

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

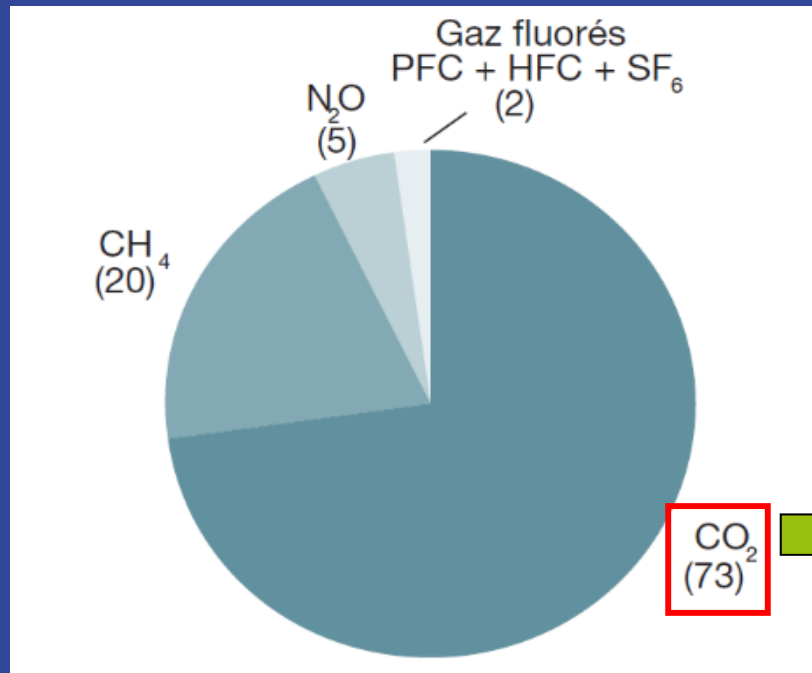


CC0 Creative Commons <https://pixabay.com>

# Emissions de gaz à effet de serre et transports

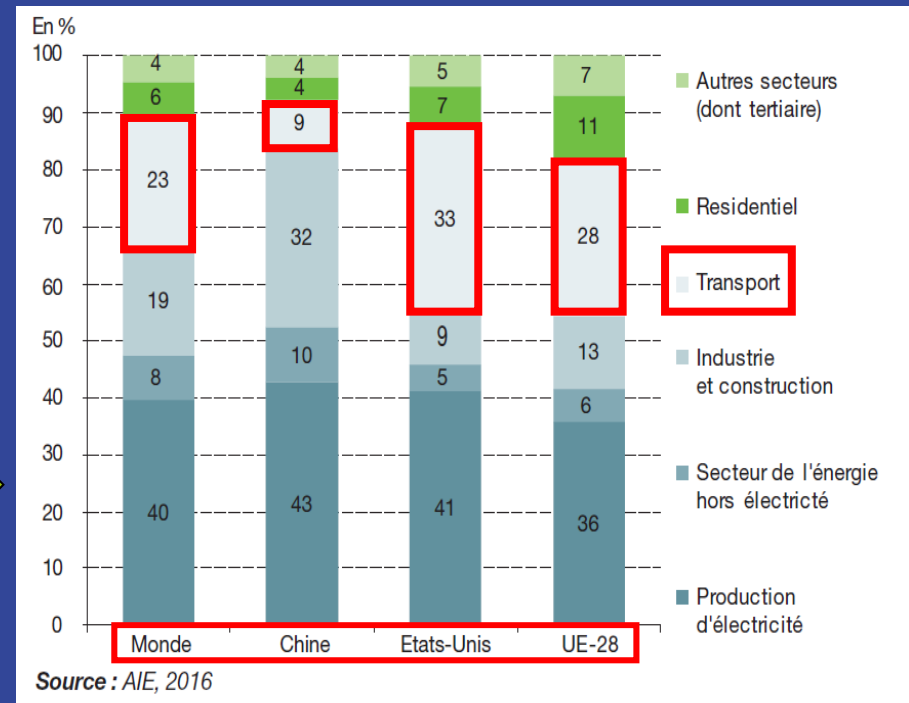
Année 2014

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 CO<sub>2</sub>  
par zones géographiques



Transports, au niveau mondial :

23% des émissions de CO<sub>2</sub>

18% de la contribution au réchauffement climatique

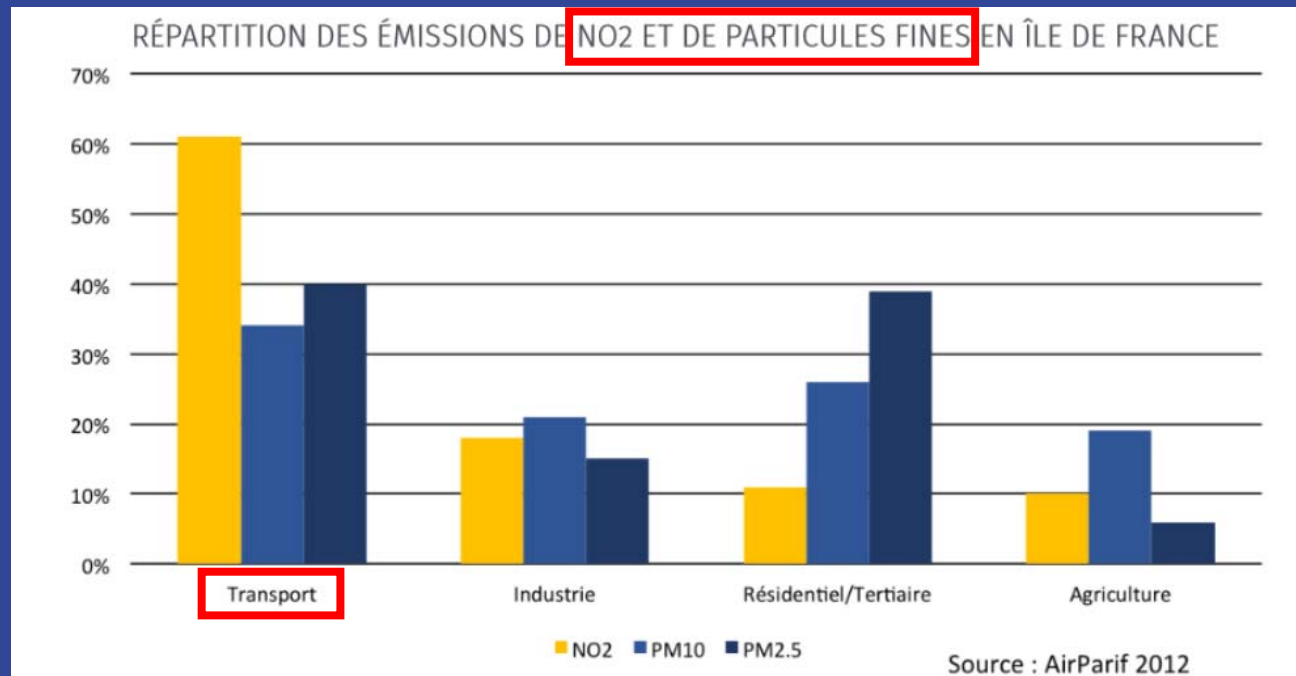


# Transports et autres impacts

**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**

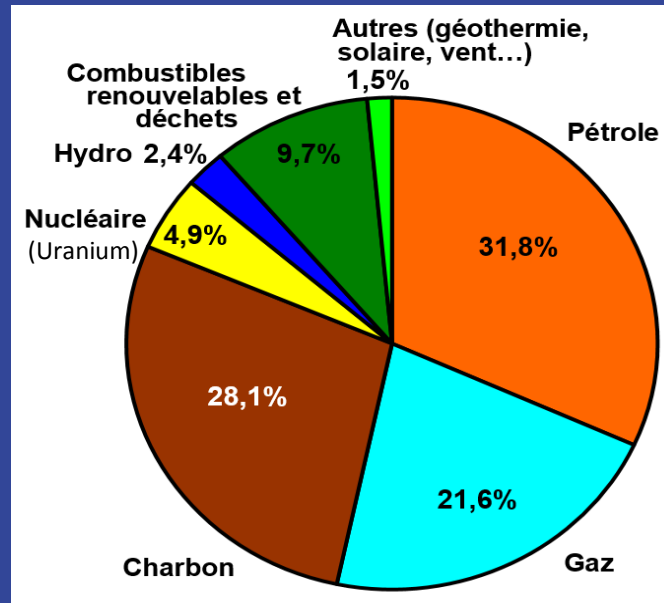
Source : Commissariat Générale à la Stratégie et la Prospective 2014

Au total : 20 à 30 milliards d'Euros par an

Source : CGDD, Quelles valeurs monétaires pour les impacts sanitaires de la pollution atmosphérique ? Enjeux, limites et perspectives, 2014.

