

TSE101 - Partie 1 / Chapitre 3

Energie et décarbonation

Philippe Ciblat

Telecom Paris, Institut Polytechnique de Paris



1. Energies actuelles

- Types d'énergie
- Mesure et efficacité de l'énergie
- Utilisation par pays, activité, habitant

2. Décarbonation

- Taxonomie des techniques de décarbonation
- Avantages et inconvénients de certaines énergies décarbonées

1 TP : Egalité de Kaya

Objectifs de ce chapitre

- Quelques bilans énergétiques
- Métriques de comparaison entre sources d'énergies
- Analyse par approche systémique

Section 1 : Energie

Définition de l'énergie

C'est ce qui permet de modifier l'environnement

- Thermique/chaueur : agitation de la matière (électrons, ...)
- Mécanique : mouvement possible d'objets
 - cinétique (ex. : moulin à vent)
 - potentielle (ex. : barrage hydraulique)
- Chimique : liaisons inter-atomes
 - la combustion casse les liaisons et libère l'énergie
 - ex. : pétrole, gaz, biomasse
- Rayonnante : présente dans les rayonnements (Soleil)
 - ex. : photosynthèse ou photo-voltaïque
- Nucléaire : liaisons intra-atomes (protons, neutrons)

Types de production d'énergie

- Energie primaire : non transformée ou exploitée directement
 - pétrole brut, charbon extrait, biomasse, hydraulique ou vent (en mécanique), Soleil, ...
- Energie secondaire : obtenue par transformation d'une énergie primaire
 - électricité (via une centrale ou un barrage, ...) : éolien, hydroélectricité, nucléaire
 - carburant (via le raffinage du pétrole brut)
 - chaleur (via le brulage de biomasse ou charbon)

Vecteur énergétique

Forme d'énergie (primaire ou secondaire) permettant de la

- transporter
- ou stocker

Exemples : eau, électricité, hydrogène, charbon, ...

Types de consommation d'énergie

- Energie finale : quantité d'énergie consommée (et donc facturée) pour un service
 - carburant dans le réservoir
 - électricité dans la prise de courant
 - énergie finale = % de l'énergie primaire
- Energie utile : quantité d'énergie dépensée par un service
 - distance parcourue par la voiture
 - éclairage effectif de la lampe
 - énergie utile = % de l'énergie finale

Attention : pertes énergétiques à tous les niveaux

- Passage du primaire à secondaire
- Vecteur d'énergie
- Passage de la finale à l'utile

- Energie :

- Joules (J) : déplacement de 100g sur une hauteur de 1m
- Calories (cal) : élévation d'1g d'eau de 1°C à pression std

$$1\text{cal} = 4,18\text{J}$$

↪ 2000kcal = 8,36MJ, d'où, 2000kcal/j = 96W

- Tonne-Equivalent-Pétrole (tep) : énergie obtenue par combustion d'1t de pétrole brut

$$1\text{tep} = 41,8\text{GJ}$$

↪ 1tep = 954kg essence

↪ Exemple : un plein (50kg) donne 2,19GJ ou 524.110kcal

- Puissance : Watt ($W = J/s$)

- Attention : énergie délivrée par une puissance de 1W durant 1h = 1 Watt-heure (Wh)

↪ Exemple : à 100km/h, ce plein dure 10h et fournit du 60kW en puissance et du 600kWh en énergie

Quelques manipulations avec des Watts

- $1\text{kWh}=3,6\text{MJ}$
- 1TWh : énergie délivrée par une puissance de 1GW durant 1000h (40j) ou 10GW durant 100h (4j)
- $1\text{TWh}/\text{an}$: puissance de 115MW en fonctionnement continu

Un réacteur nucléaire (dit aussi « tranche »)

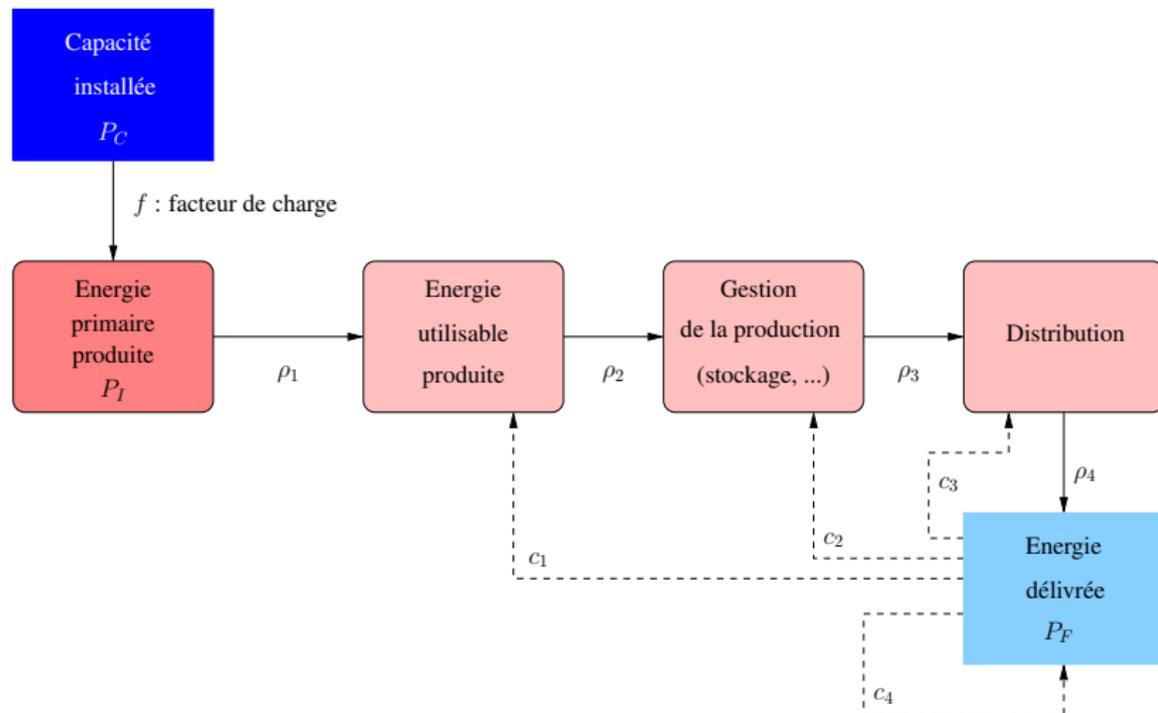
- 1GW
- $8,76\text{TWh}/\text{an}$ (nb d'heures dans une année : $365 \times 24 = 8760$)

