

EES CM : Énergies & matières à travers les révolutions industrielles



Adrien Luxey-Bitri Damien Marchal



1er octobre 2025

Au menu

Qu'est-ce que l'énergie ?

Histoires industrielles

L'ère pré-industrielle

L'ère proto-industrielle

La I^e révolution industrielle

La II^e révolution industrielle

La III^e révolution industrielle

Défis de l'ère moderne

Crise climatique

Limites extractives

La gestion des déchets

Le pari numérique

I - Qu'est-ce que l'énergie ?

Énergie

Quantité de travail d'une force agissant sur une longueur :

$$[E] = [F] \times [L] = MLT^{-2} \times L = ML^2T^{-2}$$

Unités : joule (J), calorie (cal, kcal), watt-heure (Wh)...

1 Wh = énergie dispensée par 1 W de puissance en 1 h.

Énergie

Quantité de travail d'une force agissant sur une longueur :

$$[E] = [F] \times [L] = MLT^{-2} \times L = ML^2T^{-2}$$

Unités : joule (J), calorie (cal, kcal), watt-heure (Wh)...

1 Wh = énergie dispensée par 1 W de puissance en 1 h.

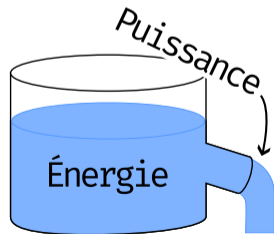
Puissance

Débit d'énergie (énergie par unité de temps) :

$$[P] = [E]/[T] = ML^2T^{-3}$$

Unité : watt (W)

$$1 W = 1 J/s \quad 1 Wh = 3600 J$$



Exemples de puissance

<i>Chez moi, par semaine :</i>	Puissance	Durée	Énergie/sem.
Raspberry Pi	1.15 W	24/7	193.2 Wh
Ordi portable	15 W	60 h	900 Wh
Aspirateur	1 kW	1 h	1 kWh
2× serveurs M82 [Deu20]	60 W	24/7	10 kWh
Eau chaude	1-2 kW	?	~ 20kWh
...			...
Total d'après relevé EDF			42 kWh
Humain (2000 kcal = 2.3 kWh)	~ 95 W	24/7	~ 16 kWh

Exemples de puissance

<i>Chez moi, par semaine :</i>	Puissance	Durée	Énergie/sem.
Raspberry Pi	1.15 W	24/7	193.2 Wh
Ordi portable	15 W	60 h	900 Wh
Aspirateur	1 kW	1 h	1 kWh
2× serveurs M82 [Deu20]	60 W	24/7	10 kWh
Eau chaude	1-2 kW	?	~ 20kWh
...			...
Total d'après relevé EDF			42 kWh

Humain (2000 kcal = 2.3 kWh)	~ 95 W	24/7	~ 16 kWh
------------------------------	--------	------	----------

Autres exemples de puissance :

Panneau solaire domestique (crête)	300-600 W/m ²
Moteur Renault ZOE	100 kW
Éolienne EDF (crête)	1-3 MW
Centrale nucléaire REP	~ 1 GW
Centrale nucléaire EPR	1.6 GW

II - Histoires industrielles

- Éolien : bateaux
- Solaire : champs & forêts
- Bois/Charbon : chaleur
- Force animale & humaine



L'ère pré-industrielle

Matières

Pré-industriel

« 7 métaux »

