

Hackathon CampOSV
(Open Source Vehicle)

Energies renouvelables et véhicules électriques

(Renewable energy and electric vehicles)

Bernard MULTON

ENS Rennes (département de Mécatronique)

Laboratoire SATIE - CNRS

Quelques constats

Transports et impacts



Crédit : AFP / FRANCOIS GUILLOT

Energie et ressources

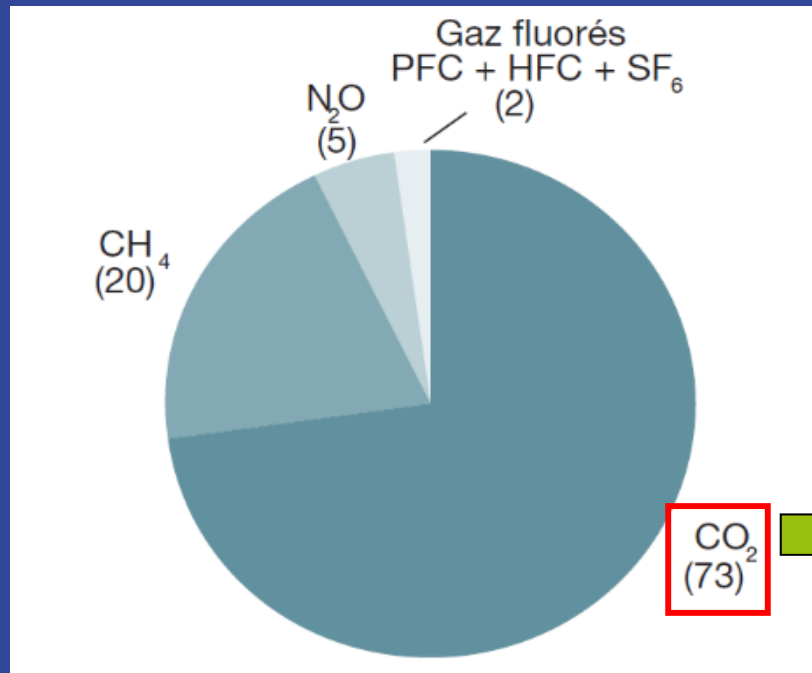


CC0 Creative Commons <https://pixabay.com>

Emissions de gaz à effet de serre et transports

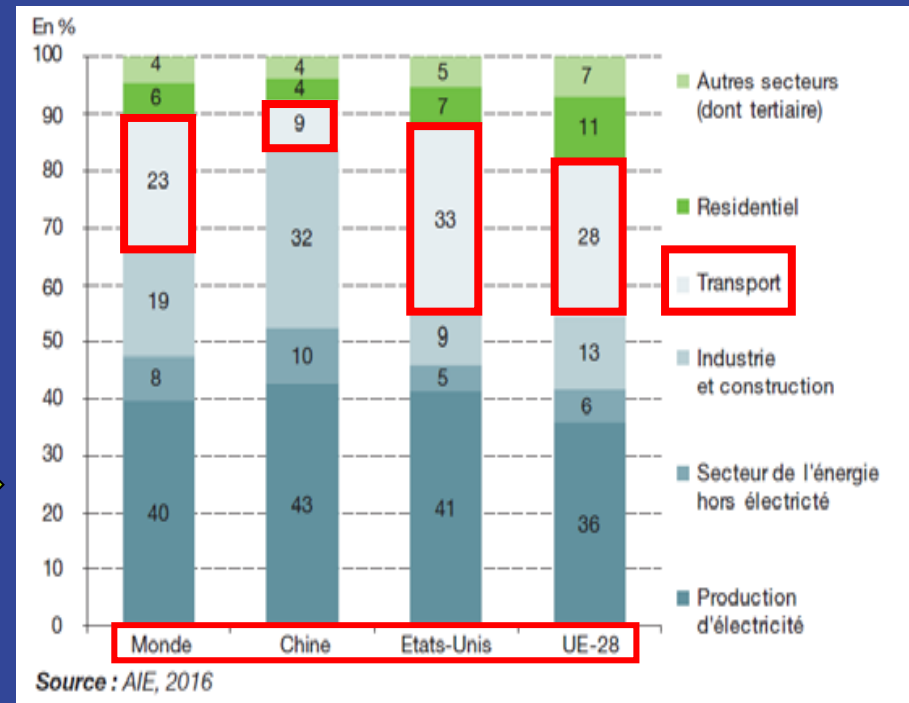
Année 2014

Contributions à 100 ans,
par types de gaz à effet de serre en %



Source : Chiffres clés du climat France, Europe et Monde, DataLab CGDD, Edit. 2018

Origines (en %) des émissions de CO₂
par zones géographiques



Source : AIE, 2016

Transports, au niveau mondial :

23% des émissions de CO₂

18% de la contribution au réchauffement climatique

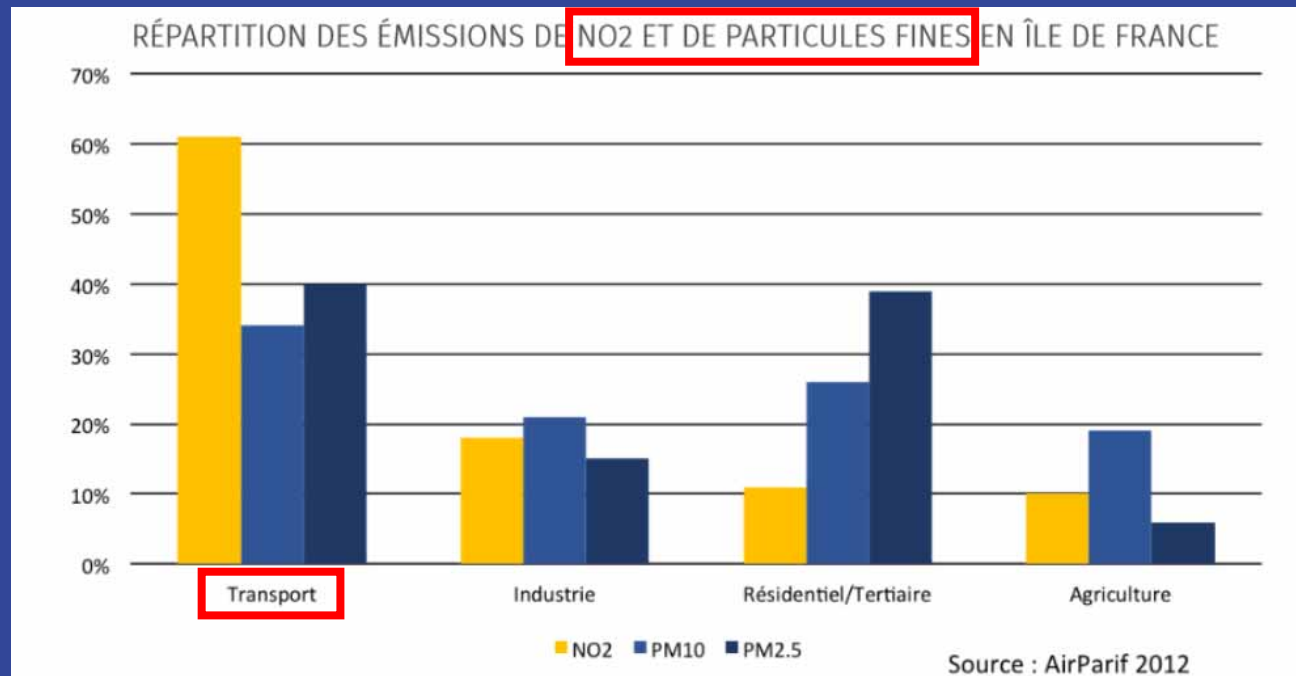


Transports et autres impacts

Polluants toxiques : oxydes d'azote, particules fines, ozone ...

Exemple
en Ile de France :

+ ozone,
COV + CO...



Coûts sociaux, en zones denses et très denses :

entre 5 et 20 c€/km pour les véhicules particuliers **diesel**

entre 1 et 4 c€/km véhicules particuliers **essence**

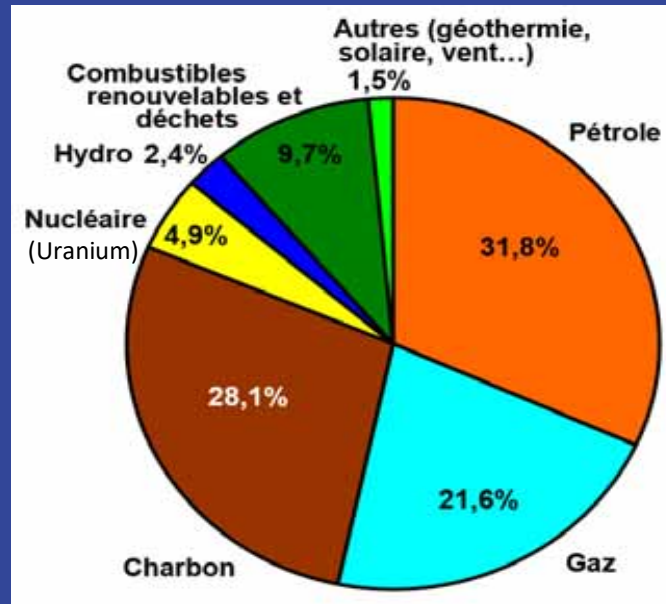
Source : Commissariat Générale à la Stratégie et la Prospective 2014

Au total : 20 à 30 Mds d'Euros par an

Source : CGDD, Santé et qualité de l'air extérieur Rapport de la commission des comptes et de l'économie de l'environnement. 2012

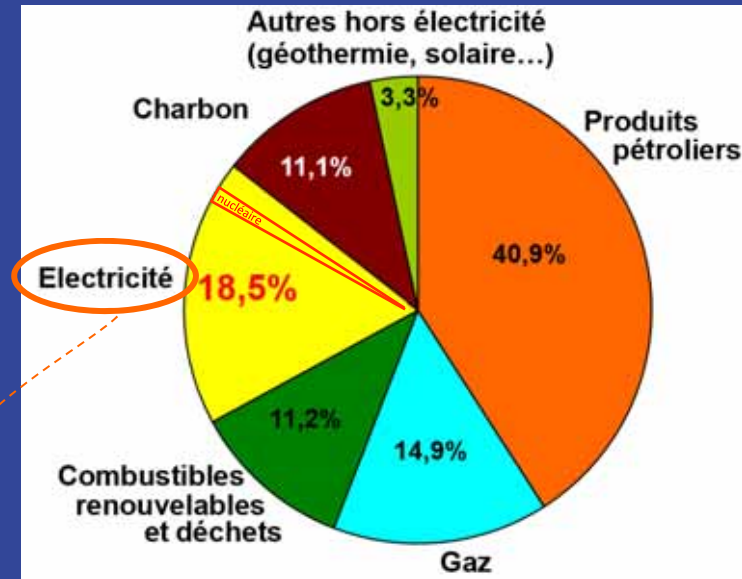
Énergie : bilan mondial 2015, place de l'électricité

Énergie primaire



Total \approx 13,6 Gtep
(158 000 TWh_p)

Énergie finale



Total \approx 9,4 Gtep
(109 000 TWh)

+3%/an
(moyenne
2005-2015)

+1,7%/an
(moyenne
2005-2015)

