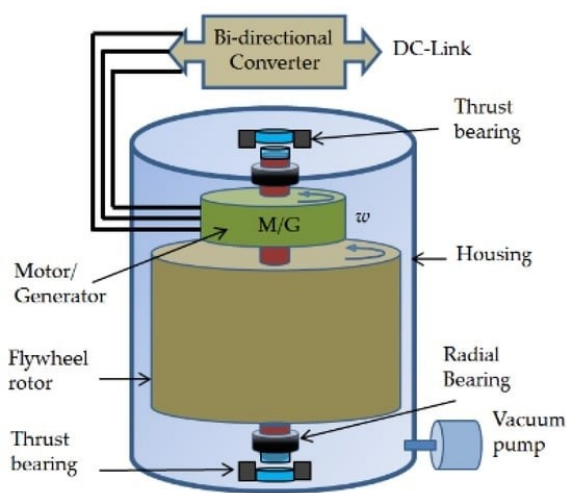
Couple sur l'axe résultant des moments des forces : C

Puissance mécanique : $P = C \omega$

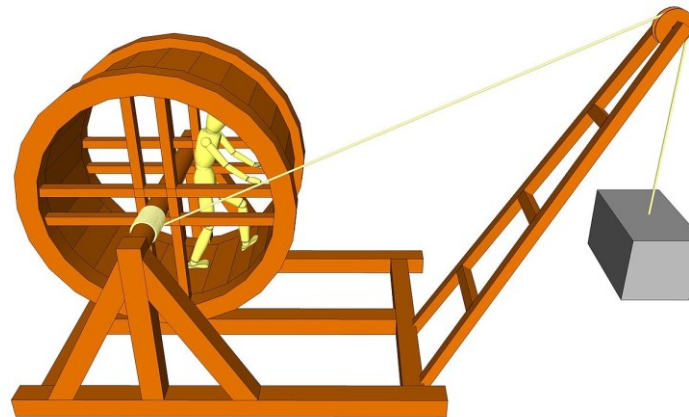


Wikipedia

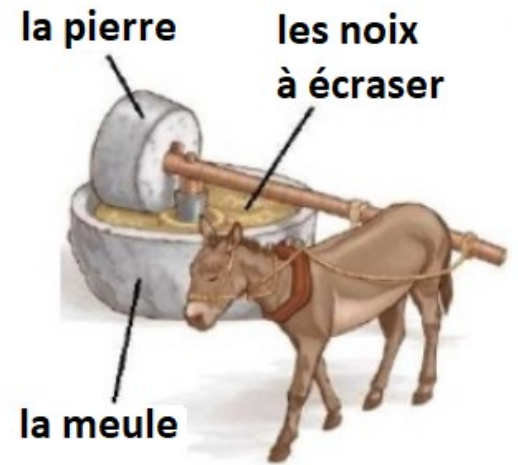
Stockage d'énergie par **volant d'inertie**



Grutage par « cage à écureuil »



Moulin à manège



Energie potentielle de gravitation

Énergie gravitationnelle = masse x constante de pesanteur x hauteur, « mgh »

Projet Energy Vault en Suisse – blocs de 35 tonnes – 35 MWh de stockage - puissance maximale 4 MW



Remarque : 1L d'essence = 10 kWh thermique => équivaut à 3500 L d'essence...

L'énergie gravitationnelle est faible, il faut utiliser une grande masse => **barrage STEP**

À l'inverse, l'énergie à fournir pour « monter » une maison est faible => on fait depuis des millénaires de grands édifices.

Frottements solides

Force opposée au mouvement et **proportionnelle au poids mg**

- frottements solides : statique et glissement
- frottements solides sur un axe de rotation
- **résistance au roulement** (invention de la roue et du moyeu)

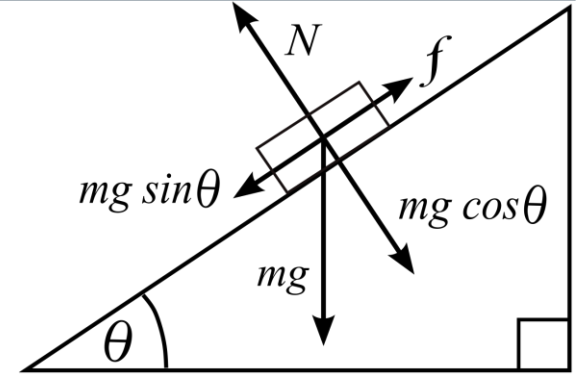
$$f = \mu_r mg$$

Le travail des forces de frottements est **dissipé en chaleur**

Les rendements mécaniques peuvent rendus plutôt (très) bons

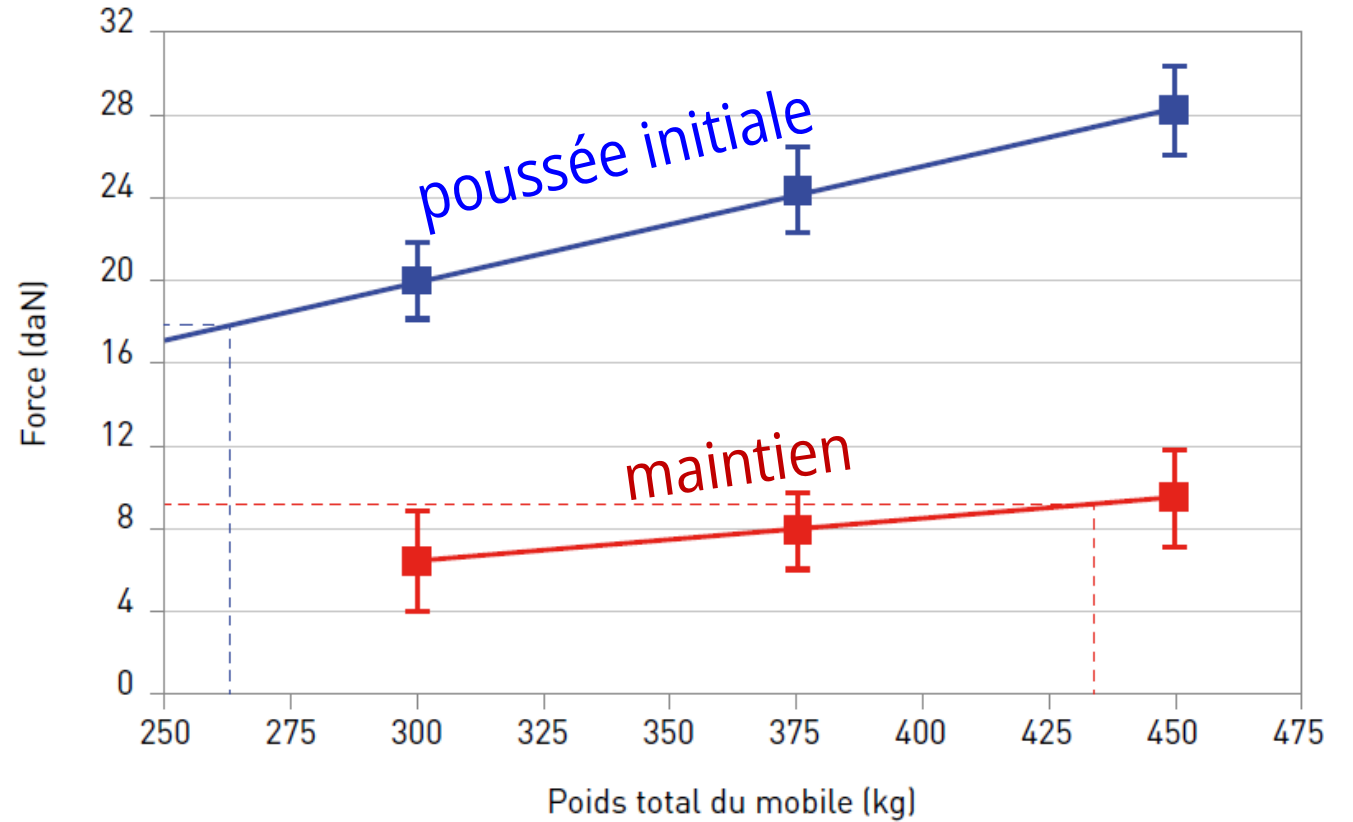
On les recherche : chaleur (allumette), meulage, broyage, frein, transmission mécanique, winch / amarrage, musique...

On les évite : vérin, presse, roulement à bille => *gain d'efficacité énergétique*



Progrès de la manutention

Dalle lisse et résistante (béton, marbre...) + roulement à billes => économie en force et en énergie, moins de pénibilité



Energie cinétique des fluides

Densité volumique d'énergie cinétique = $\frac{1}{2} \rho v^2 \Rightarrow$ puissance surfacique $\frac{P}{\pi R^2} = \frac{1}{2} \rho v^3$

Fluide	Densité (kg/m ³)	Vitesse (m/s)	Puissance surfacique (kW/m ²)	Rayon R (m)	Puissance max récupérable (MW)
eau	1000	4	32	5	2.5
vent	1.3	10	0.65	45	4.1

Hydrolienne Ouessant



Eolienne [Vestas V90-3MW](#)



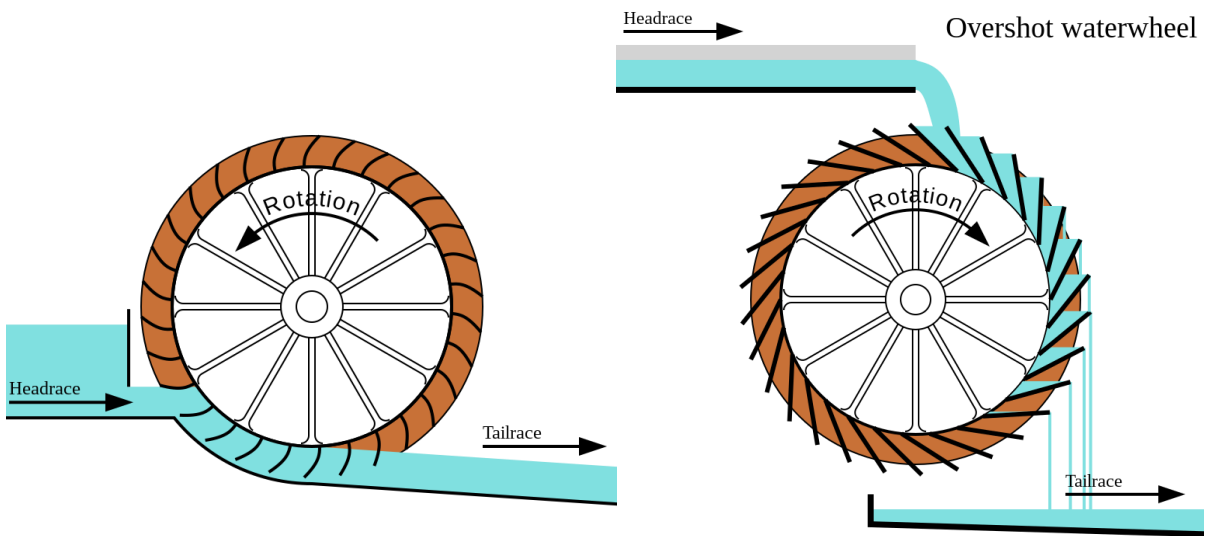
P = 5-10 kW



Moulins à eau et turbines de barrages

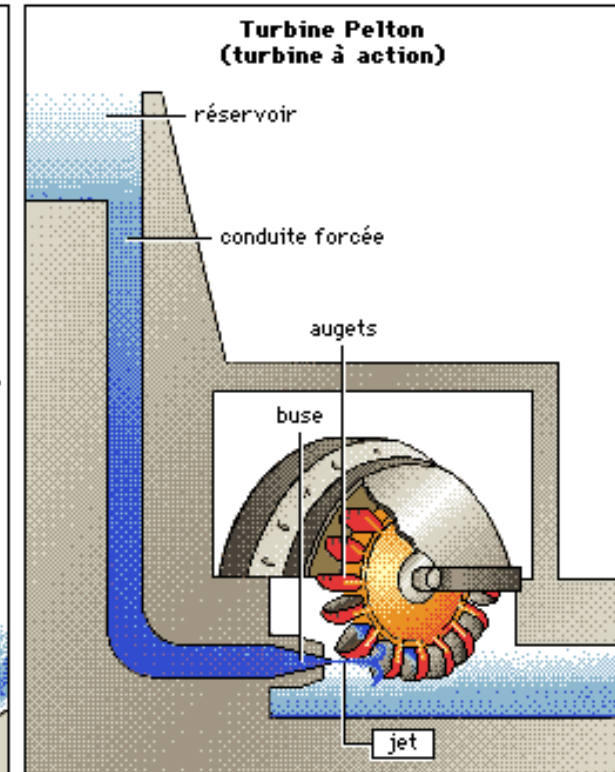
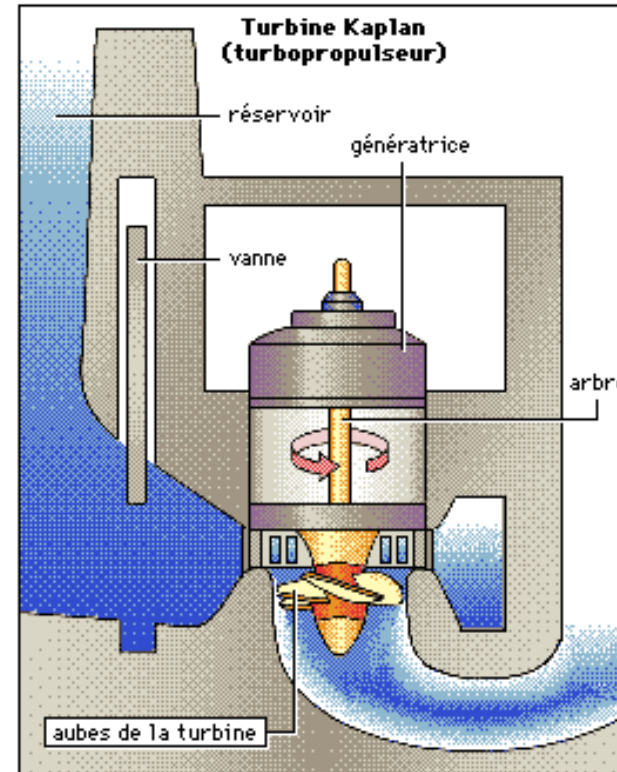
Conversion énergie potentielle de gravitation ou cinétique en énergie de rotation

Passage d'un mouvement de **translation à rotation** => **vis / hélice** ou utiliser le **moment d'une force**



$P = 5-20 \text{ kW}$, $\eta = 50 - 90\%$

wikipedia



<http://turbines.free.fr/>

$P = 5\text{kW} - 700 \text{ MW}$, $\eta = 80 - 95\%$

Conversion inverse : pompes, hélices, roue à aube

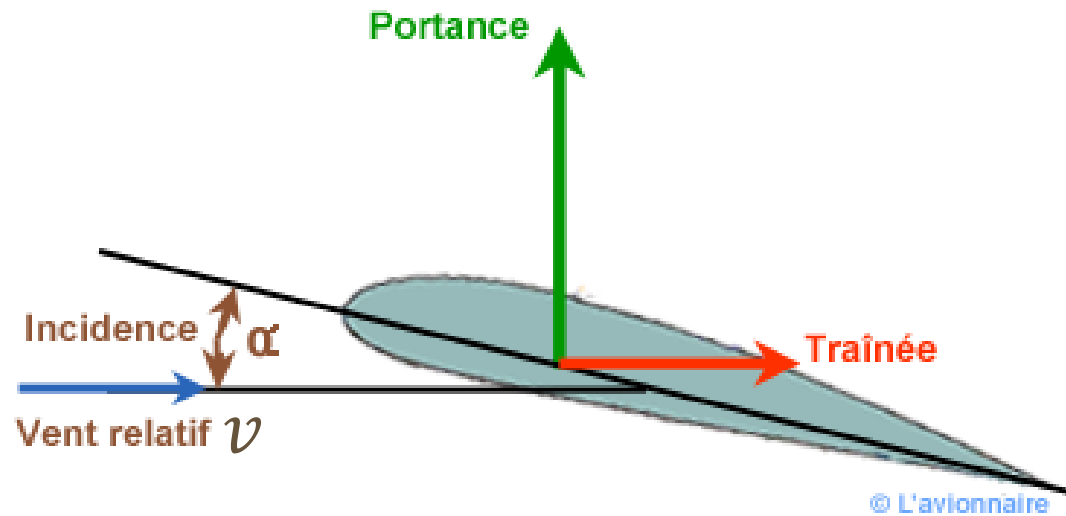
Forces exercées par un fluide sur un objet

Pour un fluide *peu dense et peu visqueux comme l'air*.

Forces de **portance** et **trainée** sur un profil aile : section S (en m^2)
création d'une *dépression sur l'extrados* et d'une surpression sur l'intrados

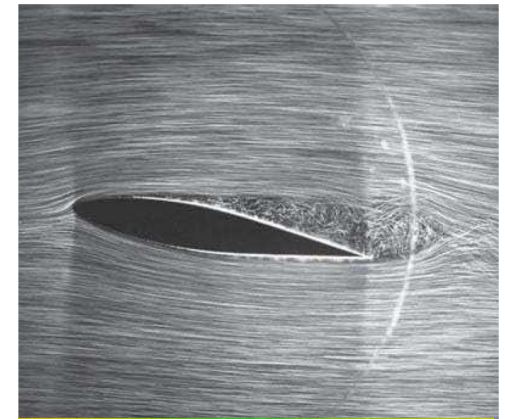
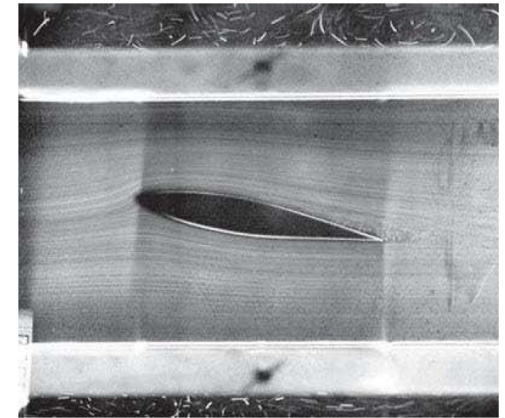
$$\text{Portance} = S C_z \frac{1}{2} \rho v^2$$

$$\text{Trainée} = S C_x \frac{1}{2} \rho v^2$$



On recherche la portance : éolienne, ventilation, bateau à voile moderne, foils

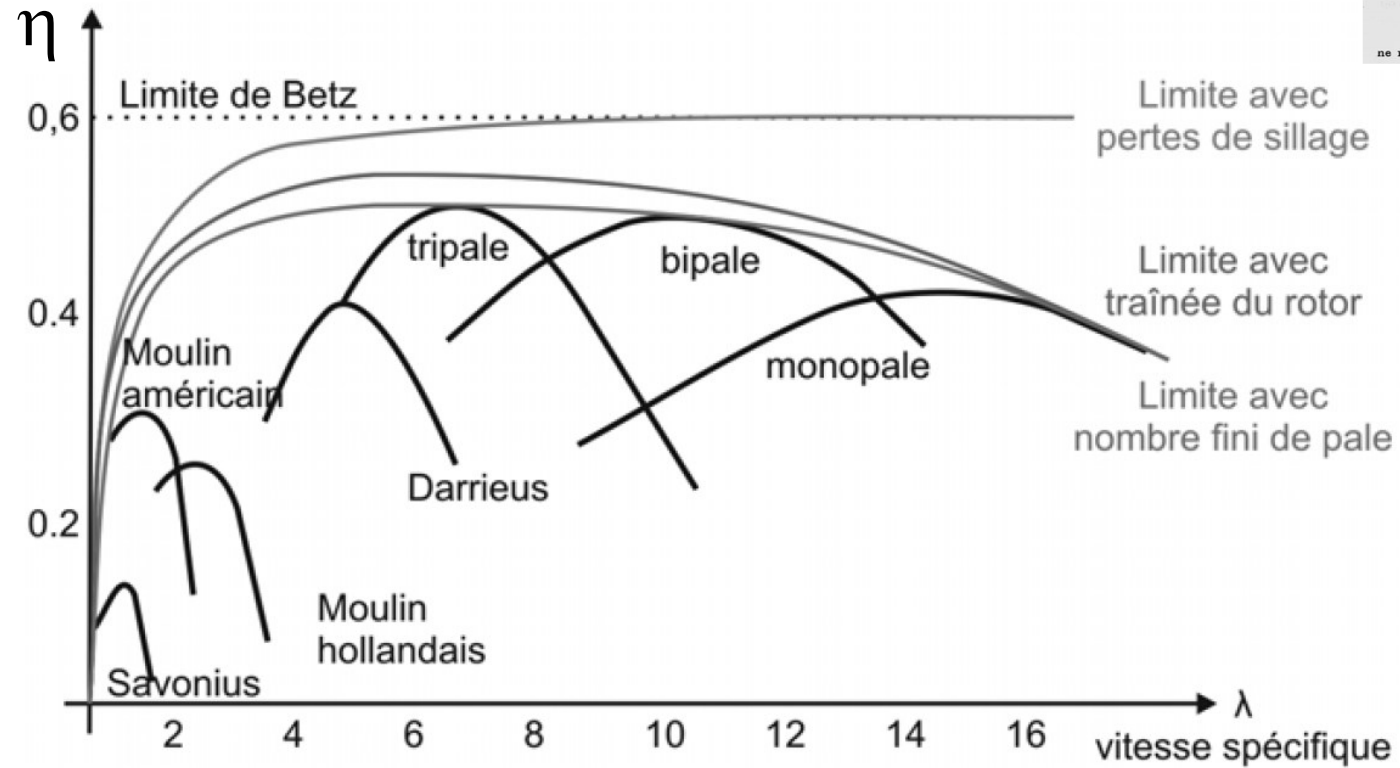
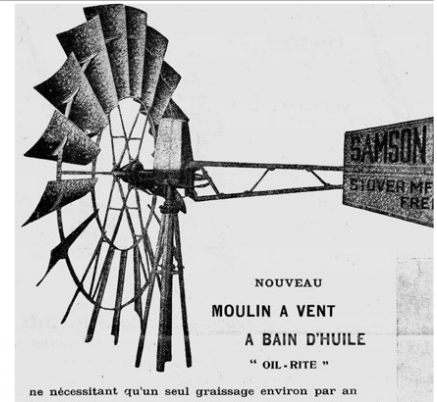
On évite la trainée : frottements fluides => dissipation en chaleur



Rendement des éoliennes

Les éoliennes modernes utilisent la portance pour créer un couple sur le rotor

Les meilleurs rendements sont de l'ordre de 50%



Transports terrestres : voiture, train, vélo

Nous devons fournir de l'énergie pour

Lutter contre...	Voiture / camion	train	vélo
inertie	forte	très forte	faible
gravité	significative	très limitante tunnels / viaducs	limitante
glissement	pneus	poids / tunnels / viaducs	pneus
résistance au roulement	significative	très faible	faible
frottements fluides	très significatif	significatif	peu limitant



Estimation de **puissances utiles** pour une Zoé, puissance mécanique de 110ch = 80 kW

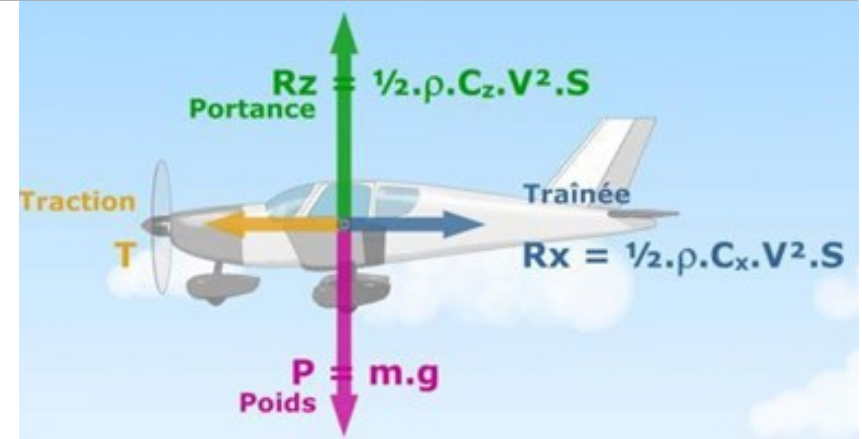
Vitesse (km/h)	30	80	110
Puissance résistance roulement (kW)	1.2	3.3	4.5
Puissance du brassage de l'air (kW)	0.3	5.4	14.0
Puissance pour atteindre la vitesse en 10s (kW)	5.2	37.0	70.0



Faire voler un avion

Raisonnement en **puissance utile**, il faut

- décollage => atteindre une vitesse suffisante pour que la portance dépasse le poids (**seuil en puissance**)
- atteindre une altitude de 10 000m => payer « mgh »
- lutter contre les frottements fluides à 900 km/h



20 kW, 0.3 tonnes



10 MW, 70 tonnes



Remarque : pour décoller => poussée d'Archimède beaucoup plus sobre en énergie (montgolfière, dirigeable)

Faire avancer un bateau

Archimède compense le poids et pas de problème de dénivelé !

Il faut lutter contre

- le déplacement de l'eau si canal étroit
- les pertes par sillage (onde interface eau-air)
- le courant



Transport fluvial & transport maritime très économe en énergie (voile, puis charbon, puis fioul lourd, diesel, gaz)



Les foils !

Utiliser la portance des foils pour soulever le bateau et réduire la résistance.

C'est élégant mais il faut une grande vitesse et on perd la poussée d'Archimède pour les gros tonnages.



Conversion d'énergie chimique en chaleur

Combustion : réactions d'oxydo-réduction exothermiques et rapide. **Oxydant = comburant, Réducteur = combustible.**
Libère des gaz très chauds et si explosif détonation & déflagration.

Le **dioxygène O₂** est le plus courant des oxydants

- **Hydrogène** : $2 \text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$ (explosif)
- **Carbonés** : méthane, propane, butane, diesel, essence, kérosène, fioul, charbon, huile, éthanol, bois, bouse séchée, tourbe, déchets...
=> libère CO, CO₂ +...
- Explosifs, souvent avec groupement oxyde d'azote

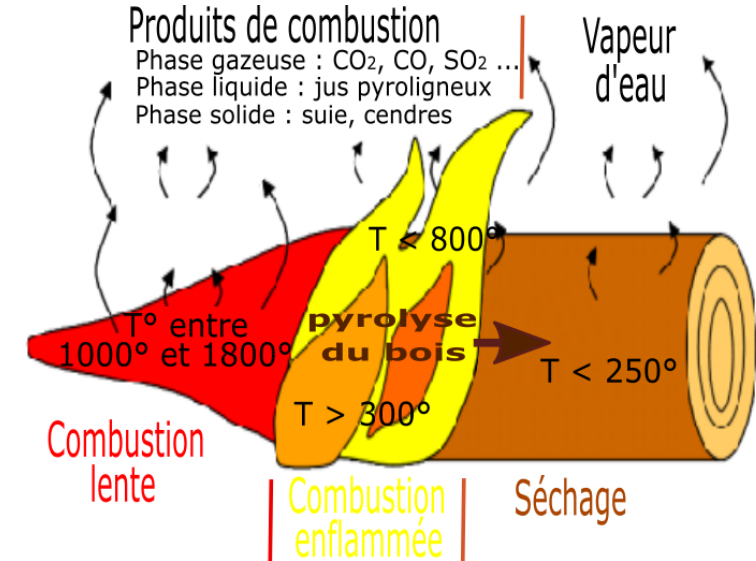
Réactions nucléaires : fournit un milieu dense et chaud

- *fission* : naturelle => géothermie, contrôlée => bombe A, contrôlée => centrale nucléaire
- *fusion* : naturelle => soleil, contrôlée => bombe H, contrôlée => projet ITER (?)