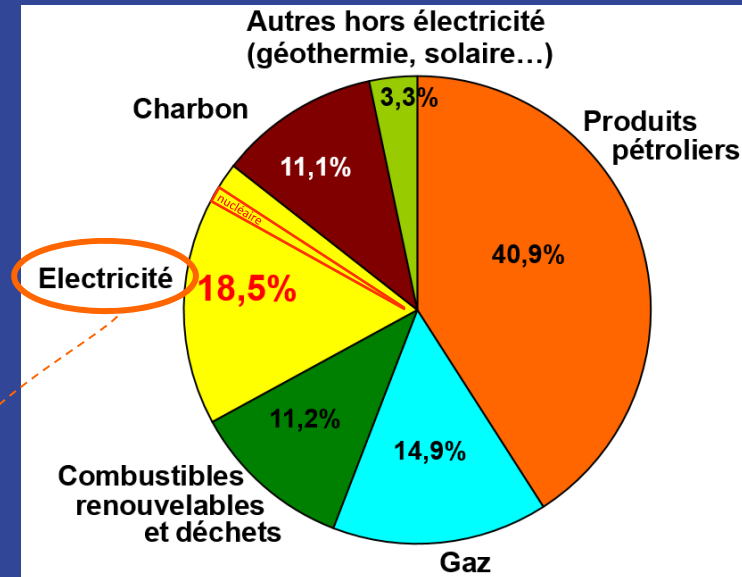
# Énergie : bilan mondial 2015, place de l'électricité

## Énergie primaire



Total  $\approx 13,6$  Gtep  
(158 000 TWh<sub>p</sub>)

## Énergie finale



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

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

+3%/an  
(moyenne  
2005-2015)

> 60 000 TWh<sub>p</sub> ( $\approx 40\%$ )  
prélevés pour :  
**24 400 TWh<sub>e</sub>**  
**d'électricité produite**

pour commercialiser :

**20 100 TWh<sub>e</sub> 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

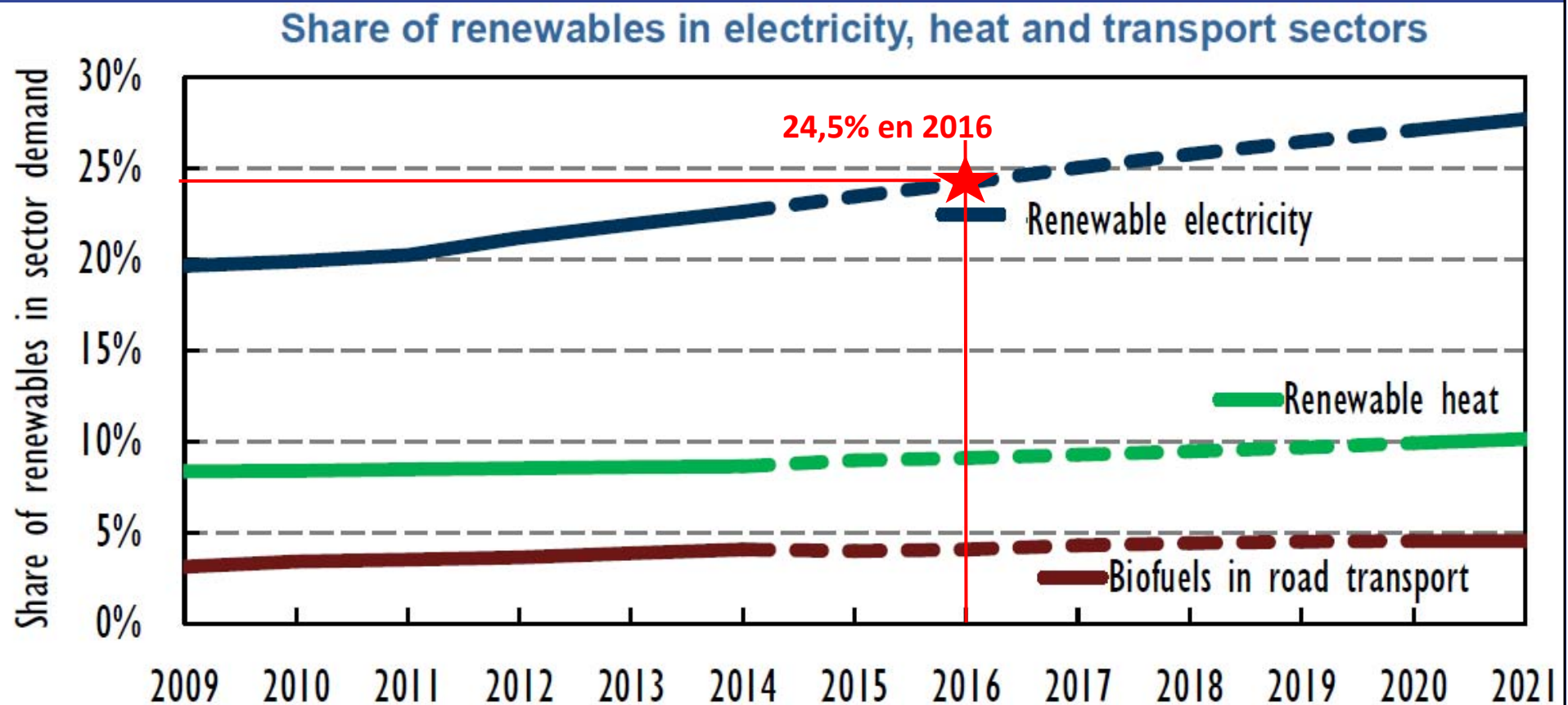
**RAYONNEMENT SOLAIRE ET SOUS-PRODUITS AU SOL :**

**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

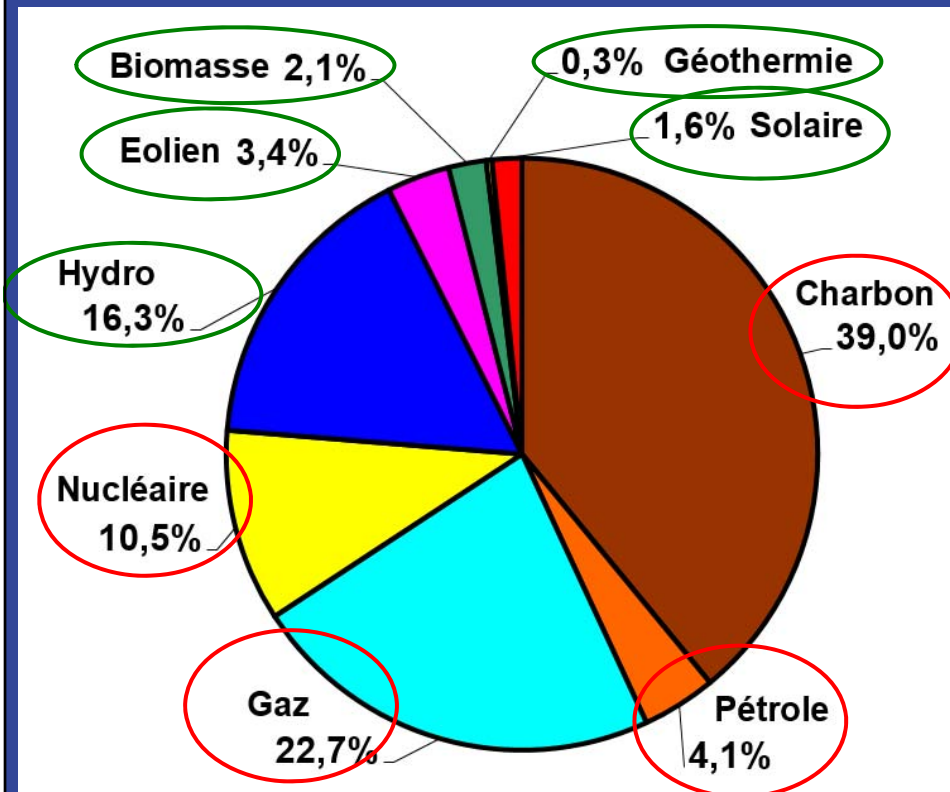


Source : (MTMR) Medium- Term Renewable Energy Market Report 2016, IEA 25 oct. 2016

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

# Production mondiale d'électricité (2015) et tendances

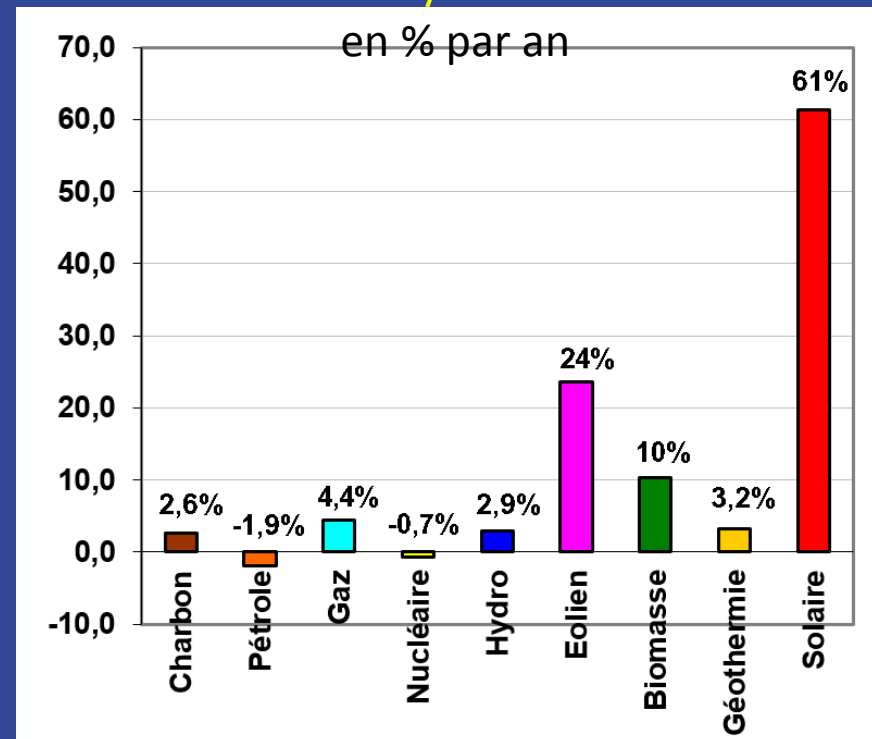
24 400 TWh +3% moy. 10 ans (2005-2015)



