

Transparents-exposé



Électrifier le transport routier, moyen essentiel de décarboner l'économie

Modifié le 20 février 2024, d'après une conférence faite pour l'AFIS (Association Française pour l'information scientifique) par Frédéric Livet, chercheur CNRS, Simap, UGA (Université Grenoble-Alpes)

Frederic.livet@simap.grenoble-inp.fr

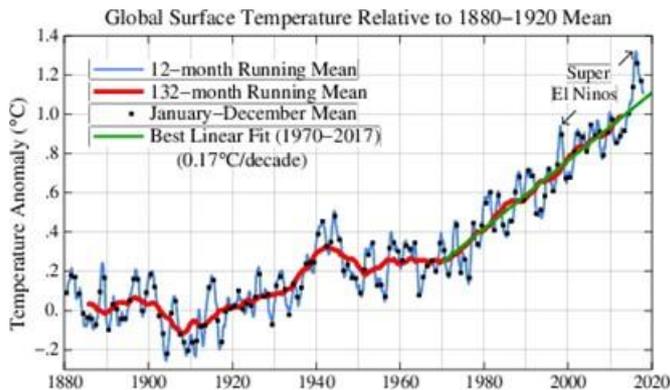
Plan

- Les émissions de CO2 dans le monde et en France
- Le contexte « externe »: climat, baisse des réserves de pétrole
- Les progrès technologiques des usages de l'électricité
- Les batteries au lithium et les autres
- Les matériaux pour les batteries et les moteurs électriques vont-ils manquer ?
- L'évolution des prix
- Quelques caractéristiques des voitures électriques existantes
- Le problème de la recharge
- Autres possibilités étudiées : hybrides rechargeables, autoroutes électriques
- Quid de l'hydrogène ?
- Les estimations de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE)
- Comment cela s'insère dans la décarbonation de l'économie française

Conclusion : il faut faire confiance dans la science et la technique !

Le contexte « externe »: climat et « peak oil »

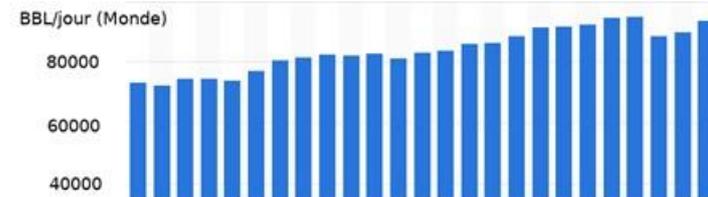
- Le réchauffement climatique lié essentiellement aux émissions de CO2 des carburants fossiles est un problème fondamental



Malgré les annonces de baisse de production aux US, observées depuis 1980, la production est ensuite remontée (pétroles de schistes).



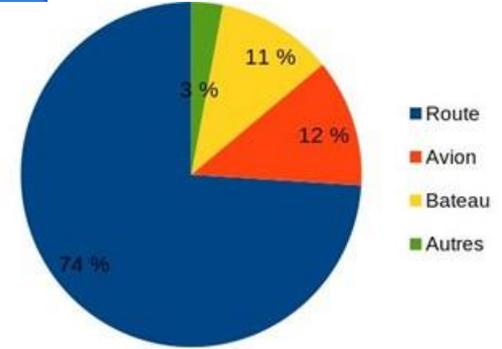
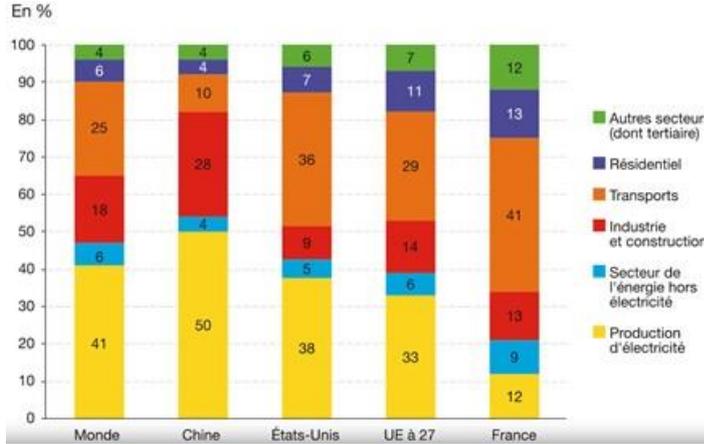
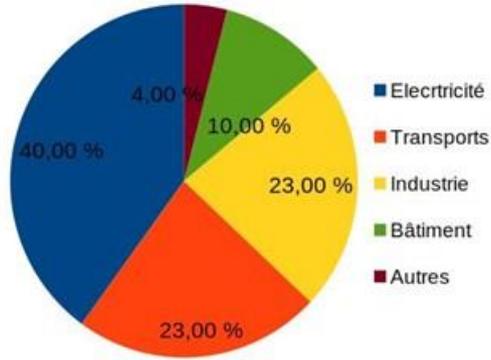
La production mondiale semble encore croître, presque de 1 % par an, malgré quelques « accidents »



Quid alors du « peak oil » ?

l'AIE parle de plus en plus de « pic de la demande » par substitution de l'électrique au pétrole

Position du problème dans les émissions de CO2 en France et dans le monde



Emissions des transports de la France

Emissions CO2 France : 300Mt

VP (auto) : 67Mt

VU (utilitaire) : 25Mt

PL (poids lourds) : 29 Mt

Deux Roues : 1.7Mt

Total 123Mt

(chiffres 2019)

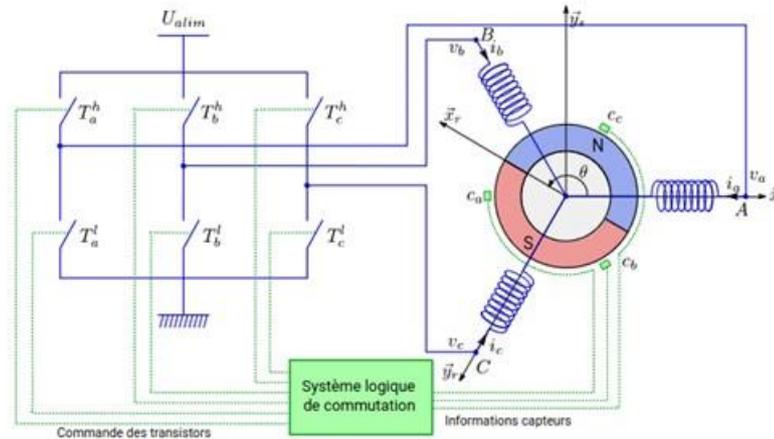
Ventilation mondiale des émissions de CO2

Divers pays-régions

- Dans le monde, la première source d'émissions est l'électricité.
- En France, ce sont les transports, car l'électricité est déjà décarbonée (nucléaire!)
- Cela devrait fixer des priorités

Le contexte « interne » : les progrès techniques

- Quatre domaines :
- Les moteurs
- L'informatique et les calculs
- L'électronique de puissance
- Les batteries