> 60 000 TWh_p (\approx 40%)
prélevés pour :
24 400 TWh_e
d'électricité produite

pour commercialiser :

20 100 TWh_e d'électricité finale
(livrée aux compteurs)

Source des données : Agence Internationale de l'énergie
traitement par l'auteur

Remarque sur la « Vraie » part du nucléaire : **4,9 % de l'énergie primaire**

mais 1,9 % de l'énergie finale car 10,5% de l'électricité est d'origine nucléaire ($10,5\% \times 18,5\% = 1,9\%$)

Ressources et réserves primaires

Non renouvelables

COMBUSTIBLES FOSSILES (charbons, pétroles, gaz naturel) :

Ressources : ~ 5000 Gtep (400 à 700 pétroles – 250 gaz – 3500 charbons)

Réserves prouvées : 1000 Gtep (240 pétroles, 170 gaz, 650 charbons)

URANIUM FISSILE :

Ressources : ~ 150 Gtep (avec réacteurs actuels)

Réserves estimées : 60 Gtep

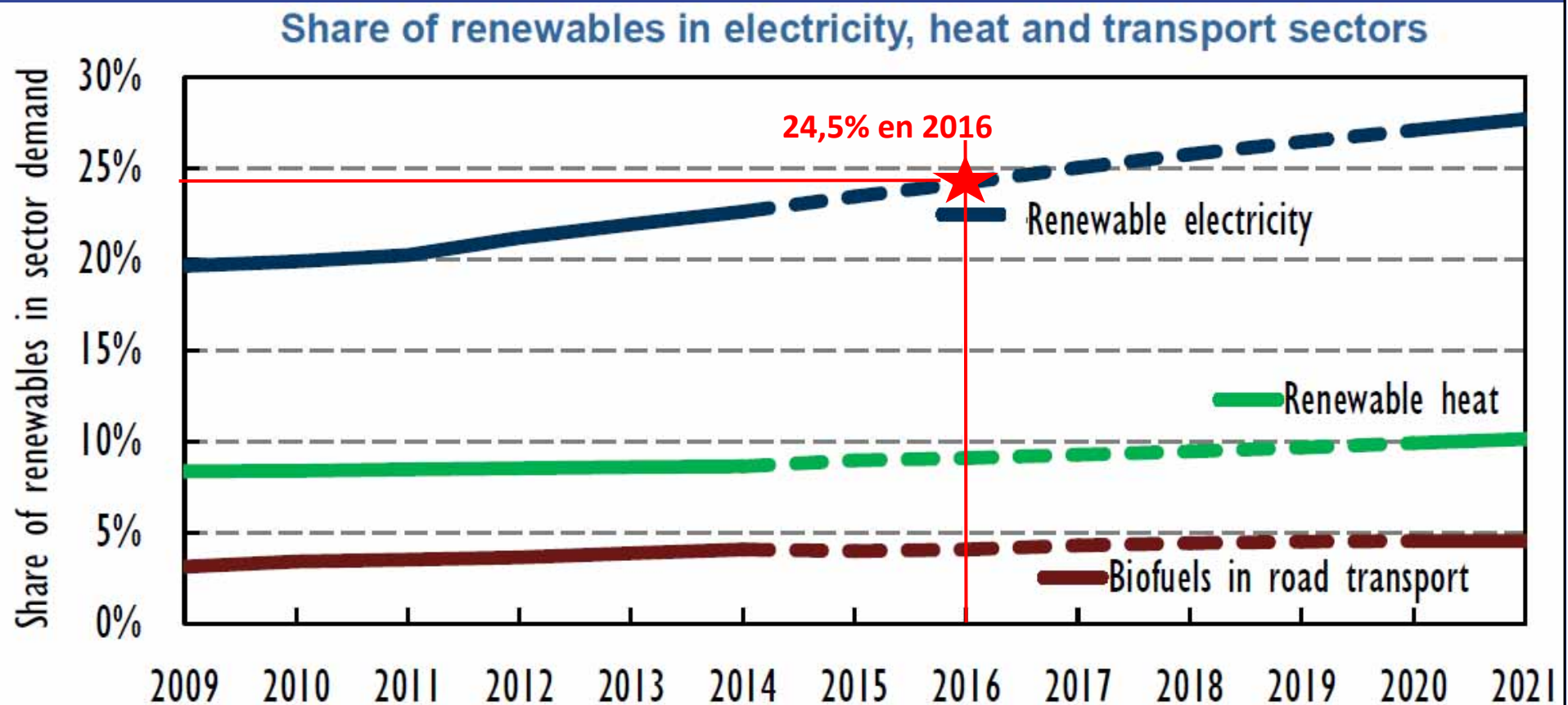
Renouvelables

RAYONNEMENT SOLAIRE ET SOUS-PRODUITS AU SOL :

100 000 Gtep... par an !

Capacité des vecteurs à intégrer les ressources renouvelables : **l'électricité se démarque clairement**

D'après l'agence internationale de l'énergie

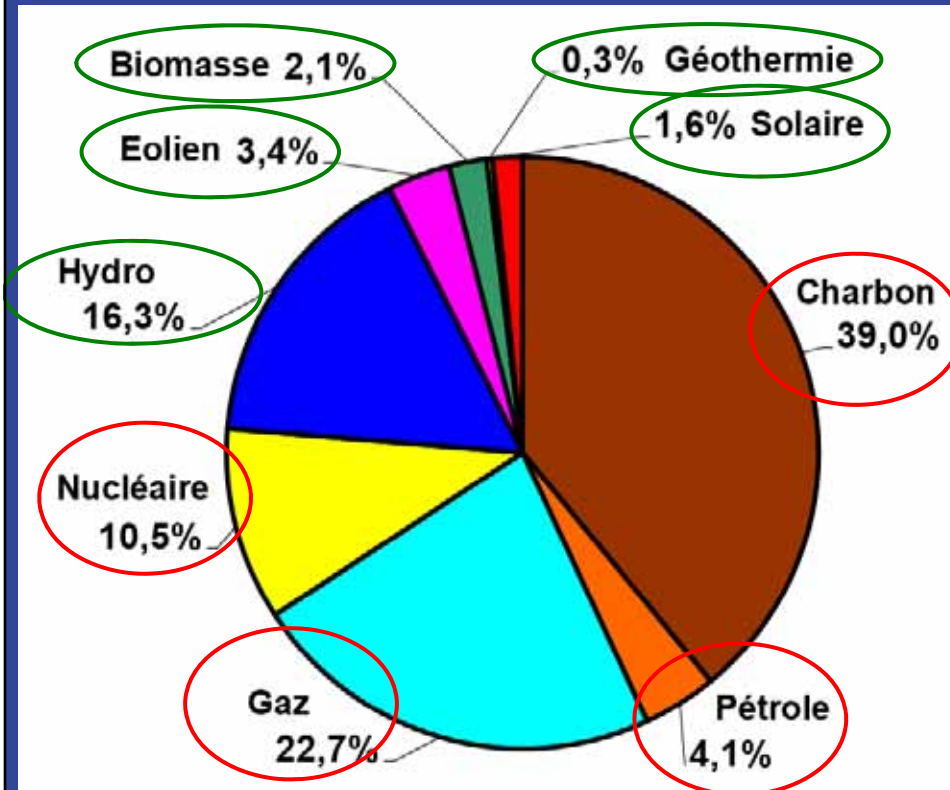


Source : (MTMR) Medium- Term Renewable Energy Market Report 2016, IEA 25 oct. 2016

Remarque : en outre, l'AIE sous-évalue de façon chronique le développement des renouvelables

Production mondiale d'électricité (2015) et tendances

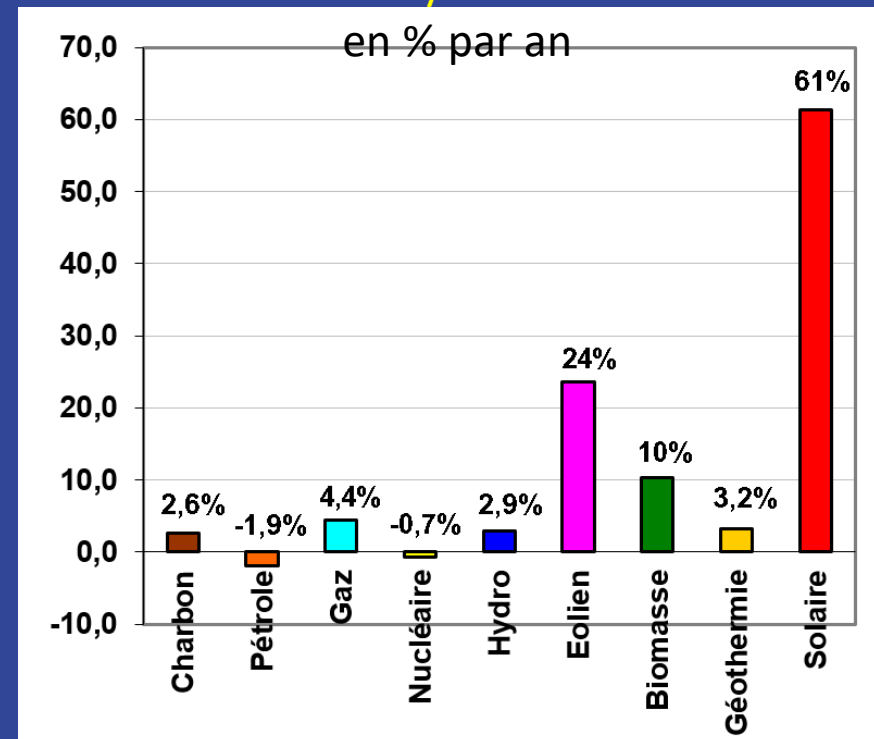
24 400 TWh +3% moy. 10 ans (2005-2015)



