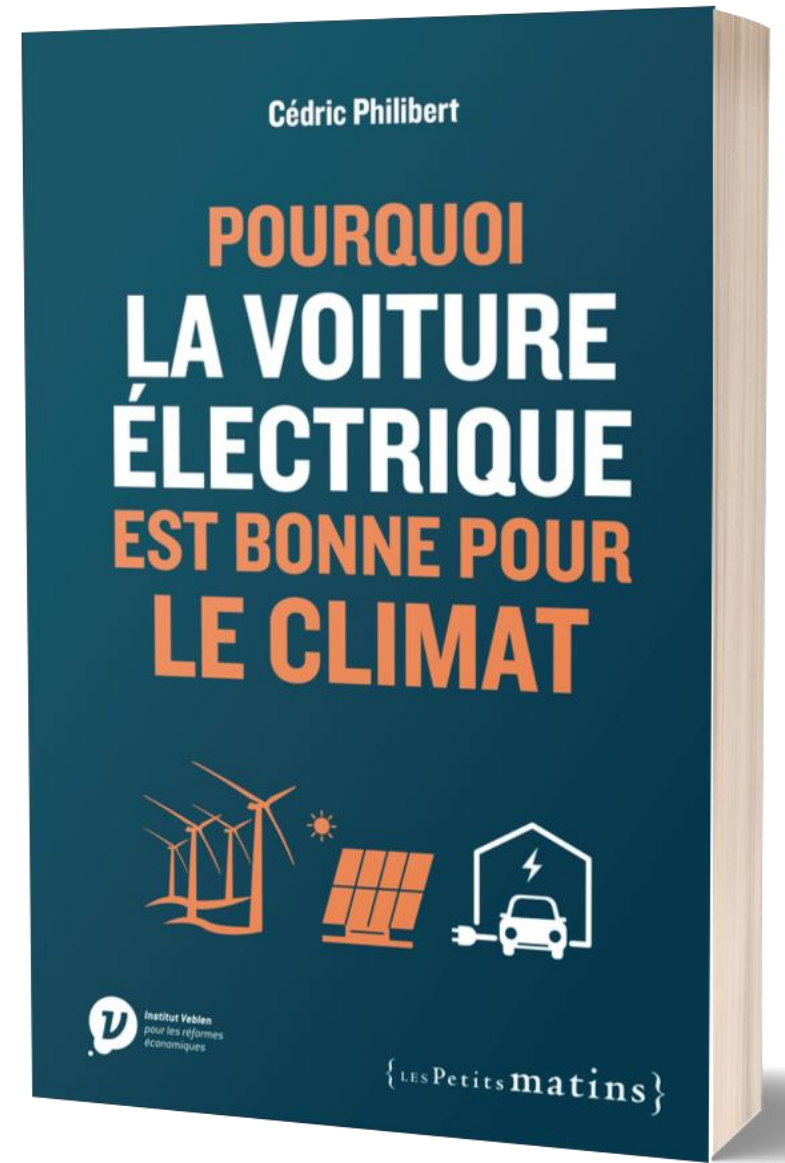


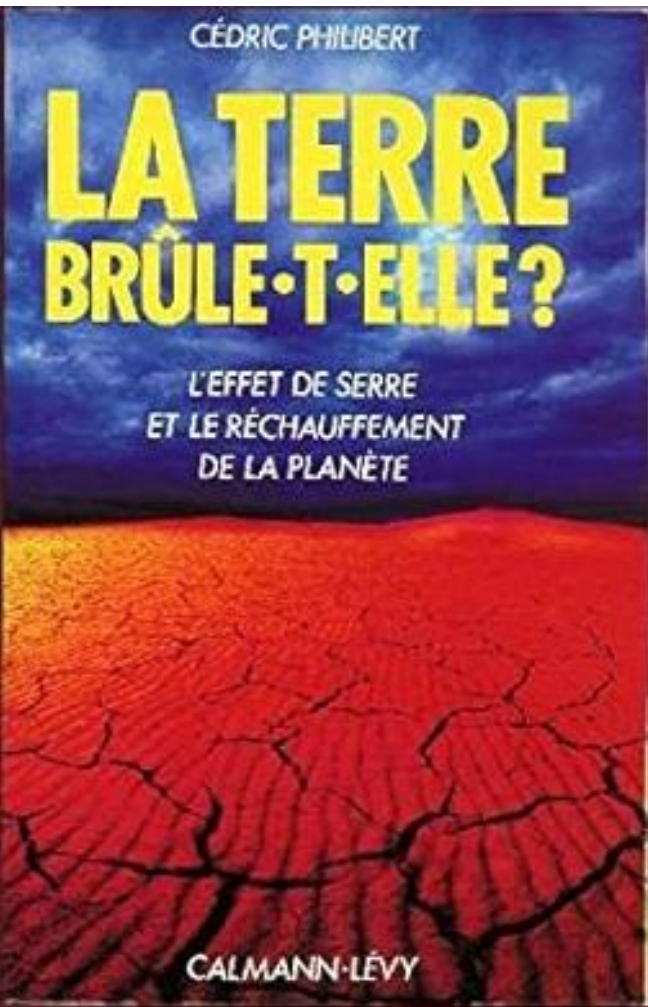


Pourquoi la voiture électrique est bonne pour le climat

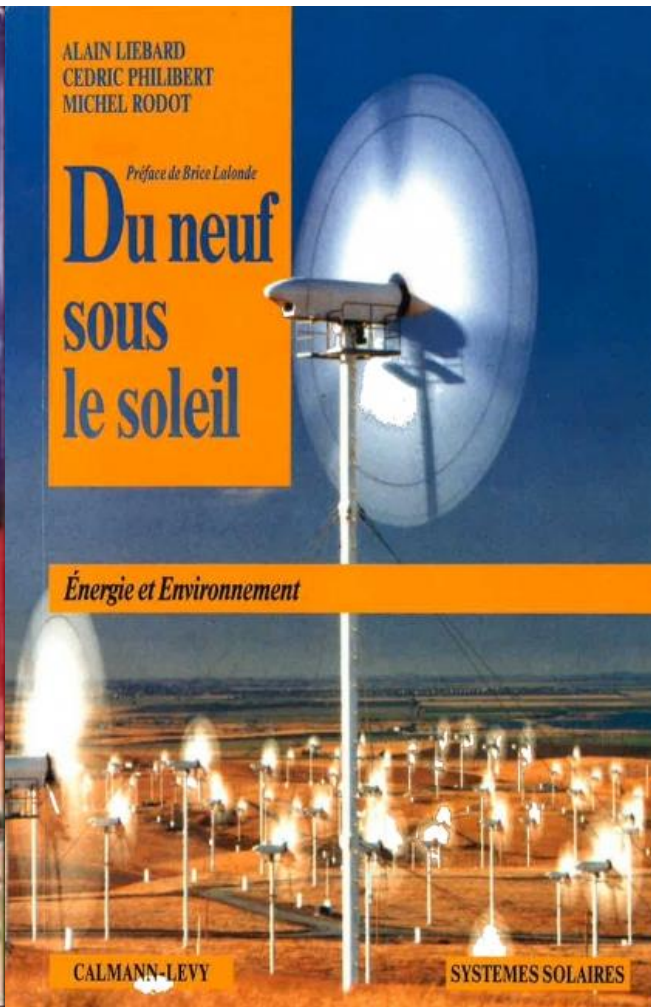
Cédric Philibert



Précédemment...

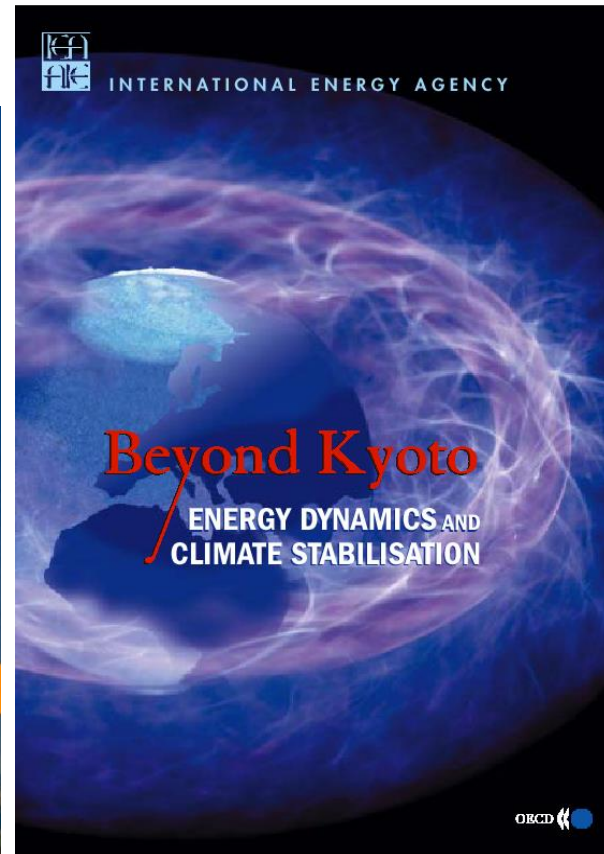


1990

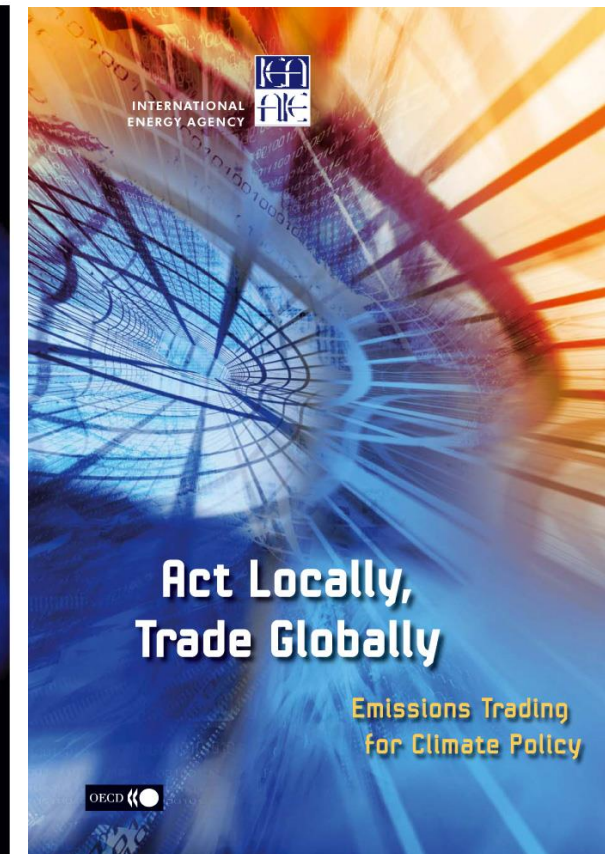


1990

2002



2005



2009

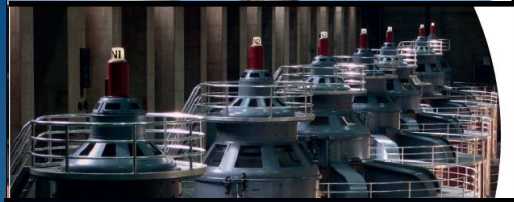
PRICE CAPS AND PRICE FLOORS
IN CLIMATE POLICY

A Quantitative Assessment

IEA INFORMATION PAPER
including a French version of the Executive Summary

Solar Energy Perspectives

2011



Technology Roadmap Solar Photovoltaic Energy

2014 edition

Renewable Energy for Industry

From green energy to green materials and fuels

Cédric Philibert

2017

INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY XXX (XXXX) XXX

2023

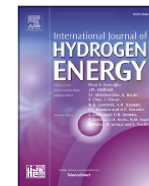


ELSEVIER

Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

journal homepage: www.elsevier.com/locate/he



Flexible production of green hydrogen and ammonia from variable solar and wind energy: Case study of Chile and Argentina

2020

Julien Armijo ^{a,*}, Cédric Philibert ^b

^a Centro de Investigación en Recursos Naturales y Sustentabilidad, Universidad Bernardo O'Higgins, Santiago, Chile

^b International Energy Agency, OECD, Paris, France

Au sommaire

INTRODUCTION. TIRS CROISÉS

1. QUI AURAIT PU PRÉDIRE ?

Les habits neufs des climatosceptiques
Il n'est jamais trop tard

2. « J'ADORE LA BAGNOLE »

« Ça pue et ça pollue »
Le dieselgate

Zones à faibles émissions ou à forte exclusion ?
On n'a pas de pétrole

3. UN MONDE SANS VOITURES ?

Trop de voitures tuent la voiture
Dix fois plus vite, dix fois plus loin
Un désir nommé tramway
Vive la vélorution !
Le train-train quotidien

4. UN LI-ION DANS VOTRE MOTEUR

General Motors: Impact avec le diable
L'hybride sur le coup
La révolution du lithium
Tesla, l'électro chic

Le poids, un argument qui ne pèse pas des masses
Le feu aux médias
La « wature », trois fois plus efficace
L'éventail des batteries modernes
La batterie en danger, sauvée par la Na-ion ?
Un monde sans bornes

5. LES ROUTIERS SONT SYMPAS

Un monde sans camions ?
Inefficaces biocarburants
NégaWatt met les gaz
La bulle hydrogène
Le camion électrique: watt else ?

