

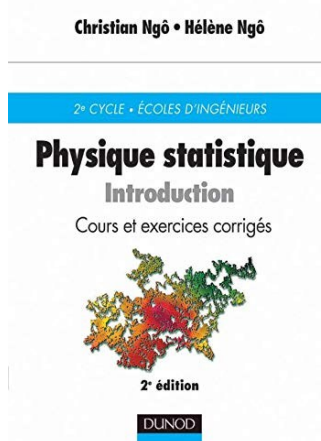
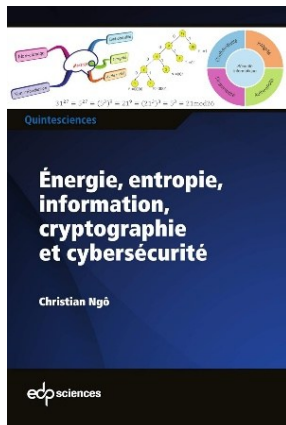
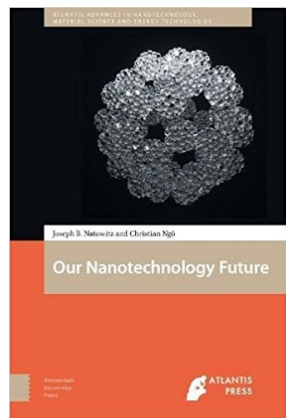
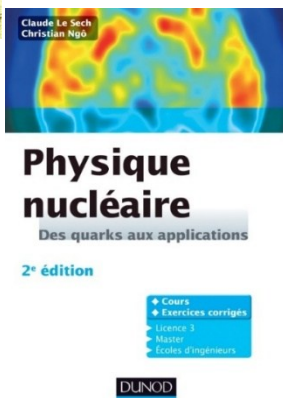
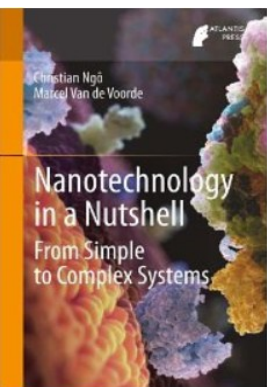
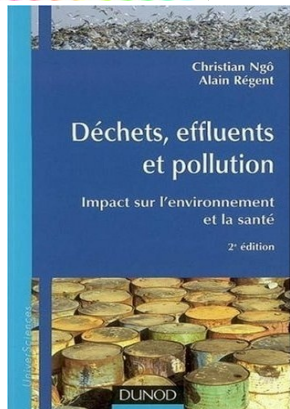


Edmonium

Énergie, géopolitique Guerres de l'énergie et des matières premières

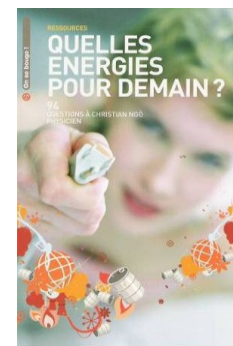
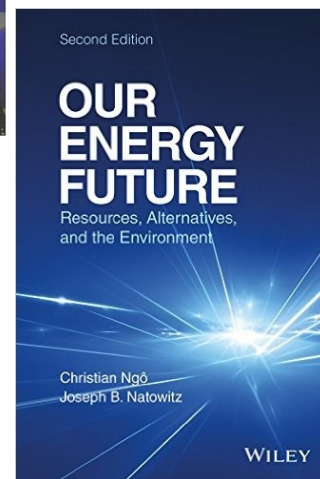
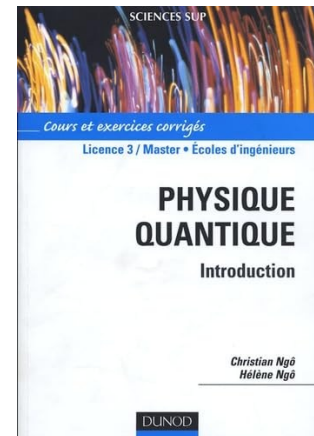
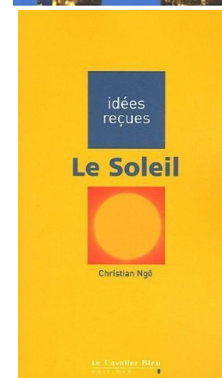
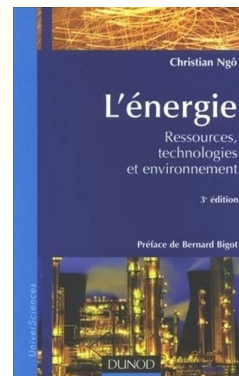
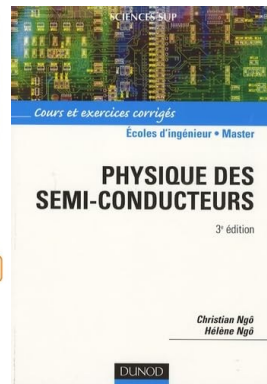
Christian Ngô, EDMONIUM

edmonium@gmail.com



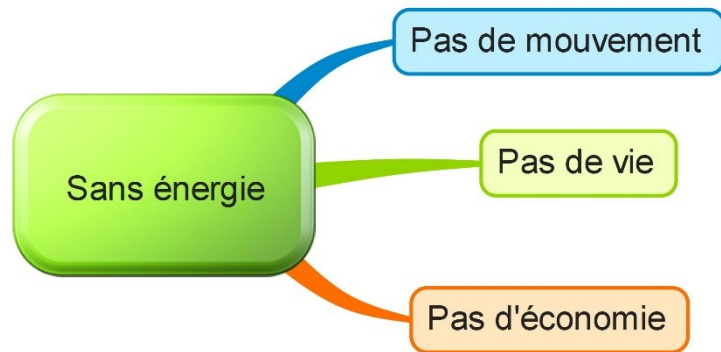
Énergies fossiles,
Nucléaire et
Renouvelables
L'embarras du choix

Christian Ngô et François Lemprière



L'énergie

- ❑ L'énergie intervient dans tout processus physique, chimique ou biologique qui se traduit par un changement. De l'énergie peut être absorbée ou libérée.
- ❑ Ce qui est utile pour les activités humaines c'est de transformer une forme d'énergie vers une autre pour produire de la chaleur, du travail, de la lumière, etc.



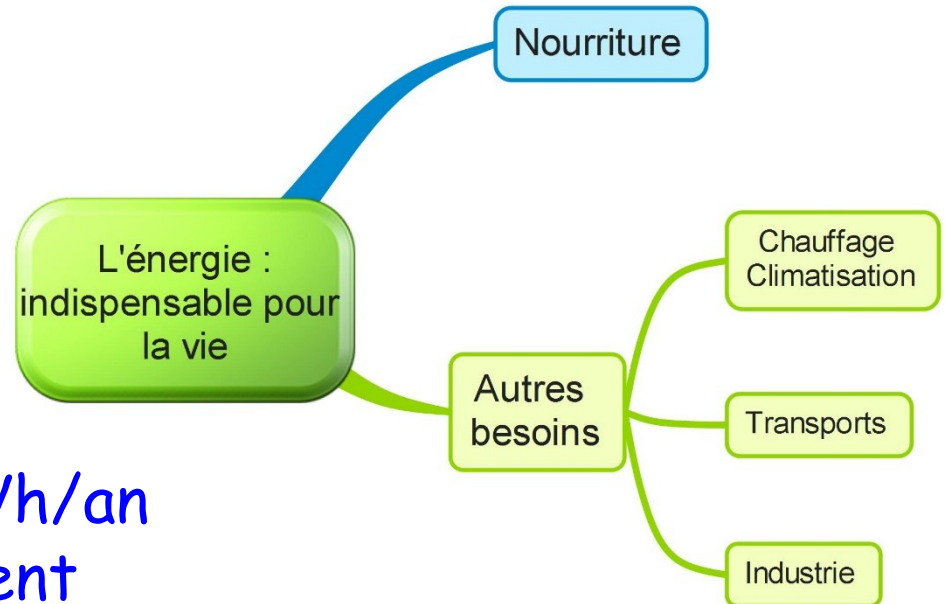
$$E=mc^2$$

$$1\text{kg}=25 \text{ TWh}$$

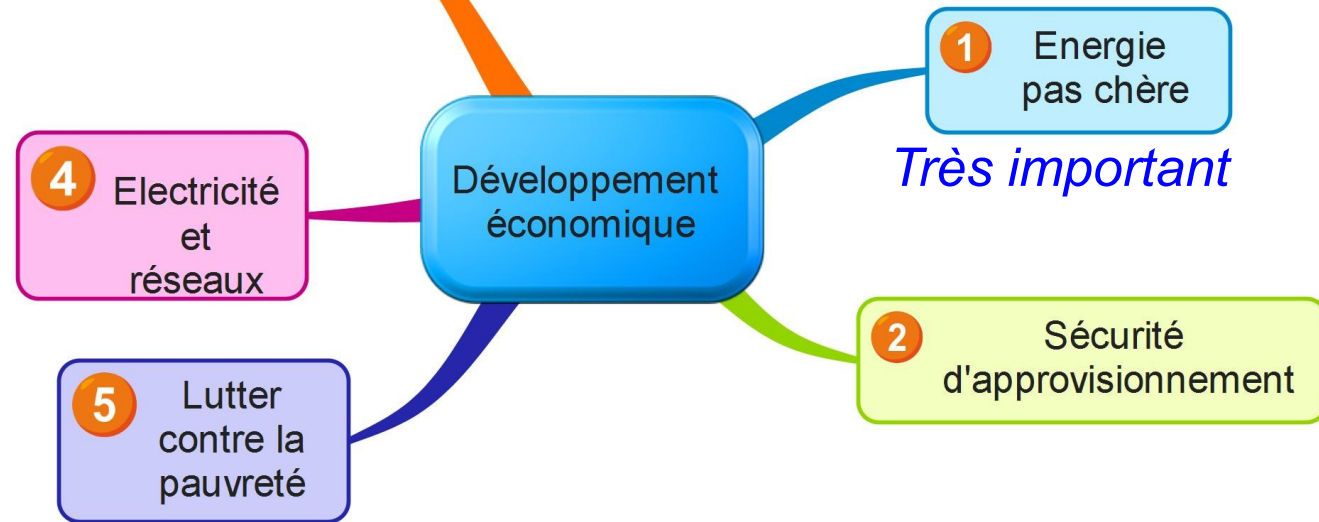
Électricité France : 450 TWh/an

18 kg de matière disparaissent

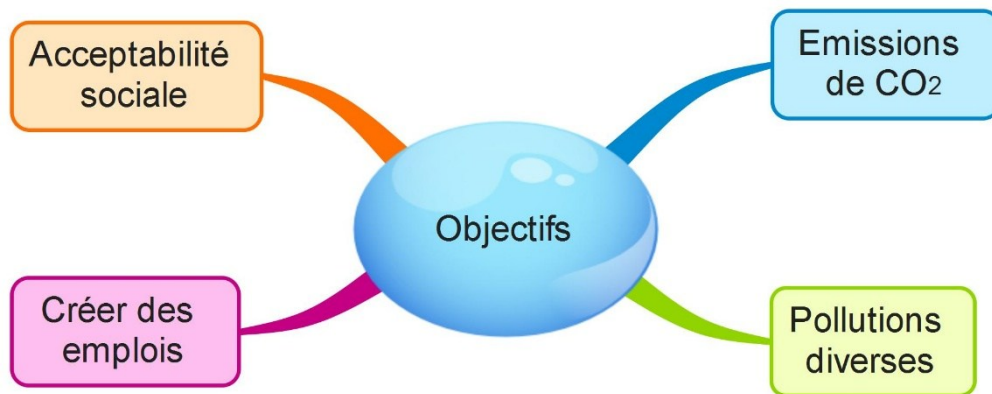
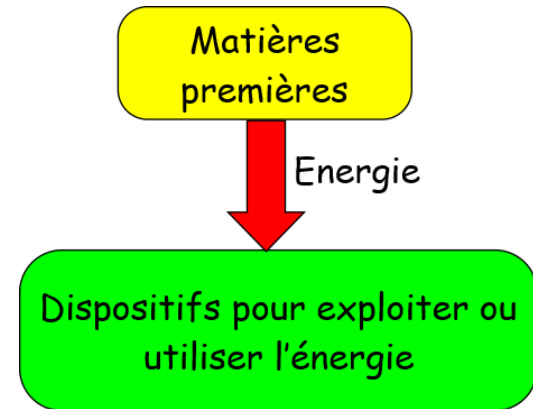
1g d'antimatière $\approx$ 3 fois Hiroshima



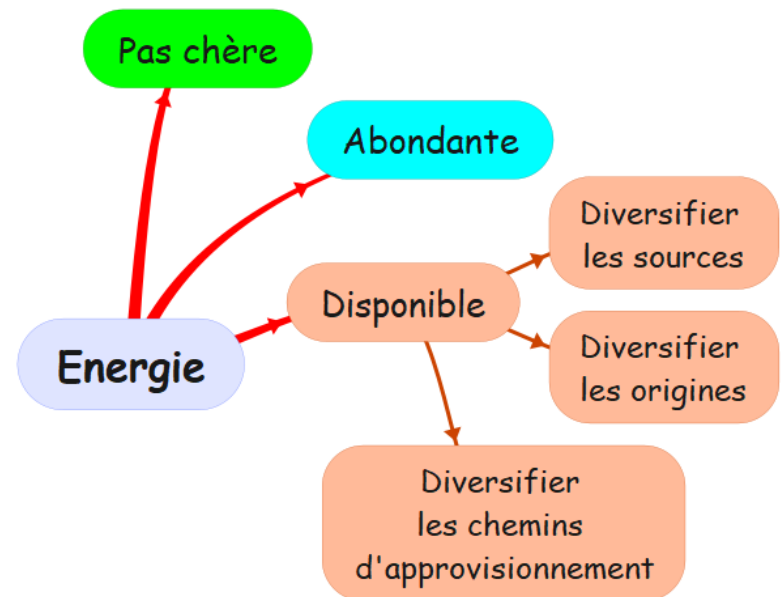
L'énergie : le sang du développement économique



Très important



Énergie : les nouvelles contraintes des pays riches



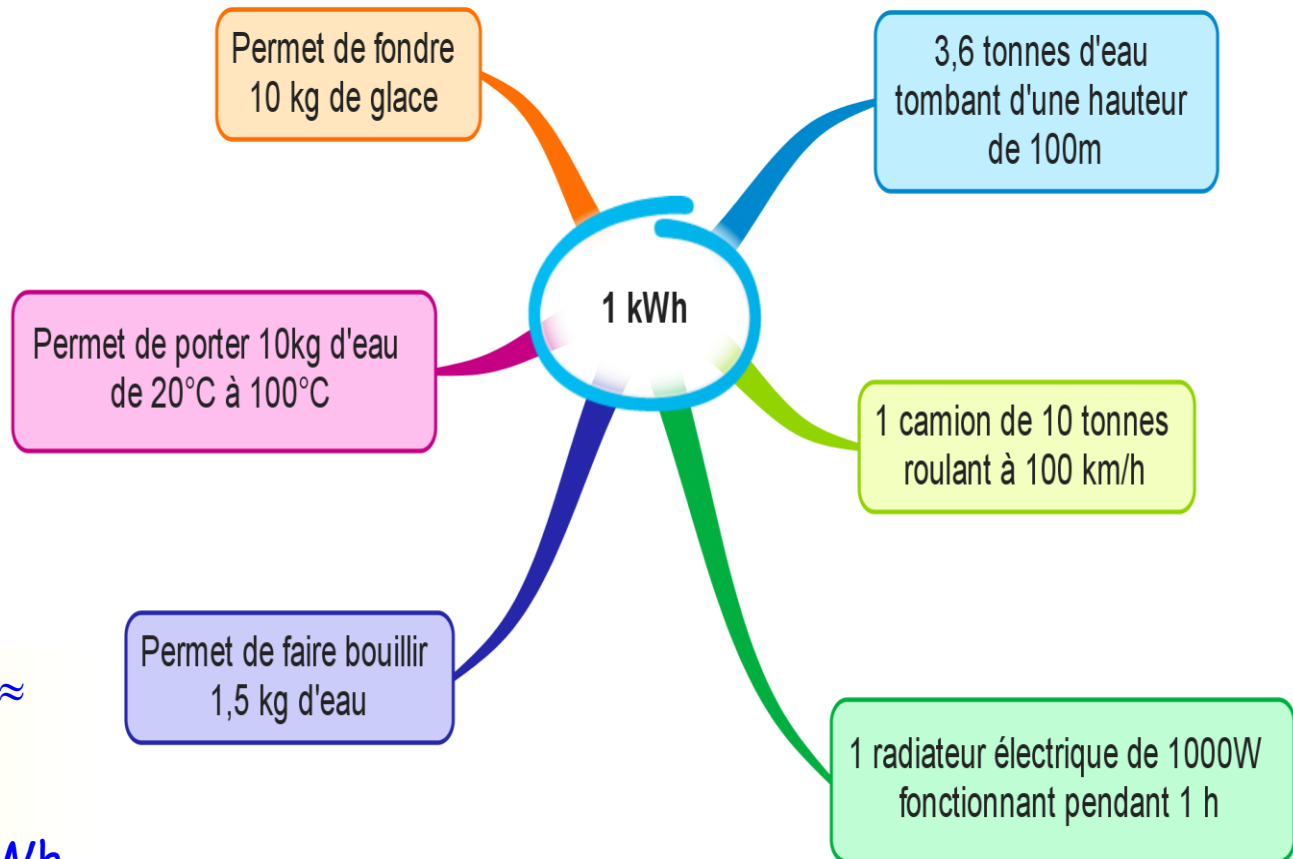
Les unités

Unité officielle : le joule (1J = très faible énergie ≈ 50 frappes sur les touches d'un clavier)

$1\text{ kWh} = 1\text{ kW}$ pendant 1 heure = 3,6 millions de joules

1 personne de 70 kg éjectée d'un vélo à 20 km/h a une énergie cinétique de d'environ 1000 J, soit 0,3 Wh

Batterie d'ordinateur $\approx 40\text{-}50\text{ Wh}$
Batterie voiture électrique $\approx 50\text{-}100\text{ kWh}$



Pays riches : malades d'être trop heureux Le business des marchands de peur

Convaincre la population que la fin du monde est proche.