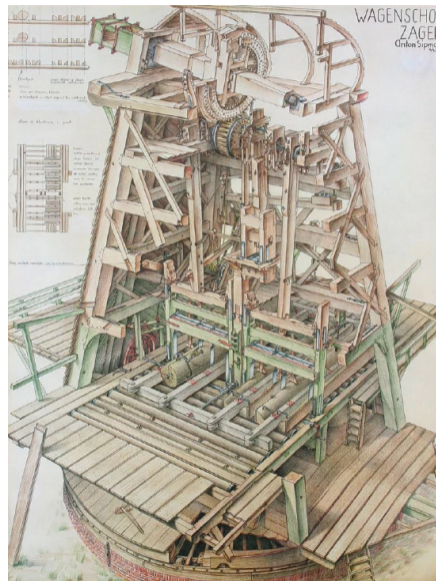
Autres métaux

hydrogène 1 H																	hélium 2 He						
lithium 3 Li	béryllium 4 Be																	bore 5 B	carbone 6 C	azote 7 N	oxygène 8 O	fluor 9 F	néon 10 Ne
sodium 11 Na	magnésium 12 Mg																	aluminium 13 Al	silicium 14 Si	phosphore 15 P	soufre 16 S	chlore 17 Cl	argon 18 Ar
potassium 19 K	calcium 20 Ca	scandium 21 Sc	titane 22 Ti	vanadium 23 V	chrome 24 Cr	manganèse 25 Mn	fer 26 Fe	cobalt 27 Co	nickel 28 Ni	cuivre 29 Cu	zinc 30 Zn	gallium 31 Ga	germanium 32 Ge	arsenic 33 As	sélénium 34 Se	brome 35 Br	krypton 36 Kr						
rubidium 37 Rb	strontium 38 Sr	yttrium 39 Y	zirconium 40 Zr	niobium 41 Nb	molybdène 42 Mo	technétium 43 Tc	ruthérium 44 Ru	rhodium 45 Rh	palladium 46 Pd	argent 47 Ag	cadmium 48 Cd	indium 49 In	étain 50 Sn	antimoine 51 Sb	tellure 52 Te	iode 53 I	xénon 54 Xe						
césium 55 Cs	baryum 56 Ba	lanthanides 57-71	hafnium 72 Hf	tantale 73 Ta	tungstène 74 W	rhénium 75 Re	osmium 76 Os	iridium 77 Ir	platine 78 Pt	or 79 Au	mercure 80 Hg	thallium 81 Tl	plomb 82 Pb	bismuth 83 Bi	polonium 84 Po	astate 85 At	radon 86 Rn						
francium 87 Fr	radium 88 Ra	actinides 89-103	rutherfordium 104 Rf	dubnium 105 Db	seaborgium 106 Sg	bohrium 107 Bh	hassium 108 Hs	meitnerium 109 Mt	darmstadtium 110 Ds	roentgenium 111 Rg	copernicium 112 Cn	ununtrium 113 Uut	ununquadium 114 Uuq	ununpentium 115 Uup	ununhexium 116 Uuh	ununseptium 117 Uus	ununoctium 118 Uuo						
			lanthane 57 La	cérium 58 Ce	praséodyme 59 Pr	néodyme 60 Nd	prométhium 61 Pm	samarium 62 Sm	europium 63 Eu	gadolinium 64 Gd	terbium 65 Tb	dysprosium 66 Dy	holmium 67 Ho	erbium 68 Er	thulium 69 Tm	ytterbium 70 Yb	lutécium 71 Lu						
			actinium 89 Ac	thorium 90 Th	protactinium 91 Pa	uranium 92 U	neptunium 93 Np	plutonium 94 Pu	américium 95 Am	curium 96 Cm	berkélium 97 Bk	californium 98 Cf	einsteinium 99 Es	fermium 100 Fm	mendélévium 101 Md	nobélium 102 No	lawrencium 103 Lr						

Une évolution progressive

- IXe-XIVe siècles : *Moulins*
Mécanisation du travail :
meule, pompe, textile, scierie...
- XIIe-XVIIe siècles : *Enclosures*
Répondent à l'accroissement de la
demande en matières premières

Frilosité à l'innovation :
Subordonnée au maintien du tissu social



Une révolution plus nette

- La proto-industrie déboise les forêts
- XVIIe siècle :
 - La machine à vapeur accroît le rendement des mines de charbon
- XVIIIe siècle :
 - Accroissement exponentiel de la capacité de production
 - La colonisation assure l'approvisionnement en matières premières

Transport :
chemin de fer, bateau à vapeur

Communication :
courrier puis télégraphe



Gloire au charbon !

