

TSE101 - Partie 1 / Chapitre 3

Energie et décarbonation

Philippe Ciblat

Telecom Paris, Institut Polytechnique de Paris



- Energies actuelles
 - Types d'énergie: primaire, secondaire, ...
 - Unités et conversion des énergies
 - Utilisation passée, actuelle: par pays, activité, habitant

- Décarbonation
 - Principe de décarbonation
 - Avantages et inconvénients de chaque énergie décarbonée
 - Réserves

Section 1 : Energie

Définition de l'énergie

C'est ce qui permet de modifier l'environnement

- Energie primaire: non transformée ou exploitée directement
 - pétrole brut, charbon extrait, biomasse, hydraulique, vent, ...
- Energie secondaire: obtenue par transformation d'une énergie primaire
 - électricité (via une centrale ou un barrage, ...)
 - carburant (via le raffinage)

Attention: convertisseur d'énergie permet de passer d'une énergie à une autre énergie

- Moulin à vent: vent (primaire) en énergie mécanique
- Bateau à voile: hydraulique (primaire) en énergie mécanique
- Voiture: carburant (secondaire) en énergie mécanique

Vecteur énergétique

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

- transporter
- ou stocker

Exemples:

- Eau
- Electricité
- Hydrogène (H_2)
- Carburant (vecteur proche de la source)
- Charbon (non-vecteur si consommé à l'endroit de la source)

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

Taux de conversion

- Primaire → Finale électrique $\approx 2,3$ en France
- Finale électrique → Utile (propulsion) $\approx 1,11$

- Energie: Joules (J), Watt-heure (Wh), calories (cal), tonne-équivalent-pétrole (tep), ...
 - ↪ 1J: déplacement de 100g sur une hauteur de 1m
- Puissance: Watt (W)
 - ↪ 1W: consommation de 1J durant 1s
 - ↪ cheval-vapeur (cv): 735W (selon J. Watt: 32.000pd.ℓ/mn)

Quelques manipulations avec des Watts

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

- Calorie: énergie pour élever 1g d'eau de 1°C à pression std

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

- 2000kcal = 8,36MJ
- 2000kcal/j = 96W
- Tonne Equivalent Pétrole: énergie moyenne obtenue lors de la combustion d'une tonne de pétrole brut

$$1\text{tep} = 41.760\text{GJ} = 11,6\text{MWh}$$

- 1tep = 10Gcal
- 1tep = 1616kg houille = 1069 m³ gaz = 954kg essence
- Voiture: un plein (50kg) sur 10h (car 100km/h) → 66cv

source: <https://www.unitjuggler.com/convertir-energy-de-Btu-en-kWh.html>

Exemples: chiffres-pivot

Un réacteur nucléaire (dit aussi « tranche »)

- 1GW
- 8,6TWh/an
- 56 réacteurs: 486TWh/an

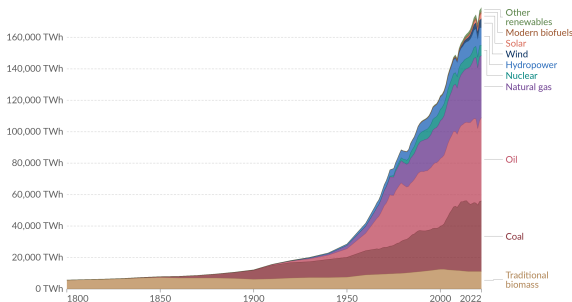
Un humain

- Métabolisme: 2500kcal/j ($\sim 100\text{W}$)
- Cycliste en plein effort: +450W

Quelques machines

- Aspirateur: 2000W ($\sim 220\text{V} \times 10\text{A}$ avec section 1mm^2)
- Tracteur: 125kW (~ 1000 humains)