Mais toutes les prédictions se sont avérées fausses

Prédictions (Scientifiques de Harvard, Stanford, ONU)
des années 70 :

En 2000, famine dans les pays non-occidentaux, fin de la civilisation, catastrophe écologique équivalente à un holocauste nucléaire, pays entiers rayés de la carte par l'élévation du niveau des mers, etc.

Peur des années 70 : entrée dans une période glaciaire

Progrès en une décennie (jusqu'à 2019)

1. L'humanité a créée 28% de sa richesse totale (PIB)
2. Extrême pauvreté (<1,9\$/jour). Passée de 18,2% à 8,6% de la population mondiale (137 000 personnes/jour en moins). Elle était de 36% en 1990.
3. Mortalité infantile divisée par ≈ 3 (2,1 millions décès d'enfants de moins de 5 ans évités par an)
4. Espérance de vie est passée de 69,5 à 72,6 ans en 10 ans (8h/jour)
5. Taux de mortalité due à la pollution diminuée de 19%
6. Décès dus aux catastrophes climatiques divisés par 3. Réduction de 95% depuis 1960

Données tirées de l'article de Tyler Brandt, The Foundation for Economic Education.

Comparer les sources d'énergie. Puissance

❑ Le tep (tonne équivalent pétrole) → permet de grossièrement comparer des énergies différentes.

❑ Le baril de pétrole = 159 litres
74\$/baril (2/4/2025) < 0,46€/l
(eau minérale (Badoit) 0,7-1€/l)



❑ **Puissance** = énergie par unité de temps

❑ 10 l d'essence (100 kWh) utilisés en 1 h = 100 kW. Brûlés en 6 s = 60 MW = la puissance des 4 réacteurs d'un Boeing 747

❑ Essence = 11,3 kWh/kg ; TNT = 1,17 kWh/kg

❑ Hiroshima = 23 300 m³ d'essence. Amoco Cadiz ≈ 10 fois l'énergie de la bombe d'Hiroshima.

Décisions politiques: impact ⇒ 20 à 30 ans après. On paye aujourd'hui la lâcheté et le dogmatisme des politiques.

Énergie et vivant

L'être humain

- ❑ L'homme $\approx 2,7$ kWh/jour (≈ 110 W)
- ❑ Grossesse ≈ 90 kWh (1 litre d'essence = 10 kWh)
- ❑ Un Français consomme en moyenne 150 kWh/jour

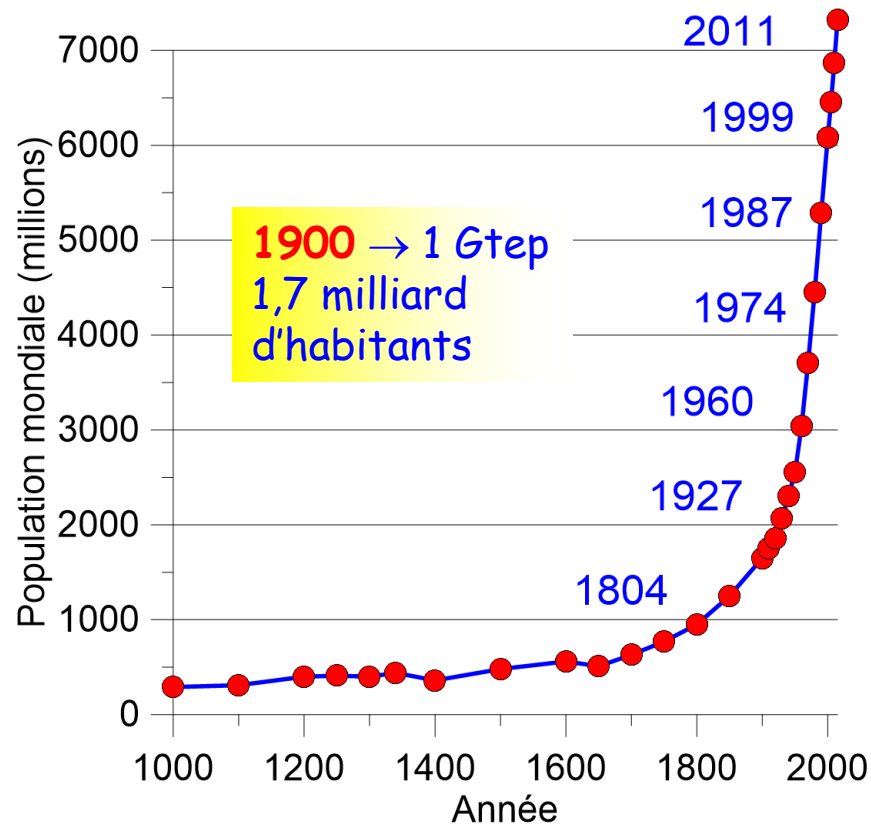
⇒ **Nourriture** $\Rightarrow$ équivalent à 500-600 Millions de tep
($\approx 6\%$ de notre consommation d'énergie totale)

Énergie que peut fournir un travailleur manuel $\approx 0,5$ kWh/jour

- ❑ Travailleur $\approx 0,5$ kWh/jour. 1 kWh ≈ 190 € (avec charges sociales)
- ❑ Pour un foyer $\approx 3\,500$ kWh/an hors chauffage
 - 30 personnes à temps plein + stockage de l'électricité
 - 750 000 € de salaire annuel
 - Coût actuel chez EDF ≈ 700 €/an
 - Coût de production ≈ 150 €/an

Le facteur déterminant : la population et l'accroissement du niveau de vie

- ❑ La population augmente ($\approx 200\,000$ habitants/jour)
- ❑ les pays émergents augmentent leur niveau de vie



Gtep = milliard de tonnes
équivalent pétrole

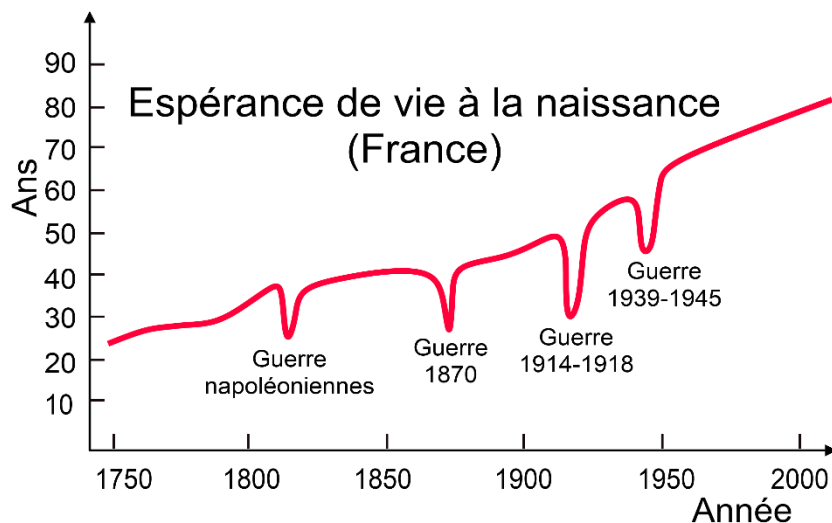
Poids de + en + élevé des
pays émergents et émergés

L'impact environnemental
réel de la France au niveau
mondial est presque nul ($\approx$
1% de la population)

1800 → $\approx 0,2$ Gtep/an ?
 ≈ 1 milliard d'habitants

2000 → 10 Gtep
6 milliards d'habitants

Espérance de vie et énergie



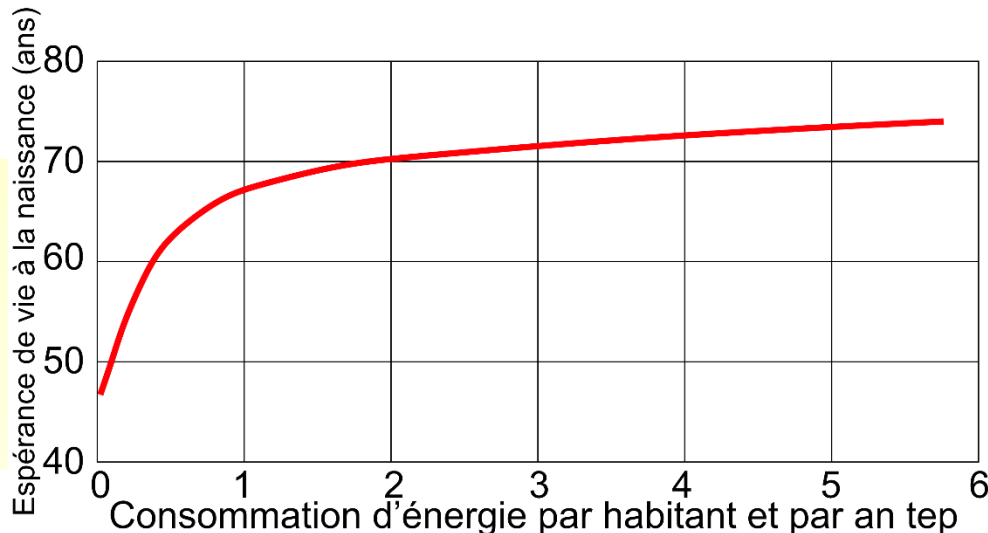
En 200 ans, en France

Consommation énergétique

× par 14 par français (1,3%/an)

× 28 (France, 1,75%/an) (population ×2)

- ❑ 2 milliards d'habitants consomment $\leq 0,2$ tep/hab/an
- ❑ 2,4 milliards d'habitants $\Rightarrow$ biomasse (cuisine et chaleur)



Importance du taux de natalité

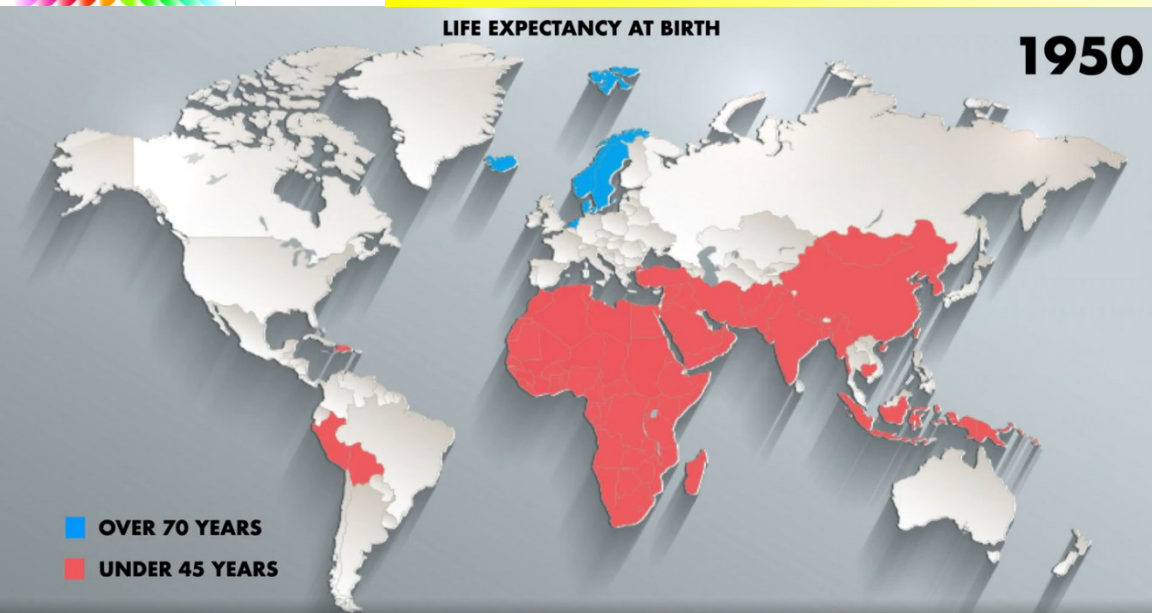
(1) $16 \rightarrow 8 \rightarrow 4 \rightarrow 2$

(2) $16 \rightarrow 16 \rightarrow 16 \rightarrow 16$

(4) $2 \rightarrow 4 \rightarrow 8 \rightarrow 16$

L'espérance de vie de ceux qui ont le moins accès à l'énergie est faible

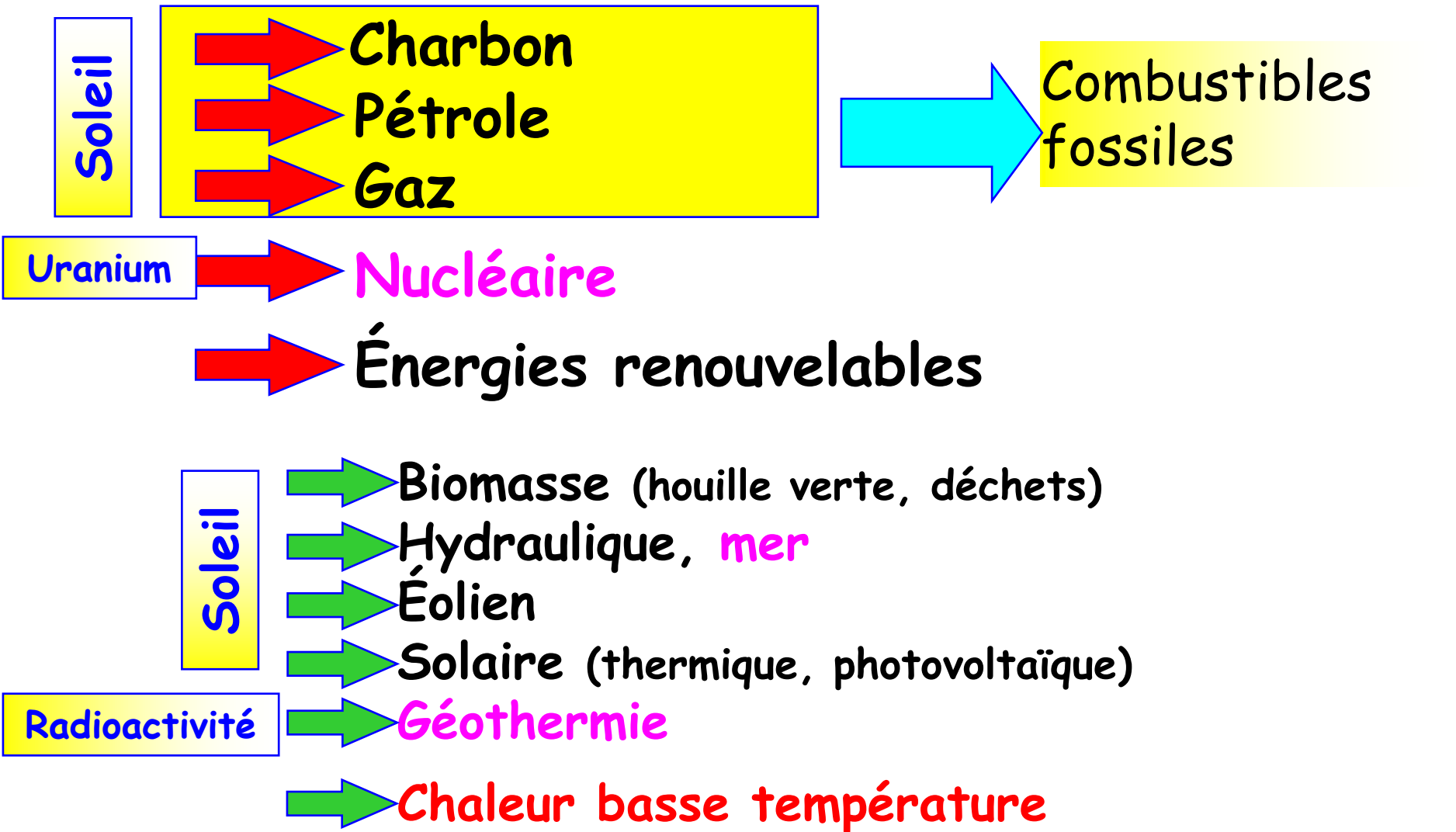
Espérance de vie à la naissance



*Steven Johnson,
TED 2021, Source
Our World In Data*



Sources d'énergie



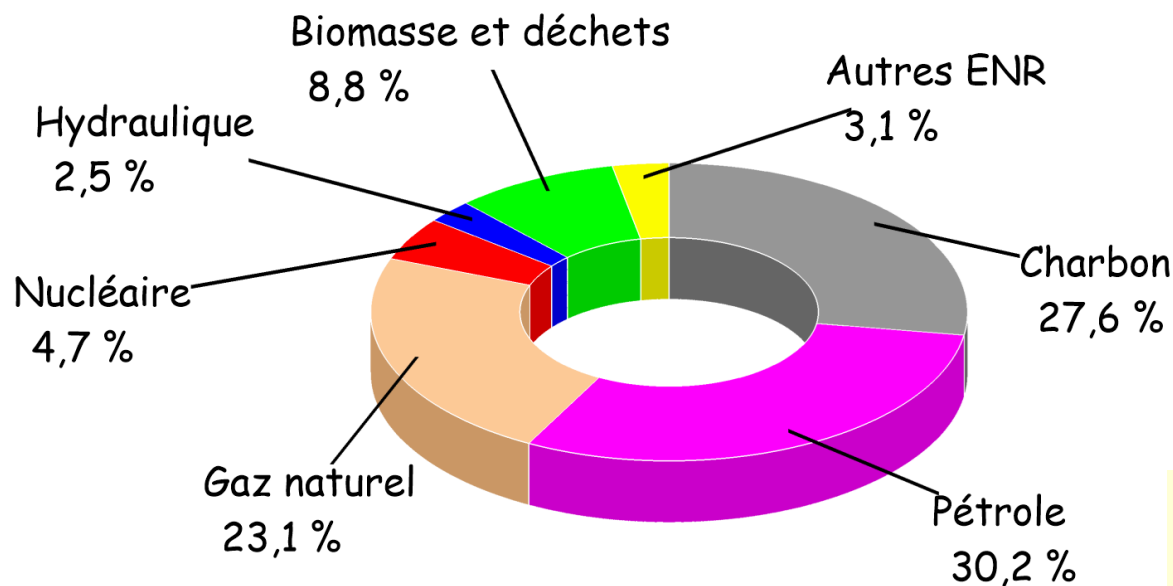
Interactions fondamentales mises en jeu : électromagnétique, gravitation, nucléaire + faible pour le Soleil

Domination des combustibles fossiles (>80%)

Énergie primaire 2022 $\Rightarrow$ 14,4 Gtep
 $\Rightarrow$ 9,4 Gtep d'énergie finale (1973 : 6,1 Gtep)

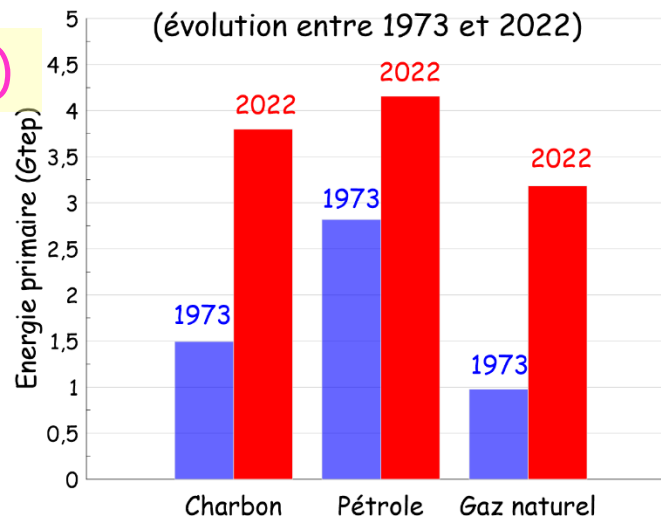
En 49 ans (1973-2022) la consommation de combustibles fossiles n'a diminué que de 5,8% soit en moyenne 0,12%/an

Energie primaire (2022)

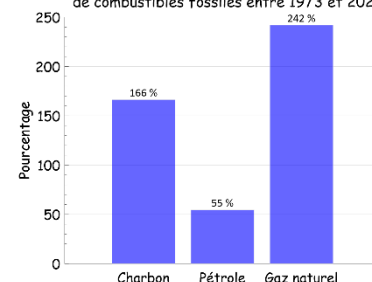


On consomme 5 à 6 fois plus de biomasse aujourd'hui qu'il y a 200 ans et 3 fois plus de personnes l'utilisent comme source d'énergie principale.