Biologique : métabolisme, bactéries,...

Changement d'état :

glace (fusion), mélange colligatif (sel+glace), chaufferette par métastabilité



Libérer les énergies thermiques

L'énergie provient à la fois des **énergies de liaisons** et des **propriétés thermodynamiques des réactifs et des produits**

Ainsi, l'énergie récupérée dépend des conditions de température et de pression

dans les conditions standards

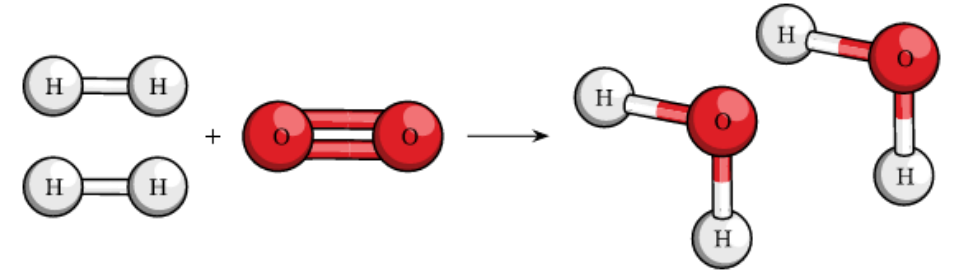
PCS = Pouvoir calorifique supérieure

La vapeur d'eau est supposée condensée à la fin
=> récupération de la chaleur latente

PCI = Pouvoir calorifique inférieur

La vapeur d'eau n'est pas condensée, d'où $PCI < PCS$

Faire sécher le bois : le PCI chute rapidement avec l'humidité



Nom	PCS (kWh/kg)	PCI (kWh/kg)
Charbon	9.5	9.25
Bois		3 à 5
Méthane	15.4	13.9
Essence	13.0	11.8
Diesel	12.8	11.9
Dihydrogène	39.4	33.4



$P = 1 - 4 \text{ kW}$

Stocker l'énergie thermique

Isoler + Capacité calorifique des corps ou chaleur spécifique C_V

Chaleur à fournir pour augmenter la température de ΔT : $Q = C_V \Delta T$

Inertie thermique : une grande capacité calorifique est longue à chauffer mais longue à refroidir

Stockage thermique de la centrale solaire d'Andasol (Espagne)

28 000 t de mélange $\text{NaNO}_3 / \text{KNO}_3$: $C_V = 0,41 \text{ Wh/kg/K}$, $\Delta T = 100 \text{ K}$

=> $Q = 1150 \text{ MWh}$

Calorie : énergie pour augmenter de $\Delta T = 1^\circ$ un gramme d'eau

1 cal = 4.18 J = 1.16 mWh

Pour 1L = 1kg d'eau

- Passage de 20°C à 100°C = 0.1 kWh
- Évaporation à 100°C = 0.627 kWh

Applications : ballon à eau, bouillotte, briques réfractaires, poêle de masse



Transferts thermiques

L'énergie thermique passe du milieu le plus chaud au milieu plus froid.

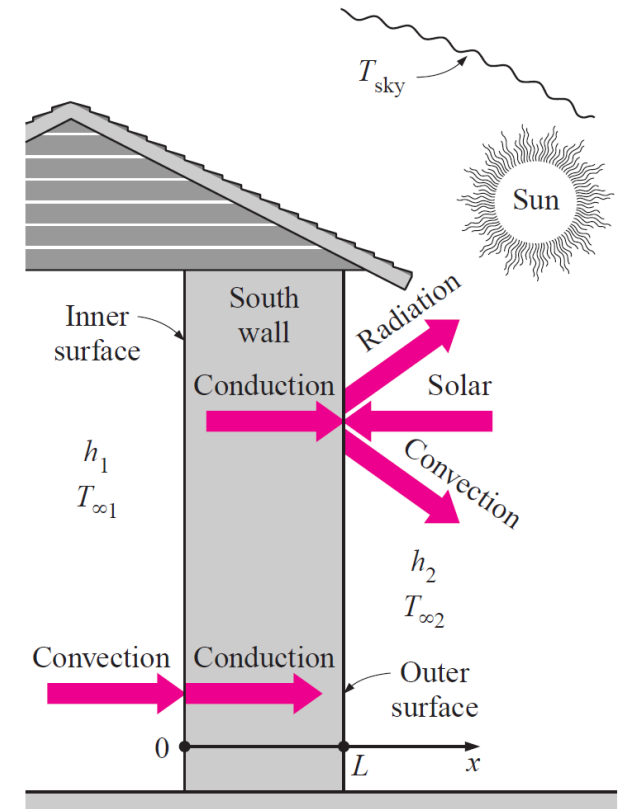
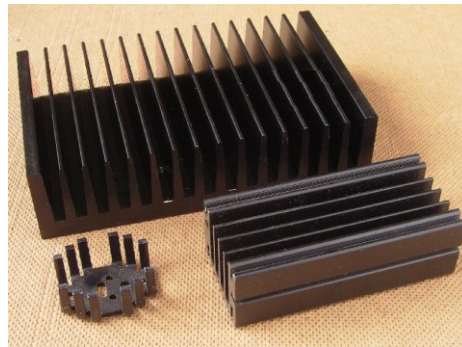
Trois principaux processus : **conduction, convection, radiation**

Isolation thermique : lutter contre les trois par résistance thermique, piégeage des fluides / vide, réflexion

Échangeurs thermiques avec fluides

Paroi avec convection : $P = \text{Surface} \times \text{coefficient} \times (T_C - T_F)$

- bons conducteurs thermiques
- maximiser la surface d'échange
- bon écoulement



Physique des gaz - entropie

Variables : **volume V**, **sa température T**, **sa pression p** => couplage à la mécanique

Énergie = énergie cinétique « désordonnée » + interactions

Equation d'état : $p = N k_B T / V + \dots$

Nombreuses transformations: compression, détente, échanges de chaleur

2nd principe de la thermodynamique : entropie S qui croît toujours pour un système fermé, traduit l'irréversibilité.

Un échange de chaleur Q avec une source à T fixée est associé à un échange d'entropie Q/T

$$\Delta S_{\text{gaz}} \geq \frac{Q}{T}$$

Applications : circuit pneumatique, stockage par air comprimé
 $V = 300 \text{ L}$ à $p = 300 \text{ bars}$ => 6 – 8 kWh

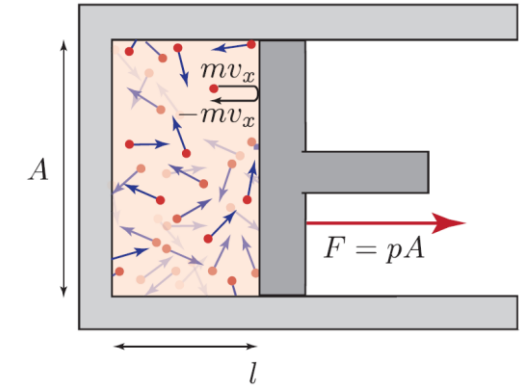
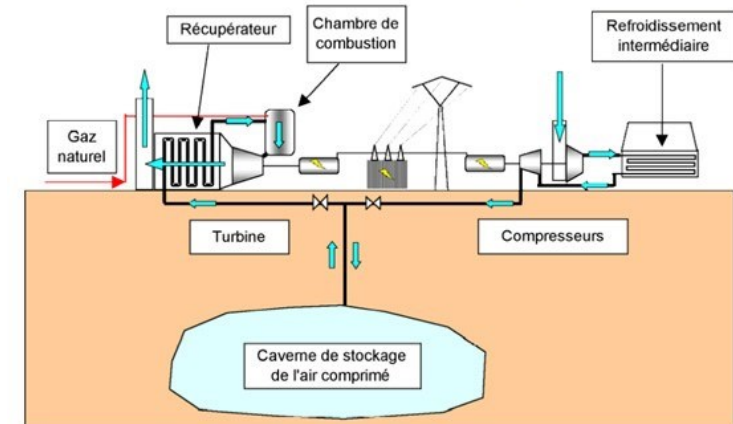
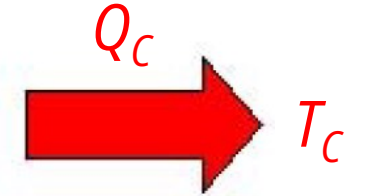
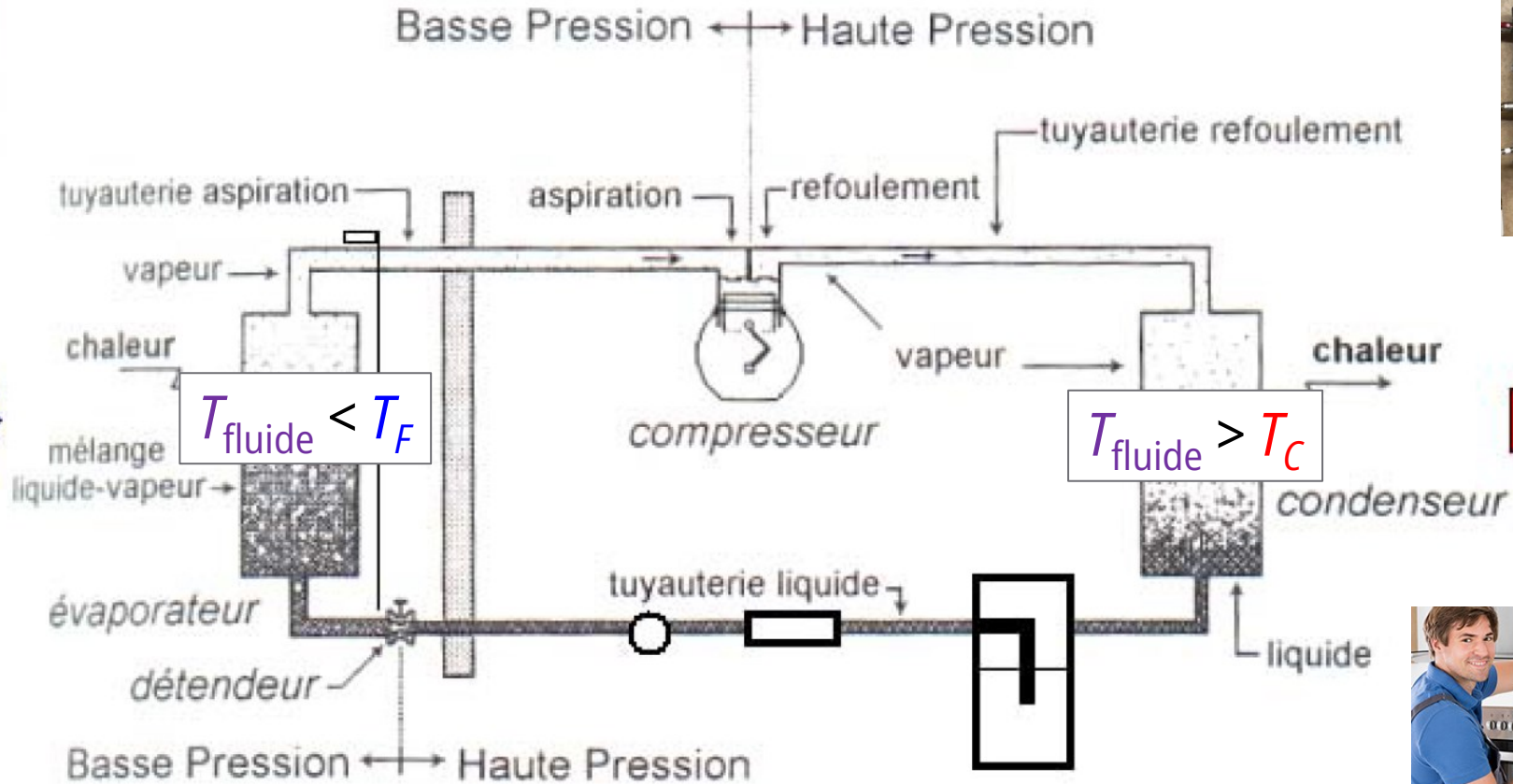
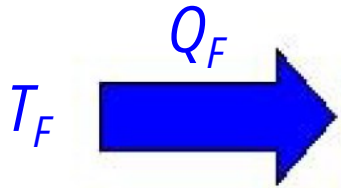


Schéma de principe d'une installation de stockage à air comprimé



« production » de froid

Point de vue de la plomberie : une détente pour refroidir à basse pression, une compression pour chauffer à haute pression. Régler la pression pour que les températures d'équilibre liquide-vapeur soit en-dessous / au-dessus de T_F / T_C



Applications : frigo, congélateur, pompe à chaleur, climatisation...

Principes gouvernant les machines thermiques

Elles sont des **cycles thermodynamiques** : le fluide doit revenir à l'état initial à la fin de chaque cycle.

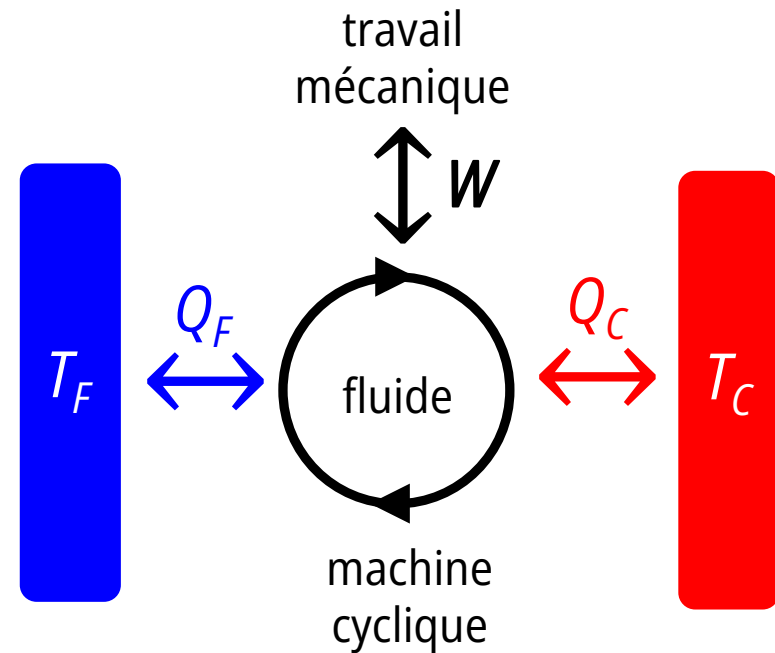
Machine ditherme : en contact avec deux sources de chaleur

Energies échangées avec le fluide : *convention* > 0 si reçue, < 0 si donnée

- 1^{er} principe : $\Delta U_{\text{fluide}} = 0 = W + Q_C + Q_F$
- 2nd principe : $\Delta S_{\text{fluide}} = 0 \geq \frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F}$

On en déduit

$$W \geq Q_F \left(\frac{T_C - T_F}{T_F} \right)$$



Modes de fonctionnement

Sans travail $W = 0$: l'évolution naturelle du chaud vers le froid

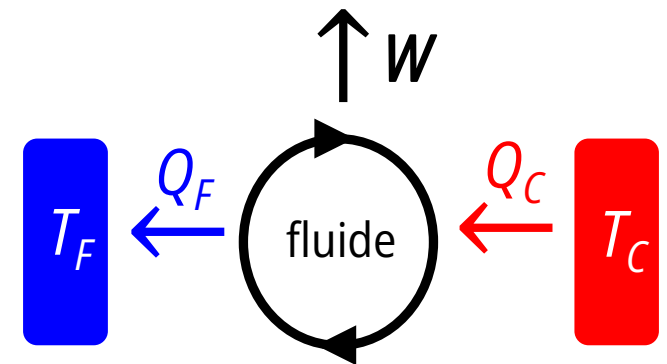
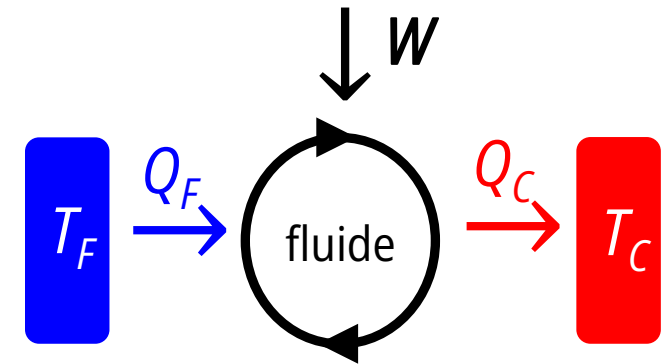
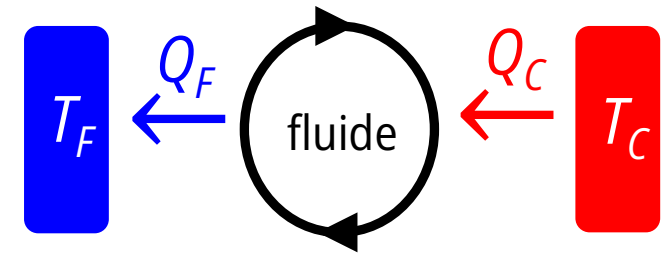
$$0 \geq Q_F \left(\frac{T_C - T_F}{T_F} \right) \Rightarrow Q_F = -Q_C < 0$$

Pompe à chaleur $W > 0$: $Q_F = -Q_C > 0$ pourvu que l'on fournisse un travail minimum

$$W \geq W_{\min} = Q_F \left(\frac{T_C - T_F}{T_F} \right) \quad \text{et} \quad \text{COP} = \frac{|Q_C|}{W} = \frac{T_C}{T_C - T_F} > 1$$

Moteur thermique $W < 0$: $Q_F = -Q_C < 0$ on récupère un travail maximum

$$|W| \leq W_{\max} = |Q_F| \left(\frac{T_C - T_F}{T_F} \right) \quad \text{et} \quad \eta = \frac{|W|}{Q_C} = \frac{T_C - T_F}{T_C} < 1$$



Moteur thermique de Carnot

La source froide est indispensable (*pas de moteur monotherme*)

- le fluide fait un cycle, il est chauffé, il doit être refroidit
- Pour fournir le travail W , l'énergie et l'entropie du fluide diminuent, alors la source froide récupère l'entropie pour assurer le second principe : $|Q_F| \geq \frac{T_E}{T_C} Q_C$
- Il faut du débit important pour refroidir des GWs !
Limitation au dimensionnement et à la productivité des centrales thermiques

Sur le rendement

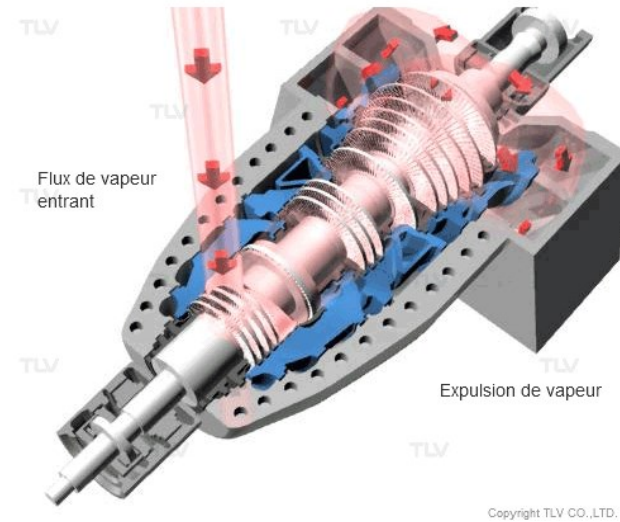
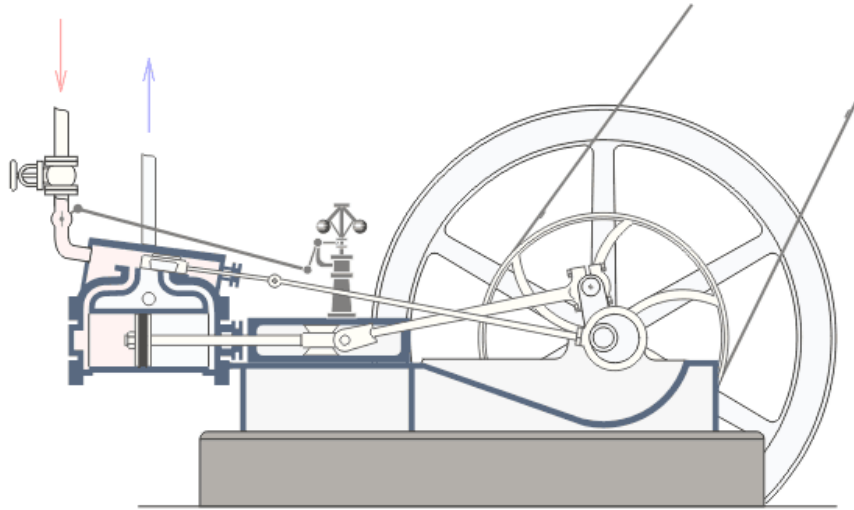
- On a intérêt à une grande différence de température entre source chaude et froide
- **un moteur thermique n'a pas un bon rendement** et génère beaucoup de chaleur : $\eta = 20 - 50\%$
- Le rendement optimal de Carnot est une limite réversible très lente (puissance)
Rendement pour puissance maximale (Curzon-Ahlborn)

$$\eta = 1 - \sqrt{\frac{T_E}{T_C}}$$

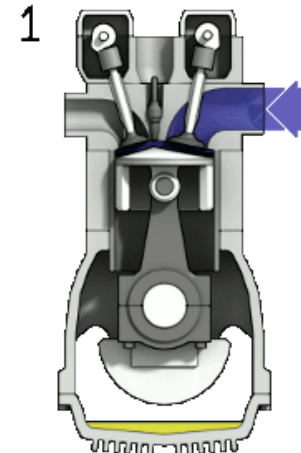
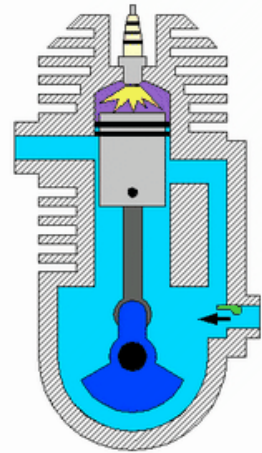


Moteurs thermiques les plus courants

Combustion externe : vapeur chaude et haute pression => machine de Watt et turbine moderne



Combustion interne : 2 temps et 4 temps, combustible liquide (essence, diesel,...)

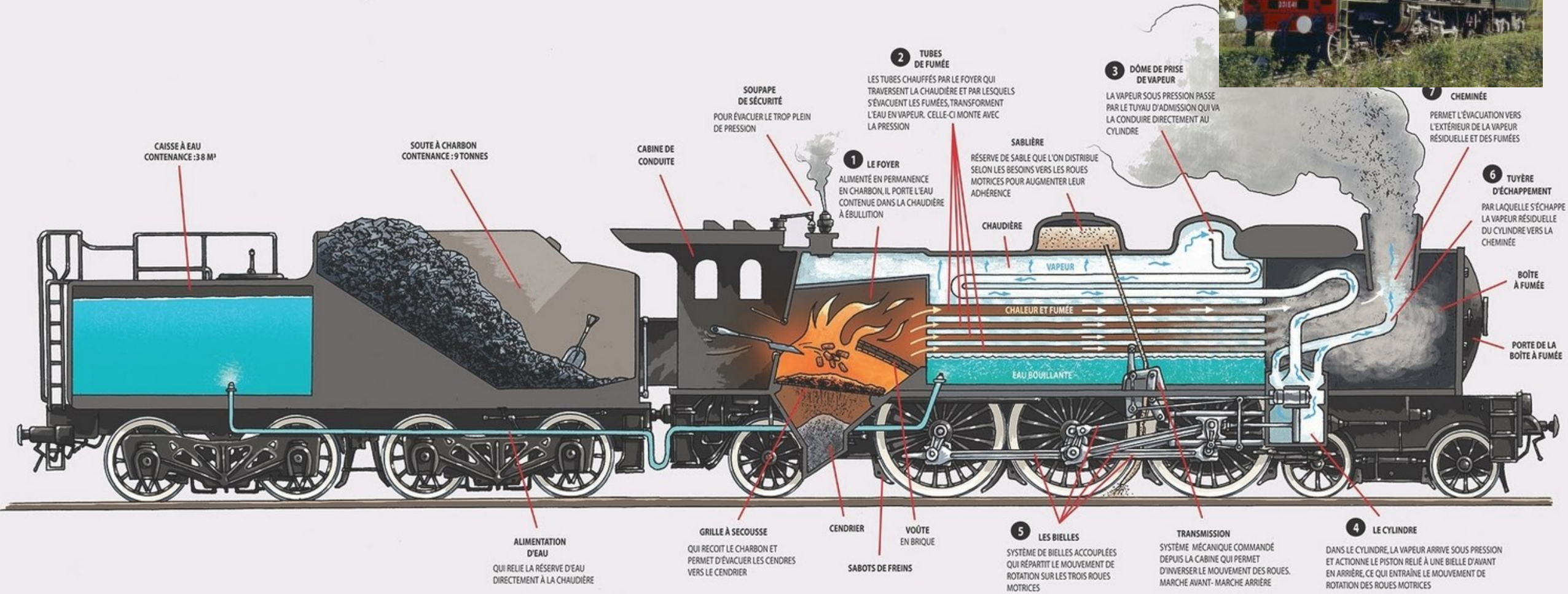


Locomotive à vapeur

1938

Poids : 107 tonnes

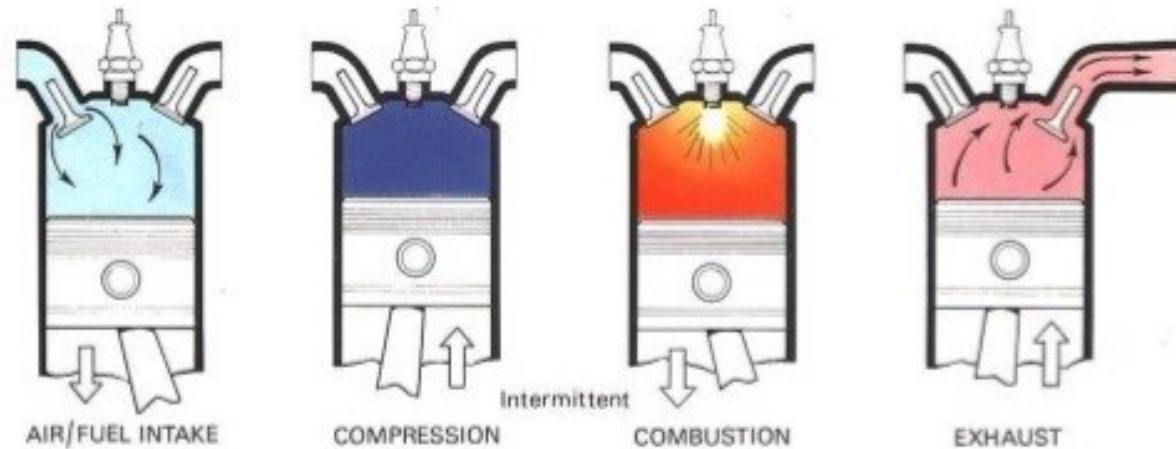
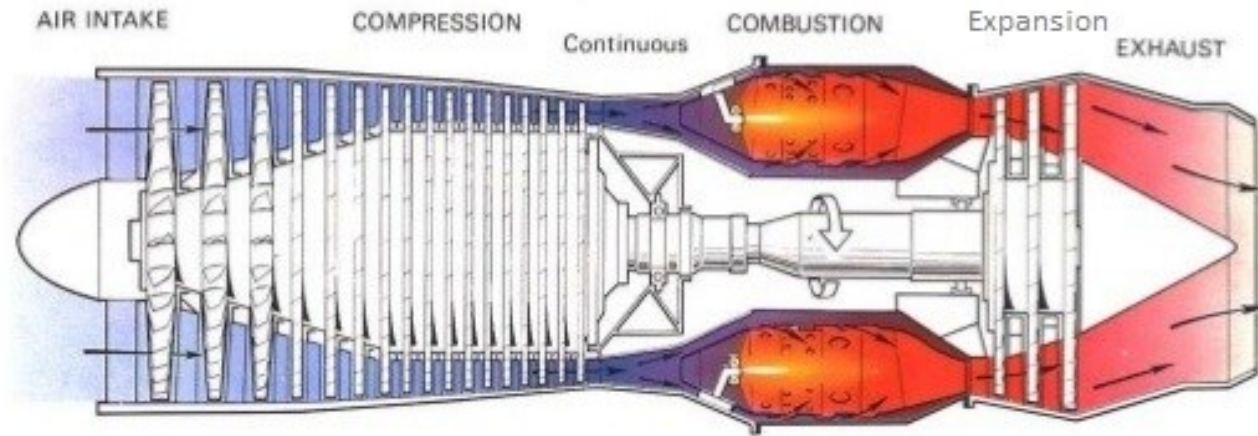
Vitesse de service : 140 km/h