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.**

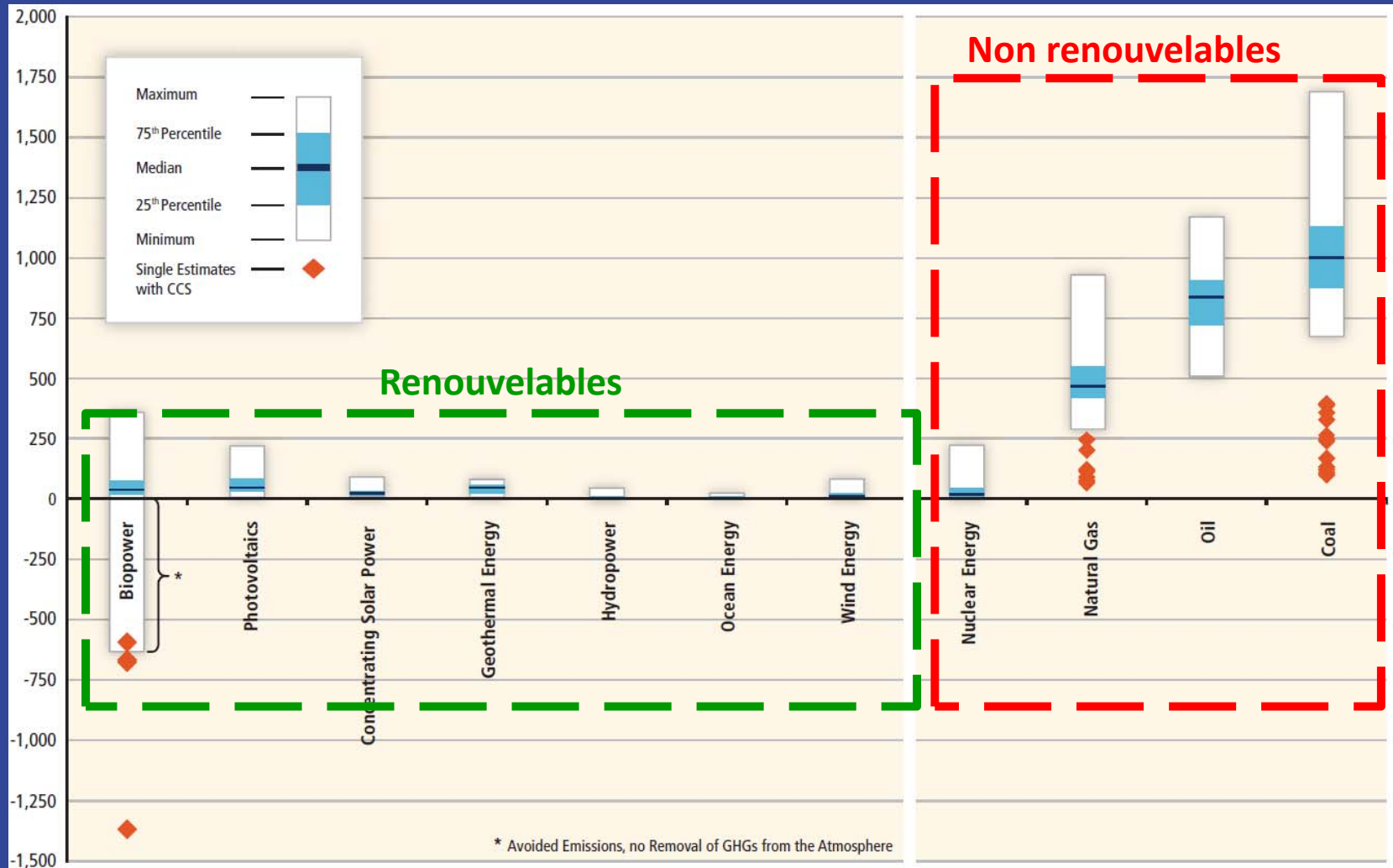
Source : Renewables 2017 Global Status Report

Source : données IEA, analyse auteur



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

grammes eq. CO<sub>2</sub> / kWh<sub>e</sub>

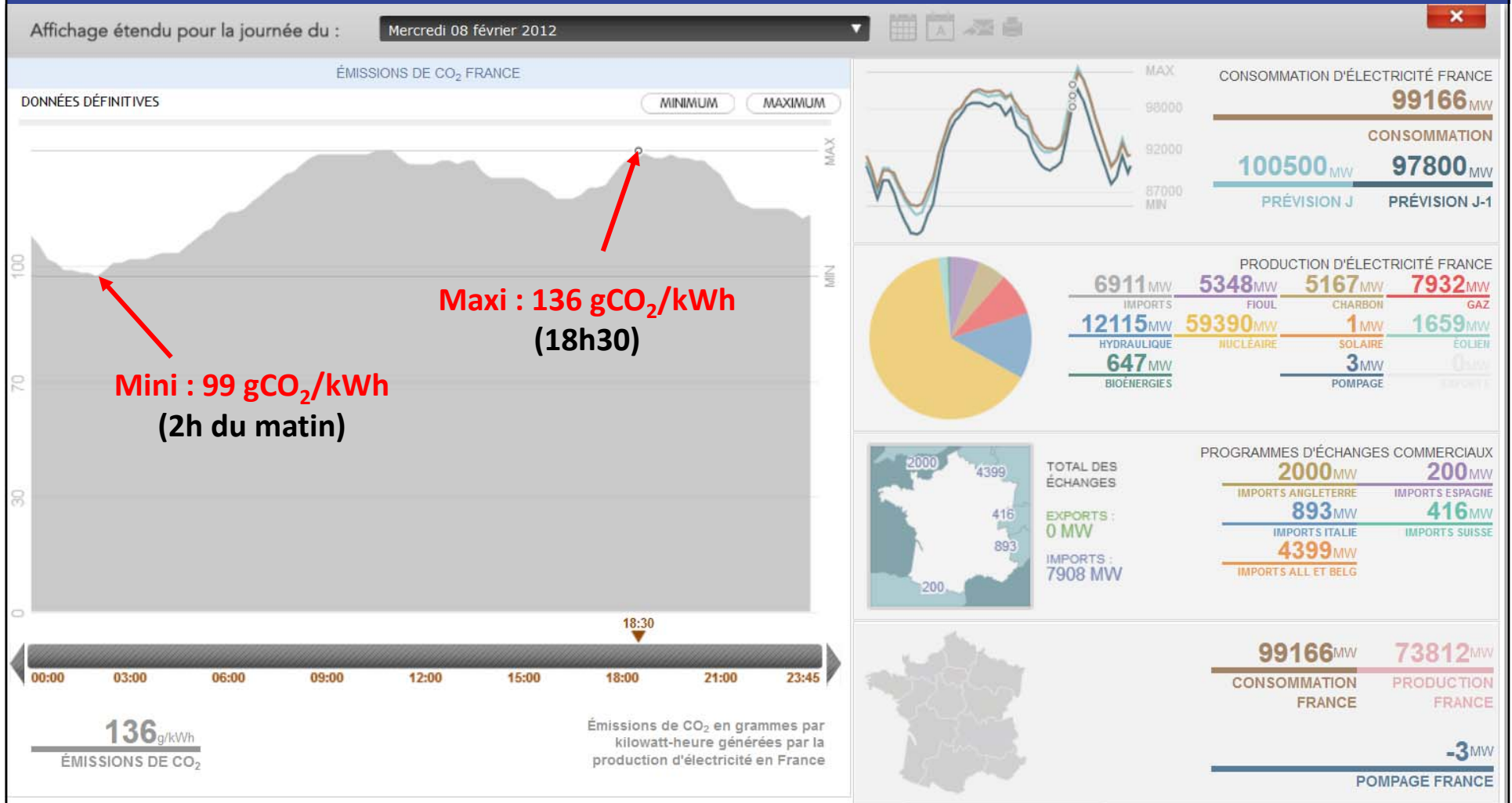


Source : IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, 2011  
Ch. 9 : Renewable Energy in the Context of Sustainable Development  
[https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/SRREN\\_FD\\_SPM\\_final.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/SRREN_FD_SPM_final.pdf)