Non renouvelables : + 2,3% /an sur 10 ans

23,7 % renouvelables : + 5,7% /an sur 10 ans

Evolution moyenne sur 10 ans



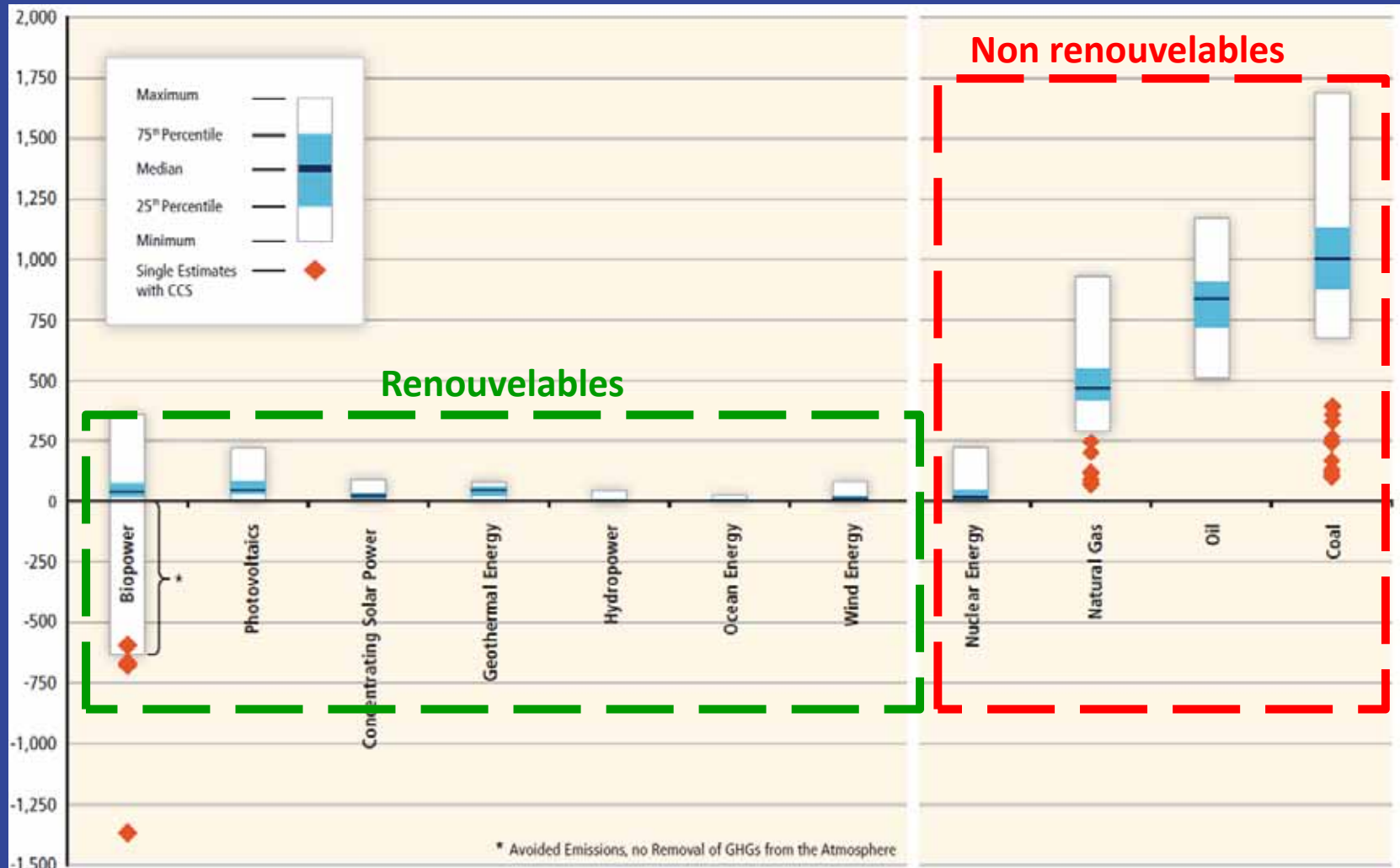
En 2016 : 75,5% NR et 24,5% Ren.

Source : Renewables 2017 Global Status Report

Source : données IEA, analyse auteur

Emissions de GES, sur tout leur cycle de vie, des filières de production d'électricité

grammes eq. CO₂ / kWh_e

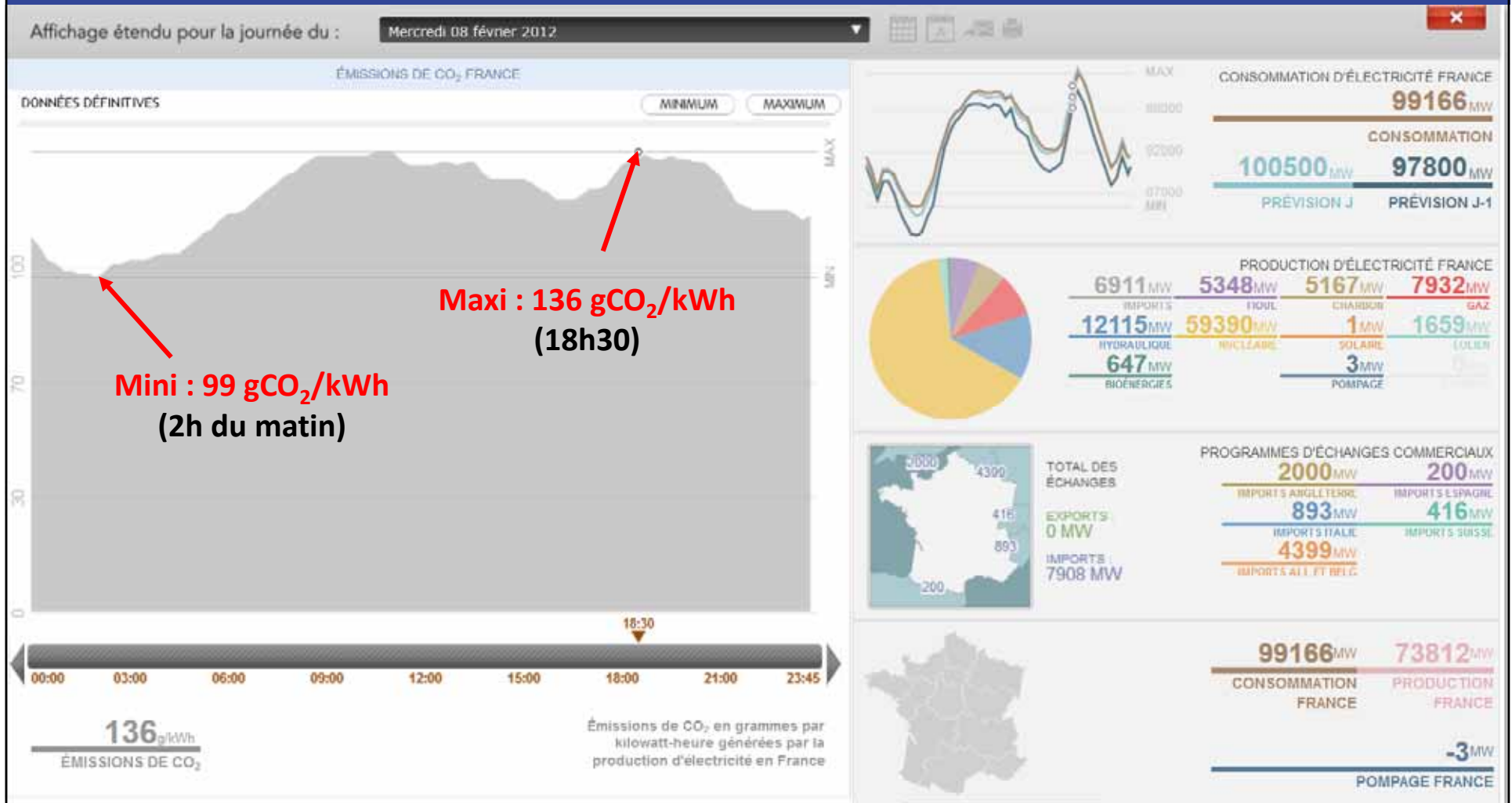


Source : IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, 2011
Ch. 9 : Renewable Energy in the Context of Sustainable Development
https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/SRREN_FD_SPM_final.pdf

Rejets de GES de la production d'électricité

Ils dépendent fondamentalement du mix électrique instantané

Exemple : en France, un jour de grand froid (émissions nationales, hors imports...)



<http://www.rte-france.com/fr/eco2mix/eco2mix-co2>

Quelles solutions pour des automobiles « soutenables » ?



Source : <http://bercy.blog.lemonde.fr/2010/12/10/biocarburants-les-deputes-prolongent-pour-deux-ans-le-niveau-de-defiscalisation/>

?



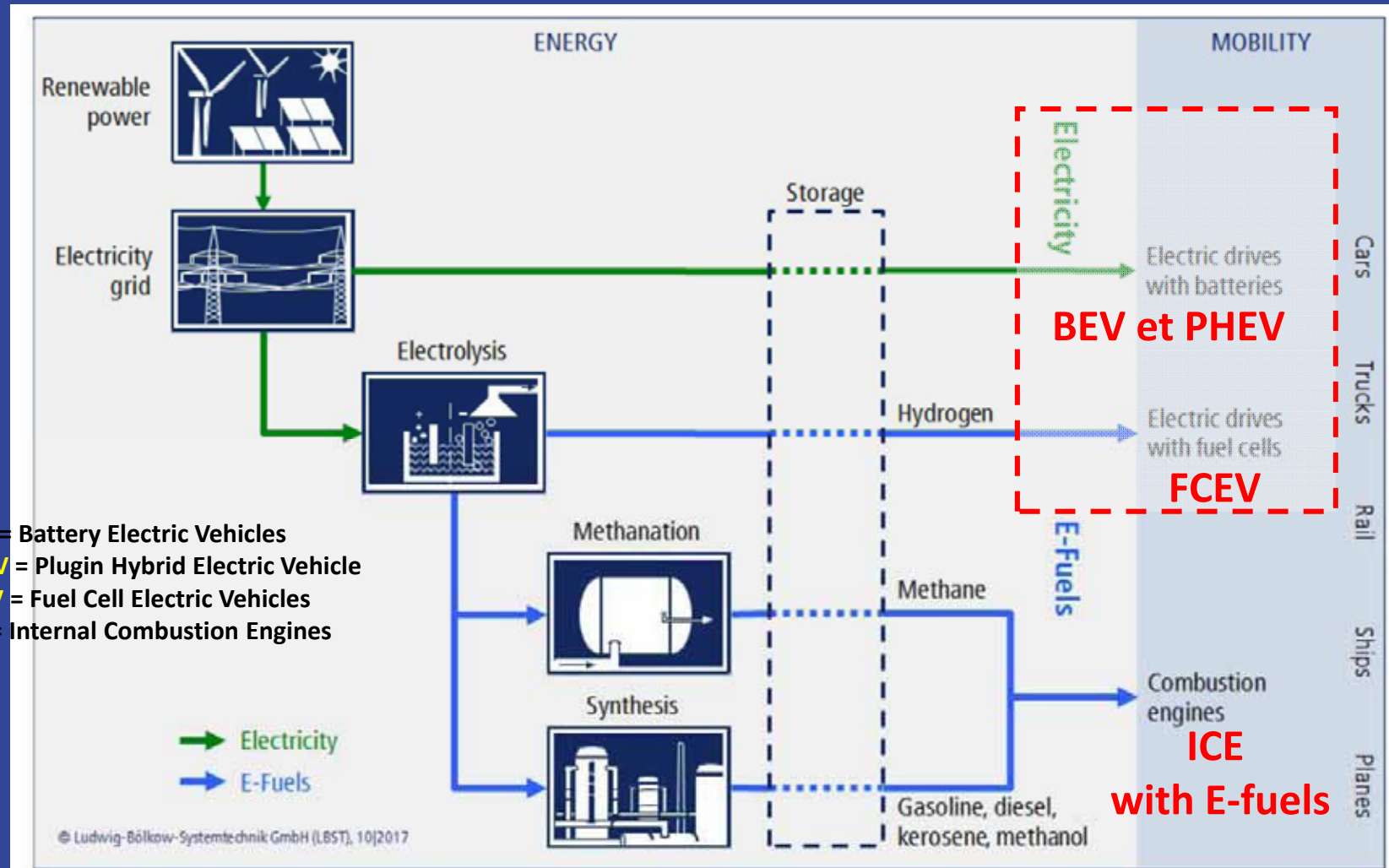
Bornes Bolloré © DR



Toyota Mirai
11

Alors, quelles solutions pour des transports terrestres moins impactants ?