Le turboréacteur

Idéal pour les grandes vitesses, au-delà des limites des hélices

- machine thermique avec turbine qui convertit pression en énergie cinétique
- plus principe de réaction (propulsion par éjection)
- Puissance = 1-10 MW



Electricité : la mécanique des électrons

Les électrons canalisés dans des fils métalliques ou semi-conducteurs (le courant électrique) sont

$$P = UI$$

- accélérés par une tension => crée du **courant**
- déviés par un champ magnétique => **force de Laplace** => couplage mécanique
- freinés par des frottements => **effet Joule** => couplage thermodynamique

On peut créer une tension avec

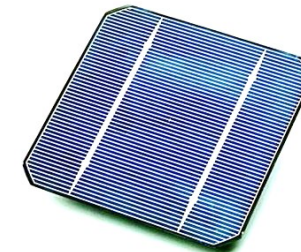
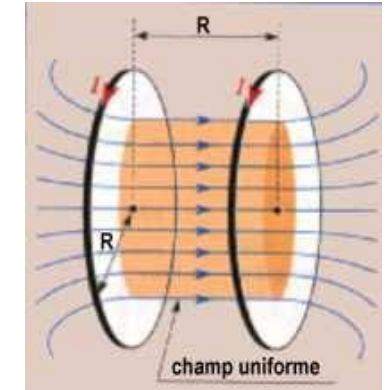
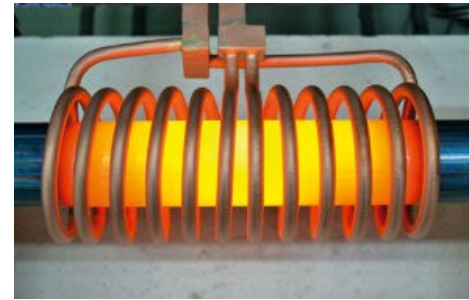
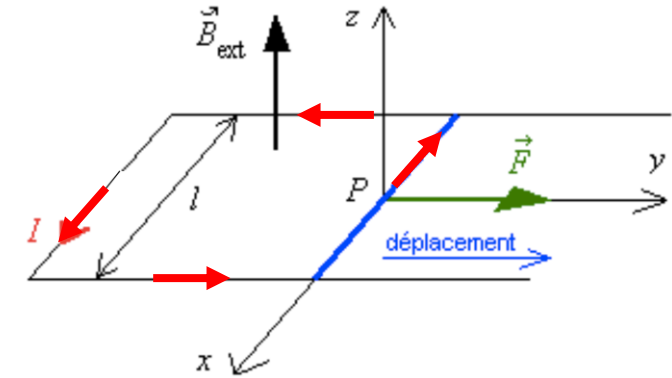
- un accumulateur / pile
- un champ magnétique variable (**induction**)

On peut créer un champ magnétique avec

- un aimant permanent
- une boucle de courant (**électro-aimant**)

Conversion lumière \Leftrightarrow courant (**effet photoélectrique, LED**)

Et beaucoup beaucoup d'autres choses...



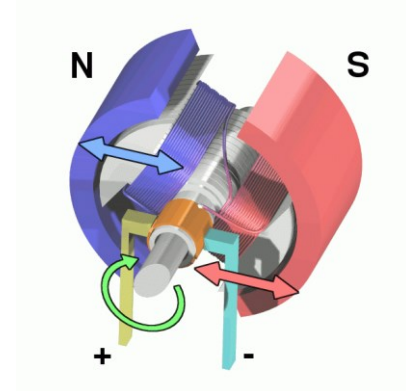
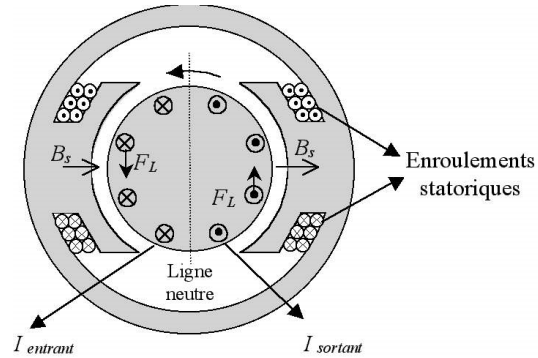
Moteur électrique

Énormément d'avantages : peu de contact, miniaturisable, bon rendement (80-95%), très pilotable, bon couple, fiable
mais grosse dépendance au cuivre

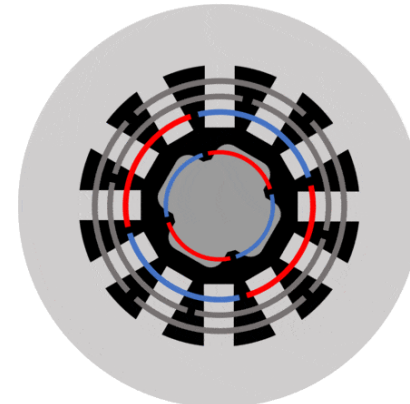
Moteur à courant continu
(en général avec aimant permanent)

Exemples de moteurs sans aimants (sans terres rares!)

Moteur asynchrone (champ tournant)
fonctionnement possible en génératrice



Moteur synchrone à rotor bobiné (Renault Zoé)
sans aimant permanent



Intérêt industriel

Importants gains de productivité pour une faible consommation énergétique

métier à tisser 2 kW



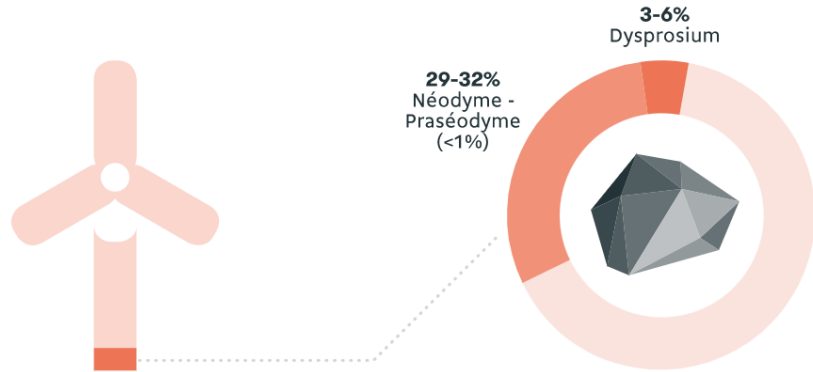
Scie industrielle 22 kW



Alternateur : production d'énergie électrique

Dynamo (**aimant permanent**)

pas forcément besoin de terres rares



6%

des éoliennes terrestres en France utilisent des terres rares

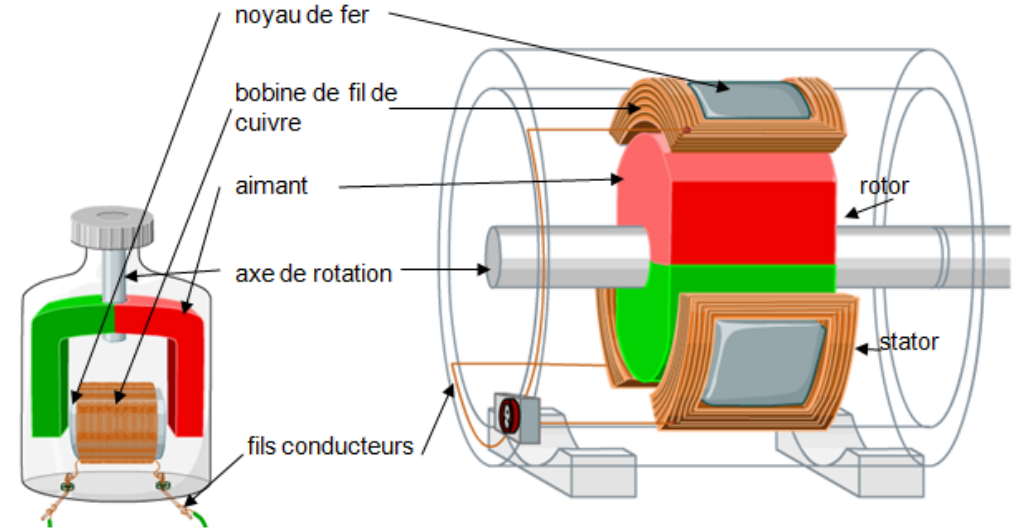
Composition aimants

Composition typique des aimants permanents avec des terres rares

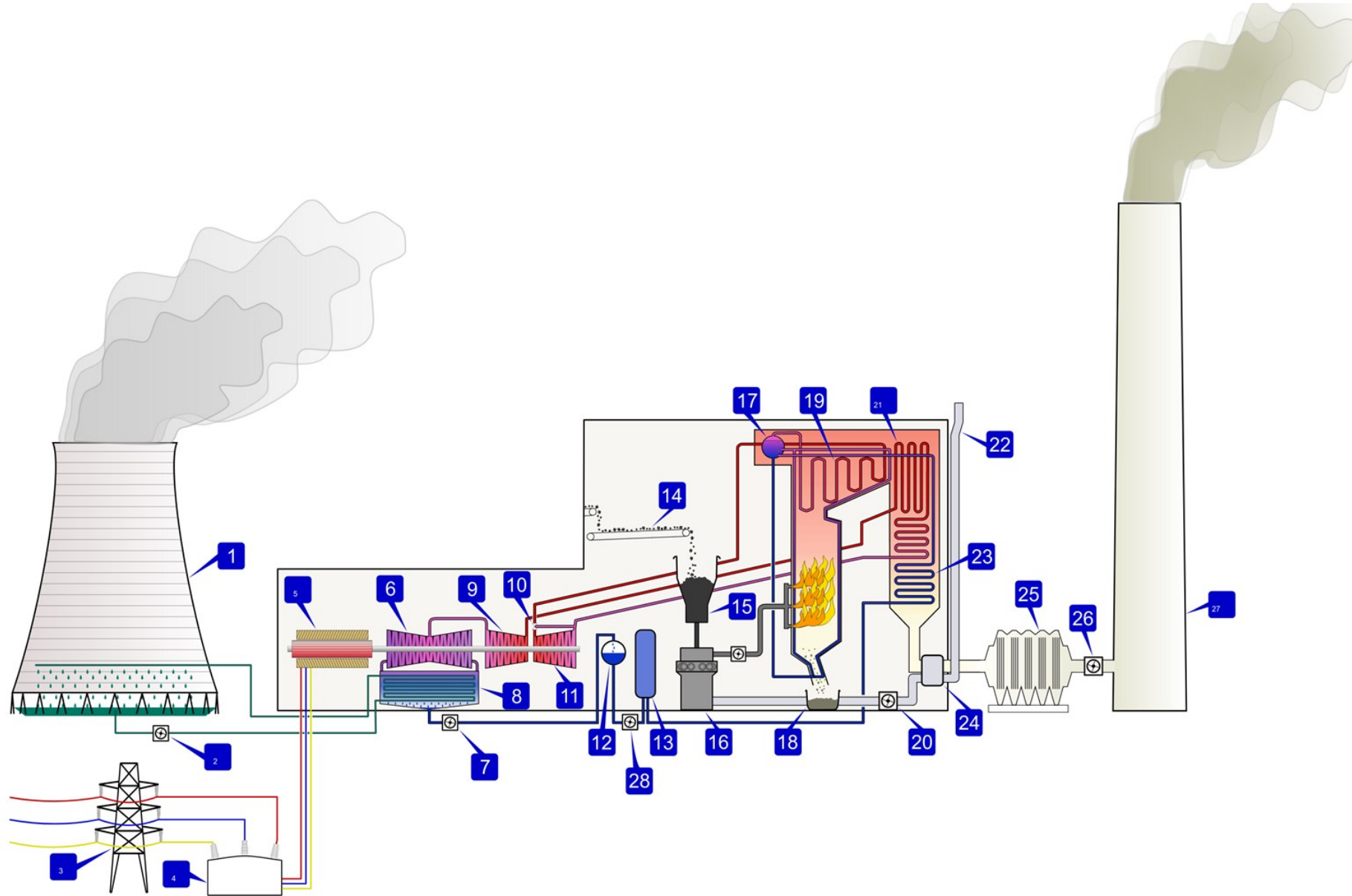
www.info-eolien.fr

Electro-aimants pour les alternateurs de centrales (jusqu'au GW)

$\eta \approx 95 \%$



Recharger son portable au charbon ou à l'uranium



Avec ou sans cheminée



Potentiel standard d'oxydo-réduction E^0

Unité : le **volt V**

Beaucoup d'autres couples Ox / Red

Réducteur le plus fort

Oxydant	Réducteur	E^0 (V)
Li^+	Li	-3,04
K^+	K	-2,92
Ba^{2+}	Ba	-2,9
Ni^{2+}	Ni	-0,257
Sn^{2+}	Sn	-0,14
Pb^{2+}	Pb	-0,13
H_3O^+	$\text{H}_2(\text{g})$	0
$\text{O}_2(\text{g})$	H_2O	1,23
$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$	Cr^{3+}	1,33
$\text{Cl}_2(\text{aq})$	Cl^-	1,39
PbO_2	Pb^{2+}	1,45
MnO_4^-	Mn^{2+}	1,51
Au^{3+}	Au	1,52
MnO_4^-	MnO_2	1,69
S_2	SO_4^{2-}	2,1
F_2	F^-	2,87

Force des oxydants

Force des réducteurs

Oxydant le plus fort

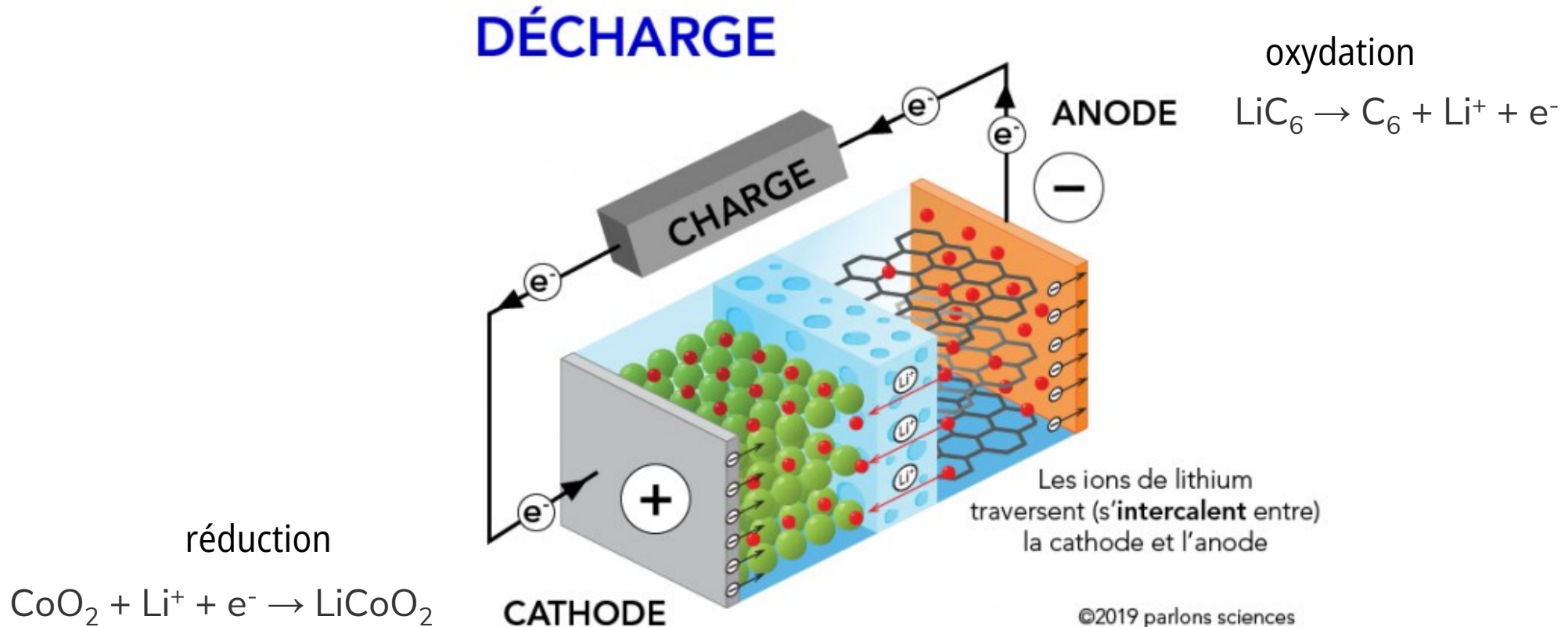
© L. Miseur

Cellule électrochimique : batterie

Principe : séparer le couple oxydant / réducteur pour rediriger l'échange d'électron dans un circuit électrique

Réversible / rechargeable => **accumulateur**, non-rechargeable => **pile**

Exemple **batterie Li-Ion** : équilibre globale $\text{LiC}_6 + \text{CoO}_2 \rightleftharpoons \text{C}_6 + \text{LiCoO}_2$



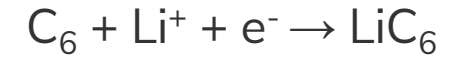
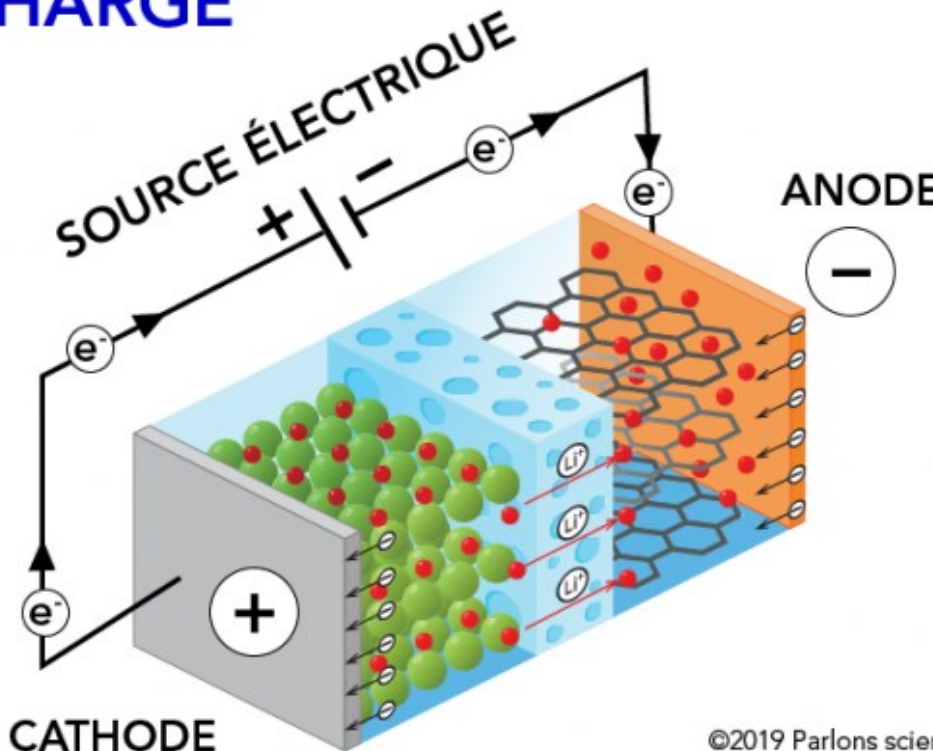
Cellule électrochimique : batterie

Principe : séparer le couple oxydant / réducteur pour rediriger l'échange d'électron dans un circuit électrique

Réversible / rechargeable => **accumulateur**, non-rechargeable => **pile**

Exemple **batterie Li-Ion** : équilibre globale $\text{LiC}_6 + \text{CoO}_2 \rightleftharpoons \text{C}_6 + \text{LiCoO}_2$

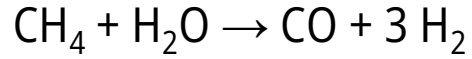
CHARGE



Batterie de Renault Zoé
densité énergétique 134 Wh/kg
390 kg pour 52 kWh

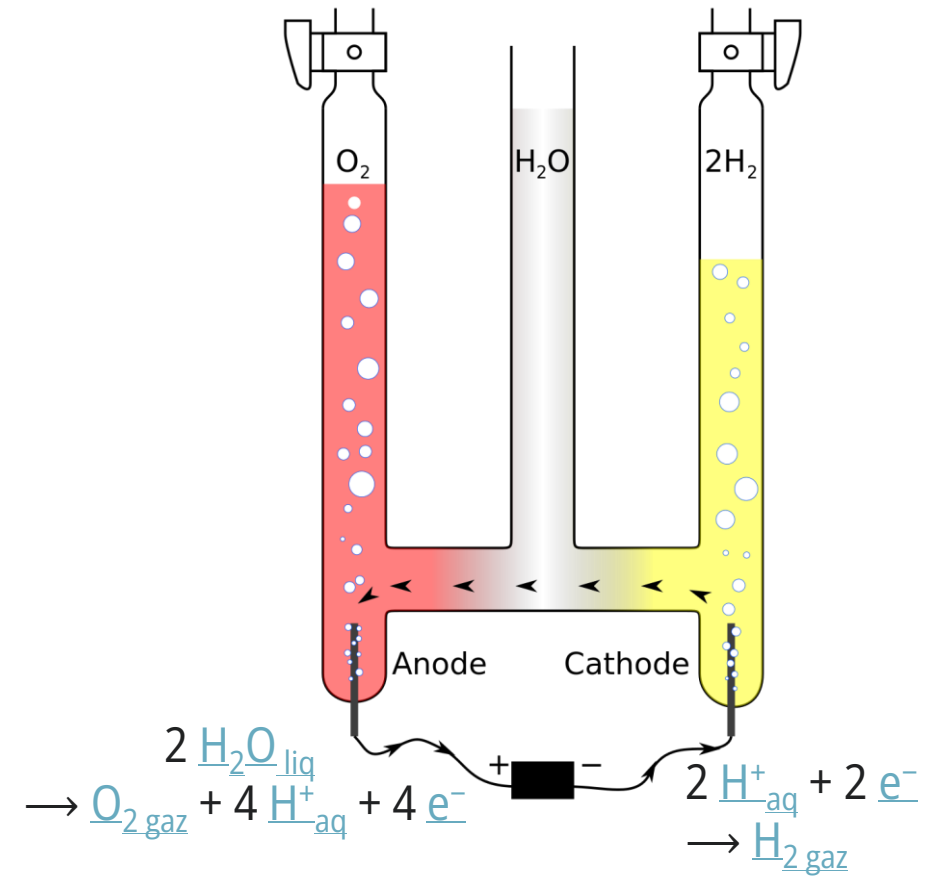
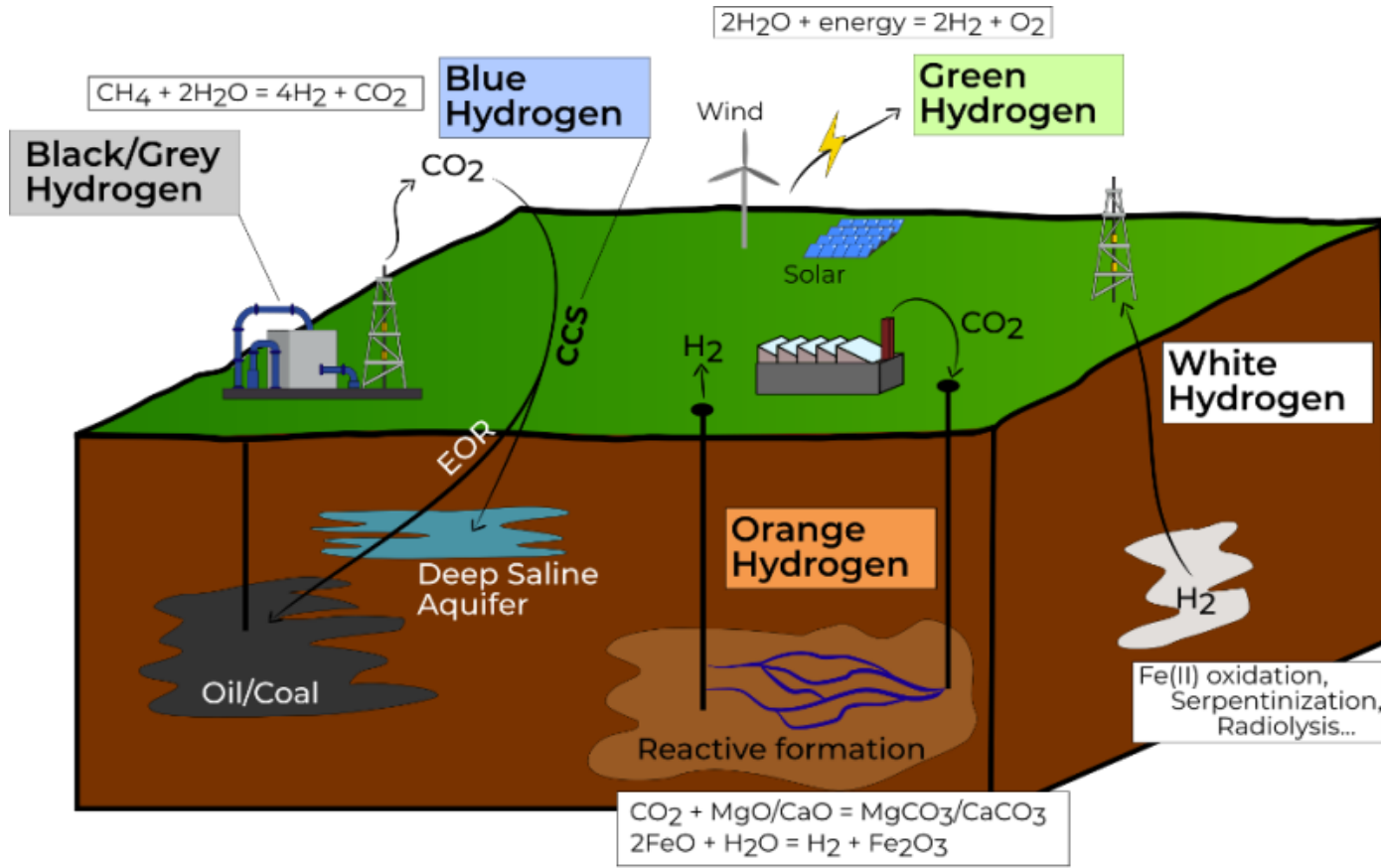
Production d'hydrogène de toutes les couleurs !