Quelques machines

- Aspirateur : 2kW ($\sim 220\text{V} \times 10\text{A}$ avec section 1mm^2)
- Tracteur : 125kW (~ 1000 humains)

Transformation de l'énergie

Chaîne de production d'énergie finale



Mesure d'efficacité de la transformation

Analyse Cycle de Vie (ACV) : Energy Return On energy Inverted (EROI)

$$\begin{aligned} \text{EROI} &= \frac{\text{Energie délivrée}}{\text{Energie investie}} \\ \text{Energie Nette} &= \text{Energie délivrée} - \text{Energie investie} \\ &= \text{Energie délivrée} \times \left(1 - \frac{1}{\text{EROI}}\right) \end{aligned}$$

Selon les frontières d'analyse, on a

$$\begin{aligned} \text{EROI}_{\text{std}} &= \frac{P_F T}{c_1} \\ \text{EROI}_{\text{point d'usage}} &= \frac{P_F T}{c_1 + c_2 + c_3} \\ \text{EROI}_{\text{étendu}} &= \frac{P_F T}{c_1 + c_2 + c_3 + c_4} \end{aligned}$$

Aucune notion de rendement des processus de transformation !

Quelques valeurs de EROI

Exemples d'EROI

	Solaire	Eolien	Biom.	Charbon	Gaz	Hydro	Nuc.
*	2	4	4	30	28	35	75
**	10	20	-	45	18	80	15

- Chiffres évoluant avec le temps
 - Technologies utilisées
 - Qualité de la matière première
 - Extraction de difficulté variable
- Et les zones géographiques !

source : I. Capellan-Perez, "Dynamic EROI and material requirements", 2019 ; G. Bonhomme et al., "EROI and its importance in performance in energy systems", 2024* ; E. Dupont et al., "Global available wind energy with EROI", 2018 ; C. Hall, "EROI of different fuels", 2014**

Mesure d'efficacité de la transformation

- Analyse par rendement : mode « usage » sans ACV

$$\rho = \frac{P_F}{P_I} = \prod_i \rho_i$$

Taux de conversion $\rightarrow 1/\rho$

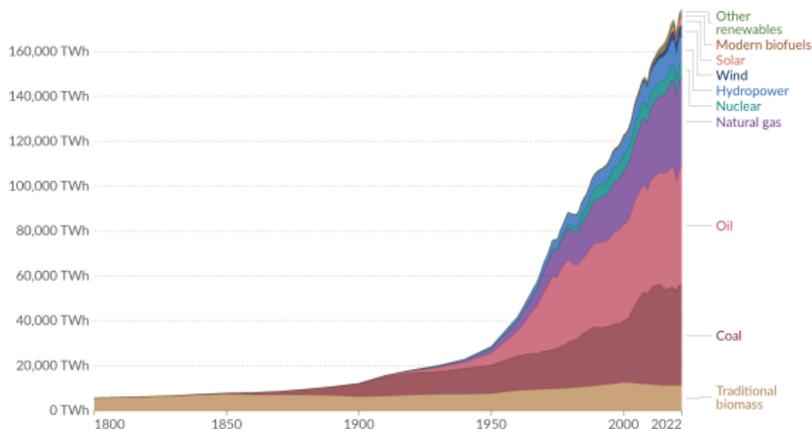
- Analyse par facteur de charge :

$$F = \frac{\text{Energie primaire produite}}{\text{Energie nominale maximale}}$$

Exemples (attention pas d'ACV)

- Voiture thermique : pétrole \rightarrow carburant délivré $\approx 1,05$;
carburant délivré \rightarrow utile (propulsion) $\approx 3 \Rightarrow 3,15$
- Voiture électrique : primaire \rightarrow électricité délivrée $\approx 2,3$;
électricité délivrée \rightarrow utile (propulsion) $\approx 1,17 \Rightarrow 2,7$