Passer par l'électricité renouvelable :

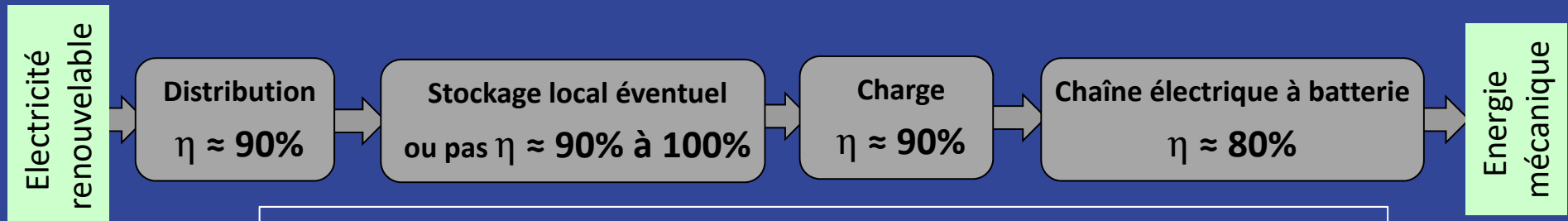


Source : «E-FUELS» STUDY The potential of Electricity-based fuels for low-emission transport in the UE, LBST & DENA, nov. 2017

Véhicules électriques : à batterie (BEV) ou à pile à combustible (FVEV) ?

Alimentation en électricité renouvelable à faibles impacts

1- BEV (Battery Electric Vehicles)



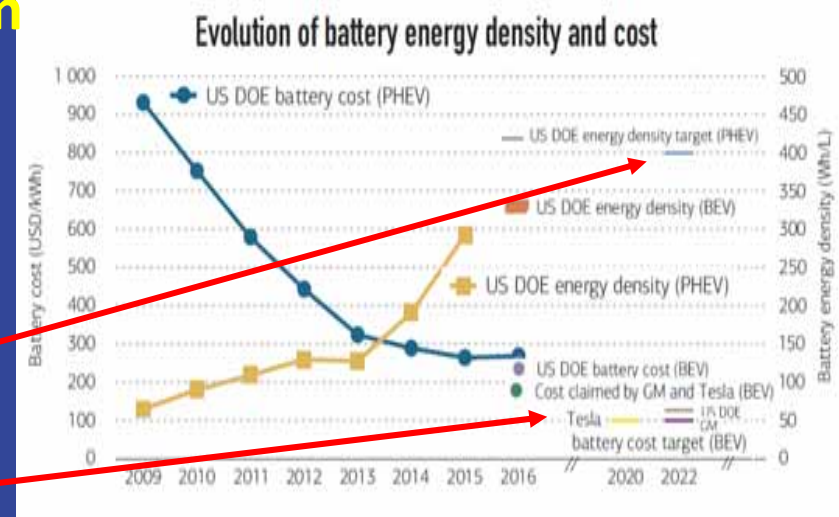
$\eta_{global} \approx 65\% \text{ à } 52\%$ (avec stockage intermédiaire)

En France : **part énergie** environ **2 c€/km**

Batterie (pour 400 km) : 40 à 50 kWh
8 à 10 k€ et 270 à 330 kg

Evolutions (lithium-ion)
(densité et prix) de 2009 à 2016:

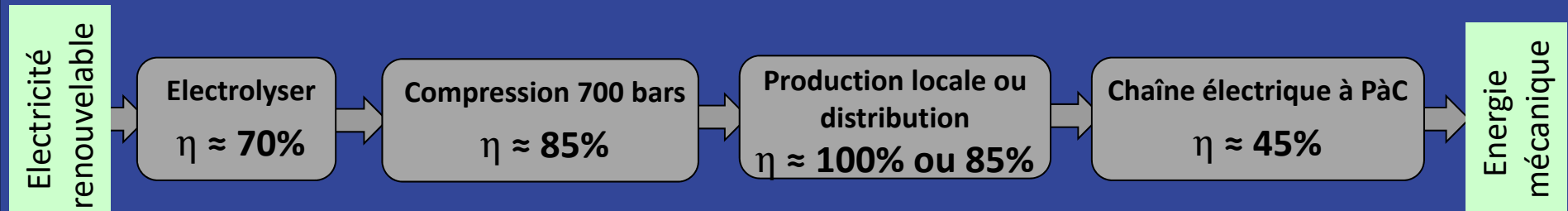
Vers 200 Wh/kg et 400 Wh/L
et 100 \$/kWh



Source : Global EV Outlook 2017, IEA (june 2017)

Véhicules électriques : à batterie ou à pile à combustible ?

2- FCEV (Fuel Cell Electric Vehicles)



$\eta_{global} \approx 23\% \text{ à } 27\%$ (production centralisée ou locale)

=> consommation 2 à 3 fois plus élevée que celle d'un BEV

En France : **part énergie** environ 5 à 10 c€/km => 2,5 à 5 fois plus cher

Autonomie et performances massiques peu supérieures à celles des BEV :

Mirai : pile (230 kg) + réservoir H2 (92 kg) + batterie NiMH (30 kg)



Toyota Mirai

=> **350 kg pour 5kg d'H2 (500 km)**

Tesla S : batterie 75 kWh **540 kg (485 km)**



Tesla Motors

Véhicules électriques : à batterie ou à pile à combustible ?

2- FCEV (Fuel Cell Electric Vehicles) suite

Seul avantage : une **recharge plus rapide**
mais au prix d'infrastructures très coûteuses
(plus chères que
des chargeurs électriques très puissants > 100 kW)



Source images : magazine Turbo,
<http://www.turbo.fr/photos/diaporama-essai-toyota-mirai-2015-photos-d-2764>

Des rejets d'eau non négligeables
Mirai : environ 18 L/100 km



In fine, une autonomie du même ordre de grandeur qu'une électrique...
pour un **prix d'investissement qui restera plus élevé**
et pour une **dépense d'énergie 2 à 3 fois plus élevée**

Véhicules électriques : à batterie ou à pile à combustible ?

Matières premières critiques ?

Lithium métal : réserves 14 Mt (ressources 40 Mt)

110 g de Li métal par kWh
=> 5,5 kg/batterie de 50 kWh

Nombre possible de BEV : 2,5 milliards (ou 7 milliards)

Platine : réserves 13 kt (ressources 30 kt ?)

0,5 g de Pt par kW
=> 50 g /PAC de 100 kW

Nombre possible de FCEV : 0,26 milliard (ou 0,6 milliard)

Un compromis possible : PHEV (Plugin Hybrid Electric Vehicle)
mode électrique en agglomération urbaine et mode hybride en dehors

Et pourquoi pas PFCHEV (Plugin Fuel Cell hybrid Electric Vehicle) ?

Véhicules électriques : à batterie ou à pile à combustible ?

Tendances

BEV et PHEV :

Total fin 2017:

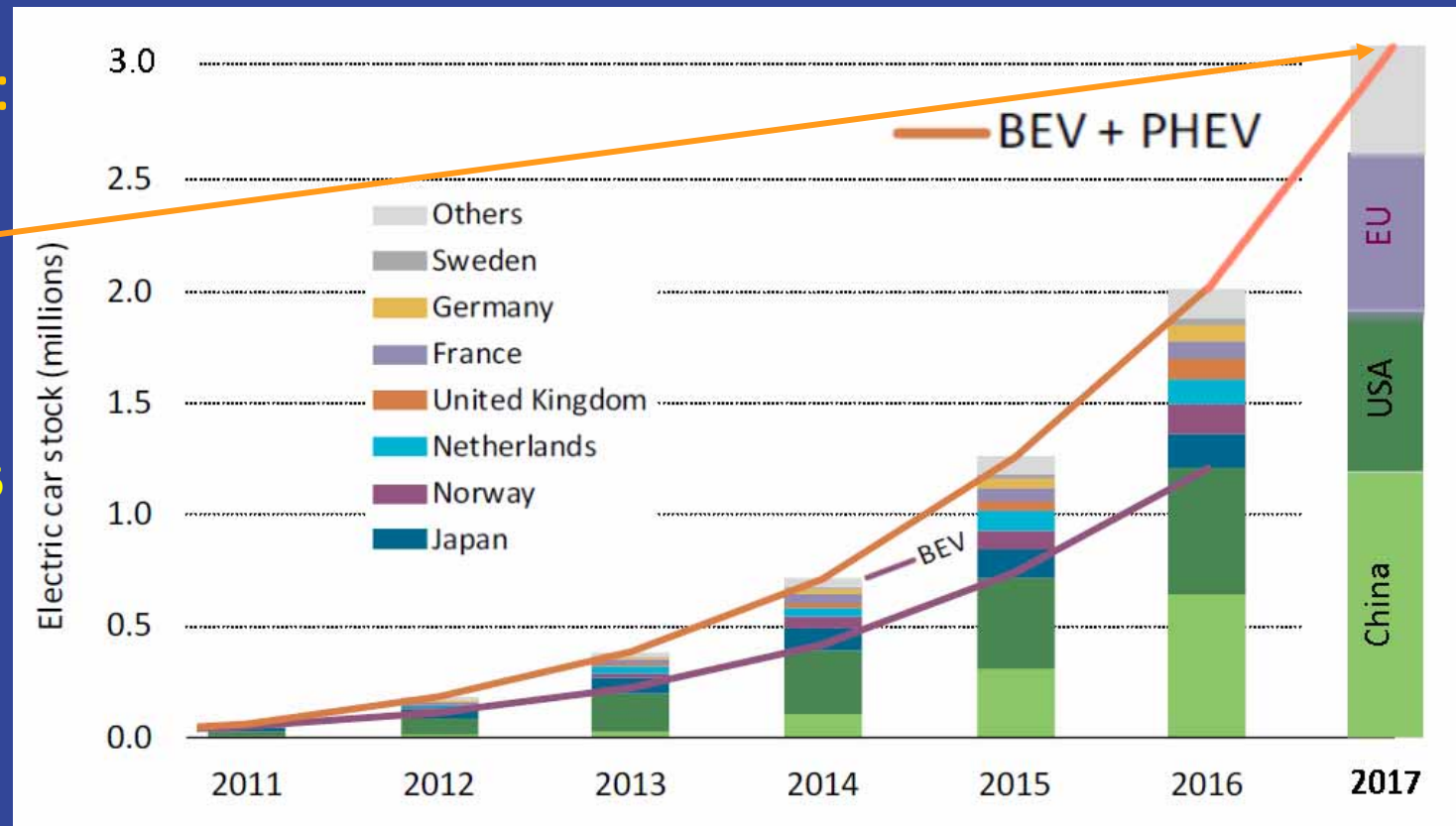
3.2 M

(sur 1,2 G d'automobiles
en circulation : 0,27%)

+ 1.2 M 2017 / 2016

(sur 79 M : 1,5%)

+ 1.9 M en 2018 ?