6. À CHARGE ET À DÉCHARGE

L'énergie de l'espoir
Les watts qu'elles préfèrent
L'électrification des mines et des usines

7. MÉTAUX, C'EST TROP !

Une croissance infinie dans un monde fini ?
L'âge du cuivre
L'énergie de la mine
Une géologue des terres minées
Nickel chrome
Le triangle du lithium
Les enfants du cobalt
Mines de mines
Boucler la boucle

8. DÉSESPÉRER BILLANCOURT

L'électro-chèque
La stratégie de la Chine
L'Allemagne fait volt farce
Un électrochoc mondial

9. LES TRANSPORTS EXTRATERRESTRES

Démondialisation ?
L'assistance éolienne
L'ammoniac, « l'autre hydrogène »
L'avion transporte surtout du carburant
L'avion à hydrogène arrivera trop tard
SAF qui peut !
Quoi qu'il en coûte

CONCLUSION. L'INÉLUCTABLE ÉLECTRIFICATION

Christian Gerondeau

La voiture
électrique
et autres folies
La religion écologiste 3



**L'AVEU IMPLICITE
D'ELON MUSK**

L'ARTILLEUR

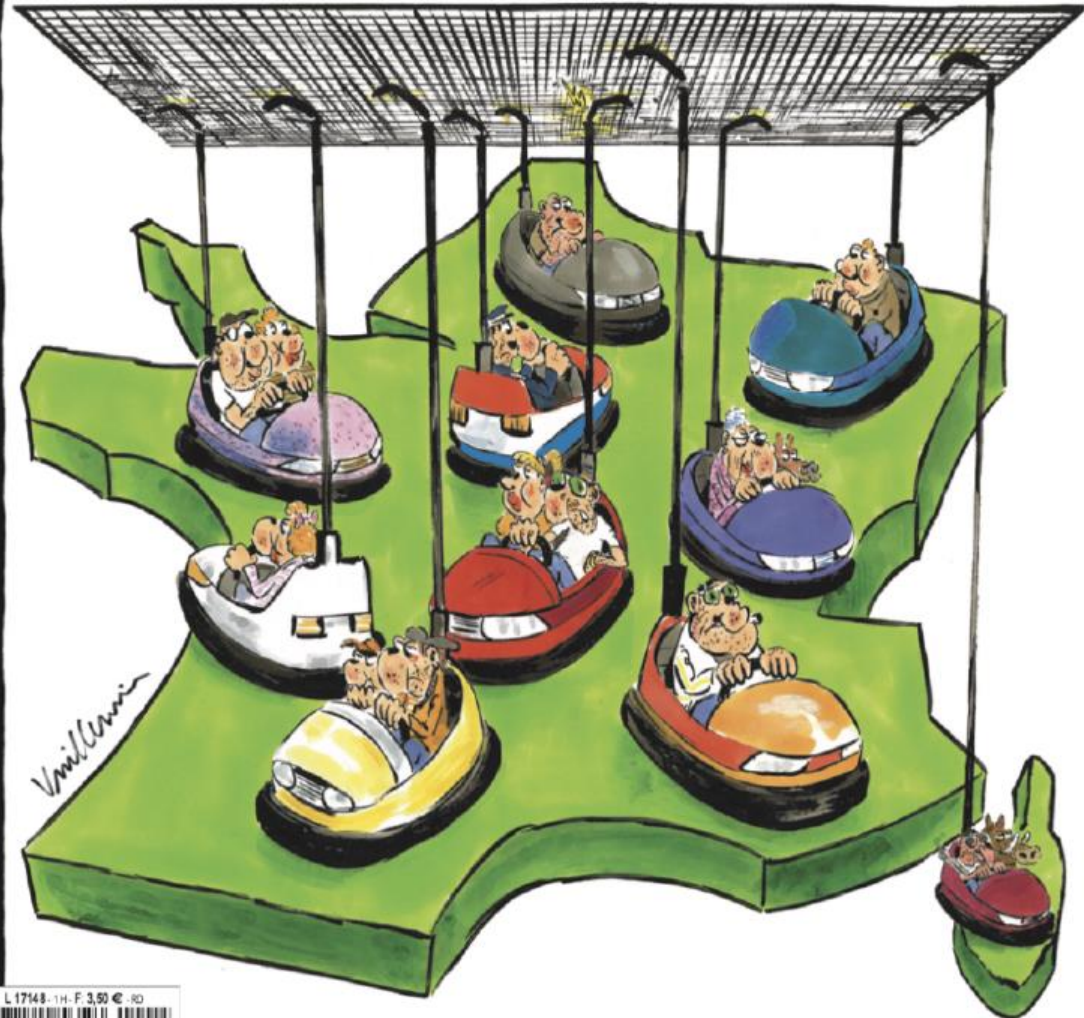
Tirs croisés

CHARLIE HEBDO

N° 114 / 1^{er} JUIN 2022 / 3,50 €

VOITURE ÉLECTRIQUE

dernière arnaque avant l'apocalypse



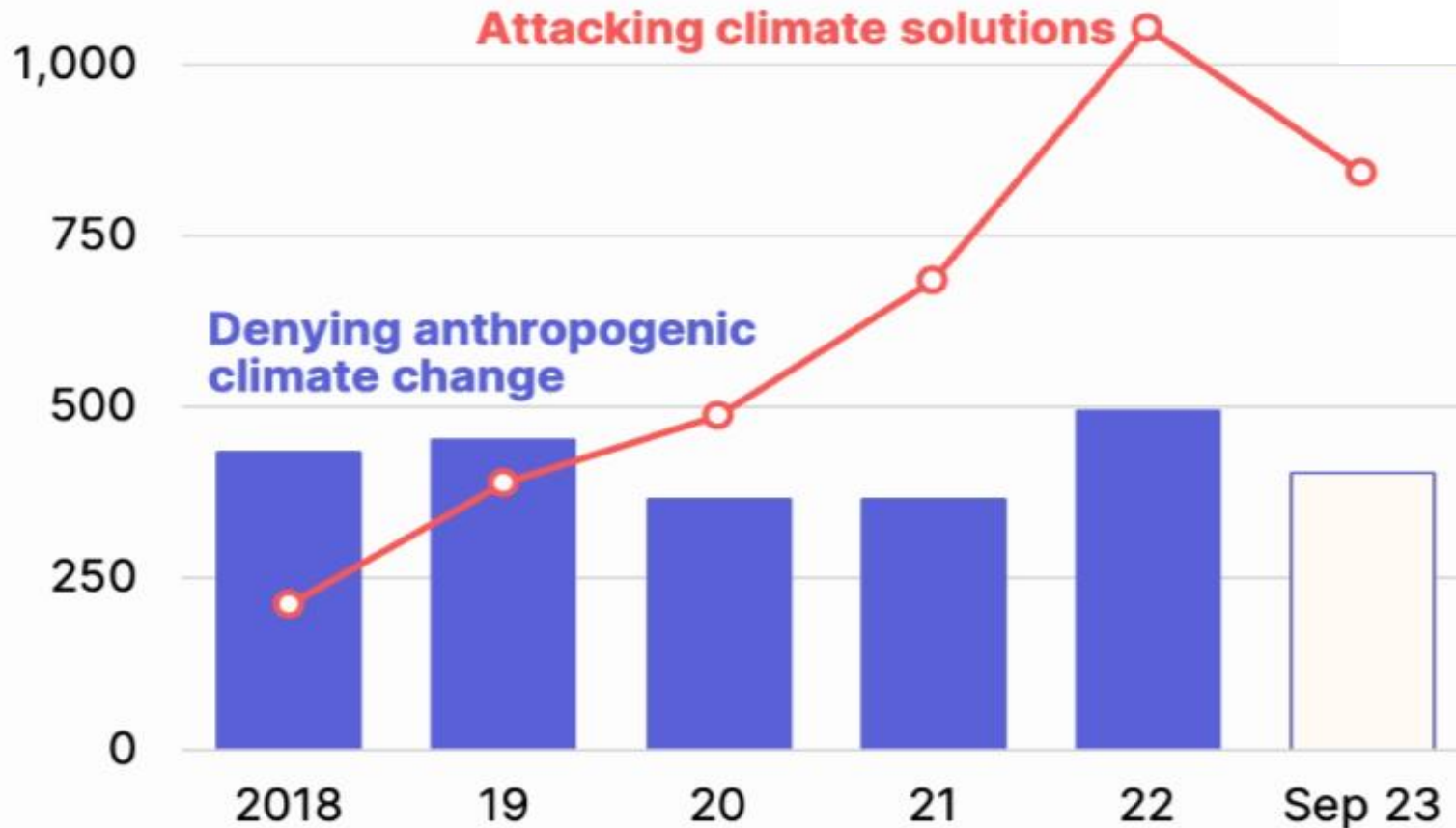
L 17148-1H-F 3,50 € - RD



1. « Qui aurait pu prédire »

Dans ce premier chapitre, je note que le changement climatique est devenu une évidence. Les lobbies des fossiles ne se risquent plus trop à le nier, en Europe du moins, par contre ils ne cessent d'attaquer les solutions sous les prétextes les plus divers, mais assez souvent « écologiques ». Après les éoliennes, les véhicules électriques...

Sur Youtube, plutôt que nier le changement climatique, on attaque les solutions



January 2024

Source:
Center for
Countering
Hate, YouTube,
Bloomberg

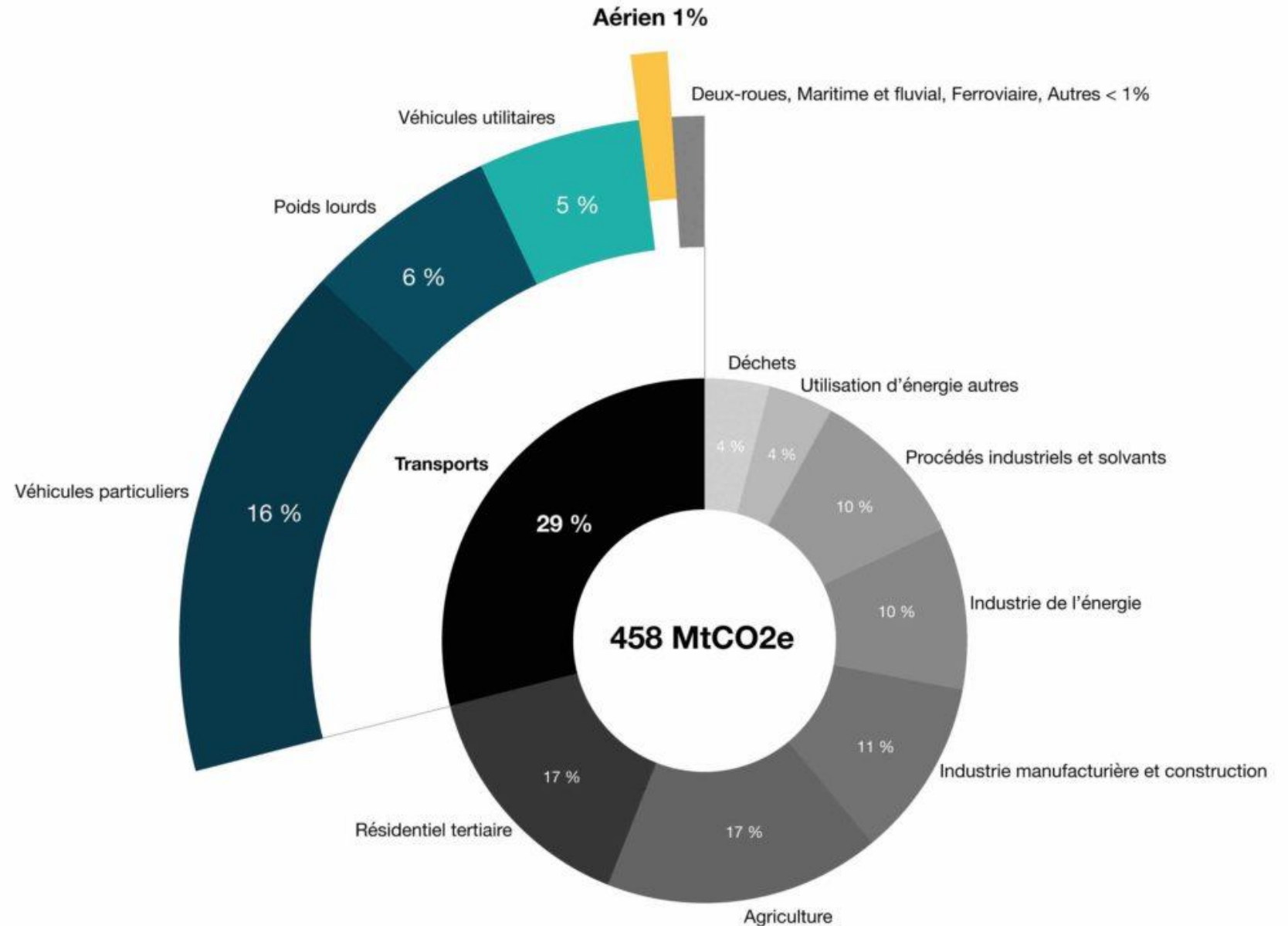
Note:
96 YouTube
channels in
study



NAT BULLARD

2. « J'adore la bagnole »

Dans le deuxième chapitre, je fais le constat que les émissions de gaz à effet de serre des transports représentent une large fraction des émissions « territoriales » de la France, de l'Europe et du Monde. Ces émissions ne cessent d'augmenter. Et il ne faut pas oublier le rôle des transports dans la pollution « classique » par les oxydes d'azote, les particules, les composés organiques...