Bilan mondial

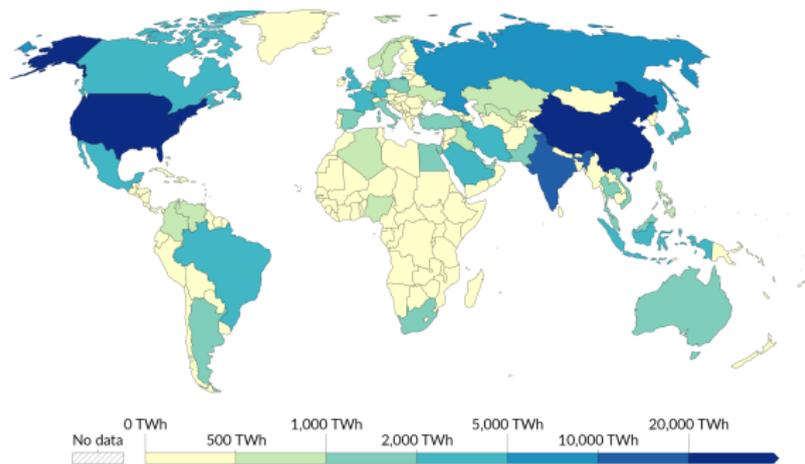


- Production annuelle de 170.000TWh/14Gtep (mais 85.000TWh/7Gtep en 1979)
- Energies fossiles : 81% du mix
- Accumulation des sources

source : H. Ritchie et al., "Energy Production and Consumption", 2020 ; <https://ourworldindata.org/> ;

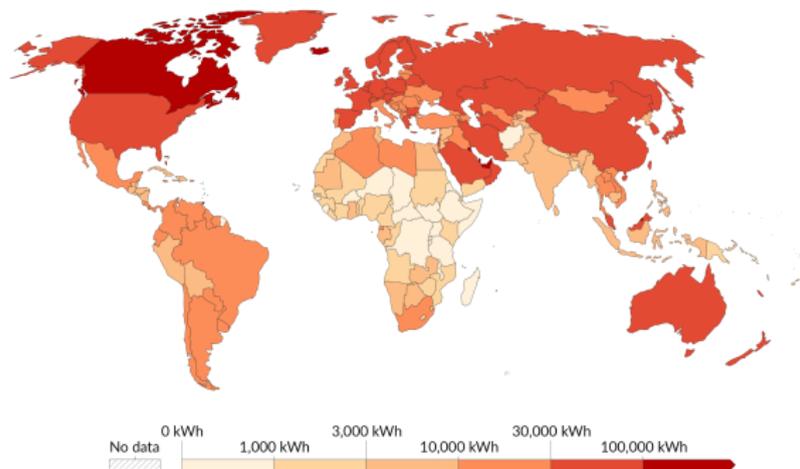
J.B. Frescoz, "Sans transition", 2024

Bilan mondial par pays



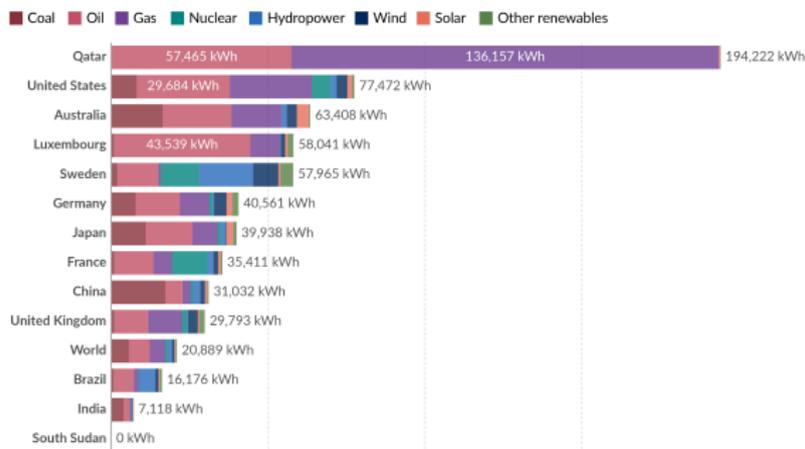
- Etats-Unis : 16% (en 1965, 33%)
- Chine : 26% (en 1965, 3,5%)
- UE : 10% (en 1965, 22%) dont France 1,4% (en 1965, 3%)

Bilan mondial par habitant



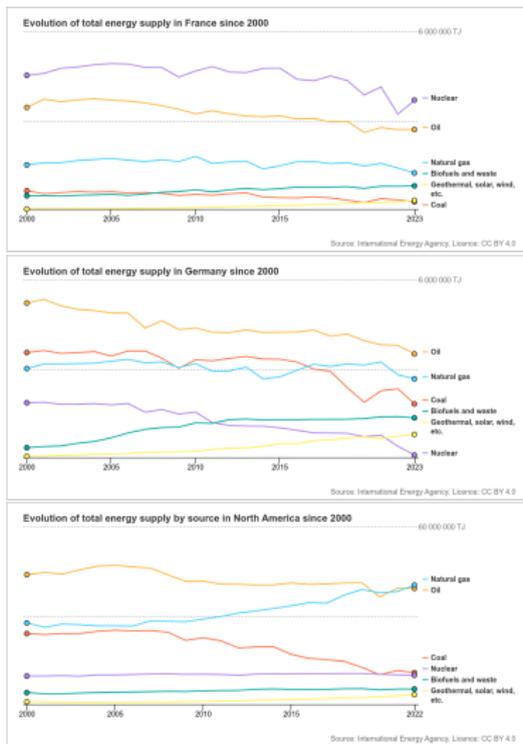
- Fort émetteurs : Amérique du Nord, Europe, Asie de l'Est, Pays du Golfe
- Faible émetteurs : Afrique
- Fortement corrélée au revenu par habitant