- Conso. charbon UK 1820 \approx toute la superficie UK en forêts
- Total des réserves UK \approx prod. cumulée pétrole Arabie Saoudite
- Sidérurgie au coke de charbon décuple prod. de fer

hydrogène 1 H		Pré-industriel										1e révolution										hélium 2 He													
		« 7 métaux »					Autres métaux					XVIII siècle					XIXe siècle																		
lithium 3 Li		béryllium 4 Be												bore 5 B		carbone 6 C		azote 7 N		oxygène 8 O		fluor 9 F		néon 10 Ne											
sodium 11 Na		magnésium 12 Mg												aluminium 13 Al		silicium 14 Si		phosphore 15 P		soufre 16 S		chlore 17 Cl		argon 18 Ar											
potassium 19 K		calcium 20 Ca		scandium 21 Sc		titane 22 Ti		vanadium 23 V		chrome 24 Cr		manganèse 25 Mn		fer 26 Fe		cobalt 27 Co		nickel 28 Ni		cuivre 29 Cu		zinc 30 Zn		gallium 31 Ga		germanium 32 Ge		arsenic 33 As		sélénium 34 Se		brome 35 Br		krypton 36 Kr	
rubidium 37 Rb		strontium 38 Sr		yttrium 39 Y		zirconium 40 Zr		niobium 41 Nb		molybdène 42 Mo		technétium 43 Tc		ruthérium 44 Ru		rhodium 45 Rh		palladium 46 Pd		argent 47 Ag		cadmium 48 Cd		indium 49 In		étain 50 Sn		antimoine 51 Sb		tellure 52 Te		iode 53 I		xénon 54 Xe	
césium 55 Cs		baryum 56 Ba		lanthanides 57-71		hafnium 72 Hf		tantale 73 Ta		tungstène 74 W		rhénium 75 Re		osmium 76 Os		iridium 77 Ir		platine 78 Pt		or 79 Au		mercure 80 Hg		thallium 81 Tl		plomb 82 Pb		bismuth 83 Bi		polonium 84 Po		astate 85 At		radon 86 Rn	
francium 87 Fr		radium 88 Ra		actinides 89-103		rutherfordium 104 Rf		dubnium 105 Db		seaborgium 106 Sg		bohrium 107 Bh		hassium 108 Hs		meitnerium 109 Mt		darmstadtium 110 Ds		roentgenium 111 Rg		copernicium 112 Cn		ununtrium 113 Uut		ununquadium 114 Uuq		ununpentium 115 Uup		ununhexium 116 Uuh		ununseptium 117 Uus		ununoctium 118 Uuo	
						lanthane 57 La		cérium 58 Ce		praséodyme 59 Pr		néodyme 60 Nd		prométhium 61 Pm		samarium 62 Sm		europium 63 Eu		gadolinium 64 Gd		terbium 65 Tb		dysprosium 66 Dy		holmium 67 Ho		erbio 68 Er		thulium 69 Tm		ytterbium 70 Yb		lutécium 71 Lu	
						actinium 89 Ac		thorium 90 Th		protactinium 91 Pa		uranium 92 U		neptunium 93 Np		plutonium 94 Pu		américium 95 Am		curium 96 Cm		berkélium 97 Bk		californium 98 Cf		einsteinium 99 Es		fermium 100 Fm		mendélévium 101 Md		nobélium 102 No		lawrencium 103 Lr	

Le pétrole passe en force

- Fin XIXe siècle : *Peak Coal*
 - Raréfaction des réserves européennes de charbon
 - Navy UK passe au mazout en 1914
- Atténuation des risques liés aux grèves
 - Liquide : moins de main-d'œuvre
 - Étirement de la masse salariale sur plusieurs pays

Transport : voiture, avion, bateau au fioul

Communication : téléphone

Évolution ou révolution ?

