



Les Éconoclastes

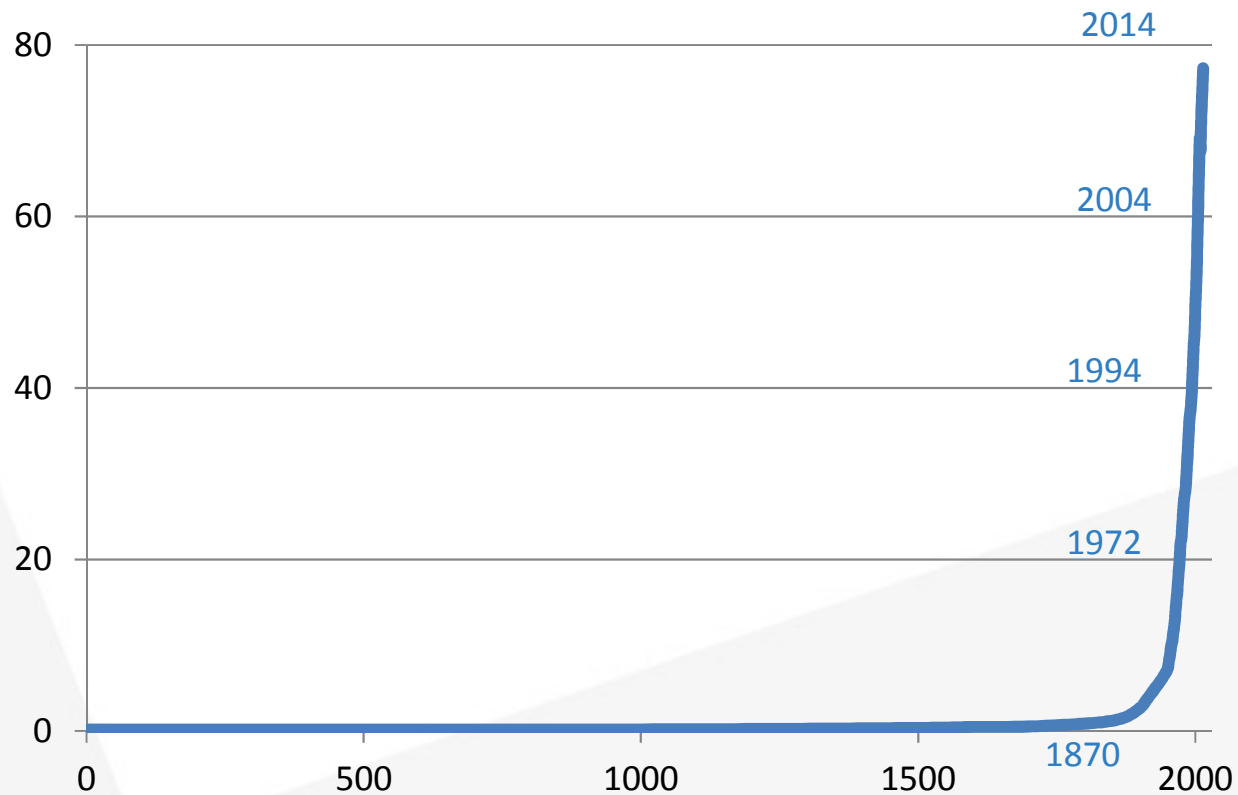
THINK TANK

Géopolitique
Macroéconomie
Marchés financiers

« Celui qui croit qu'une croissance exponentielle peut continuer éternellement dans un monde fini est soit un fou, soit un économiste » Kenneth Boulding



Evolution du PIB Mondial
- Billions de dollars de 2014, 0 à 2014 -



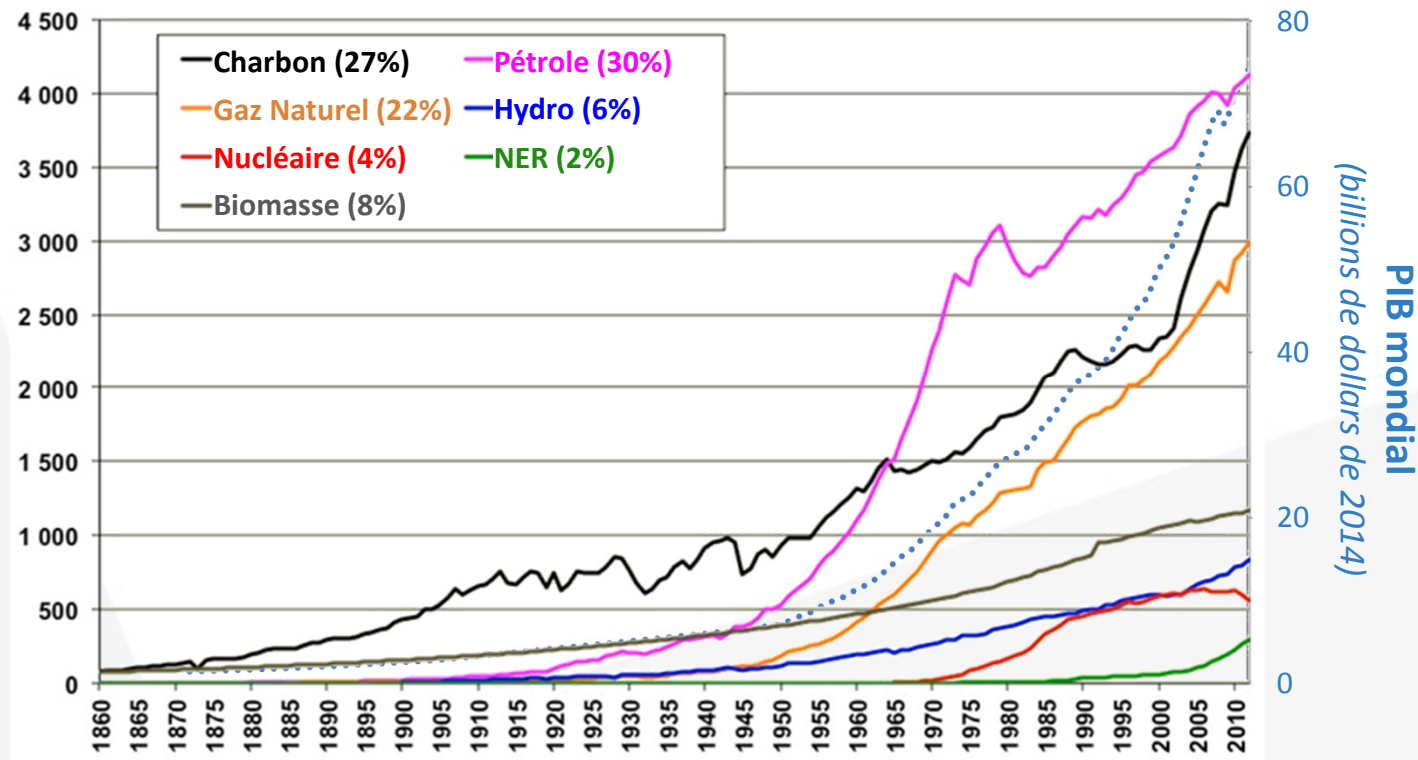
Source: Angus Maddison

Le pétrole est notre principale source d'énergie (et de croissance)



Evolution de la consommation mondiale d'énergie primaire et du PIB mondial - 1860 à 2012 -

Consommation mondiale d'énergie primaire
(millions de tonnes équivalent pétrole)

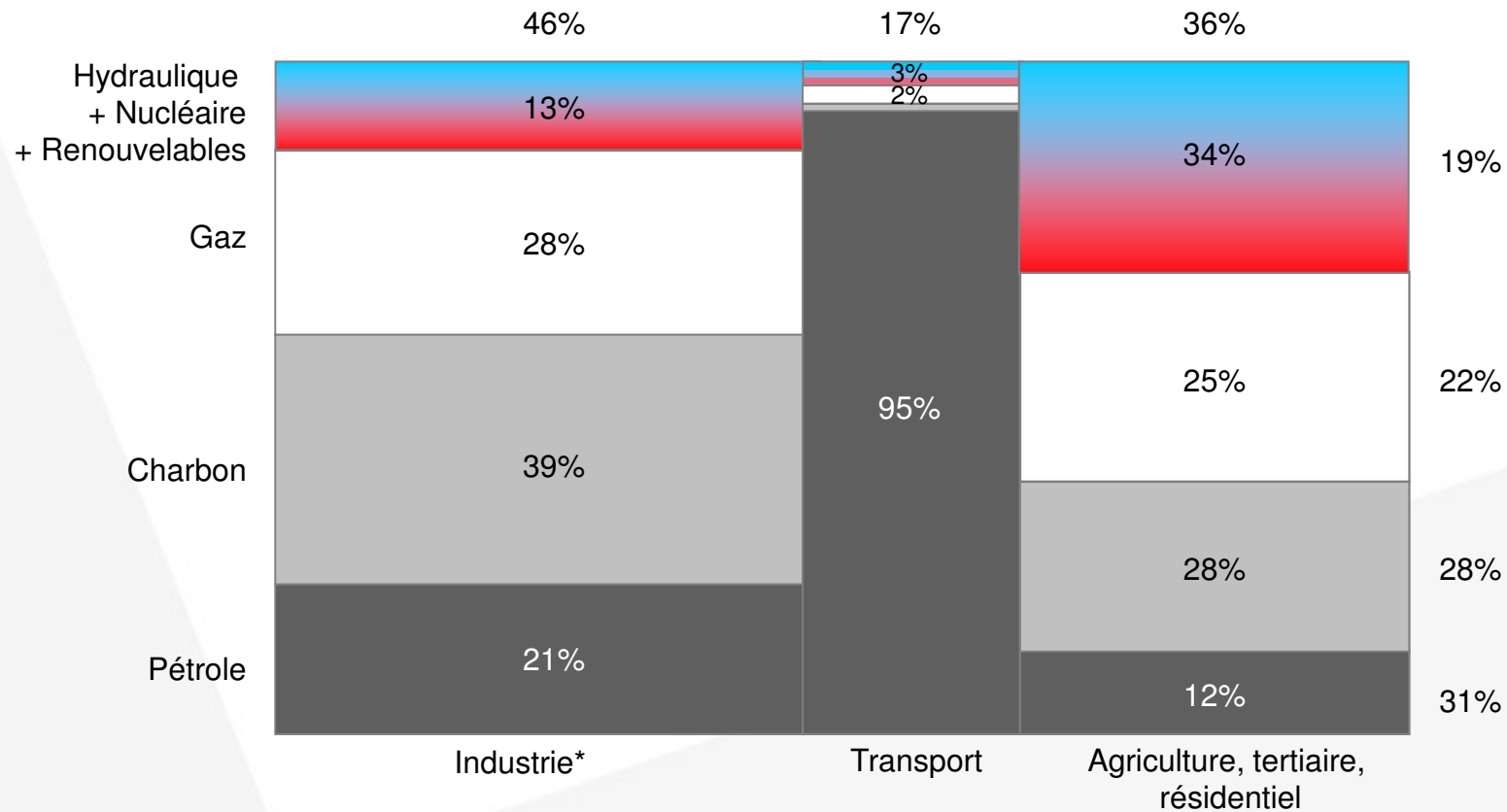


Sources: Shilling et al., 1977, et BP Statistical Review, 2013

A quoi ça sert l'énergie?



Répartition de la consommation mondiale d'énergie primaire - % de tonnes équivalent pétrole, 2013-



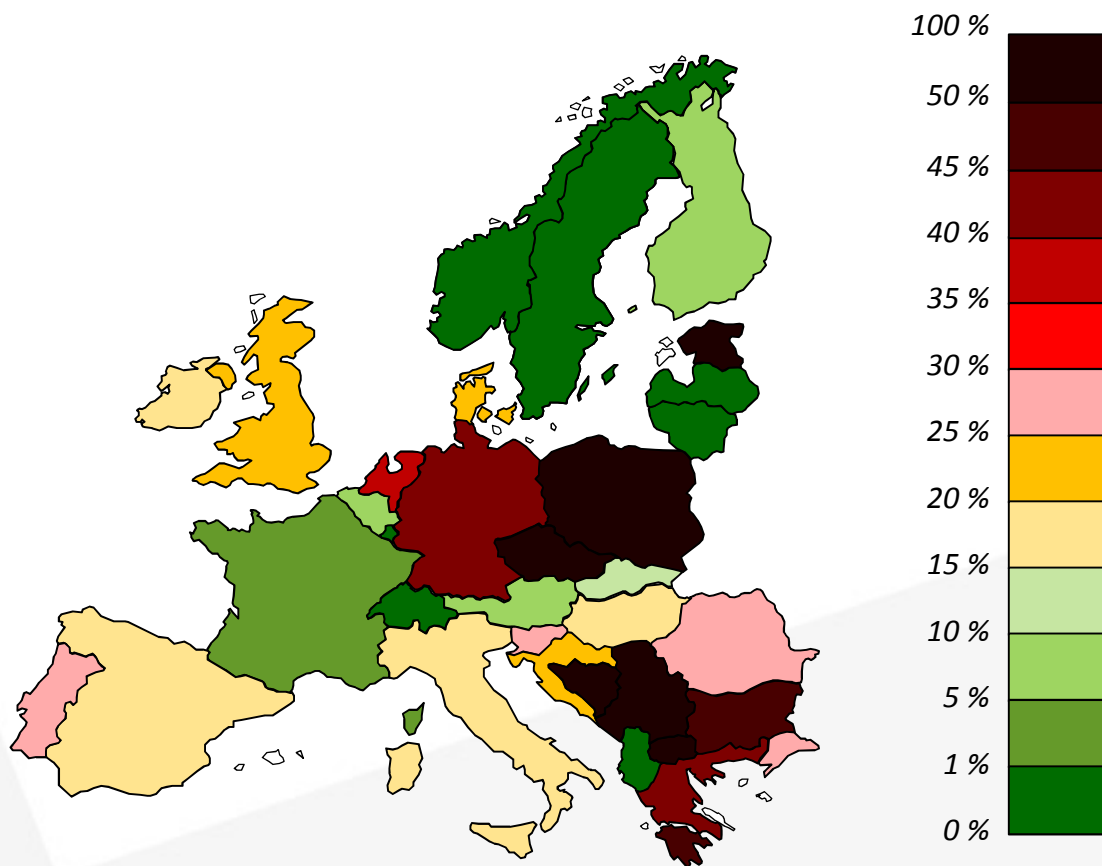
* Inklus les usages non-energétiques Autres secteurs = agriculture, tertiaire, résidentiel

Sources: [BP Energy Outlook 2035](#), EIA

Et moi qui croyait que le charbon était une énergie du passé...