Bilan mondial par habitant et mix



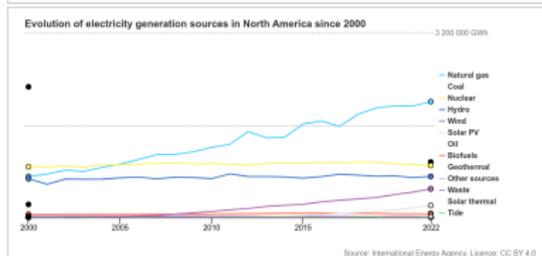
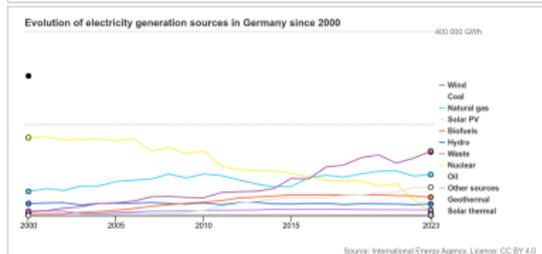
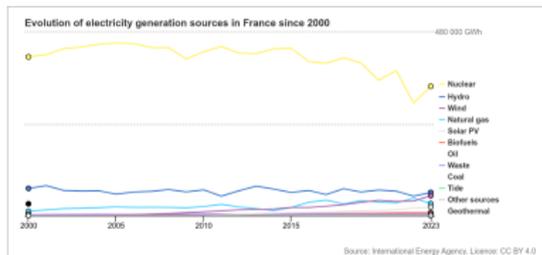
- Pays de Golfe : émissions par habitant triple des Etats-Unis
- Etats-Unis : émissions par habitant double de la France
- Selon les pays, mix énergétique très différent
 - Pétrole ou Charbon dominant presque partout
 - Quelques exceptions: Suède/Brésil avec l'hydro-électricité, France avec le nucléaire

Evolution du mix énergétique



source : <https://www.iea.org/countries/france/energy-mix>

Evolution du mix électrique

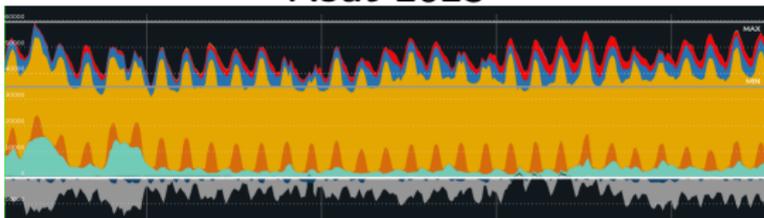


- Allemagne : nucléaire remplacé par éolien et solaire
- Amérique du Nord : le gaz remplace le charbon

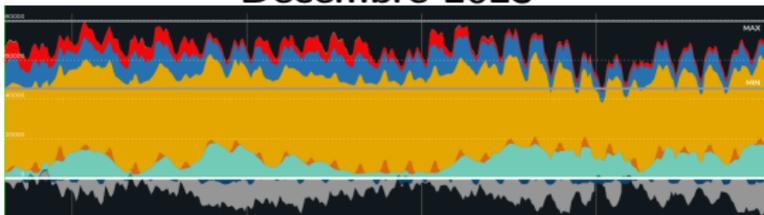
Intensité carbone

- France : 81gCO₂/kWh en 2017, 59g en 2023
- Allemagne : 528gCO₂/kWh en 2017, 416g en 2023

Août 2023



Décembre 2023



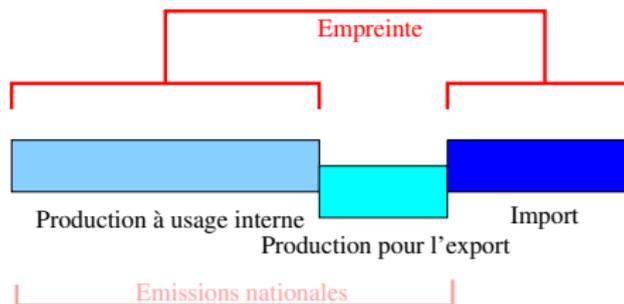
Bulletin météorologique

- “en août, des perturbations sur le territoire du 1^{er} au 5”
- “en décembre, des perturbations se sont succédé”