Reformage du méthane : source fossile, consomme beaucoup de chaleur



Électrolyse de l'eau : consomme beaucoup de courant, rendement faible

Autres hypothèses

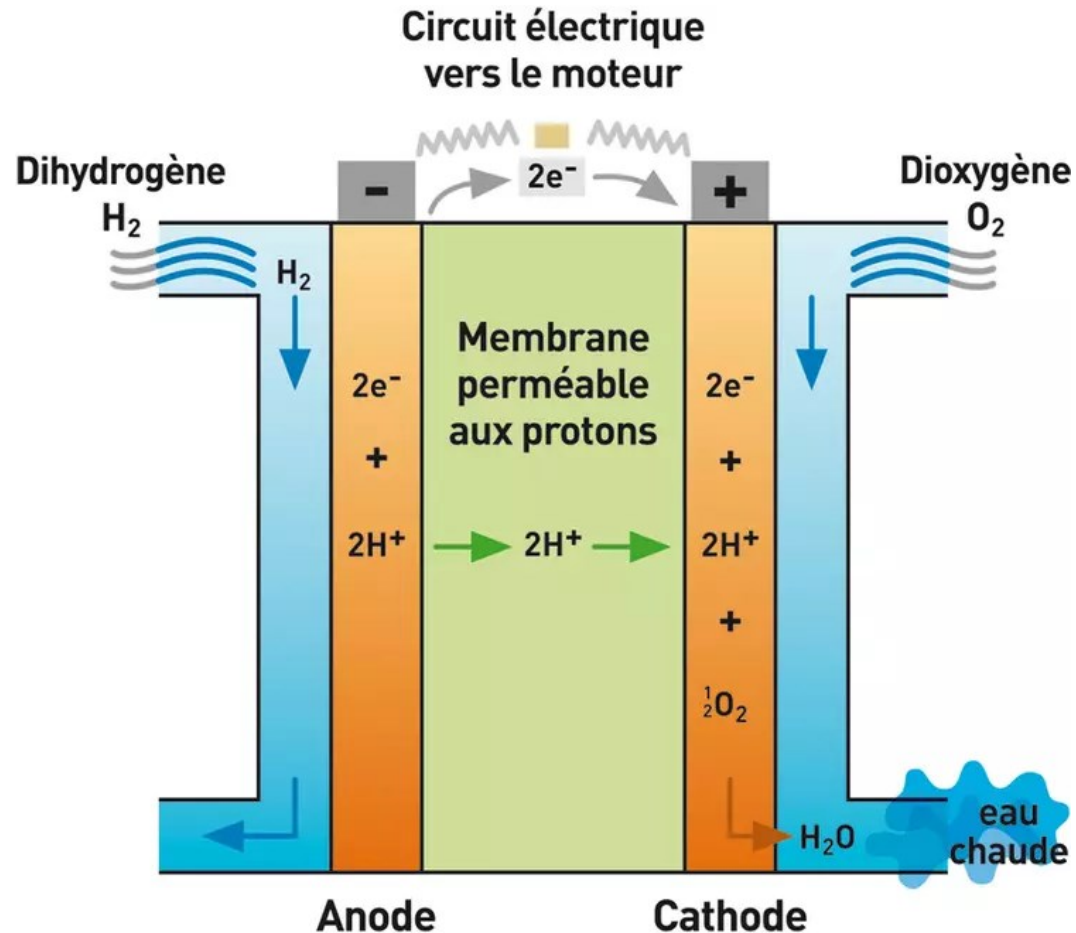
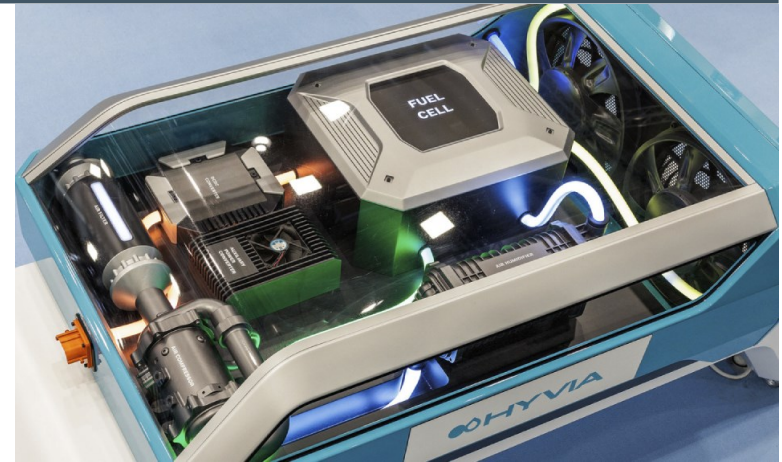


Hydrogène : pile à combustible

Électrolyse inverse de l'eau => génère une tension

procédé qui marche mais cher, utilisation pour l'instant très spécifique

Rendement pas très bon, 30-50%, dégage de la chaleur



Energie et information

En raison du second principe, écrire / effacer de l'information consomme de l'énergie : limite de Landauer

Progrès exponentiels de l'efficacité des processeurs : Loi de Koomey

Mais effet rebond et forte croissance des usages ! => *pollution informationnelle, de l'attention (?)*

En recherche académique, CNRS Idris : Jean Zay => 2.5 MW, projet Exascale => 20 MW



Statistiques de production et consommation d'énergie

usages, ordres de grandeurs, économie, couplage aux activités humaines

Ordres de grandeur : du microscopique...

À l'échelle individuelle et journalière en kWh

essence : 1000L / an => 27 kWh / jour finale => 8 kWh / jour utile

région	primaire	finale	électrique
world	59	41	8
USA	210	149	32
France	117	73	18

Energie utile	Consommation journalière (kWh)	Puissance typique (kW)
Frigo	0.13	0.1
Ordinateur portable	1	0.1
Eau chaude	2.2	2
chauffage	5	10
voiture	10	70

Reconstitution des consommations d'électricité spécifique en 2016 (TWh)

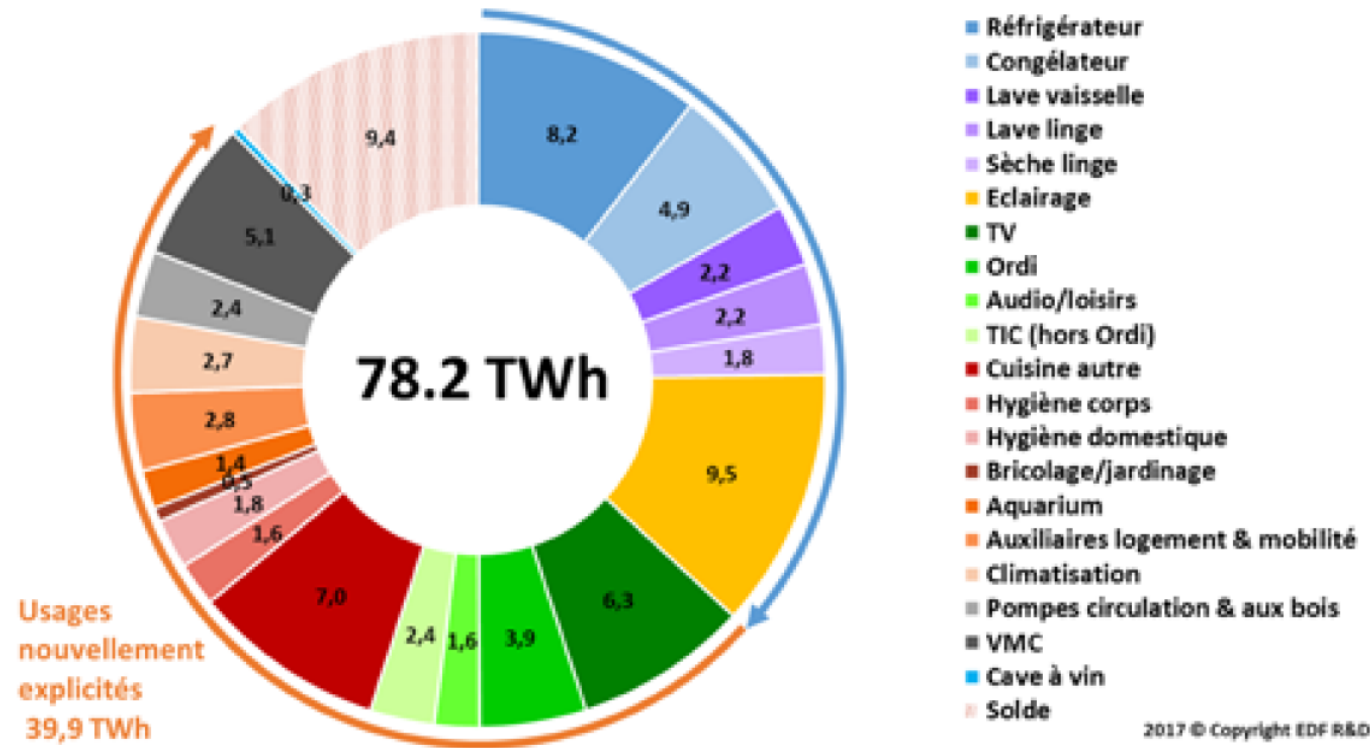


Figure 4. Estimation et décomposition du poste électricité spécifique en 2016

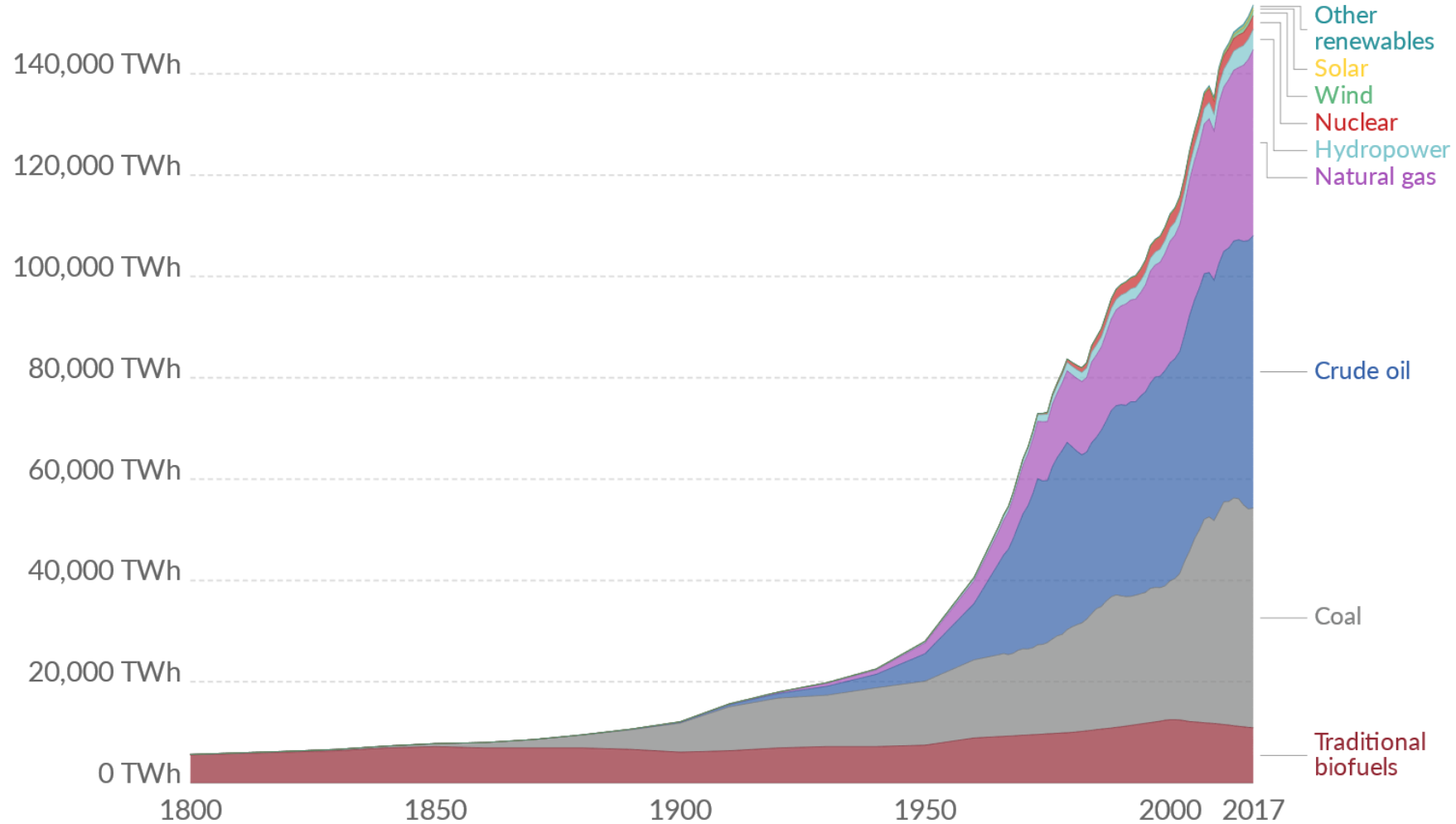
Source : EDF R&D

...au macroscopique

Global primary energy consumption

Global primary energy consumption, measured in terawatt-hours (TWh) per year. Here 'other renewables' are renewable technologies not including solar, wind, hydropower and traditional biofuels.

Our World
in Data

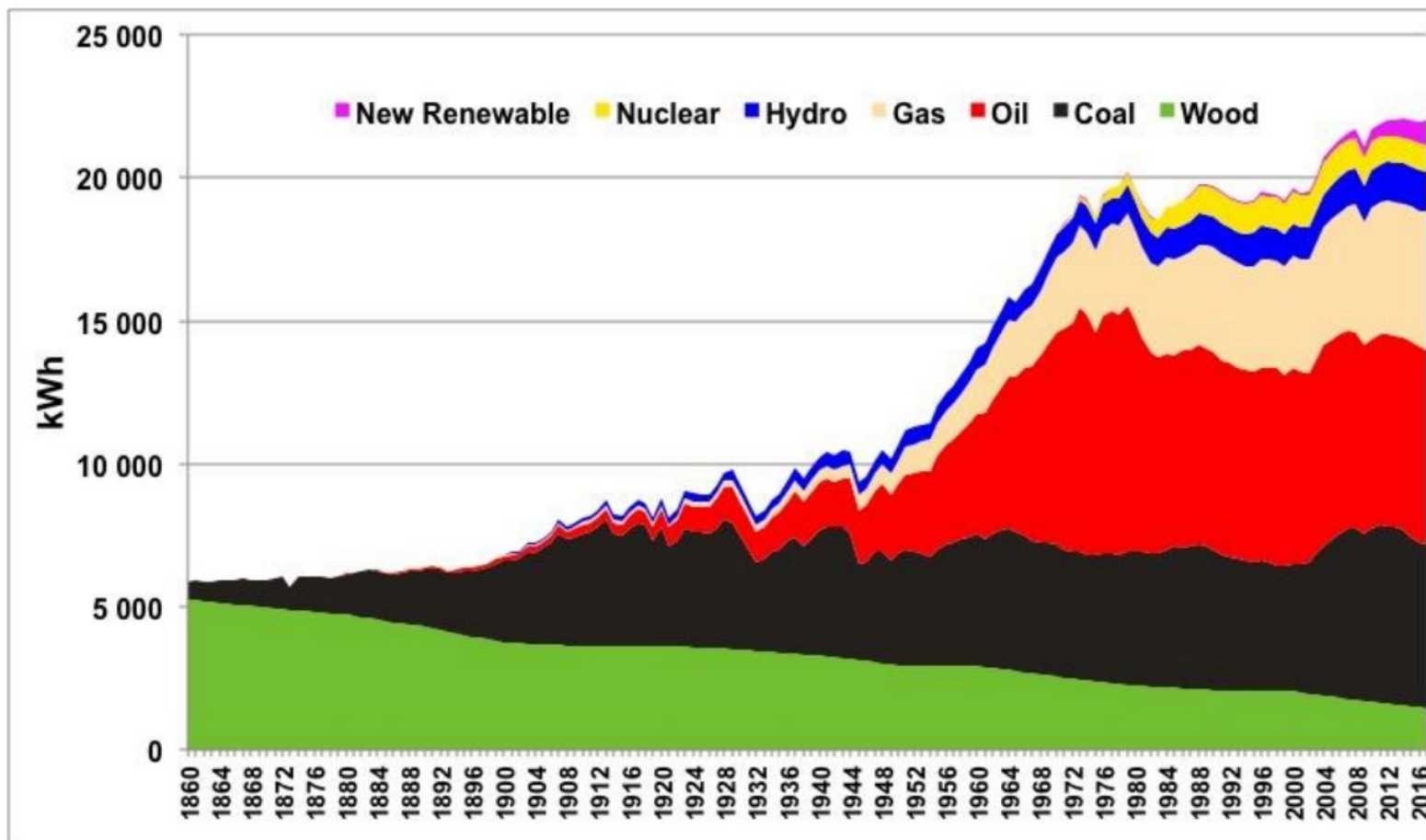


Source: Vaclav Smil (2017) and BP Statistical Review of World Energy

CC BY

...au macroscopique

Energie primaire par habitant

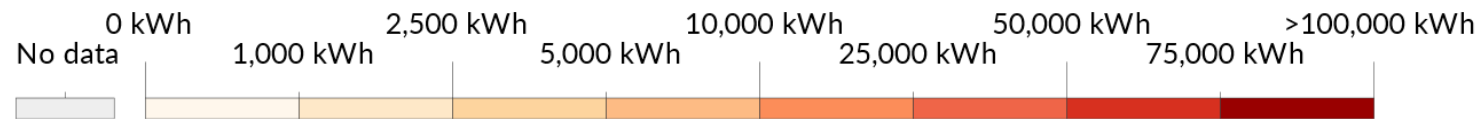
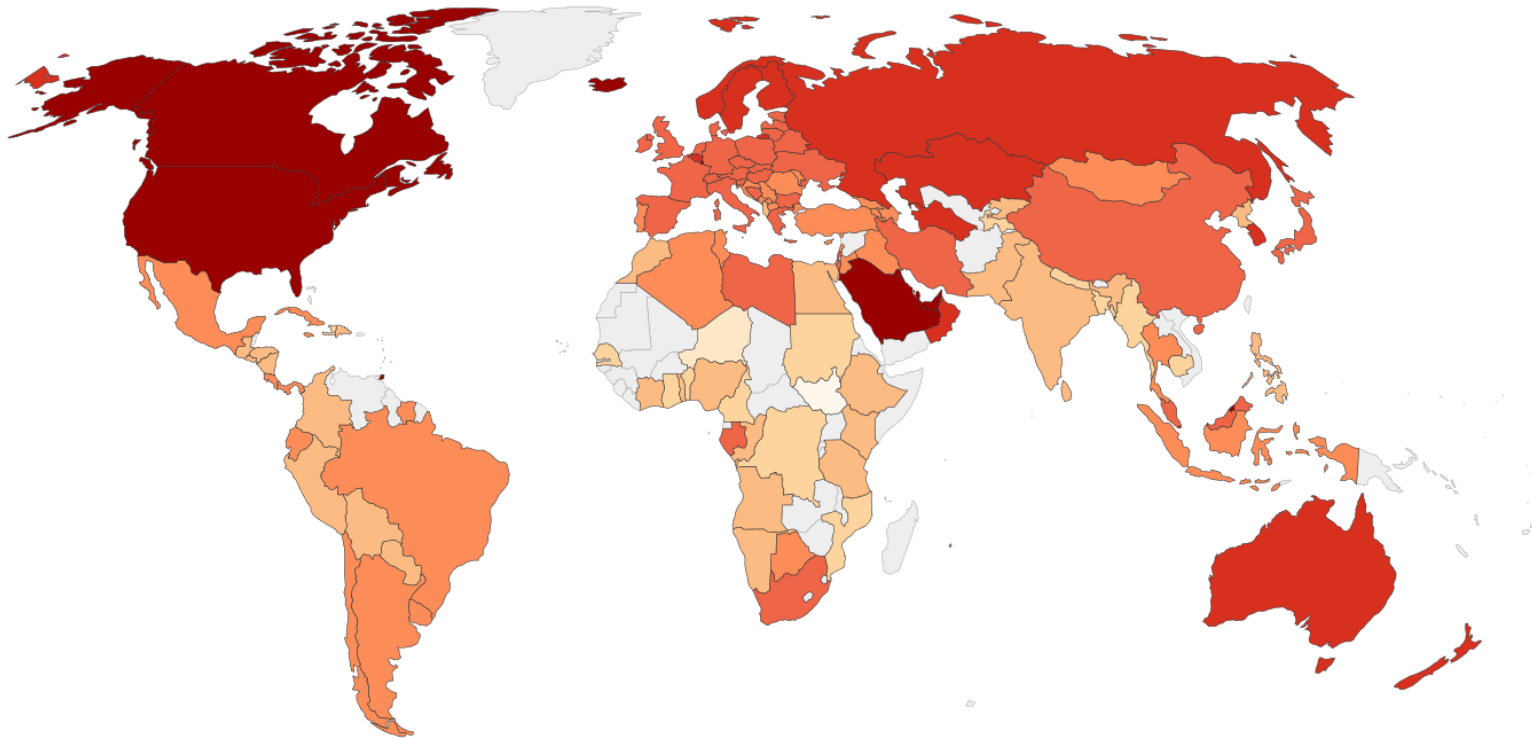


...au macroscopique

Energy use per capita, 2015

Annual average per capita energy consumption is measured in kilowatt-hours per person per year.

Our World
in Data

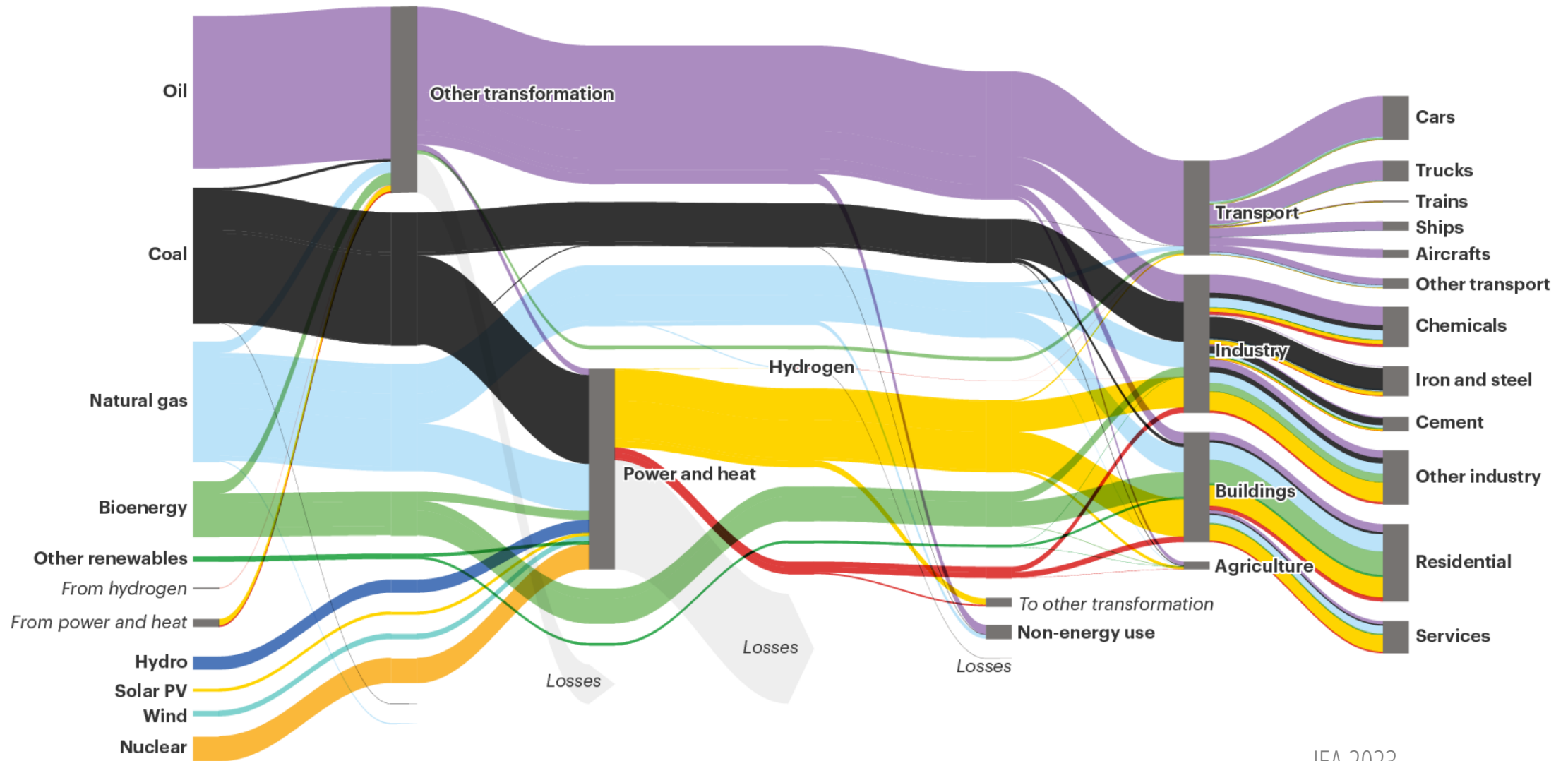


Source: International Energy Agency (IEA) via The World Bank

OurWorldInData.org/energy-production-and-changing-energy-sources/ • CC BY

Mix énergétique mondiale

2021

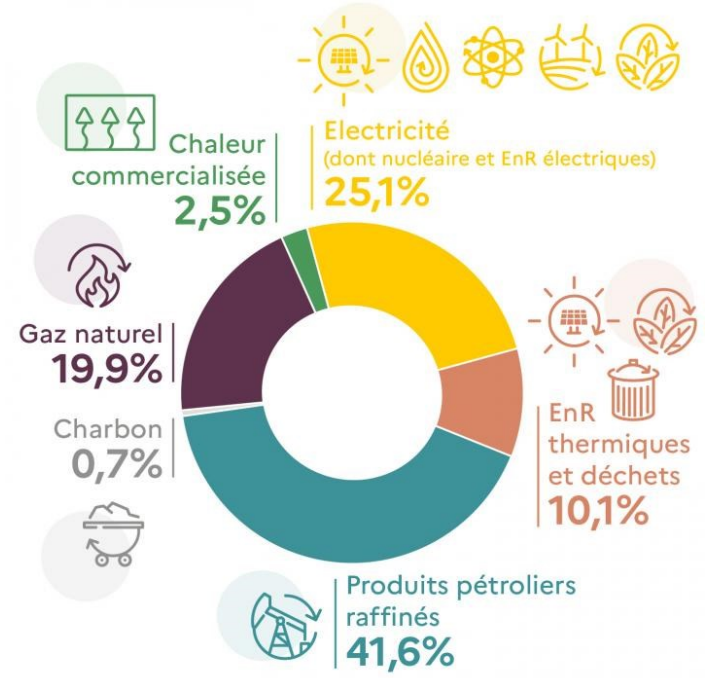
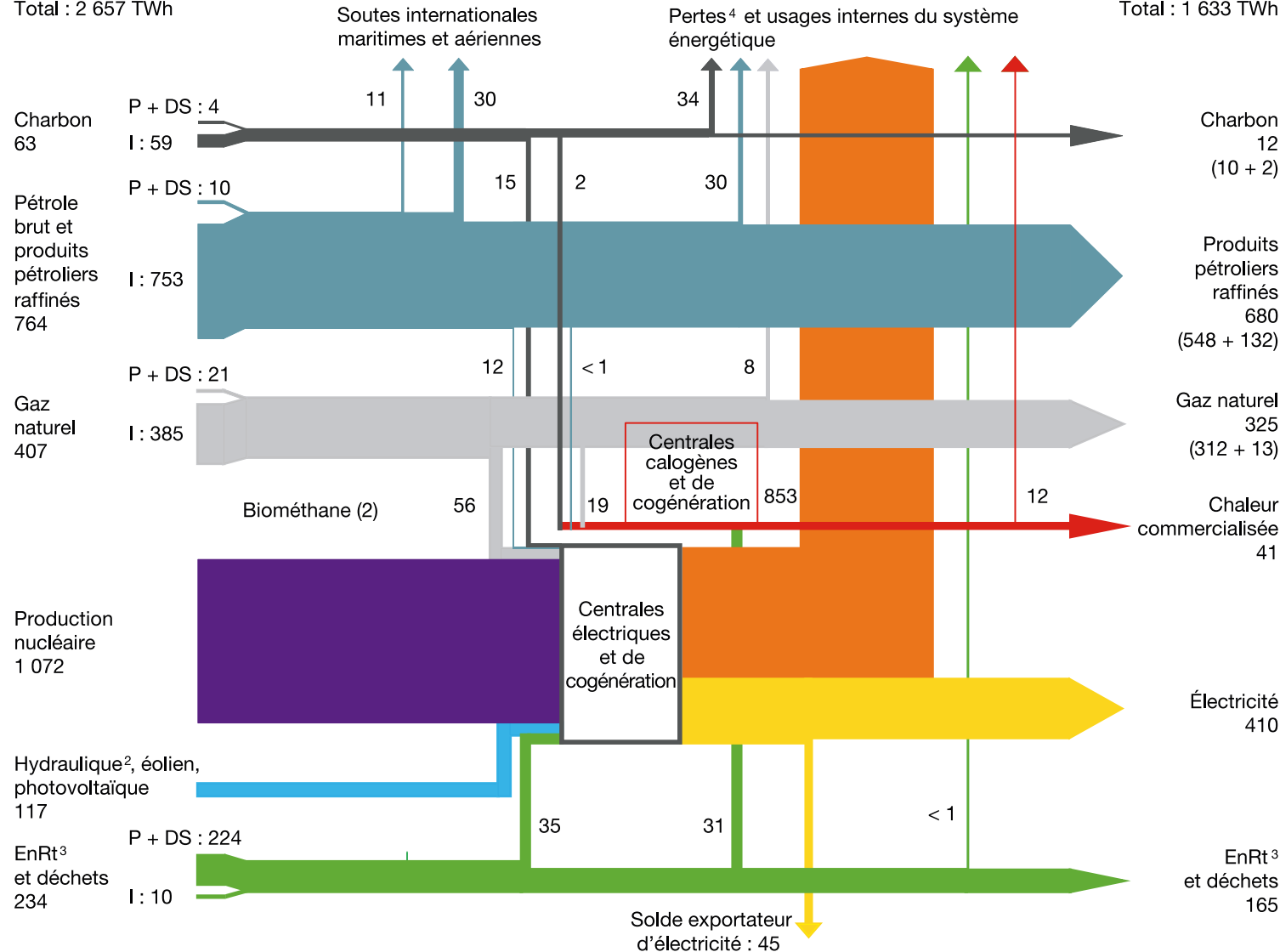