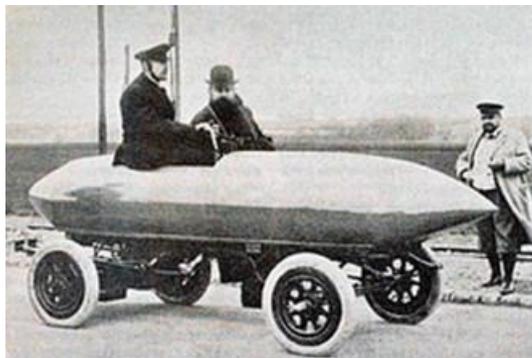
Brushless pour vélo électrique

Le moteur « brushless » simplifié. Ici, le rotor a 2 poles qui sont obtenus avec aimants permanents (NdFeB). On peut avoir beaucoup plus de pôles. C'est un ordinateur qui commande les commutations, avec la mesure de la position du rotor par des sondes « à effet Hall ». Rendements supérieurs à 96 %. Il faut une grande puissance de calcul, car on dépasse les 10000 pas par seconde. Les commutations rapides avec un courant de puissance (peut être des centaines d'ampères) nécessitent des composants nouveaux : SiC, GaAs, Mosfets.. Donne des moteurs/générateurs très légers (de 4 à 10kW/kg), utilisés aussi dans les éoliennes, avec beaucoup de pôles, les vélos électriques (voir photo), les drones, voire la propulsion des avions...

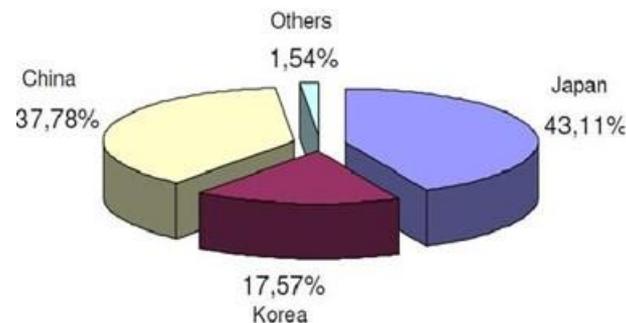
Mais les moteurs à stator bobinés ont aussi profité du développement des programmes de calcul de champs magnétiques développés pour les accélérateurs de particules et ils ont aussi progressé.

Les Batteries : Les Voitures électriques (VE) à batteries (VEB) : de 1899 à 2000

- Diverses batteries ont été essayées.
- D'abord batteries au plomb : la « jamais contente » (la première à 100km/h) n'avait que ~10 km d'autonomie.
- Donc le moteur essence s'impose
- Puis batteries NiCd (Nickel Cadmium, voir Citroën Saxo): très toxiques
- Puis batteries NiMH (Nickel-Métal-hydrure :Toyota Prius hybride)
- Enfin arrivent les Lithium ! Des téléphones portables aux VE en passant par les ordi portables
- Mais personne (2006) en Europe ne se préoccupe de produire les batteries



1899 : 100km/h !



2006 : qui produit batteries ?

« SYSTEMES » BATTERIE

🔋 Energie	kWh
🔋 Poids	kg
🔋 Autonomie	km/cycle
🔋 Prix	k.€
	€/km (1)

	Plomb	Ni-Cd	Ni-MH
Energie	11	12	18
Poids	458	246	303
Autonomie	67	87	118
Prix	2	6	6,5
€/km (1)	0,08	0,02	0,03

Des estimations vers 2000 De VE à batteries

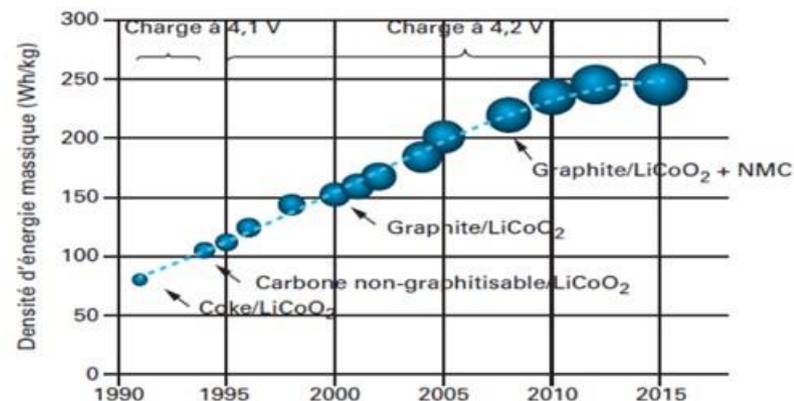
Les batteries au lithium

Les batteries au lithium ont une bonne capacité de stockage. Développées dans les années '90 à partir du travail de Goodenough (prix Nobel à 97 ans..). Ce sont en général des batteries « Li-ion », qui ont été lentement améliorées quant à leurs capacités de stockage massique d'énergie (Watt-heure/kilo) et à leur longévité (10-20 ans, 5000 cycles)

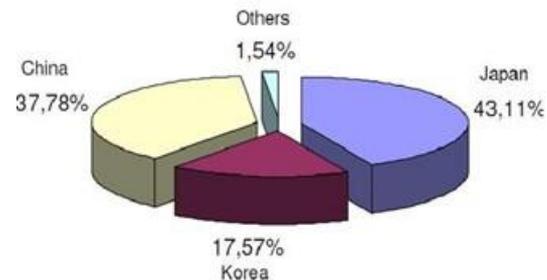
Au début, destinées aux téléphones (qq Wh), puis aux ordinateurs portables (qq dizaines de Wh).

On a commencé à les envisager pour la VE vers 2005, alors qu'elles étaient toutes fabriquées en Asie. C'est à ce moment que les Chinois ont commencé à s'y investir (BYD, CATL)

Il fallait prévoir des dispositifs capables de stocker des dizaines de kWh (40-80kWh/VE). Personne ailleurs qu'en Chine ne semblait bien s'y intéresser..



La progression des cellules Li-ion



L'abandon catastrophique des batteries en Europe (2006)

Les diverses batteries Lithium

- Il existe de nombreuses déclinaisons de batteries au Lithium. Toutes ont fait l'objet de développements et d'études pour leur stabilité, pour leur énergie massique (en Wh/kg) et leur capacité à être chargées rapidement : N=Nickel, C=Cobalt, M=Manganese, LFP=LiFePO4

kg/kWh	Lithium	Nickel	Cobalt	Manganèse	Energie (Wh/kg)
NCA	0.1	0.67	0.13	0.09	~250
NMC 111	0.15	0.40	0.40	0.37	~220
NMC 433	0.14	0.47	0.35	0.35	~220
NMC 532	0.14	0.59	0.23	0.35	~220
NMC 622	0.13	0.61	0.10	0.20	~220
NMC 811	0.11	0.75	0.08	0.09	~220
LFP	0.1	0	0	0	~160

Aucun projet « à l'Ouest »....sauf Tesla

- Pour produire des millions de VE, il faut des batteries qui permettent des centaines de GWh de capacité de stockage. Des constructeurs européens disent alors : on achètera en Asie : Renault avec LG (Corée)...
- Tesla décide de construire des usines (coll. Panasonic). La première, la « gigafactory 1 » (G1), produit déjà 35GWh de cellules (et 50GWh de batteries) en fin 2018, Elle a coûté 6G\$, couvre 54ha et sa production équipe plus de 500000VE/an. Tesla compte doubler cette usine, a construit la G2 à Buffalo, G3 à Shanghai, a G4 à Berlin, une usine en projet au Mexique.