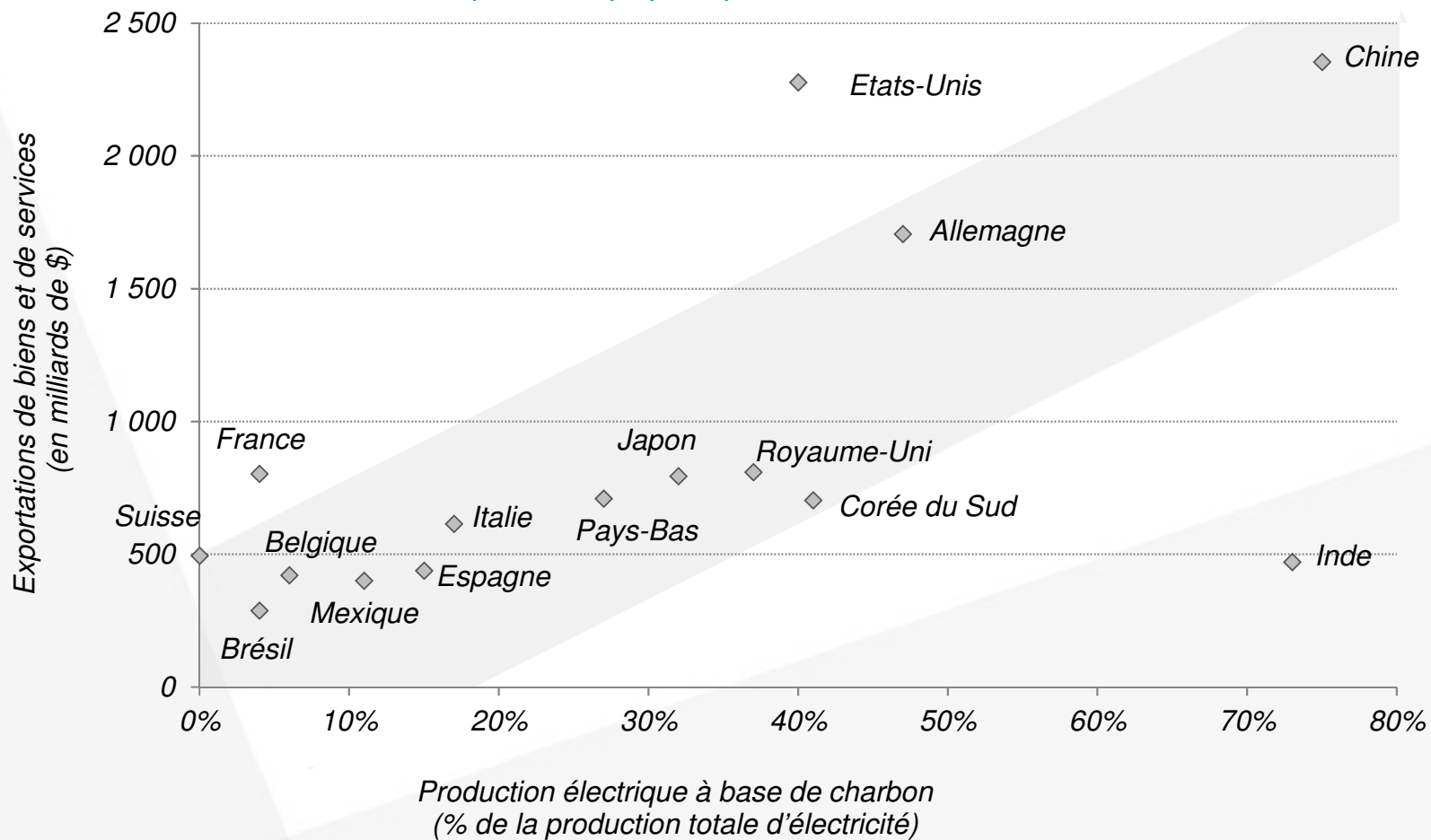
Production d'électricité à base de charbon
- % de la production totale d'électricité, 2015 -



Pourquoi consomme-t-on encore autant de charbon pour produire de l'électricité?



Exportations de biens & services vs. production électrique à base de charbon - Top 15 des pays exportateurs*, 2013 -

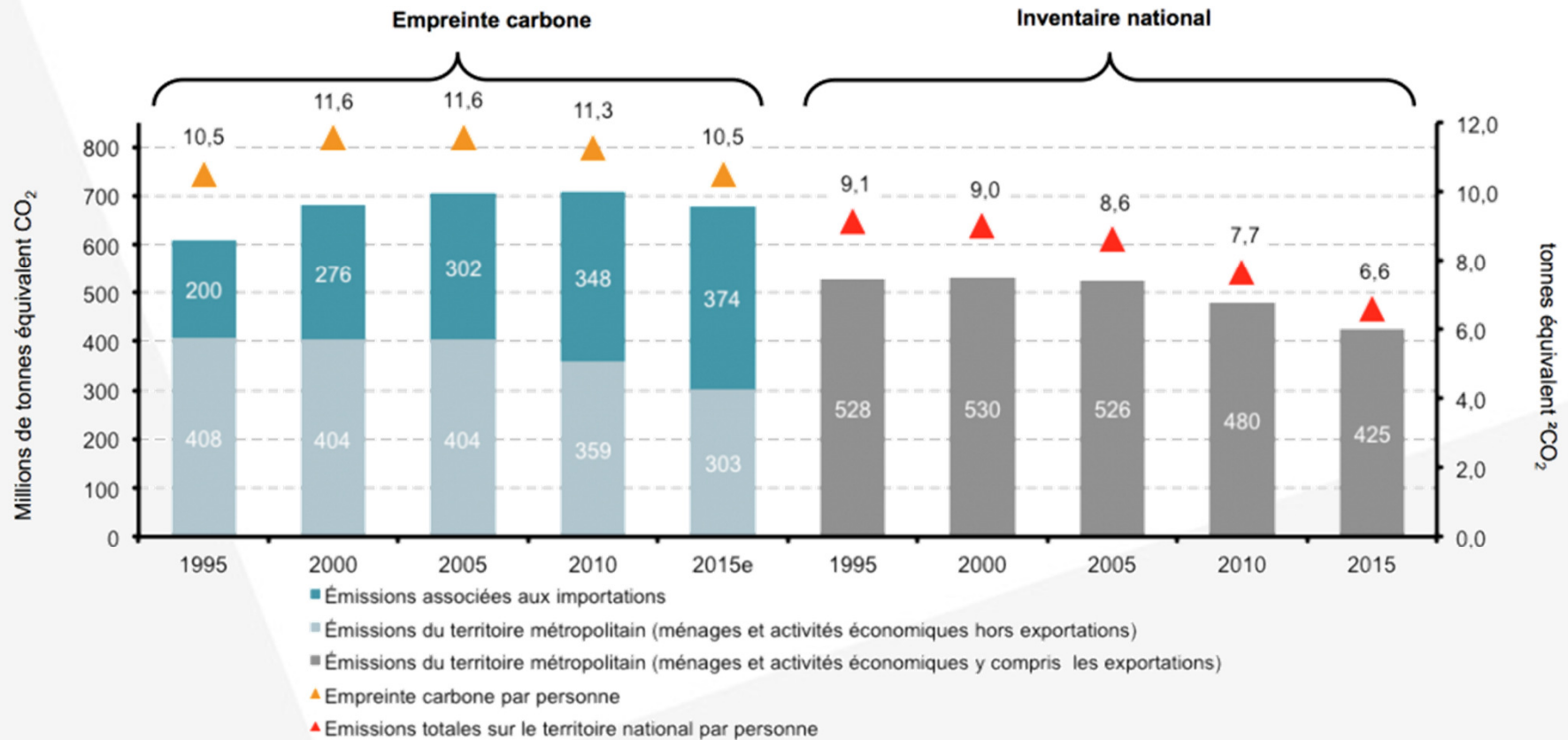


* Hors énergie
Sources: Banque Mondiale

Loin des yeux, loin du cœur...



Évolutions comparées de l’empreinte carbone et des émissions sur le territoire



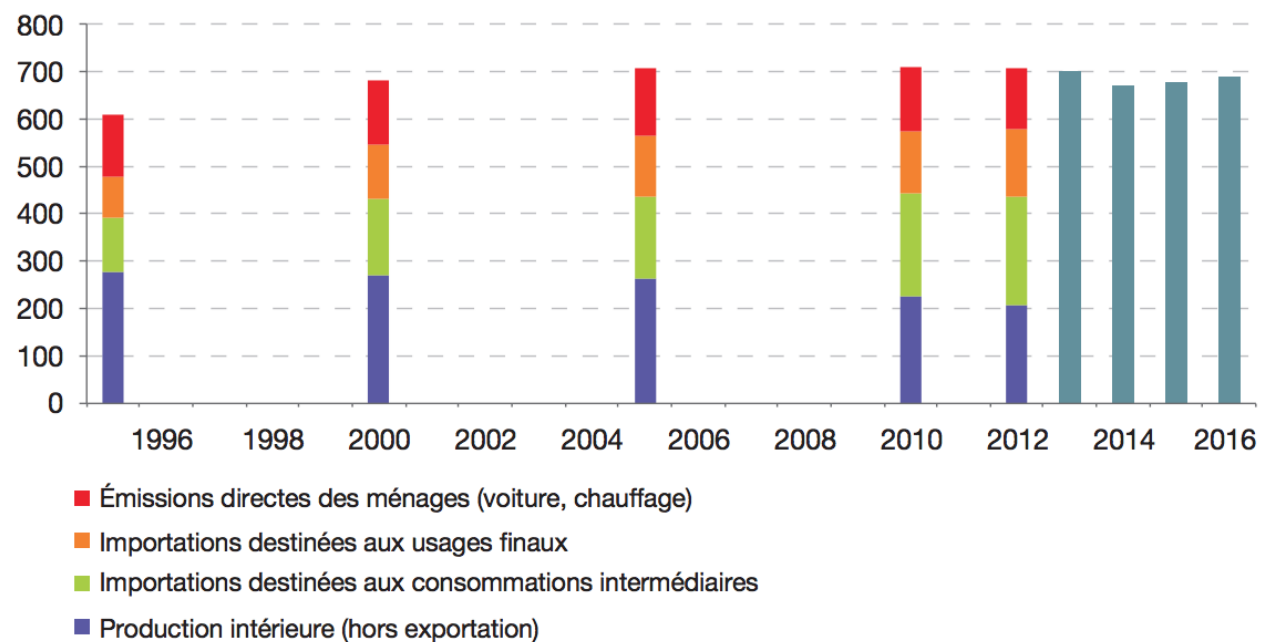
Note : l’empreinte et l’inventaire portent sur les trois principaux gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, N₂O) ; e = estimation.
Champ : France métropolitaine.

Merci Laurent Fabius d'avoir sauvé la Planète...ou pas?