Mix énergétique en France

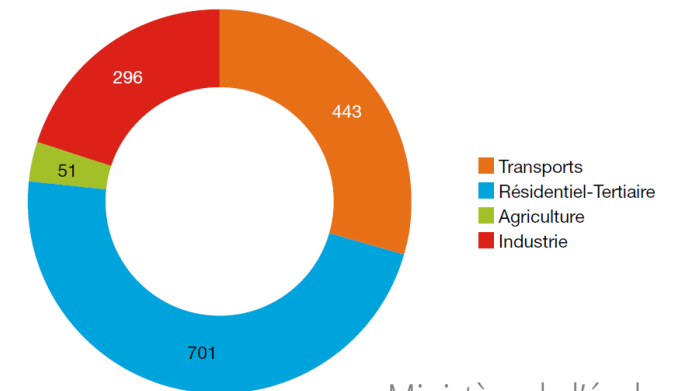
En TWh, en 2020 (données non corrigées des variations climatiques)

Ressources primaires¹
Total : 2 657 TWh

Consommation finale⁵
Total : 1 633 TWh



CONSOMMATION FINALE ÉNERGÉTIQUE PAR SECTEUR EN FRANCE
TOTAL en 2020 : 1 490 TWh (données non corrigées des variations climatiques)



Aspects socio-économiques

Au-delà de la technique

Efficacité énergétique

Consommer **le moins d'énergie pour un même service** et optimiser les conversions

Exemple : **trajet quotidien en milieu urbain de 12 km**

	vélo		voiture
durée du trajet	1 heure	/ 2	30 mins
Énergie primaire consommée	0.1 kWh	x100	1L essence ≈ 10 kWh
puissance moyenne	100 W	x200	20 kW
puissance maximale	350 W	x200	70 kW
coût énergie	0		2 €

Les usages ne sont pas que gouvernés par l'optimisation énergétique ou par l'argent, beaucoup d'autres facteurs rentrent en compte.

Efficacité énergétique : effets économiques

Effet rebond : les gains d'efficacité des moteurs thermiques de voitures compensés par leur augmentation de poids

Dépendance au chemin : difficulté à sortir d'une infrastructure systémique et monopolistique. La majorité des grandes villes à travers le monde tentent de sortir du modèle tout-voiture implémenté dans les années 1950-1990.



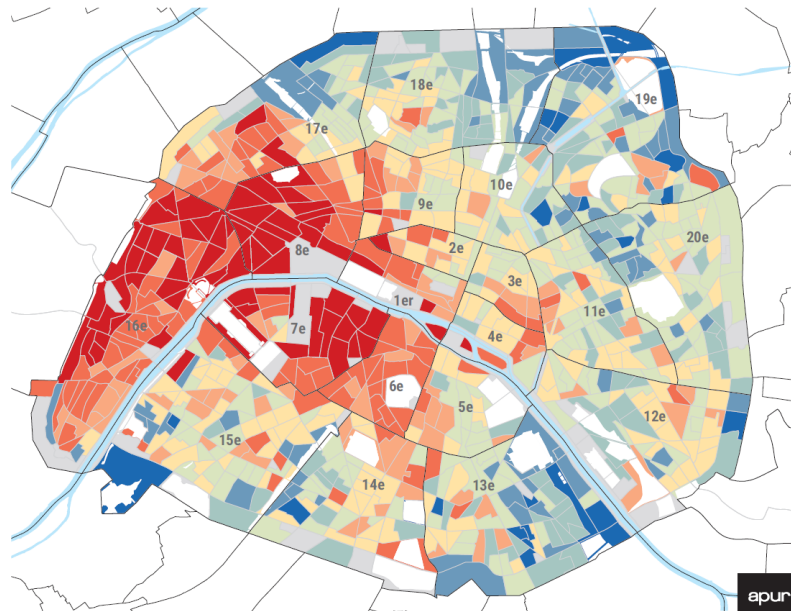
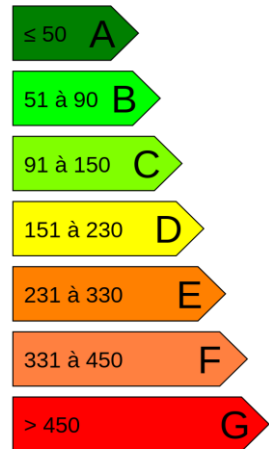
une ville sans voiture, oui mais en vacances



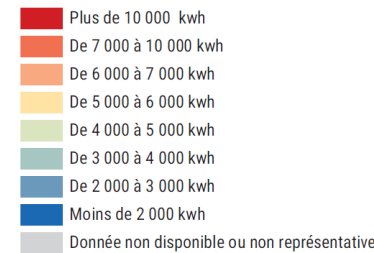
Efficacité énergétique et inégalités sociales

Étude de l'APUR sur les consommations d'énergie finale des foyers.

Consommation énergétique
en kWh/m²/an

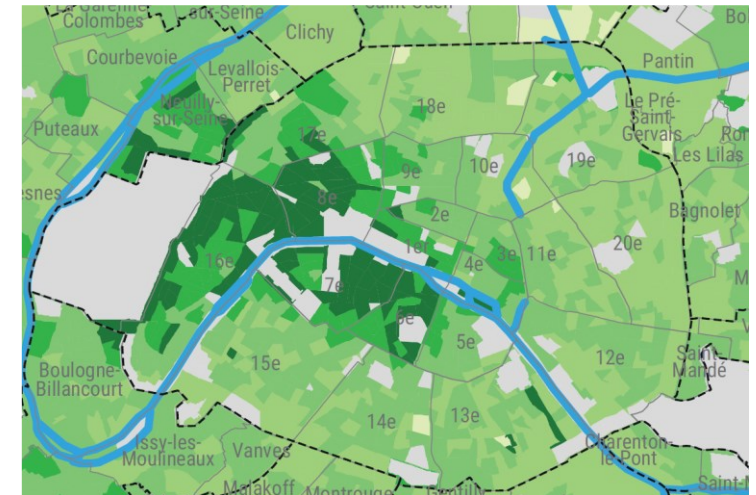


CONSOMMATION RÉELLE DE GAZ,
D'ÉLECTRICITÉ ET DE CHAUFFAGE
URBAIN DES LOGEMENTS
(EN KWHEF/HAB/AN)

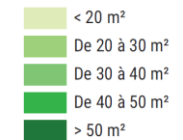


Les emprises des principaux équipements et espaces
verts apparaissent en blanc.

Sources : Apur, Enedis, GRDF, CPCU 2020, Insee RP 2018



SURFACE HABITABLE MOYENNE*
PAR HABITANT (EN M²)



* La surface habitable moyenne par habitant est calculée à partir
de la connaissance de la surface habitable des logements du parc
privé et du parc social issue des bases de données DGFIP et RPLS
et de la population des ménages du recensement 2018.
Les logements vacants sont écartés.

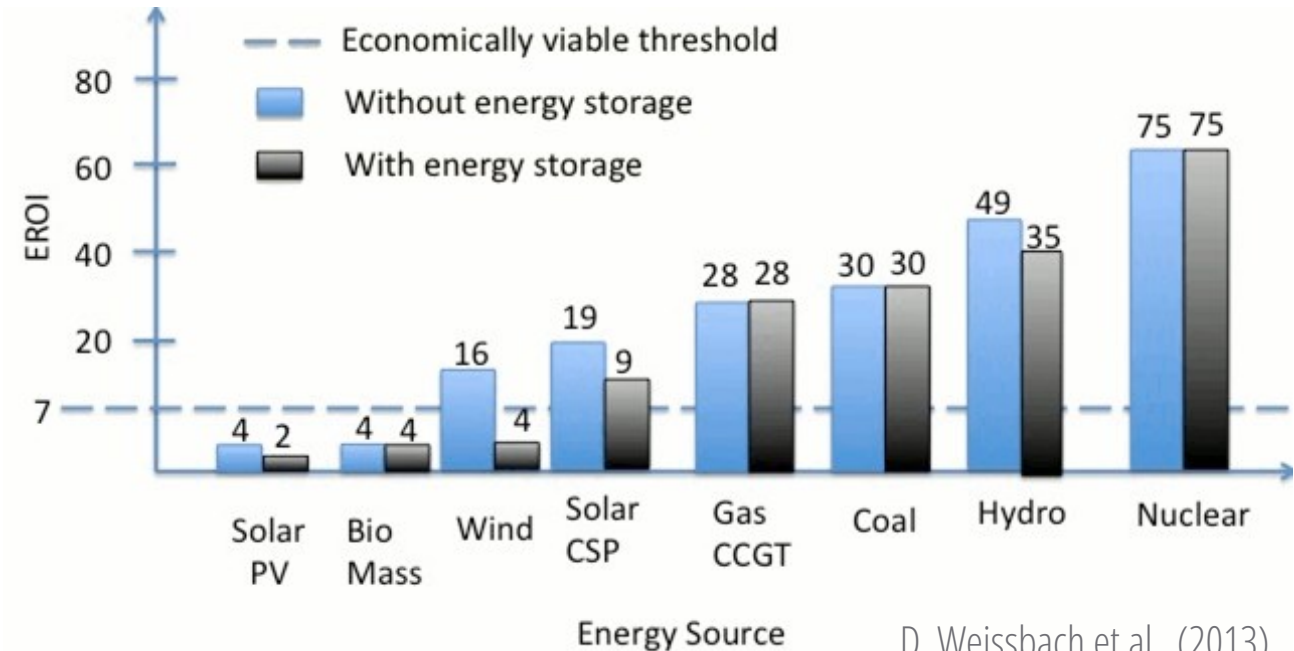
Les émissions carbone sont discutées par habitant
L'étiquette est donnée par m² et par logement

Maison individuelle : pertes surfaciques / énergie volumique => biais favorable aux grands logements !

Taux de retour énergétique

EROI : « energy return on (energy) invested »

$$\text{EROI} = \frac{\text{énergie récupérée dans un vecteur}}{\text{énergie pour l'extraire}}$$



Cependant

- Notion qui semble « physique » mais à forte teneur économique, dépend des procédés, du périmètre, notamment pour les sources intermittentes.
- Ce n'est probablement pas la principale raison du choix des énergies (spéculation financière pour le pétrole, développement massif du photovoltaïque par la baisse des coûts...)
- Favorise les infrastructures de grande échelle
- Pour le stockage : énergie stockée / énergie investie généralement faible mais le gain est parfois ailleurs => exemple du drone qui remplace l'hélicoptère pour des missions d'observation

Energie grise

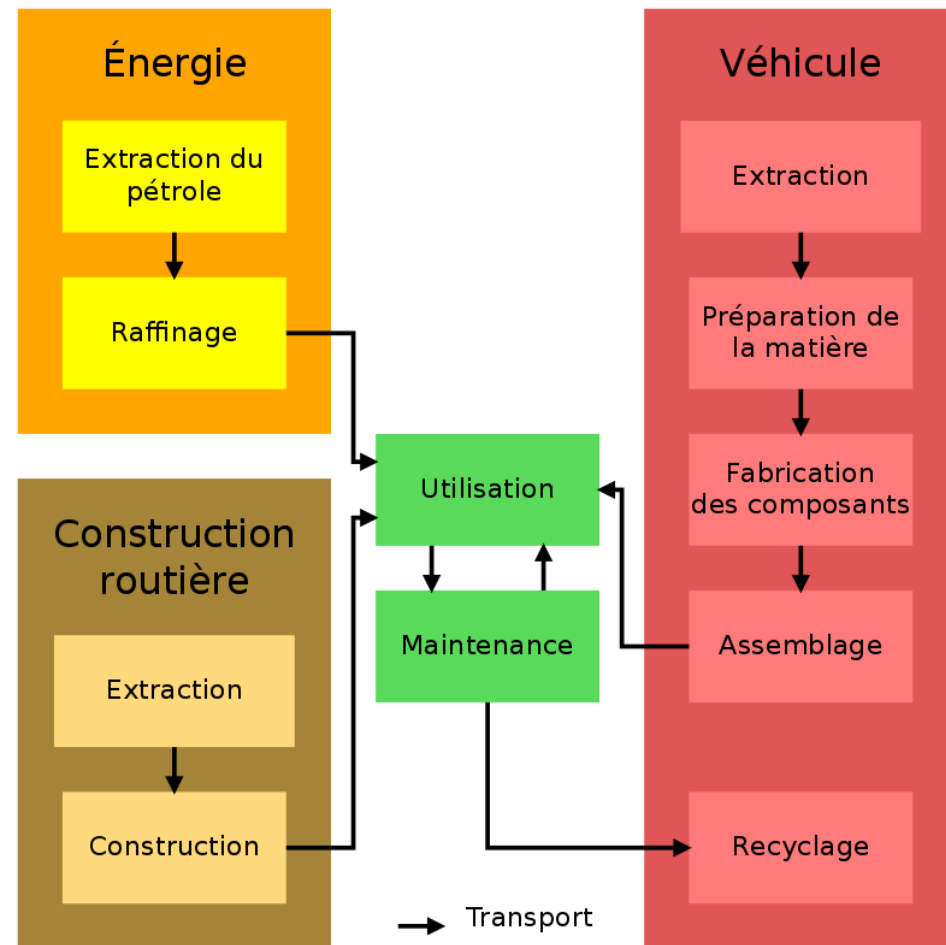
Lors d'une **analyse de cycle de vie d'un matériau**, y compris vecteur énergétique ou batterie :
énergie pour la fabrication / transport / entretien / recyclage / rebut
mais **pas l'énergie consommée lors de l'usage**

Difficile à calculer mais plus pertinent.

Montre la dépendance structurelle et systémique
(I. Illich sur la voiture)
et de lutter contre l'obsolescence programmée

Exemple d'application (Etude Ademe 2022):

« Sur l'ensemble de sa durée de vie, une voiture électrique roulant en France a un impact carbone 2 à 3 fois inférieur à celui d'un modèle similaire thermique, à condition que sa batterie soit de capacité raisonnable (< 60 kWh) »



Pourquoi des énergies fossiles partout ?

des avantages techniques indéniables

faciles à stocker et transporter

très concentrées en énergie, puissance

ressources importantes, exploitables et pas cher

peut tout faire : chaleur, électricité, propulsion

utilisables de l'échelle individuelle à industrielle

utilisation optimisée et pilotable



un couplage avec les enjeux géostratégiques

- par l'**extractivisme**, couplé à la **finance** (UK, USA, pays du Golf,...)
- par la **puissance économique** : satisfaction des besoins, création de nouveaux marchés, mondialisation
- par la **puissance militaire** : capacité à gérer la production / logistique, couplée à la géopolitique des ressources

cela a été un choix politique tacite malgré les impacts environnementaux Fressoz, *Le Monde*, Juin 2023

« Les pays industriels ont "choisi" la croissance et le réchauffement climatique, et s'en sont remis à l'adaptation »

Résilience & autonomie vs flux continu & gains d'échelle

Flux tendu : « Arrêt » de la verrerie Duralux pendant 5 mois hiver 22-23 => en fait passage de 1300 à 1200 degrés pour éviter la prise en masse et la destruction du four.

Limites au gigantisme : transport maritime économe => gros flux à encaisser au niveau du port mais on le paie en camions et en infrastructure à la sortie.

Mal-adaptation des usages au dérèglement climatique :

« *manger une glace devant Netflix pendant une canicule* »

Chaîne du froid : puissance déterminée par les maximas de température pour assurer le service pendant les canicules.

Avec le réchauffement, on surdimensionne le système, qui surconsomme le reste de l'année. Et on utilise de l'eau pour évaporer si le ventilateur ne suffit plus lorsqu'on passe le seuil.

Pareil pour le datacenter ?!

⇒ Renforcement du problème

Solution : questionner & changer les usages et les besoins



Impacts environnementaux des énergies

climat, biodiversité, santé humaine, cycle de l'eau, usage des terres

Gaz à effet de serre

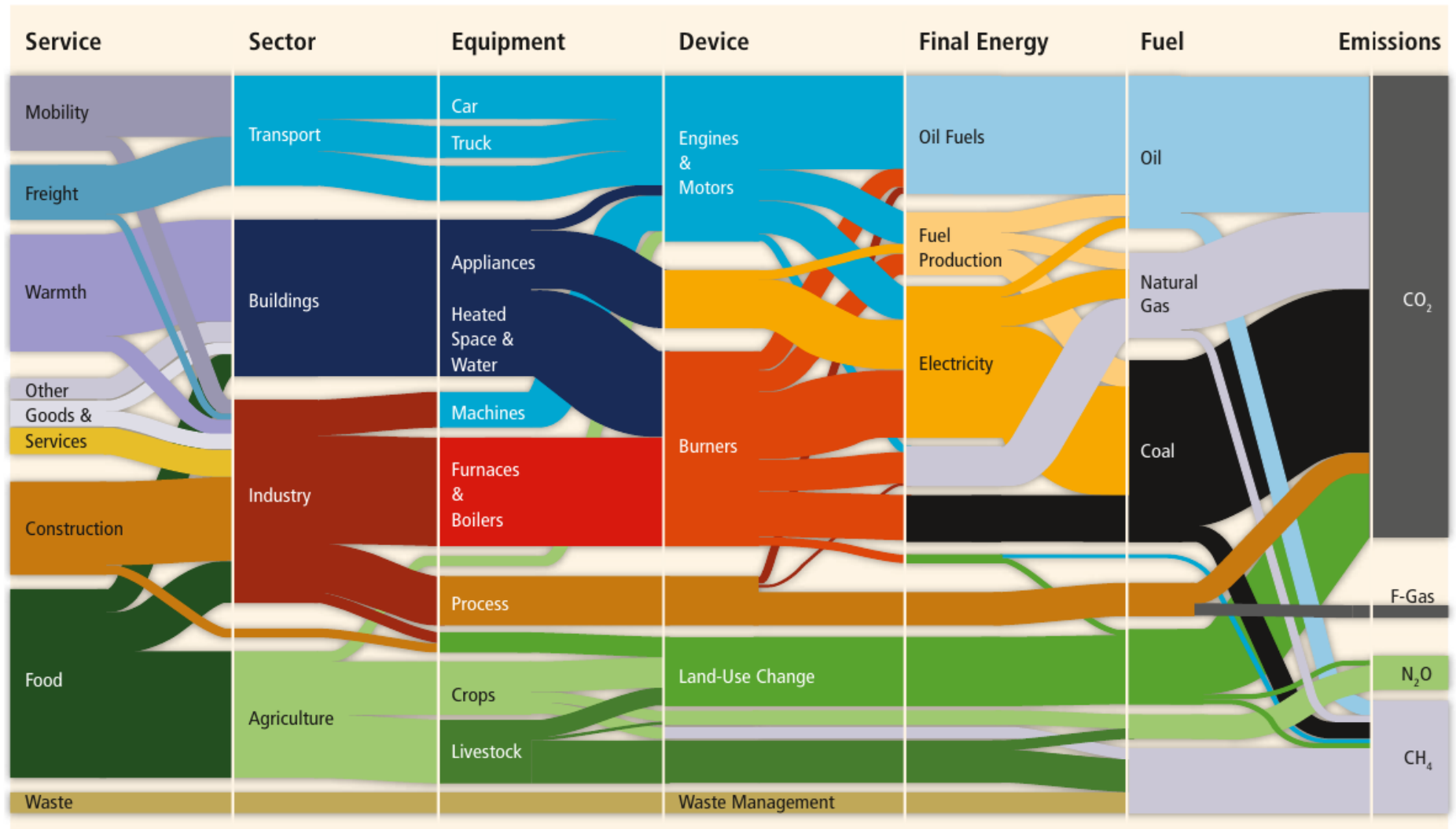


Figure 10.1 | A Sankey diagram showing the system boundaries of the industry sector and demonstrating how global anthropogenic emissions in 2010 arose from the chain of technologies and systems required to deliver final services triggered by human demand. The width of each line is proportional to GHG emissions released, and the sum of these widths along any vertical slice through the diagram is the same, representing all emissions in 2010 (Bajželj et al., 2013).

Pollutions et artificialisation

Combustions : transports & chaleur

- pollution de l'air (sanitaire) : émissions de Nox, de particules fines
- émissions de gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4 , SO , NO_x)
- pollution sonore et olfactive

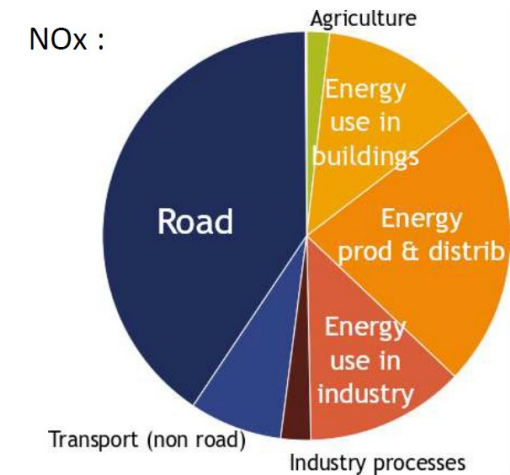
Infrastructures

- Transports + logistique : artificialisation des sols et fractionnement du territoire (biodiversité)
- Pollution sonore et lumineuse (biodiversité)
- Pollution de l'eau (PCB transformateurs)
- Barrages (biodiversité)

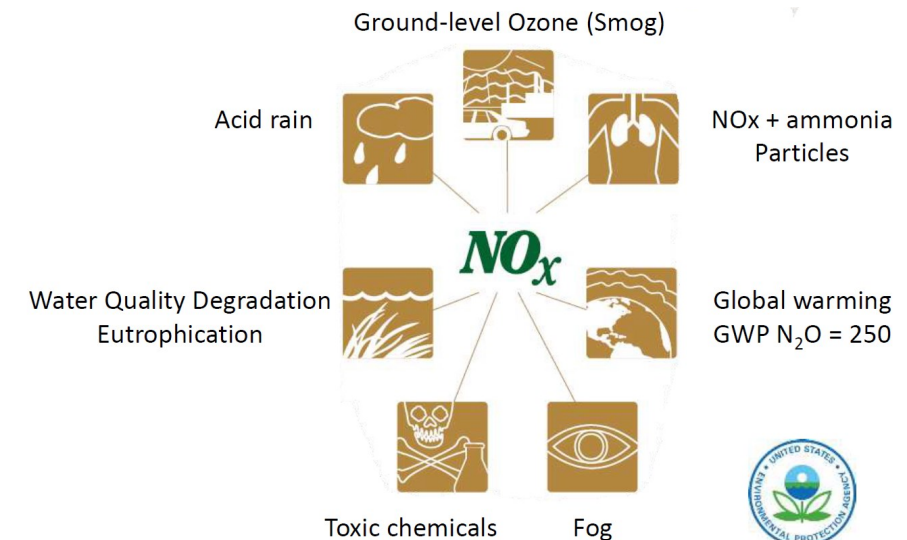
Nucléaire

- déchets à gérer de même que les déchets industriels toxiques

...



European Environment Agency



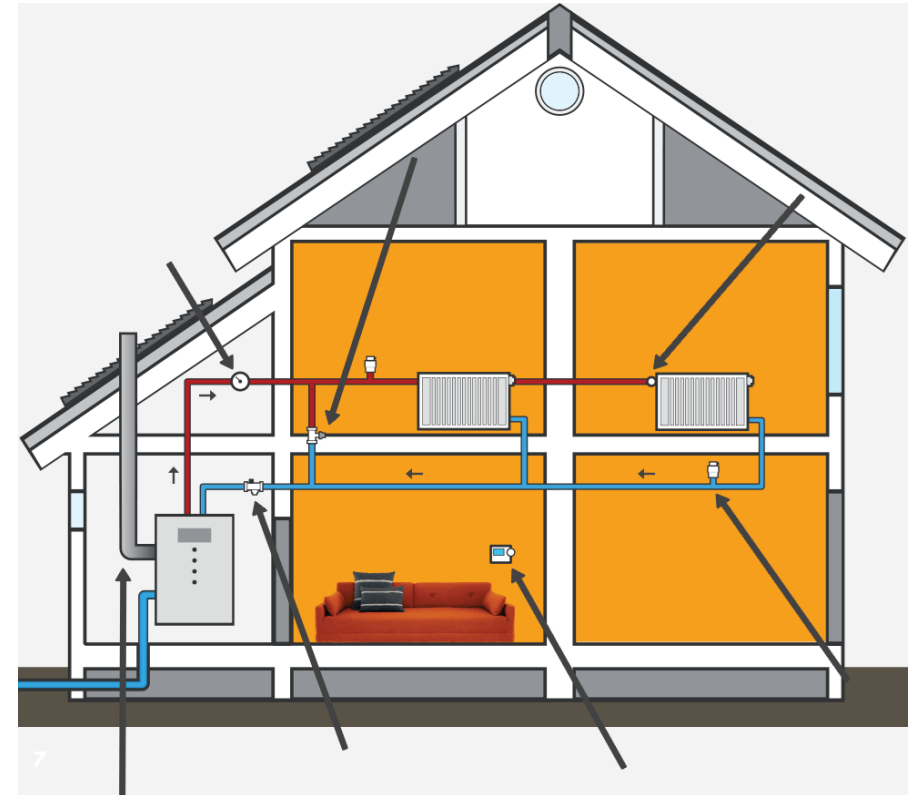
Les fossiles : invibilisation de l'énergie

Les raffineries consomment beaucoup d'eau pour le refroidissement. Proches des grands ports.