Combustibles fossiles
 (évolution entre 1973 et 2022)



Pourcentage d'augmentation de la production de combustibles fossiles entre 1973 et 2022



Énergie finale

Industrie $\Rightarrow$ 30,4%

Transports $\Rightarrow$ 27,8%

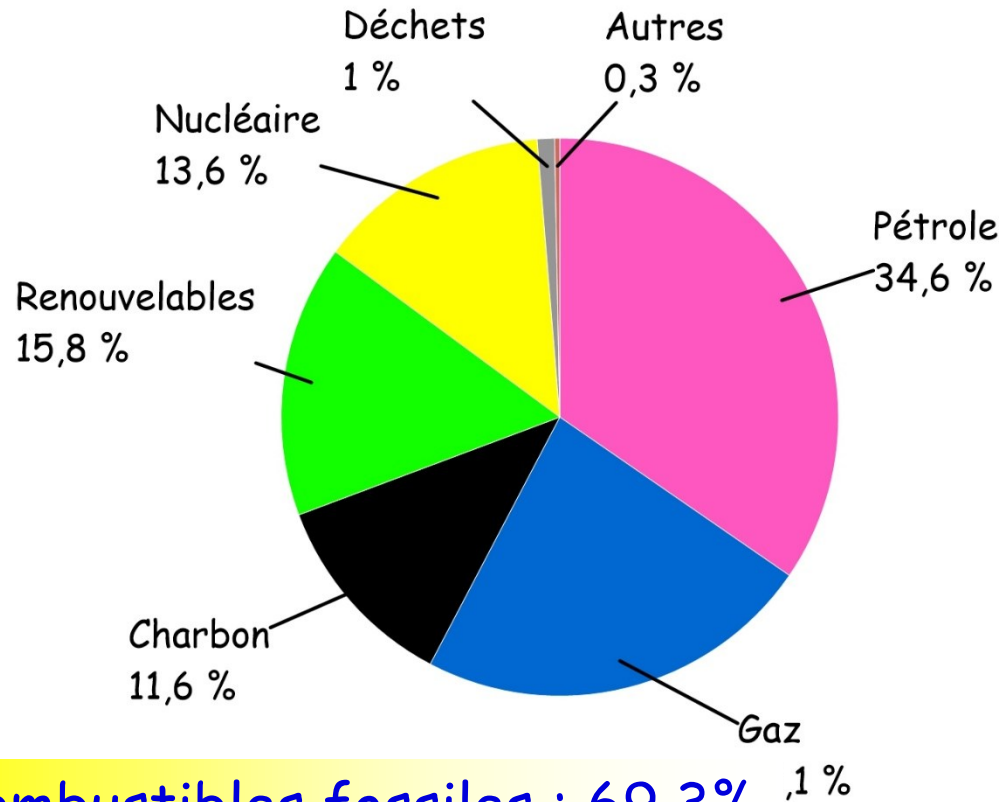
Bâtiments $\Rightarrow$ 28%

Agriculture et pêche $\Rightarrow$ $\approx$ 2%

Non énergétique $\Rightarrow$ $\approx$ 10%

L'Europe (avant 2022)

Consommation d'énergie
(Union Européenne 2018)



Combustibles fossiles : 69,3%

Gaz naturel : dépendance du gaz Russe
Allemagne : 55%, France : 17%

Importations

⇒ **Charbon**

Russie ⇒ 43,5%

USA ⇒ 16,8%

⇒ **Pétrole**

Russie ⇒ 26,8%

USA ⇒ 5,2%

Norvège ⇒ 6,9%

⇒ **Gaz naturel**

Russie ⇒ 34,3%

USA ⇒ 4,8%

Norvège ⇒ 13,2%

Algérie ⇒ 7,7%

Qatar ⇒ 8,7%

La France et le gaz naturel

La France a importé 534 TWh* de gaz naturel en 2020

La France produit
moins de 1 %
du gaz
qu'elle
consomme

Norvège
36 %

Achats
sur les
marchés
boursiers
22 %

Russie
17 %

Algérie
8 %

Pays-Bas
8 %

Nigeria
7 %

Qatar
2 %

Le terminal gazier
de Saint-Nazaire Montoir.

Source : ministère de la Transition écologique. *Térawattheures

Photo et infographie : Ouest-France.

Quelle évolution ?

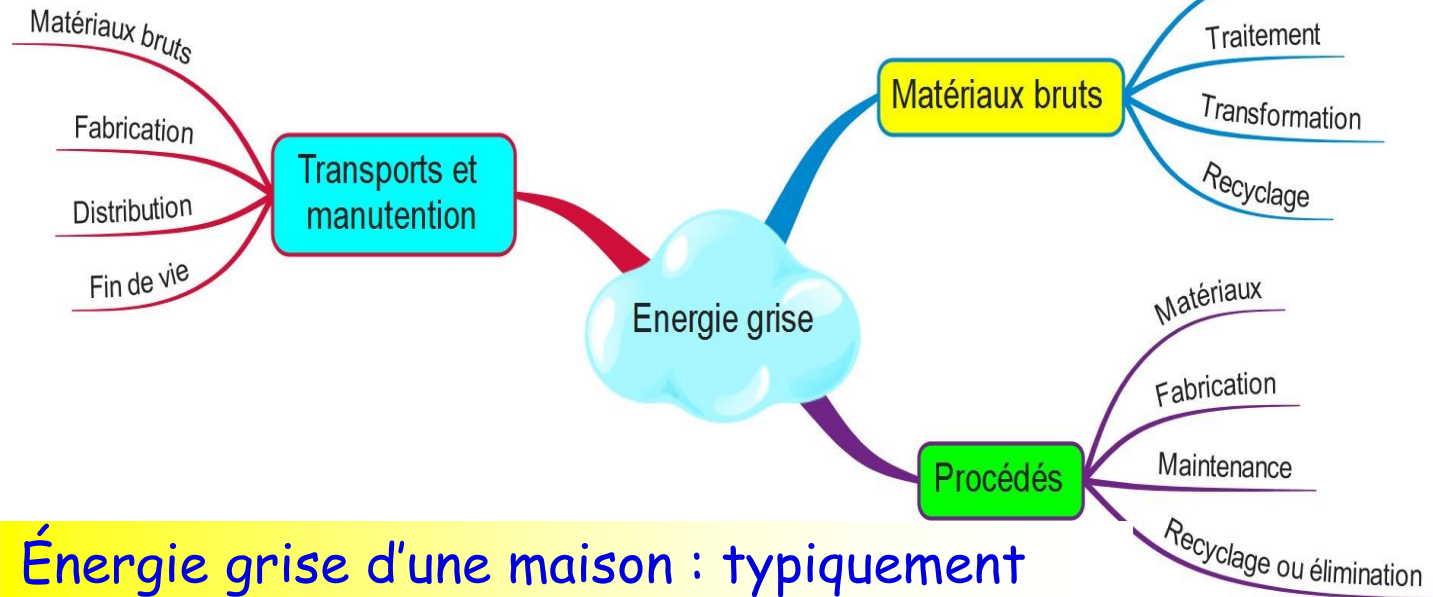
- ⇒ Importance du charbon (mais très polluant)
- ⇒ Les combustibles fossiles non conventionnels dont gaz et pétrole de schiste deviennent importants
- ⇒ Les énergies renouvelables là où elles sont rentables
- ⇒ Le solaire est une énergie d'avenir
- ⇒ La biomasse : source de carbone organique d'avenir
- ⇒ Électricité : place de plus en plus importante
- ⇒ Dans certains pays les ENR intermittentes risquent d'être une désillusion et cela commence déjà
- ⇒ La Chine domine le marché énergétique (composants, métaux rares, etc.)
- ⇒ L'Europe est très mal partie pour l'énergie (elle en a peu) en s'imposant en plus des contraintes dogmatiques (nucléaire, transition écologique, etc.)

L'énergie grise dont on parle peu (grey energy ou embodied energy)

Fabrication d'un Tshirt

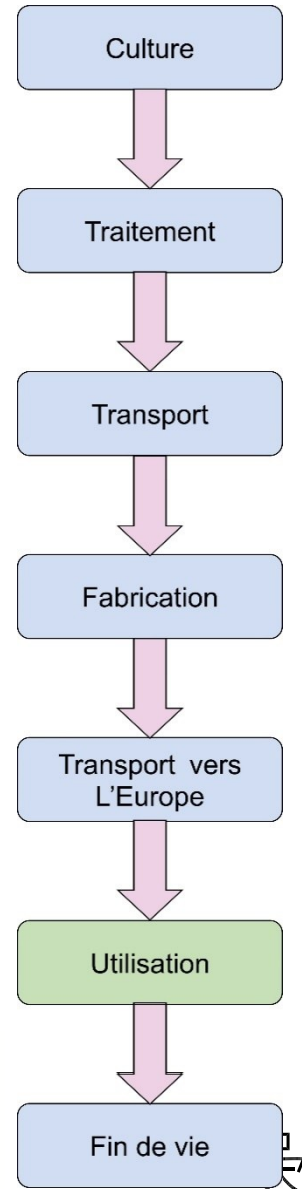
Dans l'énergie totale

- ❑ énergie d'usage ou d'utilisation
- ❑ énergie grise



Énergie grise d'une maison : typiquement 50-60 ans de consommation. De plus en plus important pour les nouveaux bâtiments

Estimation : au niveau de l'Europe l'énergie grise représenterait le double de l'énergie d'utilisation



Effet de serre et énergie

Sans effet de serre la température moyenne de la terre serait à **-18°C** . Elle de **$+15^{\circ}\text{C}$** . Augmentation depuis l'ère préindustrielle due aux activités humaines

Pour une 1 kWh électrique:

Charbon $\Rightarrow$ environ 1000g de CO_2

Pétrole $\Rightarrow$ environ 750 g de CO_2

Gaz $\Rightarrow$ environ 500 g de CO_2

Le CH_4 est 23 fois plus impactant que le CO_2

Une voiture qui fait 15 000 km/an ($\approx 150\text{g } \text{CO}_2/\text{km} \approx 6,4 \text{ l}/100 \text{ km}$)
 $\Rightarrow \approx 2,25$ tonnes de CO_2 .

$\Rightarrow$ 1 litre d'essence = 2.35 kg de CO_2

$\Rightarrow$ 1 litre de diesel = 2.69 kg de CO_2

Respiration humaine $\approx 500 \text{ kg } \text{CO}_2/\text{an}$

Vache $\Rightarrow \approx 650 \text{ kg } \text{CO}_2/\text{an}$ et $360 \text{ kg } \text{CH}_4/\text{an}$

$\Rightarrow \approx 7,5$ tonnes de CO_2 équivalent/an

Le défi énergétique français

CO₂ (88% vient de l'énergie
37,9 Gt (2018)
Charbon 39%,
Pétrole 30%,
Gaz 19%
Autres 12%

On émet 2 fois plus de CO₂ que la nature peut absorber

Échelle de temps courte

①

Réduire les émissions de gaz à effet de serre

Échelle de temps longue

②

Réduire la consommation d'énergies fossiles

1960 $\Rightarrow$ 1bbl consommé, 5 découverts
2023 $\Rightarrow$ 3-4 bbl consommés, 1 découvert

③

France : réduire le déficit commercial

Défi énergétique

Mais ne pas confondre énergie et CO₂ !

Suède

15 MWh/hab/an d'électricité, 5,3 tCO₂/hab/an

Danemark

6,9 MWh/hab/an d'électricité, 10,1 tCO₂/hab/an

....En France la RT2012 a favorisé le gaz par rapport à l'électricité

Déficit commercial, dette.

Année	Déficit commercial	Déficit lié aux combustibles fossiles	Part
2011	69,6 G€	61,4 G€	88,2%
2022	163,6 G€	108,6 G€	66,4%
2024	≈ 81 G€	≈ 55,6 G€	68,6%
2025	≈ 69,2 G€	≈ 44,2 G€	63,9%

PIB réel corrigé de l'inflation jusqu'en 2025

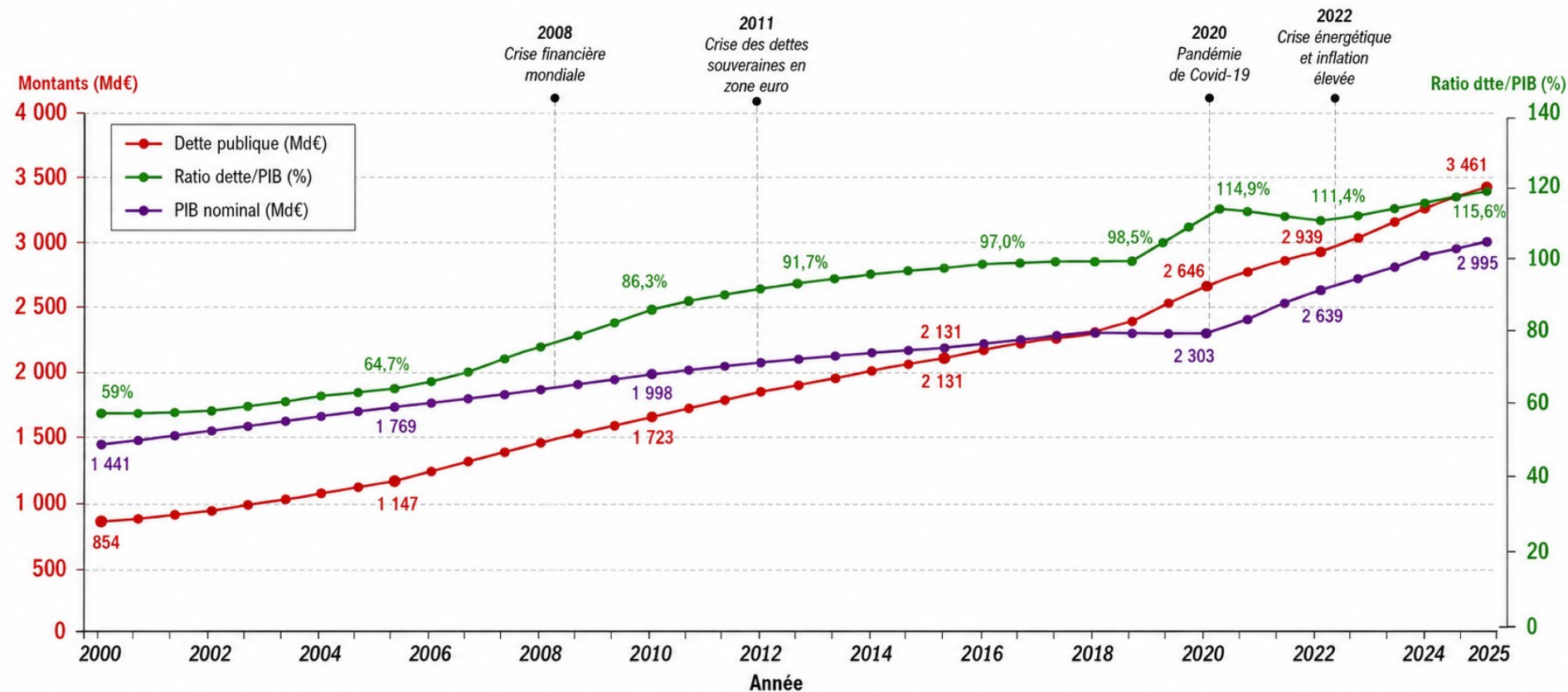
- ❑ Évolution depuis 2007 : Chine (170%), Inde (120%), USA (36%), Zone € (16%), France (15%)
- ❑ Évolution depuis 2020 : Chine (27%), Inde (32%), USA (12%), Zone € (6%), France (5%)

Économie souterraine (estimée) : ≈ 8-12% du PIB. Trafic de drogue ≈ 6,8G€, 210 000 emplois équivalent temps plein

Déficit commercial, dette.