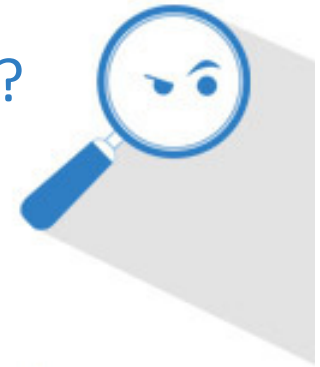
Évolution de notre empreinte carbone de 1995 à 2015

En millions de tonnes CO₂e

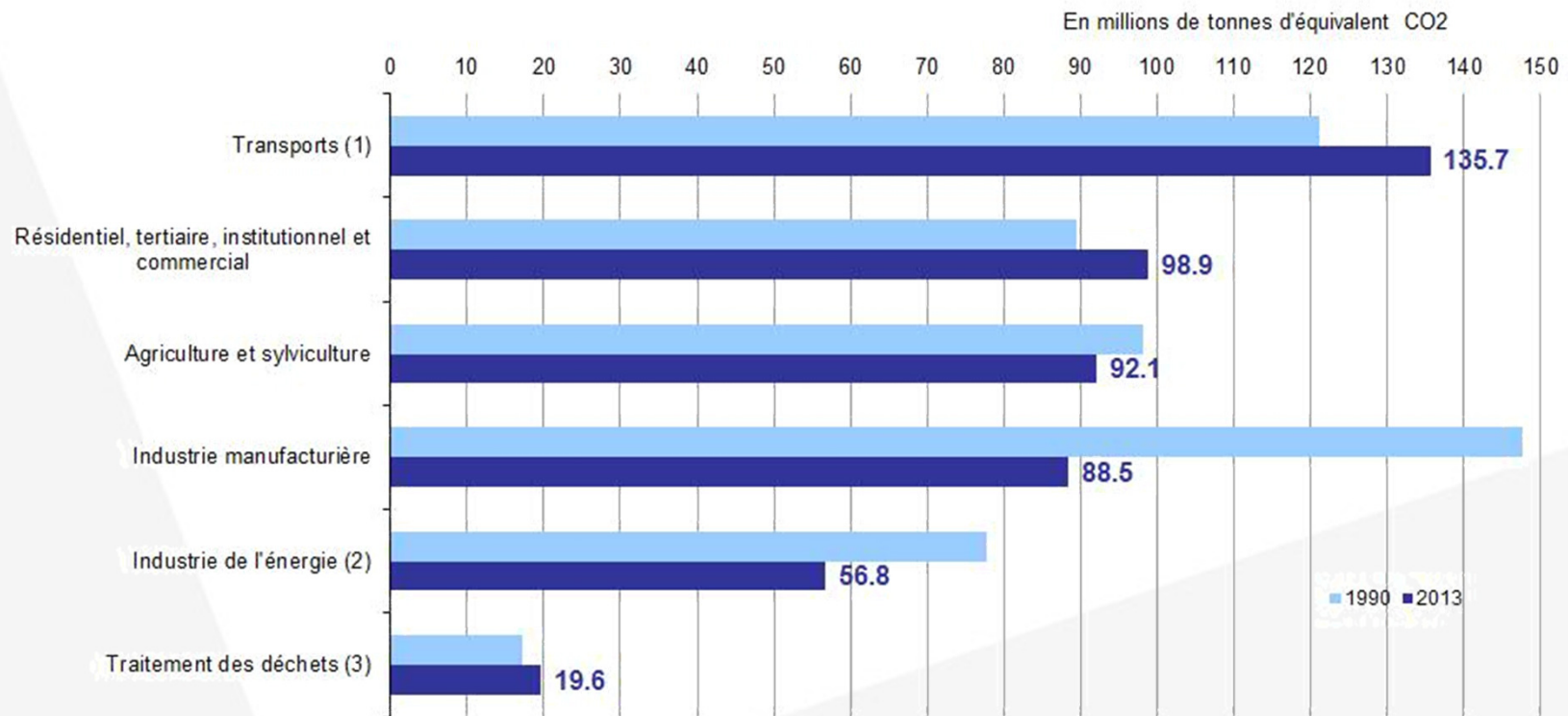


Notes : empreinte calculée pour les trois principaux gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, N₂O) et pour l'ensemble de la demande finale hors exportations (consommation des ménages, services publics, investissements) selon la nouvelle méthodologie 2017 ; données 2013-2016 estimées.
Champ : France métropolitaine.

La France championne du monde des délocalisations?



Evolution des émissions de gaz à effet de serre par secteur en France de 1990 à 2013

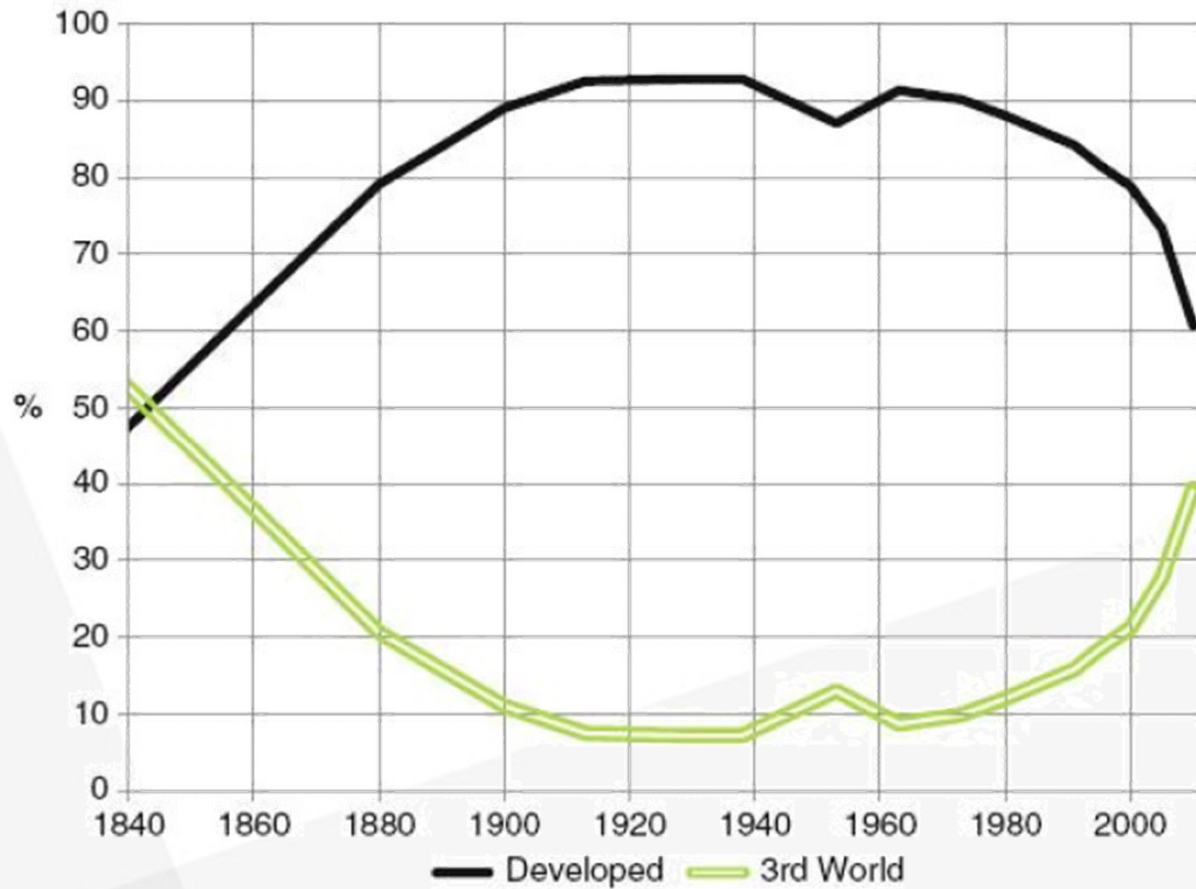


Notes : hors UTCF (utilisation des terres, leurs changements et la forêt) ; (1) aérien et maritime : trafic domestique uniquement ; (2) y compris incinération des déchets avec récupération d'énergie ; (3) hors incinération des déchets avec récupération d'énergie, et hors captage de biogaz.
Champ : France métropolitaine, départements d'Outre-mer, Saint Martin (périmètre Protocole de Kyoto).

Le Monde champion du monde des délocalisations?



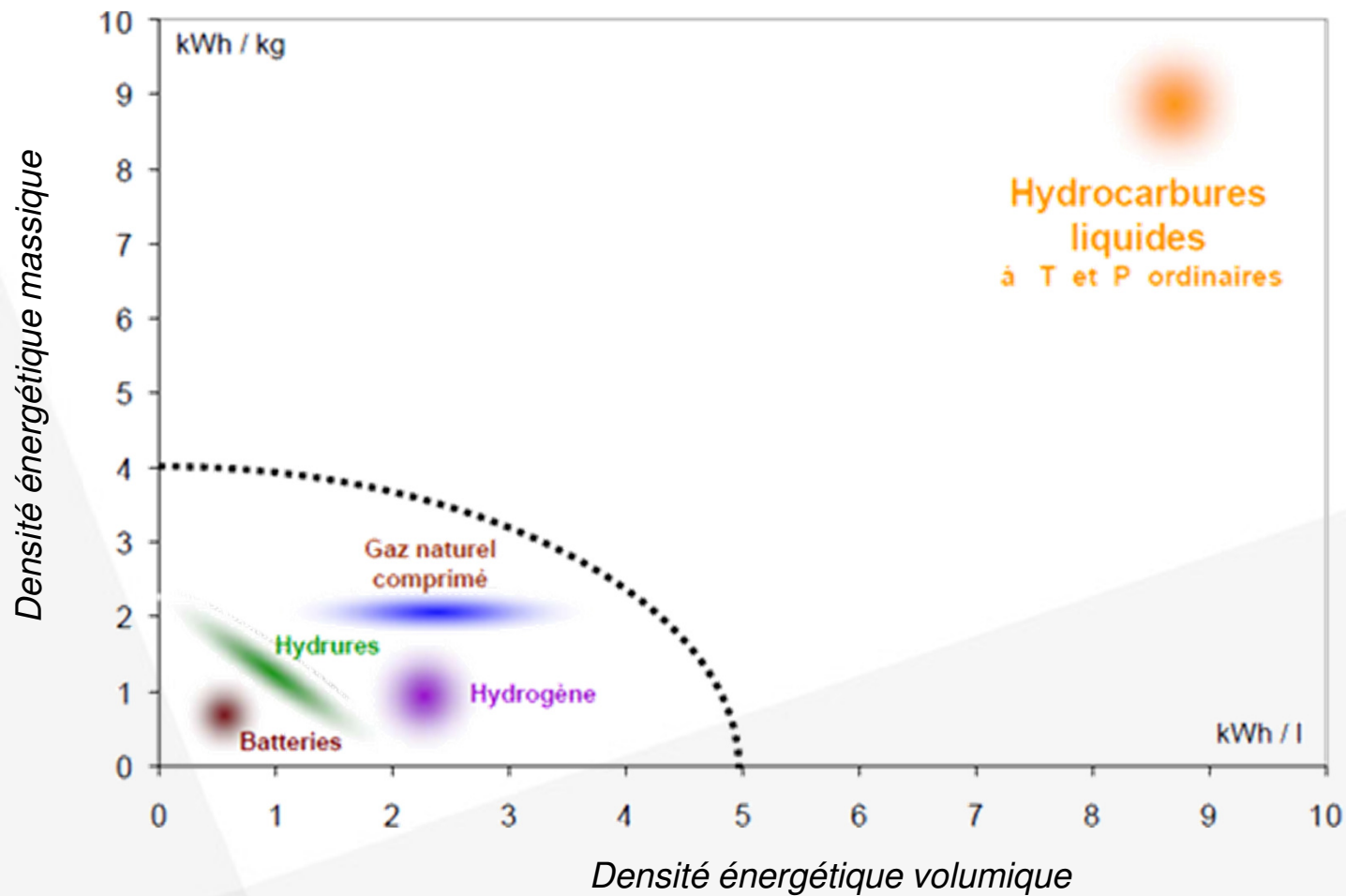
Répartition de la production manufacturière mondiale entre les pays développés et les pays du Tiers-Monde de 1840 à 2010 (en %)



Pourquoi sommes-nous drogués au pétrole dans le transport?