Les futures « mégafactory » de batterie ont besoin crucial d'un accès à l'eau.

Pas de production chez nous & automatisation des usages

Raffinerie de Donges, 3 à 4 millions de m³ / an d'eau potable de la nappe phréatique, 17% carburant des français

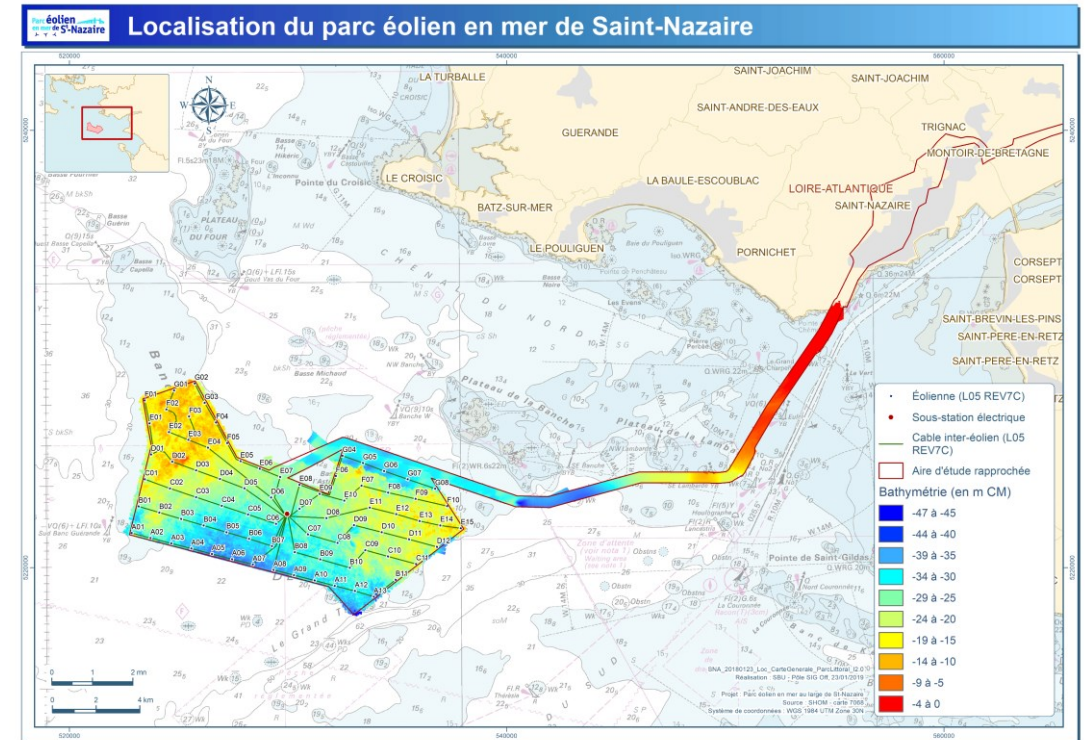
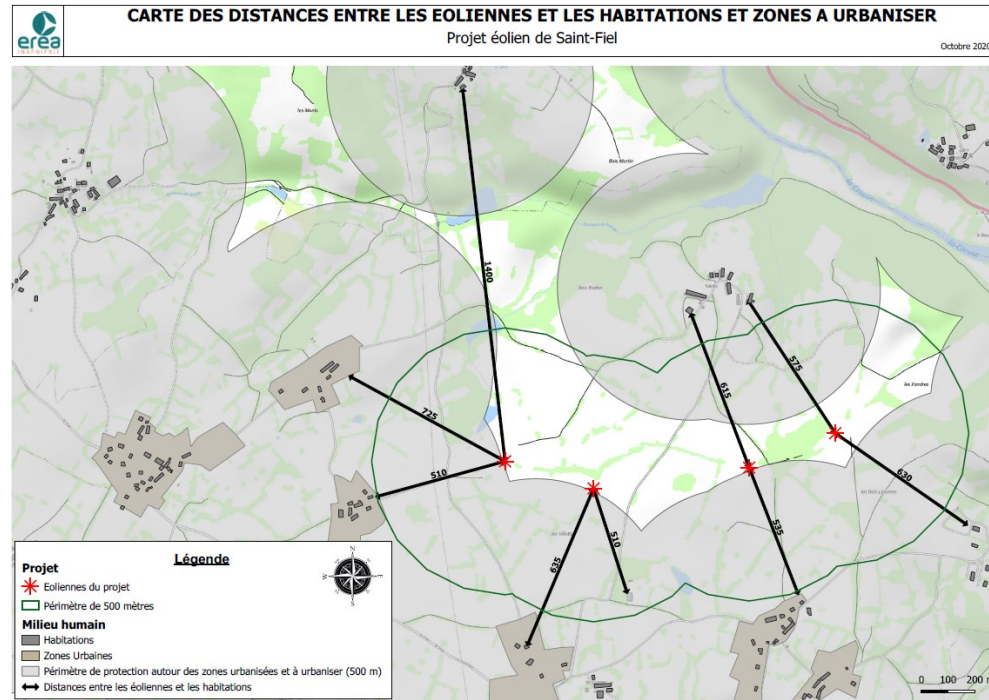


La carte et le territoire : éolien et solaire

L'éolien et le solaire sont gourmands en occupation des sols et en acier / béton mais sobres en eau

Eolien terrestre : pas d'éolienne < 500 m des habitations.
Renforcement du découplage ville / campagne
territoires désirables / indésirables ?

Eolien maritime : eaux peu profondes.
de 50 à 100 parcs selon scénarios RTE 2050



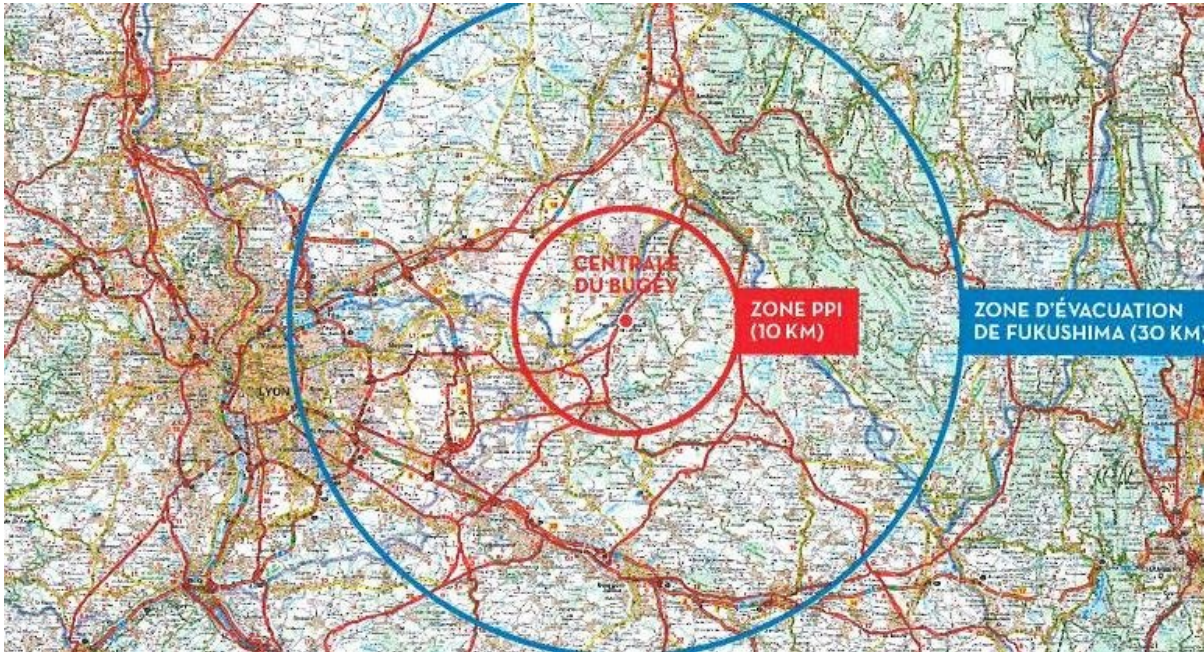
La carte et le territoire : nucléaire et hydraulique

Nucléaire « terrestre » : sur fleuve, loin des villes, sensible au cycle de l'eau

Nucléaire « maritime » : sensible à la montée des eaux, sur le littoral méditerranéen ?

Le nucléaire est « dense » mais on ne peut pas le mettre partout, USA – URSS => risque de territoires sacrifiés.

Hydraulique : le petit hydraulique peu impactant (bief), les gros barrages impactent climat / biodiversité, saturation du potentiel en France, forte sensibilité au cycle de l'eau, couplage fort à l'agriculture



barrage de Serre-Ponçon 2022
hydroélectricité/irrigation de la vallée de la Durance

Scenarios futurs

S'orienter dans ses choix

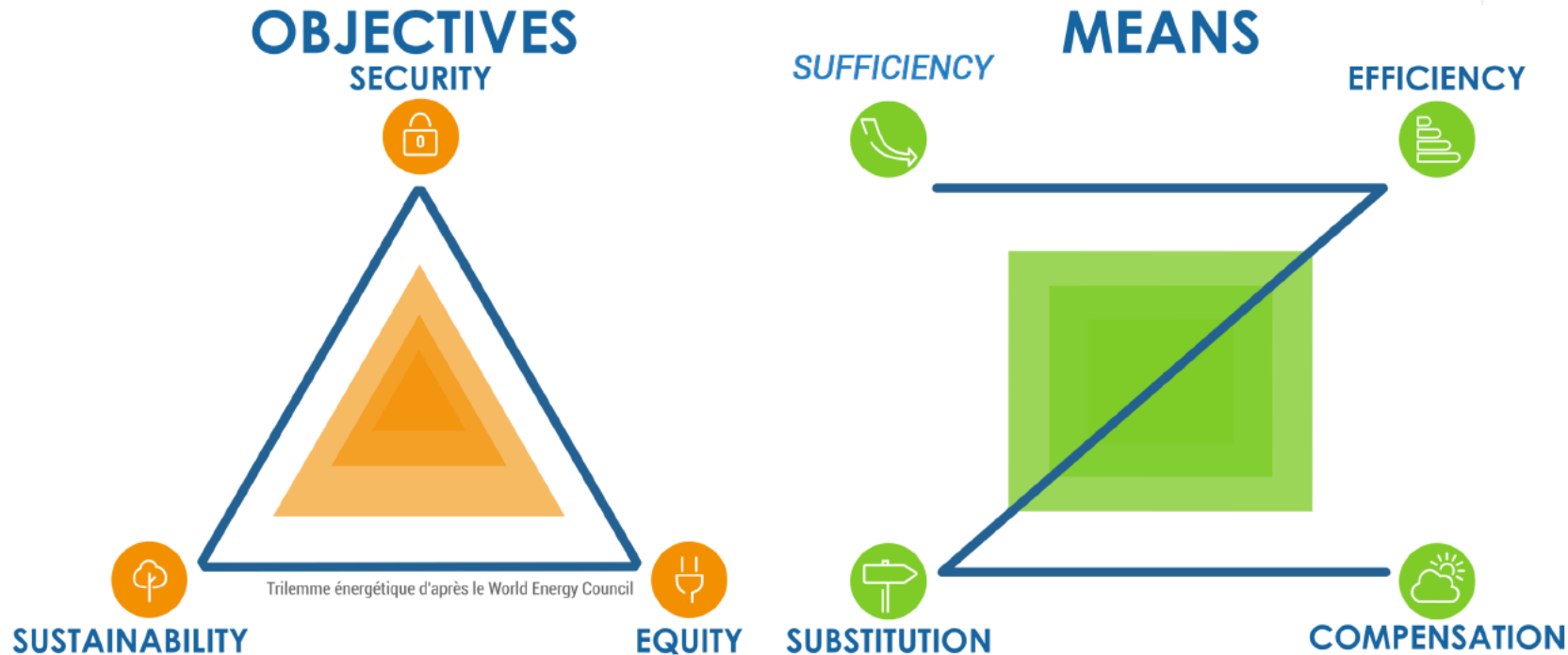
Transition ou pas transition ?

Il y a aura nécessairement une transition avec la fin des fossiles sous la **double contrainte : climat + épuisement des capacités d'extraction**. La pollution plastique commence à devenir une contrainte supplémentaire.

En Europe, la transition est largement motivée par des questions d'indépendance géostratégique.

Il y a de nombreux choix possibles en termes de technologies et en termes d'usages mais les deux sont couplés.

La Wishlist

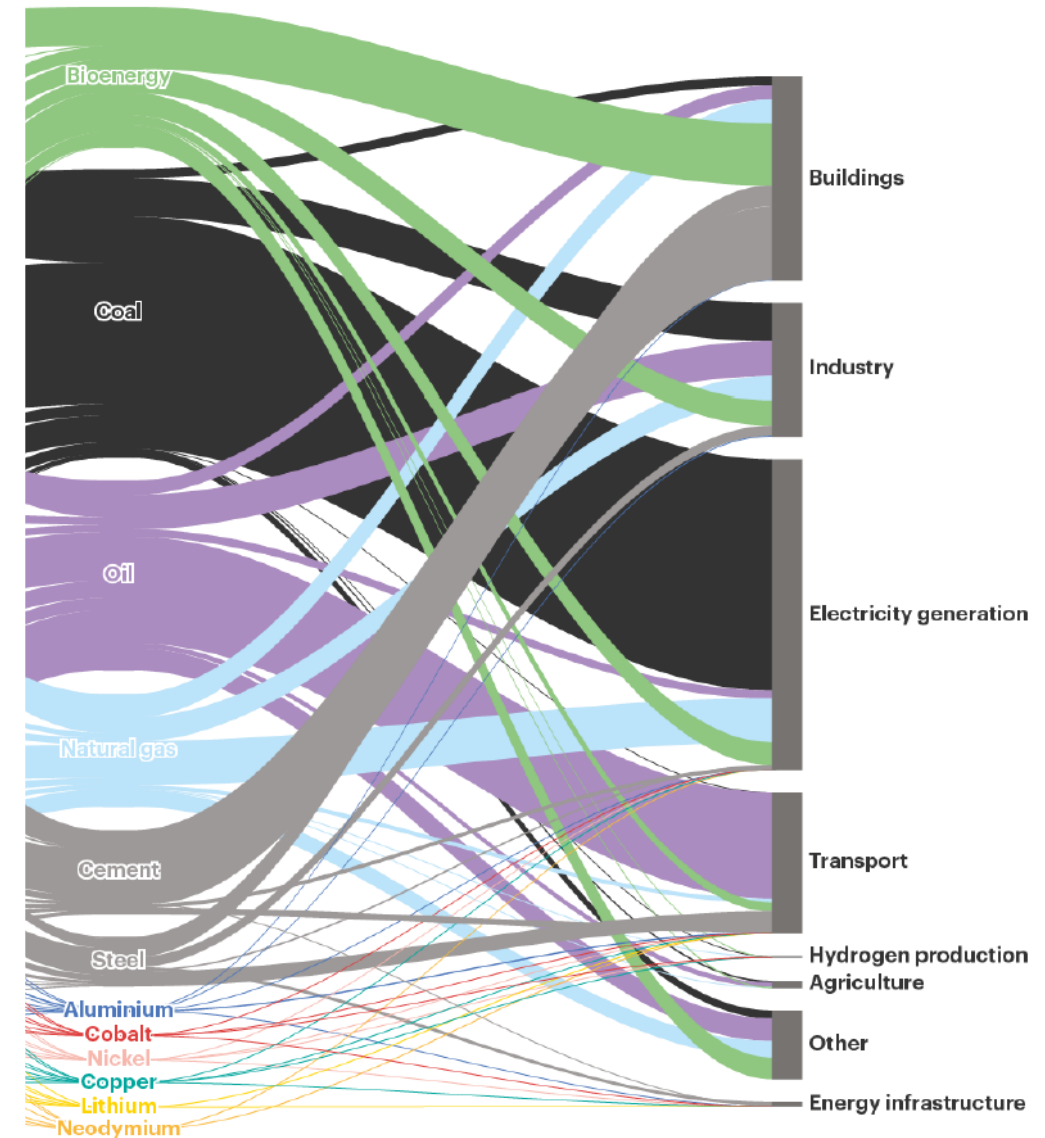


Interdépendance usages - ressources

Un usage fait appel à de nombreuses ressources

Cf l'énergie grise et les analyses de cycle de vie...

=> tendance à l'accroissement de l'extractivisme plutôt qu'à la substitution



Interdépendance usages - ressources

Un usage fait appel à de nombreuses ressources

Cf l'énergie grise et les analyses de cycle de vie...

=> tendance à l'accroissement de l'extractivisme plutôt qu'à la substitution

Une même ressource donne lieu à de nombreux usages. Filière ramifiée

Eau : alimentation, agriculture, hygiène, énergie, industrie, béton, solvant, loisir,...

Bois : énergie, meubles, construction

Pétrole : énergie & pétrochimie => plastiques, textiles, pharmacie, bitume, lubrifiants...

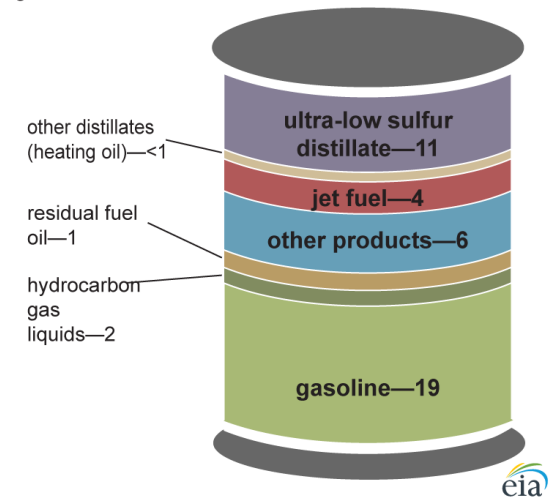
Gaz : énergie, engrais de synthèse

Nucléaire : énergie, militaire, santé

Hydrogène : métallurgie, combustion, électricité

Petroleum products made from a barrel of crude oil, 2018

gallons



Note: A 42-gallon (U.S.) barrel of crude oil yields about 45 gallons of petroleum products because of refinery processing gain. The sum of the product amounts in the image may not equal 45 because of independent rounding.

Source: U.S. Energy Information Administration, *Petroleum Supply Monthly*, April 2019, preliminary data.

Les promesses de l'hydrogène

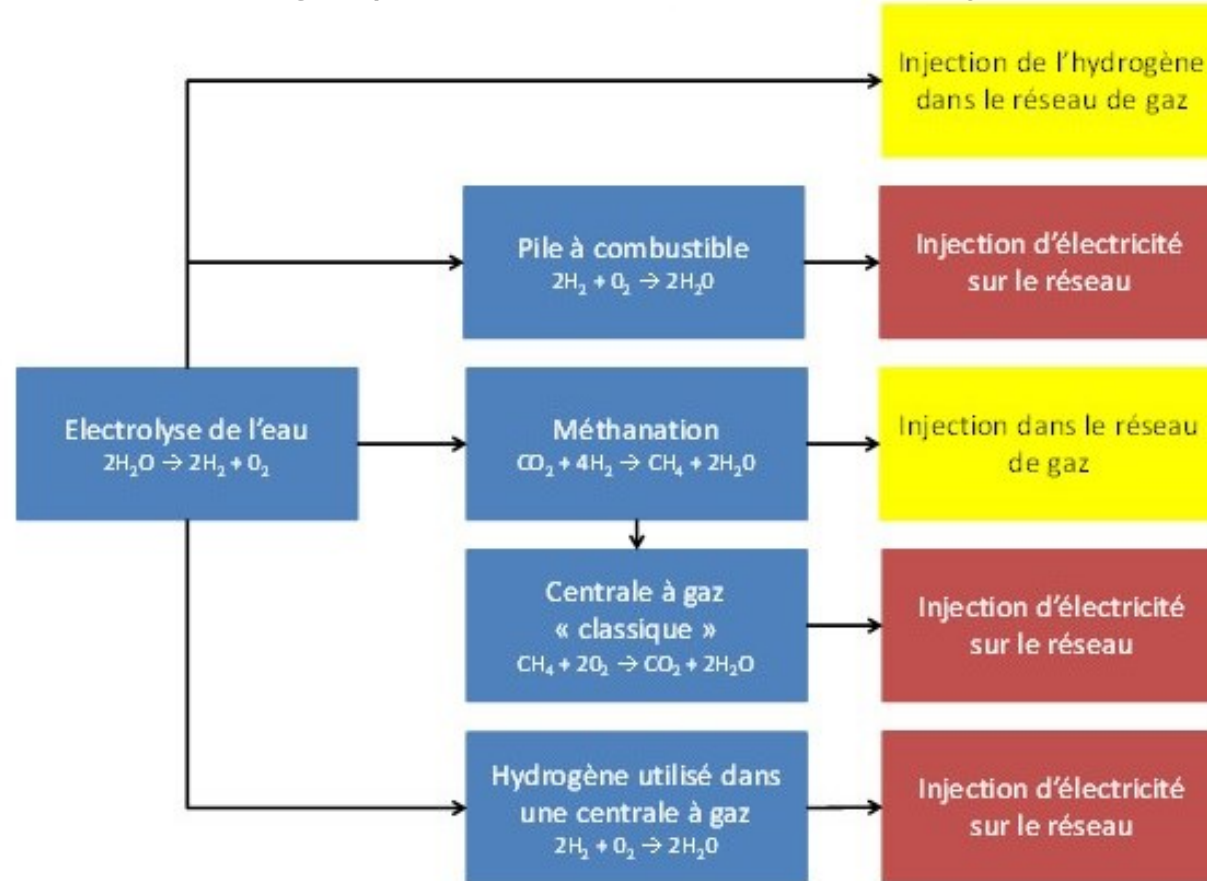
H₂ est difficile à stocker (liquéfaction, fuites) et **explose facilement à l'air** mais **très dense énergétiquement**
Certains rendements de conversion sont mauvais, notamment électrolyse de l'eau.

beaucoup de R&D car

i) vecteur de stock associable au vecteur électricité

ii) probablement le seul substitut crédible aux usages non électrifiables

iii) un très bon réducteur pour la métallurgie, pétrochimie, **carburants de synthèse (e-fuel)**...



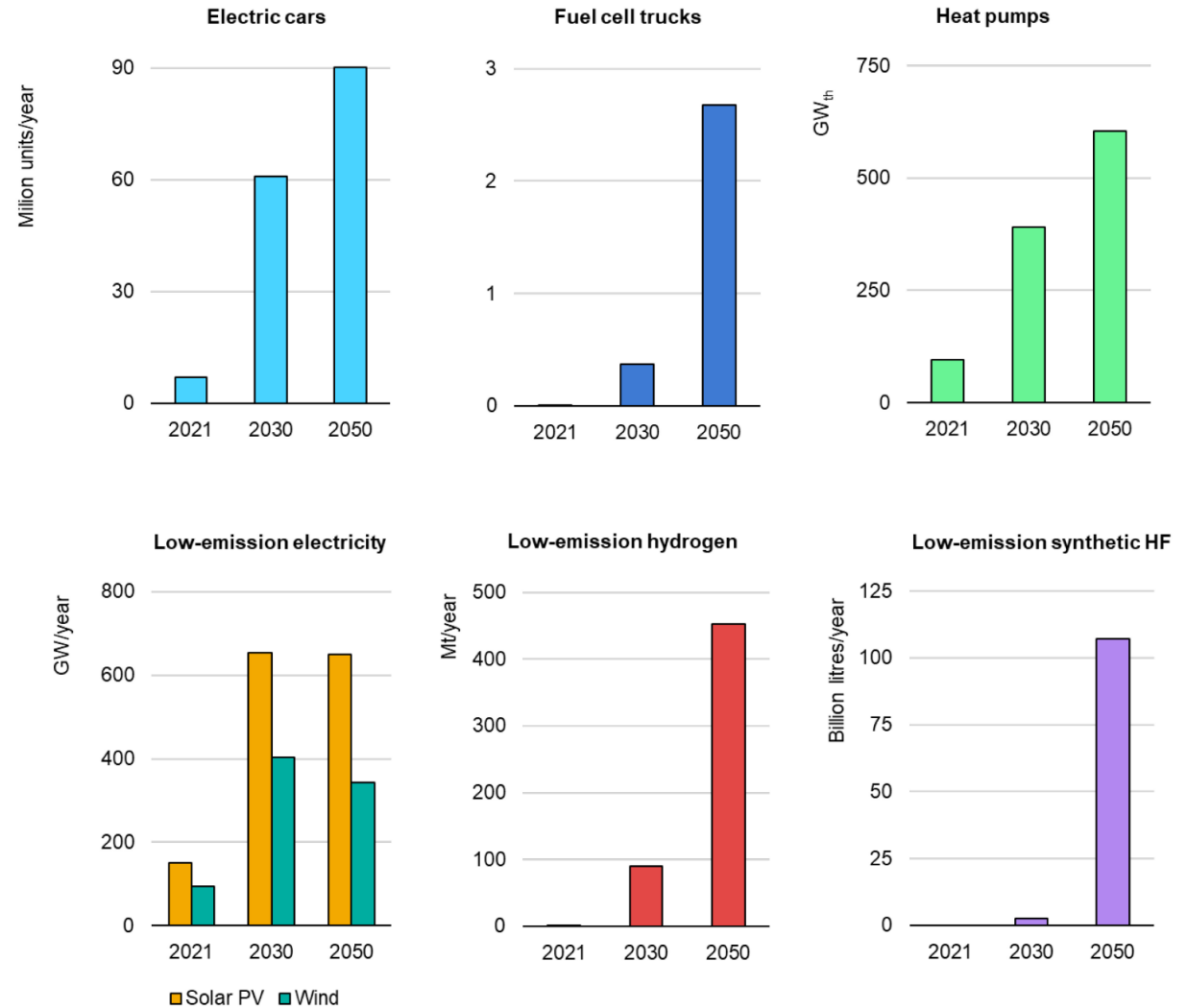
Substitution : la stratégie de la vectorisation

Stratégie « Net Zero Emission » de l'IEA, utilisation de l'électricité et de l'hydrogène

Mais probablement de grosses pertes d'efficacité et des difficultés technologiques.