source : <https://www.rte-france.com/eco2mix> ; <https://meteofrance.fr>

Empreinte contre émissions nationales

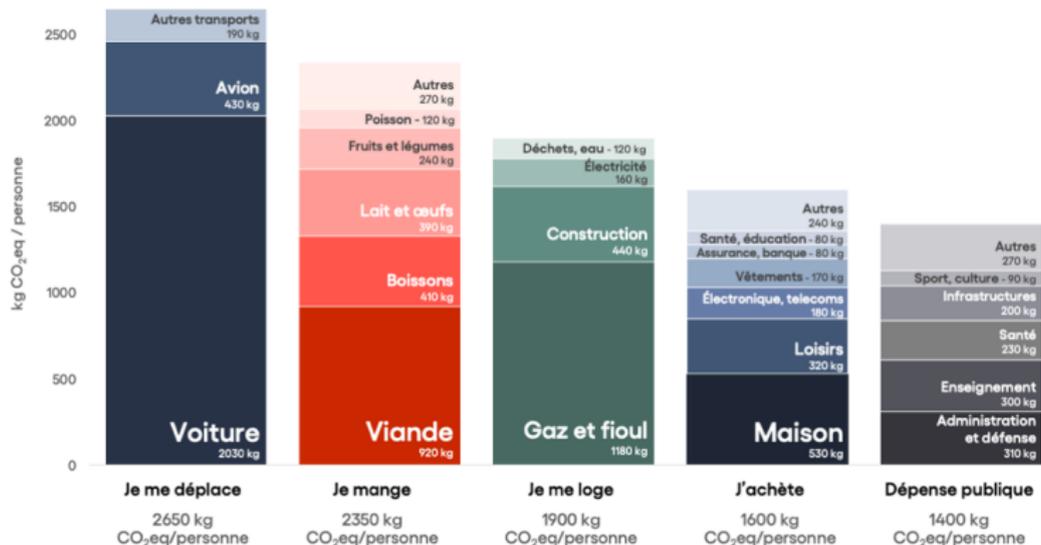
- Production sur le territoire : **émissions nationales**
- Consommation des habitants du territoire : **empreinte**



- France :
 - ↳ 9tCO₂e/hab en empreinte (11tCO₂e/hab en 1990)
 - ↳ 6,7tCO₂e/hab en émission (9,4tCO₂e/hab en 1990)
- Monde : 7,5CO₂e/hab (émission = empreinte)

source : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/>

Empreinte-carbone par secteur en France

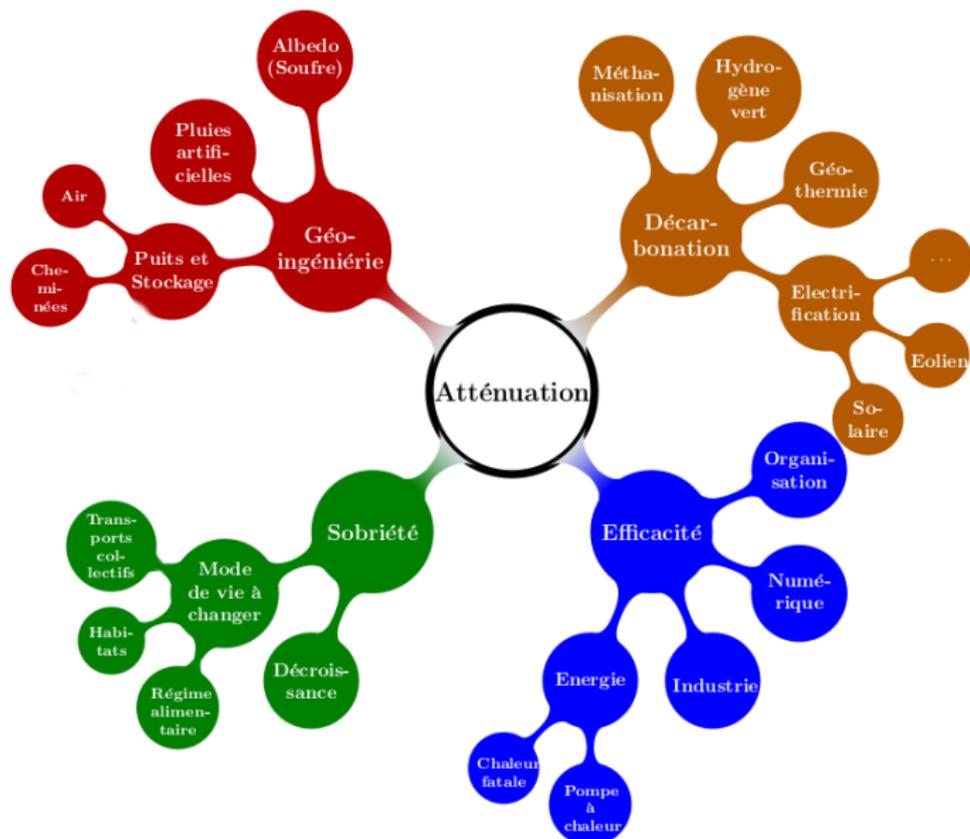


- Voiture individuelle, chauffage, alimentation carnée
- Objectif en émissions : 1,5tCO₂e en 2050

source : <https://www.myco2.fr> (Carbone4)