Bilan mondial

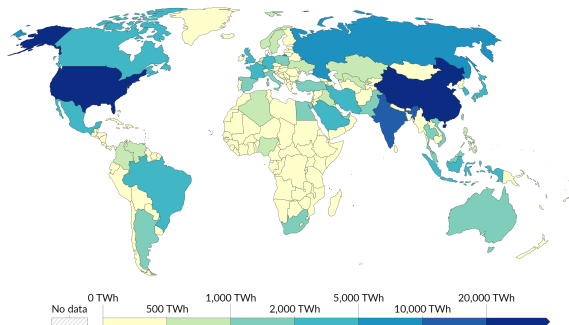


- Production annuelle de 170.000TWh/14Gtep (mais 85.000TWh/7Gtep en 1979)
- Asie contribue massivement à la croissance depuis 1979
- Energies fossiles: 81% du mix
- Accumulation des sources

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

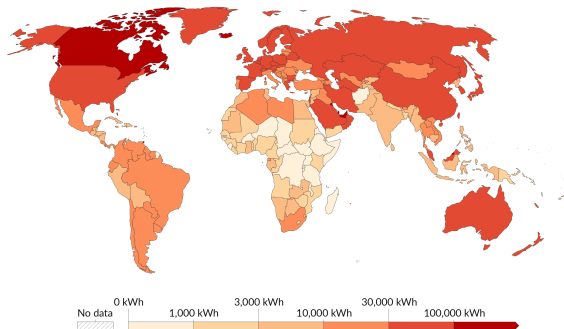
Fressoz, "Sans transition", 2024

Bilan mondial par pays



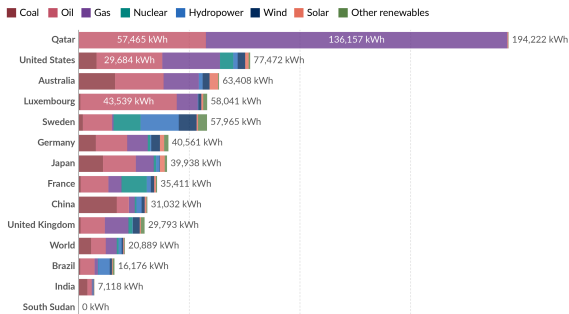
- Etats-Unis: 16% (en 1965, 33%)
- Chine: 26% (en 1965, 3,5%)
- UE: 10% (en 1965, 22%)
 - France: 1,4% (en 1965, 3%)

Bilan mondial par habitant



- Fort émetteurs: Pays anglo-saxons, Eurasie, Asie de l'Est, Pays du Golfe
- Faible émetteurs: Afrique de l'Ouest, centrale et de l'Est
- Fortement corrélée au revenu par habitant

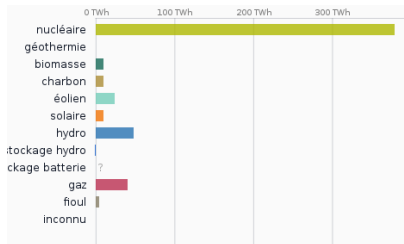
Bilan mondial par mix et habitant



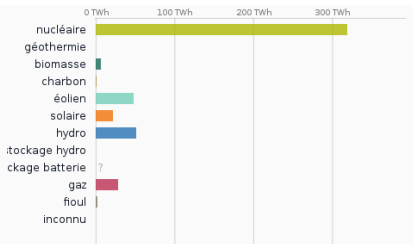
- Pays de Golfe: émissions par habitant triple des Etats-Unis
- Etats-Unis: émissions par habitant double de la France
- Selon les pays, mix énergétique très différent
 - Pétrole ou Charbon dominant presque partout
 - Quelques exceptions: Suède/Brésil avec l'hydro-électricité, France avec le nucléaire

Bilan en France (1/2)