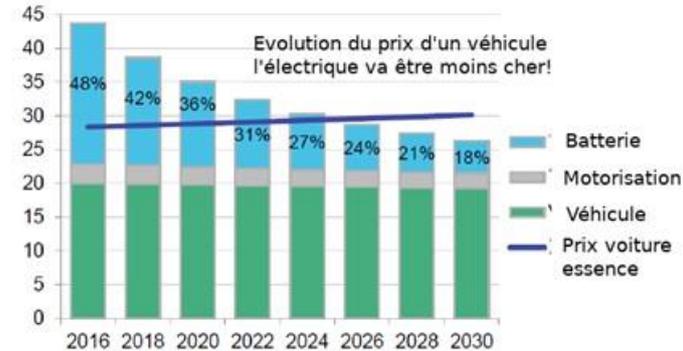
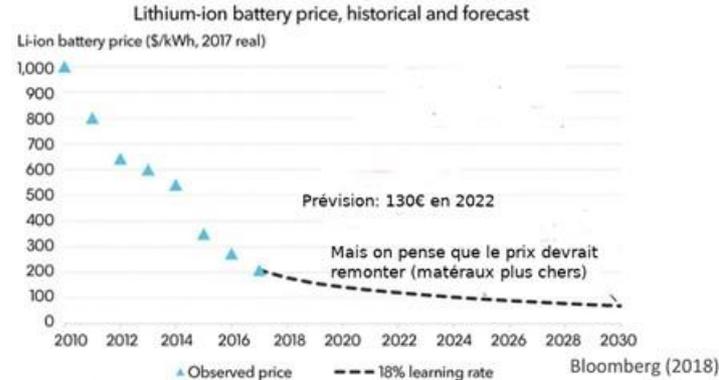


L'évolution des prix : batteries, véhicules

Le prix des batteries a chuté. Estimation 2019 : 116\$/kWh (Tesla), 146\$/kWh (moyenne constructeurs). Problème 2023 : le prix des matières premières croît, Li et surtout Cobalt. On se tourne vers LiFePO₄, moins critique, mais moins efficace (160Wh/kg quand même) : le prix semble « crever » le plancher 100\$/kWh en 2023.

Les voitures électriques, dont le surcoût était surtout lié à la batterie, sont en train de passer en dessous du prix des voitures essence, surtout si on tient compte du moindre entretien et du faible coût du carburant électrique

[Et maintenant arrivent les batteries sodium, qui semblent moins chères mais moins efficaces (?)]



La Révolution des batteries Li que seule la Chine semble avoir anticipée !

Le réveil ?

- Il y a à peu près 30 ans (1997), Citroën a introduit des voitures électriques avec batteries (VEB). Les « saxos » avec batteries de Ni-Cd qui assuraient 90 km d'autonomie ont été un moment les VE les plus vendues au monde. Mais seulement 5500 furent produites et ce fut un échec commercial qui contribua à la réticence ultérieure de Citroën à se lancer dans l'électrique. D'où les récriminations de Tavarès ?

Une VE type est la ZOE ----->

Batteries 52 kWh, 300 kg

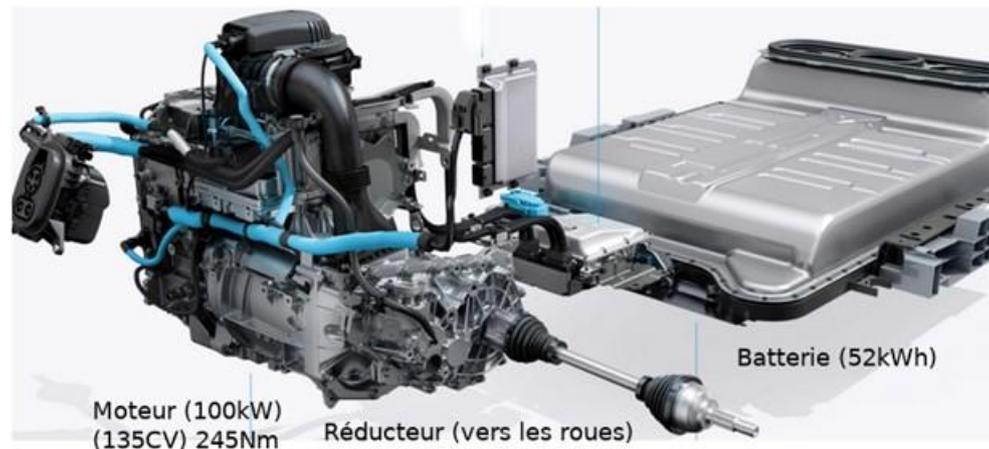
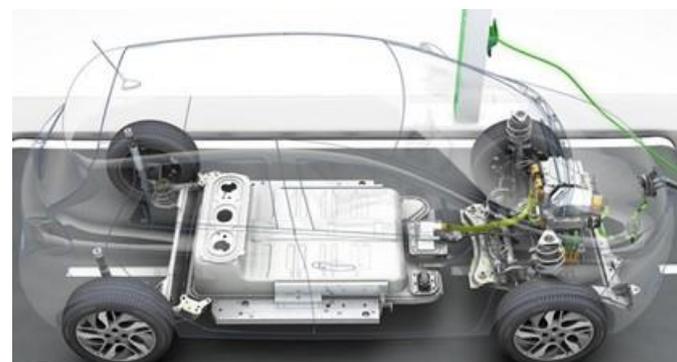
Charge > 3 heures

Autonomie 380 km

Poids 1500 kg

~250000 exemplaires produits

Périmée : production arrêtée en 2024

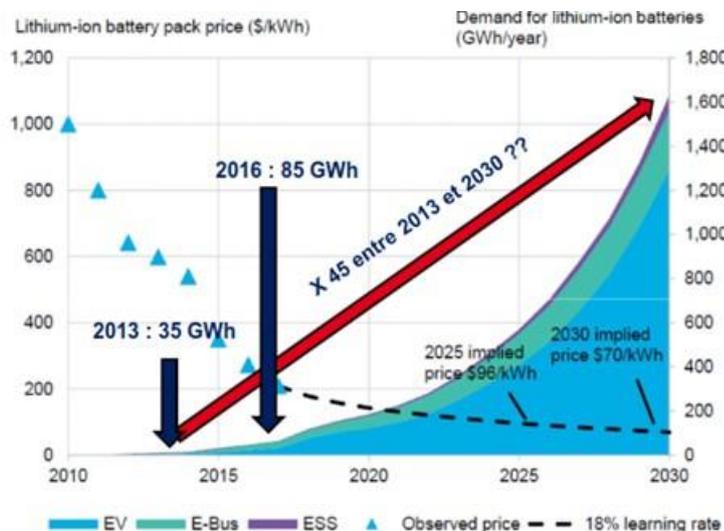


Rôle essentiel d'une industrie des batteries !