Section 2 : Décarbonation

Leviers possibles



Action pour diminuer le CO₂

- Puits de carbone naturels
 - Océans : moins efficace si réchauffement car moins de courants
 - Forêts, tourbières, prairies
- Puits de carbone artificiels: capture et stockage
 - Objectif SSP1-2.6 : 100Gt d'ici 2055 et 8Gt par an à terme
 - Capture actuelle : 40Mt par an
 - Surplus non gérable par d'autres procédés pour net zéro
 - Techniques
 - ↳ Energie par biomasse avec captage du carbone (1,5Mt par an)
 - ↳ Captage des fumées d'usine (démonstrateurs)
 - ↳ Captage directement dans l'air (9kt par an)
 - Zone de stockage: aquifères salins profonds (400 à 10.000Gt) et anciens gisements d'hydrocarbures (6.000 à 42.000Gt)
- Limitation de CO₂ : efficacité, décarbonation, sobriété

source : Centre Hadley ; IFPEN ; CITEPA ; Energy Transitions Commission, "CCUS in the energy transition: vital but limited", 2022

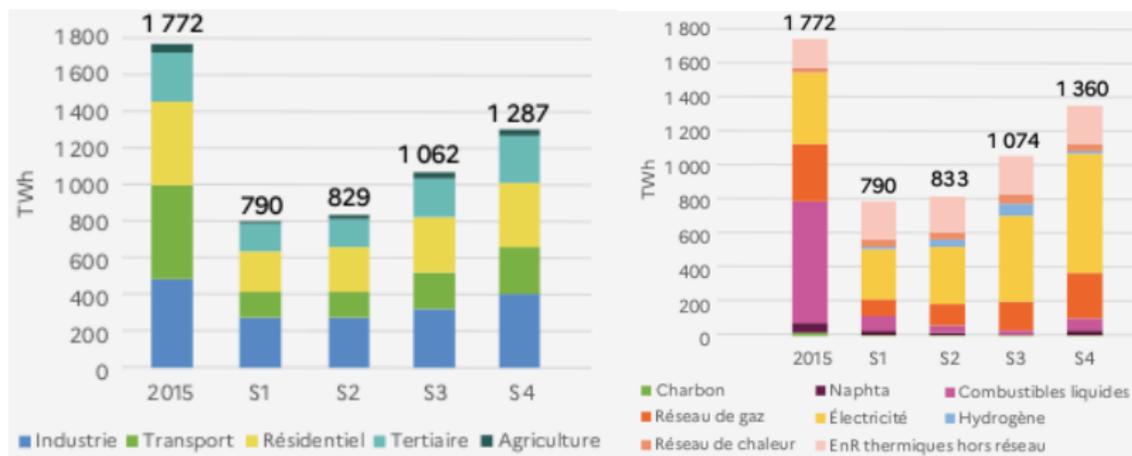
- Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) depuis 2016:
 - Chemin à suivre pour les émissions nationales jusqu'en 2050
 - ↳ point de départ: 450MtCO₂e (émissions)
 - ↳ point d'arrivée: 100MtCO₂e (émissions) ou 0 avec puits
 - ↳ 75% de baisse d'émissions
 - Tendances données par secteur et parfois avec des conseils technologiques
 - Points d'étape vérifiés par le Haut Conseil pour le Climat

En complément, des agences étatiques ont des chemins plus précis

- ADEME : 4 scénarios de société pour le SNBC
- RTE : 6 narratifs de mix électrique (50% de hausse)

Scénarios ADEME

- S1 : Sobriété, végé/bio ++, mobilité réduite, numérique stable
- S2 : Partage, végé/bio +, mobilité maîtrisée, numérique stable
- S3 : Technologies vertes, végé/bio, mobilité stable, numérique en hausse
- S4 : Pari du captage, optimisation, mode de vie inchangé



Objectif : 75GW de production, d'où 650TWh/an (S4-ADEME)

Capacités installées (GW)

	N	H	E	S	G	F	B	C	Total	Prod.
Base	61	25	23	17	12	3	2	2	145	50
M0	0	22	136	208	-	0	2	0	368	75
M2	16	22	132	125	-	0	2	0	297	75
N1	30	22	103	118	-	0	2	0	275	75
N3	53	22	65	70	-	0	2	0	212	75

- Production : nucléaire, éolien, solaire, hydro, méthanisation
- Stockage : hydro, hydrogène, batteries

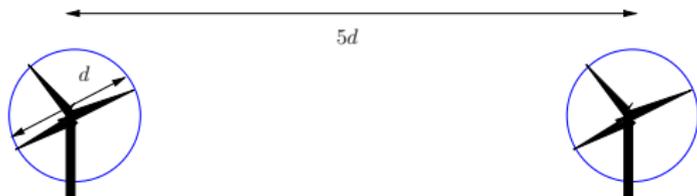
Comparaison des sources d'électricité

	Intensité carbone	Densité surfactive	Facteur de charge	Prix de production
Charbon	820	550	80	50
Pétrole	700	225	70	55
Gaz naturel	490	550	50	60
Biomasse	10-100	0,2	85	100
Solaire	30	10	15	55
Eolien	15	2	25	60
Hydro	15	15	25	20
Nucléaire	15	1100	65	30-120
	(gCO ₂ /kWh)	(W/m ²)	(%)	(€/MWh)

source : M. Bard et al., "Energies du XXI^e siècle", CEA, 2021 ; U. Fritsche et al., "Energy and Land use", IRENA, 2017 ;