3. Un monde sans voitures?

Dans le troisième chapitre, je discute des possibilités – et limites – de la sobriété. Bien sûr il faut continuer de développer les transports en commun, la pratique du vélo, le train... Mais nous devons éliminer les émissions des voitures, or nous ne pourrions pas éliminer les voitures, qui restent indispensables, notamment dans le périurbain et l'espace rural. En réalité, la mesure de sobriété qui aurait le plus d'effet immédiat, ce serait la limitation de la vitesse sur les autoroutes.

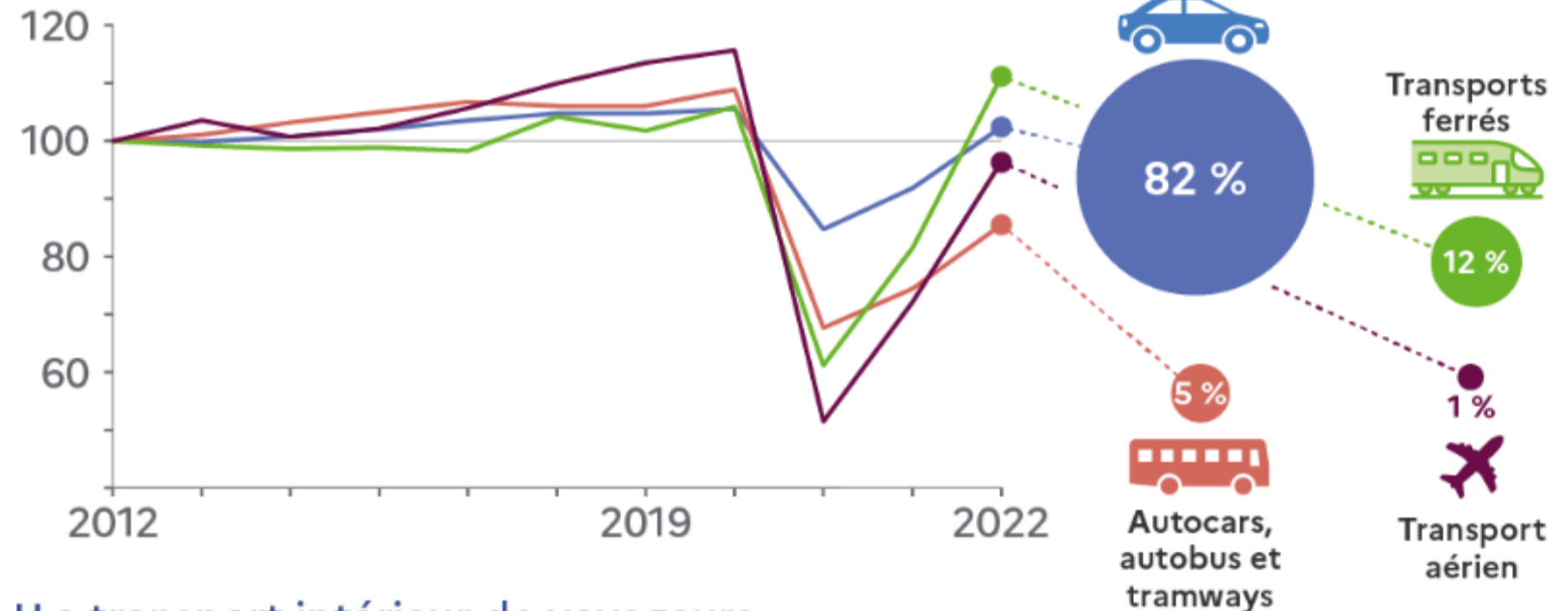


Transport intérieur de voyageurs

999,7 milliards de voyageurs-kilomètres

Correspond au transport d'un voyageur sur 1 km

Indice base 100 en 2012

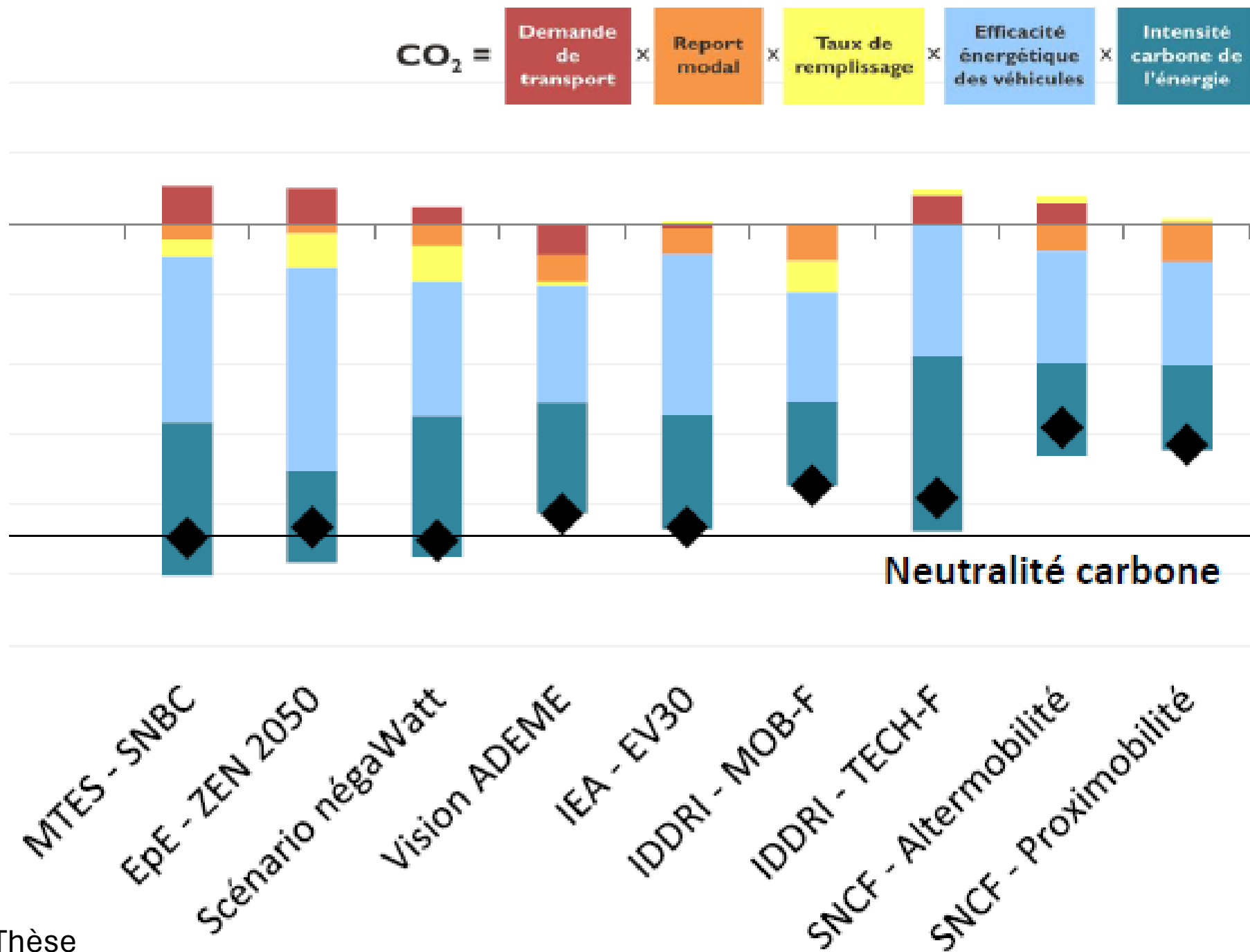


Le transport intérieur de voyageurs confirme sa reprise en 2022 et se rapproche de son niveau d'avant-crise.

NB: le chiffre du transport aérien ne reflète que sa part dans le transport intérieur

La sobriété ne suffit pas

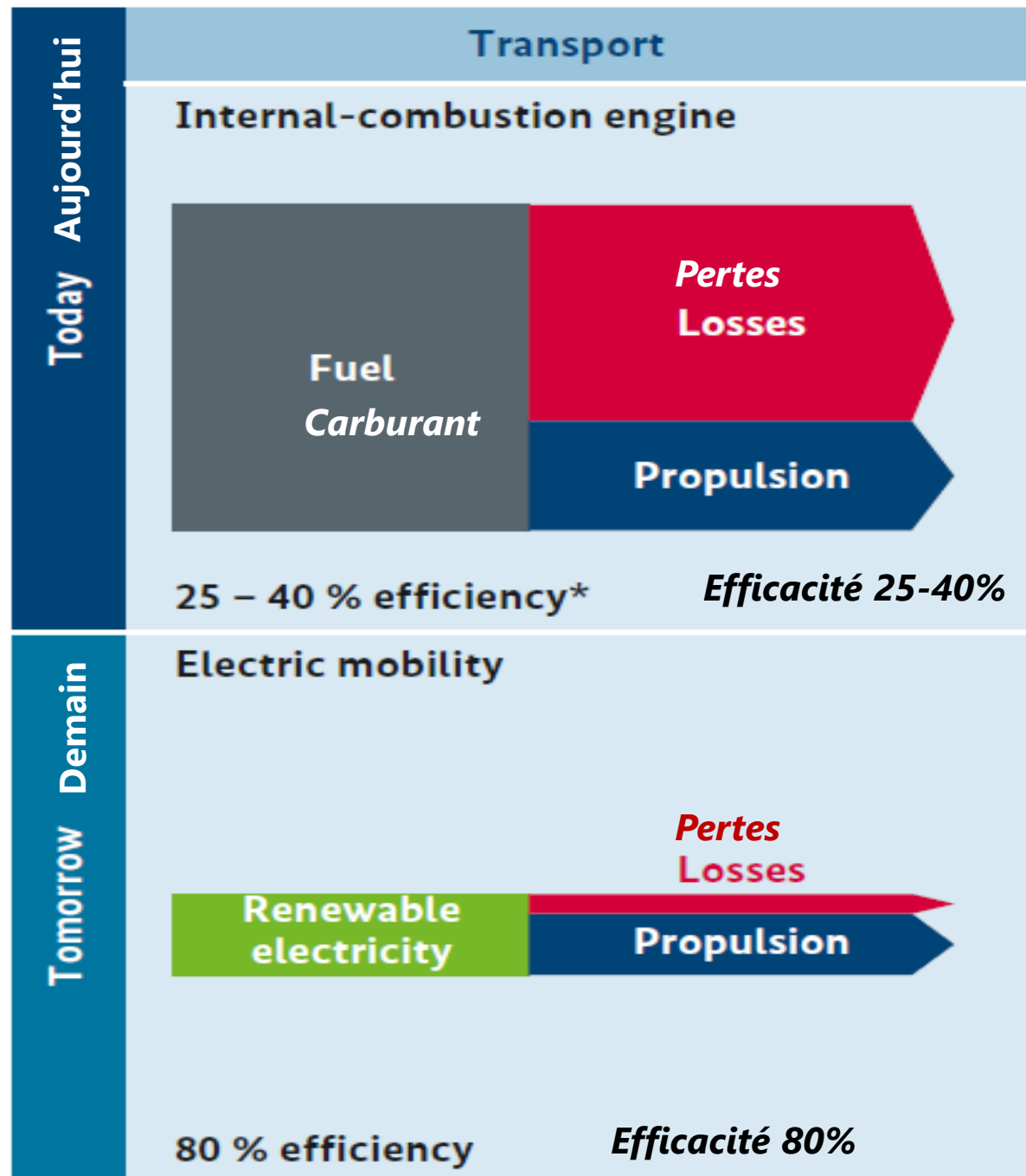
Dans tous les scénarios, l'efficacité énergétique et l'intensité carbone de l'énergie compte davantage que le report modal et le taux de remplissage - pour les passagers...