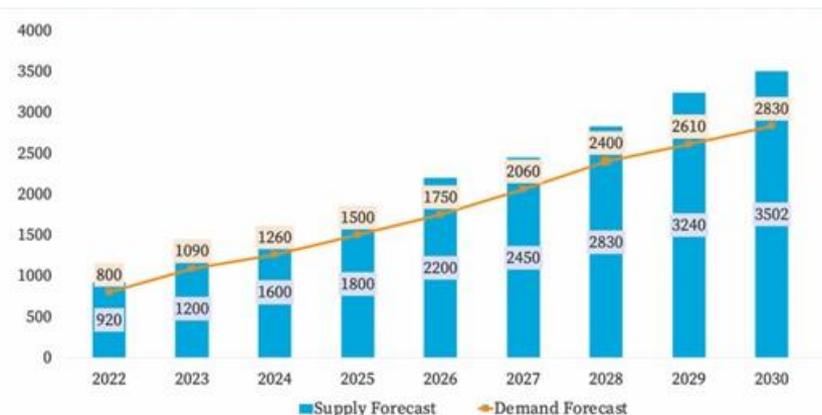
- Nos industriels au début ont pensé que le processus d'arrivée des VE serait lent et ont compté acheter les batteries en Asie, où le centre de gravité s'est centré sur la Chine : BYD, CATL.
- Le réveil est brutal : les Chinois arrivent avec batteries ET voitures, bus.. !
- Alors on lance des usines avec le soutien des États, mais dans le plus grand désordre : pas d'Europe des batteries !
- Dans le Nord de la France, 3 projets : ACC, à partir de la SAFT, Verkor, et Prologium
- Mais c'est l'Allemagne qui a le réveil le plus brutal : 12 gigafactories, production de 435GWh/an prévus en 2030 : de quoi équiper 5 millions de VE par an.
- On table sur 700GWh de production annuelle en 2030 en Europe : 10millions de VE !
- Les investissements sont autour de 5G€ pour 30GWh. Pour VW, un investissement de 120G€ !
- La Commission européenne se demande si on aura accès aux matériaux de base sur lesquels les Chinois ont une forte position.

Où en est la transition mondiale ?

- Pour les batteries, tous les pronostics sont déjoués



Les prévisions de Bloomberg en 2016



Les prévisions début 2023

En 2016, Bloomberg prévoyait une production annuelle de 180GWh en 2022 et de 1600 en 2030. En 2022, on en a produit ~800GWh (dont 520 en Chine) et on table sur ~3000-3500GWh en 2030 : tous les pronostics sont dépassés.

Où est-on ? Où va-t-on ? Peut-on le faire ?

- Il y a ~1.4G véhicules circulant dans le monde, on en a produit 86M en 2022. La question posée en 2016 :



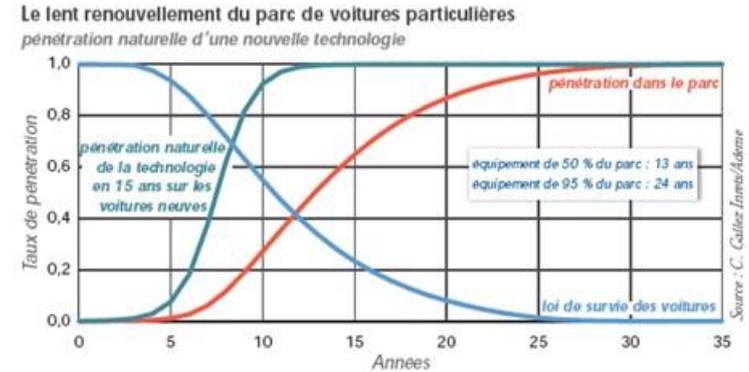
Prévisions Bloomberg en 2016 et réalité:

Les étoiles représentent les valeurs atteintes :

2020 : 5 %, 2021 : 9 %, 2022 : 14 %, 19 % en 2023

En France (2023) : 17 % VE, 9 % de PHEV (hybrides rechargeables). Plus de 1/4 des ventes en 2023

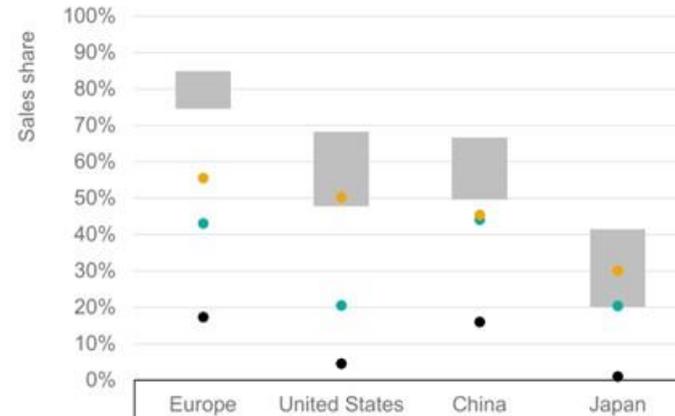
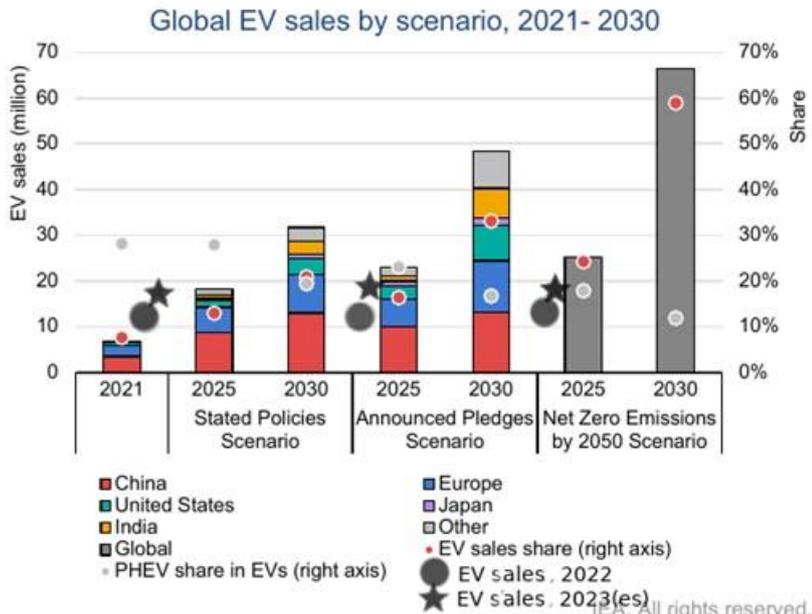
Comment le parc mondial va-t-il évoluer ?



Les courbes ci-dessus essaient de modéliser ce que pourrait être une évolution future : transition des achats en 5 ans, mais le parc basculerait en 20 ans. Peu probable ; si on interdit de produire des voitures thermiques en 2035, on compte plutôt sur une transition des achats en 15 ans.

Les trois scénarios de l'Agence Internationale de l'énergie (AIE)

- L'AIE a retenu 3 scénarios : le SPS, suivant les décisions de pays (lois), le APS, correspondant aux annonces récentes et a rajouté le NZE : zéro émissions en 2050. La figure montre comment cela s'inscrit dans le temps. Les points rouges sont les pourcentages de VE vendus. Sur la figure, on donne les valeurs pour 2021 (9%), et on a rajouté les résultats de 2022 (14%) et de 2023 (18%). On remarque que l'on se rapproche beaucoup du scénario NZE !



Cette figure de l'AIE est intéressante : elle montre l'état du marché en 2021 (points noirs) et les prévisions de vente en 2030 : SPS en bleu et APS en jaune. La zone hachurée correspond aux annonces des constructeurs !

Quels sont les besoins en matériaux ?