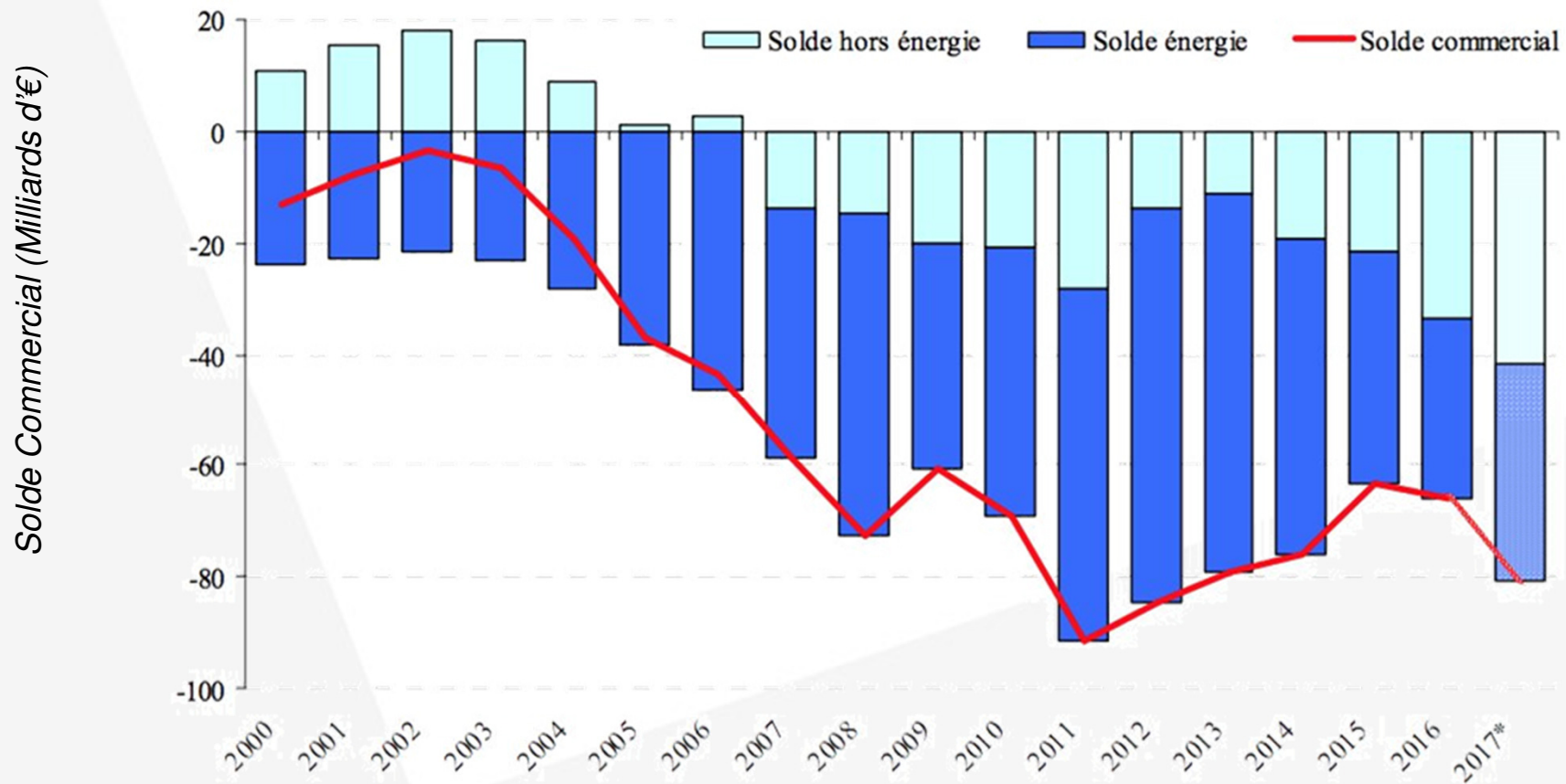
Densité énergétique des différentes énergies utilisées dans le transport



Et ça coute cher le pétrole?



Evolution du solde commercial par produit* de 2004 à 2017
- Mrds d'€ -



* Données CAF/FAB hors matériel militaire

Source : Douanes

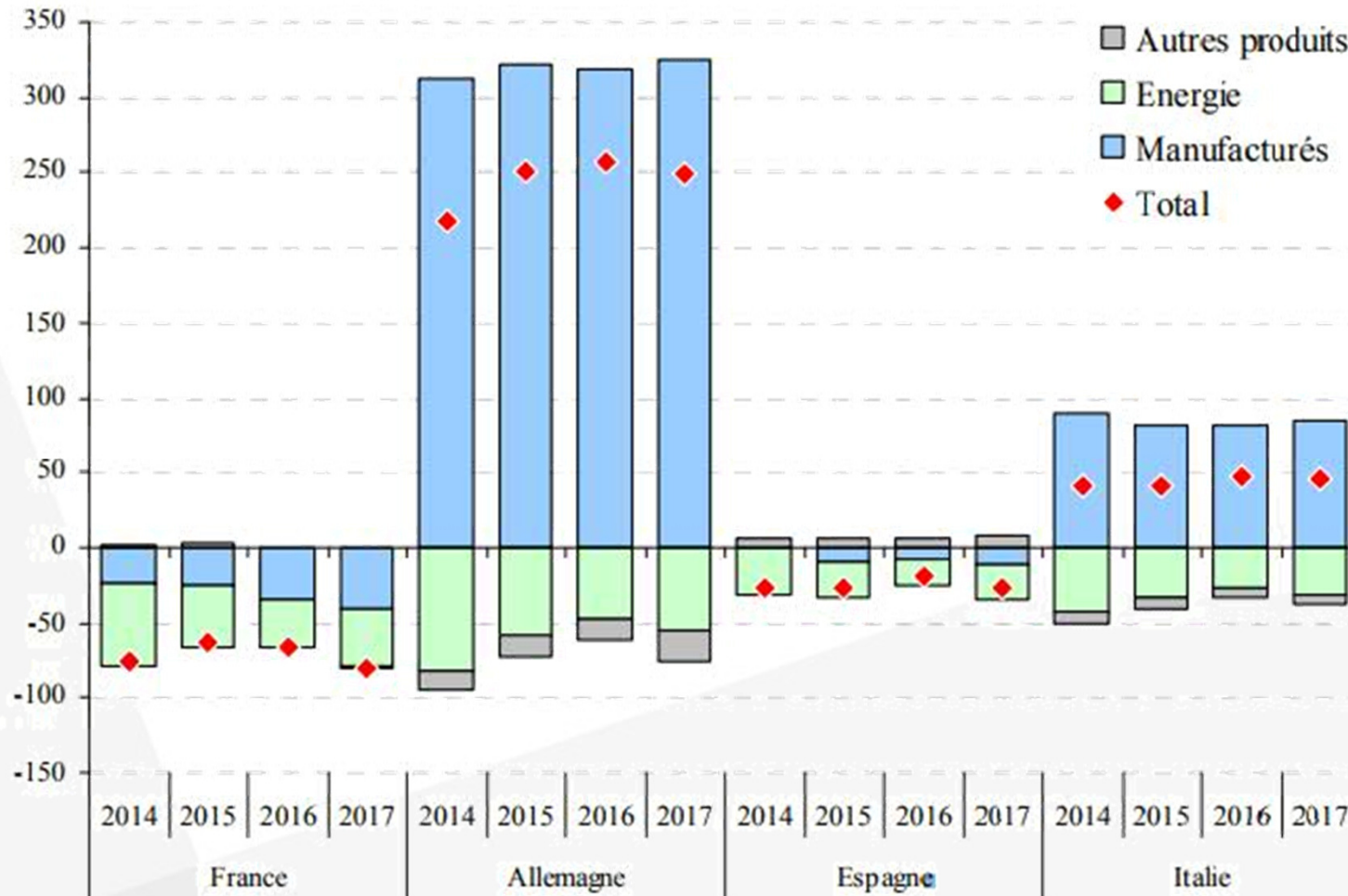
Un problème franco-français?



Soldes commerciaux de 2014 à 2017 par type de produit

- Mrds d'€ -

Solde Commercial (Milliards d'€)

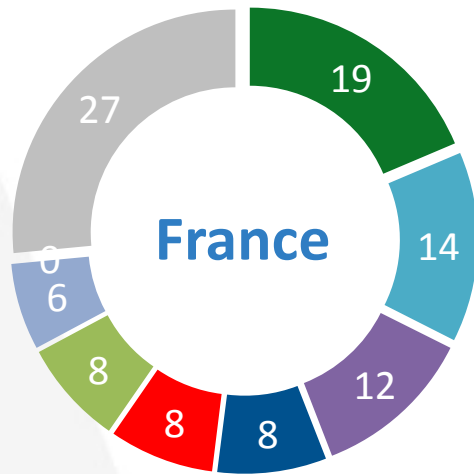


Sources : Douanes, Eurostat

A qui on l'achète notre pétrole ?

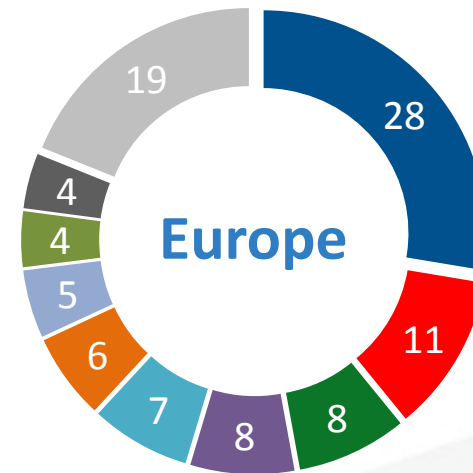


Importations de pétrole -2015, en% -



- Arabie Saoudite
- Nigeria
- Angola
- Azerbaïdjan
- Autres
- Kazakhstan
- Russie
- Algerie
- Norvège

Source: Bilan énergétique de la France pour 2014, Ministère



- Russie
- Nigeria
- Iraq
- Azerbaïdjan
- Angola
- Norvège
- Arabie Saoudite
- Kazakhstan
- Algerie
- Autres

Source: Eurostat

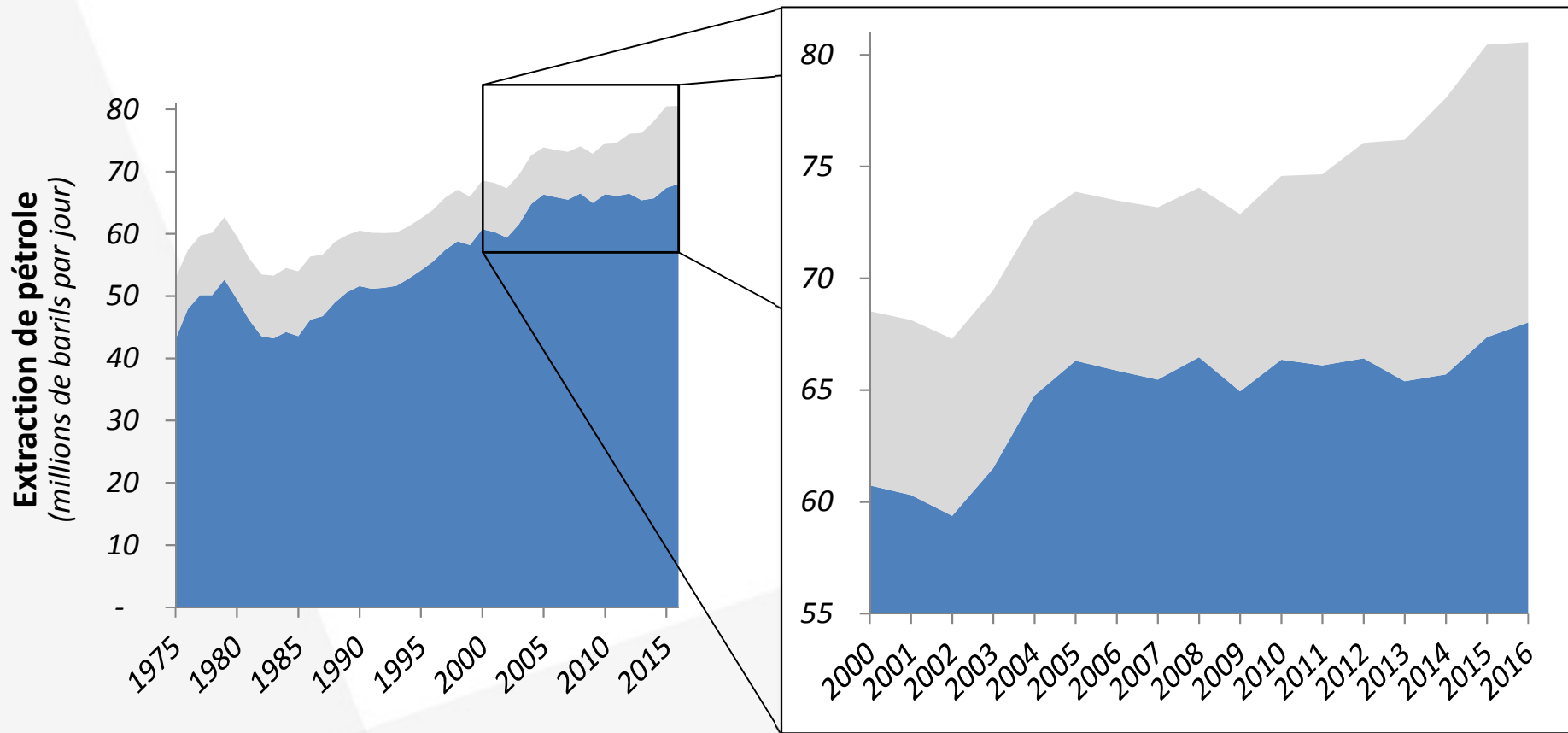
Le pic « tous pétroles » arrivera d'ici 2025.