- Mi-XXe : l'informatique permet la communication numérique
- Début XXIe : crise climatique commande énergies décarbonées

Communication : Internet

Énergies : éoliennes & panneaux solaires

DALLE TACTILE + VITRE

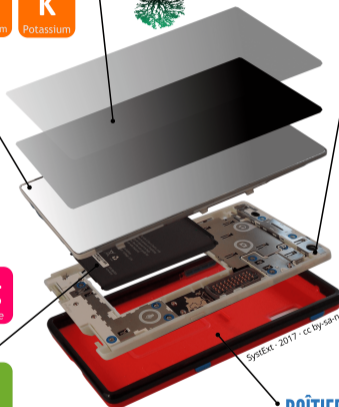
In Indium	Sn Etain	Si Silicium	Al Aluminium	K Potassium
---------------------	--------------------	-----------------------	------------------------	-----------------------

ÉCRAN

Eu Europium	Tb Terbium	Y Yttrium	
Gd Gadolinium	Ce Cérium	Tm Thulium	
La Lanthane	B Bore	Ba Baryum	
S Soufre	Mg Magnésium	Mo Molybdène	Hg Mercure

BATTERIE

Li Lithium	Co Cobalt	C Carbone	F Fluor
Mn Manganèse	V Vanadium	P Phosphore	Al Aluminium



SystExt - 2017 - cc by-sa-nc 3.0 fr

BOÎTIER

Mg Magnésium	C Carbone	Sb Antimoine	Br Brome	Ni Nickel	Zn Zinc
------------------------	---------------------	------------------------	--------------------	---------------------	-------------------

CARTE ET COMPOSANTS

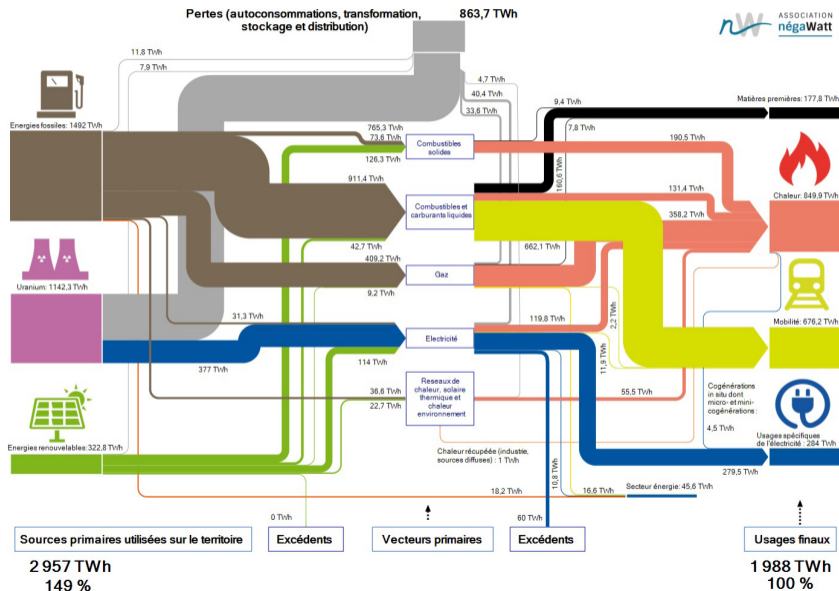
Ni Nickel	Pb Plomb	Sn Etain	Bi Bismuth
Au Or	Ag Argent	W Tungstène	Pt Platine
Rh Rhodium	Be Béryllium	Cu Cuivre	P Phosphore
As Arsenic	Ga Gallium	Ge Germanium	Si Silicium
Zr Zirconium	Ru Ruthénium	Nd Néodyme	Fe Fer
B Bore	Sm Samarium	Co Cobalt	Pr Praseodyme
Cl Chlore	Dy Dysprosium	Ta Tantale	
	Nb Niobium	Pd Palladium	