France : évolution de la dette publique, du PIB nominal et du ratio dette/PIB (2000-2025)

En milliards d'euros courants et en %



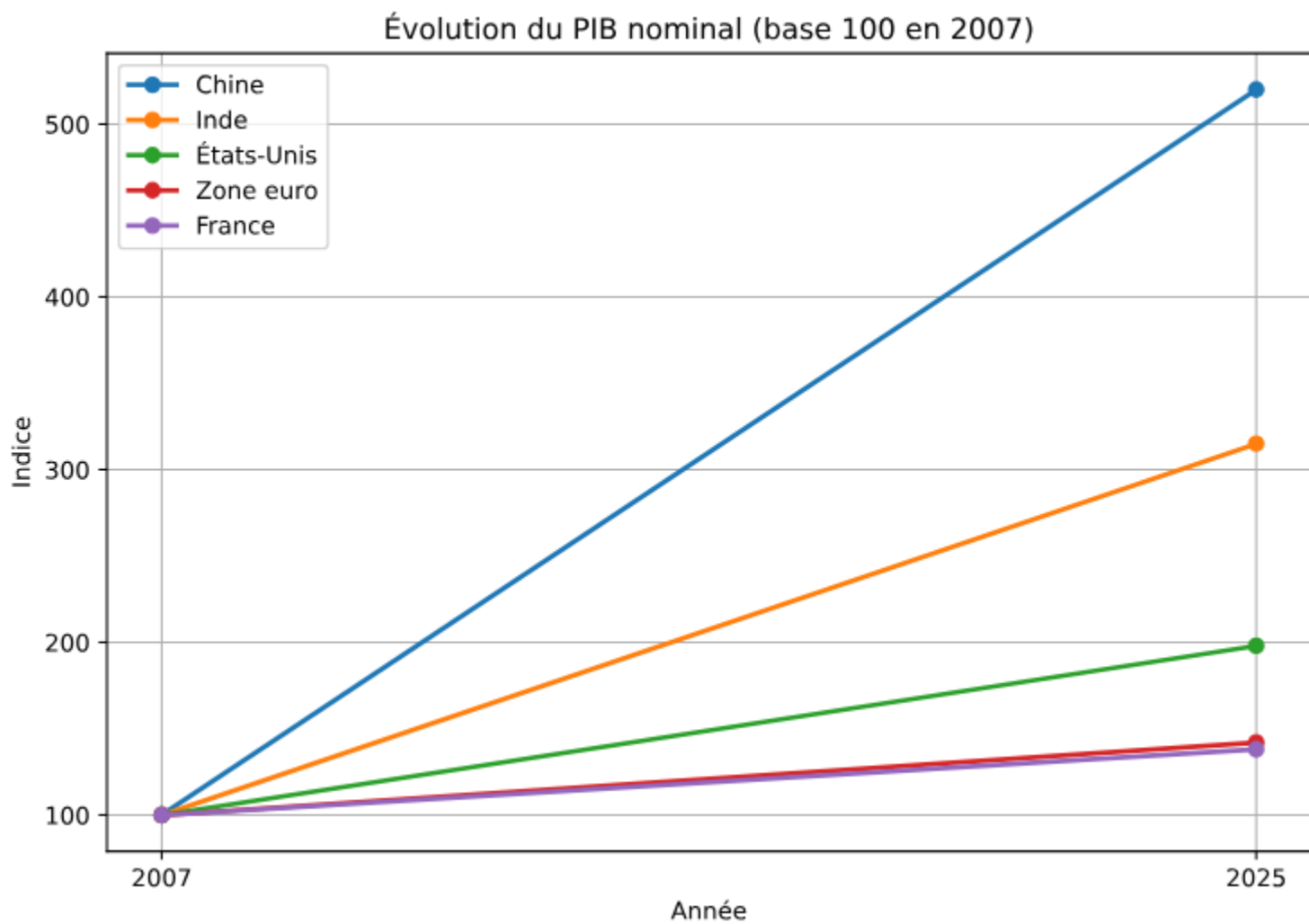
Sources : Insee (Comptes nationaux) jusqu'en 2024 ; projet de loi de finances pour 2025 (dette publique).

Note : Dette publique au sens de Maastricht (administrations publiques).

Dernière année : 2025 (prévision)

© 2025

Le PIB nominal n'est pas corrigé de l'inflation
Le PIB réel est corrigé de l'inflation



Les contraintes dogmatiques

Des décisions politiques coupées de la réalité scientifique, technique et économique

Exemples parmi d'autres :

- ❑ Réduire le nucléaire à 50% $\Rightarrow$ La France émettrait plus de CO_2 en 2030 qu'en 2011 (373 Mt au lieu de 350 Mt en 2011)
- ❑ Fermeture de Fessenheim : coût plusieurs G€, remplacement de 10 emplois de haute qualification par 1 emploi sans qualification, augmentation des émissions de CO_2 (25 Mt), etc. *On a du redémarrer les centrales à charbon*
- ❑ La RT 2012 pour l'habitat favorise le gaz par rapport à l'électricité (on émettra plus de CO_2). RT2020 corrige en

Ce que disait R.Reagan en parlant de la politique des démocrates aux USA s'applique aussi à la France :

« Tout ce qui bouge on le taxe ; ce qui bouge encore on le réglemente ; tout ce qui ne bouge plus on le subventionne. »

USA : imposer son hégémonie

Les USA ont été fondés en 1776. Ils ont été impliqués dans 227 années de guerre sur les 245 années de leur existence (18 années de paix sur 2 siècles et demi)

Financement de 78 coups d'états

Pays bombardés par les USA depuis la deuxième guerre mondiale :

1950-> Corée, Chine, Guatemala, Indonésie, Cuba, Guatemala, Congo, Laos, Vietnam, Cambodge, Guatemala, Grenade, Liban, Salvador, Nicaragua, Iran, Panama, Irak, Koweït, Somalie, Bosnie, Soudan, Afghanistan, Yougoslavie, Yémen, Irak, Afghanistan, Pakistan, Somalie, Yémen, Libye, Syrie <- 2015

On est en train de passer d'un monde mondialiste à un monde souverainiste. Le pb d'un monde multipolaire : qui va financer le niveau de vie des Américains ?

Le monde d'après ne sera pas celui qu'avait prévu les « élites » occidentales

- ⇒ Forum de Davos : vous n'aurez plus rien et vous serez heureux
- ⇒ Contrôle de la population, gouvernance par la peur
- ⇒ Vers un monde **multipolaire** au lieu **d'unipolaire**
- ⇒ Remise en cause du partage de la valeur
- ⇒ L'occident n'a pas le monopole du bien (beaucoup de guerres injustes (liées à l'énergie) ont été menées par les occidentaux
- ⇒ **Les USA dominant de moins en moins le monde**
- ⇒ Dédollarisation lente mais progressive
- ⇒ Extraterritorialité du droit américain
- ⇒ L'occident ne protège plus le droit de propriété

Le privilège exorbitant du dollar (\$)

Le dollar est notre monnaie, mais c'est votre problème
(John Connaly, 1971)

La monnaie de réserve est utilisée comme moyen de paiement dans les transactions internationales car elle est digne de confiance

1944 Bretton Woods 1 once d'or = \$35 et monnaie de réserve. Avant: Florin(1600-1750) $\Rightarrow$ livre sterling (1750 $\rightarrow$)

1960 Pbs car Guerre du Vietnam + dépenses sociales $\Rightarrow$ Création monétaire silencieuse $\Rightarrow$ inflation à l'extérieur
Pas assez d'or (France et Suisse $\Rightarrow$ rachat d'or)

1971 (Nixon) Plus de conversion \$ $\Rightarrow$ or. Impression de \$ quand les USA le veulent

1972 1 once d'or $\Rightarrow$ \$75

1973 Effondrement des marchés

Fin 1973 $\Rightarrow$ Arabie Saoudite + autres pays $\Rightarrow$ vente du pétrole en \$ (pétrodollars)

1981 $\Rightarrow$ confiance rétablie

Le privilège exorbitant du dollar (\$)

≈ 2000, l'Europe souhaite créer une monnaie de réserve (€)

1999 Création de l'€ avec l'objectif de créer des pétroeuros.

2000 Pays comme l'Irak (Sadam Hussein) veulent vendre leur pétrole en €. La Lybie (Kadhafi) aussi et veut créer une monnaie Africaine. D'autres pays (Syrie, etc.) veulent s'émanciper du \$

2003 Guerre d'Irak, 2011 Lybie, 2011 Syrie, etc.

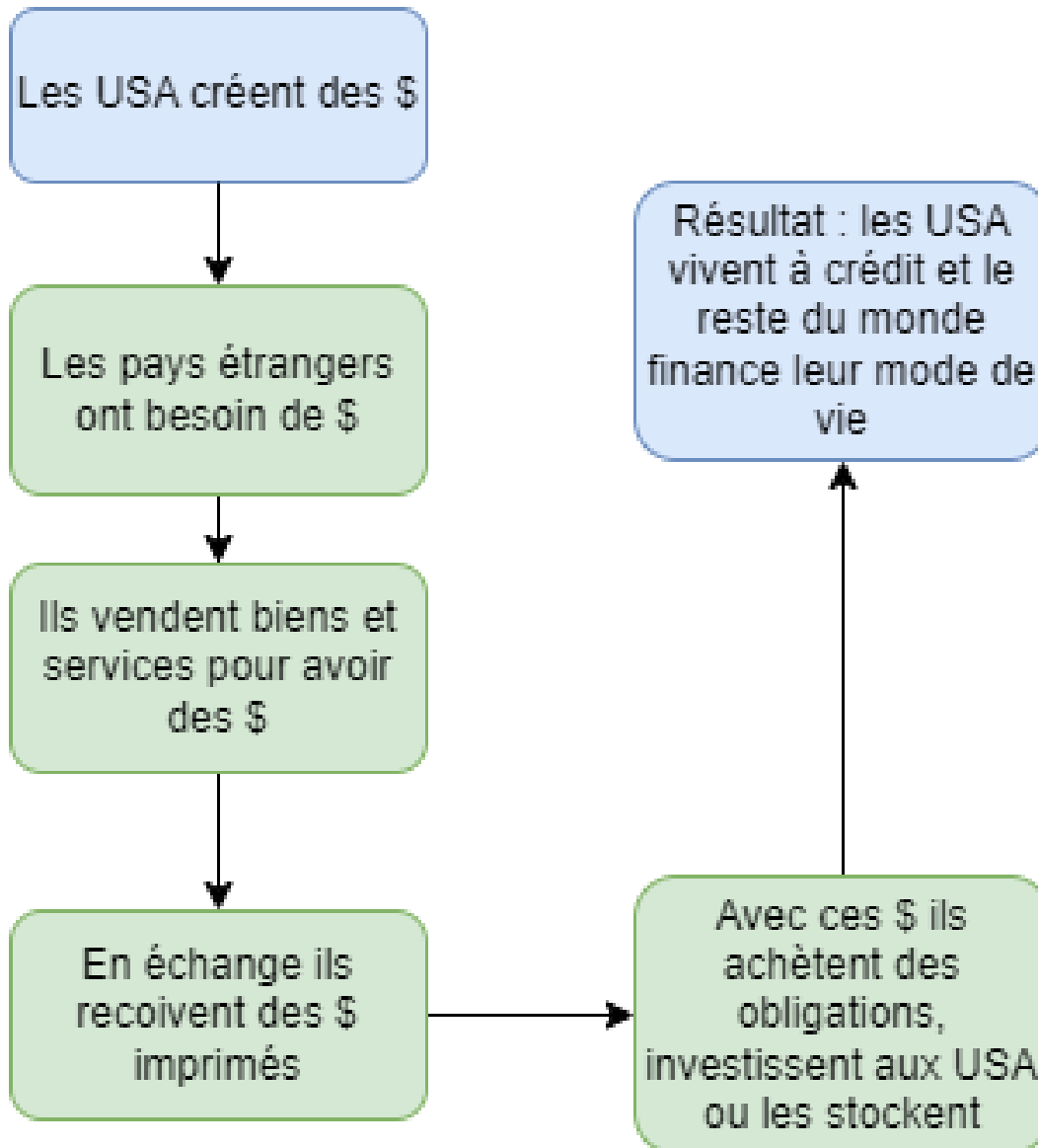
2010 Sanctions plus dures contre l'Iran (commencées en 1979)

Les USA ont trop tiré sur la corde (extraterritorialité, création monétaire, etc.)

Aujourd'hui 1 once d'or ≈ \$4000 (perte de ≈ 99,9% de sa valeur depuis 1944)

La dédollarisation est en marche accélérée par les conflits Ukraine-Russie, USA-Israël-Iran. Monde Multipolaire (Occident-BRICS)

Le privilège exorbitant du dollar (\$)



USA : des règles plutôt que droit international

Les USA utilisent des règles pour piller le monde

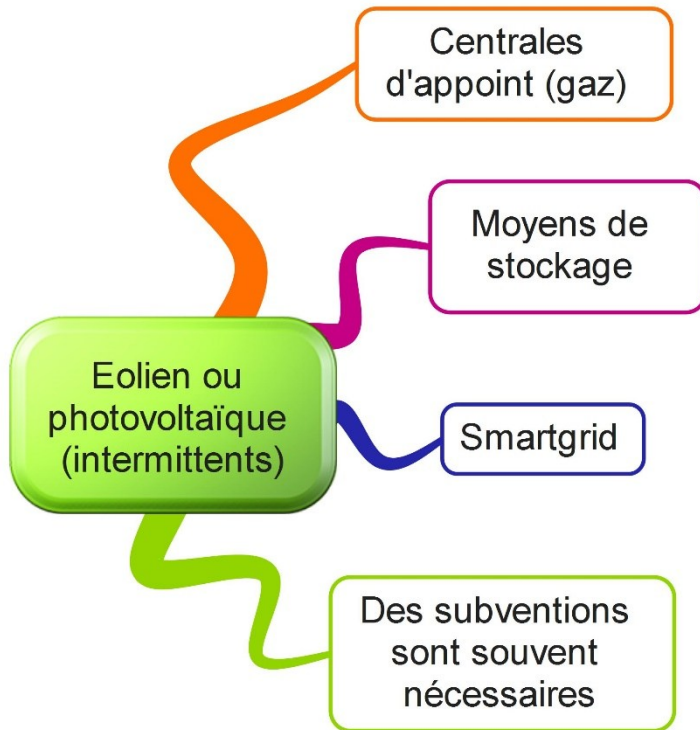
Quelques exemples

- ⇒ Extraterritorialité du droit américain
- ⇒ Espionnage par NSA et autres agences
- ⇒ Règlementation ITAR (International Traffic in Arms Regulation) ex d'application : missiles Scalp
- ⇒ IRA (Inflation Réduction Act)
- ⇒ Réseau SWIFT pour surveiller les transactions
- ⇒ Confiscation des avoirs
- ⇒ Mise au ban de sociétés (Huawei,...)
- ⇒ Semiconducteurs (ASML, TSMC,...)

Il peut y avoir des représailles : ex : terres rares
(La Chine extrait 58% des terres rares, en raffine 89%
et en manufacture 92%)

Voir <https://www.youtube.com/watch?v=2bep7dWT8ow>
(Guerre commerciale : la nouvelle guerre totale, Alain Juillet)

Energies intermittentes



Eolien (Allemagne)
 62 GW $\Rightarrow$ 74 TWh/an
 France (nucléaire)
 63 GW $\Rightarrow$ 405 TWh/an

Tous les kWh ne se valent pas

kWh fossile $\Rightarrow$ production continue, émet du CO_2 , épuise les stocks

kWh éolien ou photovoltaïque $\Rightarrow$ intermittent, pas de CO_2 , nécessite des moyens supplémentaires $\Rightarrow \text{CO}_2$

En Europe, le prix du kWh peut varier de -0,5€ à 3€ selon l'offre et la demande.

Prix Moyen avant 2020 :

France $\Rightarrow$ 12,7 c€/kWh

Allemagne $\Rightarrow$ 22,8 c€/kWh

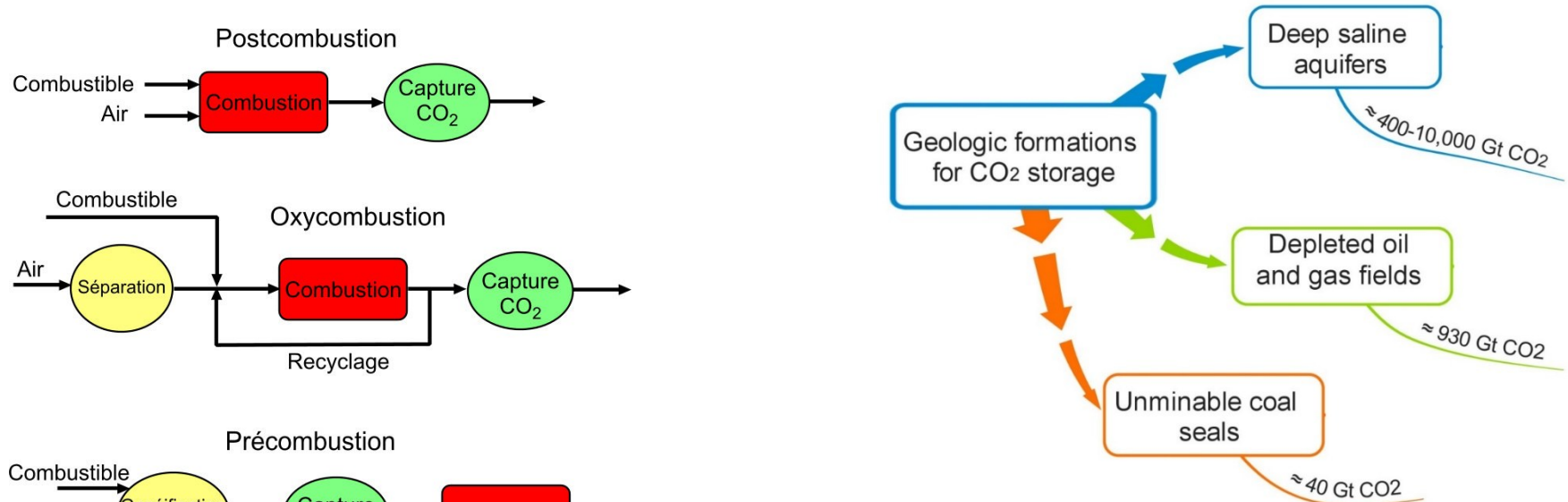
Danemark $\Rightarrow$ 27 c€/kWh

Les combustibles fossiles (pétrole, gaz, charbon)

- ❑ Ils émettent tous du gaz carbonique
- ❑ Capture et stockage ? ... mais diminution du rendement.
- ❑ Réserves limitées

La capture-stockage du CO₂

Des milliers de centrales CCS 1Mt/an seraient nécessaires



Le CO₂ est toxique si > 3%.