Evolution de l'extraction de pétrole brut

- Millions de barils par jour, 1975 à 2016 -

■ World - North America ■ North America

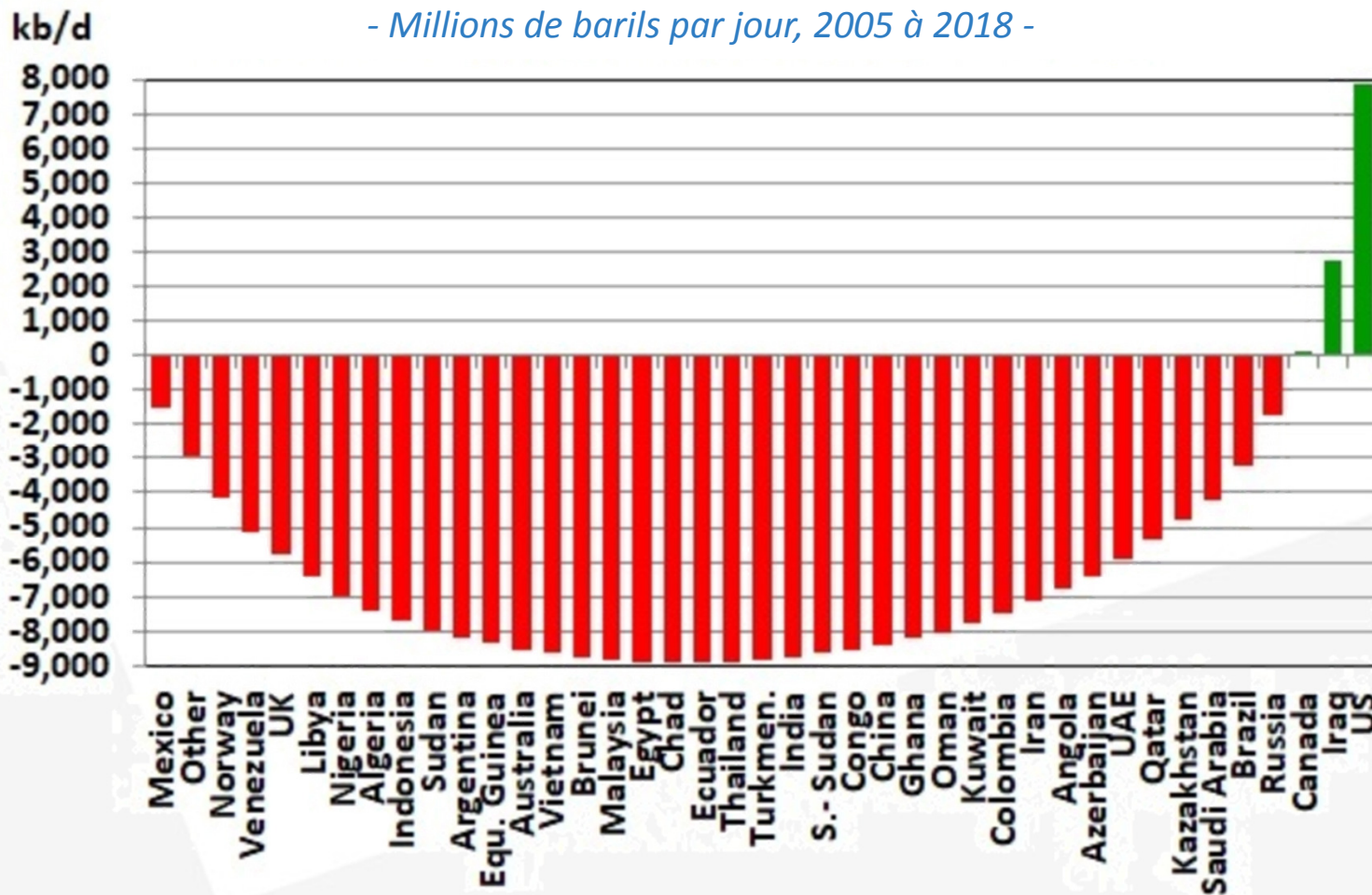


On attend juste le pic de l'Irak et des Etats-Unis



Variation de l'extraction de pétrole brut cumulée

- Millions de barils par jour, 2005 à 2018 -

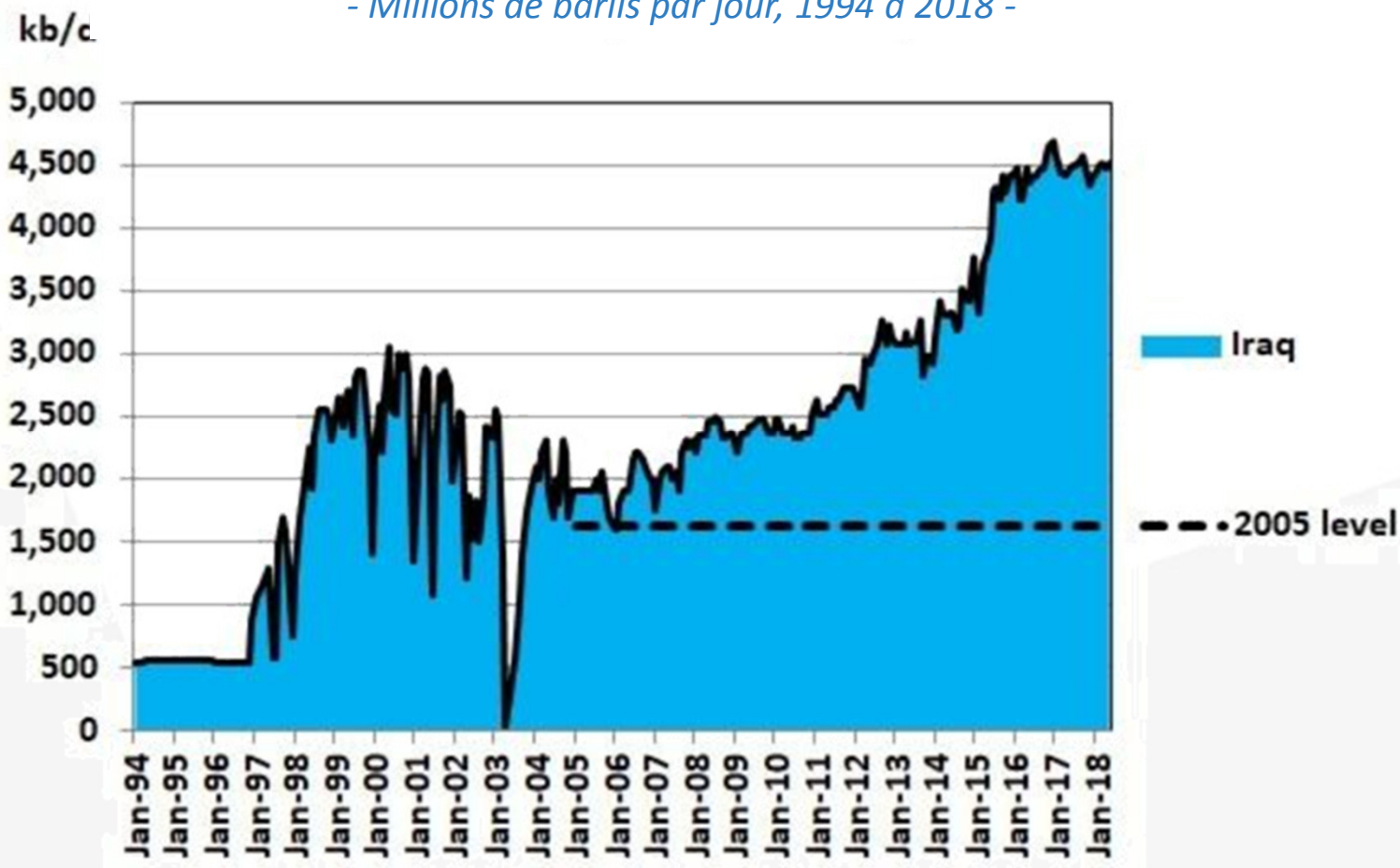


La bonne nouvelle, c'est qu'on a retrouvé les armes de destructions massives, cachées sous les champs de pétrole

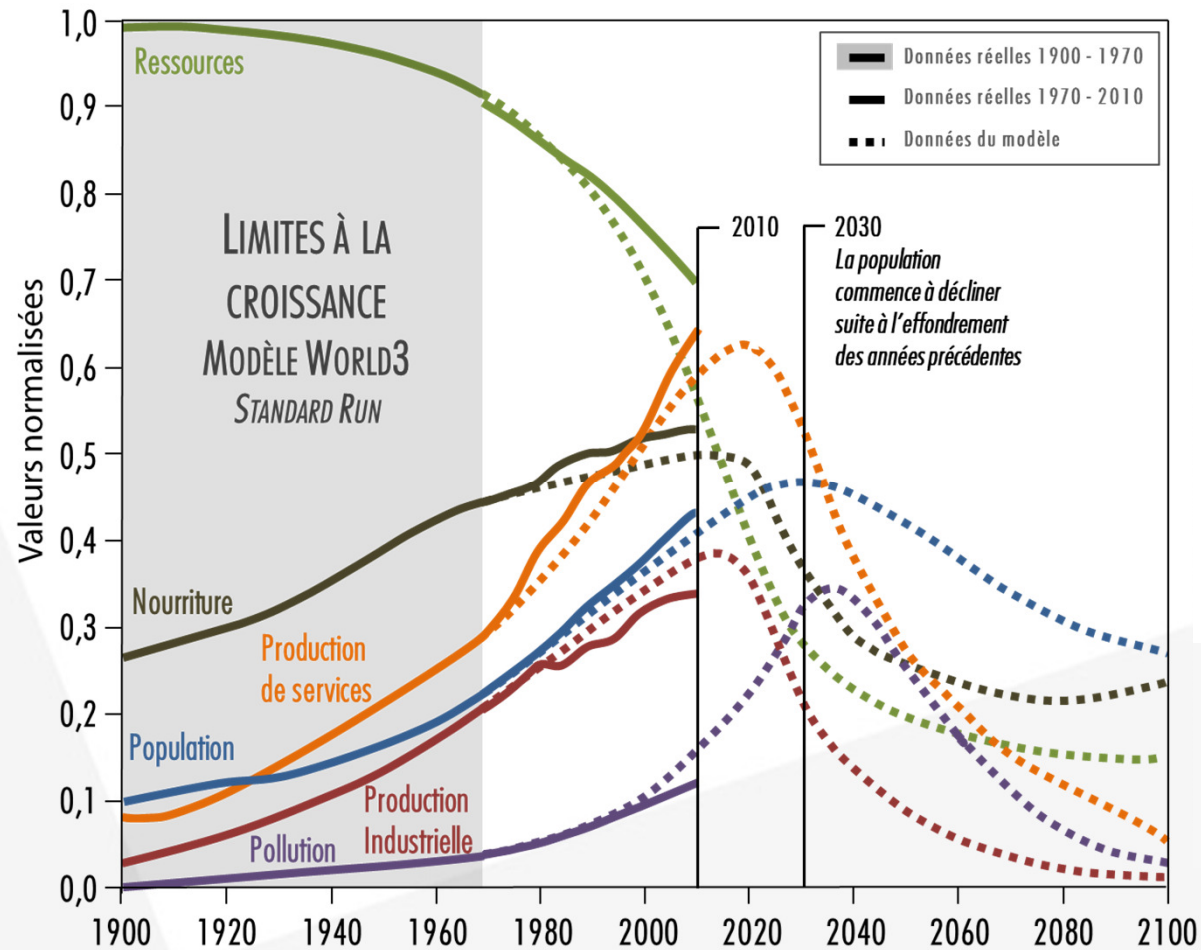


Extraction de pétrole en Irak

- Millions de barils par jour, 1994 à 2018 -



Et qui dit pic « tous pétroles » dit à priori que la croissance, c'est fini...

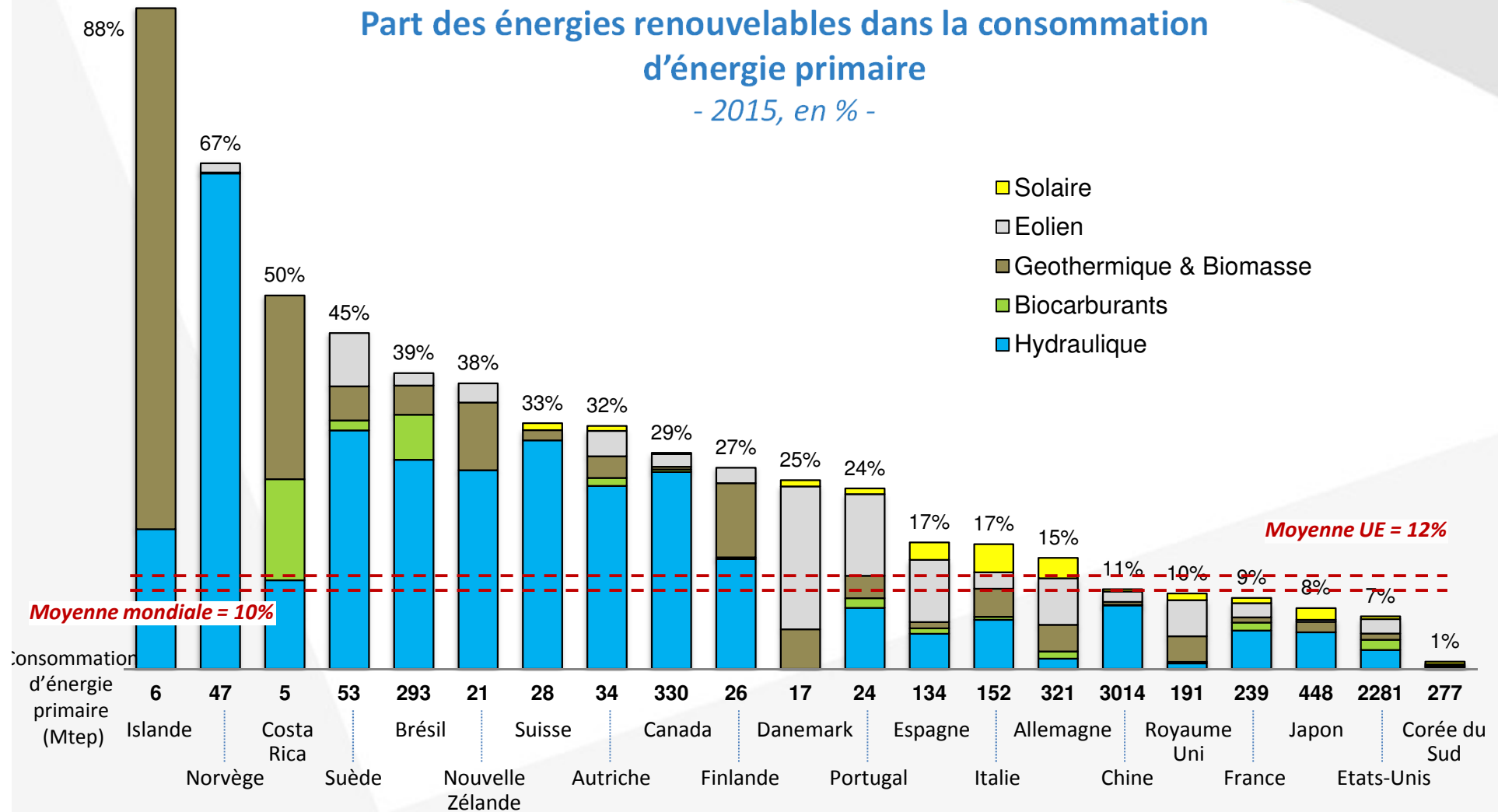


Source : Graham M. Turner 2012 – « [On the Cust of Global Collapse? Updated Comparison of the Limits to Growth with Historical Data](#) » GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society, Volume 21, Number 2, June 2012, pp.116-124 (Image: Raphaël Stevens)

Ne peut-on pas avoir une énergie 100% renouvelable comme au Moyen Âge?