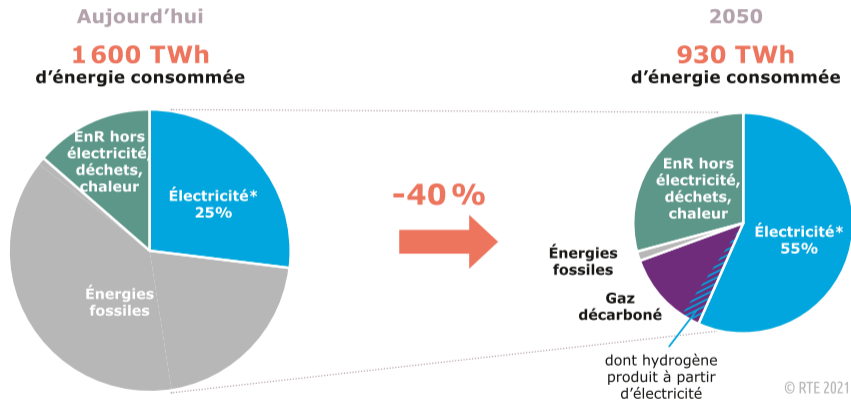
GROUP 1		1980's										1990's						2000's		2010's	
PERIOD 1	H Hydrogen																			He Helium	
2	Li Lithium	Be Beryllium											B Boron	C Carbon	N Nitrogen	O Oxygen	F Fluorine	Ne Neon			
3	Na Sodium	Mg Magnesium											Al Aluminum	Si Silicon	P Phosphorus	S Sulfur	Cl Chlorine	Ar Argon			
4	K Potassium	Ca Calcium	Sc Scandium	Ti Titanium	V Vanadium	Cr Chromium	Mn Manganese	Fe Iron	Co Cobalt	Ni Nickel	Cu Copper	Zn Zinc	Ga Gallium	Ge Germanium	As Arsenic	Se Selenium	Br Bromine	Kr Krypton			
5	Rb Rubidium	Sr Strontium	Y Yttrium	Zr Zirconium	Nb Niobium	Mo Molybdenum	Tc Technetium	Ru Ruthenium	Rh Rhodium	Pd Palladium	Ag Silver	Cd Cadmium	In Indium	Sn Tin	Sb Antimony	Te Tellurium	I Iodine	Xe Xenon			
6	Cs Cesium	Ba Barium	57-71 Lanthanides	Hf Hafnium	Ta Tantalum	W Tungsten	Re Rhenium	Os Osmium	Ir Iridium	Pt Platinum	Au Gold	Hg Mercury	Tl Thallium	Pb Lead	Bi Bismuth	Po Polonium	At Astatine	Rn Radon			
7	Fr Francium	Ra Radium	89-103 Actinides	Rf Rutherfordium	Db Dubnium	Sg Seaborgium	Bh Bohrium	Hs Hassium	Mt Meitnerium	Ds Darmstadtium	Rg Roentgenium	Cn Copernicium	Nh Nihonium	Fl Flerovium	Mc Moscovium	Lv Livermorium	Ts Tennessine	Og Oganesson			
		La Lanthanum	Ce Cerium	Pr Praseodymium	Nd Neodymium	Pm Promethium	Sm Samarium	Eu Europium	Gd Gadolinium	Tb Terbium	Dy Dysprosium	Ho Holmium	Er Erbium	Tm Thulium	Yb Ytterbium	Lu Lutetium					
		Ac Actinium	Th Thorium	Pa Protactinium	U Uranium	Np Neptunium	Pu Plutonium	Am Americium	Cm Curium	Bk Berkelium	Cf Californium	Es Einsteinium	Fm Fermium	Md Mendelevium	No Nobelium	Lr Lawrencium					

III - Défis de l'ère moderne

Crise climatique









Durée de vie d'un panneau solaire = 25 ans

Limites extractives




ALL THE METALS WE MINED

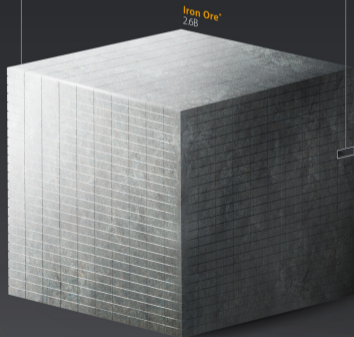
IN 2021

The world produced roughly **2.8 billion tonnes** of metals in 2021. Here are all the metals we mined, visualized on the same scale.