Dans tous les cas baisse du rendement
⇒ plus de consommation d'énergie, plus d'émissions

Les hydrocarbures non conventionnels



Methane hydrates

Unconventional hydrocarbons

Source rock

Heavy oil

Extra-heavy oil

Tight oil

Tight gases

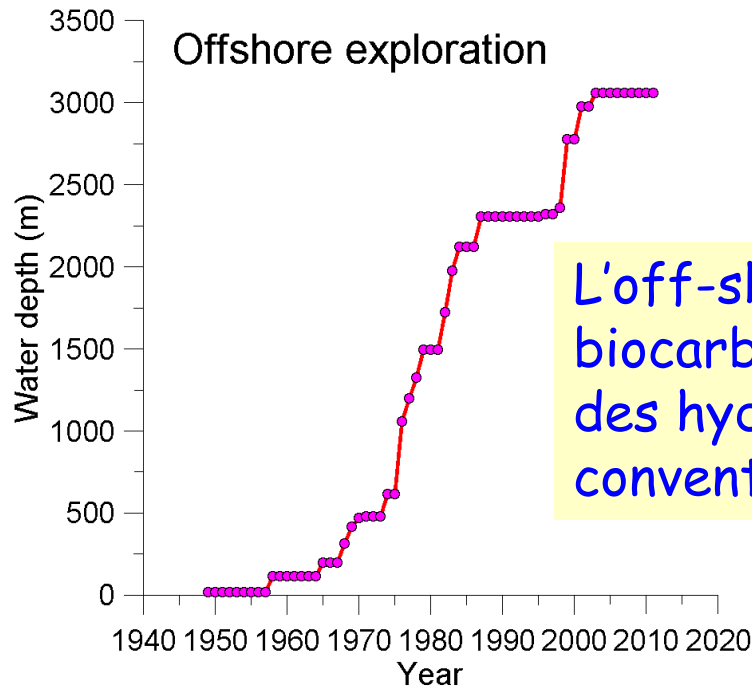
Reservoir

Oil shales

Shale oil

Shale gas

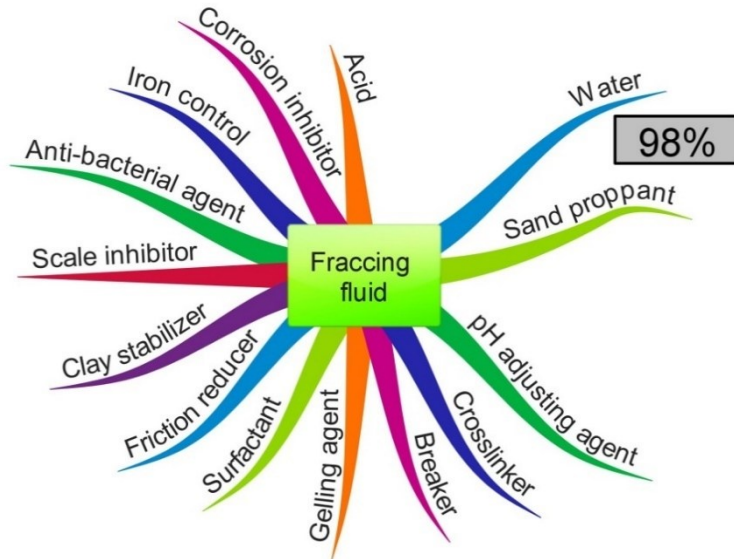
Coalbed methane



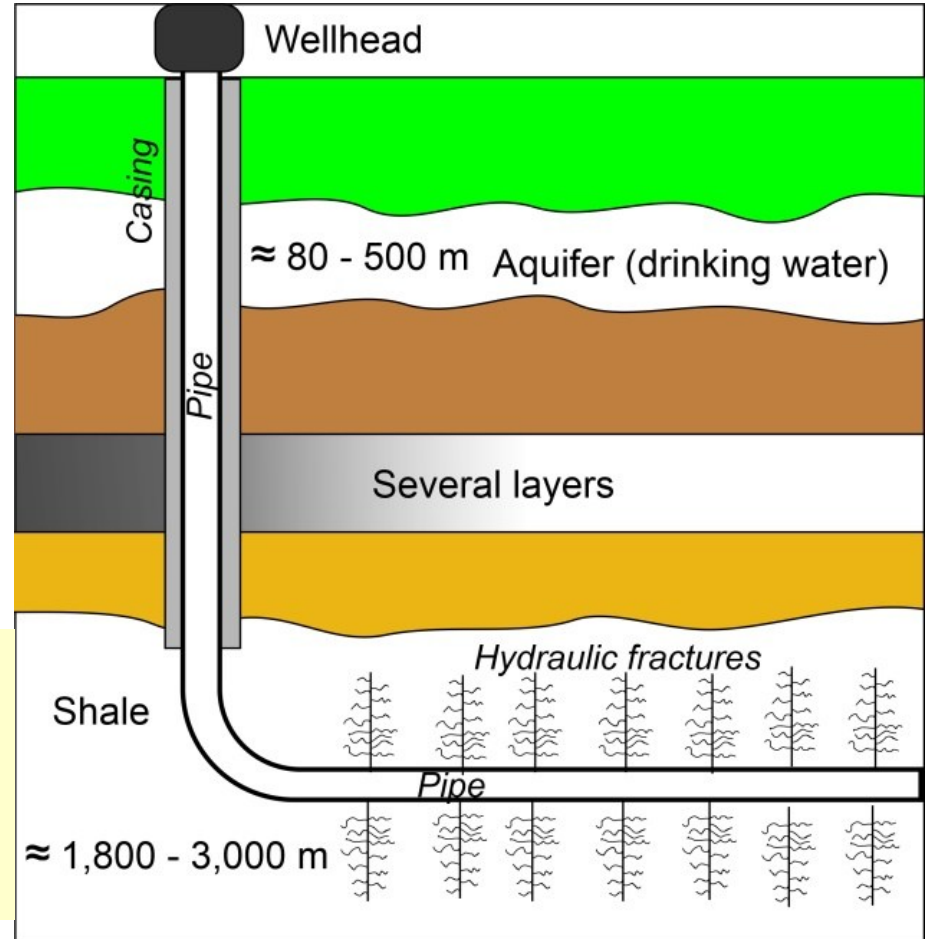
L'off-shore profond et les biocarburants sont aussi des hydrocarbures non conventionnels

Shale oil = huile de schiste
Oil shale = schiste bitumineux

Le gaz de schiste



La fracturation hydraulique
(elle est utilisée aussi en
géothermie profonde et pour le
pétrole conventionnel)



Aujourd'hui : Prix du GNL 4-7 fois plus cher pour l'Europe qu'aux USA. Des industries européennes vont se délocaliser aux USA. L'Europe importe du pétrole et du gaz Russe par des voies détournées.

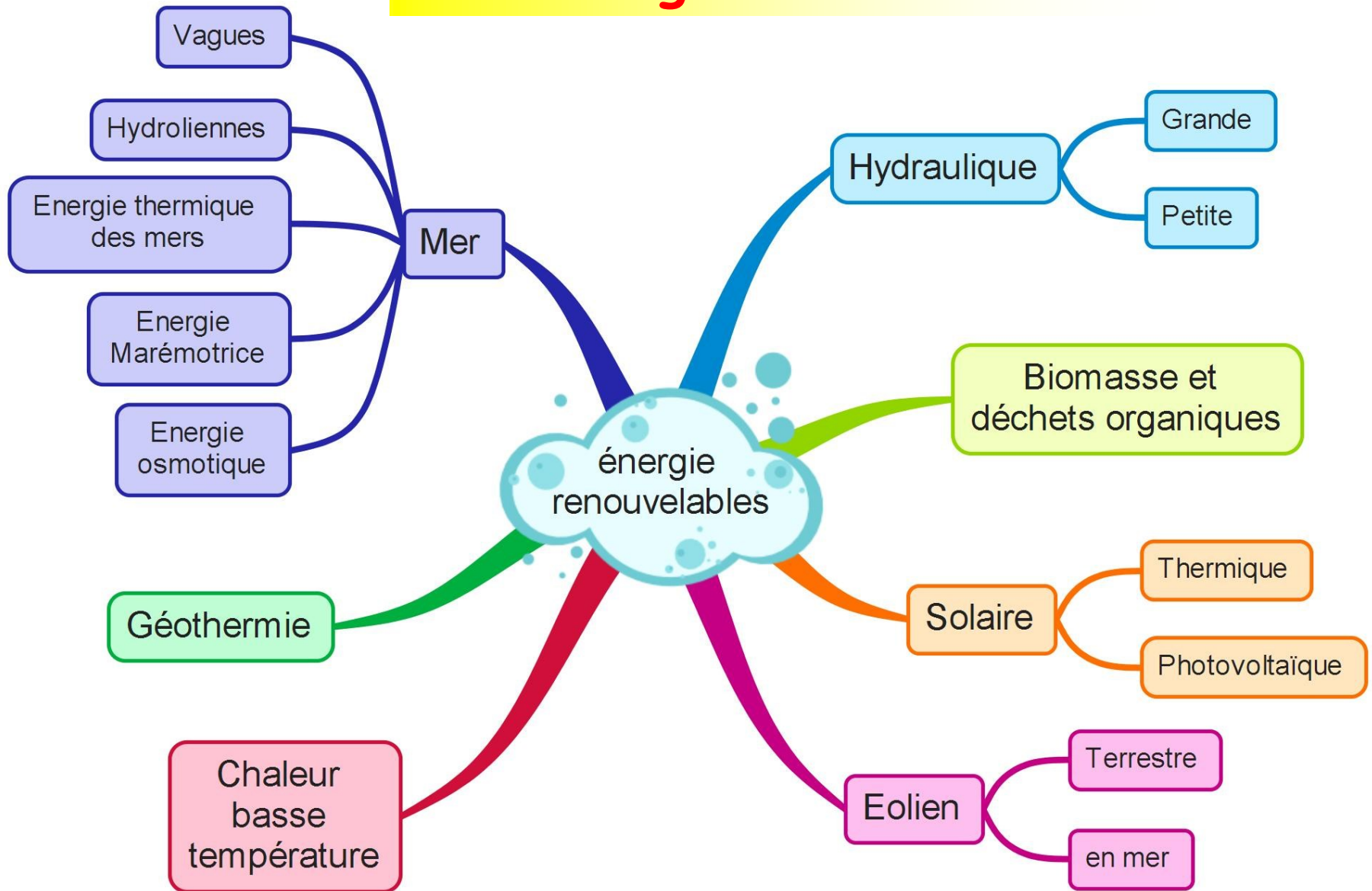
Les énergies renouvelables (ENR)

De vieilles énergies (500 000 ans d'âge)

- ❑ Peu concentrées $\Rightarrow$ 1g d'eau tombant de 100m = 0,3 mWh
1g de ^{235}U = 23 000 kWh. 1g de pétrole = 1,2 Wh
- ❑ Aujourd'hui: biomasse $\Rightarrow$ chaleur, Hydraulique $\Rightarrow$ électricité
- ❑ On consomme plus de biomasse aujourd'hui et plus de monde en consomme qu'il y a 200 ans. (1800, 0,2 Gtep, 1 Ghab 2000, 1 Gtep, 3Ghab)
- ❑ ENR $\Rightarrow$ diminuer la consommation de combustibles fossiles
- ❑ Énergies renouvelables $\Rightarrow$ efficacité énergétique
- ❑ Éducation et la formation $\Rightarrow$ important
- ❑ ENR $\Rightarrow$ investissements importants $\Rightarrow$ nouveaux modes de financement
- ❑ Exploiter les technologies qui apportent une plus value au pays
- ❑ Nécessité d'une continuité

Subvention des ENR en Allemagne $\Rightarrow$ contribution du consommateur :
0,58c€/kWh en 2004 à 5,2c€/kWh en 2013, soit 896% d'augmentation.
CSPE en France (2018) $\Rightarrow$ 7,7 G€ HT dont 55% pour l'éolien et le solaire)

Les énergies renouvelables

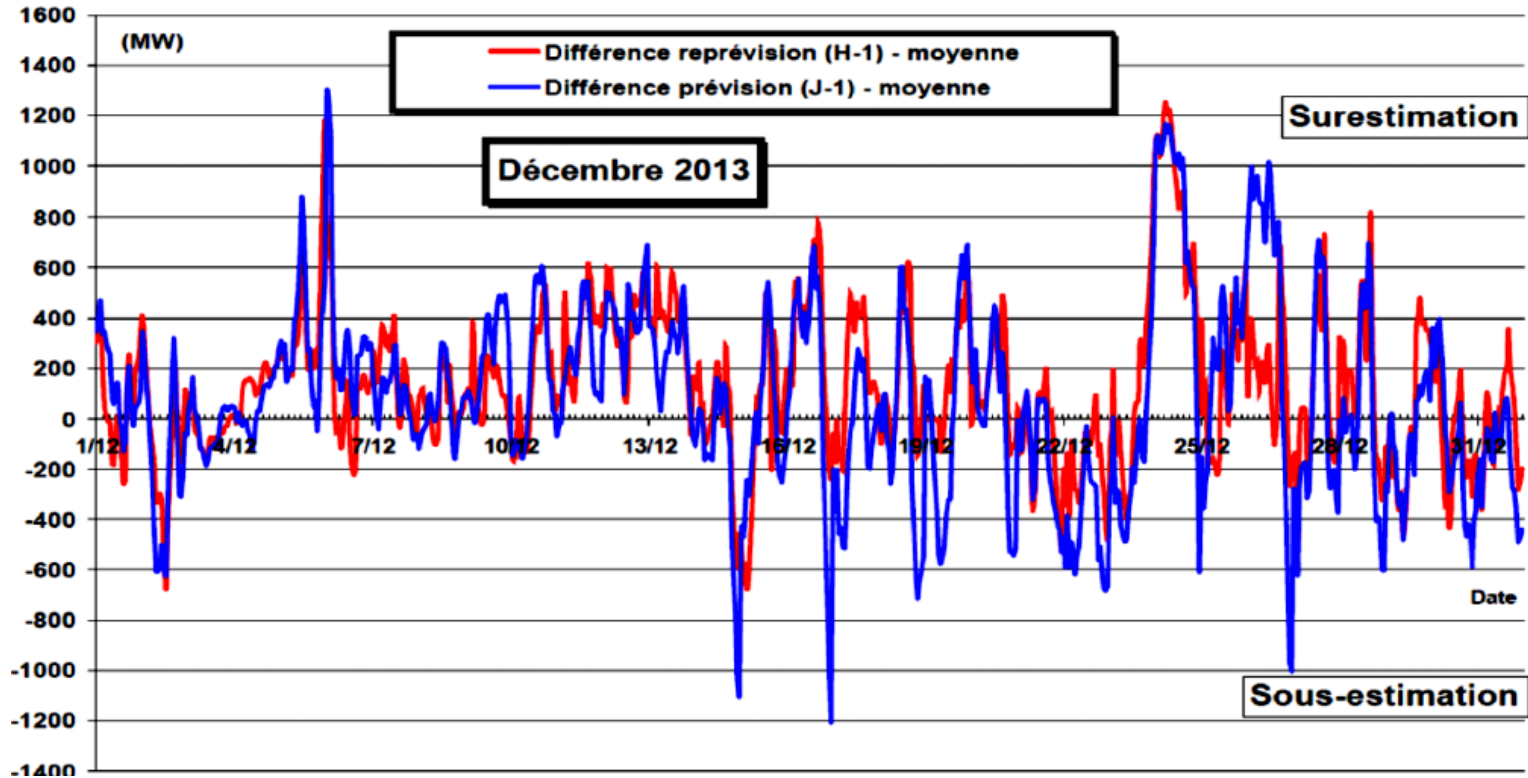


Le problème majeur de l'éolien et du photovoltaïque : l'intermittence

- ❑ On peut avoir de l'électricité quand on n'en n'a pas besoin
- ❑ On peut ne pas avoir de l'électricité quand on a besoin

Pour comprendre la contrainte de l'intermittence, imaginer une carte bleue dont le plafond des dépenses serait corrélé à la vitesse du vent

La prévision de l'éolien $\Rightarrow$ mauvaise



Éolien France, Décembre 2013. Suivi heure par heure de la différence (en MW) entre la puissance prévue à un jour (J-1 courbe bleue) et à une heure (H-1 courbe rouge) et celle effectivement livrée.

Ref : H. Flocard, J. P. Pervès et J.P. Hulot, Techniques de l'ingénieur, 2014

De plus, le foisonnement ne peut pas résoudre le problème de l'intermittence

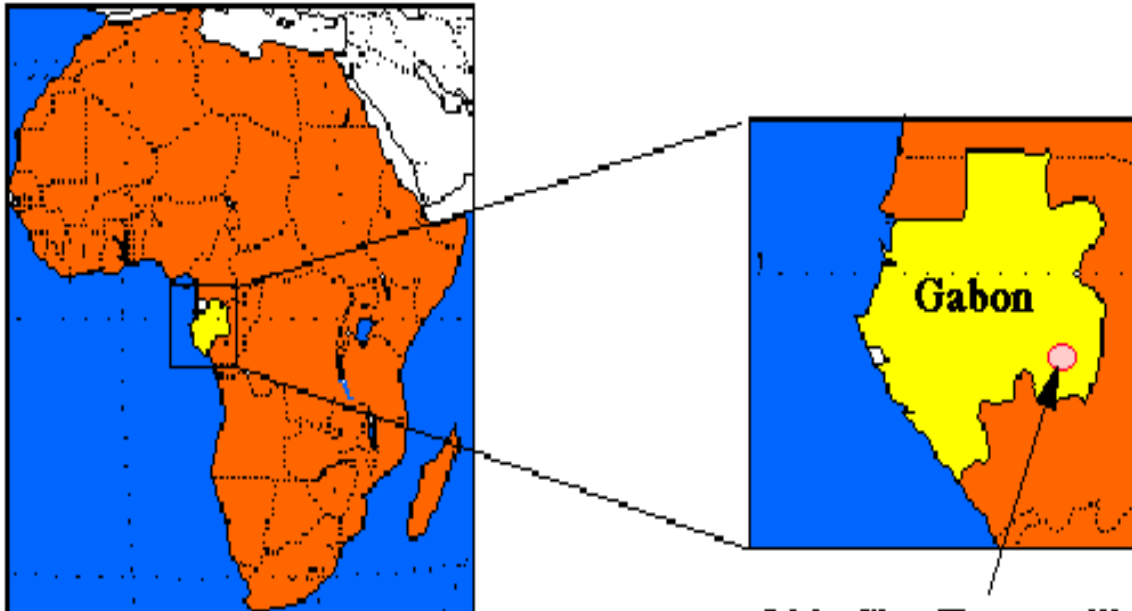
L'énergie nucléaire est concentrée

La fission est une énergie très concentrée (plus d'un million de fois plus que le pétrole)

1g de matière fissile $\approx 23\,000$ kWh

1g de pétrole $\approx 0,012$ kWh

Le premier réacteur nucléaire était naturel (Oklo, il y a 2 milliards d'années).