L'électrification source d'importantes économies d'énergie dans les transports

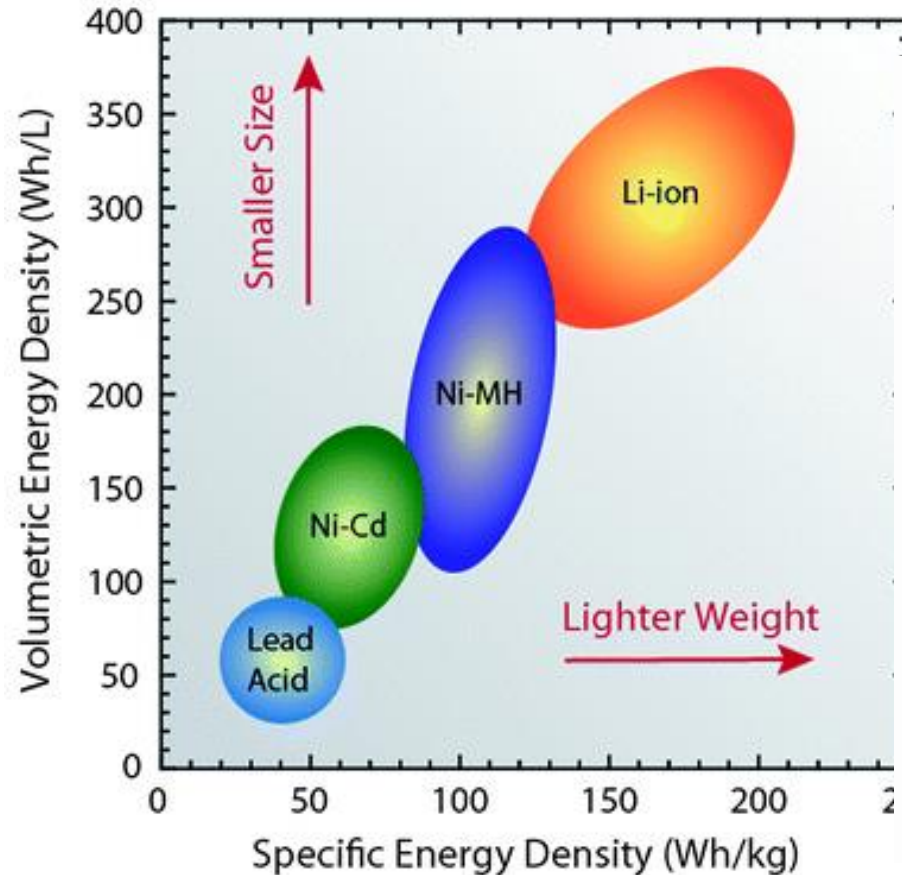
*Dans d'autres applications (ex : transport maritime, groupes électrogènes), l'efficacité des moteurs à combustion interne peut dépasser 50 %.

Adapté du ministère fédéral de l'Economie et de l'Energie, 2015, *An electricity market for Germany's energy transition, White Paper.*

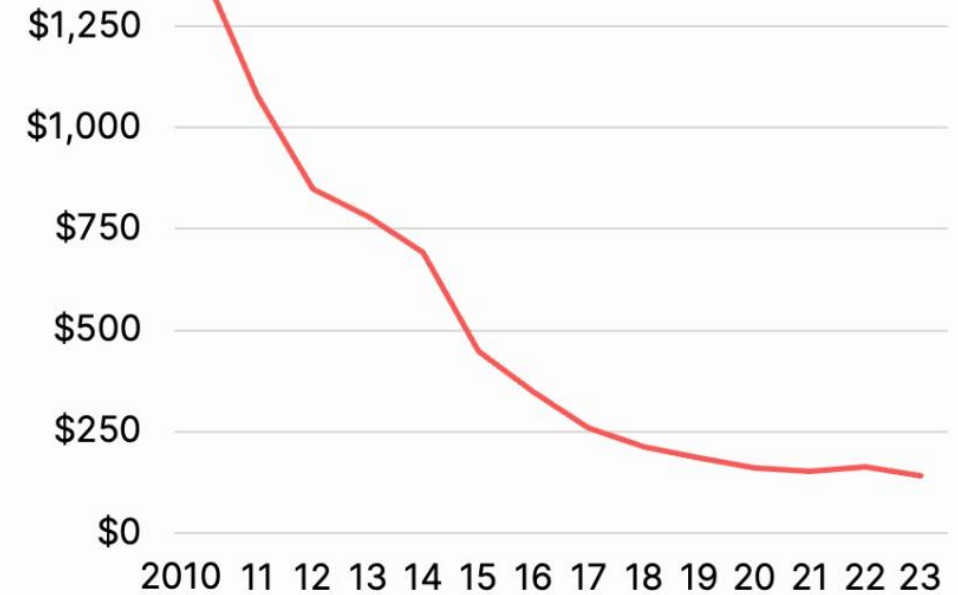


4. Un li-ion dans votre moteur

Dans ce chapitre, je retrace l'histoire déjà ancienne du véhicule électrique. Je montre comment l'arrivée des batteries lithium-ion, l'amélioration continue de leurs performances et la baisse rapide et forte de leur coût, ont changé la donne.



\$1,500 per kilowatt-hour, real 2023 \$

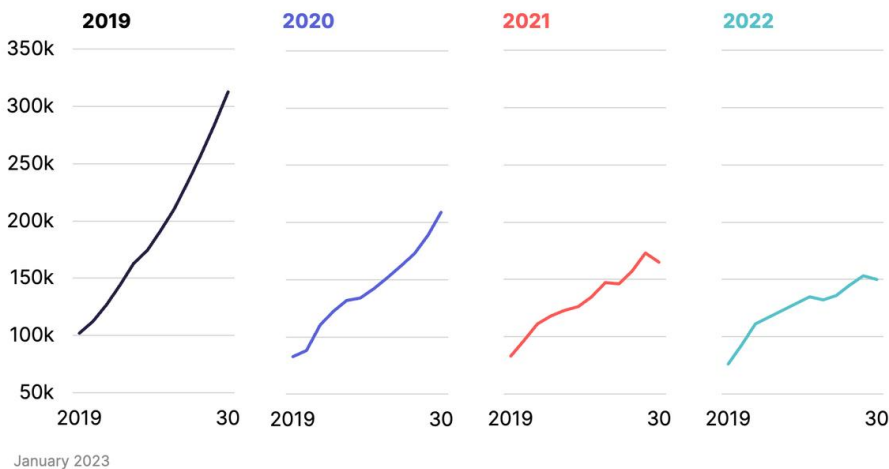


January 2024

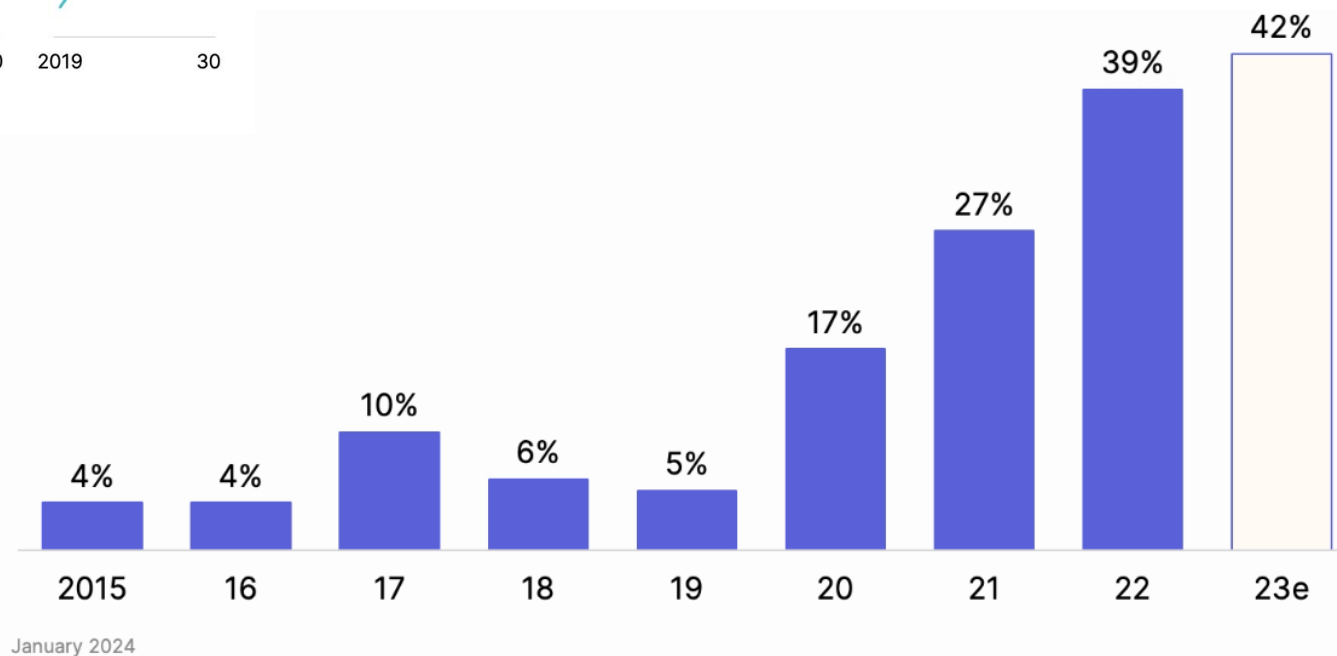
Source: EPEC

En 4 ans, la prévision de demande pour le cobalt en 2030 a été réduite de moitié...

L'évolution technique des batteries est loin d'être terminée. Par exemple, elles contiennent de moins en moins de cobalt. De nouvelles « chimies » font leur apparition, qui ne contiennent plus de cobalt ou de nickel. Et peut-être les batteries au sodium permettront-elles de se passer du lithium.



... et les batteries lithium-fer-phosphate sans nickel ni cobalt et représentent plus de 40% du marché



5. Les routiers sont sympas

Dans ce chapitre j'exprime la conviction que tous les camions pourront être électrifiés, peut-être avec des voies électrifiées ou des systèmes d'échange de batteries – à moins que les progrès si rapides des batteries ne rendent ces complications inutiles. Ce qui n'interdit pas de chercher à augmenter la part du fret ferroviaire...