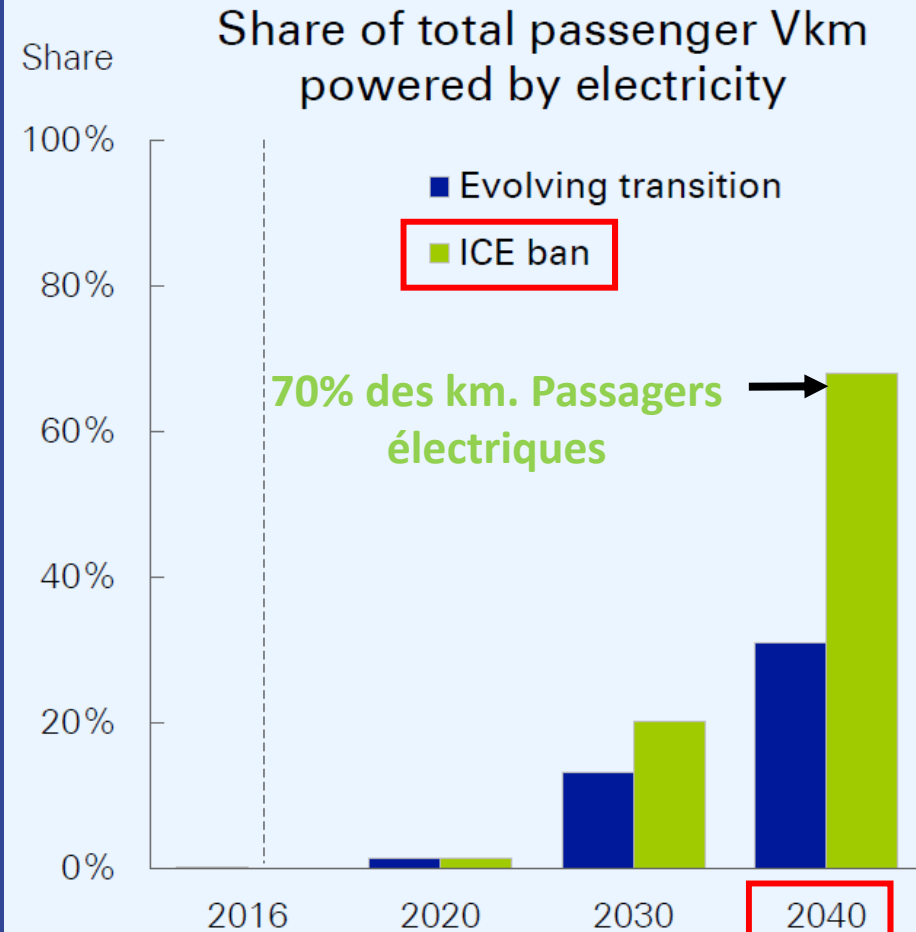
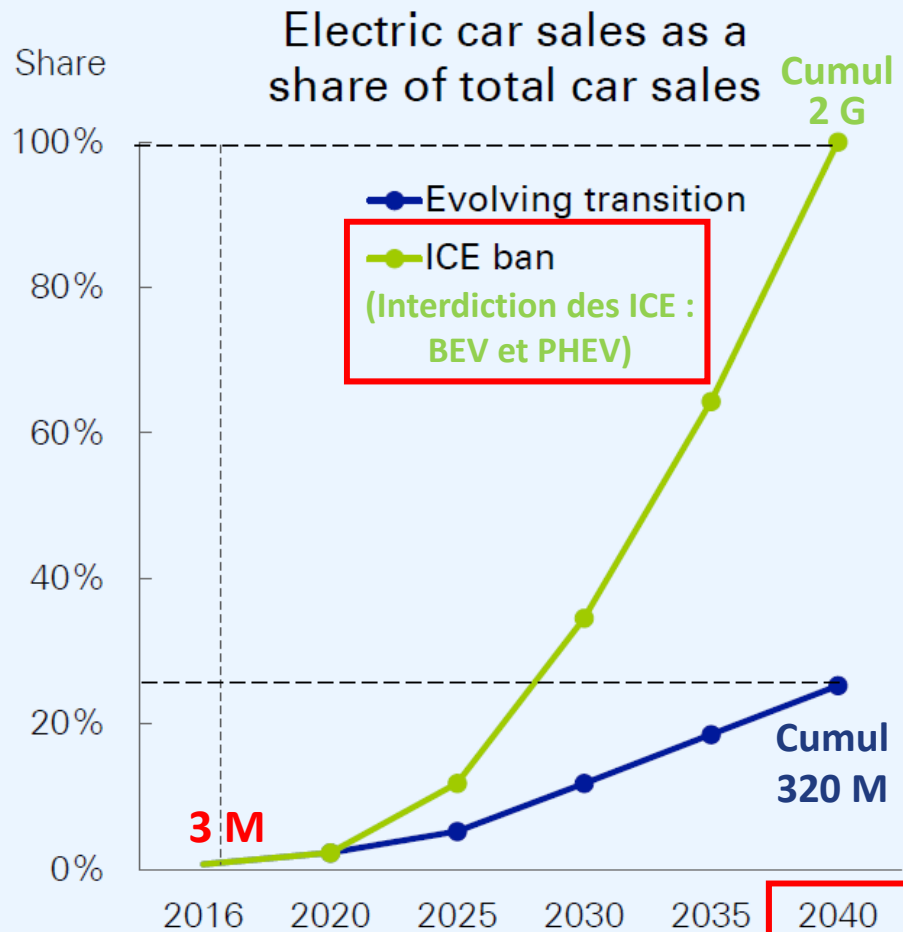
Source : Global EV Outlook 2017, IEA (juin 2017) + complements (2017) auteur

FCEV : nombres cumulés fin 2017 < 10 000

(5 300 Toyota Mirai + 2500 Honda Clarity + moins de 1000 Hyundai ix35)

=> **toujours en émergence, < 0,3% du marché des EV**

Scénarii 2018 de BP : entre 320 M et 2 G EV en 2040 :



Une vision rare de pétrolier qui va jusqu'à envisager l'éradication
des automobiles à moteur à combustion interne, au moins en ville!

Source : BP Energy Outlook 2018 (feb. 18)

Rejets de CO₂ d'un véhicule électrique

**Sur la seule phase d'usage,
ils dépendent du mix énergétique de production électrique**

En 2015, 1 kWh électrique en France : 52 gCO₂/kWh_e
 en Europe (UE28) : 300 gCO₂/kWh_e
 au monde : 670 gCO₂/kWh_e **en moyenne...
 et sur la phase d'usage** →

Un (petit) véhicule électrique consomme à la prise environ 0,18 kWh/km
 (avec climatisation et autres équipements)

$$N \text{ gCO}_2/\text{km} = X \text{ gCO}_2/\text{kWh}_e \times Y \text{ kWh}_e/\text{km} \Rightarrow 10 \rightarrow 54 \rightarrow 120 \text{ gCO}_2/\text{km}$$

Rejets production d'électricité consommation électrique du véhicule

En ajoutant l'énergie grise de la batterie (300 kWh_p/kWh_{sto}) : en usage européen
 (10 ans 150 000 km) avec une batterie 30 kWh_{sto} - 1000 cycles => 0,06 kWh_p/km
 et avec 350 gCO₂/kWh_p => 20 gCO₂/km de supplément



Citroën C-Zero

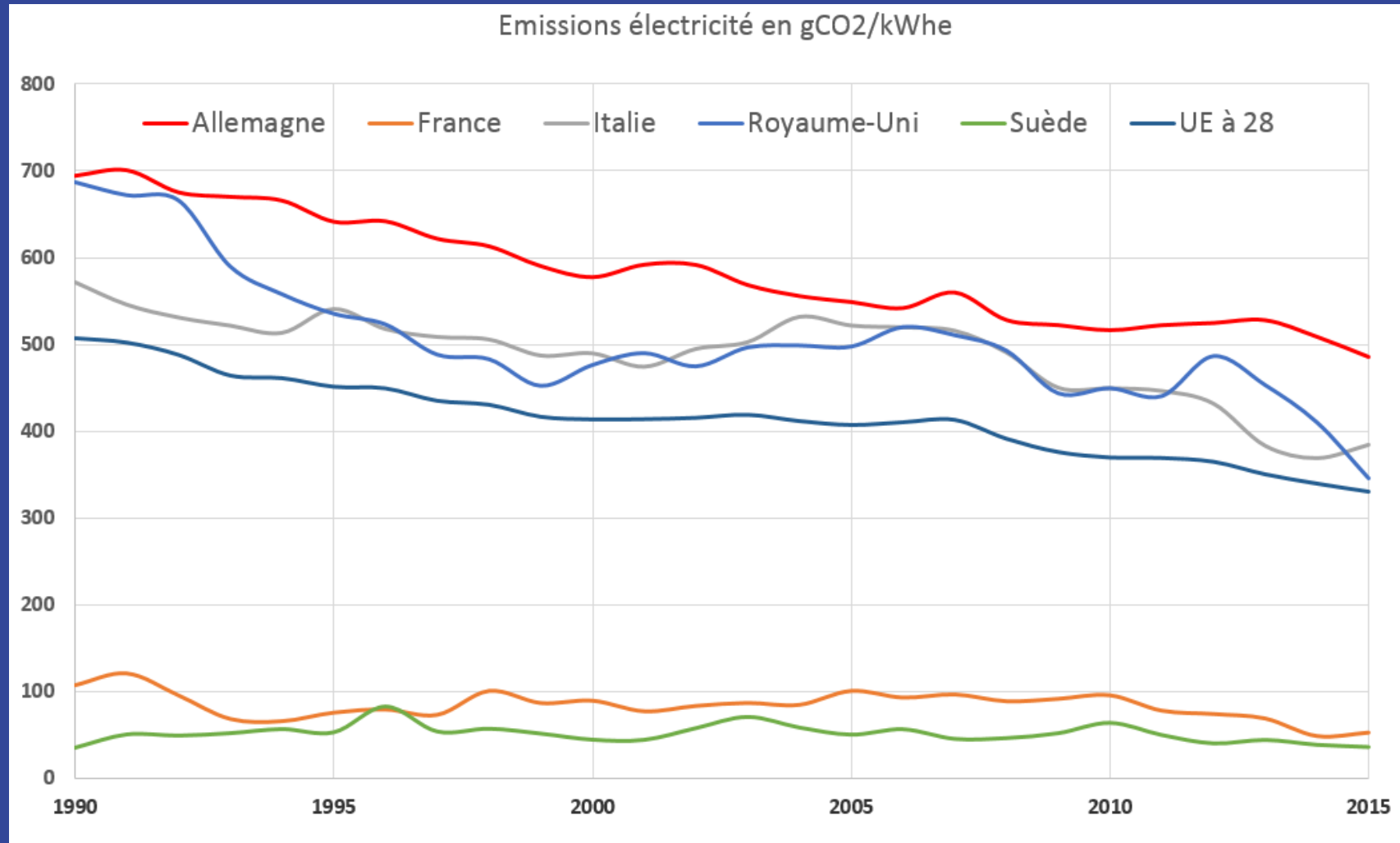


Renault ZOE

**Nécessité d'une électricité « propre »
 sinon le seul intérêt est de réduire la pollution locale**

L'électricité de moins en moins carbonée

Ici en Europe (vrai également en Chine, en Amérique, etc...) :



Source : Chiffres clés du climat - France, Europe et Monde, nov. 2017

Baisse en relation avec la progression de l'électricité renouvelable

Rouler à l'énergie solaire ?



Source : auteur (Le Bourget du Lac, Institut Energie Solaire)



Consommation réelle de véhicules électriques :

- BEV Citadine en cycle urbain : 150 Wh/km
- PHEV (Prius rechargeable) : 200 Wh/km

Une place de parking : 12 m²

avec des modules de 180 W_c/m²,
et 1000 h/an équivalent pleine puissance

=> **2200 kWh_e/an**

Soit : **11 000 à 15 000 km/an**
parcourus à l'énergie solaire

Rejets de CO₂ sur la phase d'usage :

dus à la fabrication du système PV

1700 kg CO₂ par kW_c installé*,
pour une durée de vie de 20 ans mini

=> **6 à 8 gCO₂/km**

* The IPCC fifth Assessment Report - Climate Change 2013: the Physical Science Basis.
Working Group I, IPCC Secretariat, Geneva

Recharge solaire des BEV en France ?