Oklo Site (Franceville)



L'énergie nucléaire 71,6% de l'électricité française (2017)

- ❑ **Electricité peu chère avec un prix stable dans le temps (à l'échelle de 40-60 ans).** Si le prix de L'U naturel est multiplié par 10, le prix du kWh augmente de moins de 40% (multiplié par 7 pour le gaz si le prix du gaz est multiplié par 10).
- ❑ **N'émet pas de CO_2 .** Évite 3,3 t CO_2 /hab/an si on utilisait du gaz ou 7,5 t CO_2 /hab/an si c'était du charbon.
- ❑ **La valeur ajoutée se fait dans le pays qui l'utilise (emplois, devises...).** Si on avait choisi le pétrole au lieu du nucléaire dans les années 70 les importations correspondraient presque au budget de l'éducation nationale. : 65G€ en 2025 hors pensions de retraite)
- ❑ **Mais on n'utilise des réacteurs à neutrons lents (^{235}U , 0,7% de U naturel) et:**
 - 1 kWh d'électricité $\Rightarrow$ 2 kWh de chaleur rejetés
 - Ressources pour 1-2 siècles $\Rightarrow$ valoriser $^{238}U \Rightarrow$ rapides

Le nucléaire du futur

⇒ **réacteurs à neutrons les rapides** (1 an d'uranium pour les REP actuels = plus de 140 ans de fonctionnement avec les rapides) ⇒ **Réserves pour des dizaines de milliers d'années**

Fonctionnement à haute température ⇒ 1kWh électrique pour 1 kWh de chaleur

Rappel : il faut du plutonium



Combustible nécessaire pour 1 REP (40ans) ⇒
≈ 5 000 ans de fonctionnement
dans un réacteur à neutrons rapides

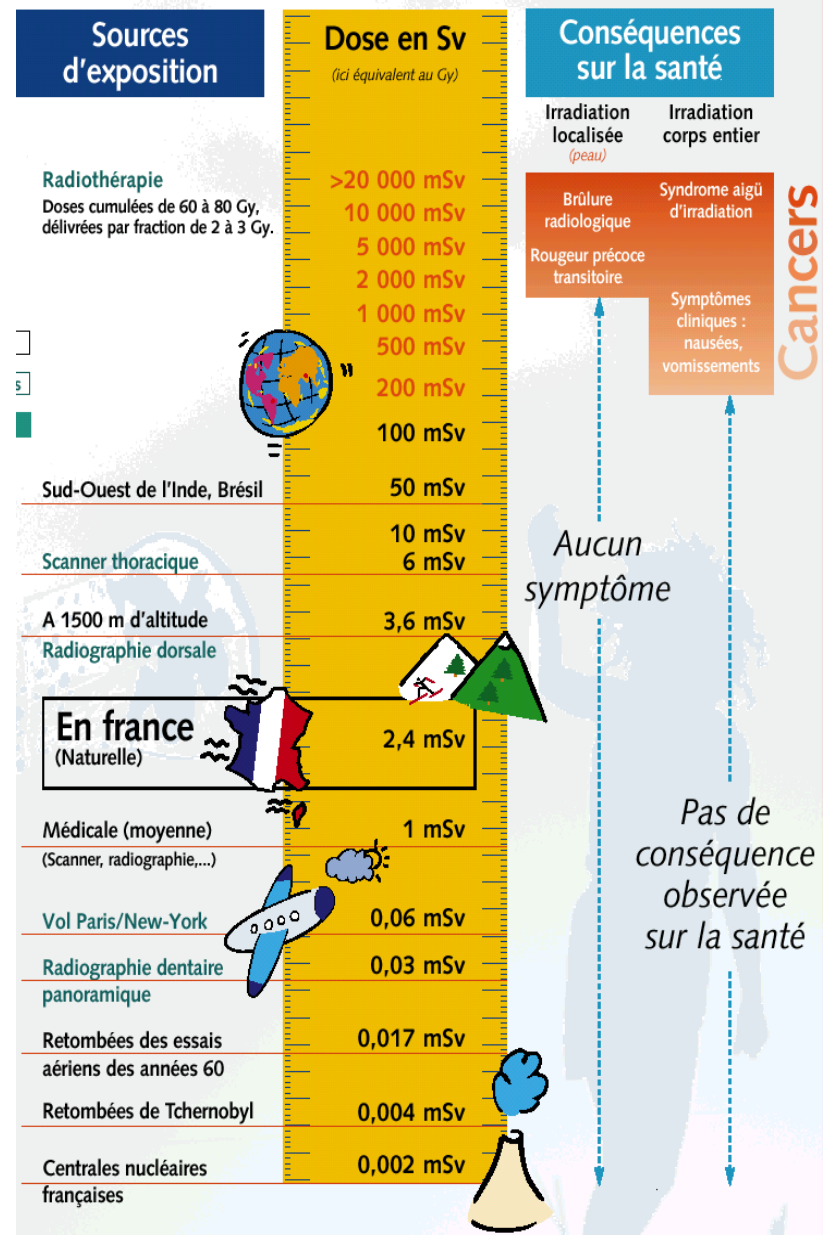
Quand ? ⇒ Dans quelques décennies. La France qui était leader mondial a été, sous l'action des écologistes, mise hors-jeu. Maintenant : Russie, Chine, Japon, etc.

Radioactivité et vivant

Quelques valeurs repères

L'ADN de chaque cellule est altérée des dizaines de milliers de fois par jour (oxygène) et parfaitement réparée la plupart du temps.

Radioactivité naturelle
 $\Rightarrow \approx 2$ altérations/an



Du Dr Laurence Lebaron-Jacobs

Effets déterministes (seuil ≈ 500 mSv) $\Rightarrow$ précoces
 Effets probabilistes (seuil ≈ 100 mSv) $\Rightarrow$ tardifs

Les phénomènes naturels ne sont pas toujours linéaires

*Faibles doses, doses inférieures à 100-200mSv $\Rightarrow$
Approximation linéaire, seuil ou Hormesis ?*

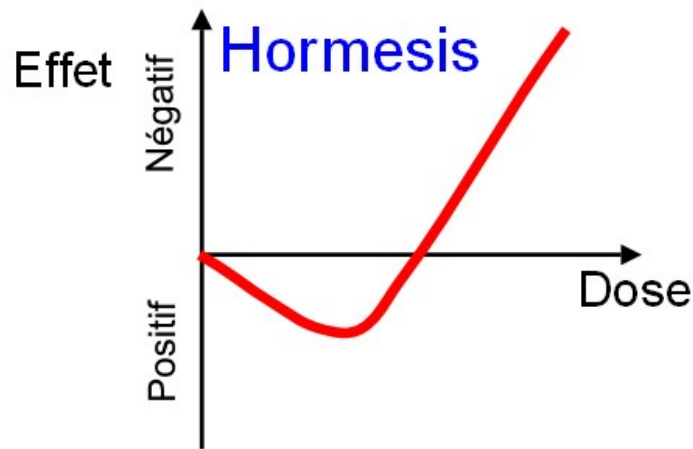
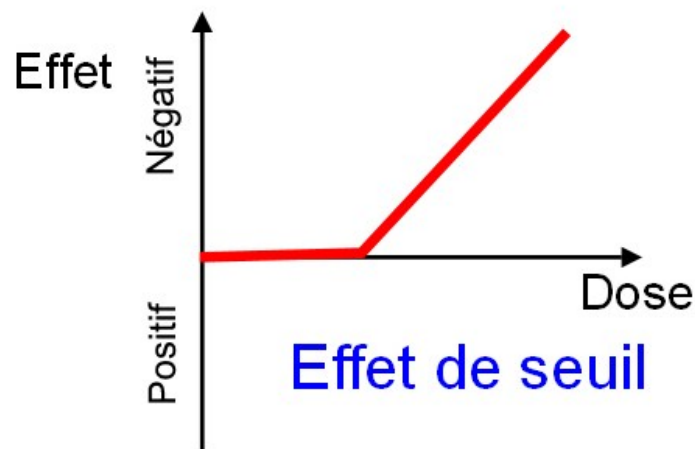
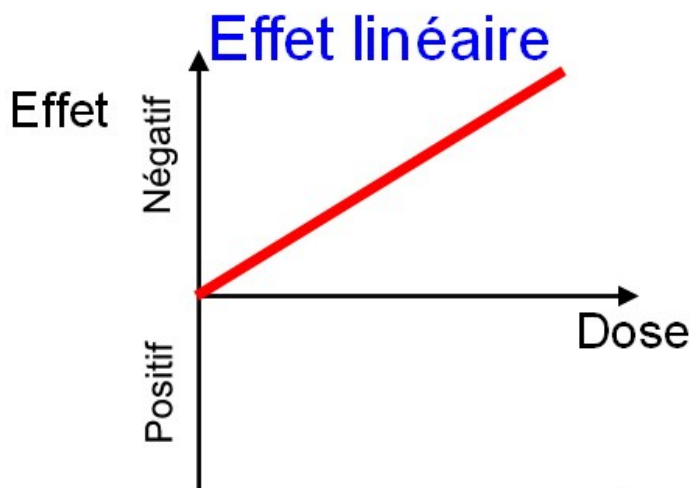


Illustration par un exemple avec des valeurs imaginaires

- ❑ 1000 personnes boivent 3L de vin/jour $\Rightarrow$ 900 voient leur espérance de vie diminuée
- ❑ 1000 personnes boivent 15 cl de vin $\approx$ (1 verre) par jour (20 fois moins). Que peut-on en déduire ?
 - Modèle linéaire $\Rightarrow$ 45 voient leur espérance de vie diminuée
 - Modèle à seuil (seuil à 2 verres/jour) $\Rightarrow$ aucun ne voit son espérance de vie diminuée
 - Hormesis $\Rightarrow$ Certains voient leur espérance de vie augmenter

Les accidents ne sont pas tous perçus de la même manière

Accidents dans le domaine de l'énergie ayant causé plus de 5 morts entre 1969 et 2000 dans le monde

Energie	Nombre d'accidents	Nombre de morts
Charbon	1 221	25 107
Pétrole	397	20 218
Gaz naturel	135	2 043
GPL	105	3 921
Hydraulique	11	29 938
Nucléaire	1	31
Total	1 870	81 258

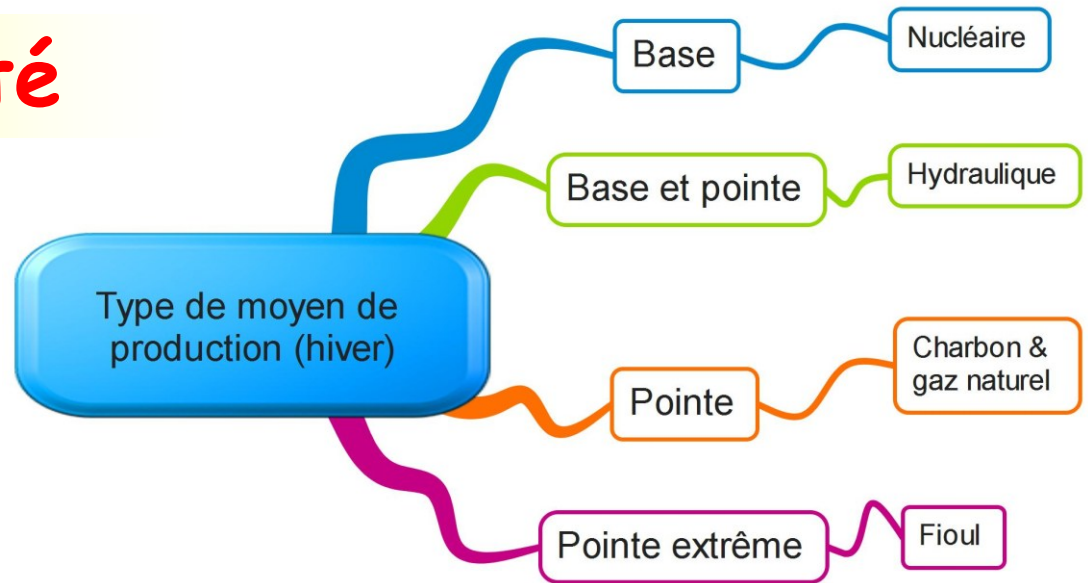
Base de données ENSAD (Energy -related severe accident database)

Détails sur : <http://www.edmonium.fr/page33.php>

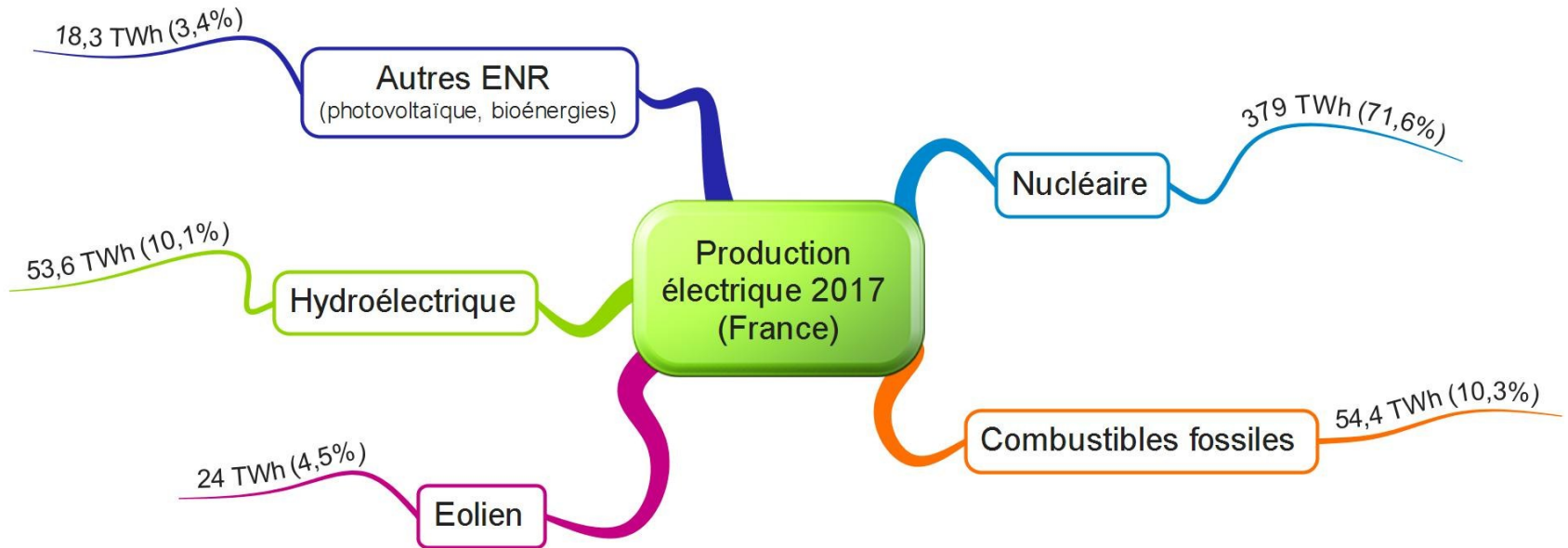
Accidents de la route 2003 dans le monde : 1,2 millions de morts, 50 millions de blessés, coût environ 400 G€

L'électricité

Production électrique et pointes de consommation



Électricité $\Rightarrow$ production = consommation



Dans la plupart des pays produire de l'électricité est très polluant 吳

Couplage au réseau

Problème des énergies intermittentes

- ❑ Augmentation de la demande de puissance = diminution de la fréquence
- ❑ Diminution de la demande de puissance = augmentation de la fréquence



Analogie avec une perceuse

Un changement sociétal que l'on veut imposer

Avant et aujourd'hui

La demande est variable et la production s'adapte

Demain ?

La production est variable et la demande s'adapte

Mais on doit toujours avoir :
PRODUCTION = CONSOMMATION
Sus peine de disjonction du réseau

Comment déstabiliser un système électrique

Avec les règles sur les énergies intermittentes

1. Éolien et solaire sont prioritaires sur le réseau
2. Tarif de rachat élevé et garanti

Conséquences pour équilibrer le réseau

1. Il faut des moyens de stockage et des centrales de pointe non rentables. Cela conduit au "marché de capacité"
2. Il faut mettre en place un "système d'effacement"

Conséquences pour les entreprises électriques (EDF, E.ON, RWE, Iberdrola, etc.)

1. Elles sont toutes fragilisées
2. Pour le particulier le prix de l'électricité augmente

1. On crée une concurrence artificielle (nouveaux acteurs)
2. On force EDF à leur vendre une partie de son électricité nucléaire à bas prix. 2022⇒ EDF doit acheter au prix fort

Des taxes sur l'électricité en augmentation constante

CSPE (Contribution au Service Public de l'électricité)
En 2002 (3€/MWh). En 2016 (22,5€/MWh). Augmentation de 650%. En moyenne 100€/ménage

À quoi ça sert :

1. Obligation d'achat des ENR (75,6% en 2016)
2. Péréquation électrique (19,5%)
3. Dispositions sociales (4,6%)
4. Financement du dispositif

Depuis 2016 la CSPE est intégrée dans une autre taxe la TICFE (Taxe Intérieure sur la Consommation Finale d'électricité) qui touche toutes les énergies. Aussi TICPE

Facture de la CSPE pour la France 7 G€.

Facture de l'équivalent de la CSPE pour l'Allemagne 28 G€

En plus en France : augmentation régulière du gaz naturel.

L'énergie devient de plus en plus chère

Prix et coût sont décorrélés

La crise du gaz naturel de 2022

Des règles européennes soutenues par l'Allemagne pour couler la France

- ❑ Prix donné par la dernière centrale mise en service
- ❑ Le prix est différent du coût
- ❑ La France produit de l'électricité à moins de 50€/MWh
- ❑ EDF a dû acheter de l'électricité jusqu'à 1000€/MWh
- ❑ Objectif de l'Europe depuis 20 ans : démanteler EDF
- ❑ Les vendeurs alternatifs demandent à leurs clients de partir pour aller chez EDF qui doit acheter de l'électricité hors de prix pour les satisfaire et est obligé de vendre le quart de sa production nucléaire à ces vendeurs à 46€/MWh qui revendent au tarif fort.