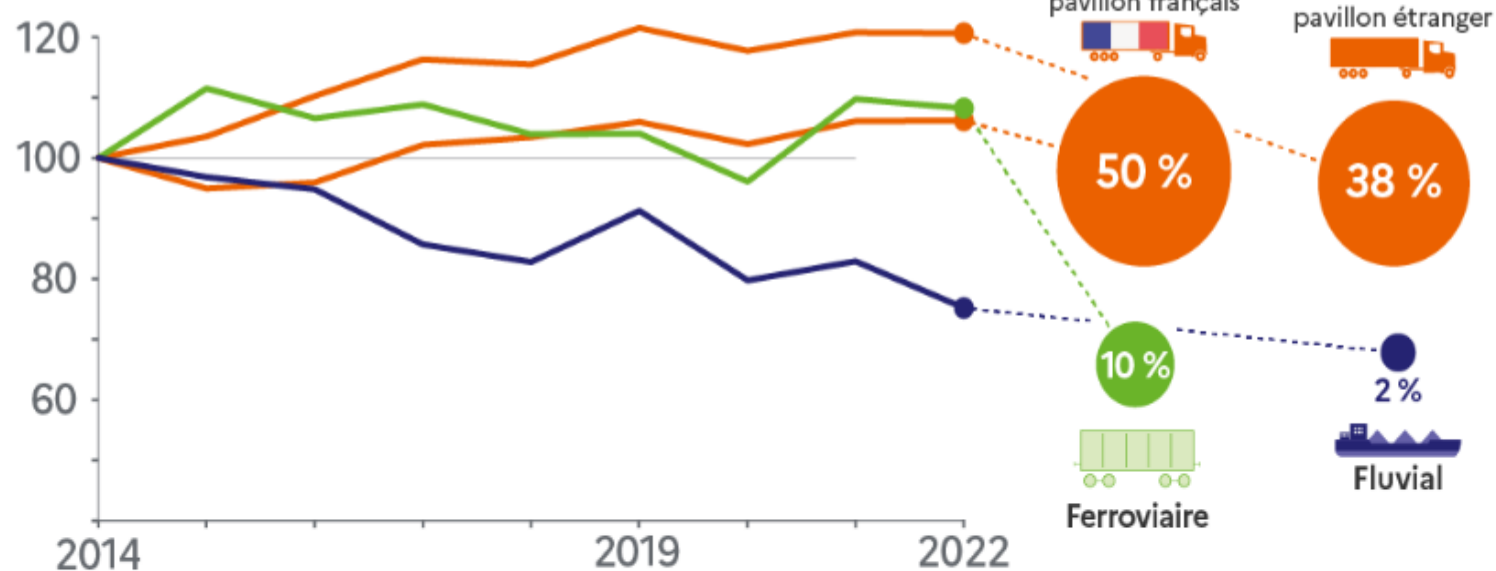


Transport intérieur de marchandises

338 milliards de tonnes-kilomètres

Correspond au transport d'une tonne sur 1 km

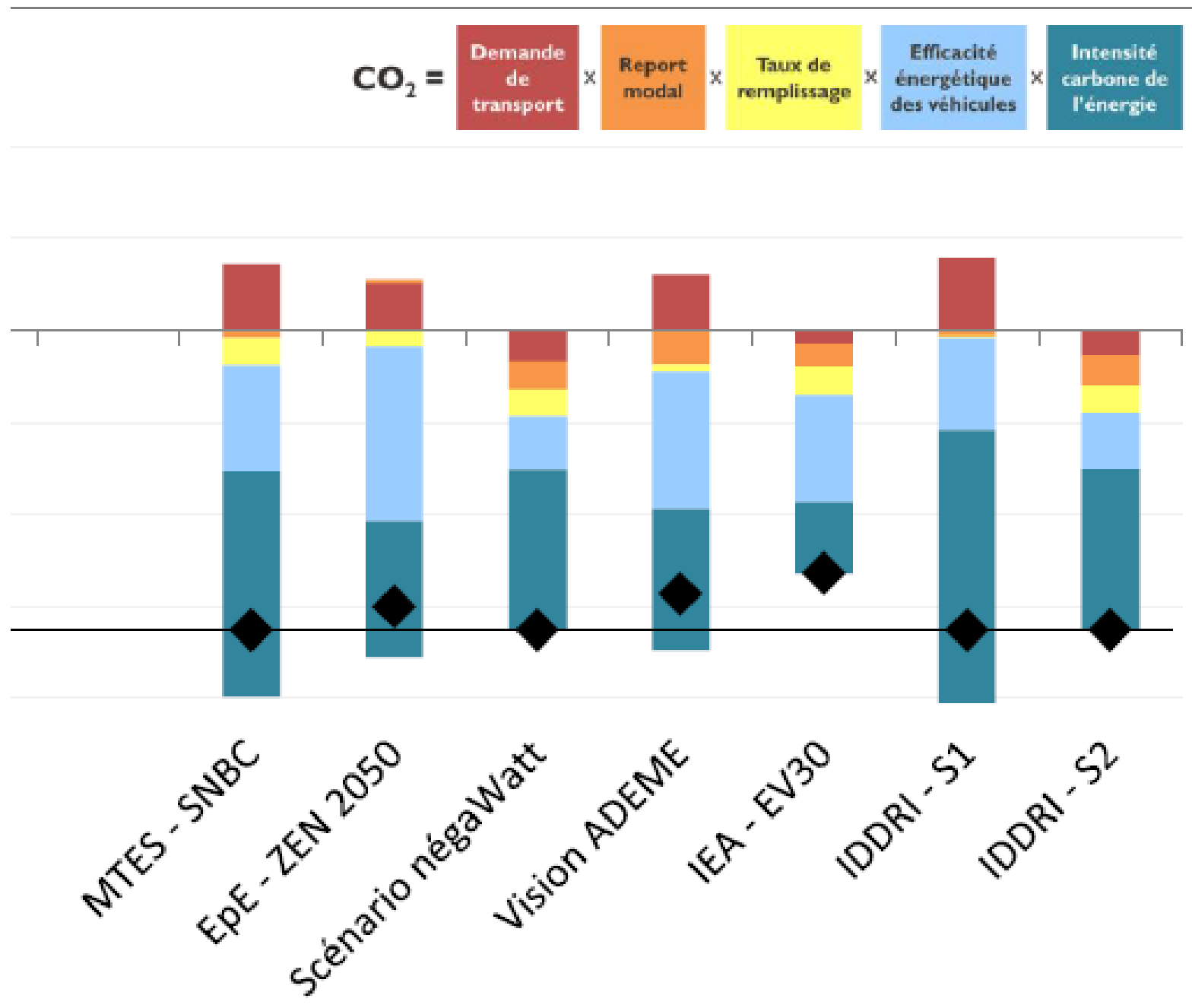
Indice base 100 en 2014



Globalement stable en 2022, le transport de marchandises reste largement dominé par le fret par poids lourds.

La sobriété ne suffit pas

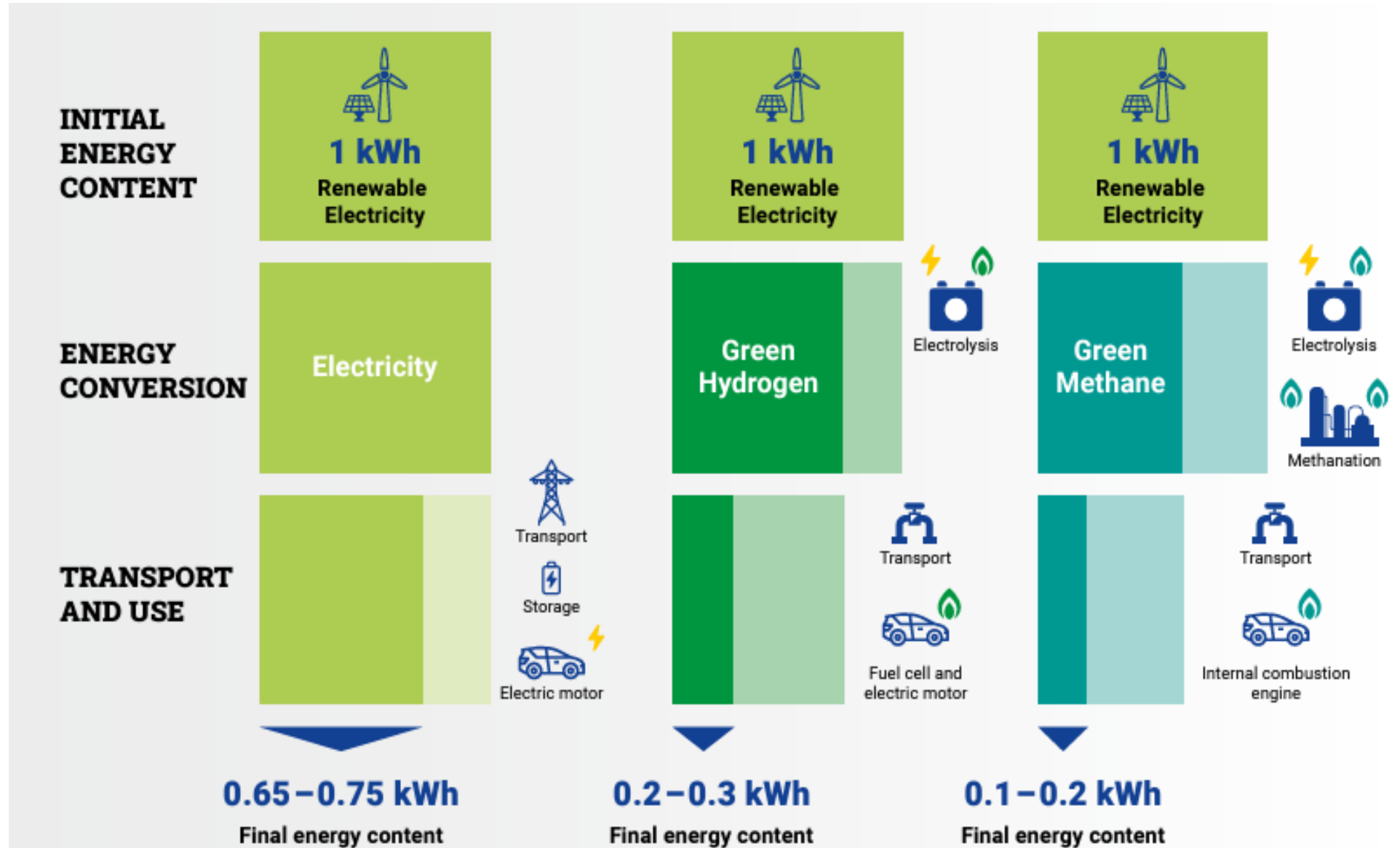
Dans tous les scénarios, l'efficacité énergétique et l'intensité carbone de l'énergie compte davantage que le report modal et le taux de remplissage – comme pour les marchandises...



Les alternatives: hydrogène et e-fiouls

Les véhicules à batteries sont 3 à 5 fois plus efficaces

Si je n'ai pas parlé d'hydrogène à propos des voitures, c'est parce que la vogue des voitures à hydrogène est entrée en phase terminale. Mais on continue de parler de camions à hydrogène – je n'y crois pas beaucoup plus. Ils coûteront nettement plus cher, et consommeront trois fois plus d'électricité...

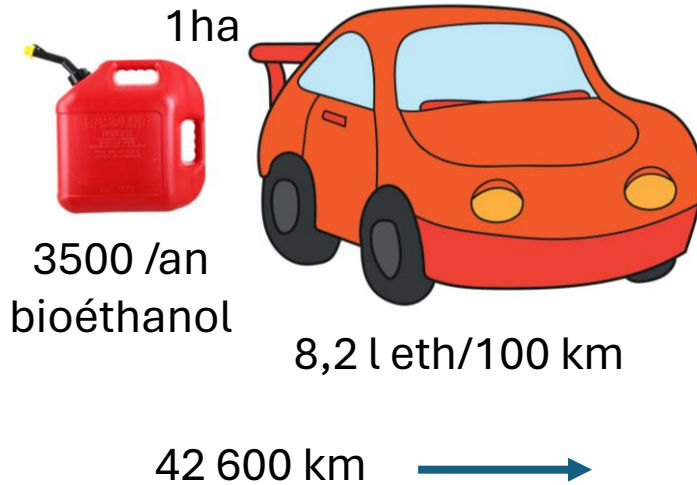


Les alternatives: les biocarburants

Biocarburants vs. PV+voiture électrique

Je compare la distance qu'on peut parcourir en un an avec un hectare de biocarburants et un véhicule thermique, et celle qu'on peut parcourir avec un hectare d'agrivoltaïsme et un véhicule électrique.

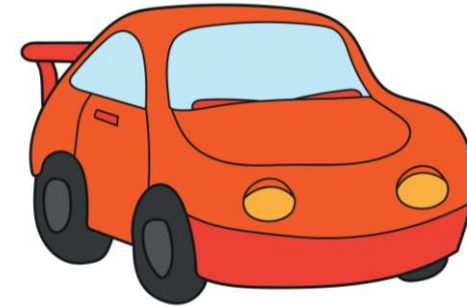
Selon les études, la voiture électrique alimentée par du PV parcourt entre 100 et 300 fois plus de kilomètres que la voiture qui roule à l'éthanol.