Part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie primaire
- 2015, en % -



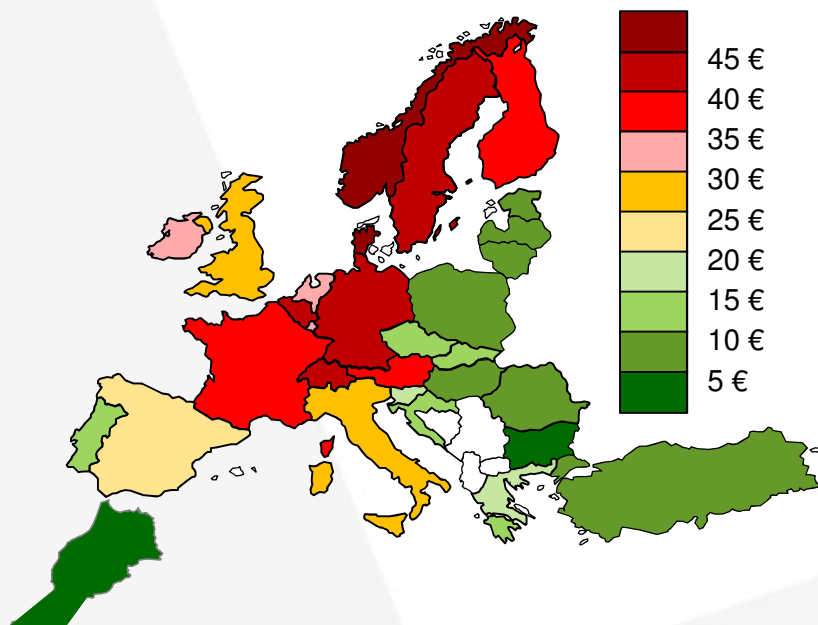
Facteur de conversion TWh / Mtep sur la base d'un rendement moyen de 38% des centrales thermiques modernes
Sources: [BP Statistical Review of World Energy 2014](#), [IEA](#)

Quelle est-ce qu'il ne faut surtout pas faire?



Niveau du coût de l'heure de travail

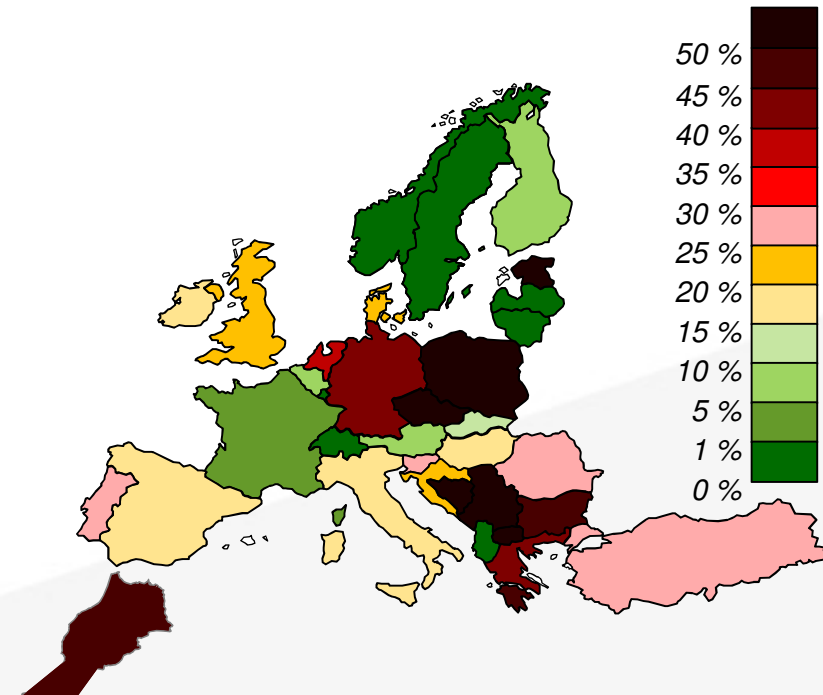
- Industrie manufacturière, €/h, 2018 -



Source : Coe – Rexecode, Eurostat, Inovev

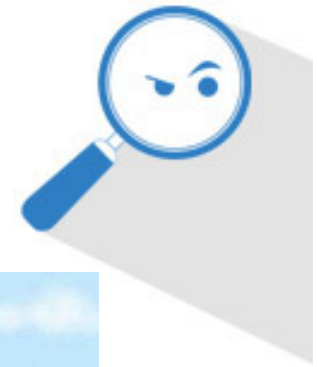
Production d'électricité à base de charbon

- % de la production totale d'électricité en 2015 -



Source : Worldbank

A chaque problème complexe
il existe une solution simple et fausse.

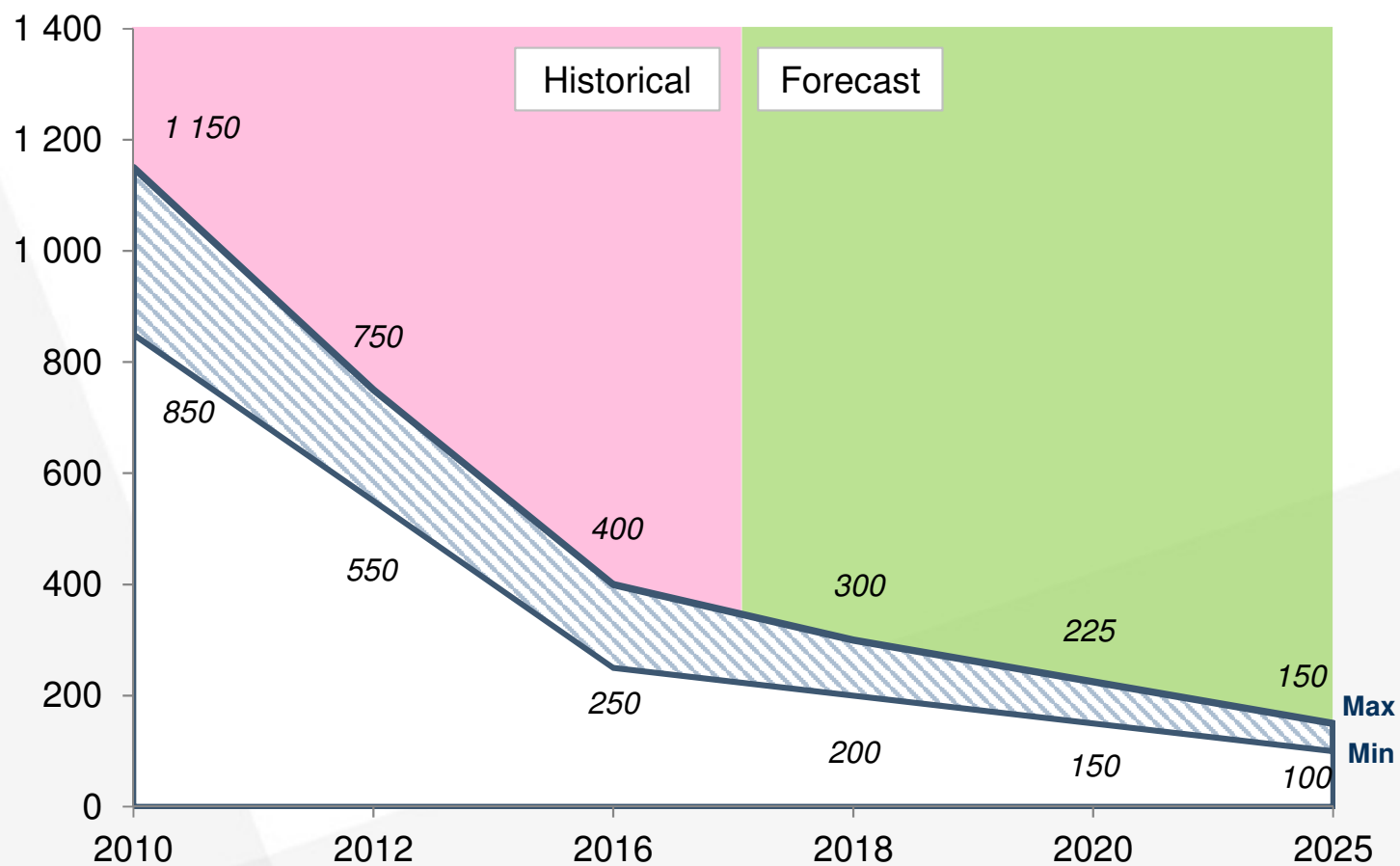


La diminution anticipée du prix des batteries a incité les constructeurs automobiles à développer des voitures électriques avec des batteries de capacité plus importante.



Evolution du prix des batteries "Lithium-Ion"





- \$/kWh, 2010 à 2015 -



Source: Frost & Sullivan

Vexés par Tesla, Audi et Mercedes prévoient de lancer des voitures électriques avec des batteries de plus de 60 kWh et une recharge ultra rapide à 350 kW



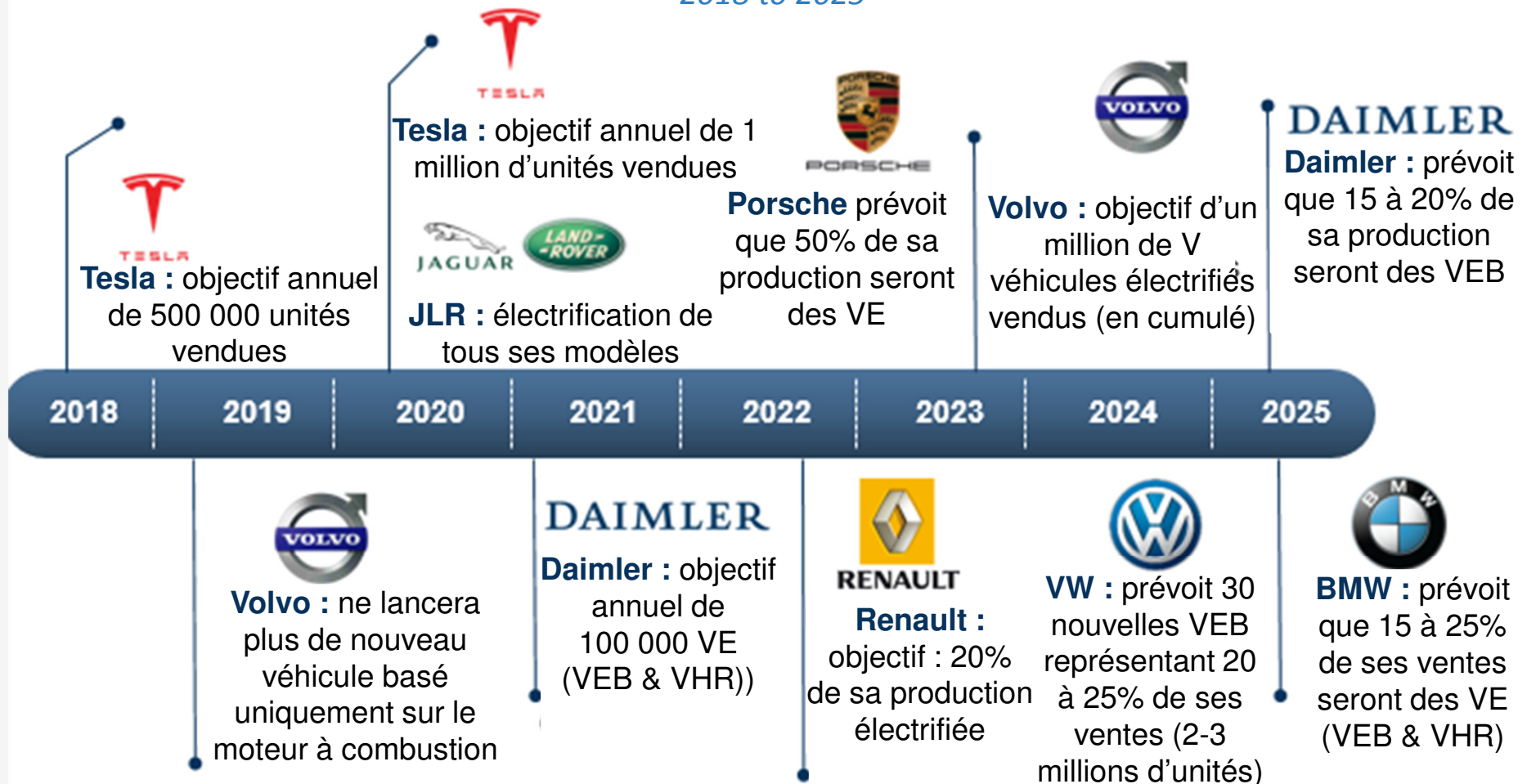
Constructeur	Modèle	Caractéristiques
	 <i>EQ</i>	<ul style="list-style-type: none">• Taille de la batterie – 79 kWh• Puissance – 300 kW• Couple – 700 Nm• Autonomie – 500 km (NEDC)• Capacité de charge – 350kW• Lancement – 2019
	 <i>e-Tron Quattro</i>	<ul style="list-style-type: none">• Taille de la batterie – 95 kWh• Puissance – 300 kW• Couple – 800 Nm• Autonomie – 500 km (NEDC)• Capacité de charge – 350kW• Lancement – 2018