Analogie. Production de baguettes : 99 à 1€ et 1 à 100€

Bon sens $\Rightarrow$ Prix de la baguette $\Rightarrow$ 1,99€

Europe $\Rightarrow$ Prix de la baguette $\Rightarrow$ 100€

Le stockage de l'énergie

Le point faible du domaine énergétique

- ❑ Stocker : pouvoir utiliser plus tard ce dont on n'a pas usage aujourd'hui
- ❑ Le stockage de l'énergie est le point faible de la filière énergétique
- ❑ Intrinsèque (1 litre d'essence = 10 kWh)
- ❑ Indirect : chimique, physique, biologique

Il existe 2 grands systèmes de stockage de l'énergie en France

- ❑ Les véhicules (exemple, 30 millions de voitures avec 25 l de carburant = 7,5 TWh $\approx$ production annuelle d'un réacteur nucléaire)
- ❑ Cumulus : 11 millions en France. On stocke de l'ordre d'une vingtaine de TWh dans l'année.

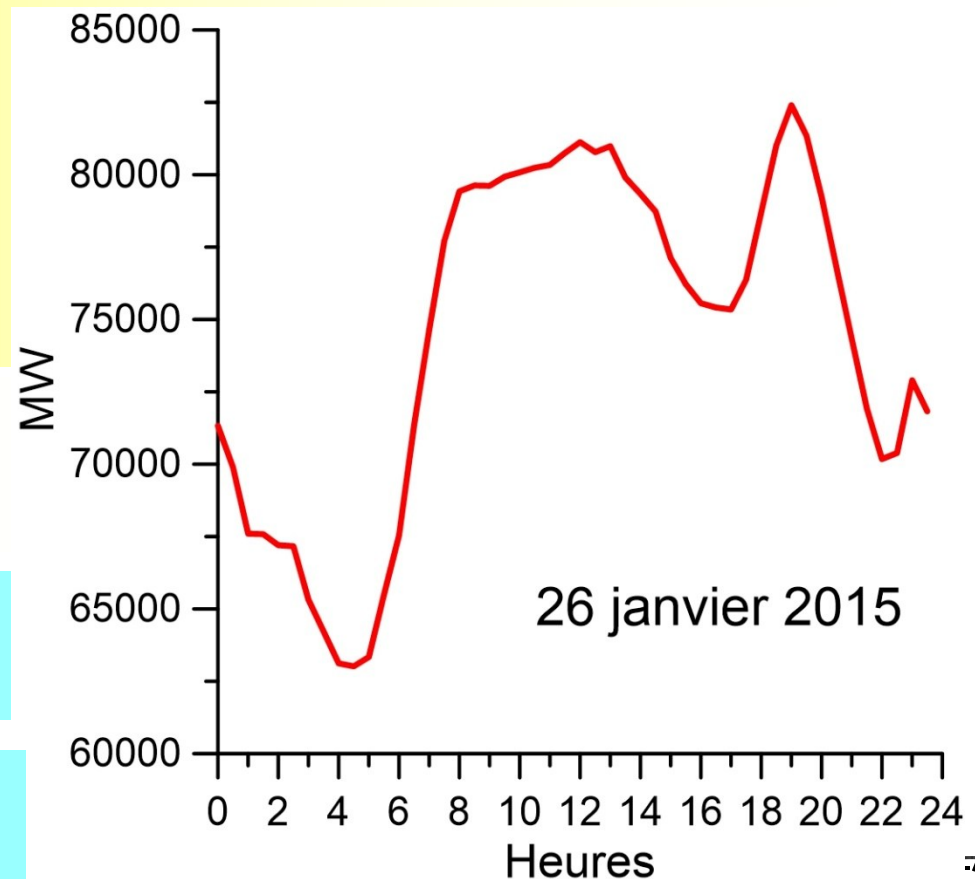
Pourquoi stocker l'électricité ?

- ❑ Lisser la production, stocker pas cher pour vendre cher...)
- ❑ Indispensable pour les ENR intermittentes (éolien, photovoltaïque)
- ❑ Systèmes nomades, transports, etc.
- ❑ Avoir de l'électricité « propre »

Électricité
production = consommation

2017 $\Rightarrow$ puissance moyenne 60GW
mais puissance installée $\Rightarrow$ 130 GW

2024 $\Rightarrow$ puissance moyenne 56GW
mais puissance installée $\Rightarrow$ 140 GW



Stocker l'électricité

le talon d'Achille de la filière énergétique

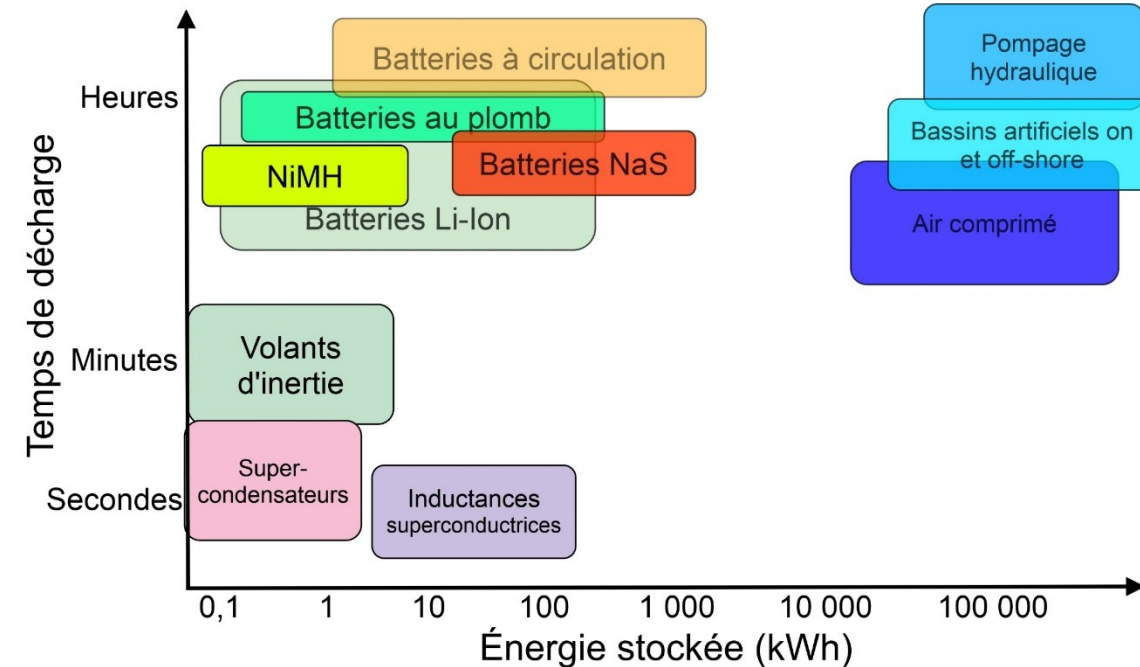
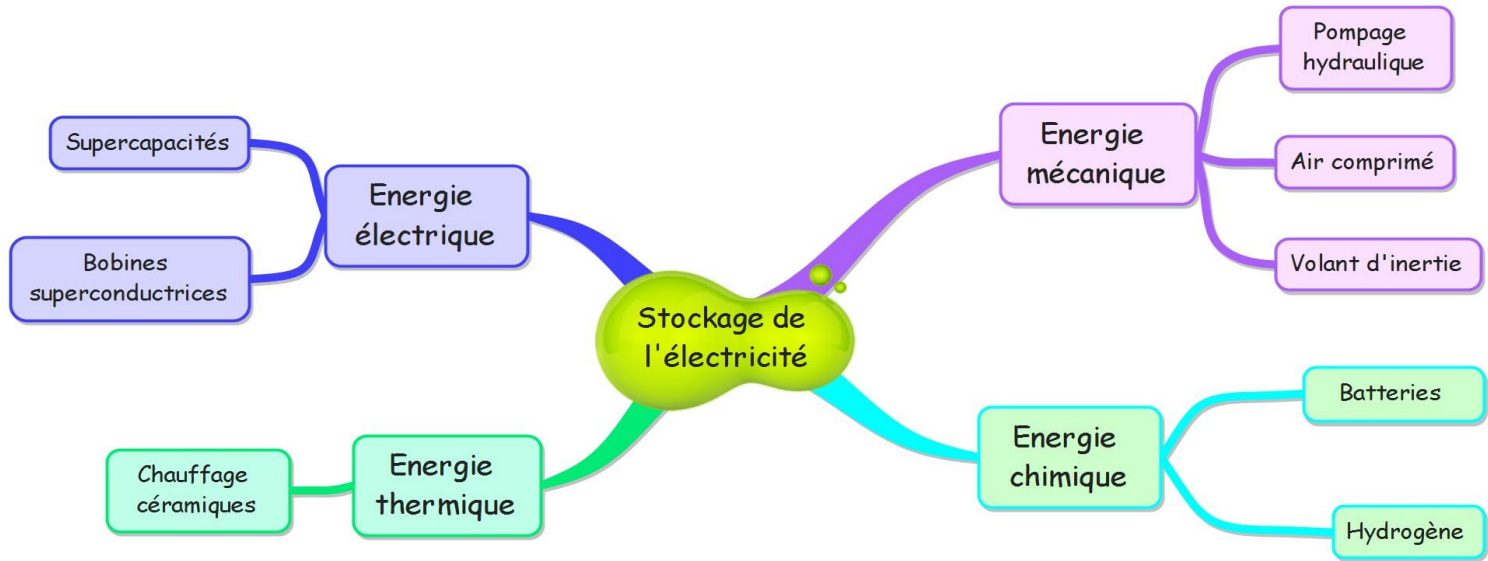
Matériau	1 kWh
Essence	70g = 0,07kg
Batterie Pb	≈ 30 kg
Batterie Li-Ion	≈ 5-8 kg
Eau	3600 kg d'eau à une hauteur de 100m

Le lithium⇒

Une matière bientôt stratégique (0,17g/m³ en mer)

Le néodyme ⇒ Pour les moteurs électriques

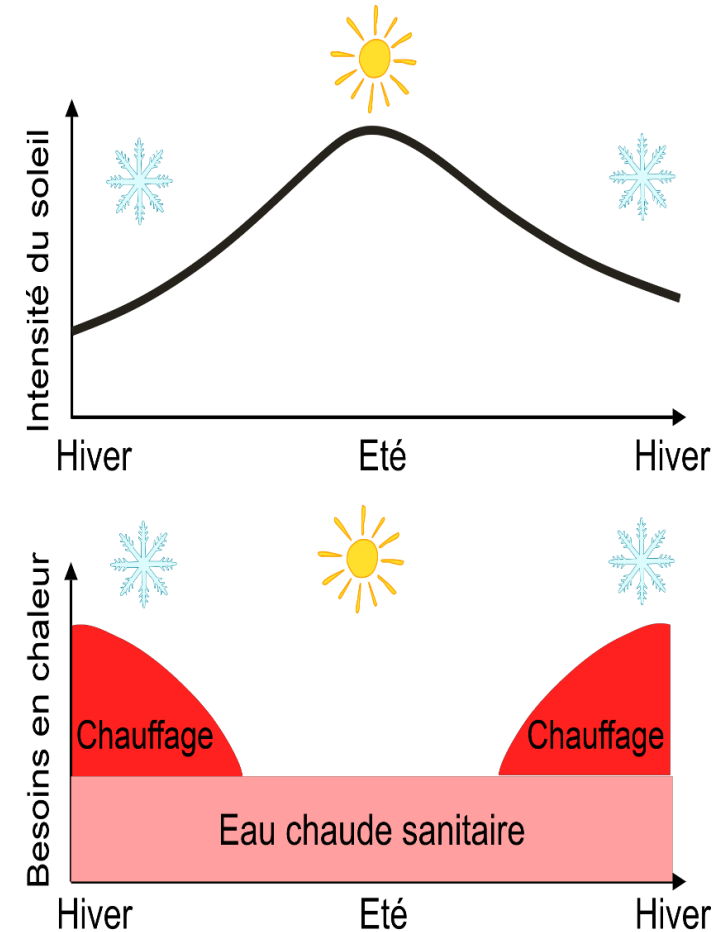
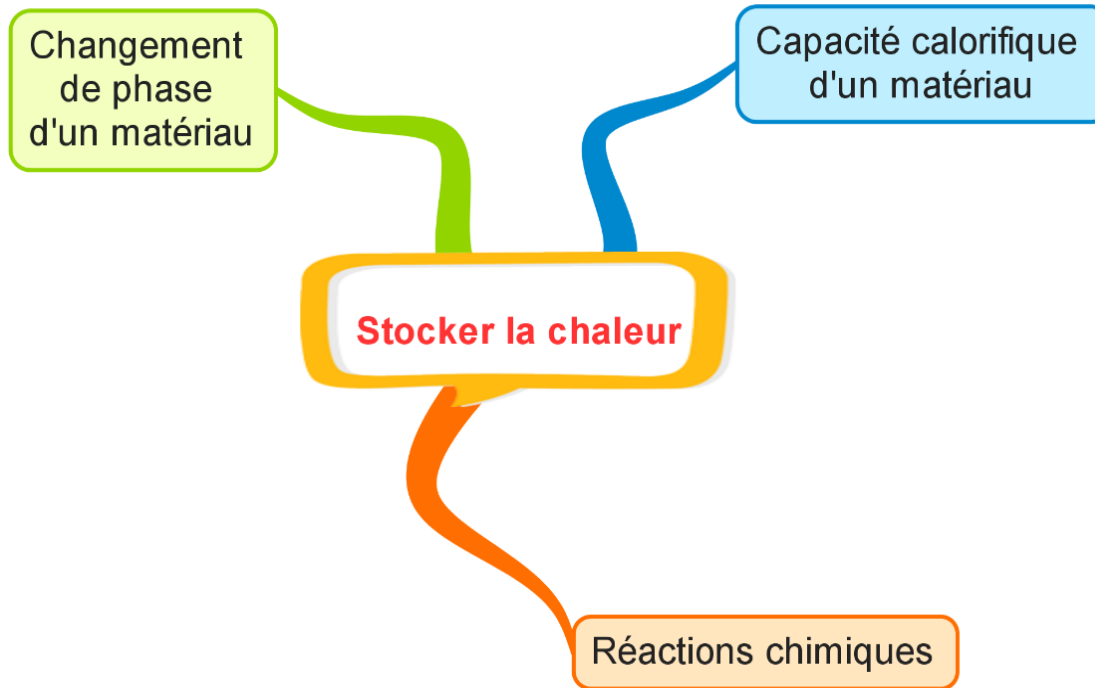
Stockage de l'électricité



1. Stockage pour le réseau
2. Mobilité
3. Systèmes électroniques nomades

Le stockage de la chaleur

La chaleur représente une part importante de la consommation d'énergie



Être sobre et efficace

La priorité: économiser l'énergie (le kWh le moins cher est celui qui n'est pas produit)

- **Sobriété** (ne consommer que lorsque c'est nécessaire)
- **Efficacité** (faire la même chose avec moins d'énergie)

1°C de moins dans une maison l'hiver = 7% d'énergie économisée

France
Éclairage : 12,8% de l'électricité des foyers
Économie numérique : 10% de la production mondiale d'électricité
≈1500 TWh ≈3 fois la production française

Quantité d'énergie pour fabriquer une tonne de fer divisée par 150 entre le Moyen-âge et aujourd'hui. Par 2,5 pour le ciment entre 1950 et 2000.

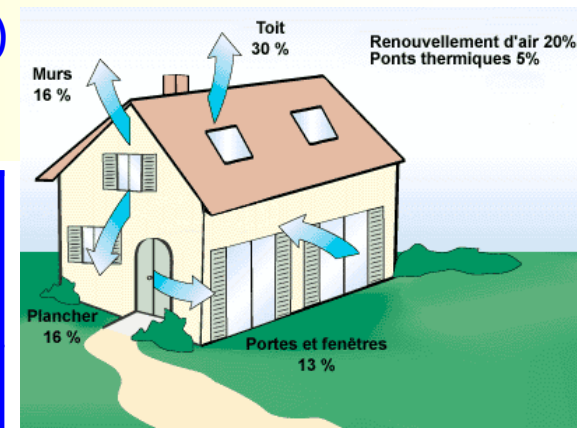
Les 3 leviers:

- ☐ La **technologie** (avec des produits économes)
- ☐ Les **pouvoirs publics** (en orientant)
- ☐ Le **consommateur** (le décideur final)

Urbanisme et bâtiments

- ❑ Le secteur du bâtiment (30 millions de logements)
43% de l'énergie utilisée en France
21% des gaz à effet de serre
- ❑ Renouvellement du parc immobilier $\approx$ 100 ans
- ❑ Transports associés à l'urbanisme (travail, courses, etc.)
Pour une famille chauffage + voiture > 80% de la consommation d'énergie
- ❑ Un gain en isolation de $80 \text{ kWh/m}^2/\text{an} = 20 \text{ km/j}$ en voiture
- ❑ RT 2012 $\Rightarrow 50 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ (énergie primaire)
- ❑ RT 2020 $\Rightarrow$ Habitat énergie positive

	Bâtiments construits avant 1975	Bâtiments neufs (RT 2000)	RT 2012
Chauffage ($\text{kWh/m}^2/\text{an}$)	330	80 à 100	50



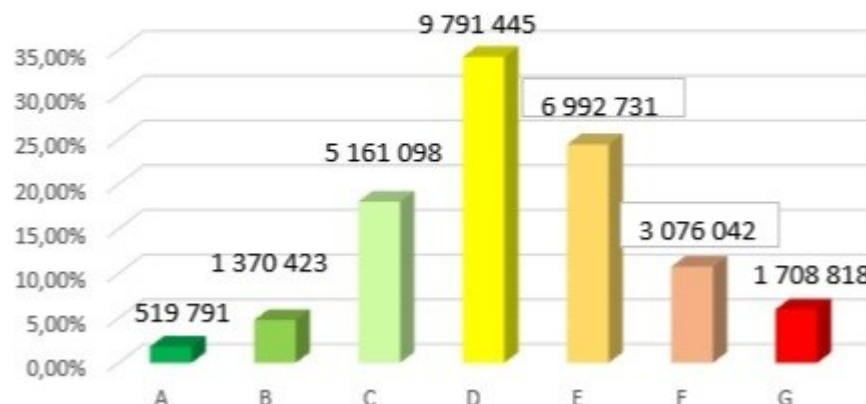
$\Rightarrow$ La rénovation est le problème le plus important

Vers une crise du logement

- ❑ Interdiction de louer des logements dont le DPE est G puis F
- ❑ Non artificialisation des sols
- ❑ L'Europe en rajoute une couche (pour la vente des biens immobiliers)

Répartition des résidences principales dans le classement DPE

Données ministère transition écologique (2017-2018)



De A.Paquereau,
article contreponts.org
septembre 2022

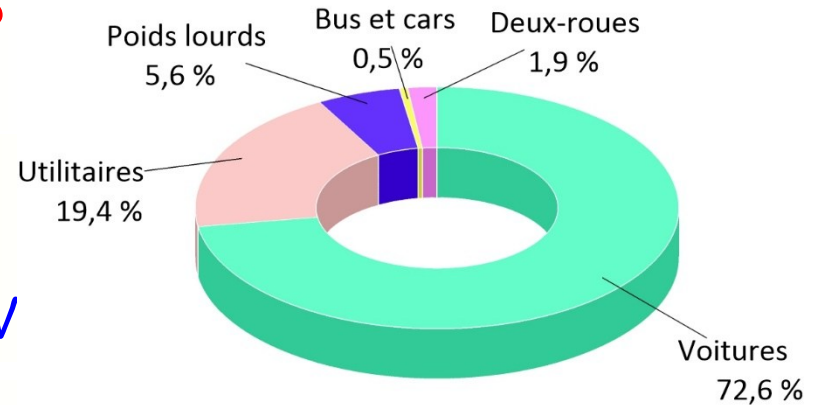
A	< 70 kWh/m ² .an	< 6 kg _{eq} /m ² CO ₂ .an
B	71-110 kWh/m ² .an	7-11 kg _{eq} /m ² CO ₂ .an
C	111-180 kWh/m ² .an	12-30 kg _{eq} /m ² CO ₂ .an
D	181-250 kWh/m ² .an	31-50 kg _{eq} /m ² CO ₂ .an
E	251-330 kWh/m ² .an	51-70 kg _{eq} /m ² CO ₂ .an
F	331-420 kWh/m ² .an	71-100 kg _{eq} /m ² CO ₂ .an
G	> 421 kWh/m ² .an	> 101 kg _{eq} /m ² CO ₂ .an

Depuis 2012 (lois contraignantes sur les logements) Nb SDF
160 000 → 300 000

D'ici 2028 (DPE F et G interdits à la location) 4,8 millions dont 30% loués

Les transports routiers le prochain défi

Circulation des véhicules en France métropolitaine en 2019



➔ **Le pétrole est indispensable**
 Transports terrestres $\Rightarrow$ 500 TWh
 Consommation d'électricité $\approx$ 480 TW

Puissance installée du parc automobile $\approx$ 20 fois celle du parc électrique mais utilisée 5% du temps ($\approx$ 30 millions de voitures)

Bilan annuel des transports en 2019 :
 bilan de la circulation, MTE 2020.