1ha

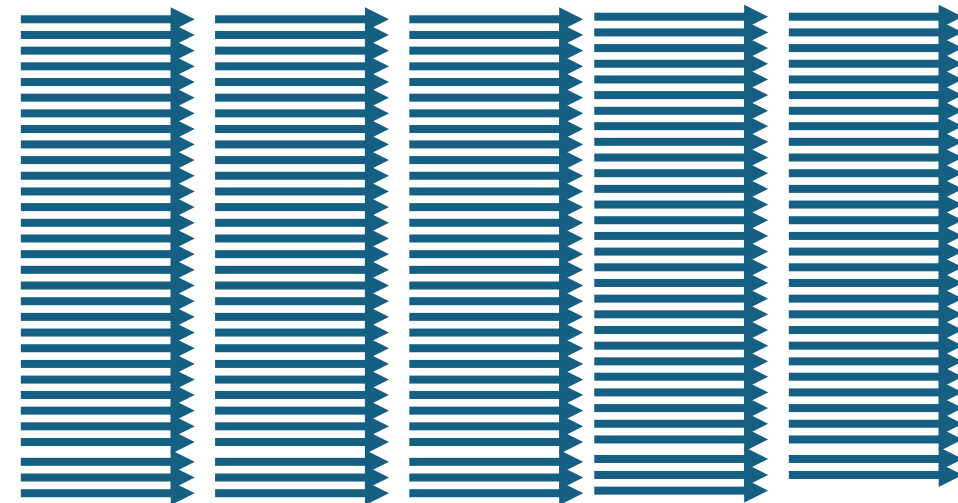


1200 MWh/an



17 kWh/100 km

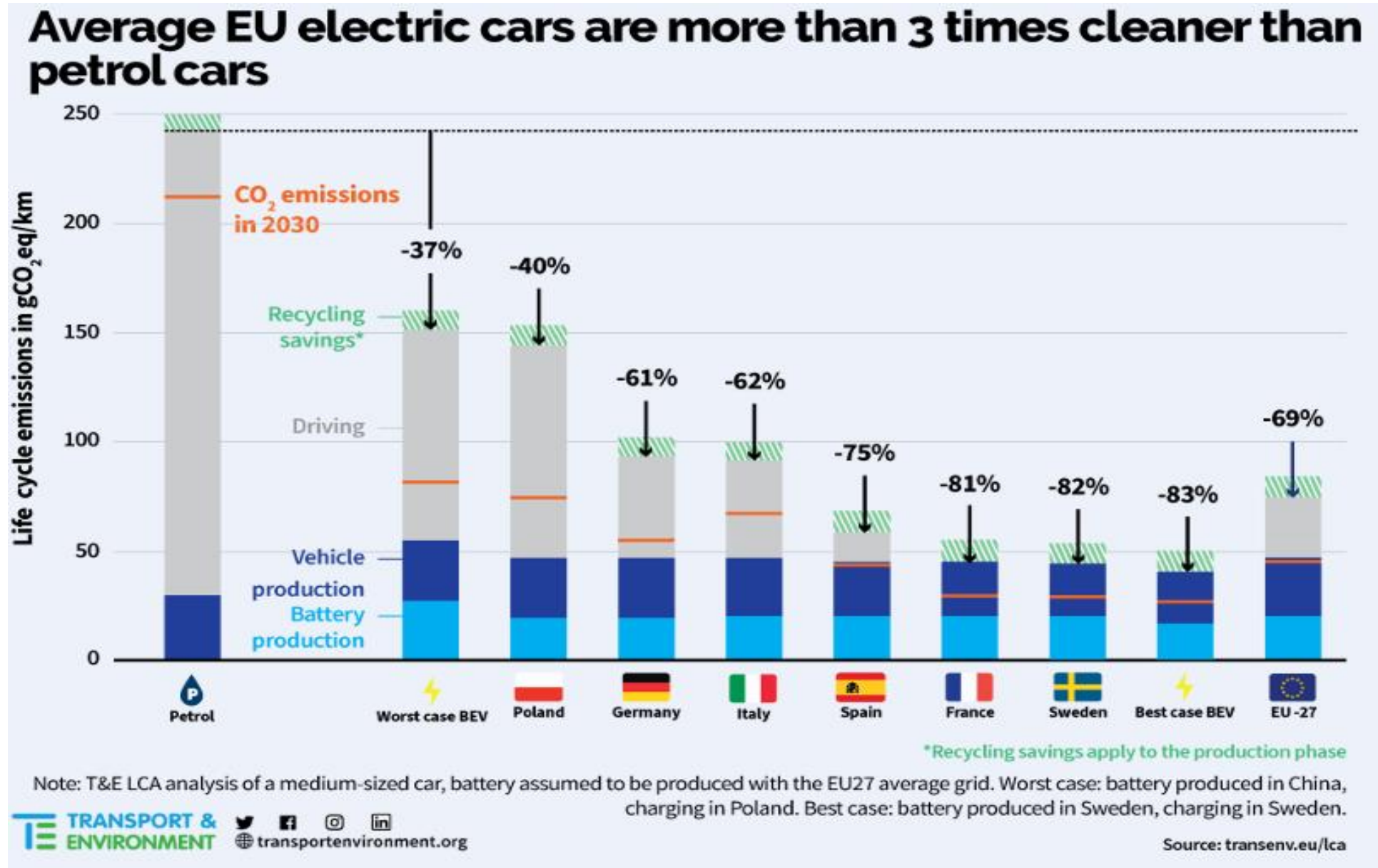
7 000 000 km



6. A charge et à décharge

Le bilan CO₂ des voitures électriques est toujours meilleur que celui des voitures thermiques, comme le montre cette étude de *Transport et Environnement*. En prenant des hypothèses un peu moins favorables je montre que l'avantage reste indubitablement aux voitures électriques...

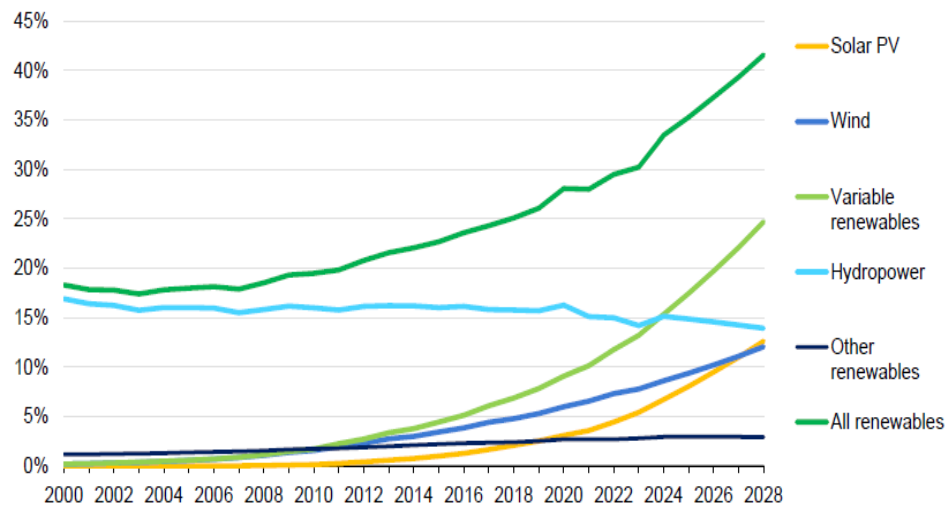
ERRATUM – p.131, il faut lire 3,5 et 7 gCO₂/km, au lieu de 0,35 et 0,7 gCO₂. Bien que l'erreur soit importante – un facteur 10! – et regrettable, elle n'affecte pas beaucoup les conclusions que je tire de ces chiffres.



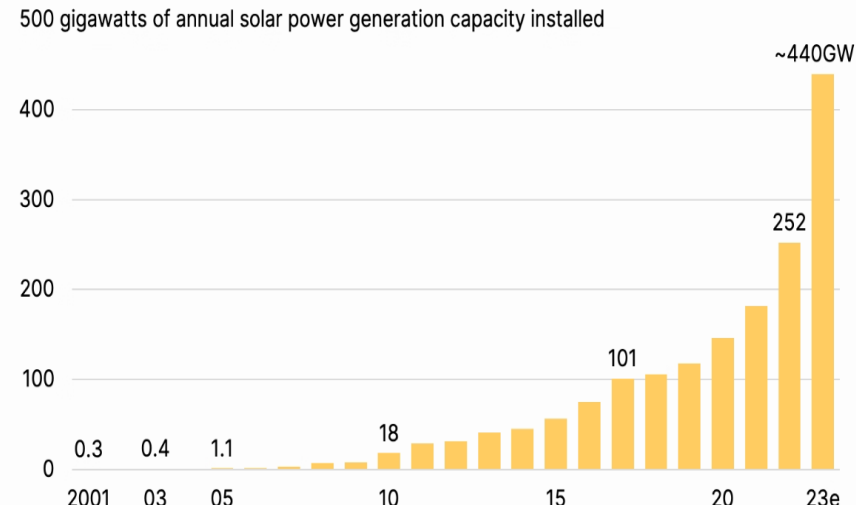
... les études qui mettent en doute ce bilan CO₂ sous-estiment généralement la rapidité de la décarbonation des réseaux électriques dans les prochaines années, un peu partout dans le monde, sous l'effet du déploiement de l'éolien et du solaire (principalement).

Elles omettent aussi de dire que grâce aux batteries, les utilisateurs particuliers pourront choisir l'électricité la moins chère, qui sera aussi la moins carbonée. Sans même parler de ceux qui voudront participer au « véhicule to grid » (V2G) et renvoyer de l'électricité sur le réseau quand il peine.

Les renouvelables dans la production électrique mondiale



La croissance du solaire est particulièrement rapide

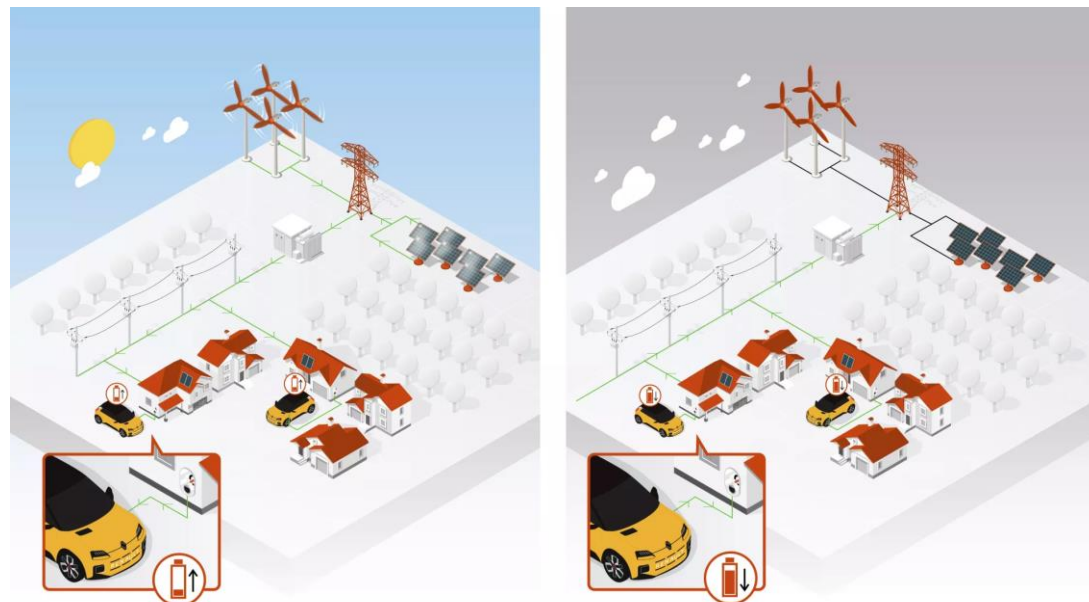


IEA. CC BY 4.0. January 2024

Le smart charging et le V2G permettront aux VE de choisir l'électricité la moins chère et la moins carbonée



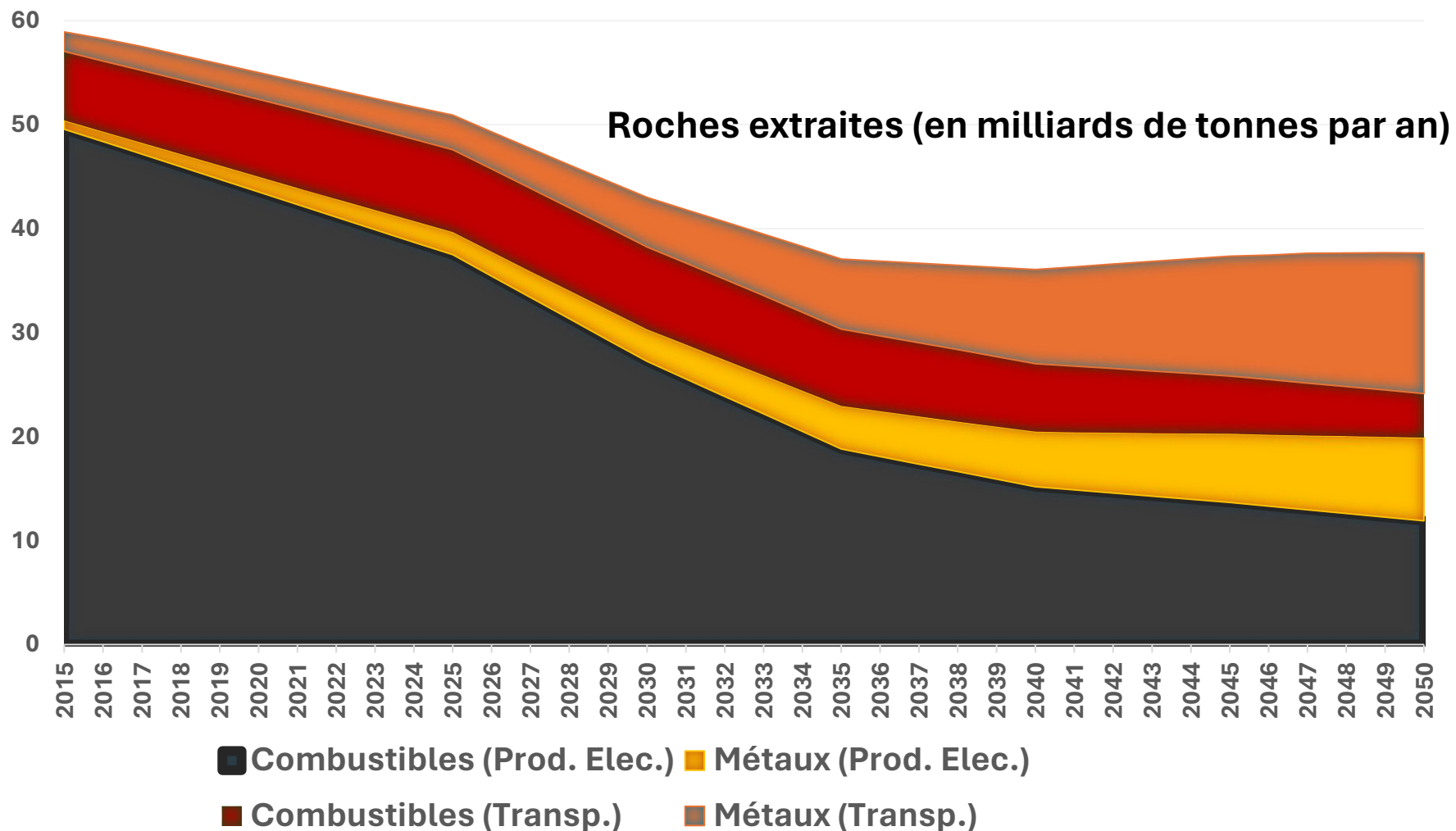
La R5 électrique est l'une des premières à être équipée d'un chargeur bidirectionnel



7. Métaux, c'est trop!

Dans ce chapitre, j'examine la question des métaux nécessaires à la transition énergétique – aux éoliennes, aux panneaux solaires, aux pompes et échangeurs de chaleur, aux réseaux électriques, aux batteries et moteurs des véhicules électriques... Si on regarde les tonnages de roches extraites ou déplacées, la transition énergétique fait diminuer l'extraction minière, en raison de l'effondrement de la consommation de charbon.