# 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

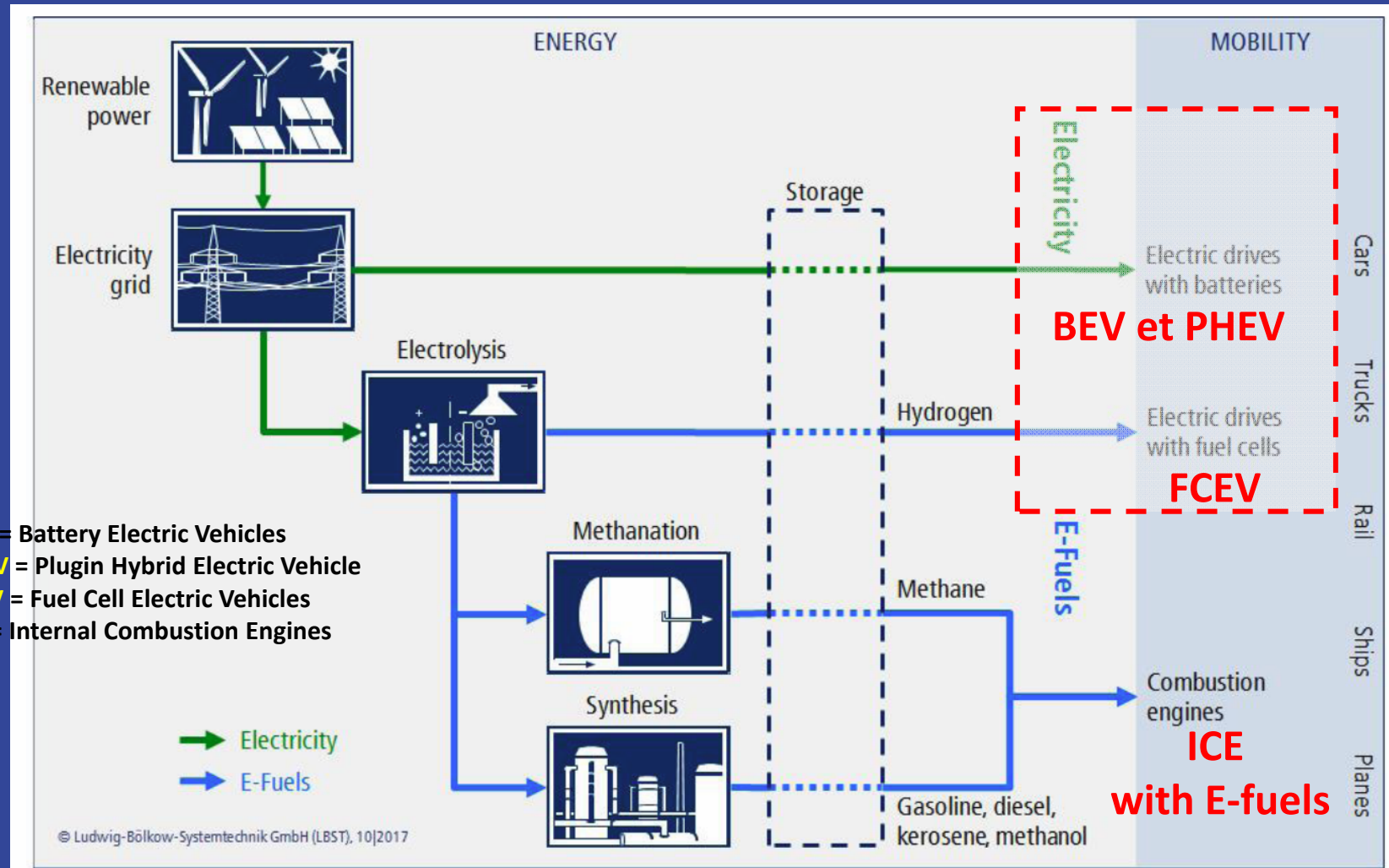


Toyota Mirai  
11



# Alors, quelles solutions pour des transports terrestres moins impactants ?

Passer par l'électricité renouvelable :

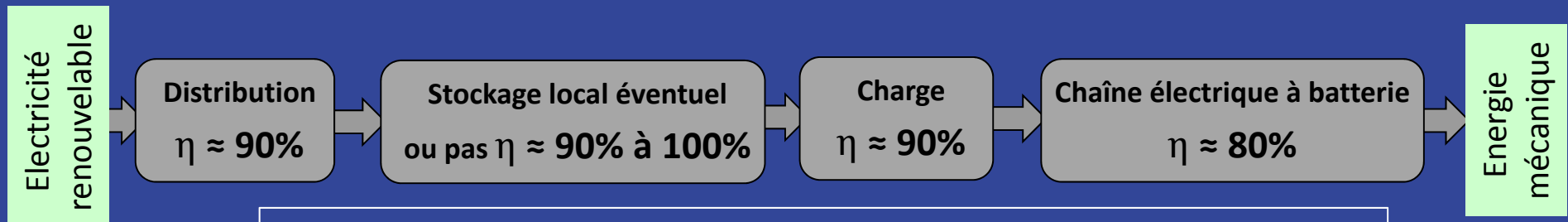


Source : «E-FUELS» STUDY The potential of Electricity-based fuels for low-emission transport in the UE, LBST & DENA, nov. 2017

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

Alimentation en électricité renouvelable à faibles impacts

## 1- BEV (Battery Electric Vehicles)



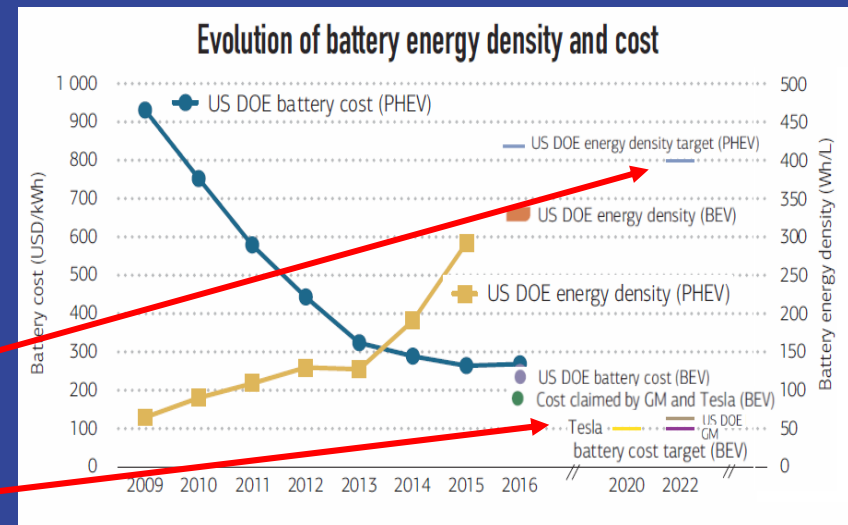
$\eta_{global} \approx 65\% \text{ à } 52\% \text{ (avec stockage intermédiaire)}$

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

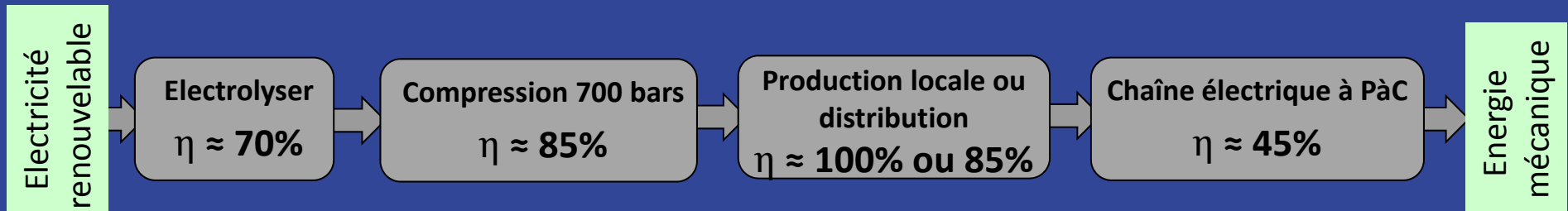
Vers 200 Wh/kg et 400 Wh/L  
et 100 \$/kWh



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 €/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:**