2017



2023



Peu de changement

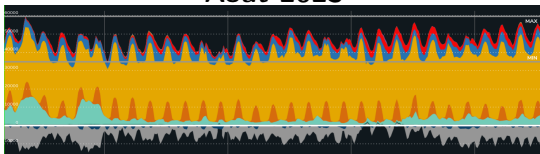
Intensité carbone (gCO₂/kWh)

- 81g CO₂/kWh en 2017
- 59g CO₂/kWh en 2023

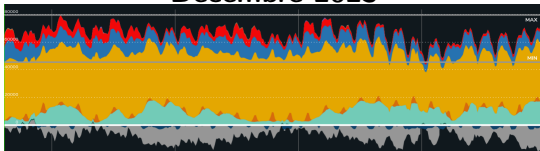
source: <https://app.electricitymaps.com/zone/FR>

Mix électrique en France (2/2)

Août 2023



Décembre 2023



Bulletin météorologique

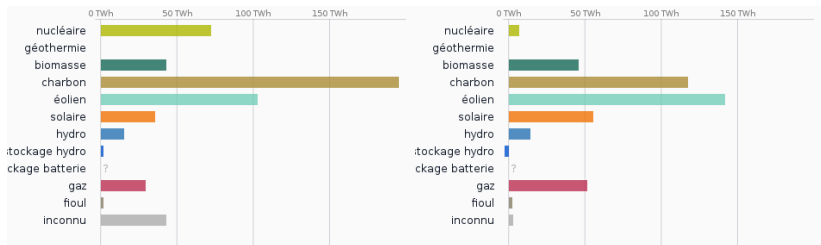
- “en août, des perturbations sur le territoire du 1^{er} au 5”
- “en décembre, des perturbations se sont succédé”

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

Mix électrique en Allemagne

2017

2023



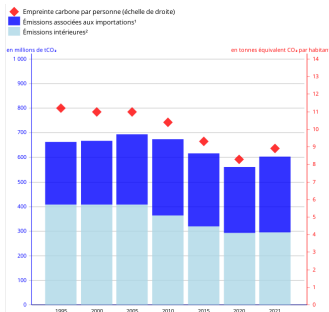
Nucléaire remplacé par éolien et solaire ; Charbon+gaz stable

Intensité carbone (gCO₂/kWh)

- 528g CO₂/kWh en 2017
- 416g CO₂/kWh en 2023

Empreinte contre émissions nationales

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



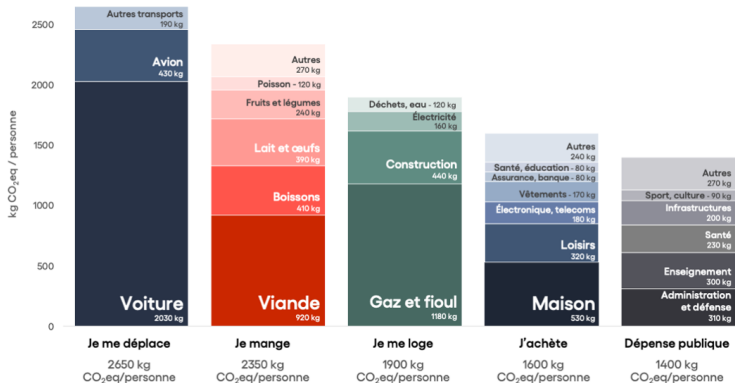
● France:

- ↪ 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

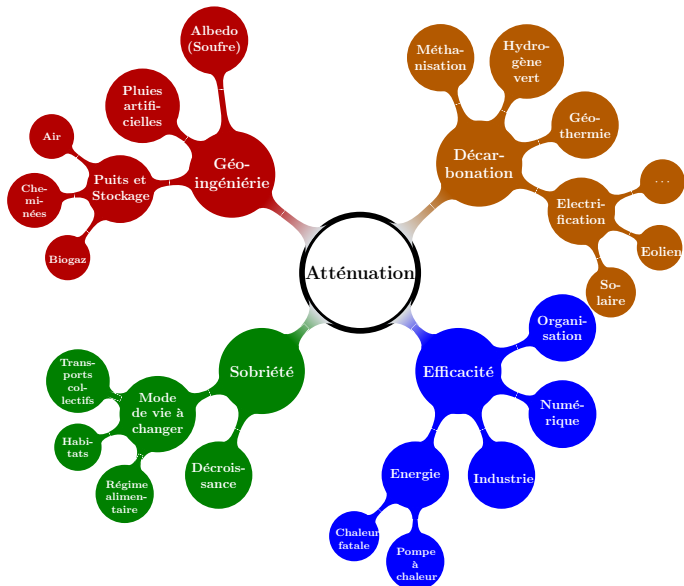


- Voiture individuelle, chauffage, alimentation carnée
- Objectif en émissions: 1,5tCO₂e en 2050

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

Section 2 : Décarbonation

Leviers possibles



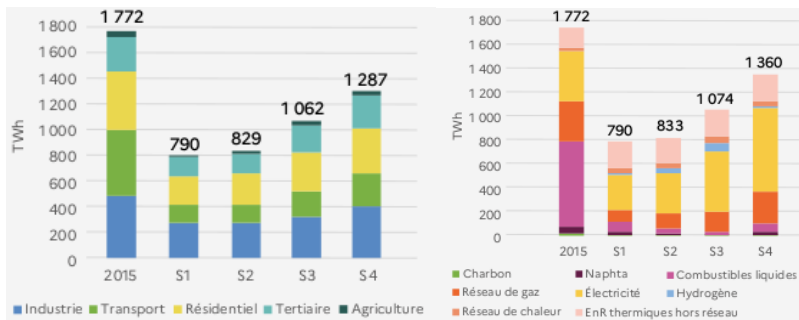
- Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) depuis 2016:
 - Chemin à suivre pour les émissions nationales jusqu'en 2050
 - ↳ point de départ: 450MtCO₂e (émissions)
 - ↳ point d'arrivée: 100MtCO₂e (émissions) ou 0 avec puits
 - ↳ 75% de baisse d'émissions
 - Tendances données par secteur et parfois avec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



Capacités installées (GW)

	N	H	E	S	G	F	B	C	Total	Conso.
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, hydraulique, méthanisation
- Stockage: hydraulique, hydrogène, batteries

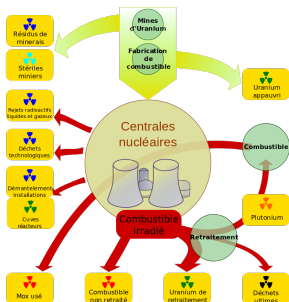
Comparaison des sources d'énergie

	Intensité carbone	Densité surfacique	Densité massique
Charbon	820	550	5
Pétrole	700	225	13
Gaz naturel	490	550	50
Biogaz	230	0,2	1
Solaire	27	11	
Eolien	12	2	
Hydraulique	12	13	
Nucléaire	12	1100	22e6 (U235)
	(gCO ₂ /kWh)	(W/m ²)	(kWh/kg ⁻¹)

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

D'autres comparaisons

	Facteur de charge %	Prix de production €/MWh
Solaire (sol)	13	65
Eolien	25	60
Hydraulique	28	20
Nucléaire	66	50



- Déchets

- ↳ Matières radioactives
- ↳ Ferme solaire et éoliennes

- Biodiversité

- ↳ Hydraulique
- ↳ Mines nécessaires

- Conflit d'usage

- ↳ Engrais contre énergie
- ↳ Surface pour solaire ou éolien

D'autres comparaisons

	Facteur de charge %	Prix de production €/MWh
Solaire (sol)	13	65
Eolien	25	60
Hydraulique	28	20
Nucléaire	66	50