IRON ORE

2,600,000,000 tonnes*

 = 1,000,000 tonnes



LARGEST END-USE



Steelmaking



Construction



Chemicals



Alloying Agents



Energy/Batteries



Magnets



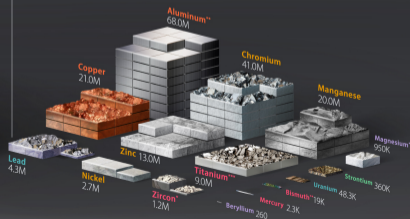
Electronics



Other

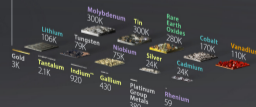
INDUSTRIAL METALS

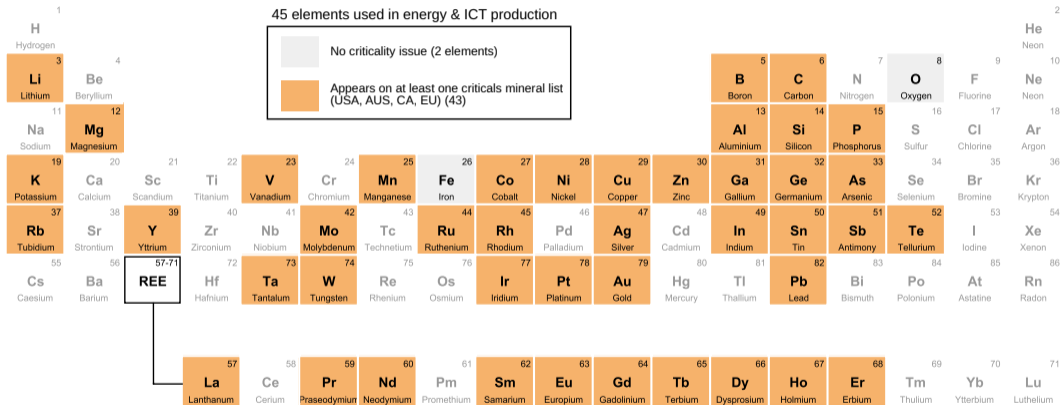
181,579,892 tonnes



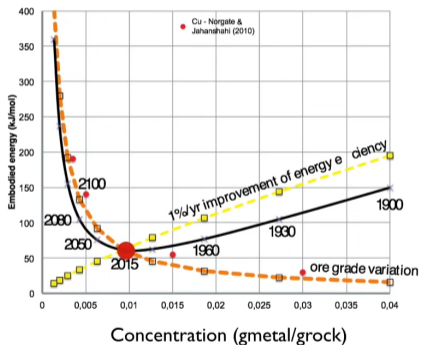
TECHNOLOGY AND PRECIOUS METALS

1,474,889 tonnes

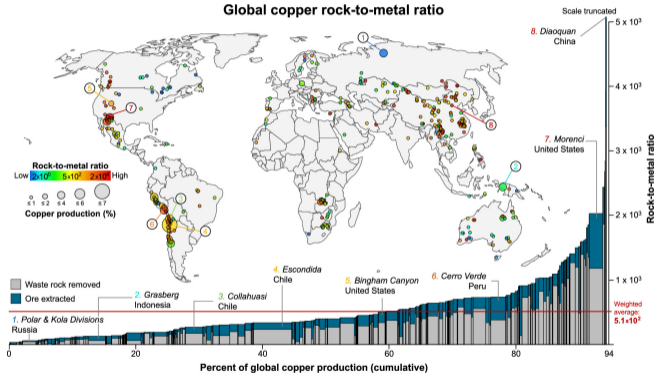




Energie de production



Global copper rock-to-metal ratio







Mine d'Escondida
Désert d'Atacama (Chili)