❑ Quelles solutions technologiques ?

- $\Rightarrow$ Véhicules hybrides (électrique-thermique)
- $\Rightarrow$ Les biocarburants (1^{ère}, 2^{ème} et 3^{ème} génération)
- $\Rightarrow$ Les véhicules électriques (villes)

Véhicules à piles à combustible
 et hydrogène $\Rightarrow$ Double rupture.

Catalyseur des PAC (il faut 280 fois la production annuelle de Pt... $\Rightarrow$ autres catalyseurs)

Europe : interdiction de vendre des voitures thermiques après 2035 (en théorie car la réalité va rattraper la fiction)



Automobile : quelques ordres de grandeur

- ❑ Il faut $\approx 150\text{-}200 \text{ Wh/km} \Rightarrow 15\text{-}20 \text{ kWh/100 km}$
- ❑ Moteur thermique (150 Wh/km et rendement $\approx 20\% \Rightarrow 7,5 \text{ l/100 km}$)
- ❑ Moteur électrique (rendement $\approx 100\% + 20\%$ récupération)
 $\Rightarrow 12\text{-}16 \text{ kWh/100 km} \Rightarrow$ Batterie d'environ $25\text{-}30 \text{ kWh}$ pour $200 \text{ km} \Rightarrow$ Batterie de l'ordre de 200 kg Li-Ion
- ❑ Attention les accessoires (chauffage, climatisation, éclairage, autoradio, etc.) diminuent fortement l'autonomie.
- ❑ Exemple côte de Sèvres sur la N118 (2 km et un peu plus de 100 m de dénivelée, $5,5\%$) $\approx 14 \text{ km}$ d'autonomie
- ❑ Une batterie Li-ion peut perdre 20 à 40% d'autonomie s'il fait froid. Par très grand froid : panne (cf USA)



Quantité d'électricité nécessaire (voitures électriques)

- ❑ Prenons une moyenne de 18 kWh/100 km. (Zoé $\approx$ 16,5 kWh/100km. Tesla 18 kWh à 90 km/h, 21 kWh à 110 et 24 kWh à 130.)
- ❑ Pour les 450 Gkm parcourus chaque année $\Rightarrow$ 81 TWh
- ❑ Rendement de charge $\approx$ 85% et $\approx$ 8% de perte dans le transport et la distribution $\Rightarrow$ rendement de 77% de la centrale à la batterie $\Rightarrow \approx$ **105 TWh/an** d'électricité.
- ❑ Si l'on veut 40% de voitures électriques d'ici 2030, par exemple, il faudrait de l'ordre de 40 TWh/an.

L'avantage de l'hybride rechargeable (sur l'électrique) est qu'il vous ramène chez vous et peut faire de grandes distances.

France : la transition vers le véhicule électrique $\approx$ 500 G€
soit $\approx$ 8000€/français + destruction de dizaines de milliers
d'emplois et d'une partie de l'industrie automobile
Voiture à 100€/mois : coût pour l'état = 13 000€

Les autres transports

Rappel

□ Voiture $\approx 150 - 250 \text{ Wh/km}$

Autres moyens de transports

□ Trains $\approx 60 - 100 \text{ Wh/km/passager}$

□ Bus $\approx 80 - 400 \text{ Wh/km /passager}$

□ Avion $\approx 360 - 450 \text{ Wh/km /passager}$

□ Vélo assistance électrique $\approx 10 \text{ Wh/km}$

□ Scooter électrique $\approx 40 \text{ Wh/km}$

Consommation d'électricité des trains en France

$\Rightarrow 7,5 \text{ TWh/an}$

$\Rightarrow$ L'électrification des transports routiers se fera probablement après celle des voitures. Cela représenterait $\approx 10 \text{ TWh/an}$ d'électricité

Retour sur le le passé : le cheval



- ❑ Un cheval consomme $\approx 9\text{kg}$ d'aliment sec/jour $\approx 10\text{ kWh}$
- ❑ Environ $30\text{ km/jour} \Rightarrow \approx 3\text{l}/100\text{ km}$ essence
- ❑ Peut porter $\approx 100\text{ kg}$ ou tracter 1,5 fois son poids
- ❑ Au début du XX^{ème} siècle à New York
175 000 chevaux.
Un cheval = $10\text{ à }15\text{ kg}$ d'excréments/j soit environ 2 tonnes/j
 $\Rightarrow$ Mouches, odeurs nauséabondes, poussières
 $\Rightarrow$ Cause de maladies respiratoires ou intestinales
 $\Rightarrow$ 15 000 chevaux morts/an (certains restaient sur place)
Donc aussi très polluant
 $\Rightarrow$ Le passage du cheval à l'automobile a réduit la pollution des
grandes villes et réduit l'occupation de la surface au sol

Les premières voitures étaient électriques

- ❑ 1834 première voiture électrique (1861 moteur à explosion)
- ❑ 1852 première voiture électrique commercialisée
- ❑ En 1900 38% du marché automobile américain était électrique

- ❑ Les premières batteries n'étaient pas rechargeables
- ❑ 1859 (Gaston Planté, Camille Faure) batterie rechargeable au plomb



Camille Jenatzy est le premier à dépasser les 100km/h avec la « Jamais contente » en 1899



Les voitures électriques c'est super pour tout, sauf pour la recharge , les réparations, la revente, etc.

- ❑ Actuellement les possesseurs de voitures électriques rechargent à la maison (long mais pas cher) plutôt qu'à l'extérieur (plus rapide mais plus cher et parfois inaccessible). Les bornes de recharges sont souvent facturées au temps de connexion et pas à la quantité d'énergie soutirée. Souvent en panne ou incompatibles
- ❑ Avec une prise 16 A (3,5 kW), il faut environ 6 heures pour récupérer 100 km. Cela veut dire que pour obtenir quelques centaines de km il faut une bonne nuit de charge. On va avoir besoin d'un flux continu d'électricité toute la nuit.

De nouveaux problèmes apparaissent

- ☐ Revente du véhicule
- ☐ Réparations
- ☐ Assurance
- ☐ Incendies
- ☐ Bornes de recharge en pannes ou pas assez puissantes
- ☐ Prix des recharges à l'extérieur
- ☐ Nouvelles taxes

La Voiture Electrique SOMBRE En Direct Live : Bon Débarras!

<https://www.youtube.com/watch?v=V0yuG3ooumc>

Qu'en est-il de l'hydrogène ?

Tout comme l'électricité c'est un vecteur énergétique et il faut donc de l'énergie pour le fabriquer

C'est très beau sur le papier :

□ 1 kg de $H_2 \Rightarrow 33 \text{ kWh} \approx 3 \text{ litres de pétrole}$

Mais difficile à gérer dans la réalité :

□ 7 litres de H_2 à 700 bars $\Rightarrow$ 1 litre d'essence

□ 4 litres de H_2 liquide (-253°C) $\Rightarrow$ 1 litre d'essence

C'est un vecteur énergétique très encombrant

□ 0,89g/litre à la pression atmosphérique

□ 1 kg d' H_2 = 11 200 litres d'hydrogène à la pression atmosphérique

Gazoduc $\Rightarrow$ la densité d'énergie transportée est 15 fois plus faible que le pétrole, ≈ 3 fois moins que le gaz naturel

Hydrogène et transports : ce n'est pas pour demain sauf pour des marchés de niche

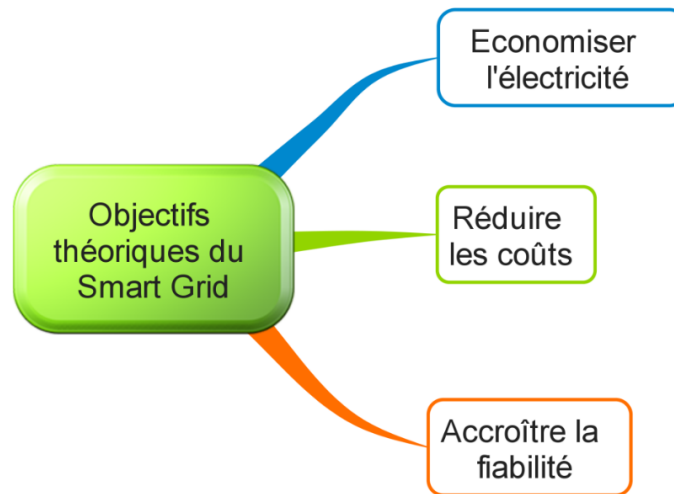
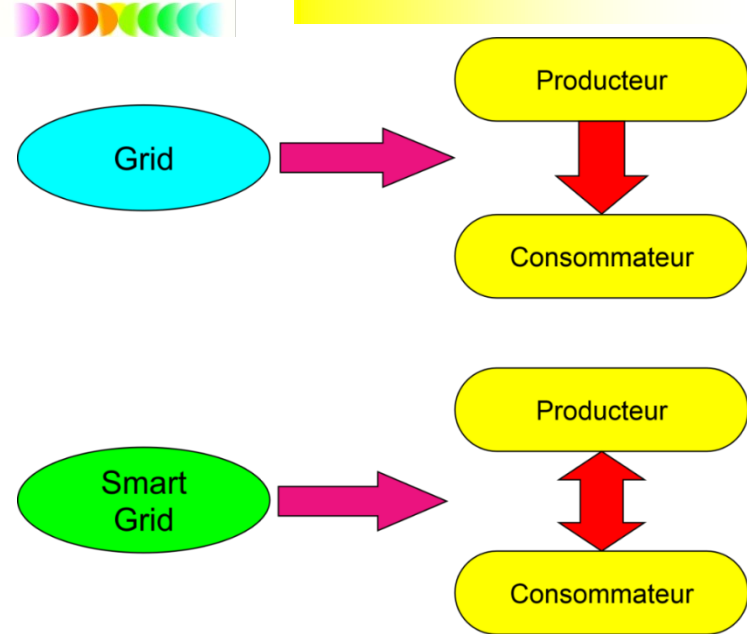
- ❑ 1 litre H_2O + 5kWh d'électricité $\Rightarrow$ $1Nm^3$ de H_2
- ❑ 1kg de H_2 = $11,2 Nm^3 \Rightarrow$ 100 km avec une pile à combustible
- ❑ Il faut 56 kWh pour fabriquer $11,2 Nm^3$ + 8 kWh pour la compression à 700 bars (+20 kWh pour le liquéfier) soit un besoin de 64 kWh pour faire 100 km
- ❑ Voiture électrique : avec 64 kWh on charge une batterie à 49 kWh compte tenu des pertes $\Rightarrow$ 300 km

Avec la même quantité d'électricité on peut faire 3 fois plus de km avec une batterie qu'avec de l'hydrogène

Aujourd'hui, la voiture à hydrogène est commercialement morte sauf pour des marchés de niche. Heureusement il existe d'autres débouchés plus intéressants et indispensables pour l'hydrogène (chimie, pétrochimie, etc.)

Smart Grid

Pilotage temps-réel du réseau électrique



Mais aussi surveiller la population

Nouveau vocabulaire

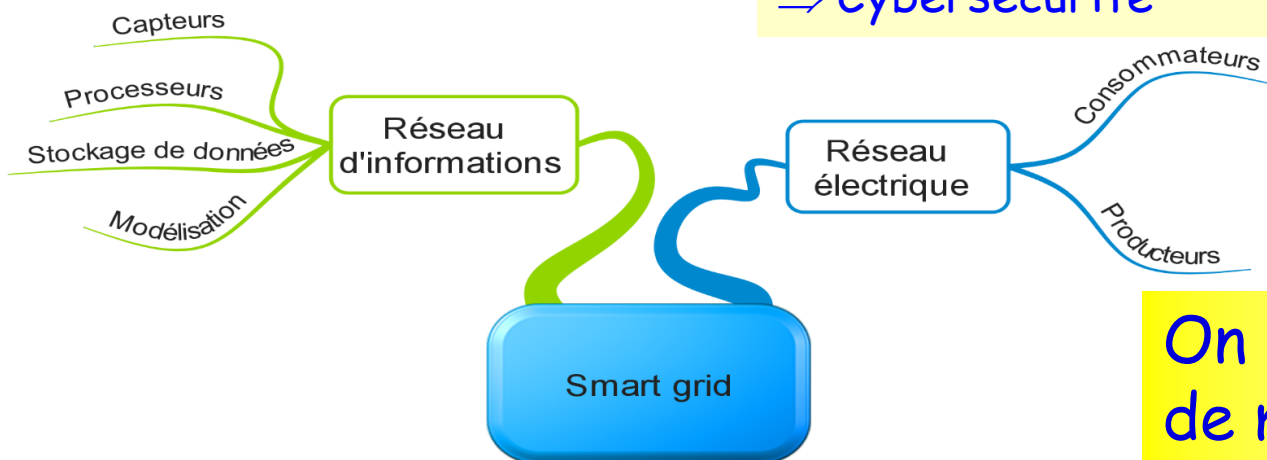
Effacement ⇒ On vous coupe l'électricité

Marché de capacité ⇒ payer pour attendre

Inconvénients du smartgrid

⇒ Big brother

⇒ Cybersécurité



On va vers un réseau de moins en moins sûr

Exemples de pannes à grande échelle et cyberattaques

- ❑ **Milieu 2010** ⇒ le ver Stuxnet infecte via windows des softwares et équipements de Siemens (déstabilisation d'équipements électriques)
- ❑ **14/8/2003** ⇒ blackout au Canada et USA (jusqu'à 4 jours, >55 millions de personnes concernées). Panne cybersystème
- ❑ **28/9/2003** ⇒ Italie et Suisse, 18h; 56 millions de personnes. Erreur humaine (difficultés techniques et mauvaise communication entre les opérateurs de réseau).
- ❑ **4/10/2006** ⇒ Europe du sud-ouest. 55 millions de personnes. Erreur humaine et mauvaise communication.

Black out

- ❑ 31/8/2012, Inde, 670 millions de personnes
- ❑ 30/7/2012, Inde, 330 millions de personnes
- ❑ 2/1/2001, Inde, 230 millions de personnes
- ❑ 18/8/2005, Indonésie, 100 millions de personnes
- ❑ 11/3/1999, Brésil, 97 millions de personnes
- ❑ 10-11/11/2009, Brésil, 87 millions de personnes

Matériaux

Plus de matériaux = Plus d'impact sur l'environnement

Matériau (tonnes/GWh/an)	Facteur de capacité	Béton	Acier
Nucléaire	85%	43	8
Solaire PV (ferme)	20%	43	10
Éolien terrestre	30%	159	43
Solaire thermique (7,5 h de stockage)	44%	338	105

Source : Martin Nicholson. The Breakthrough Institute

La transition énergétique et les green techs

Une atteinte à l'environnement garantie

Les technologies vertes ont besoin de métaux rares (terres rares et autres)

1. Les terres rares sont en majorité contrôlées par la Chine
2. Elles sont très polluantes à extraire
3. On peut difficilement les recycler

Le démantèlement va poser des problèmes.

Ordre de grandeur pour une grande éolienne :

- ❑ 1000 tonnes de béton (400 m³)
- ❑ 60 tonnes de ferraille
- ❑ Coût du démantèlement entre 300 000 et 600 000 €. Un cas déjà existant : 410 000€ de devis
- ❑ C'est bien au delà des prévisions faites

Conclusion

- ❑ L'énergie est de plus en plus chère
- ❑ Certaines matières premières sont plus rares et plus chères
- ❑ L'Europe est en train de s'effondrer

❑ Sobriété et économies d'énergie

❑ On aura besoin de toutes les sources d'énergie

❑ Energies décarbonées (nucléaire + renouvelables)

❑ Exploiter la chaleur basse température

❑ On va utiliser de plus en plus l'électricité

Mais on peut vivre mieux en consommant moins et en polluant moins...

La transition énergétique telle qu'elle est développée en France n'est rien d'autre qu'une machine à broyer les pauvres (coût $\approx 40\,000$ €/famille) avec un but environnemental plus que discutable.