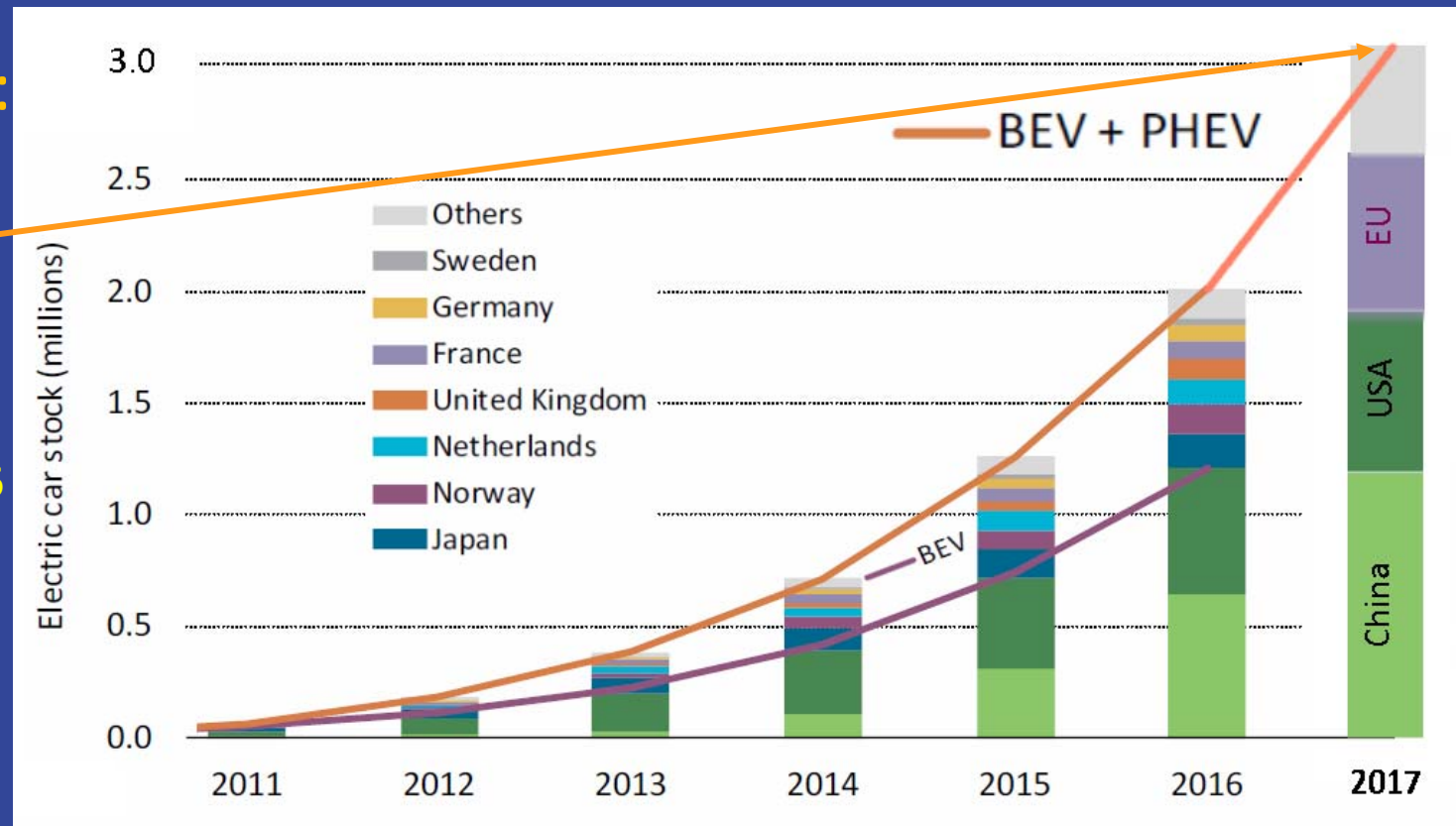
**3.2 M**

(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 ?**



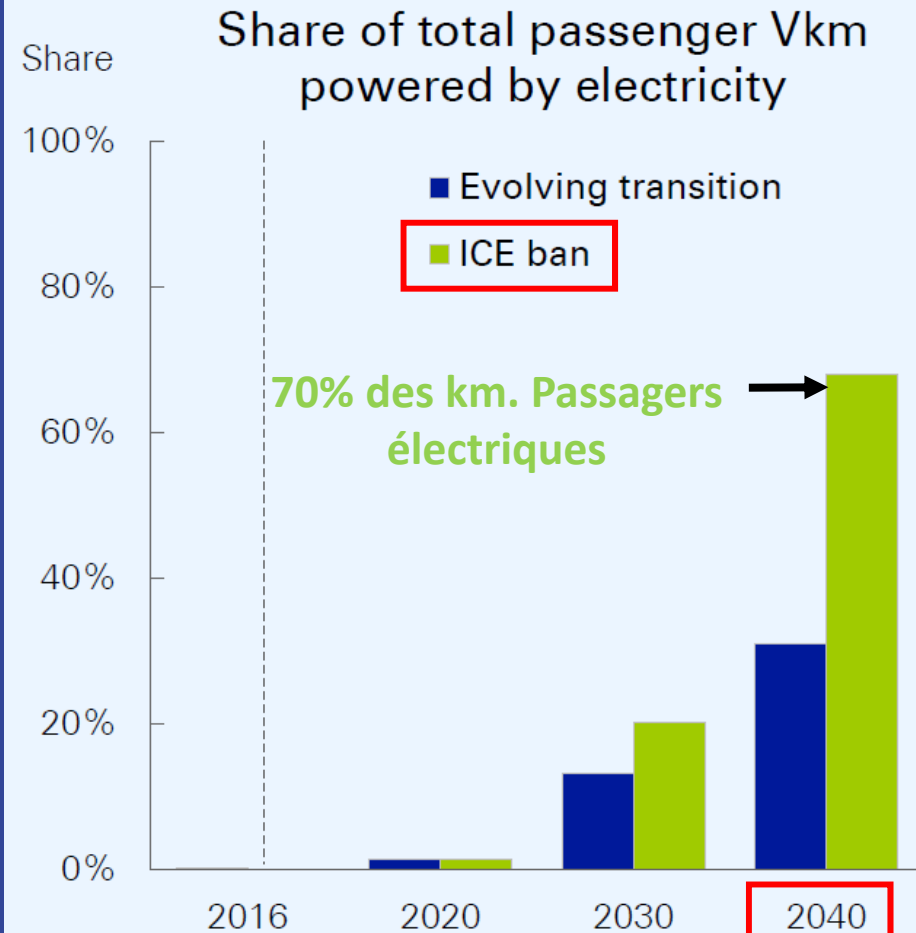
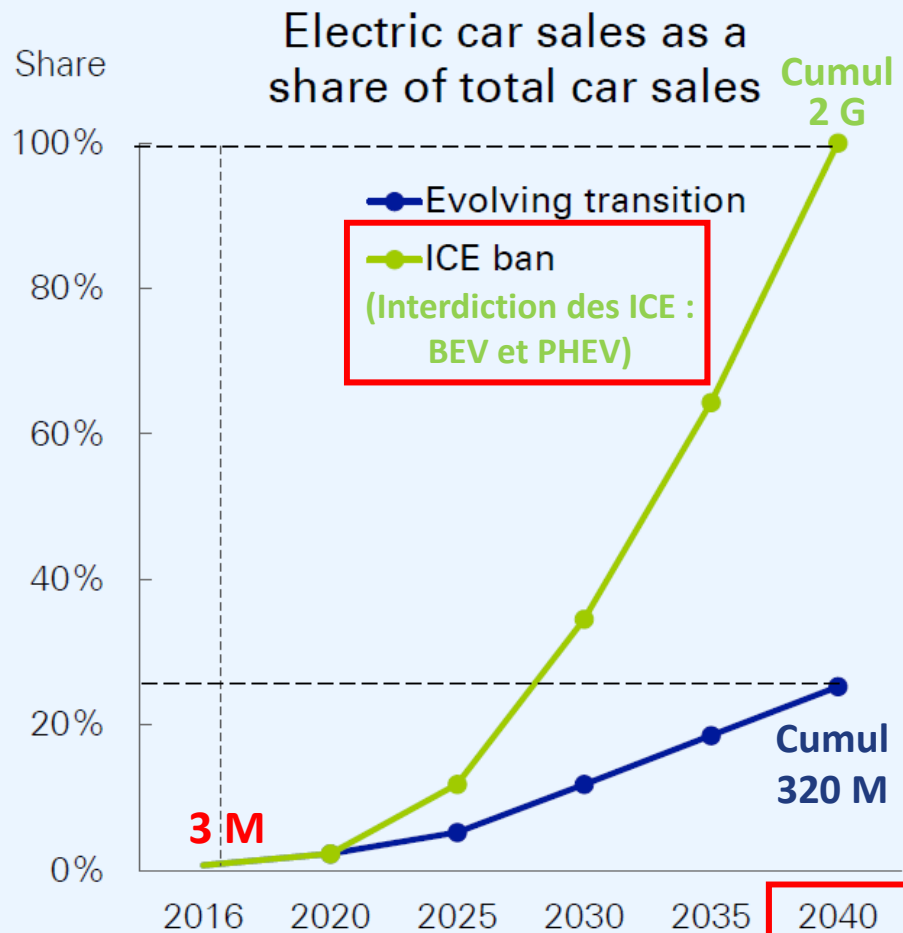
Source : Global EV Outlook 2017, IEA (june 2017) + complements (2017) auteur

**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 CO<sub>2</sub> 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 gCO<sub>2</sub>/kWh<sub>e</sub>  
 en Europe (UE28) : 350 gCO<sub>2</sub>/kWh<sub>e</sub>  
 au monde : 670 gCO<sub>2</sub>/kWh<sub>e</sub> **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)

$$N \text{ gCO}_2/\text{km} = X \text{ gCO}_2/\text{kWh}_e \times Y \text{ kWh}_e/\text{km} \Rightarrow 10 \rightarrow 63 \rightarrow 120 \text{ gCO}_2/\text{km}$$

Rejets production d'électricité    consommation électrique du véhicule

En ajoutant l'énergie grise de la batterie (300 kWh<sub>p</sub>/kWh<sub>sto</sub>) : en usage européen  
 (10 ans 150 000 km) avec une batterie 30 kWh<sub>sto</sub> - 1000 cycles => 0,06 kWh<sub>p</sub>/km  
 et avec 350 gCO<sub>2</sub>/kWh<sub>p</sub> => 20 gCO<sub>2</sub>/km de supplément



Citroën C-Zero

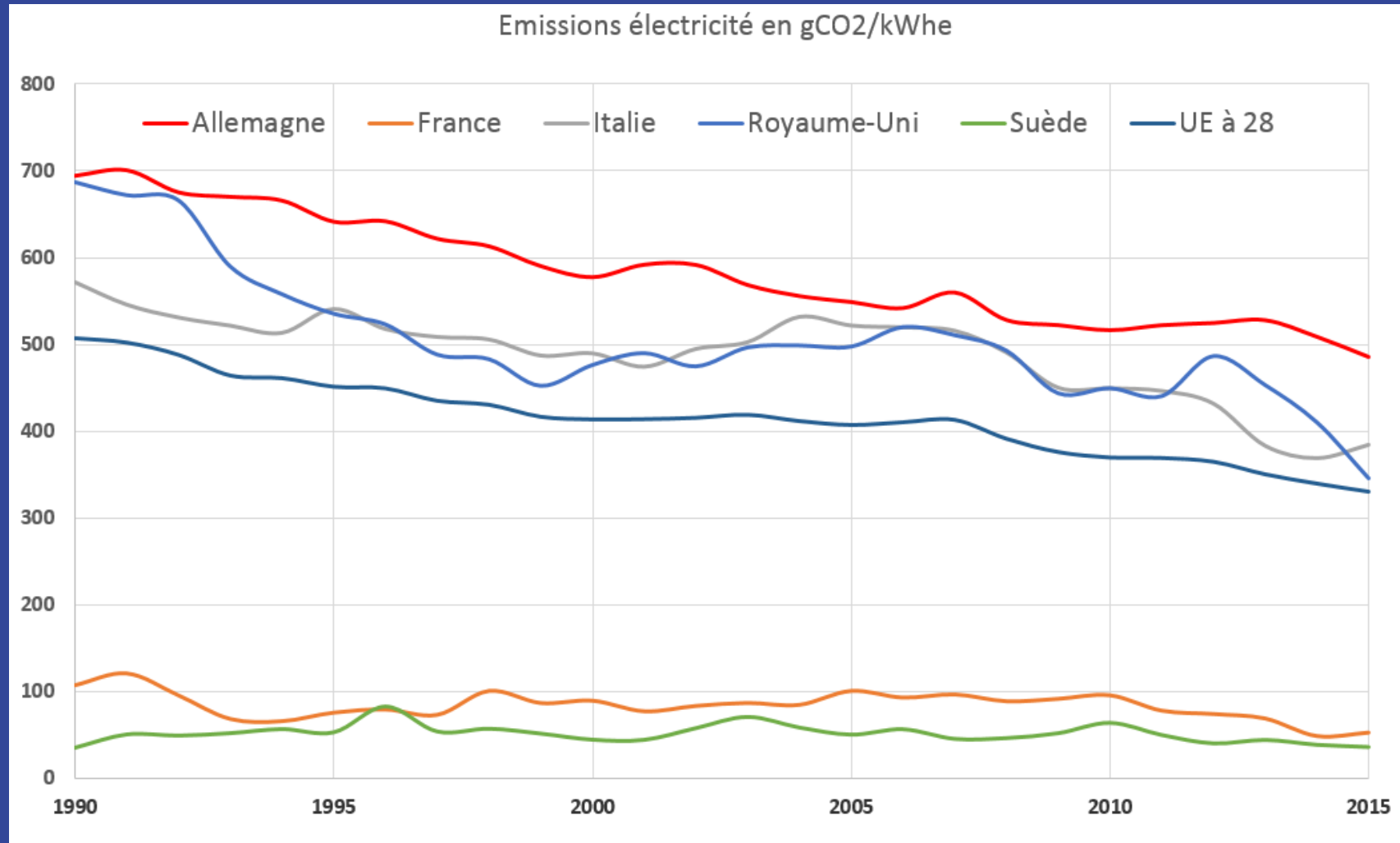


Renault ZOE

**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 m<sup>2</sup>**

avec des modules de 180 W<sub>c</sub>/m<sup>2</sup>,  
et 1000 h/an équivalent pleine puissance