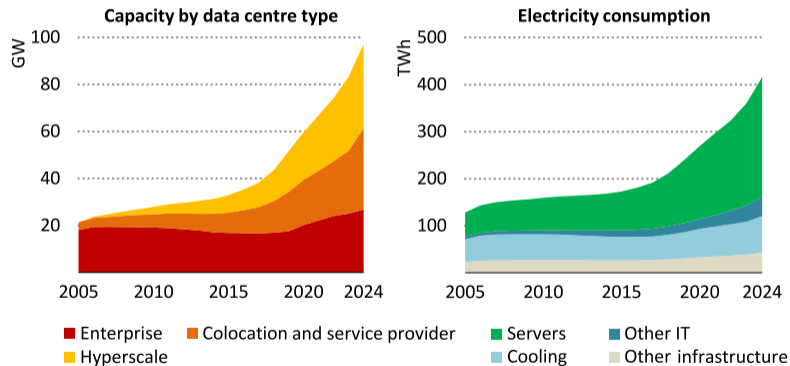


La gestion des déchets

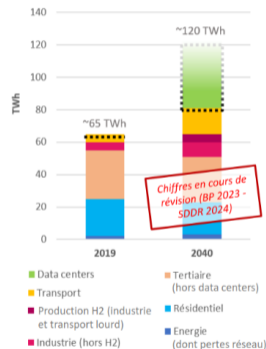
IV - Le pari numérique

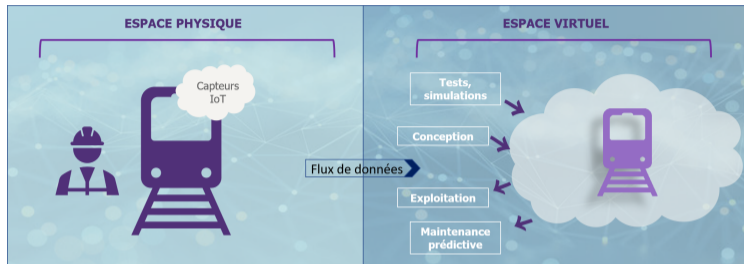
Total data centre electricity consumption by equipment type and data centre type, 2005-2024

IEA. CC BY 4.0.

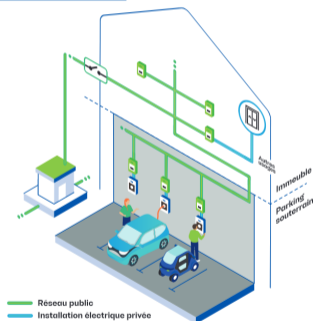


Consommation en IDF prévue dans l'étude FE 2050 (réactualisée sur les datacenters)





Système de recharge en immeuble avec solution réseau électrique auto





La demande énergétique de l'IA est assurée par des génératrices au gaz

That's all folks !