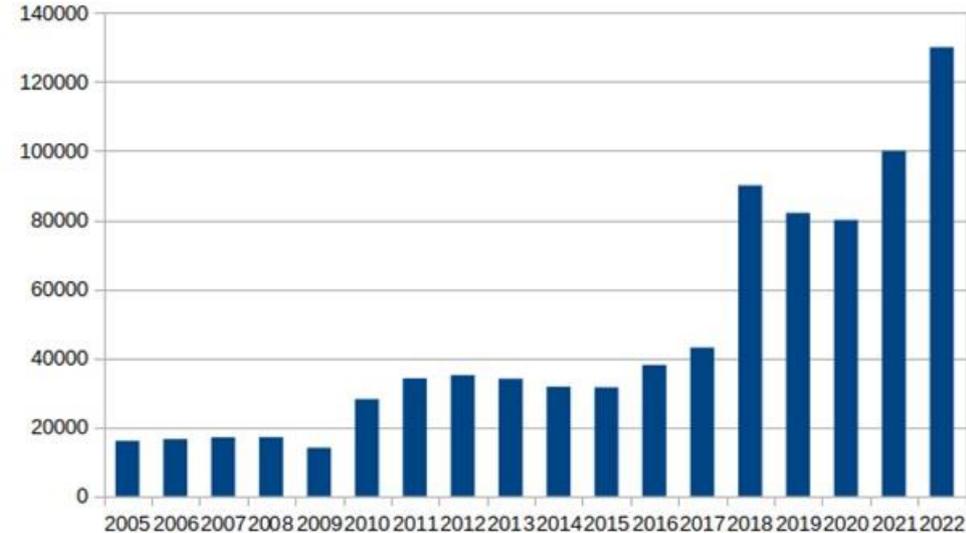
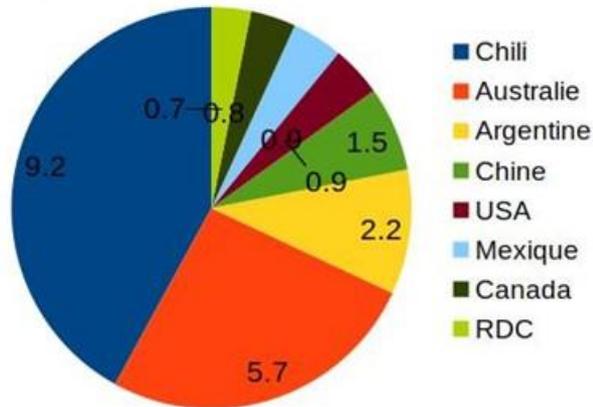
- On peut donner des estimations et les comparer aux ressources. Cela donne des scénarios plus ou moins catastrophistes. Mais on ne sait pas bien ce que sont les ressources : elles sont évolutives, car souvent, quand on cherche, on trouve. On peut comparer les productions actuelles et les besoins estimés dans une année, en supposant que chaque année il faudra produire 100M VE avec 50kWh et se servir des valeurs de la slide 7. On rajoute ~40kg de cuivre en plus pour chaque VE.

kilotonnes	Li	Ni	Co	Mn	Cu
NCA	500	3350	650	0	4000
NMC 111	750	2000	2000	2000	4000
NMC 433	700	2350	1550	1750	4000
NMC 532	700	2950	1050	1150	4000
NMC 622	650	3050	850	1950	4000
NMC 811	550	3550	450	450	4000
LFP	500	0	0	0	4000

Aura-t-on assez de matériaux : Lithium, Cuivre, Cobalt..

Lithium : Le prix du lithium s'est accru fortement, passant de 5500 €/t à 80000 \$/t en Novembre 2022, il est redescendu (Déc 2023) à 14000 \$/t, soient moins de 100 € pour une VEB

Les principales ressources prouvées en Lithium (Mt)



Production annuelle de lithium

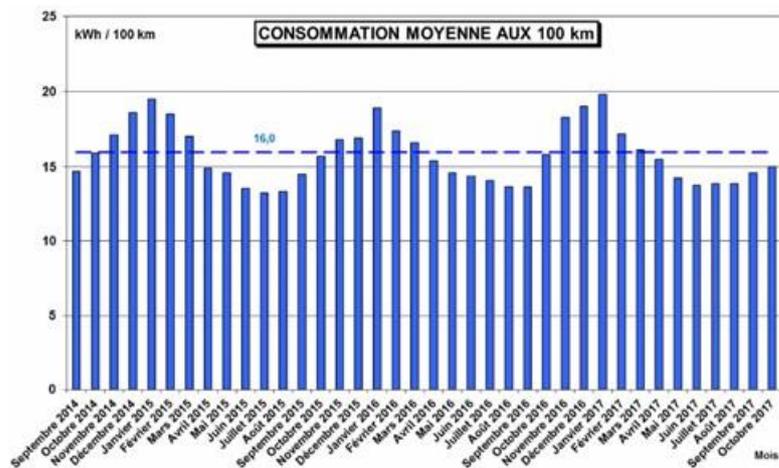
USGS estime les ressources exploitables à 98 Mt. En 17 ans, la production a augmenté d'un facteur 10. On n'a pas de problème à passer à 500,000 tonnes annuelles, mais il faut investir !

Source : <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023.pdf>

Quelques autres besoins des VE

- Le cuivre : 20kg pour voiture thermique, 60kg pour un VE. Cela correspond à 200kg de CO₂. Il faut augmenter production de 4Mt sur 25Mt produites en 2021 (réserves : 890Mt).
- Le Cobalt, sous-produit du nickel. Il est problématique de produire ~500kt/an, et les Chinois contrôlent beaucoup de sources. D'où le retour des LFP (CATL : 160Wh/kg).
- Les terres rares : elles donnent les meilleurs moteurs (brushless) par le rendement, le poids et l'entretien (pas de balais). On a besoin d'aimants de 1-2kg, avec 400g de néodyme (64\$/kg), de 60g de dysprosium (350\$/kg) , 70g de praséodyme (105\$/kg). On ne manque pas de ressources, mais comme leur traitement est difficile à dépolluer, on a laissé le monopole aux Chinois...Par exemple, Renault a préféré pour la Zoe un rotor bobiné et Tesla un rotor à induction essentiellement par peur d'un embargo chinois.
- Le graphite : en 2020, seulement 30 % de la production (77000t) était pour les batteries. Explosion des besoins.. et du prix : +30 %. Besoin de nouvelles mines ou de nouvelles unités de synthèse.
- On peut répondre aux besoins, mais parfois il y a concurrence avec le développement des renouvelables: ils sont très diffus sur le territoire et donc très gourmands en matériaux (cuivre, terres rares...)

Estimer les émissions de CO2 pour une VE : le « carburant »



Trois ans de consommation d'une ZOE :
autour de 16kWh/100km. Les VE plus
récentes, moins lourdes, plus
aérodynamiques et moteur brushless : de
10 à 19kWh/100km suivant trajet

Par comparaison, une voiture essence consomme ~7l/100km,
soit près de 14€. Cela donne 15kg CO2 pour 100km
Le prix de l'électricité a fortement augmenté, avec celui du gaz.
Aujourd'hui, un particulier paye ~250€/MWh, ce qui donne
4€/100km.