<https://jancovici.com/transition-energetique/electricite/quel-est-le-vrai-cout-de-lelectricite/>

Calcul pour l'éolien



- Energie cinétique d'une turbine : $E_c = \frac{mv^2}{2}$
- Energie récoltée en t sec. (densité air de ρ_A) : $\frac{\rho_A \cdot (\pi d^2/4) vt \cdot v^2}{2}$
- Puissance récoltée (efficacité de ρ_E) : $P_c = \frac{\rho_E \rho_A \pi d^2 v^3}{8}$

Densité surfacique

$$\rho_S = \frac{P_c}{(5d)^2} = \frac{\rho_E \rho_A \pi v^3}{200}$$

Application numérique : $v=6$ m/s (22km/h), $\rho_A = 1,3$ kg/m³,
 $\rho_E = 0,5 \Rightarrow \rho_S = 2,2$ W/m²

source : D MacKay, "Sustainable energy - without the hot air", 2009

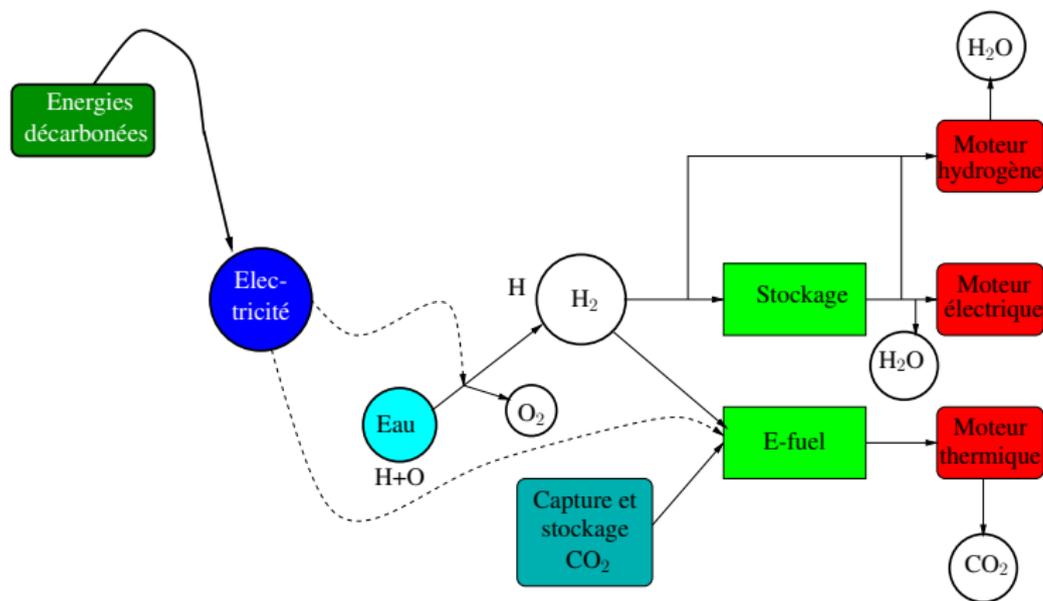
Solutions potentielles en tant que vecteur pour

- stockage (intermittence) à la place des batteries et barrages
- système embarqué
 - comprimé à 700 bars : 40kWh/kg 1,25MWh/m³
 - liquide à 20°K : 40kWh/kg 2,36MWh/m³
 - kérozène : 12kWh/kg 10MWh/m³

Taxonomie de production

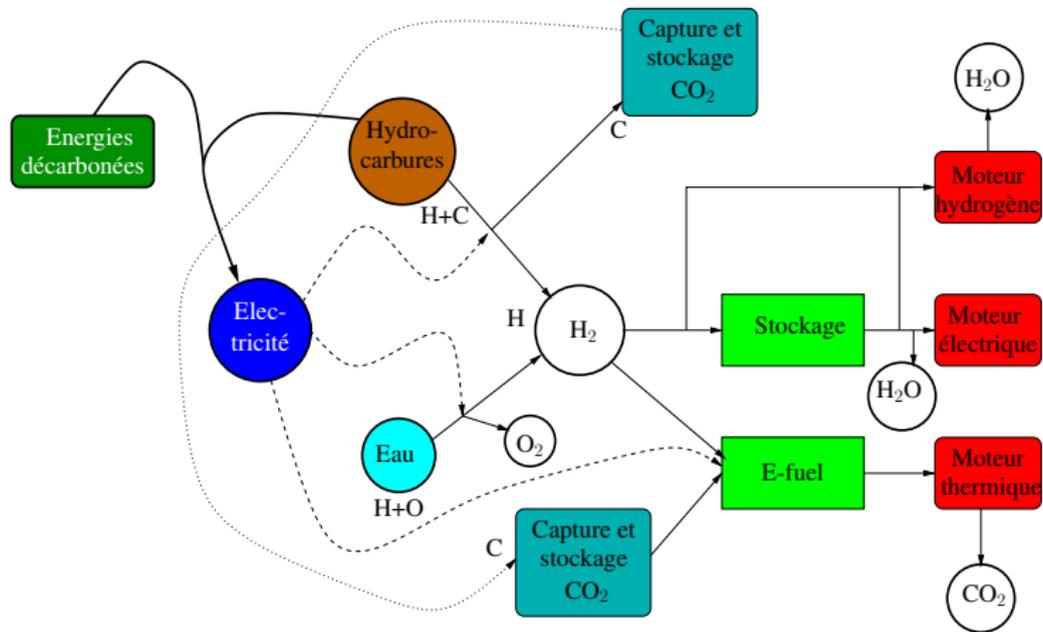
Hydrogène	Procédé	Matière	Energie
Noir	Gazéification	Charbon Lignite	Fossile
Brun			
Gris	Vaporeformage ... + Capture de CO ₂	Méthane et Eau	Fossile
Bleu			
Jaune	Electrolyse	Eau	Nucléaire Renouvelable
Vert			