**Combien d'électricité pour satisfaire la totalité (barre haute)
des besoins de transports automobiles en France ?**

Environ 400 milliards de km cumulés* par an (urbains et extra-urbains)

*32 M automobiles x 12 500 km/an

En supposant **200 Wh/km** => **80 TWh supplémentaires**

(17% des 480 TWh de consommation annuelle actuelle en France)

Recharge photovoltaïque : quelle surface requise ?

Rayonnement solaire horizontal moyen en métropole : **1200 kWh/m²**

Avec **PR = 0,75** (PR = performance ratio) et

une technologie au silicium polycristallin **180 W/m²**,

on obtient une productivité annuelle de **160 kWh_e/m²/an**

80 TWh nécessitent **500 km²** de superficie,

soit **1,4% des superficies déjà artificialisées**

Conclusion

Pour éviter ça !



<http://www.holon.se/folke/worries/oildepl/bil2.jpg>

Et choisir d'autres voies ?



<https://solarteameindhoven.nl/stella-vie/>

Voiture familiale solaire « Stella Vie » TU Eindhoven

Conclusion, futur...

Véhicules électriques à batterie : ne sont plus une utopie !

Possibilité d'une **excellente symbiose**
avec les sources électriques solaires et éoliennes (variables)

Réelles perspectives pour réduire
les impacts environnementaux des transports terrestres

Mais, notamment pour réduire les besoins de matières premières
(même recyclables), **nécessité de**
réduire les performances et le nombre de véhicules

=> Véhicules plus mutualisés : grâce aux **outils numériques**

=> Véhicules **plus petits, moins puissants et moins énergivores**

=> Possibilités de **seconde vie** (stationnaires) **pour les batteries**



<https://inhabitat.com/the-elf-a-half-bike-half-car-solar-and-pedal-powered-urban-vehicle-by-organic-transit/>

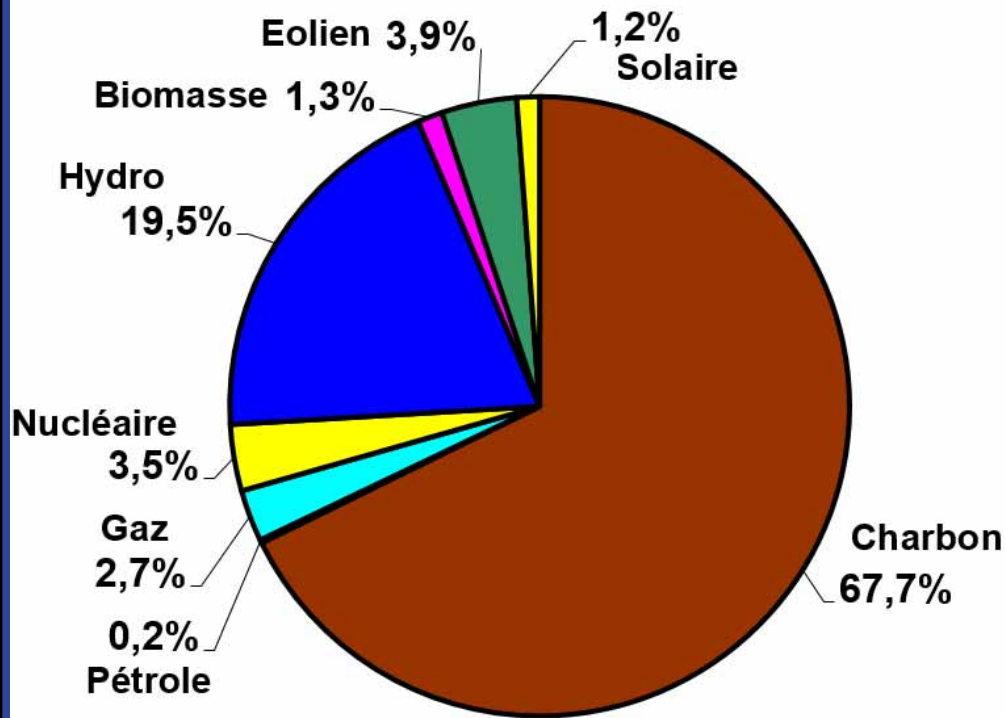
MERCI POUR VOTRE ATTENTION



<http://www.automobile-propre.com/superchargeurs-tesla-technologie-hybride-toyota/>

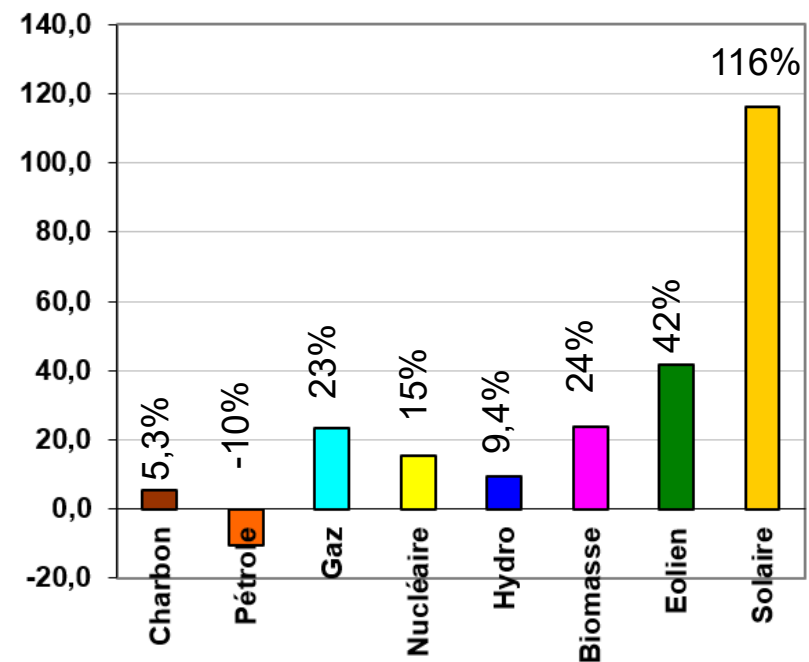
Production d'électricité en Chine 2016

Production totale : **6100 TWh** (7,4%/an moyenne 8 ans)



26 % d'origine renouvelable :
+ 12,6% par an sur 8 ans

Taux de croissance 2008-2016 : %/an



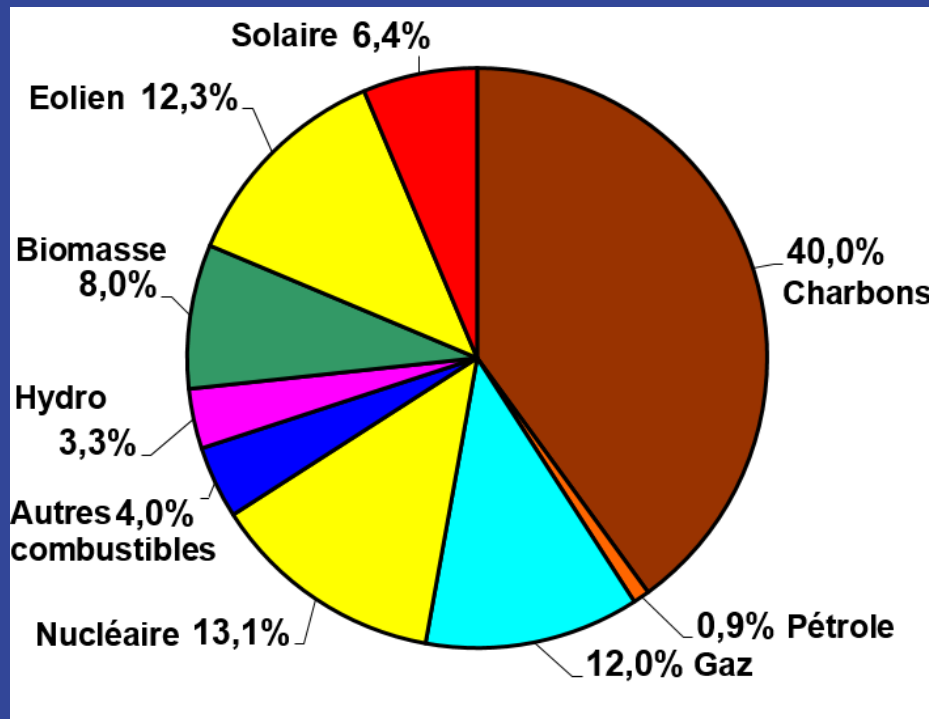
74% d'origine non renouvelable
+ 5,9% par an sur 8 ans

70,6% fossile (+ 5,6% par an sur 8 ans)
3,5% fissile (+ 15% par an -----)

Source données : diverses (auteur)

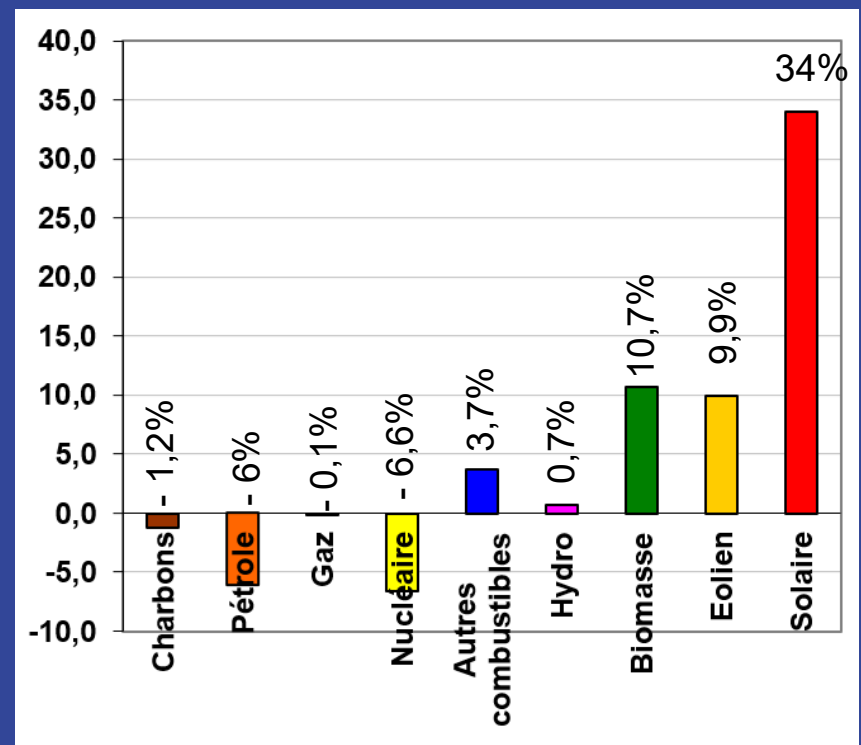
Production d'électricité en Allemagne 2016

Production totale : **642 TWh** (0%/an moyenne 10 ans)