Dans la transition, l'extraction minière diminue

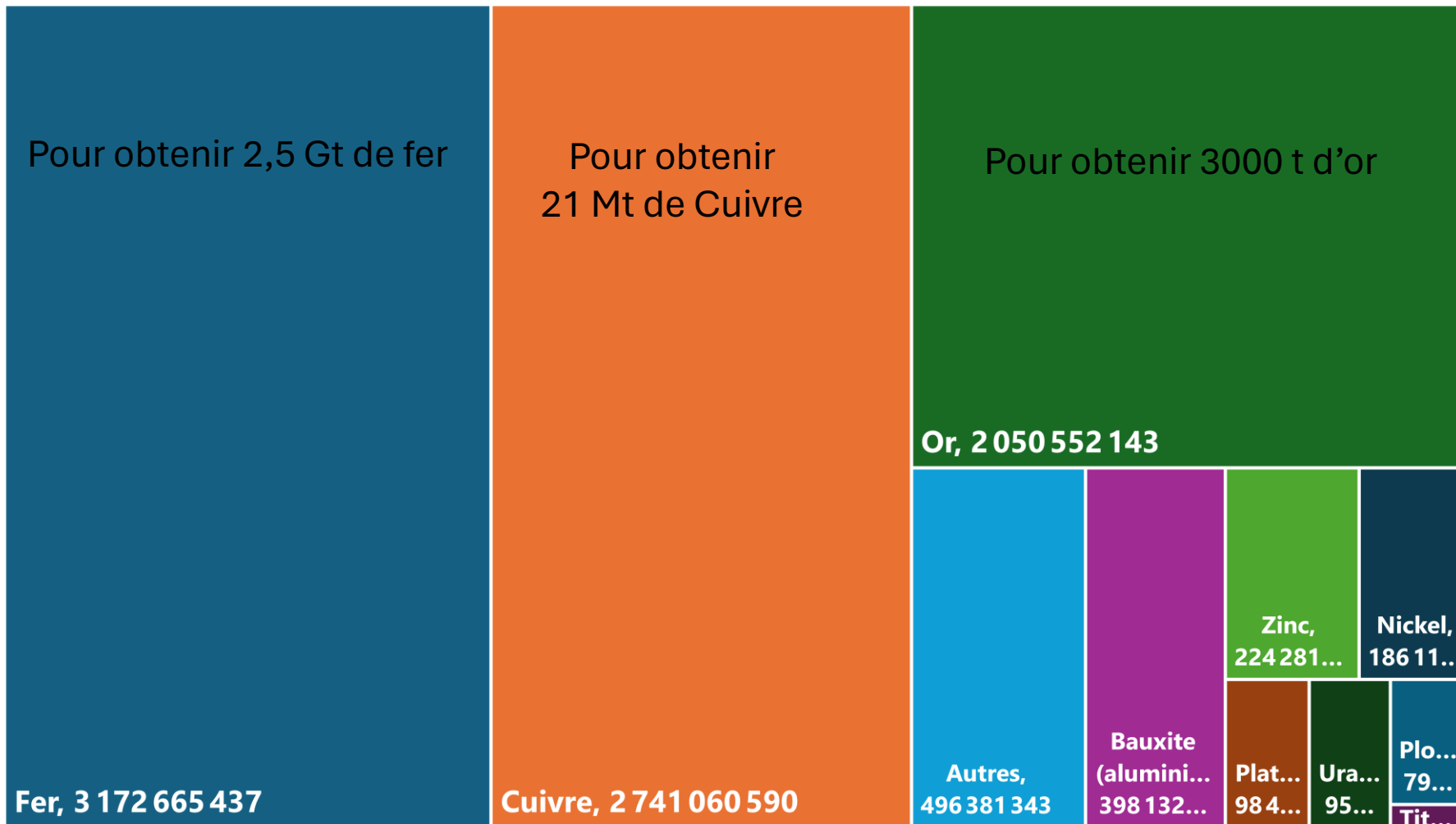


Source: Watari et al., 2021.

L'extraction du fer, du cuivre et de l'or représente 80% de l'extraction des métaux

On lit souvent que la transition énergétique va multiplier par cinq ou dix la consommation des métaux... C'est vrai pour quelques métaux très minoritaires, lithium, cobalt, graphique, nickel... Or dans l'extraction minière totale, qui est à 80% celle du fer, du cuivre et de l'or (mesurée par les tonnages de concentrés extraits). De ces trois métaux, la demande de cuivre est la seule à augmenter sensiblement – mais elle ne sera pas multipliée par cinq, plutôt augmentée de 35% d'ici 2040

Extraction mondiale de concentrés métalliques en 2021 (Gt)



N.B. Une version antérieure de ce graphe montrait un chiffre erroné de la production d'or.

Source: data from WU Vienna (2023): Raw Material Profile for Metal ores.

Le cuivre est LE métal de la transition énergétique

- En 1970, on exploitait des gisements avec 1,7% de teneur en cuivre
- On estimait alors les réserves à 280 MT et les ressources à 1,6 Gt
- Aujourd'hui on exploite des gisements à 0,6-0,7% de teneur en cuivre
- Cela prouve-t-il que « la fin est proche »? Non!
- Depuis 1970 on a extrait 650 Mt de cuivre, les réserves sont désormais estimées à 890 Mt, les ressources identifiées à 2,1 Gt et les ressources « non découvertes » à 3,5 Gt
- La raison: le progrès technique a permis d'extraire le cuivre de gisements plus pauvres avec **la même quantité d'énergie...** et des émissions de CO₂ moindres (photos ci-dessous).
- Or les gisements « pauvres » sont plus grands et plus nombreux que les gisements « riches ».



Solaire thermique pour traitement du minerai de cuivre, Chili.



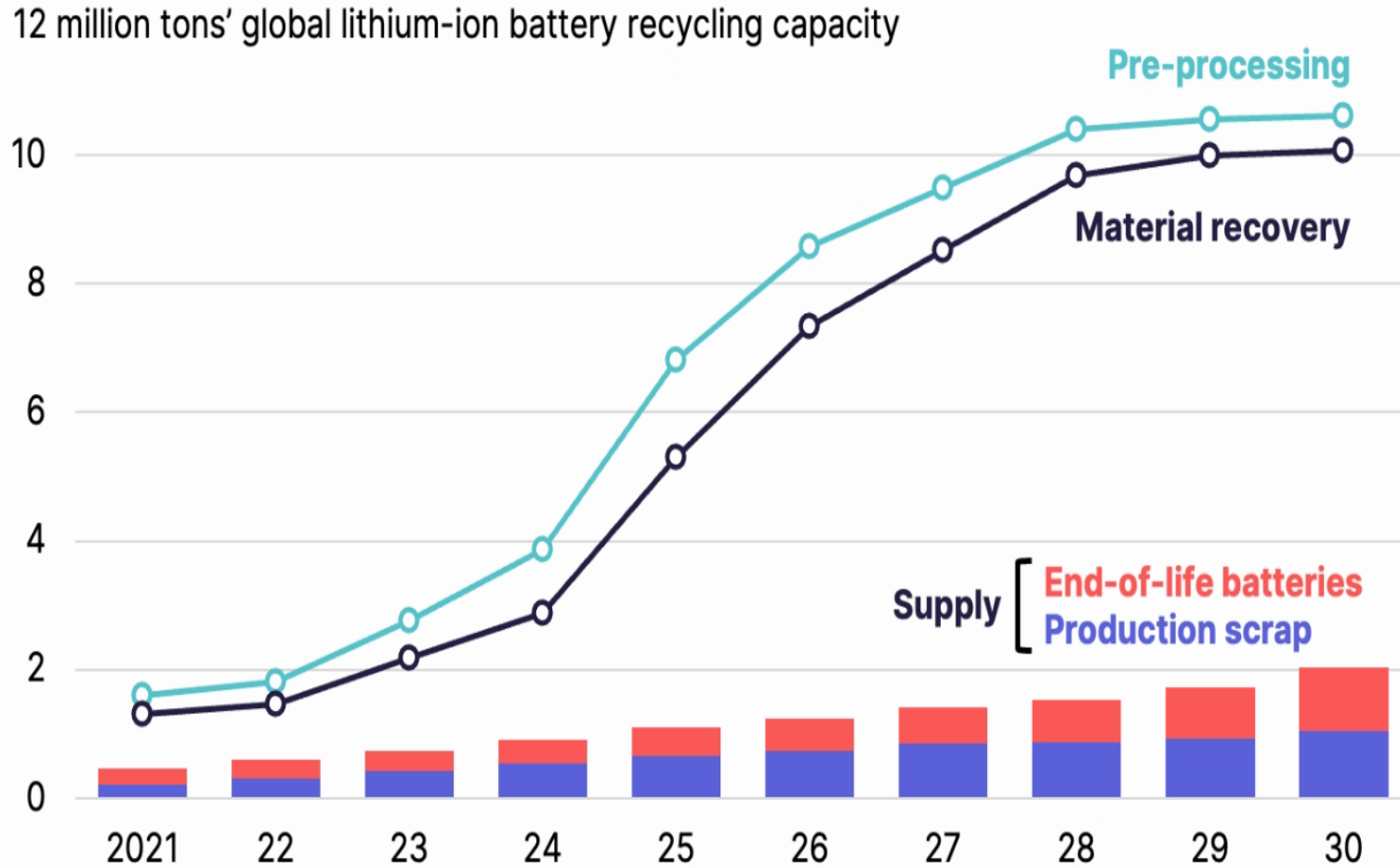
Camion minier électrique à caténaire, mine de fer de Boliden, Suède.



Camion minier électrique à batterie, Fortescue, Australie.

Le recyclage n'est pas en retard, il est en avance!

A long terme le recyclage des métaux deviendra une source d'approvisionnement importante. A court terme, il sert surtout à limiter la production de déchets, mais il manque de « matières premières », batteries en fin de vie et résidus de production, pour pouvoir alimenter une forte mais temporaire croissance de la fabrication de véhicules électriques. Ce ne sont ni les procédés ni les usines qui manquent – par exemple pour le lithium – ce sont les matériaux à recycler!



January 2024

150

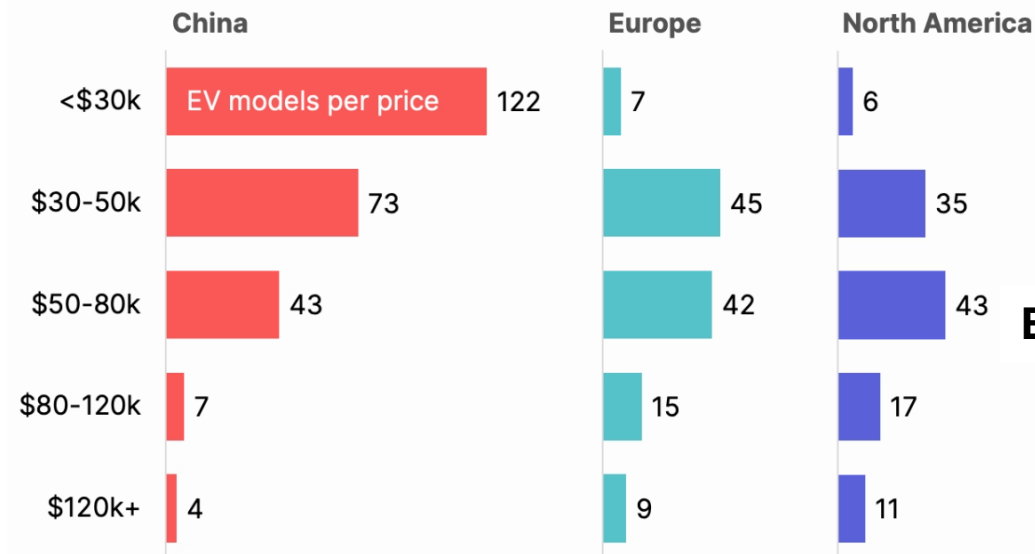


NAT BULLARD

8. Désespérer Billancourt

L'Europe s'inquiète des importations de voitures chinoises, car la Chine est en avance dans l'électrification de tous les véhicules. C'est aussi parce que les constructeurs européens ont négligé les modèles pas chers, qui vont heureusement se multiplier à partir de cette année. Il faut dire encore que la Chine n'exporte pas que des voitures électriques. Retarder le passage à l'électrique ne fera qu'aggraver les choses!