Plus de 25 modèles de véhicules électriques avec une autonomie de +300km sont attendus d'ici 5 ans.
 Objectif : atteindre les 500km d'autonomie

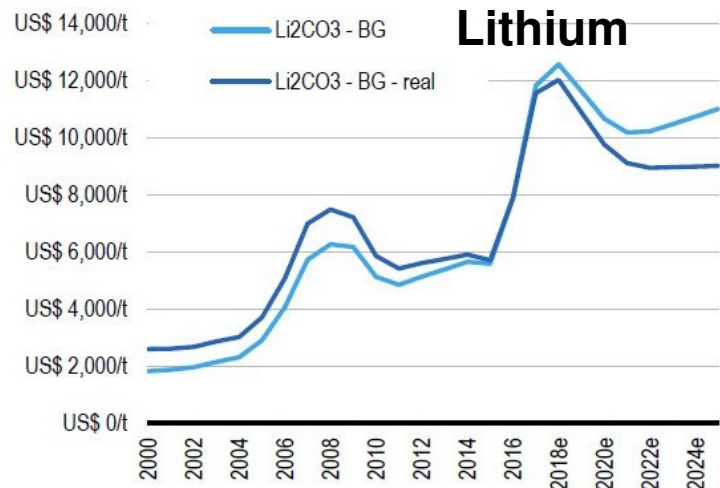


Les véhicules électriques annoncés par les constructeurs

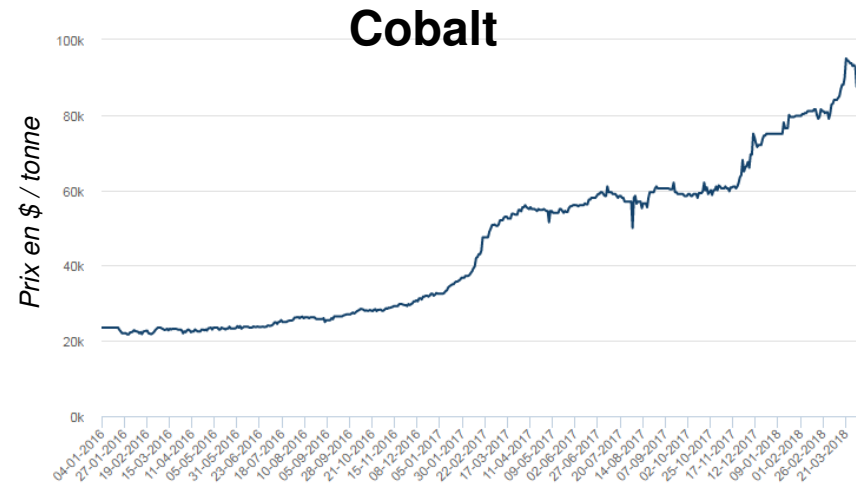
- 2018 to 2025 -



Remplacer un problème de disponibilité des hydrocarbures par un problème de disponibilité des métaux ne résout en rien ce problème et fait que le déplacer

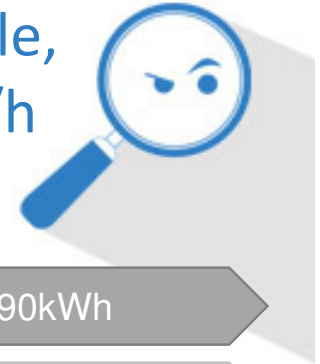


- 1 kWh batterie NMC = 120 gr de lithium = 650 gr équivalent carbonate de Lithium (LCE) = 8\$ BoM*
- 80 kWh batterie NMC = 9.6 kg de lithium = 50 kg de équivalent carbonate de Lithium (LCE) = 600\$ BoM*
- La production de 500 000 batteries par Tesla nécessiterait la production mondiale de lithium de 2015 destinée à la fabrication de batterie (40% de la production totale de lithium)
- Les prix du LCE ont été multiplié par 2 en 6 mois mais devraient se maintenir sous les 15 000\$/ tonne
- ➔ Pas de problème à court/moyen terme avec le lithium



- 1 kWh batterie Lithium-ion = 200 gr de Cobalt
- 80 kWh batterie Li-ion = 16 kg de Cobalt = 1 400\$
- Le cobalt est un sous-produit du cuivre et du nickel
- ➔ possibilité limitée d'augmenter sa production
- Le cobalt utilisé dans les batteries rechargeables représente près de 50% de la demande totale
- 60% du cobalt extrait vient de RDC & 75% du cobalt raffiné pour les batteries vient de Chine
- ➔ Stock de ressources potentielles limité & risques géopolitiques possibles pour l'approvisionnement en cobalt

L'autonomie annoncée des véhicules électriques est en ville, mais pas sur autoroute où elle chute de moitié à 130 km/h

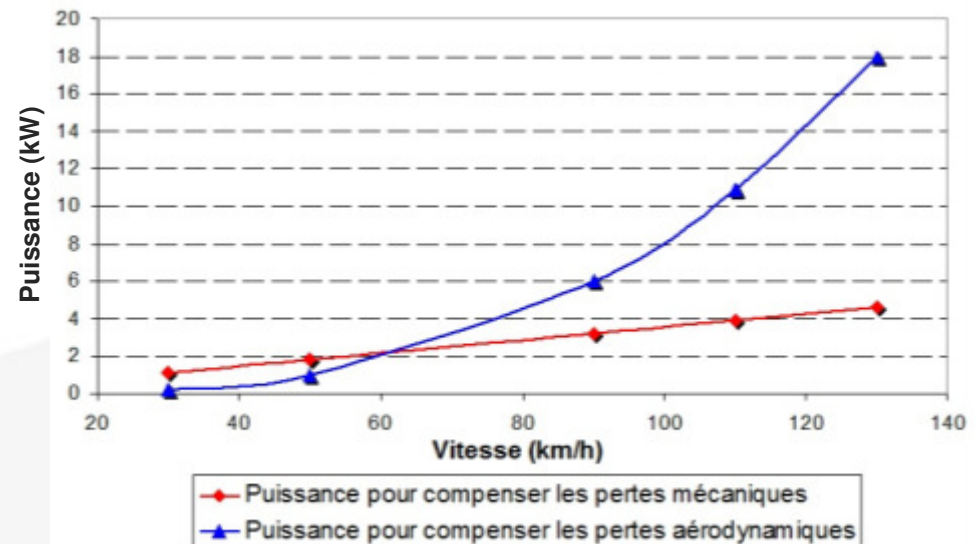


Capacité des batteries de VE, autonomie sur cycle NEDC & sur autoroute

Capacité des batteries	20-30kWh	30-60kWh	60-90kWh
Cycle NEDC	Jusqu'à 200 km	200-400 km	+400 km
Autoroute	Jusqu'à 100 km	100-200 km	+200 km
	2010	2015	2020

- Quand bien même les véhicules électriques à batterie atteignaient une autonomie de 500 km, ce serait en ville
- Sur autoroute en vitesse stabilisée à 130 km/h, l'autonomie est réduite de moitié par rapport à l'autonomie d'homologation
- A 130 km/h, la consommation d'énergie est plus que doublée par rapport à une conduite à 90km/h à cause des forces aérodynamiques qui triplent et représentent jusqu'à 80% des forces de frottement

Puissance requise pour compenser les forces de frictions mécaniques et aérodynamiques



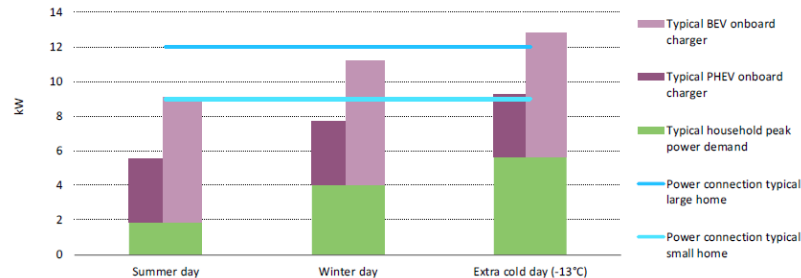
Source: [Gregory Launay](#)

Les VE vont nécessiter des investissements importants pour renforcer le réseau local de distribution mais aussi pour déployer des bornes de recharge rapide sur autoroute



Réseau de distribution local

Pointe de la demande d'électricité en Norvège dans les maisons avec recharge électrique



- Avec une **augmentation de 5 kW de la demande en pointe, plus de 30% des transformateurs en Norvège seraient en surcharge** et 10% des câbles hautes tensions devraient être remplacés
- Les « **Smart grid** » (réseaux intelligents) permettant le lissage des consommations seront critiques pour permettre le chargement de plusieurs VE dans un même quartier
- L'impact sur les réseaux de distribution sera plus important avec un véhicule électrique à batterie qu'un véhicule hybride rechargeable car il sera équipé d'un chargeur embarqué deux fois plus puissant : 7 kW au lieu de 3 kW