30 % d'origine renouvelable :
+ 10,4% par an sur 10 ans

Taux de croissance 2006-2016 : %/an



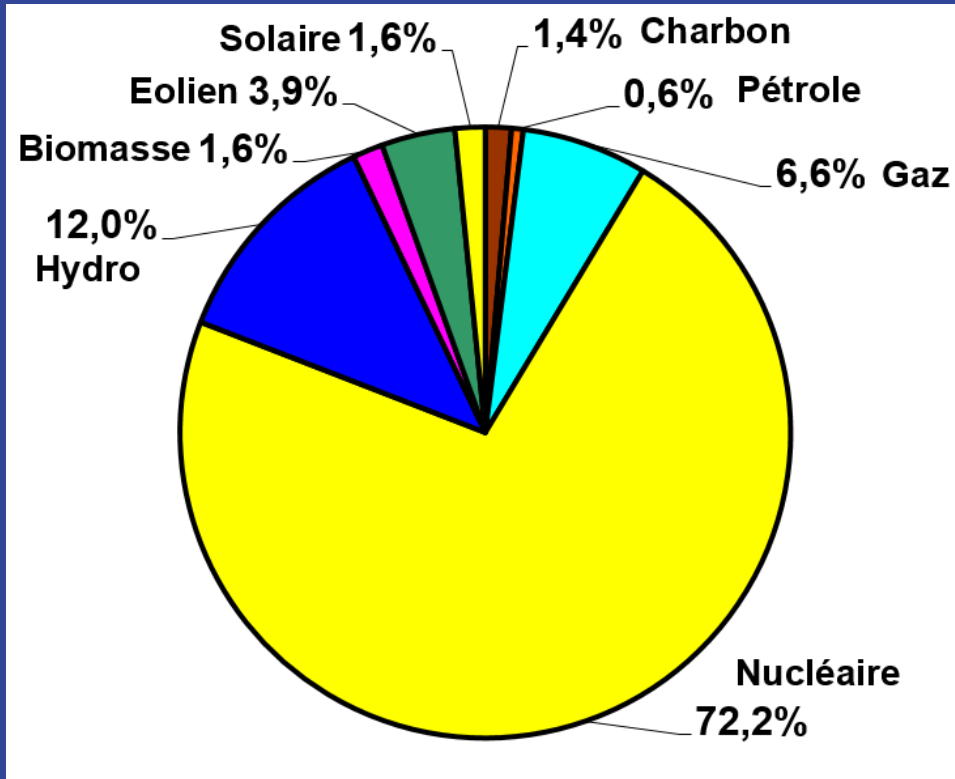
70% d'origine non renouvelable
- 2,2% par an sur 10 ans

52,8% fossile (- 1,1% par an sur 10 ans)
13,1% fissile (- 6,6% par an -----)

Source données : Agora Energiewende et HypoVereinsbank

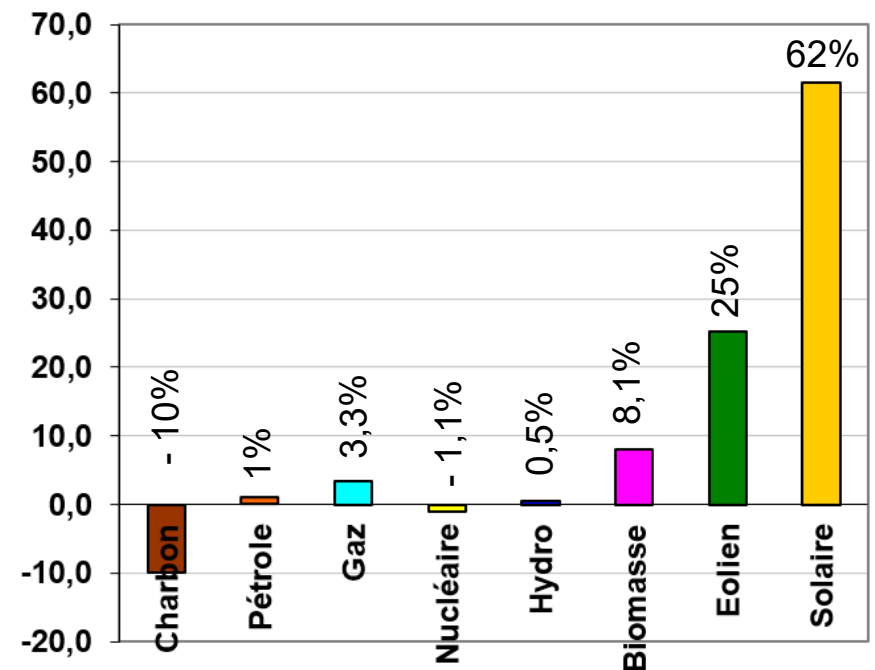
Production d'électricité en France 2016

Production totale : **531 TWh** (- 0,3%/an moyenne 10 ans)



19,1 % d'origine renouvelable :
+ 4,2% par an sur 10 ans

Taux de croissance 2006-2016 : %/an



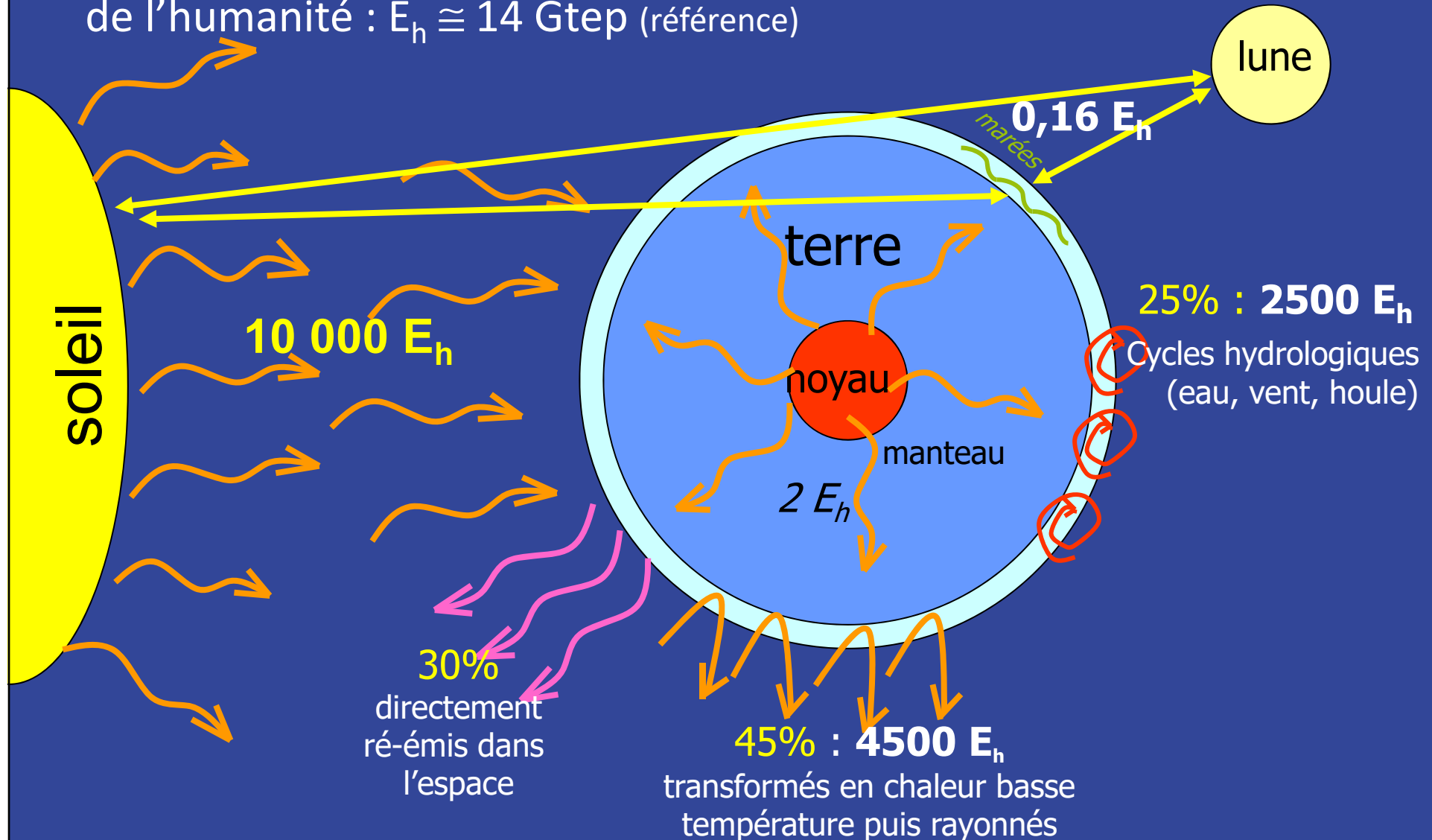
80,9% d'origine non renouvelable
- 1,1% par an sur 10 ans

8,6% fossile (- 0,8% par an sur 10 ans)
72,3% fissile (- 1,1% par an -----)

Source données : RTE

Ressources renouvelables :

valeurs ramenées à la consommation annuelle d'énergie primaire de l'humanité : $E_h \cong 14 \text{ Gtep}$ (référence)