Suivant pays, émissions très différentes (d'après electricity
maps, 2021) suivant le mix existant (ci-dessous):

Pays	Fra.	All.	Esp.	Suède	Polog.	Chine
kgCO ₂ /MWh	61	439	205	25	819	560
kgCO ₂ /100km	0.98	7.0	3.3	0.4	13.1	9.0

Solutions avec peu de batteries ?

Hybrides rechargeables?

Autoroutes électriques ?

Hybrides rechargeables ?

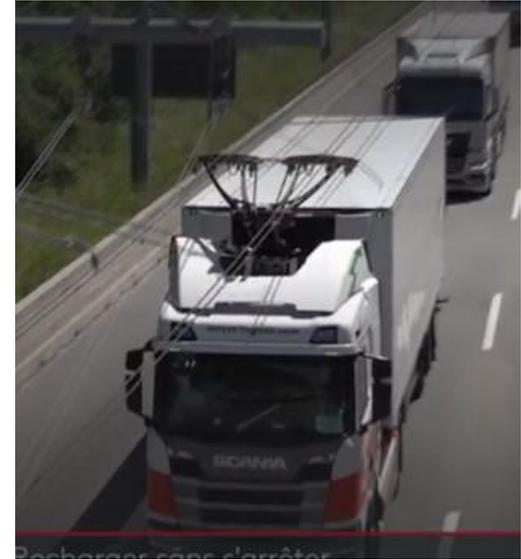
A peu près 1/3 des « voitures électriques » vendues sont des hybrides rechargeables, avec batteries de 9-13kWh et moteur thermique. Les deux moteurs sont montés en parallèle sur les roues (le moteur thermique ne sert pas qu'à charger la batterie). Autonomie électrique ~50km. Consommation fortement dépendante de l'usage : il faudrait la recharger toutes les nuits.

Le résultat mitigé a conduit à une diminution des aides, et l'interdiction européenne des moteurs thermiques en 2035 les condamne à long terme.

Dans les deux cas, l'avenir est dépendant du prix et de la disponibilité des batteries, du coût de l'installation des bornes de recharge et de celui des électrifications

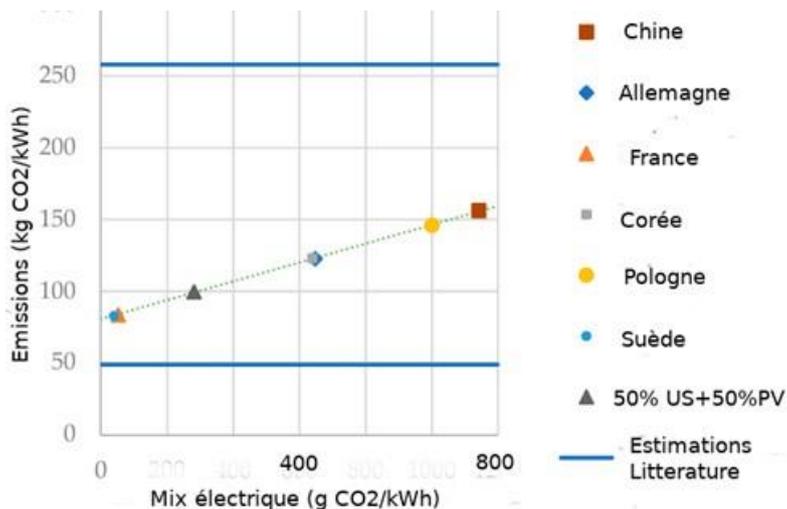
Autoroutes électriques ?

But : recharger les VE et diminuer la taille des batteries et l'autonomie électrique nécessaire. 2 techniques testées:
-en France (A10, près de Paris), rail ou induction depuis le sol
-en Allemagne (5km près de Francfort..) : pantographes pour poids lourds. (Photo ci-contre)

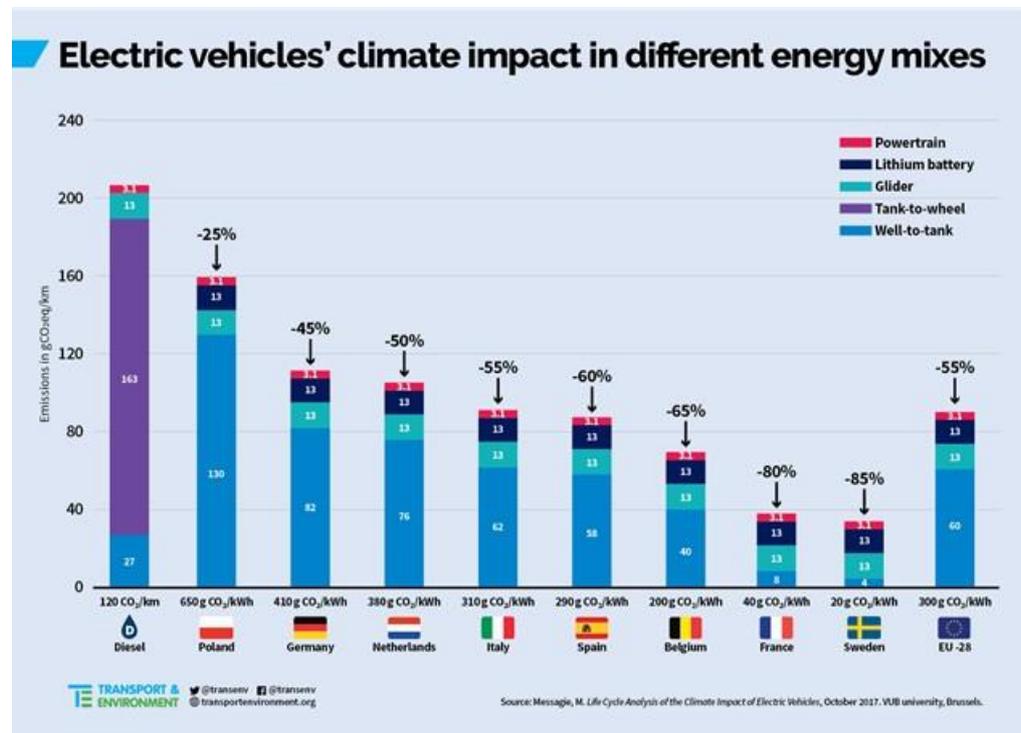


Les émissions de CO2 pour la VE : La fabrication

- Le principal concerne la batterie. Les émissions de la fabrication ont beaucoup diminué et, comme elles incorporent beaucoup d'électricité, elles dépendent du mix du pays qui les produit, comme montré sur cette figure, assez ancienne

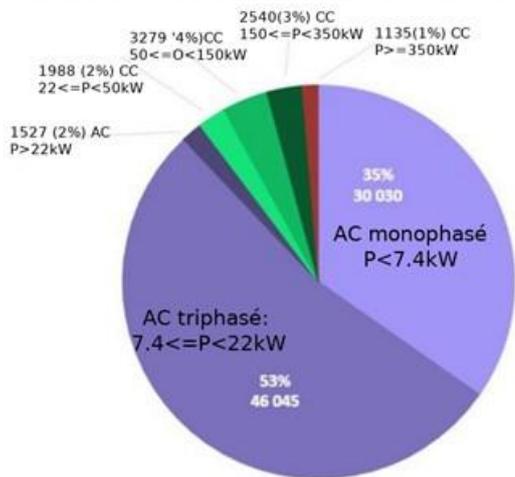
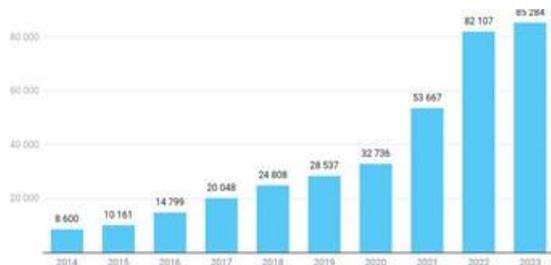