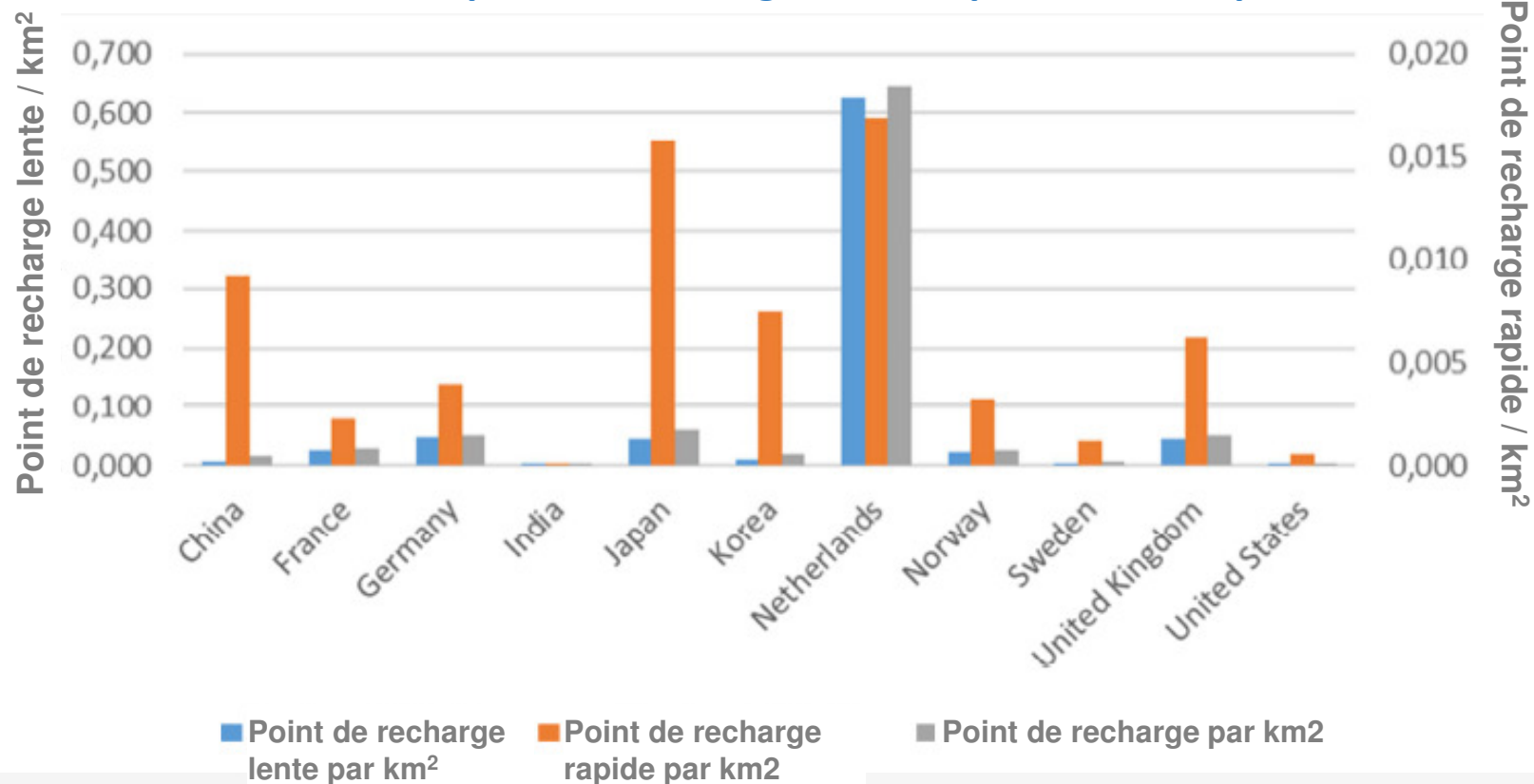
Recharges rapides sur autoroute

- Les projets de déploiement de bornes de recharge rapide **ne prévoient pas plus de 2 points de recharge ultra rapide (150kW)**, à comparer aux contre 10 pompes à essence/diesel par station
- Même avec des bornes de recharge ultra rapide, le temps pour « **faire le plein** » est **10 fois plus long qu'avec du carburant liquide** : 10 min pour 200 km vs. 3 min pour 600km
- Comme il y aura 5 fois moins de « pompes à électricité », « **faire le plein** » avec un VE sera **50 fois plus difficile qu'avec une voiture classique** à parc équivalent
- La majorité des conducteurs ayant tendance à partir en week-end / vacances aux même moment, une **infrastructure 50 fois moins dense** ne permettra pas de répondre aux pics de demande sans fils d'attentes longues
- Le déploiement d'un **réseau de bornes de recharge ultra-rapide n'est pas nécessaire pour les véhicules hybrides rechargeables** puisque l'infrastructure de recharge est en place

Même avec un réseau de bornes de recharge dense, les ventes de véhicules électriques ne suivent pas forcément, comme au Japon ou au Pays-Bas



Densité de point de recharge lente, rapide et totale par km²



Source : IEA (2017), EAFO (2017)

55000 véhicules électriques ont été vendus au Japon en 2017, sur 4.2 millions de voitures particulières, ce qui représente 1.3% des ventes

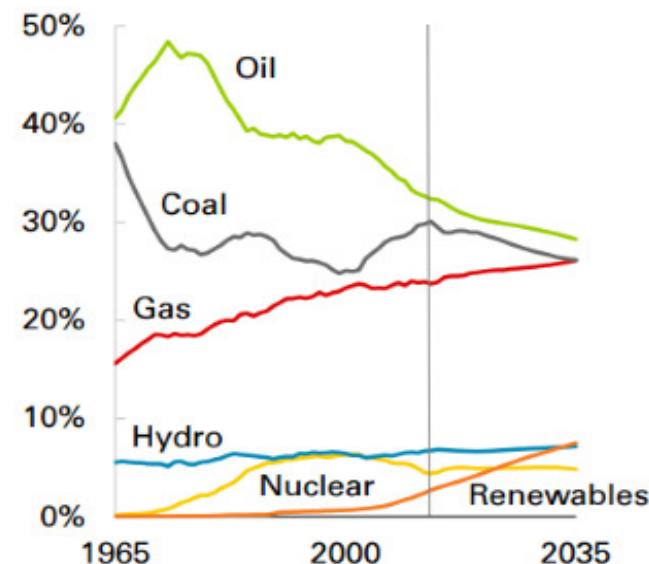
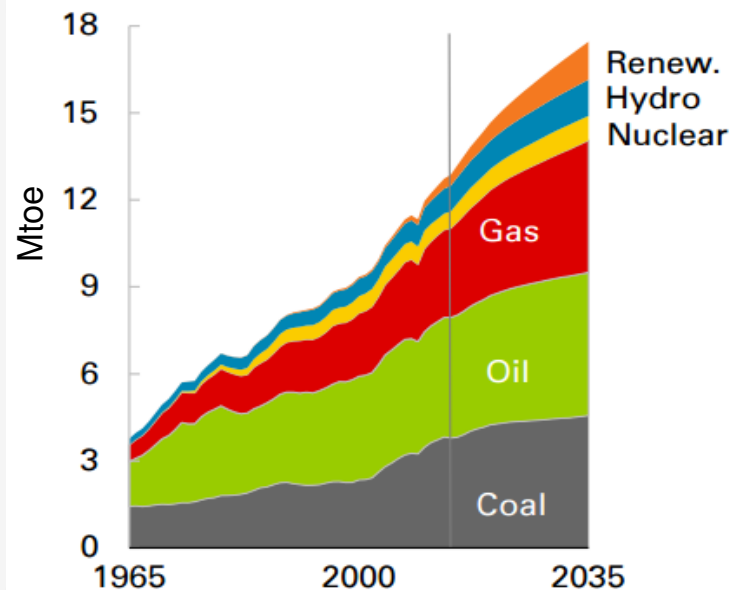
Avec une d'électricité provenant à 80% de centrales thermiques, le rendement énergétique « du puit à la roue » des véhicules à pile à combustible (FCEV) est inférieur à 10%



- Le rendement énergétique « du puits à la roue » des véhicules à pile à combustible (FCEV) est actuellement deux fois plus faible que celui des véhicules essence et diesel
- De l'hydrogène "propre" issu d'électricité fatale venant des EnR intermittentes est nécessaire pour faire des véhicules à pile à combustible une alternative plus efficace énergétiquement
- Les EnR ne devraient représenter que 8% du mix énergétique primaire en 2035. L'hydrogène pouvant être produit à partir de leur énergie fatale ne représentera donc qu'un pourcentage limité

Evolution de la consommation mondiale d'énergie primaire

- En million de tonnes équivalent pétrole & %, 1965 à 2035 -

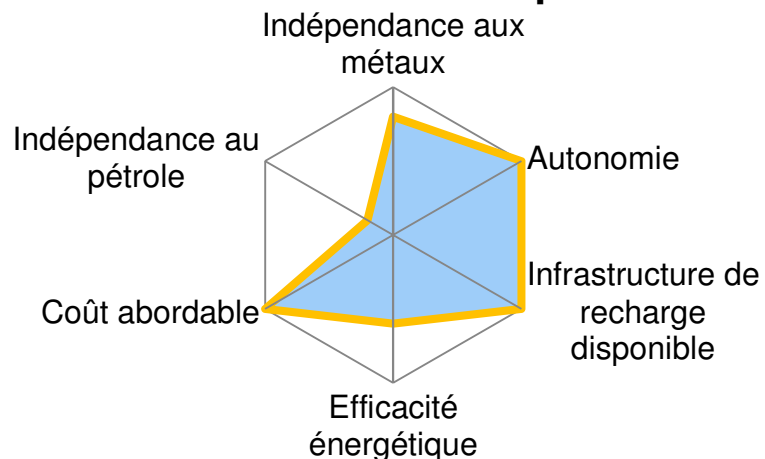


Source: [BP Energy Outlook 2035](#)

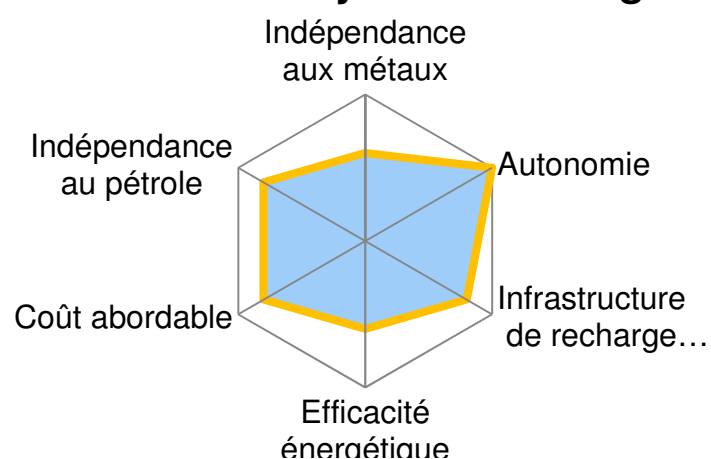
Le véhicule hybride rechargeable est la meilleure alternative pour remplacer à grande échelle les véhicules thermiques



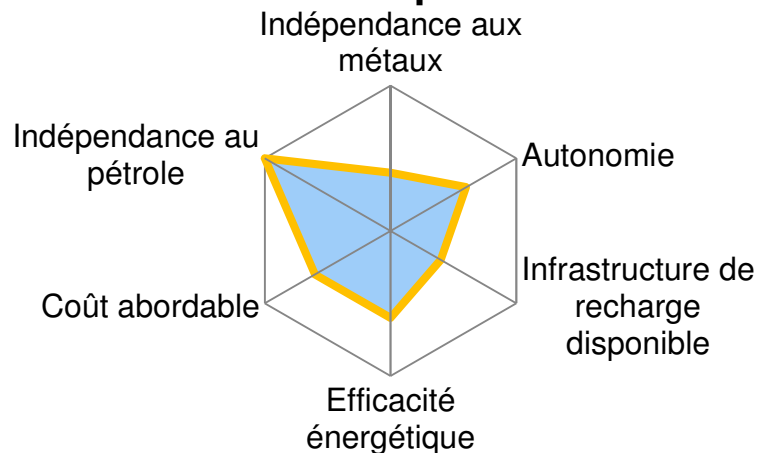
Véhicule Thermique



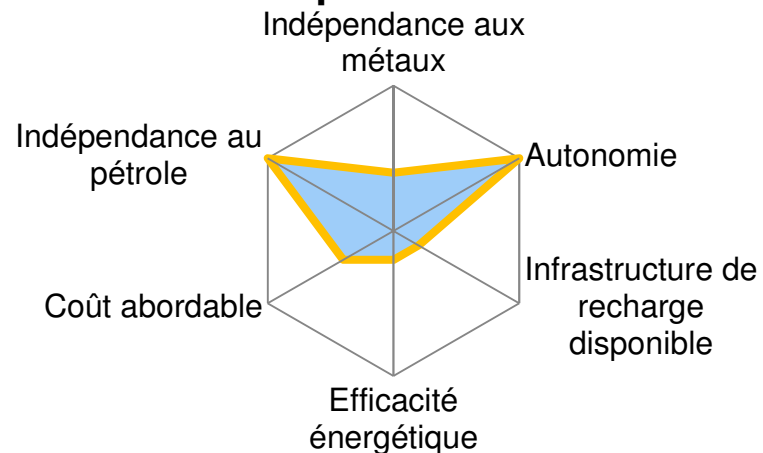
Véhicule Hybride Rechargeable

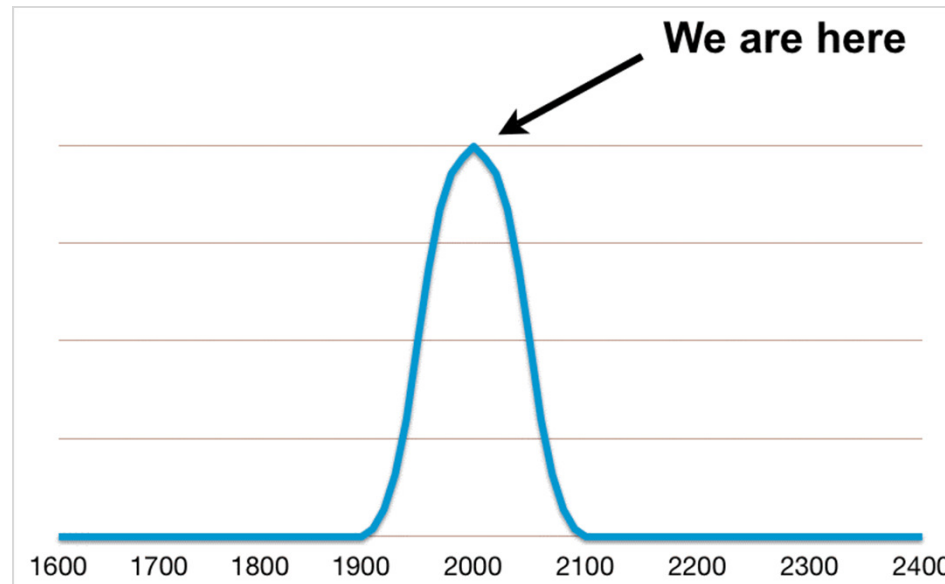


Véhicule Electrique à Batteries




Véhicule Electrique à Pile à Combustible





Nicolas Meilhan

Ingénieur-Conseil
Energie & Transport

 (+33) 6 74 09 56 09

 nmeilhan@alum.mit.edu