Slides sur <https://luxeylab.net>

Références I

- [Rif12] Jeremy RIFKIN, *La Troisième Révolution Industrielle*, Les Liens Qui Libèrent, fév. 2012, ISBN : 978-2-918597-47-6.
- [Jar14] François JARRIGE, *Technocritiques : Du Refus Des Machines à La Contestation Des Technosciences*, Éditions La Découverte, fév. 2014, ISBN : 978-2-7071-9032-1, URL : <https://www.editionsladecouverte.fr/technocritiques-9782707178237> (vu le 30/09/2025).
- [MJ17] Timothy MITCHELL et Christophe JAQUET, *Carbon Democracy : Le Pouvoir Politique à l'ère du Pétrole*, Québec : La Découverte Editions, 2017, ISBN : 978-2-7071-9586-9.
- [Sys17] SYSTEXT, *Des métaux dans mon smartphone*, avr. 2017, URL : <https://www.systext.org/sites/all/animationreveal/mtxsmpl/> (vu le 07/10/2024).
- [Vid19] Olivier VIDAL, *Énergie versus Matières Premières : La Transition Est-Elle Réellement Possible ?*, juill. 2019, URL : <https://www.youtube.com/watch?v=TxT7HD4rzP4> (vu le 11/12/2022).
- [Deu20] DEUXFLEURS, *Consommation électrique*, 2020, URL : <https://guide.deuxfleurs.fr/infrastructures/energie/> (vu le 29/09/2024).
- [nég21] NÉGAWATT, *5. Bilans énergie/matière du scénario*, Scénario négaWatt 2022, négaWatt, oct. 2021, URL : <https://www.negawatt.org/IMG/pdf/scenario-negawatt-2022-rapport-complet-partie5.pdf> (vu le 30/09/2025).
- [RTE21] RTE, *Futurs Énergétiques 2050*, Rapport Exécutif, Paris, oct. 2021, URL : <https://rte-futursenergetiques2050.com/> (vu le 04/12/2024).
- [Nas+22] Nedal T. NASSAR et al., « Rock-to-Metal Ratio : A Foundational Metric for Understanding Mine Wastes », *Environmental Science & Technology* (mai 2022), DOI : 10.1021/acs.est.1c07875.
- [Pat+22] David PATTERSON et al., « The Carbon Footprint of Machine Learning Training Will Plateau, Then Shrink », *Computer* 55 (juill. 2022), DOI : 10.1109/MC.2022.3148714.

Références II

- [Cer+23] Sophie CERF et al., *Untangling the Critical Minerals Knot : When ICT Hits the Energy Transitions*, déc. 2023, URL : <https://inria.hal.science/hal-04709741> (vu le 07/10/2024).
- [IEA23] IEA, *World Energy Outlook 2023*, rapp. tech., OECD, 2023, URL : <https://origin.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023> (vu le 01/10/2024).
- [Lau23] Séverine LAURENT, *Perspectives de raccordement de data center en Ile-de-France*, rapp. tech., RTE, nov. 2023.
- [Ene24] ENEDIS, *Le pilotage de la charge des véhicules électriques*, rapp.tech., avr. 2024, p. 28, URL : <https://www.enedis.fr/sites/default/files/documents/pdf/enedis-rapport-pilotage-de-la-recharge-de-vehicules-electriques-2024-web-v2.pdf?VersionId=yJcrPgDftrIKBaIOcb7rPZw61XpySK00> (vu le 01/07/2025).
- [Min24] MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, *Chiffres clés de l'énergie*, rapp. tech., 2024, URL : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-energie-2024/> (vu le 23/09/2024).
- [Int25] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, *Energy and AI*, World Energy Outlook Special Report, IEA, avr. 2025, URL : <https://www.iea.org/reports/energy-and-ai> (vu le 01/07/2025).
- [Les25] LES ÉLÉMENTS CHIMIQUES, *Propriétés - Date de Découverte*, Site Documentaire, 2025, URL : <https://www.elementschimiques.fr/?fr/proprietes/generalites/date-de-decouverte> (vu le 30/09/2025).
- [Mar25] Laura Paddison MARSH Rene, *Elon Musk Is Building 'the World's Biggest Supercomputer.' It's Powered with Dozens of Gas-Powered Turbines*, mai 2025, URL : <https://www.cnn.com/2025/05/19/climate/xai-musk-memphis-turbines-pollution> (vu le 30/09/2025).
- [Rou25] Gauthier ROUSSILHE, *GPU et IA gen face à l'histoire environnementale du numérique | Gauthier Roussilhe*, mars 2025, URL : <https://gauthierroussilhe.com/articles/la-phase-g-les-gpu-et-les-ia-generatives-comme-nouvelle-phase-de-l-histoire-environnementale-de-la-numerisation-partie-1> (vu le 30/09/2025).