En 2022, les estimations (Suède) donnent 45kgCO2/kWh, ce qui donne pour un VE de 50kWh, autour de 2.25 t CO2/VE. On peut donner une figure du résultat en émissions de CO2/km :



L'infrastructure de charge : les publiques

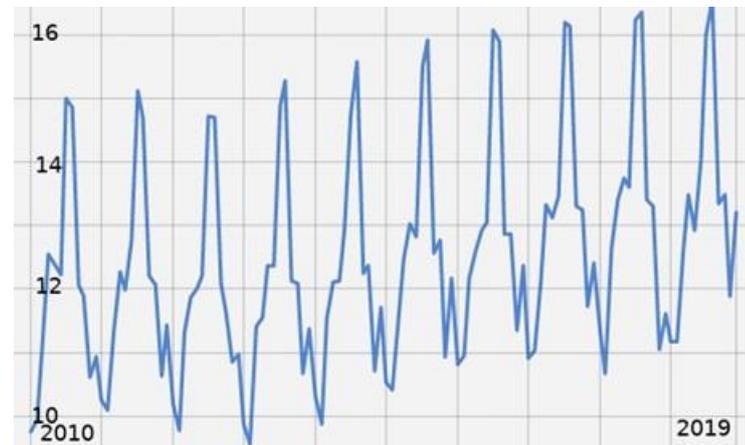
- En France, on a atteint 100000 points de recharge. Mais souvent de puissance limitée. Quid de la charge rapide ?



Ventilation des divers types de chargeurs

Les « migrations » sur autoroute : plus de 5000 voitures par heure. Si on estime que sur autoroute, un VE consomme $20\text{kWh}/100\text{km}$, il faut installer une puissance de $1\text{MW}/\text{km}$. Si on a une station tous les $\sim 30\text{km}$, il faut 200 bornes de 150kW à chaque station. En ce cas, les VE se chargent en 10-20 minutes : le temps de prendre un café. Il faut comprendre que les autoroutes ont un trafic qui ne se limite pas aux pointes, comme montré sur la figure :

Les variations saisonnières du trafic autoroutier (unités arbitraires)



Prévisions en Europe de l'infrastructure de charge

- Il existe une étude européenne qui a essayé de chiffrer les besoins pour 2030, avec l'hypothèse de 20 % du parc automobile électrifié.

Puissance (kW)	>=350kW	150kW	100kW	50kW	25kW	4-22kW
Nombre de points de recharge (millions)	0.2	0.4	0.3	2.4	36	40
Coût total (G€)	23	30	17	13	36	52
Coût par kW (€)	250	400	450	520	558	125

Cette étude pose un grave problème déontologique : on y admet que toute l'énergie sera renouvelable (éolien, solaire), le nucléaire est exclu et tous les détails ne concernent que l'Allemagne.

Il reflète le grave problème des institutions européennes : elles semblent être uniquement concernées par les intérêts de l'Allemagne. C'est très grave pour l'avenir de l'Europe !

Ici, >= 350kW, ce sont les poids lourds. Les bornes de 100-150kW sont les bornes de charge rapide. S'il faut 1MW/km dans une direction, le coût sera de 400,000*2 €/km, de 1/5 à 1/10 du prix de l'autoroute.

Le rapport estime le coût annuel jusque 2030 de toutes les installations publiques en Europe à 8G€, alors que la 5G coûterait 45 G€ annuels

On peut s'inquiéter de notre retard

Carlos Tavarès, PDG de Stellantis....

« Nous avons choisi de privilégier les véhicules qui font le plus de marge au détriment des autres. C'est le meilleur moyen de protéger l'entreprise »

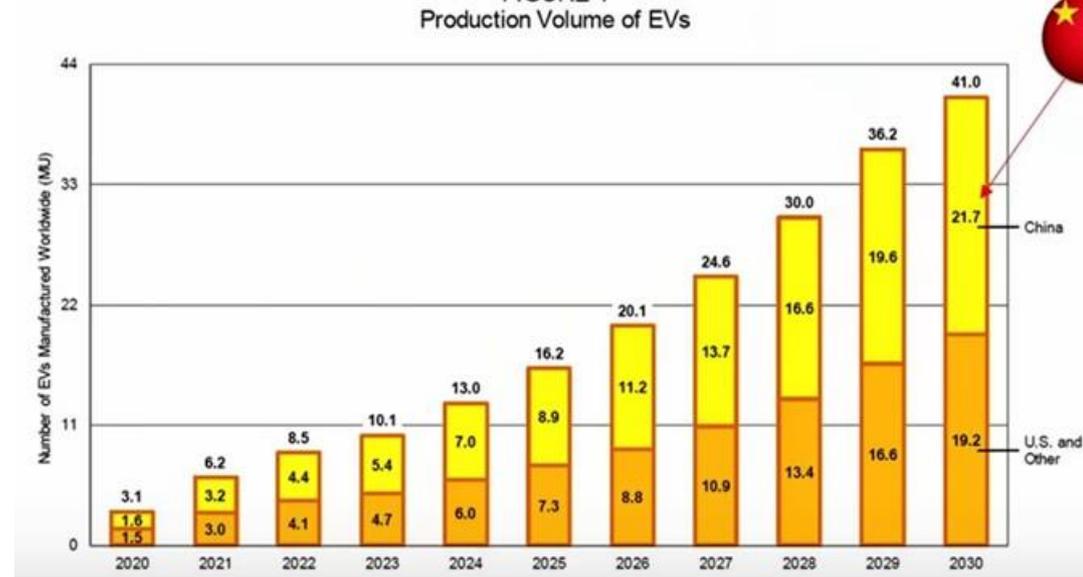
« Nous pourrions supporter une baisse de 60 % de nos volumes et être encore rentables »

Bruno Le Maire souhaite que Stellantis relocalise sa production de petits véhicules électriques, appelle les industriels à faire preuve de "patriotisme économique".

Tavarès : "L'industrie doit passer d'une technologie qui a été optimisée, affûtée, pendant plus d'un siècle à une technologie encore balbutiante. (...) la technologie n'est pas aboutie. Rien n'est optimisé »

"Je partage le constat sur le fait que l'Europe a pris cinq à dix de retard sur les véhicules électriques", a répondu Bruno Le Maire sur RMC et BFMTV

Et pendant ce temps, les Chinois s'envolent...



Les transports « lourds » : l'hydrogène ?



Initialement, on a annoncé les voitures hydrogène (la Mirai ci-dessus). Fin 2022, seulement 75,000 VH2. Plus que 2 constructeurs : Toyota et Hyundai. En 2023, effondrement des ventes partout.