=> **2200 kWh<sub>e</sub>/an**

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

**Rejets de CO<sub>2</sub> sur la phase d'usage :**

dus à la fabrication du système PV

1700 kg CO<sub>2</sub> par kW<sub>c</sub> installé\*,  
pour une durée de vie de 20 ans mini

=> **6 à 8 gCO<sub>2</sub>/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/m<sup>2</sup>**

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

une technologie au silicium polycristallin **180 W/m<sup>2</sup>**,

on obtient une productivité annuelle de **160 kWh<sub>e</sub>/m<sup>2</sup>/an**

**80 TWh** nécessitent **70 km<sup>2</sup>** de superficie,

soit **0,2% 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/>

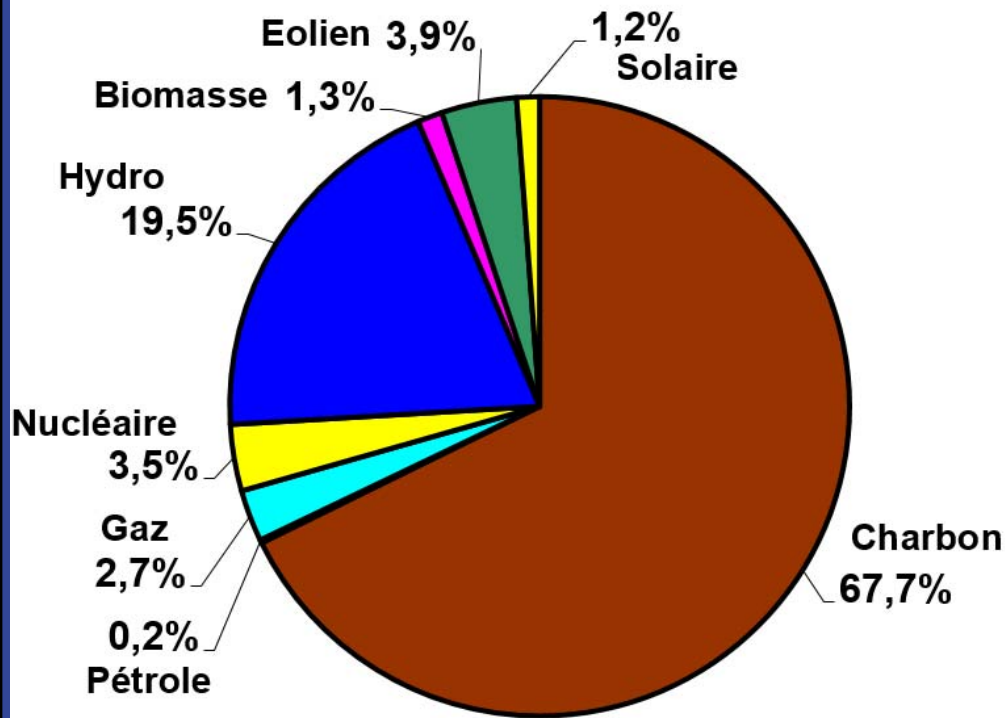
# MERCI POUR VOTRE ATTENTION



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

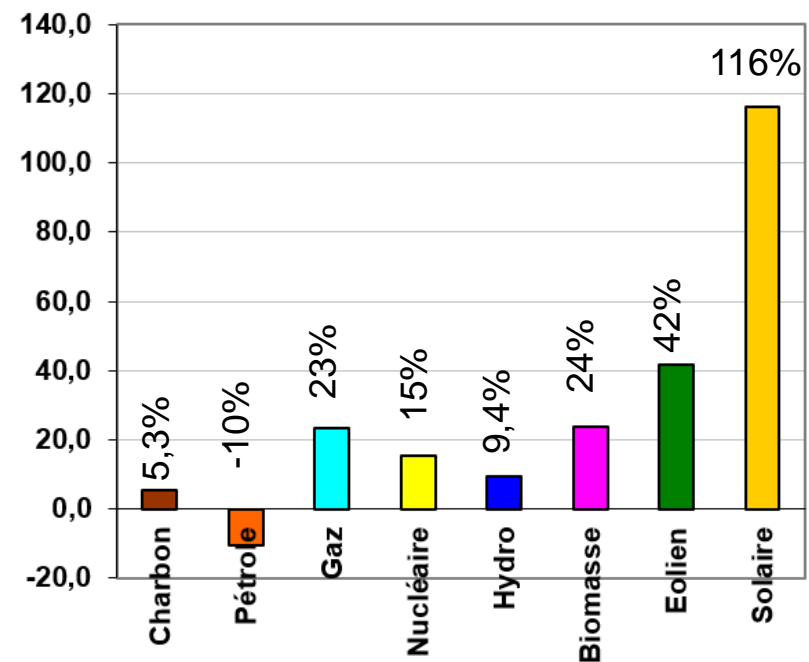
# Production d'électricité en Chine 2016

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**

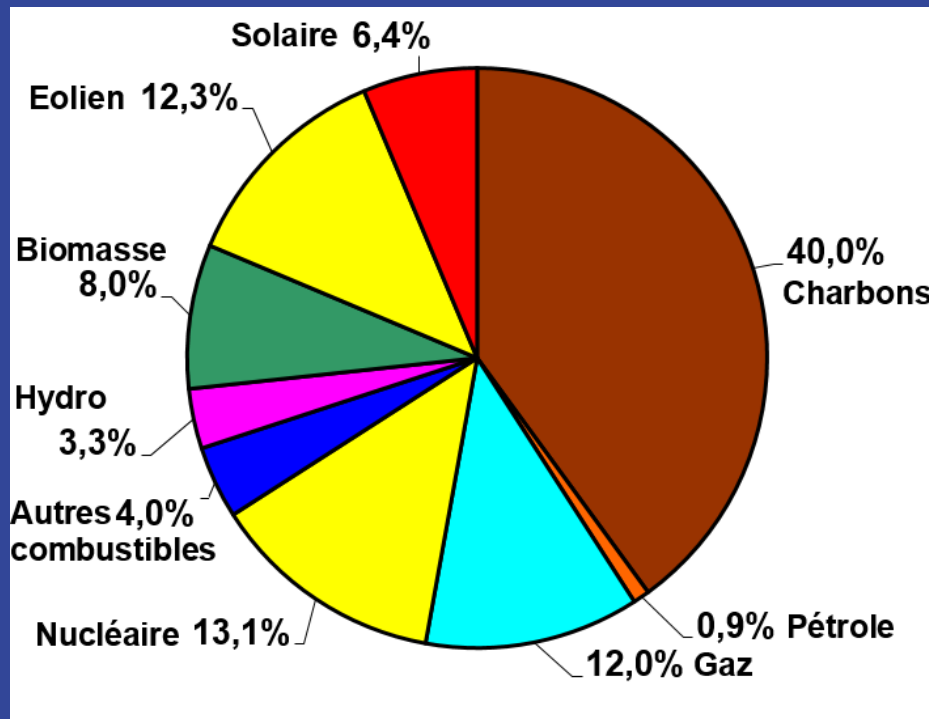
70,6% fossile (+ 5,6% par an sur 8 ans)  
3,5% fissile (+ 15% par an ----- )

Source données : diverses (auteur)



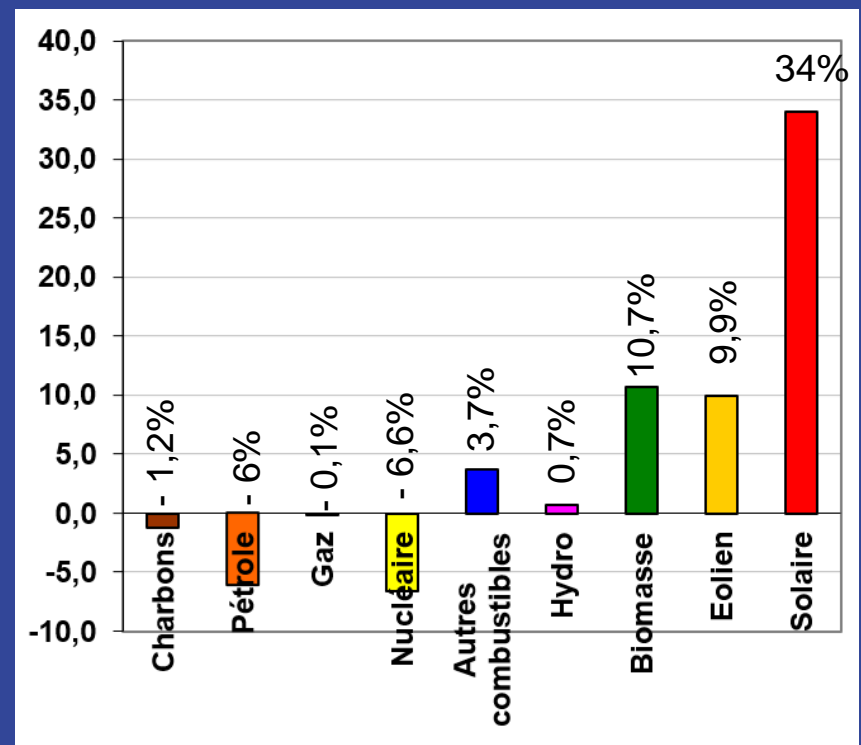
# Production d'électricité en Allemagne 2016