Infrastructures à développer
=> **manque de temps et problème de l'énergie grise?**

Figure 1.6 Global deployment of selected clean energy technologies in the NZE Scenario



Sobriété des usages



A 10-Point Plan to Cut Oil Use

iea.org

1 Reduce speed limits on highways by at least 10 km/h



4 Make public transport cheaper; incentivise micro-mobility, walking and cycling



3 Car-free Sundays in large cities



2 Work from home up to three days a week where possible



5 Alternate private car use in large cities



6 Urge car sharing and practices that decrease fuel use



7 Promote efficient use of freight trucks and goods delivery



10 Hasten adoption of electric and more efficient vehicles



9 Avoid business travel when alternatives exist

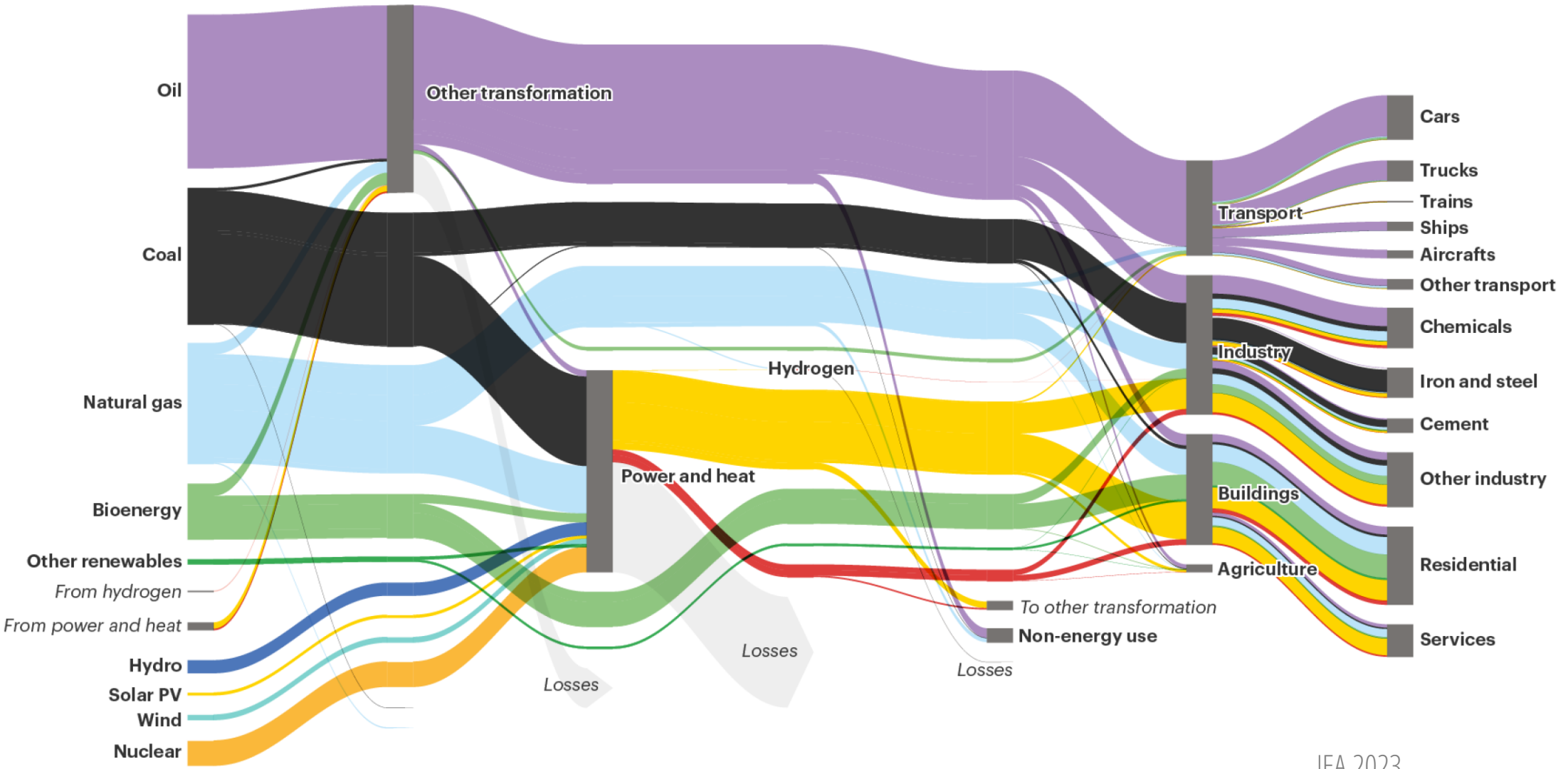


8 Prefer high-speed and night trains to planes where possible



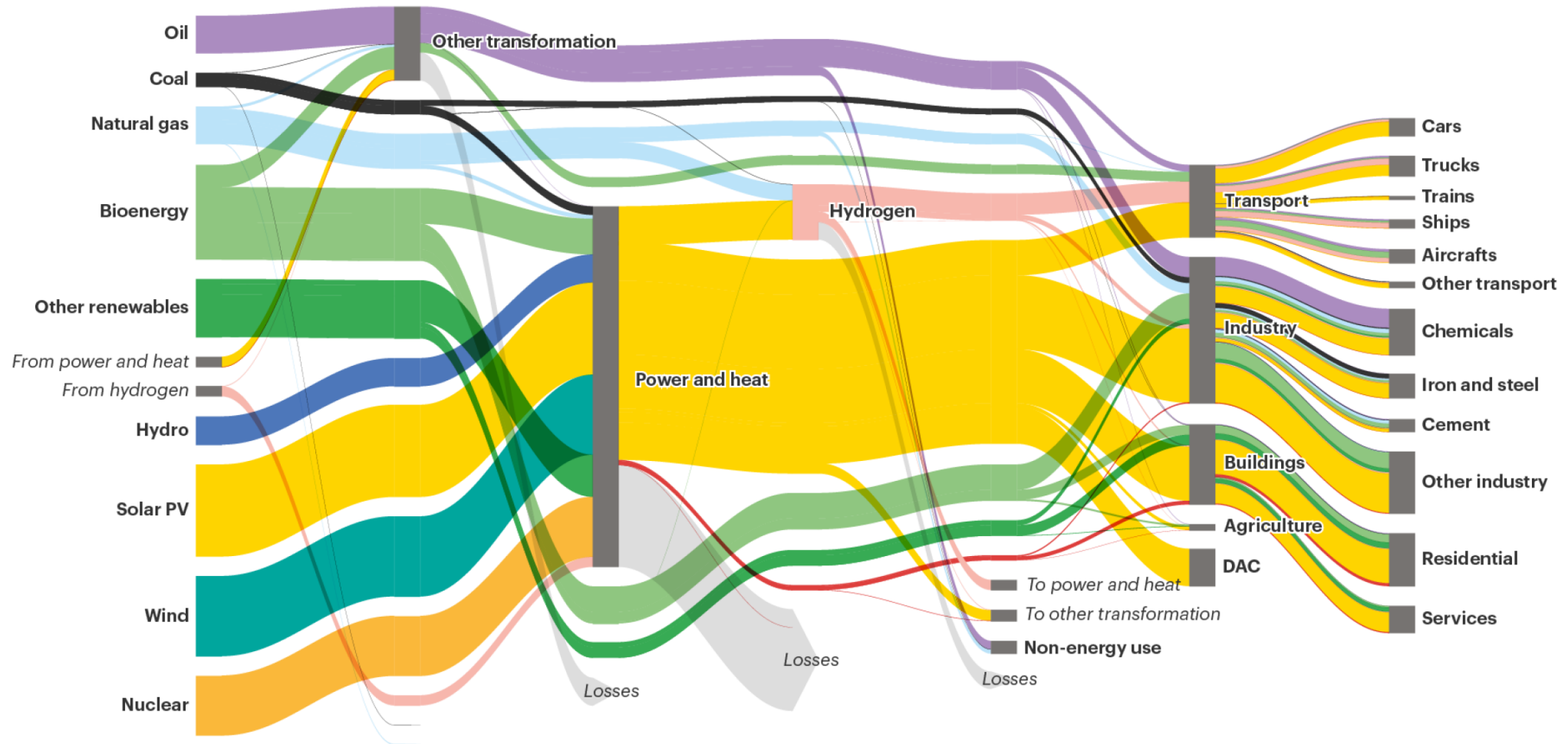
Scenario NZE de l'Agence Internationale de l'Energie

2021



Scenario NZE de l'Agence Internationale de l'Energie

2050



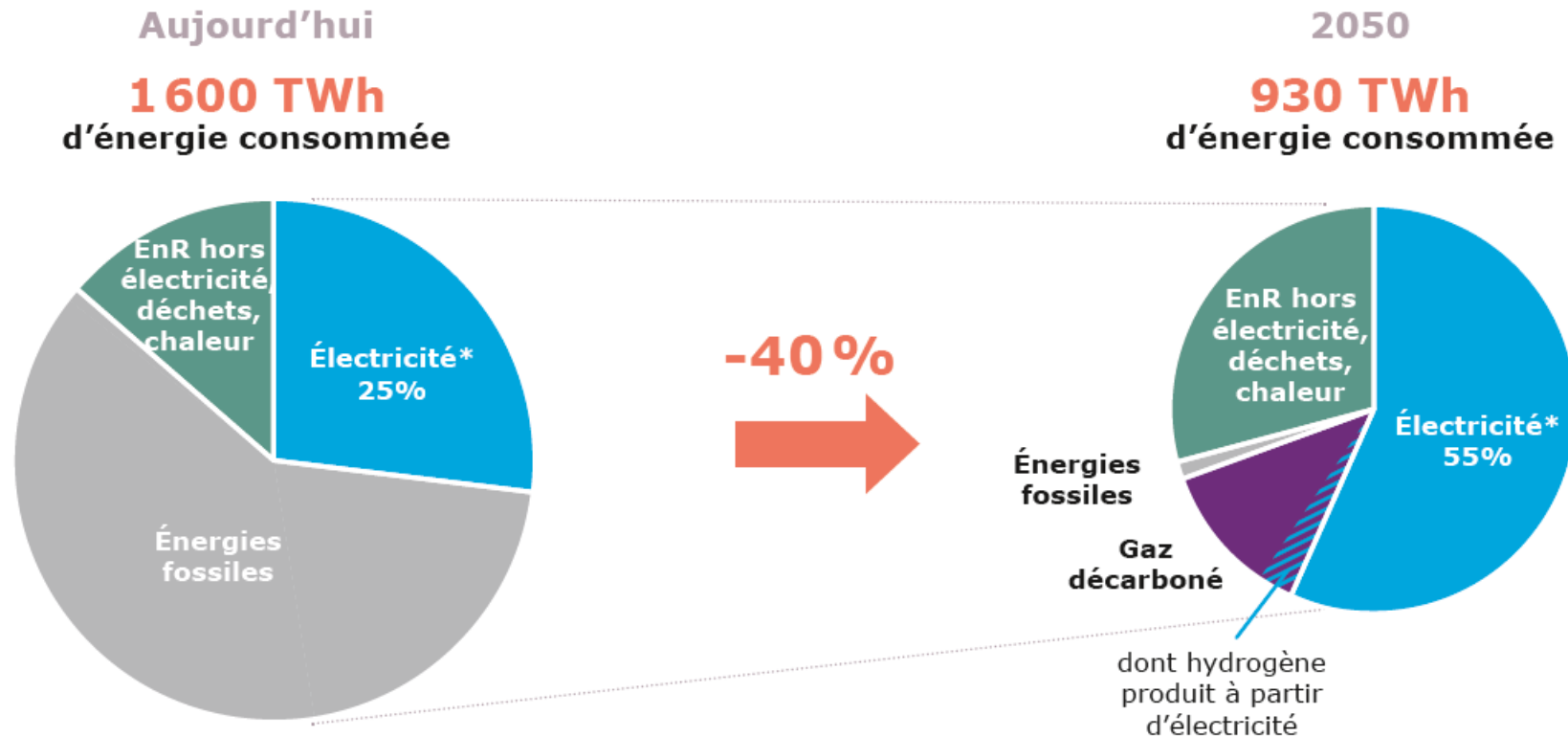
IEA. CC BY 4.0.

Notes: Some electricity is used to generate hydrogen from water electrolysis, while some hydrogen (and hydrogen-based fuels such as ammonia) is in turn used for power generation in 2050. Losses include fuel, heat and power distribution losses, as well as transformation process conversion losses and own use.

Electricity becomes the largest energy vector in the NZE Scenario, with demand more than doubling between 2021 and 2050.

Scenario RTE 2050

Figure 2 Consommation d'énergie finale en France et dans la SNBC

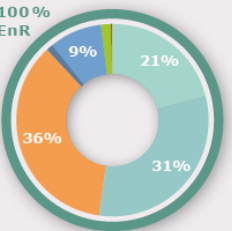




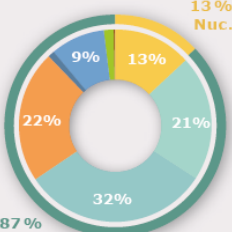




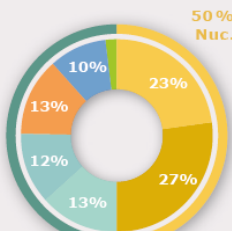





* Consommation finale d'électricité (hors pertes, hors consommation issue du secteur de l'énergie et hors consommation pour la production d'hydrogène)
Consommation finale d'électricité dans la trajectoire de référence de RTE = 645 TWh



Scenario RTE 2050

À L'HORIZON 2050

Filières :  Flexibilités de la demande (hors V2G)  Nouveau thermique décarboné  Batteries  Véhicule-to-grid

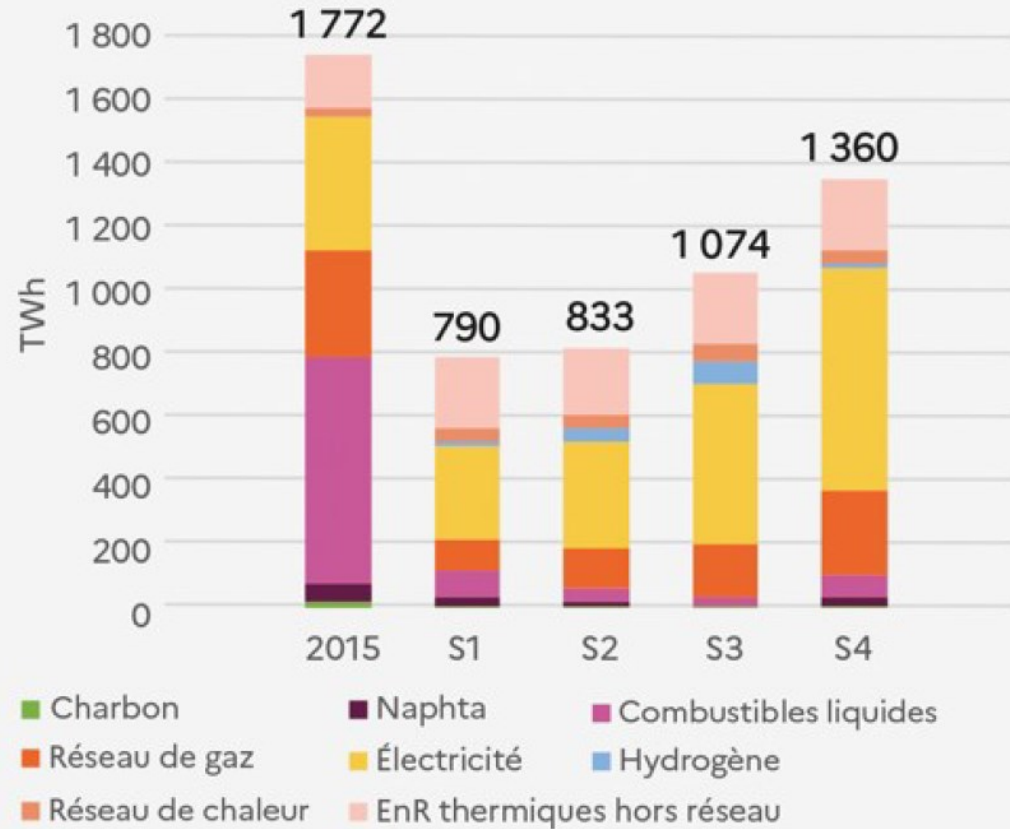
	NARRATIF	RÉPARTITION DE LA PRODUCTION EN 2050	CAPACITÉS INSTALLÉES EN 2050 (EN GW)*					BOUQUET DE FLEXIBILITÉS EN 2050
			Solaire	Éolien terrestre	Éolien en mer	Nucléaire historique	Nouveau nucléaire	
M0 100% EnR en 2050	Sortie du nucléaire en 2050 : le déclassement des réacteurs nucléaires existants est accéléré, tandis que les rythmes de développement du photovoltaïque, de l'éolien et des énergies marines sont poussés à leur maximum.		~ 208 GW (soit x21)	~ 74 GW (soit x4)	~ 62 GW	/	/	 15 GW  1,7 GW (1,1 MVE)  29 GW  26 GW
M23 EnR grands parcs	Développement très important de toutes les filières renouvelables, porté notamment par l'installation de grands parcs éoliens sur terre et en mer. Logique d'optimisation économique et ciblage sur les technologies et les zones bénéficiant des meilleurs rendements et permettant des économies d'échelle.		~ 125 GW (soit x12)	~ 72 GW (soit x4)	~ 60 GW	16 GW	/	 15 GW  1,7 GW (1,1 MVE)  20 GW  13 GW
N03 EnR + nouveau nucléaire 3	Le mix de production repose à part égale entre les énergies renouvelables et le nucléaire à l'horizon 2050. Cela implique d'exploiter le plus longtemps possible le parc nucléaire existant, et de développer de manière volontariste et diversifié le nouveau nucléaire (EPR 2 + SMR)		~ 70 GW (soit x7)	~ 43 GW (soit x2,5)	~ 22 GW	24 GW	~ 27 GW (soit ~14 EPR + quelques SMR)	 13 GW  1,7 GW (1,1 MVE)  1 GW

Scenario Ademe 2050

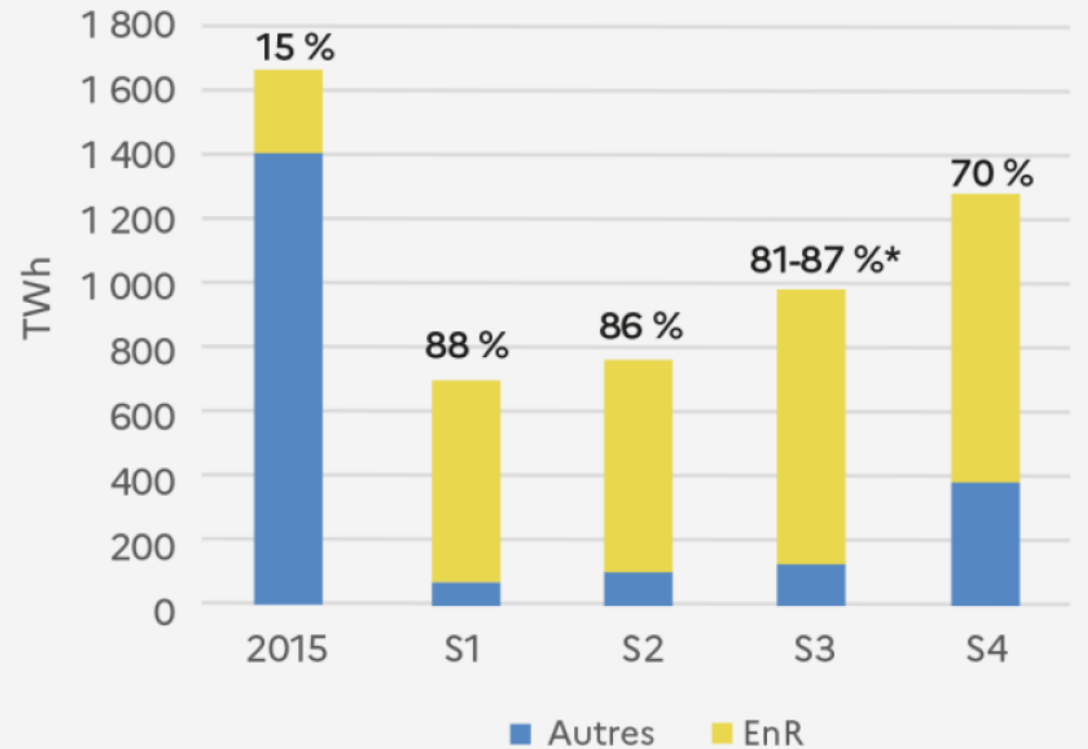
	 S1 GÉNÉRATION FRUGALE	 S2 COOPÉRATIONS TERRITORIALES	 S3 TECHNOLOGIES VERTES	 S4 PARI RÉPARATEUR
Leviers				
Sobriété	+++	++	+	
Efficacité	++	+++	++	
Gouvernance				
Impacts environnement	Éviter les impacts		Réparer les impacts	
	<ul style="list-style-type: none"> • Frugalité contrainte • Low-tech • Localisme • Villes moyennes et zones rurales • Rénovation massive • 3x moins de viande • Nouveaux indicateurs de prospérité 	<ul style="list-style-type: none"> • Coopérations entre territoires • Modes de vie soutenables • Gouvernance ouverte • Économie du partage • Mobilité maîtrisée • Fiscalité environnementale • Réindustrialisation ciblée 	<ul style="list-style-type: none"> • Métropoles • Technologies de décarbonation • Consumérisme vert • Biomasse exploitée • Hydrogène • Régulation minimale • Déconstruction/reconstruction 	<ul style="list-style-type: none"> • Technologies incertaines • Consommation de masse • Captage du CO₂ dans l'air • Étalement urbain • Économie mondialisée • Intelligence artificielle • Agriculture intensive

Scenario Ademe 2050

Demande finale énergétique par vecteur en 2015 et 2050
(avec usages non énergétiques et hors soutes internationales)

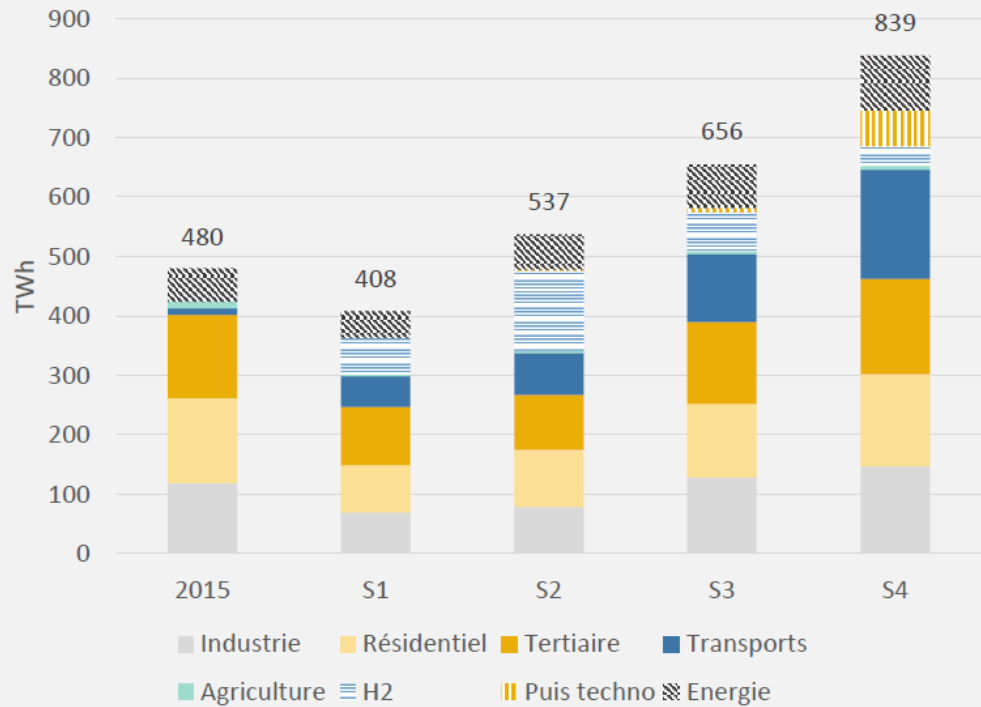


Consommation d'énergie et part des EnR dans la consommation finale brute d'énergie en 2015 et 2050

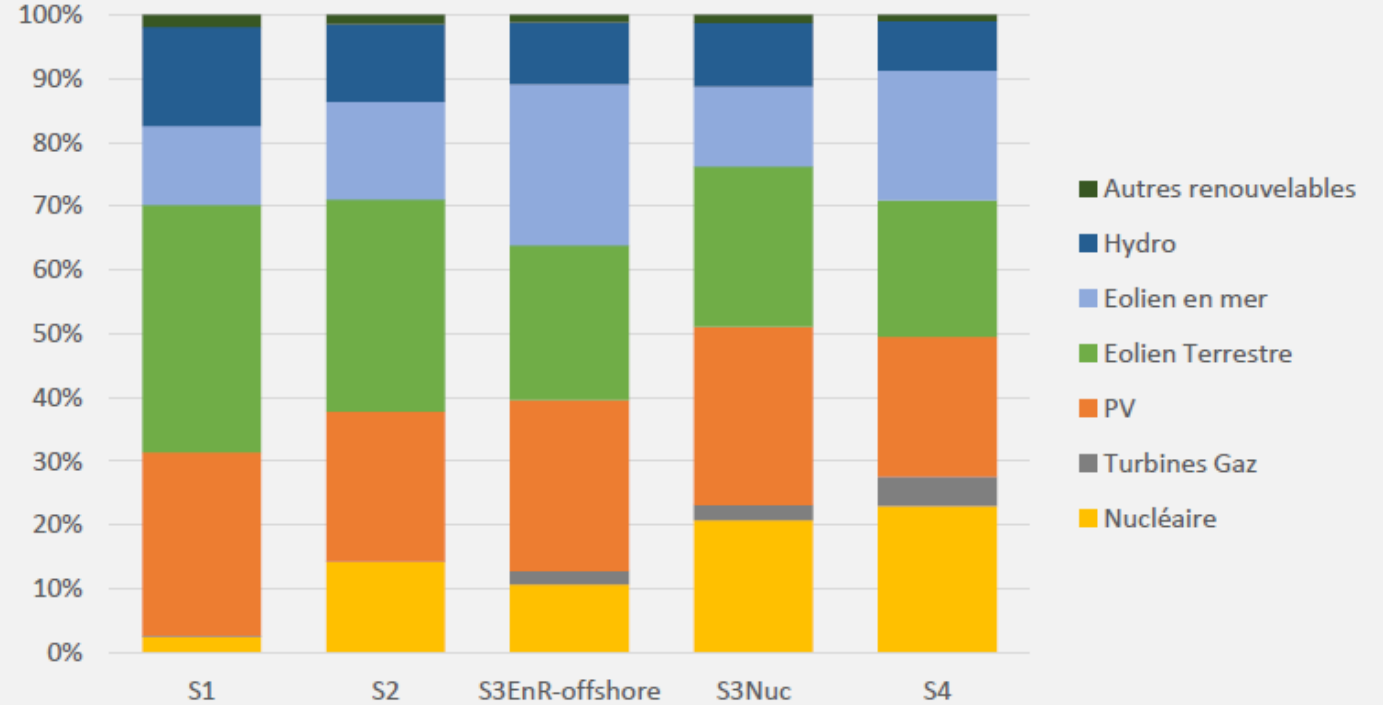


Scenario Ademe

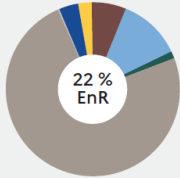
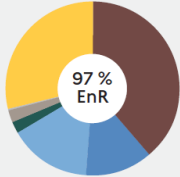
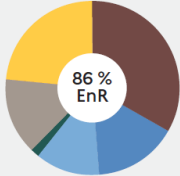
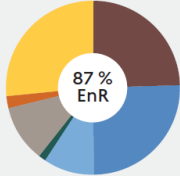
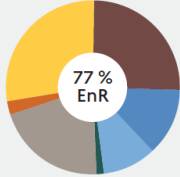
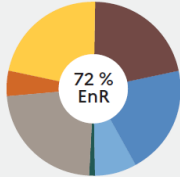
Demande d'électricité en 2015 et en 2050



Mix électrique en 2050



Scenario Ademe 2050

	Consommation domestique totale	Mix de production	Parc installé (GW)					Coût total 2020-2060	Coût complet en 2050
			PV	Éolien terrestre	Éolien en mer	Nucléaire existant*	Nouveau nucléaire		
2020	468 TWh		10	17		61	0		86 EUR/MWh en 2020
S1 2050 Génération frugale	408 TWh		92	58	14	2	0	1 045 MdEUR	85 EUR/MWh
S2 2050 Coopérations territoriales	537 TWh		92	63	24	12	0	1 097 MdEUR	74 EUR/MWh
S3EnR-offshore 2050 Technologies vertes	656 TWh		141	58	48	12	0	1 318 MdEUR	82 EUR/MWh
S3Nucléaire 2050 Technologies vertes	656 TWh		142	58	24	12	10	1 309 MdEUR	82 EUR/MWh
S4 2050 Pari réparateur	839 TWh		144	63	48	16	16	1 518 MdEUR	87 EUR/MWh

■ Nucléaire ■ Turbines gaz ■ Autres thermiques ■ Photovoltaïques
■ Éolien terrestre ■ Éolien en mer ■ Hydraulique ■ Autres renouvelables

* Les capacités installées de nucléaire existant tiennent compte de l'EPR de Flamanville.