3 raisons « tuent » l'hydrogène :

- Les véhicules H2 sont plus chers que les VEB
 - Il faut souvent remplacer les piles à combustibles
 - Il faut trois fois plus d'électricité pour fonctionner
- Enfin, les stations hydrogène sont chères

Il a été dit que l'hydrogène se centrerait sur les transports lourds longue distance. Mais l'installation de bornes autoroute de ~1MW pour les charges rapides de poids lourds/autocars en 1/2 heure va rendre l'hydrogène sans intérêt.

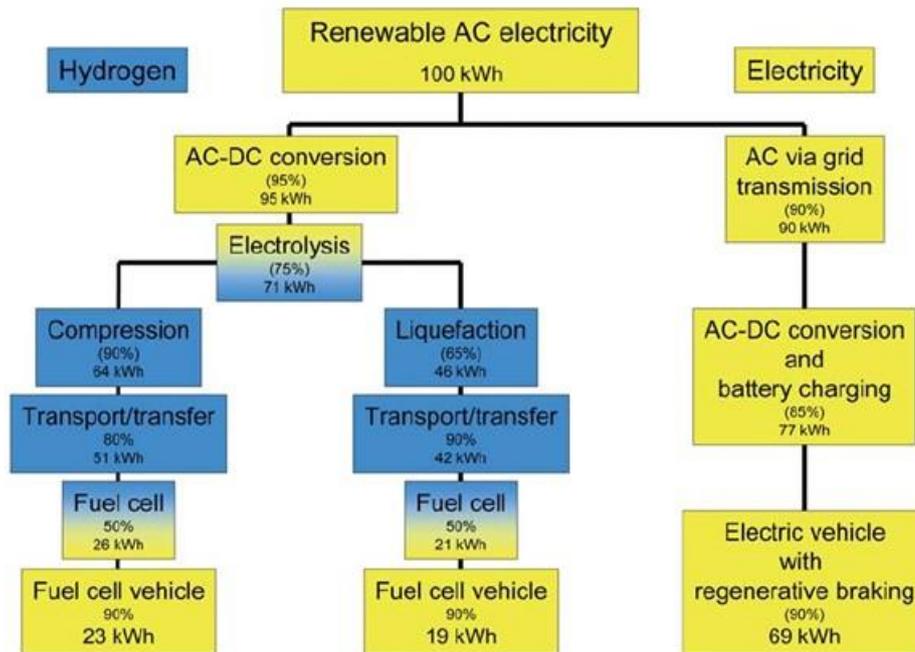


Diagramme dû à Bossel (ETH Zurich) : il faut 3 fois plus d'électricité avec hydrogène+électrolyse

L'électrification de tous les transports terrestres

En France, on annonce 880 bus hydrogène pour 2026-2030 (safran, solaris, Van hool, Renault, Caetano). Raison : subventionnement. Mais p. ex. Montpellier et Pau se sont convaincus que ces bus leur coûteraient trop cher en électricité (électrolyse).

Les collectivités achètent autour de 1800 bus/an. Jusque récemment, seuls les bus au gaz ont été en croissance : raison : le lobby gazier, qui maintenant fait la promotion de de l'hydrogène.

- Pour les poids lourds, Tesla livre en fin 2022 (encore lui, mais il n'est pas seul) des semi-remorques de 37 tonnes jusqu'à 800km d'autonomie au prix de 180000\$ (avec 3 ans de retard)

Même problème pour les trains : Alstom a racheté «Coradia », et propose des TER hydrogène sur les lignes non électrifiées. Mais pas mal de régions préfèrent les hybrides électriques (Bade-Wurtemberg, Basse Saxe)



Enfin, on discute de l'électrification des transports maritimes : plus de 10000tonnes de batteries pour un « panamax » qui traverserait l'océan !
Lire :

<https://www-nature-com.sid2nomade-2.grenet.fr/articles/s41560-022-01065-y>

Le fiasco annoncé des bus hydrogène

- Les bus hydrogène vont être un splendide fiasco sous l'effet de subventionnements non justifiés. En Allemagne on annonçait 900 BH2 en 2030, mais 7000 avec batteries. Wiesbaden annonce qu'il se débarrasse de ses bus H2...
- Subventions :
- 1M€ par Bus hydrogène avec accessoires.
- 1G€ jeté par la fenêtre

Pendant ce temps là, la Chine s'équipe en bus électriques..Les 17000 bus de Shenzhen sont électriques depuis 2017 !

Pourquoi ?

- 1-On ne veut pas acheter chinois (BYD !)
 - 2-Les Allemands imaginent H2 hydrocarbure sans carbone pour remplacer fossiles et qui permettrait de pallier les intermittences des renouvelables :
- L'ILLUSION HYDROGENE !



Les motorisations des bus urbains en Chine : en bleu les diesels, en orange, le gaz et en vert les bus électriques. A droite, le pourcentage.

La vraie question: aura-t-on assez d'électricité ?

- Il faut estimer les besoins en électricité au global (production moyenne) et au local (la production instantanée, pilotable), et mettre tout cela en rapport avec les besoins prévisibles de la décarbonation du pays

	Émissions (t CO2)	Consommation fossiles	Électricité à produire
VP+utilitaires	96Mt (2019)	30Mt pétrole	109TWh
Poids lourds-Bus	30Mt (2019)	10Mt pétrole	45TWh
Electr-Chaleur	19Mt (2020)	95TWh gaz	Décarboner
Resid. Tertiaire	74Mt (2020)	239TWh gaz+9Mt pétrole	120TWh (? avec ligne ci-dessus)
Produc. 900kt H2	9Mt (avec méthane)	50TWh gaz	50TWh (électrolyse)
Total émissions « évitables »	228Mt	40Mt pétrole + 384TWh gaz (évitées)	324TWh (à produire en plus)
Situation actuelle	303Mt	60Mt pétrole + 474TWh de gaz	~510TWh (produite 2020)
Situation « post-transition »	75Mt : il reste du boulot !	10Mt pétrole + 120TWh gaz (avions, navires, chimie, industrie)	~834TWh

Conclusion d'un scientifique-ingénieur

- On peut s'affranchir essentiellement des combustibles fossiles : électrifier !
- Mais il faut produire plus d'électricité, décarbonée et pilotable !
- Mettre en avant les progrès scientifiques et techniques pour maîtriser le problème du réchauffement climatique vous vaut le qualificatif de « technosolutionnisme », voire de « complice des climatosceptiques » par le « courant écolo »

Une telle révolution entre 1900 et 1913 a New York

1900

New York
5ème Avenue

La voiture de
la photo est là



En 13 ans, les voitures essence ont fait disparaître les voitures à cheval dans les rues de New York, alors qu'on craignait de crouler sous le crottin !

1913

New YORK,
5ème Avenue

Le cheval de
la photo est là



Quand une innovation s'impose c'est une révolution : avions contre transatlantiques, charbon de terre contre charbon de bois en métallurgie...

Quelques références

- Sur les batteries : <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023/trends-in-batteries>
- Les excellentes études de l'AIE :
- <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020>
- <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>
- <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022>
- <https://iea.blob.core.windows.net/assets/dacf14d2-eabc-498a-8263-9f97fd5dc327/GEVO2023.pdf>
- Les études de « sauvons le climat » :
- <https://www.sauvonsleclimat.org/fr/>
- Si on aime les controverses et qu'on veut exercer son esprit critique, googliser :
- « pourquoi la voiture électrique s'impose? »....

Frederic.livet@simap.grenoble-inp.fr