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



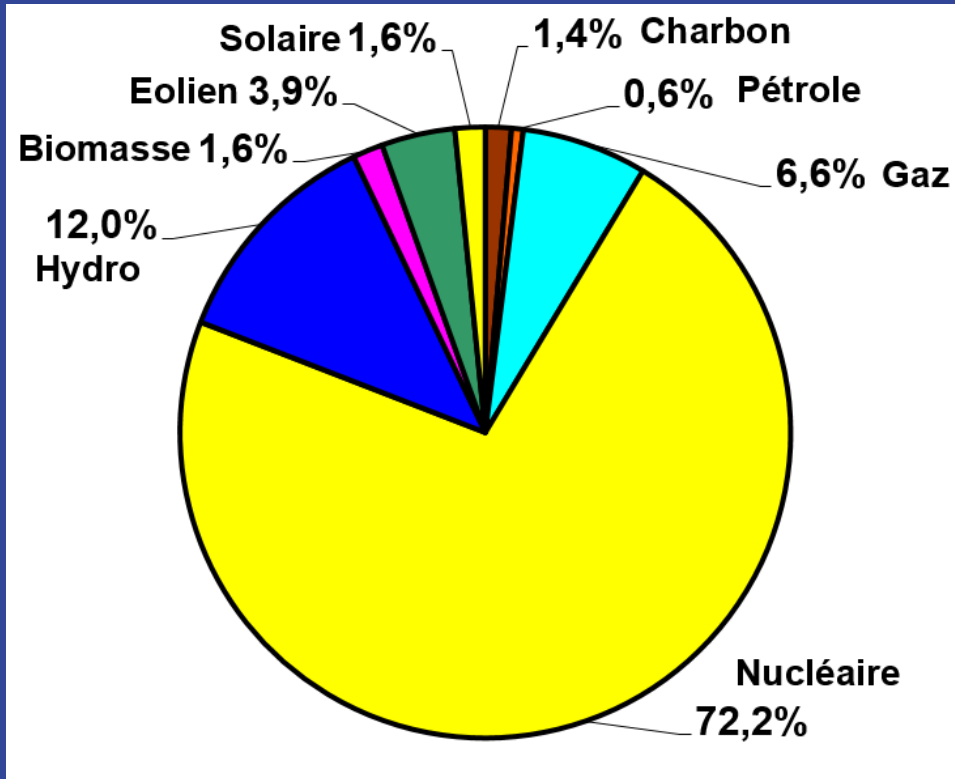
**70% d'origine non renouvelable**  
**- 2,2% par an sur 10 ans**

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

Source données : Agora Energiewende et HypoVereinsbank

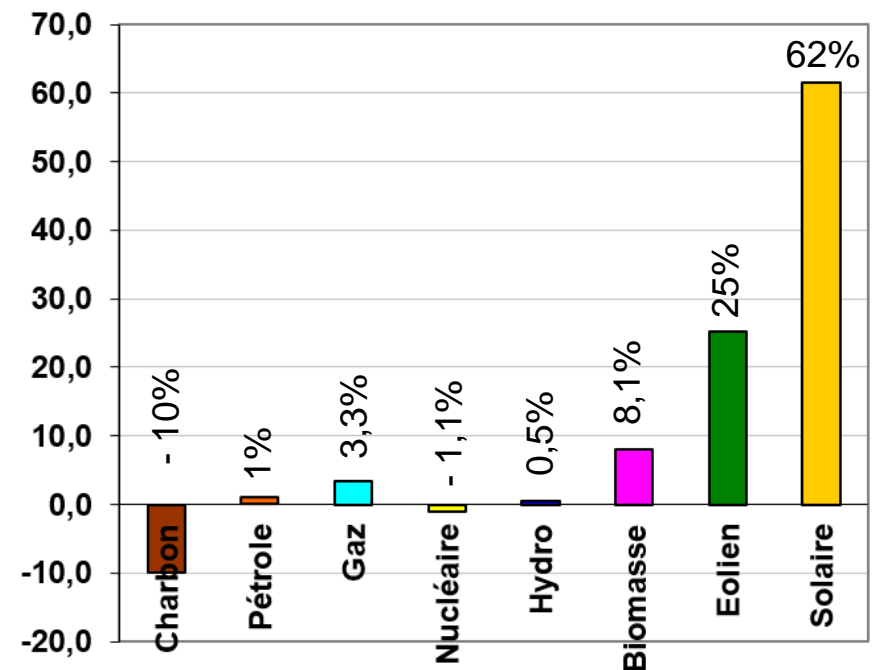
# Production d'électricité en France 2016

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



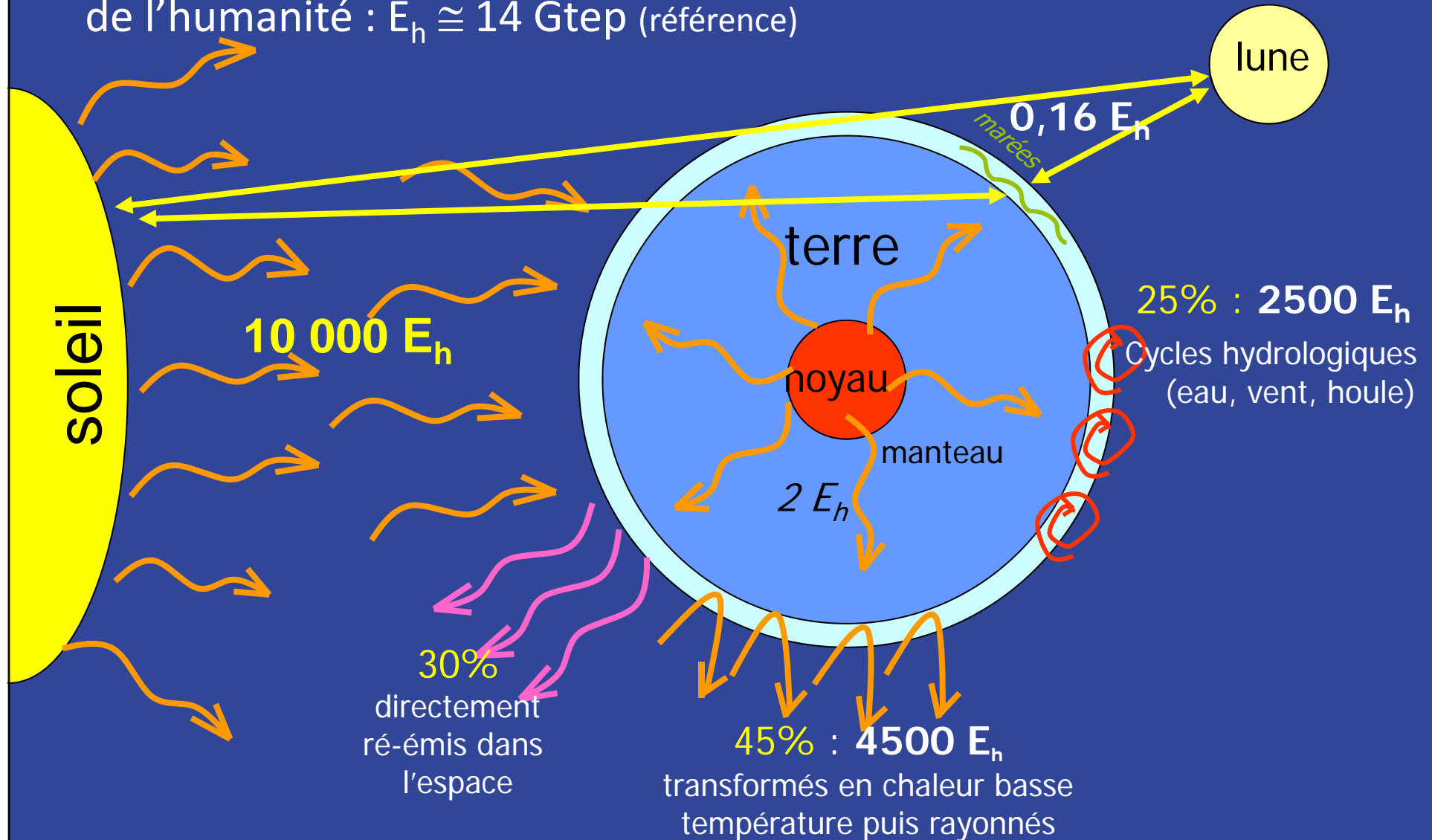
80,9% d'origine non renouvelable  
- 1,1% par an sur 10 ans

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)