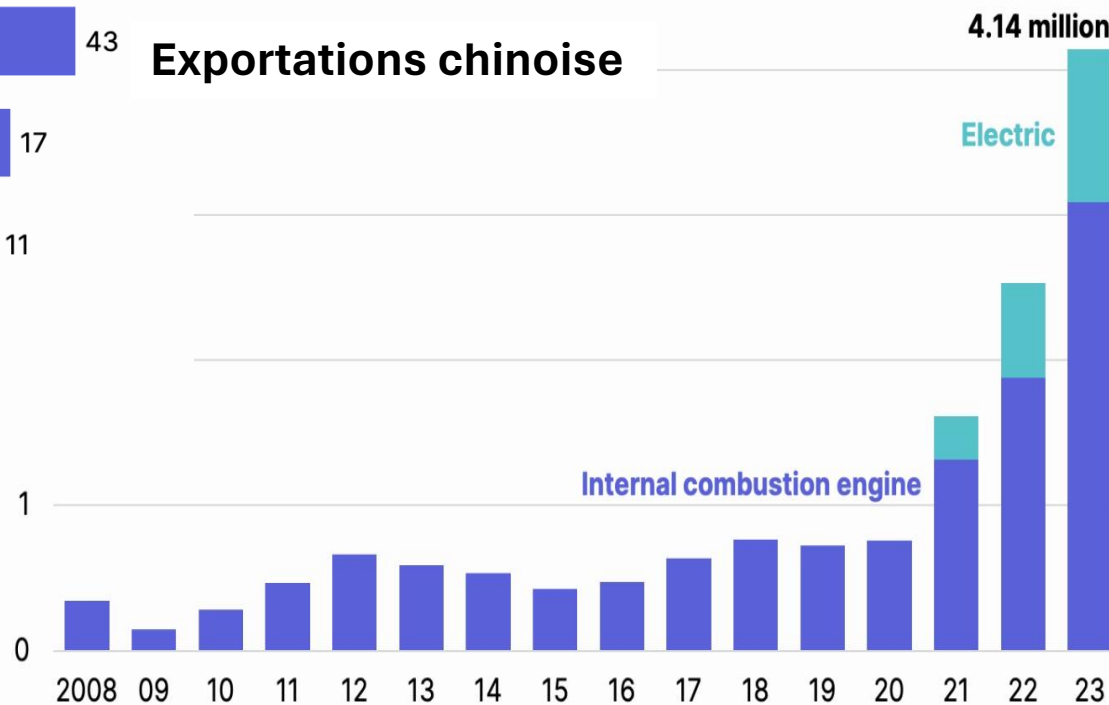
Il est temps de fabriquer ici des voitures électriques pas chères!



2024

L'envol des exportations chinoises de véhicules n'est pas seulement dû à l'électrification

Exportations chinoise

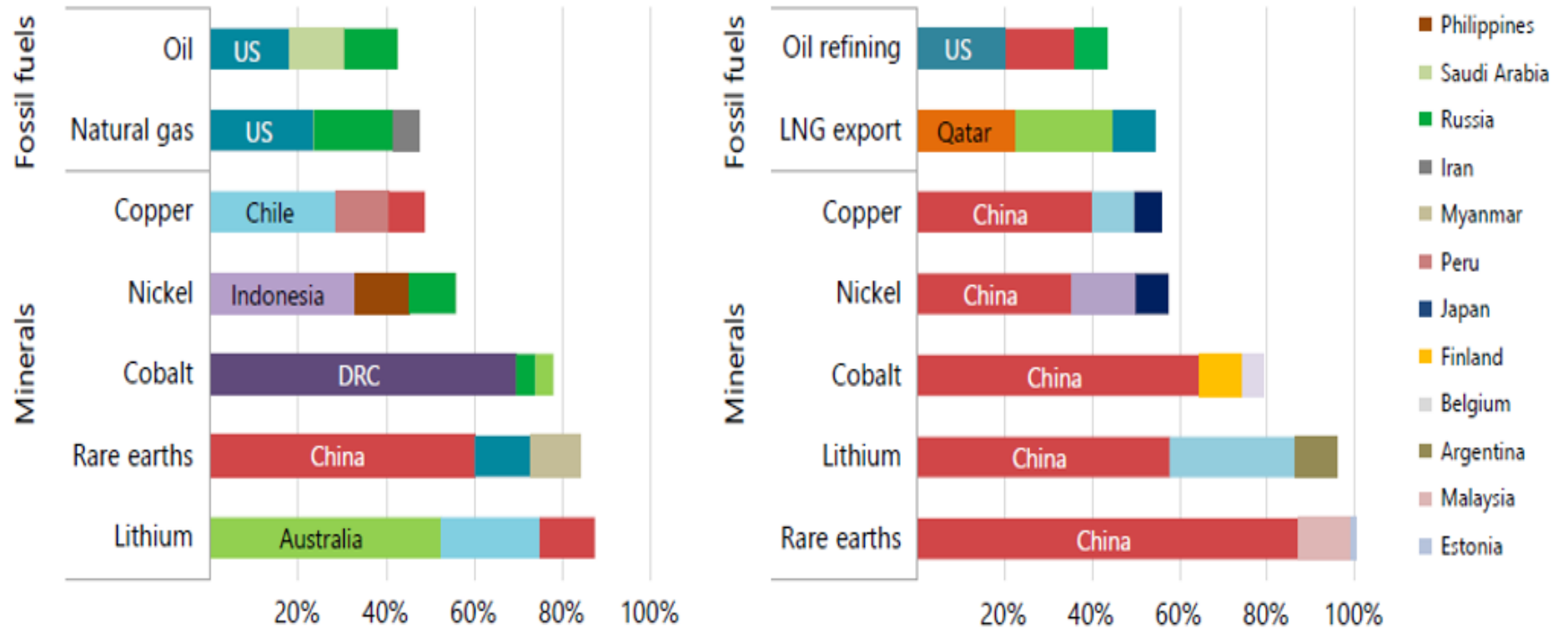


January 2024

La dépendance porte surtout sur le raffinage des métaux

Le vrai souci pour l'Europe, c'est notre dépendance à l'égard de la Chine, moins pour l'extraction des métaux que pour leur raffinage. Si nous voulons regagner en souveraineté, nous devons réinstaller des mines et des usines en Europe. Sommes-nous prêts à le faire?

La part des trois plus gros producteurs dans la production de certains minéraux et fiouls, 2019



Source: AIE, 2021

9. Les transports extra-terrestres

Justement parce qu'ils sont très difficiles à électrifier, les transports maritimes à longue distance, et les transports aériens, sont parmi les plus difficile à décarboner. L'assistance éolienne et l'ammoniac électrolytique peuvent participer à la décarbonation des navires.

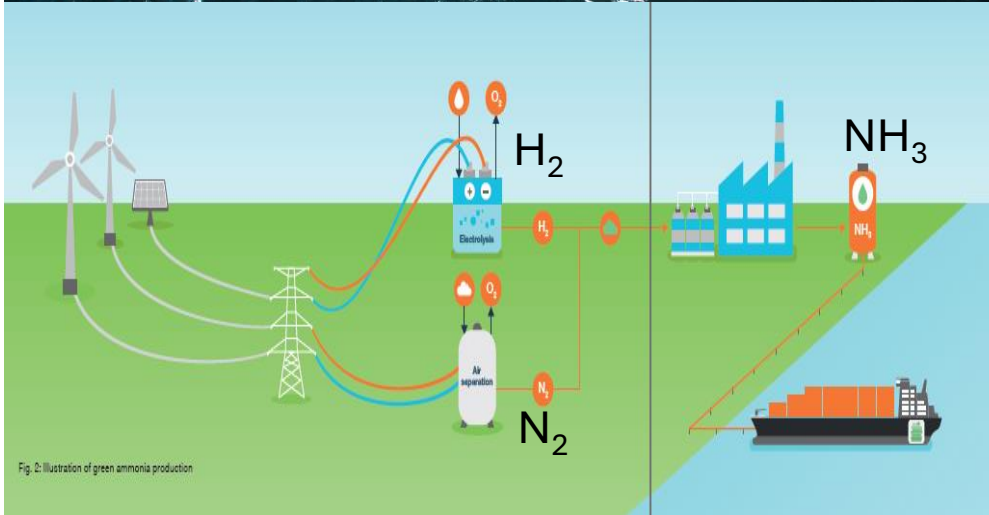
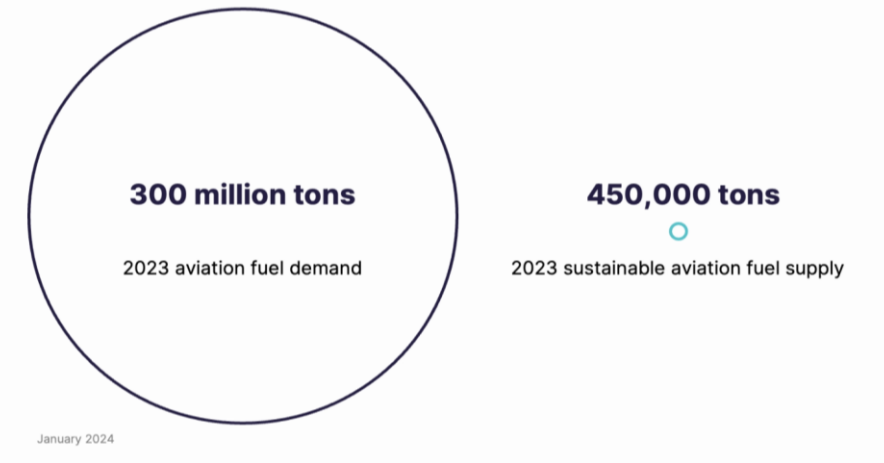
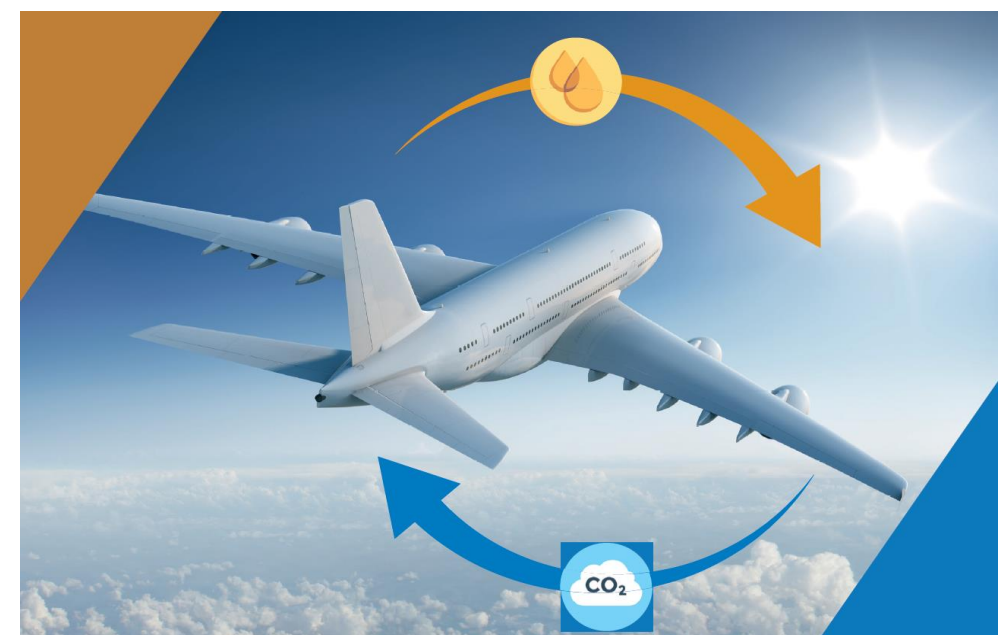


Fig. 2: Illustration of green ammonia production



Pour les avions c'est encore plus compliqué. Les carburants « durables », biocarburants et/ou de synthèse, fournissent 0,15% de la demande... Nous ne pourrons sans doute pas atteindre nos objectifs climatiques si nous n'enrayons pas la croissance, bien trop rapide, du trafic aérien.

L'inéluctable électrification

Pour conclure, je rappelle que l'électrification des voitures et des camions est indispensable à la maîtrise du changement climatique. Elle est bien engagée dans certains pays, d'autres sont à la traîne... Il faut se battre, chaque dixième de degré de réchauffement évité en vaut largement la peine!

18% electric

18% des voitures vendues en 2023 étaient électriques – et davantage en Chine et en Europe



2023, encore une année avec une croissance globale de 30% pour les ventes de voitures électriques



Note: 2023 is estimated

Les changements technologiques peuvent être rapides

Matin de Pâques 1900, 5^{ème} Avenue, New York.
Cherchez l'automobile!



Source: US National Archives.

Matin de Pâques 1913, 5^{ème} Avenue, New York.
Cherchez le cheval!



Source: George Grantham Bain Collection.