Une vision systémique sur l'hydrogène



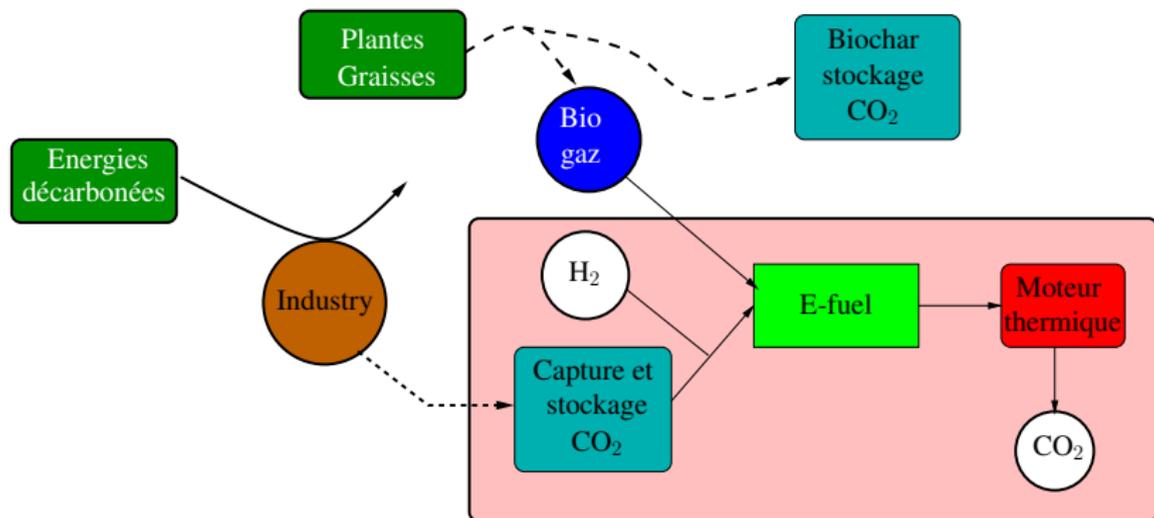
- Le bénéfice des moteurs dépend du chemin sur le graphe

Une vision systémique sur l'hydrogène



- Le bénéfice des moteurs dépend du chemin sur le graphe

Une vision systémique sur l'e-carburant



- *Sustainable Aviation Fuel (SAF), E-fuel*
- Attention au double décompte (Industrie et Moteur simultanément ?)
- Attention au conflit entre techniques

- Infrastructures
 - ↳ centrales
 - ↳ panneaux photovoltaïques, éoliennes
 - ↳ câbles
- Equipements dont stockage
 - ↳ aimants, bobines
 - ↳ batteries
 - ↳ numérique
- Combustibles
 - ↳ uranium

Remarque

Dans le renouvelable, le problème n'est plus la source d'énergie mais la fabrication de la machine permettant la conversion

source : ADEME, "Matériaux pour la transition énergétique, un sujet critique", 2022

Bilan sur les combustibles

A consommation et mix constant, les réserves sont de

- 2 siècles pour le charbon
- 35 années pour le pétrole, 50 années pour le gaz naturel
- 1 siècle pour l'uranium

Prospective: mix de 25% de hydro, solaire, éolien et nucléaire

- Consommation mondiale: 166PWh/an ou 19TW
- 4500 réacteurs nécessaires (actuellement 450)
- 160t d'uranium pour 8,7TWh (1GW) → 720kt/a → 7a
 - ↳ Uranium dans l'eau: pas exploitable actuellement
 - ↳ Thorium : réacteur expérimental en Chine
 - ↳ Surgénérateur : à l'arrêt aux Etats-Unis et en France
 - ↳ Fusion (ITER) : objectif au XXII^e siècle

source : D. MacKay, "Sustainable Energy without hotair", 2009 ; IAEA, "Options for Thorium based nuclear energy", 2022 ; I. Dumé, "Thorium, combustible nucléaire?", Polytechnique Insights, 2022 ;

P. Barabaschi, Interview dans "l'Humanité", 2023 ; A. Pottin, "Le nucléaire imaginé", 2024

Savoir :

- Quelques chiffres-clefs
- Différentes options de décarbonation possibles

Savoir-faire :

- Analyser les avantages et inconvénients d'une technique
- Analyser de manière holistique une technique