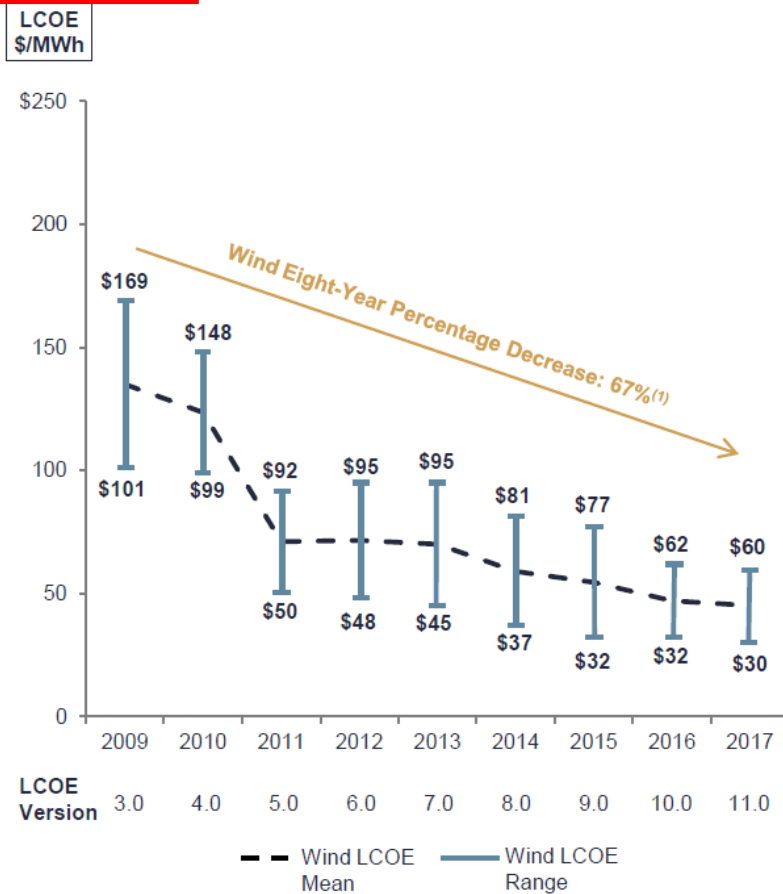
# Electricité : baisse des coûts de production éolien et PV

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

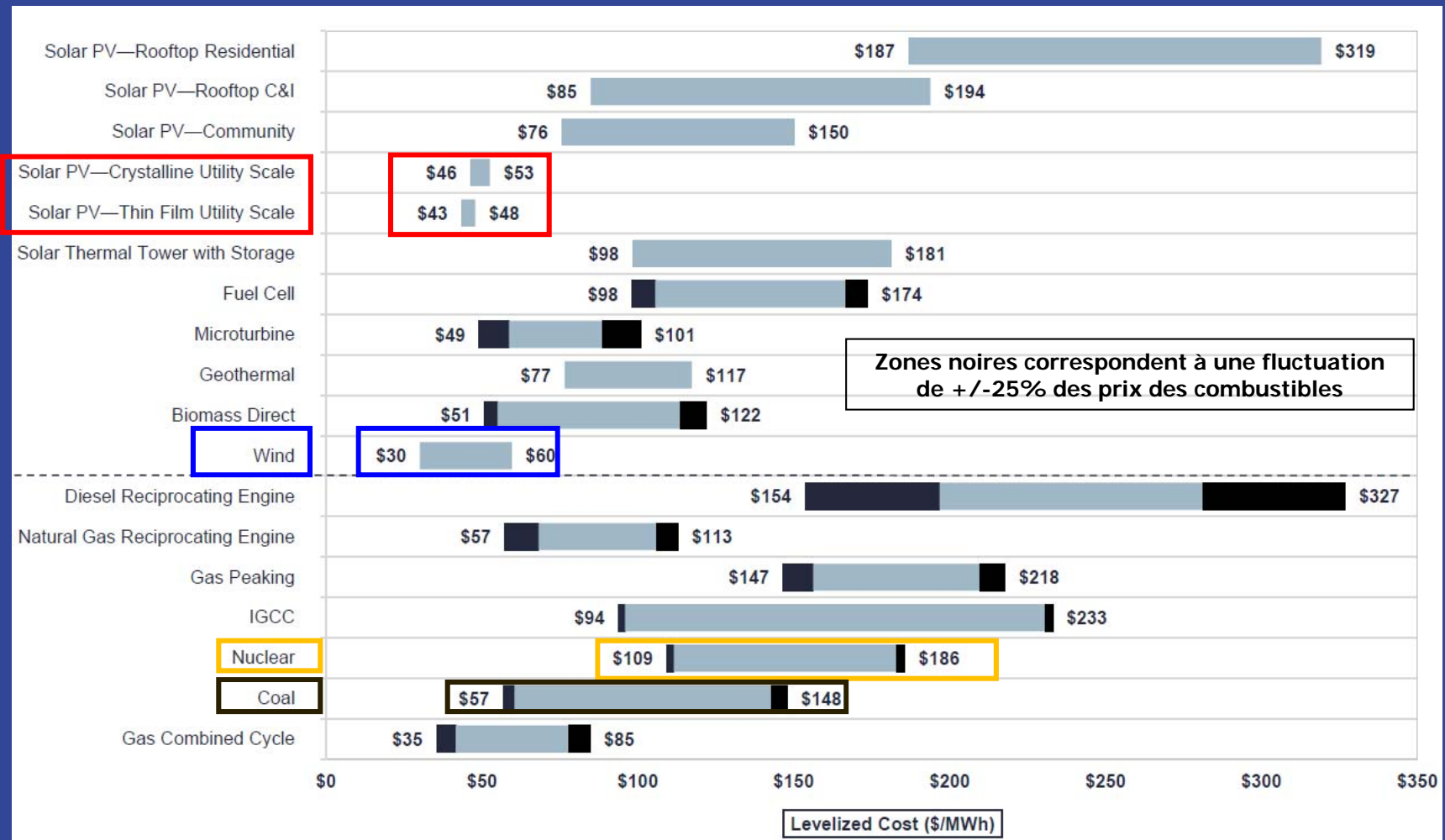
<https://www.lazard.com/media/450337/lazard-levelized-cost-of-energy-version-110.pdf>

CampOSV – InOut Mobilités numériques, Rennes 15 mars 2018

# Electricité : comparaison des coûts

Rapport banque Lazard pour les USA (nov. 2017)

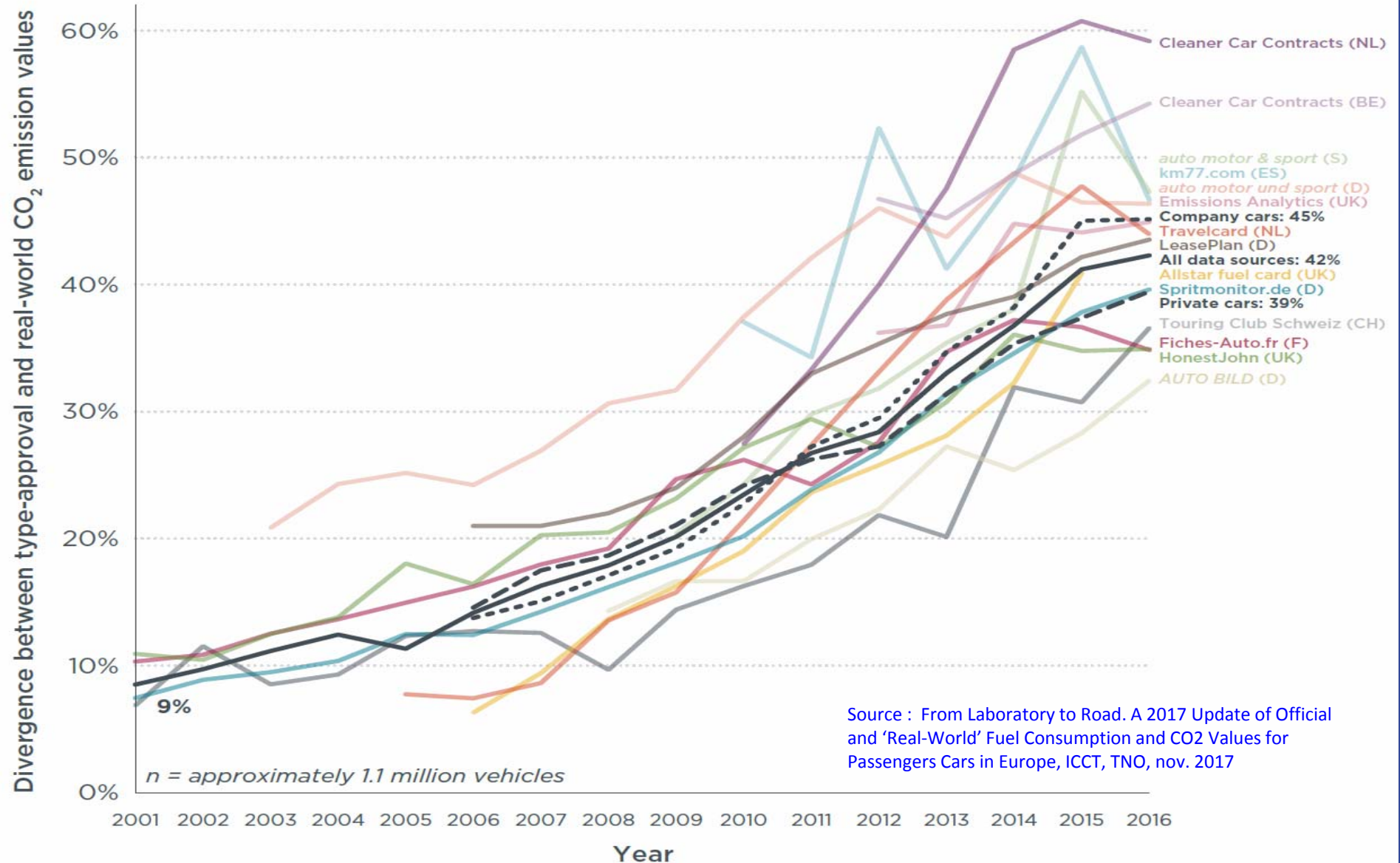
LCOE = Levelized Cost of Electricity



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 CO<sub>2</sub> Values for Passengers Cars in Europe, ICCT, TNO, nov. 2017