- Déchets

- ↳ Matières radioactives
- ↳ Ferme solaire et éoliennes

- Biodiversité

- ↳ Hydraulique
- ↳ Mines nécessaires

- Conflit d'usage

- ↳ Engrais contre énergie
- ↳ Surface pour solaire ou éolien

D'autres comparaisons

	Facteur de charge %	Prix de production €/MWh
Solaire (sol)	13	65
Eolien	25	60
Hydraulique	28	20
Nucléaire	66	50



- Déchets

- ↪ Matières radioactives
- ↪ Ferme solaire et éoliennes

- Biodiversité

- ↪ Hydraulique
- ↪ Mines nécessaires

- Conflit d'usage

- ↪ Engrais contre énergie
- ↪ Surface pour solaire ou éolien

- Hydraulique
 - Barrage de Serre-Ponçon (Durance): 380MW
 - Barrage des Trois-Gorges (Yangtsé/Fleuve bleu): 22GW
 - Barrage de la Renaissance (Nil bleu): 5GW
- Solaire
 - France: 100% → 10.000km² (Hte-Marne+Hte Saône)
 - Monde: 100% → la France
 - mais problème de réserves de matériaux
- Eolien
 - France: 100% → 50.000km² → 10% du territoire
mais 400 fermes marines tous les 12km (typ. 0,5GW pour 100km² à Dieppe)

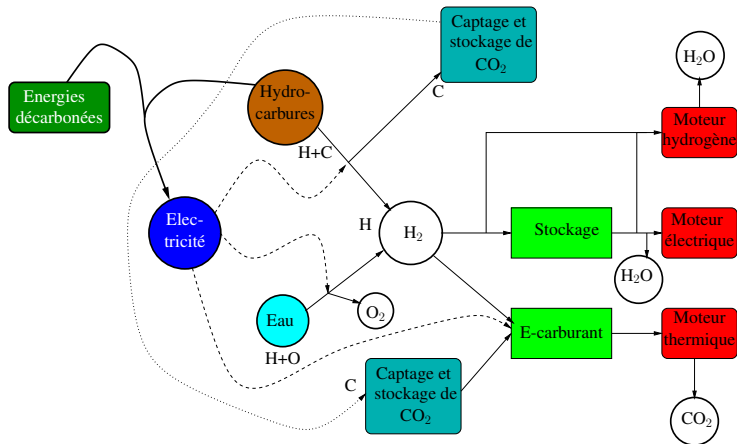
Solutions potentielles en tant que vecteur pour

- 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

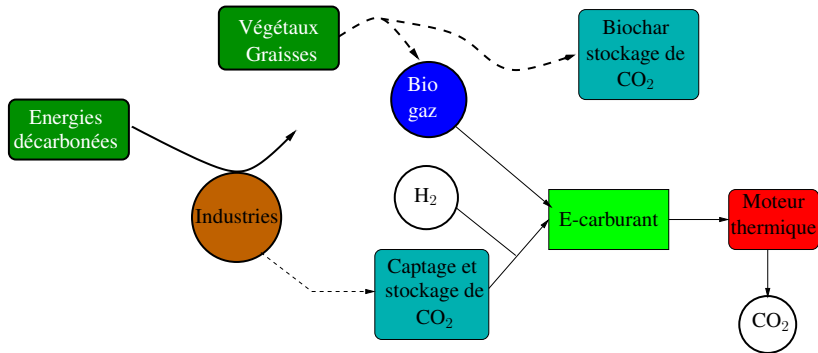
Hydrogène	Procédé	Matière	Energie
Noir	Gazéification	Charbon et Eau	Fossile
Brun			
Gris	Vaporeformage Vaporeformage+CSC	Méthane et Eau	Fossile
Bleu			
Jaune	Electrolyse	Eau	Nucléaire Renouvelable
Vert			

Une vision systémique sur l'hydrogène



- Le bénéfice des moteurs dépend du chemin sur le graphe
- Autre exemple: biogaz (dépend du cycle auquel il appartient)

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 en 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