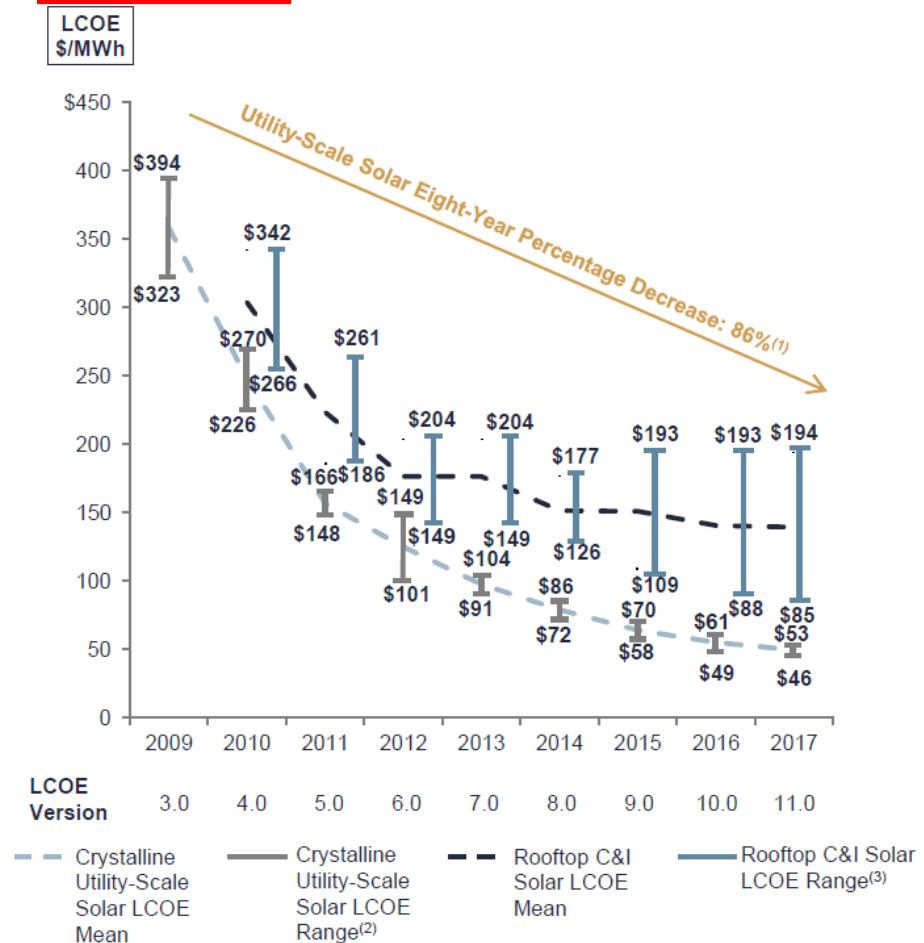
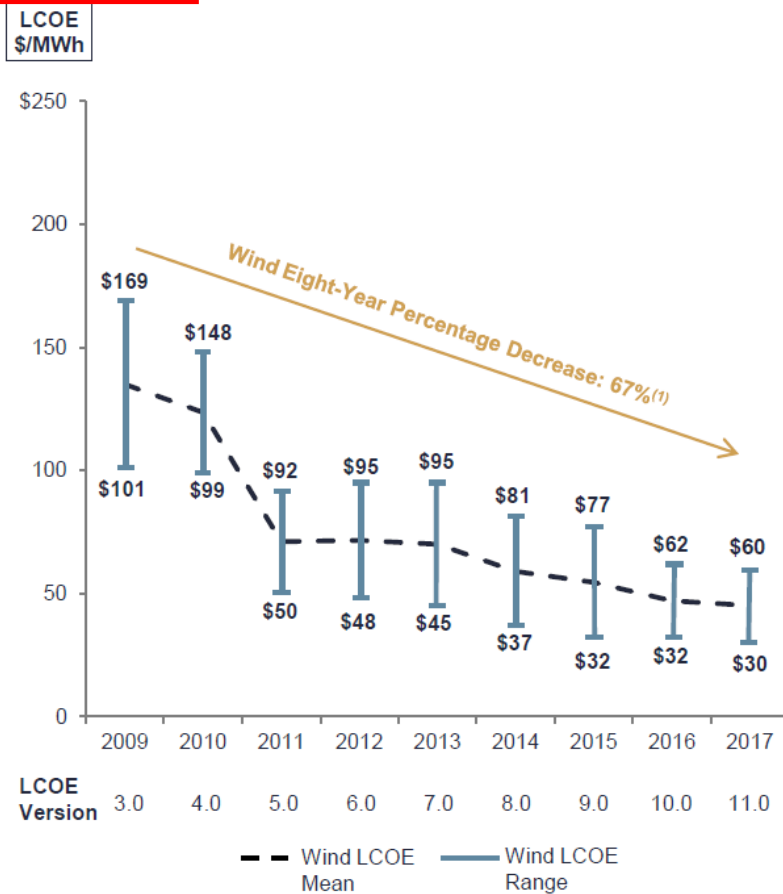
Electricité : baisse des coûts de production éolien et PV

Rapport banque Lazard pour les USA (nov. 2017)

Wind LCOE

LCOE = Levelized Cost of Electricity

Solar PV LCOE



Source : Lazard's levelized cost of energy analysis - Version 11.0 nov. 2017

B. Multon, ENS Rennes, SATIE - CNRS

30

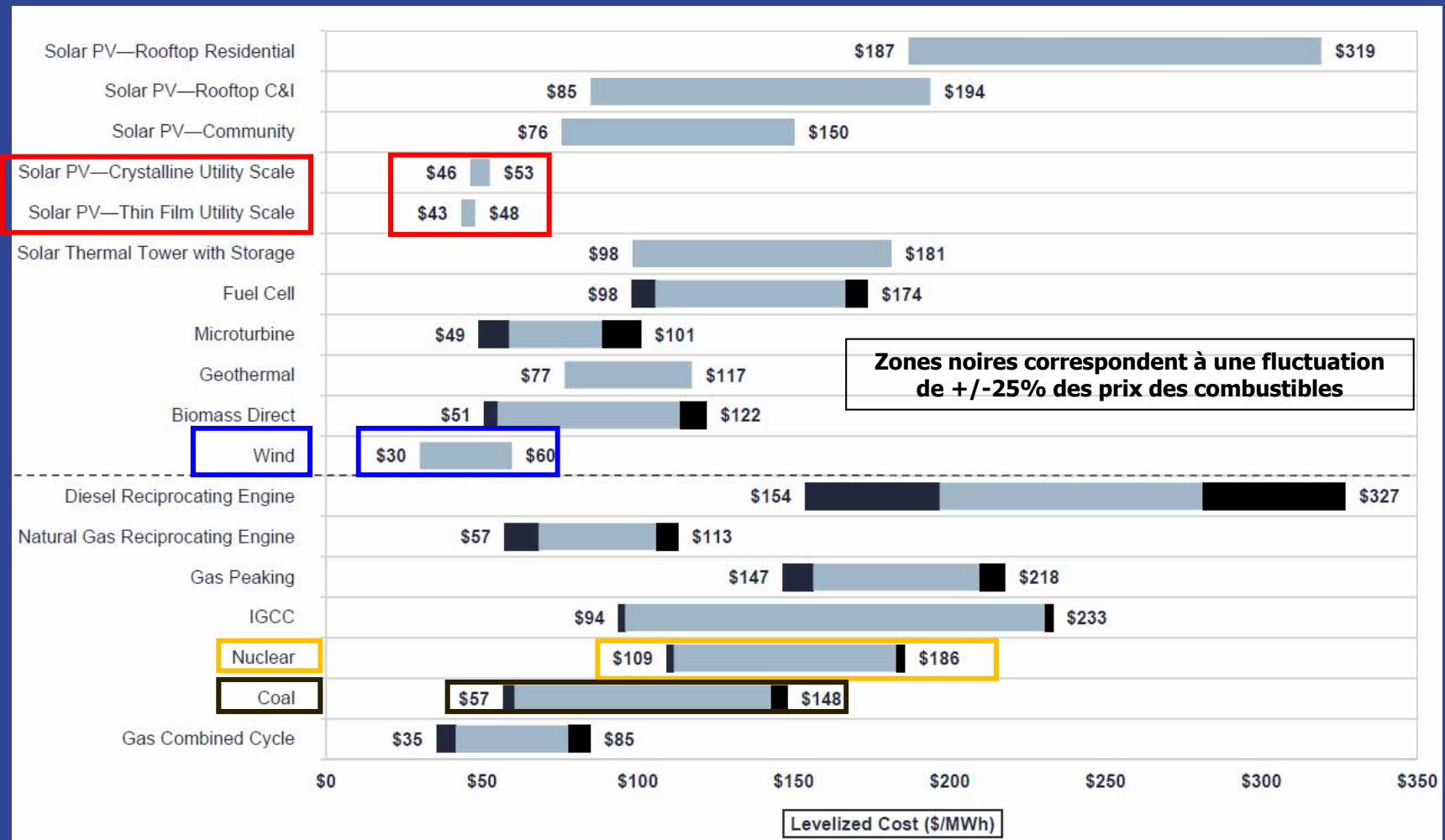
<https://www.lazard.com/media/450337/lazard-levelized-cost-of-energy-version-11.0.pdf>

CampOSV – InOut Mobilités numériques, Rennes 15 mars 2018

Electricité : comparaison des coûts

Rapport banque Lazard pour les USA (nov. 2017)

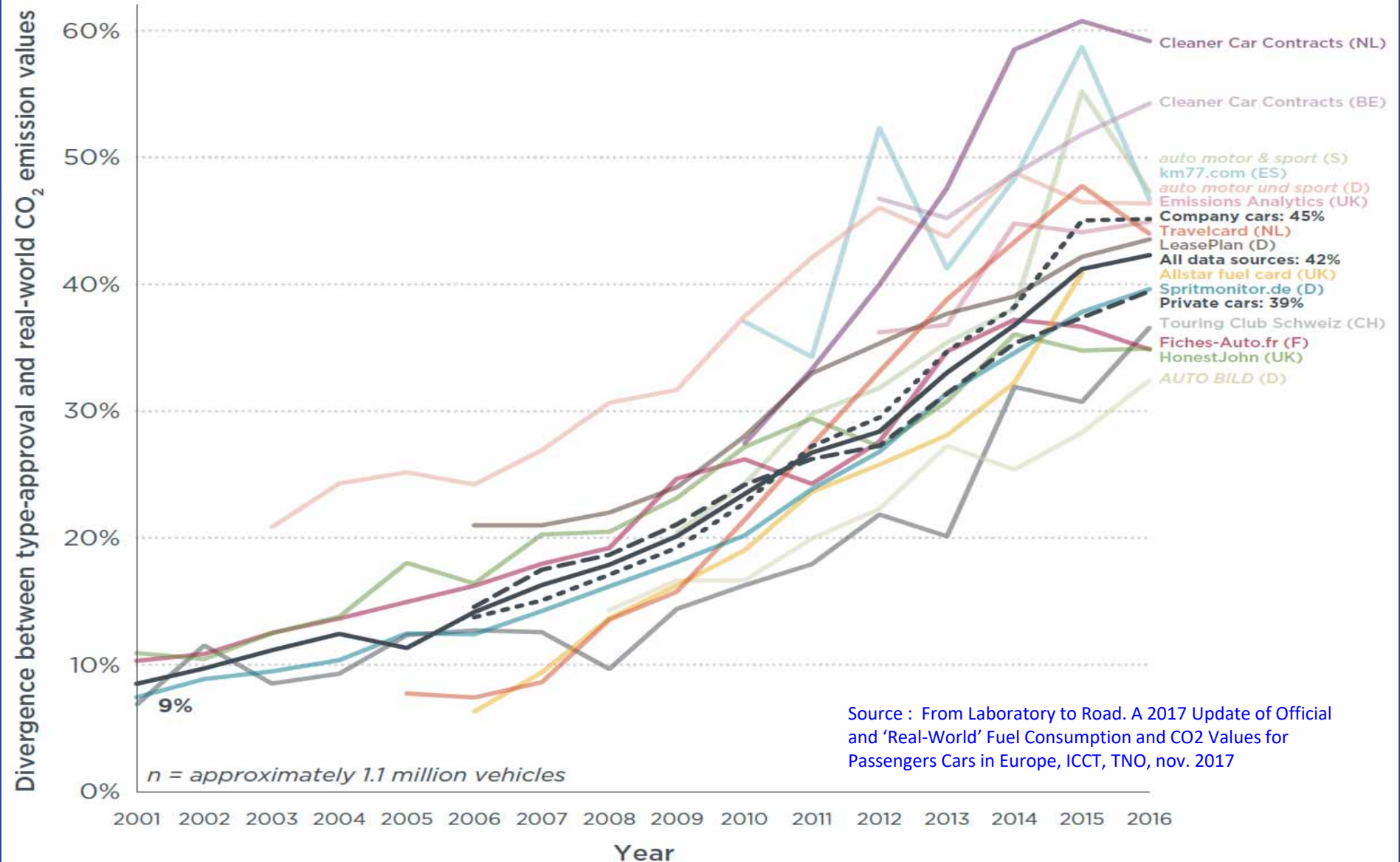
LCOE = Levelized Cost of Electricity



Source : Lazard's levelized cost of energy analysis - Version 11.0 nov. 2017

<https://www.lazard.com/media/450337/lazard-levelized-cost-of-energy-version-110.pdf>

Europe automobiles : dérive des écarts entre consommations constatées et déclarées



Source : From Laboratory to Road. A 2017 Update of Official and 'Real-World' Fuel Consumption and CO₂ Values for Passengers Cars in Europe, ICCT, TNO, nov. 2017