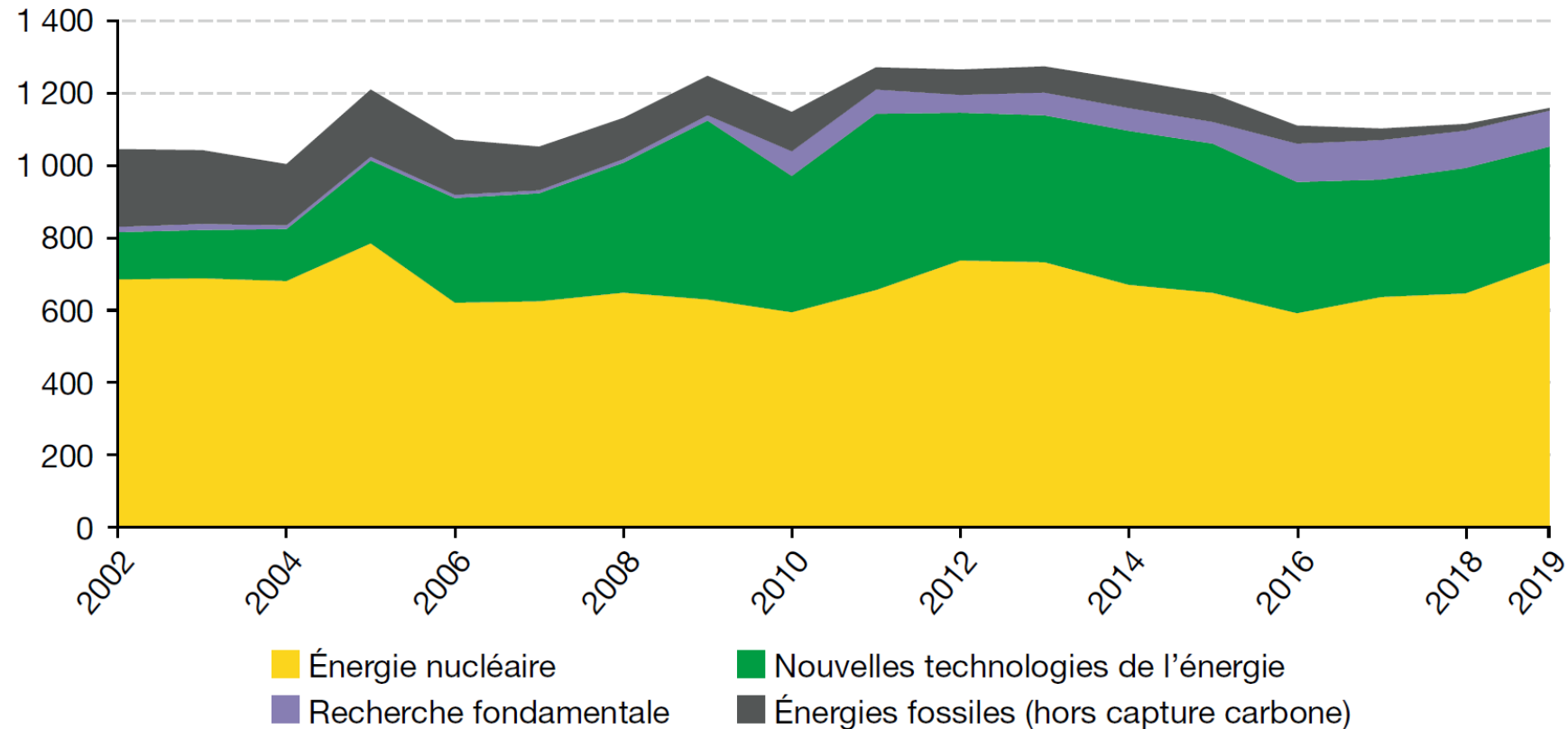
Merci pour votre
attention

La recherche sur l'énergie

DÉPENSES PUBLIQUES DE R&D SELON LE DOMAINE D'APPLICATION

TOTAL : 1,2 Md d'euros en 2019

En millions d'euros constants 2019



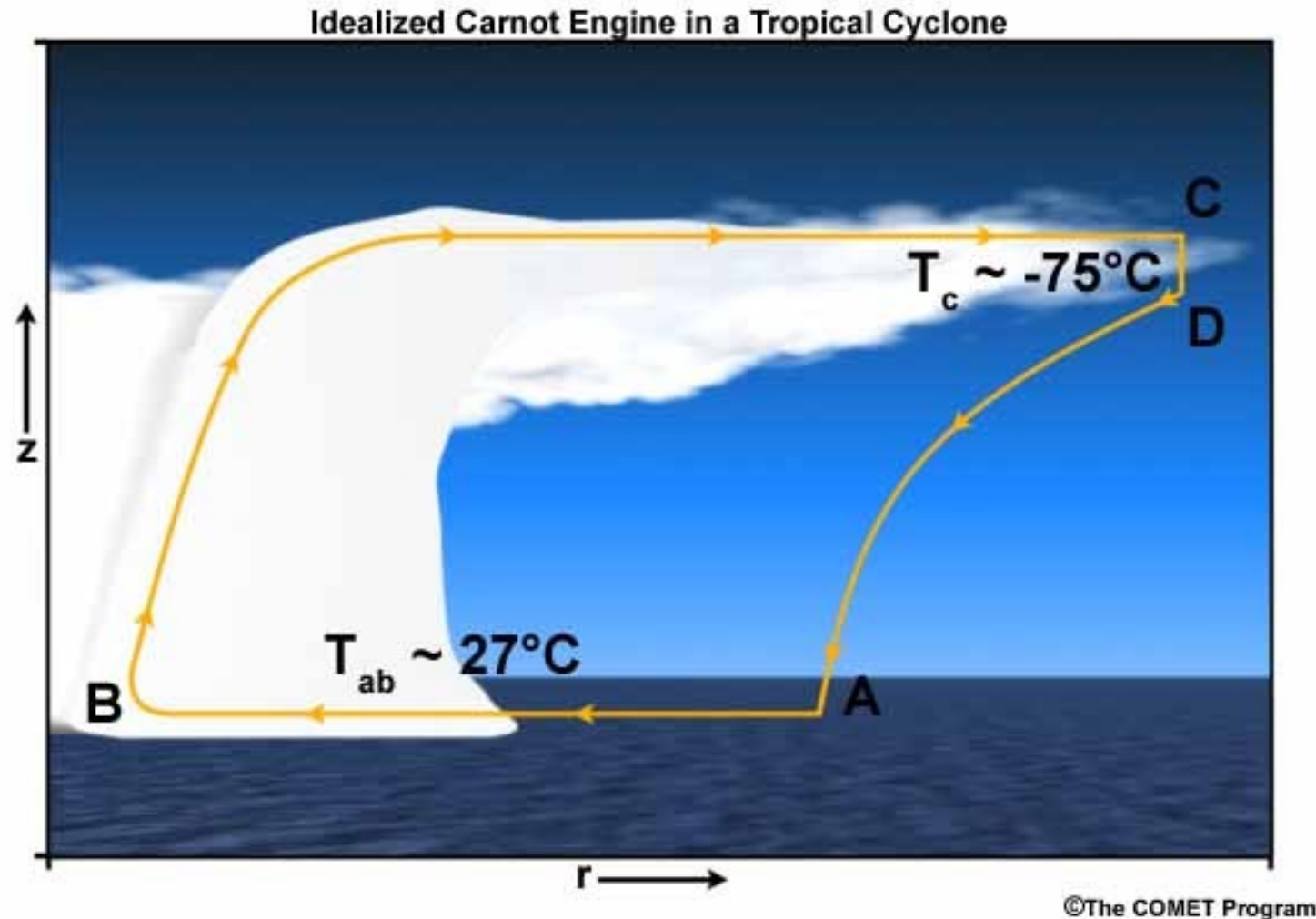
Note : une rupture de série entre 2015 et 2016 affecte la répartition des dépenses entre recherche fondamentale, nouvelles technologies de l'énergie et énergies fossiles.

Champ : France entière (y compris DROM).

Source : CRESO

Une machine thermique naturelle

Les cyclones tropicaux !

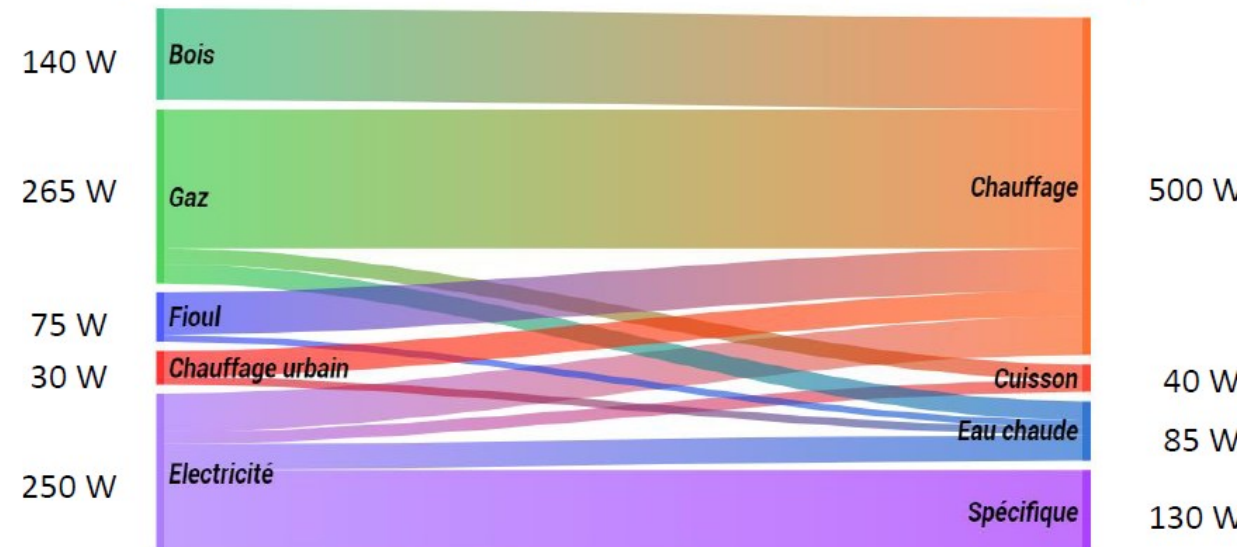


Schematic of the energy flux in a tropical cyclone idealized as a Carnot engine. Air in the atmospheric boundary layer (bottom right to left) flows isothermally, rises adiabatically in the eyewall convection, flows out to great distance isothermally near the tropopause, then sinks far from the storm.

Plus de microscopique

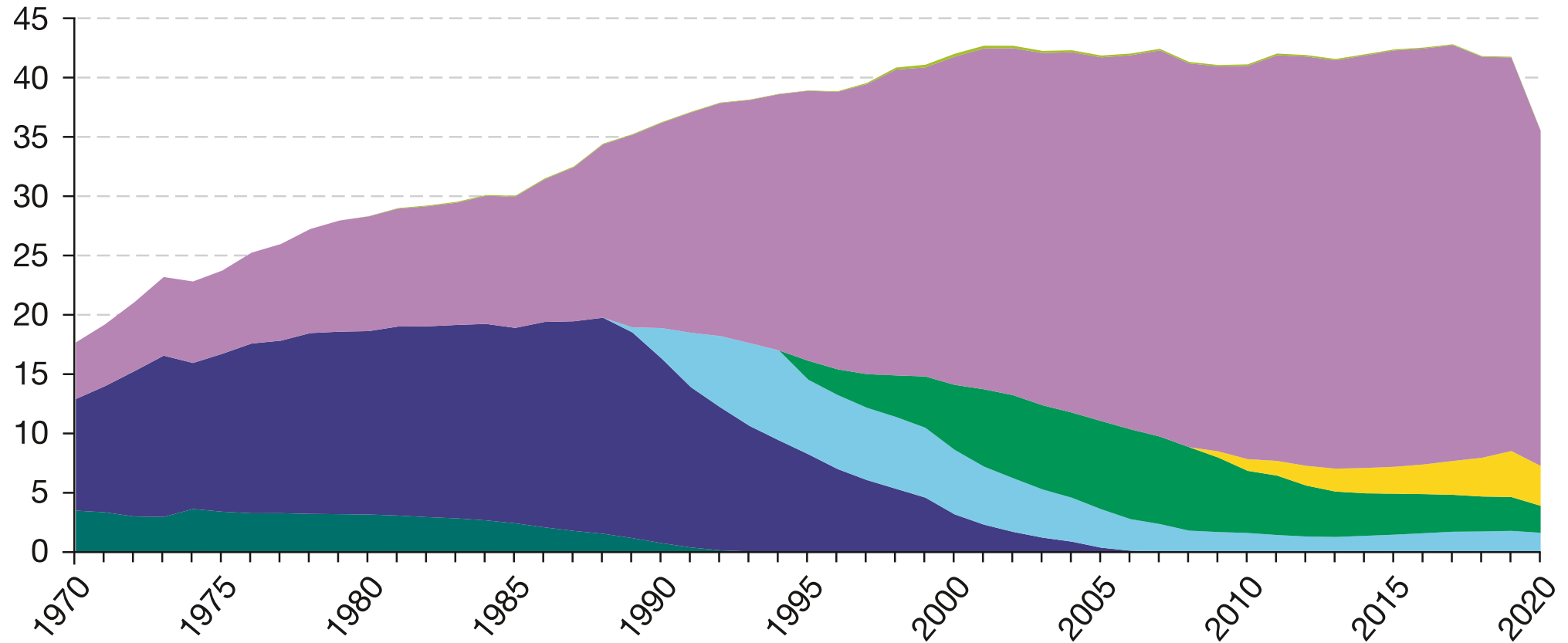
Appareils de cuisine	Consommation électrique par an (kWh)	Coût par an (€)
Réfrigérateur	332	53
Congélateur	254	41
Robot de cuisine chauffant	138	22
Four	154	25
Plaques à induction	105	17
Lave-Vaisselle standard	209	34
Cafetière à expresso	78	13
Bouilloire	88	14
Grille-pain	26	4
Friteuse	41	7
TOTAL	1425	230

Average residential consumption per capita in France (data : CEREN (2019))



Consommation de carburants routiers

En Mtep



Essence ordinaire

Sans plomb 98

SP95-E10

GPL carburant

Super plombé (ARS depuis 2000)

Sans plomb 95 hors E10

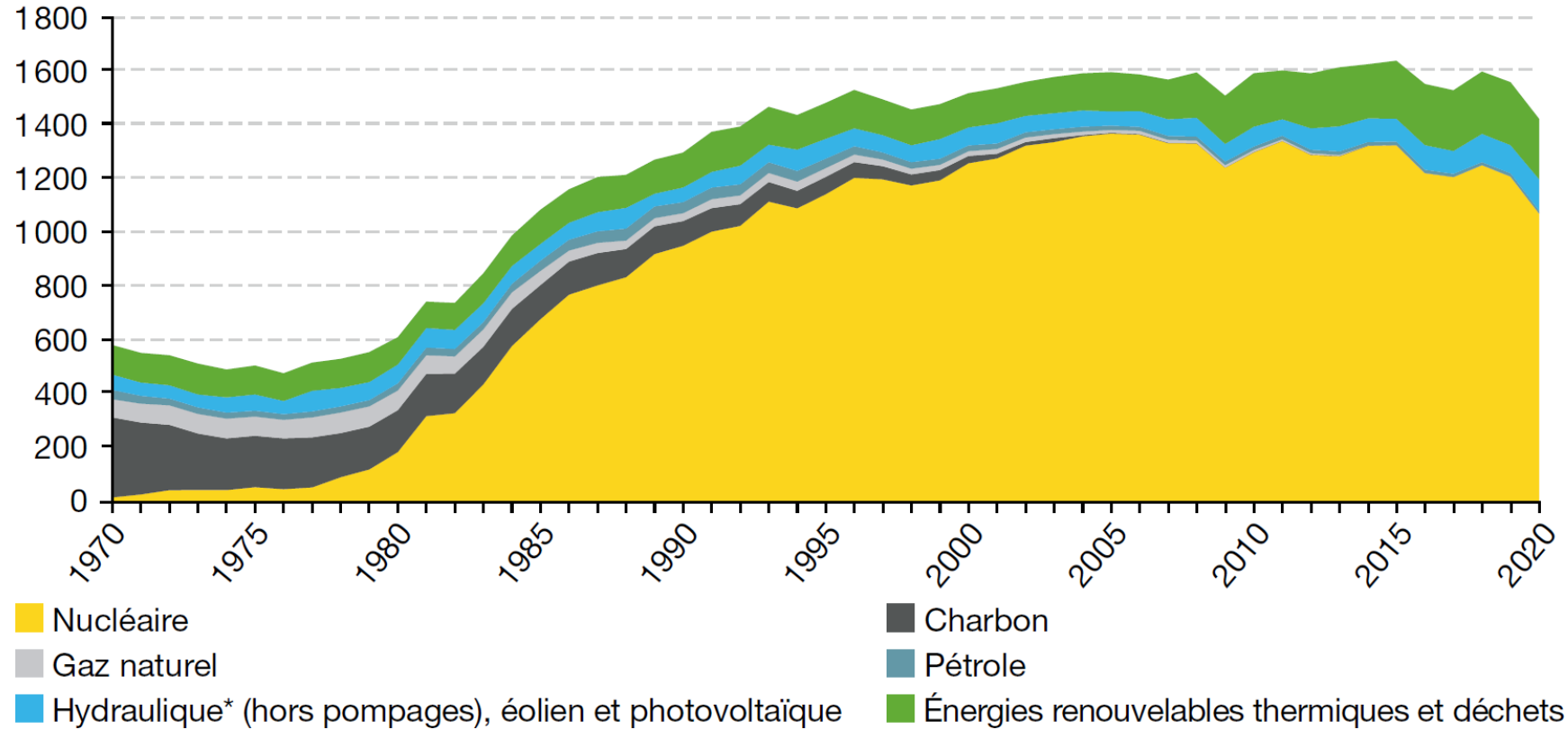
Gazole*

Production d'énergie primaire en France

PRODUCTION D'ÉNERGIE PRIMAIRE PAR ÉNERGIE

TOTAL : 1 423 TWh en 2020

En TWh



* Y compris énergies marines.

Champ : jusqu'à l'année 2010 incluse, le périmètre géographique est la France métropolitaine. À partir de 2011, il inclut en outre les cinq DROM.

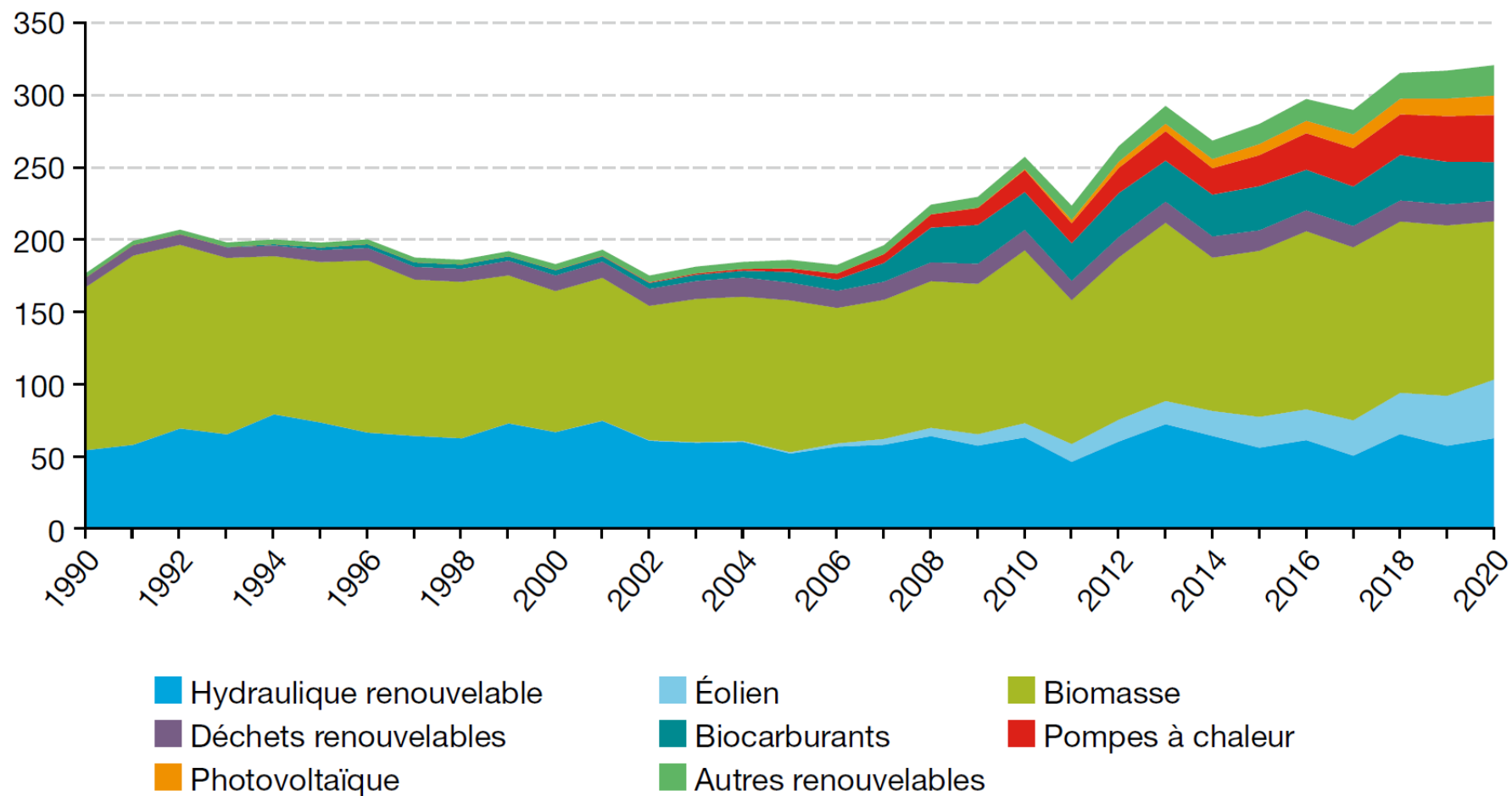
Source : SDES, Bilan énergétique de la France.

Renouvelable en France

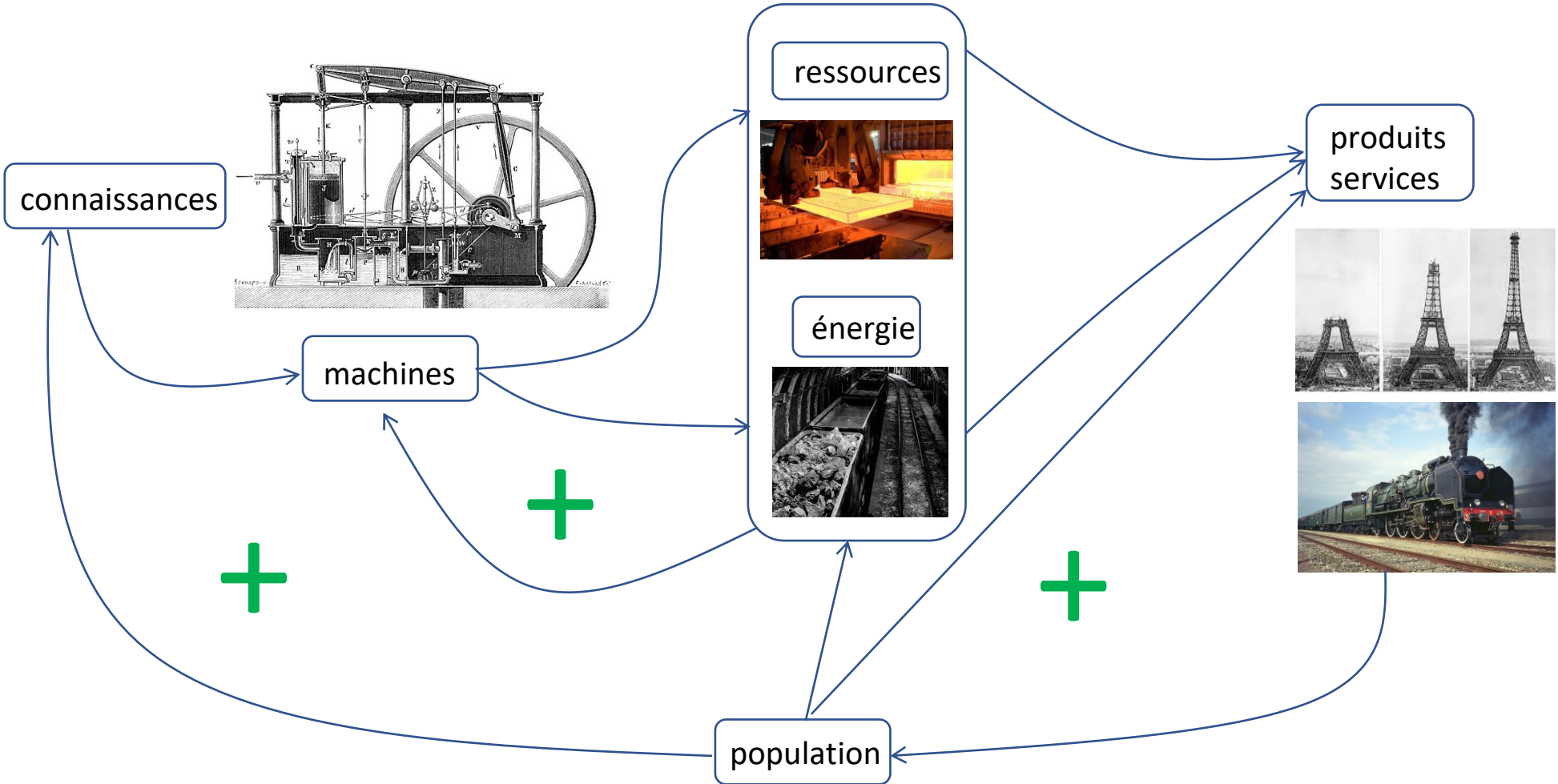
ÉVOLUTION DE LA PRODUCTION PRIMAIRE D'ÉNERGIES RENOUVELABLES PAR FILIÈRE

TOTAL : 322 TWh en 2020

En TWh



Couplage à l'économie productiviste



Couplage à l'économie productiviste

