



# Enjeux économiques et énergétiques autour des véhicules électrifiées

Adrien Vogt-Schilb

► **To cite this version:**

Adrien Vogt-Schilb. Enjeux économiques et énergétiques autour des véhicules électrifiées. Master. ENPC, 2013. <cel-00797596>

**HAL Id: cel-00797596**

**<https://cel.archives-ouvertes.fr/cel-00797596>**

Submitted on 6 Mar 2013

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



# LES VOITURES ÉLECTRIFIÉES (VEx) DU POINT DE VUE DE L'ÉCONOMIE DE L'ÉNERGIE ET DU CLIMAT

Adrien VOGT-SCHILB  
[vogt@centre-cired.fr](mailto:vogt@centre-cired.fr)

TRADD  
19 février 2013

# Plan de cette présentation

---

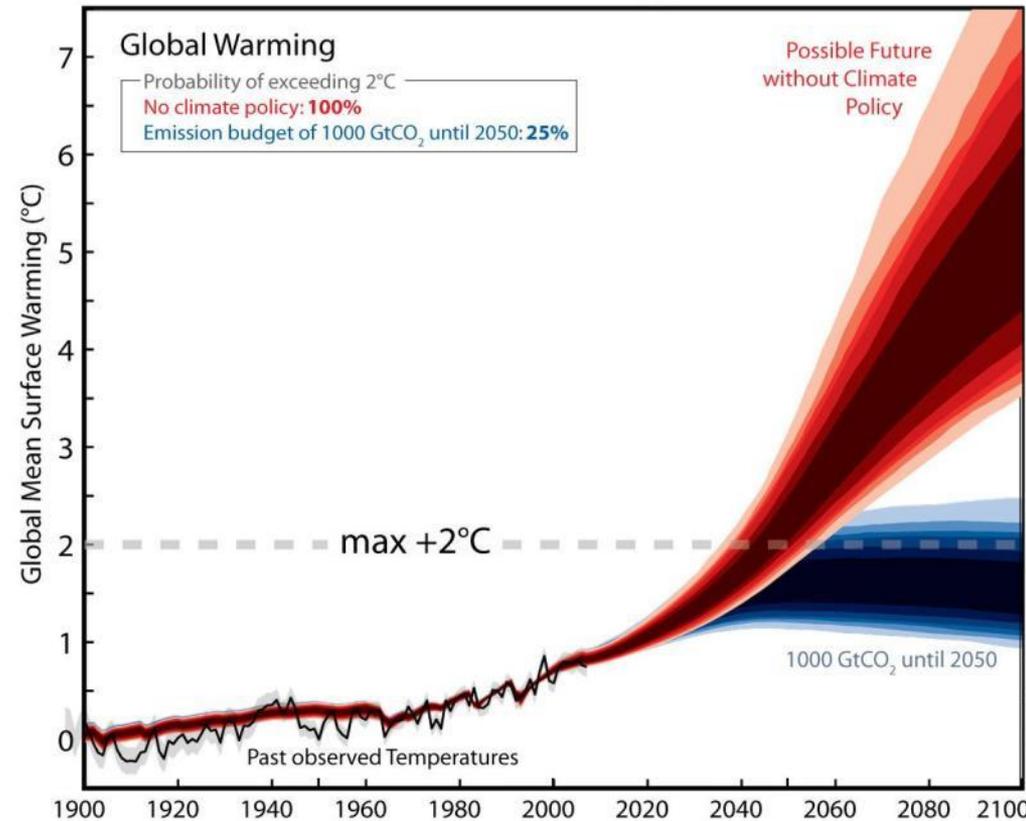
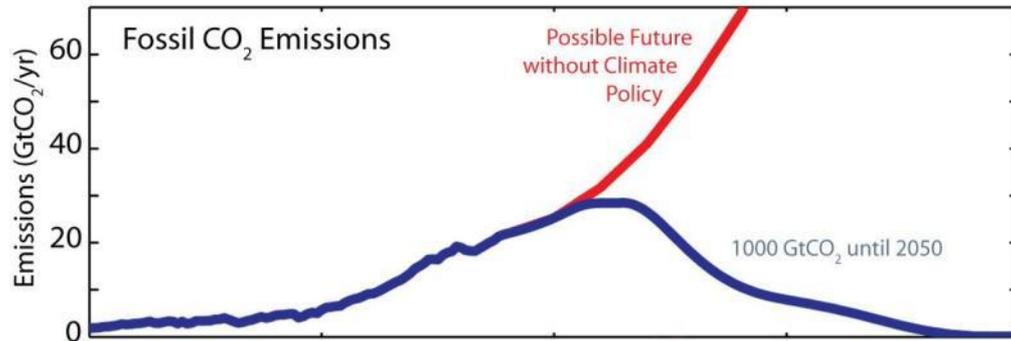
1. Comment les transports s'inscrivent-ils dans le contexte énergétique et climatique mondial?
2. Le véhicule électrique permet-il de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES)?
3. La voiture électrique est-elle compatible avec les usages en termes de mobilité?
4. Quel serait l'impact pour la production et distribution d'électricité?
5. Le coût de la tonne de CO2 évitée grâce aux VEx est-il trop élevé?
6. Quel est le rôle de l'incertitude qui pèse sur les prix futurs du pétrole, de l'électricité et du carbone ?

# La stabilisation du climat mondial exige une action collective rapide

---

- Objectif climatique :  $<+2^{\circ}\text{C}$
- Il faut réduire drastiquement les émissions de GES pendant le 21<sup>ème</sup> siècle  
(En Europe, facteur 4 en 2050)
- Il faut agir dès maintenant à cause de l'inertie du système climatique + économique  
Bonus/malus → comportement d'achats → stock de voitures → Émissions de GES → Concentration → Réchauffement
- Le transport est la 3<sup>ème</sup> source mondiale d'émission de GES

# The ambitious goal of limiting climate change to +2°C requires to reduce drastically global GHG emissions



Émissions de GES (tCO<sub>2</sub>/an) →  
Concentration (ppm) →  
Réchauffement (°C)

src : Raper, Wigley (2012)  
d'après Meinshausen et al. (2009)

# Des informations compréhensibles sur le réchauffement climatique et la « controverse » sont à votre disposition

---

- Le réchauffement climatique est une réalité  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Global\\_warming](http://en.wikipedia.org/wiki/Global_warming)
- Il est causé par les activités humaines  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Attribution\\_of\\_recent\\_climate\\_change](http://en.wikipedia.org/wiki/Attribution_of_recent_climate_change)
- Les conséquences nettes pour les humains seront négatives si on ne fait rien  
[http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/syr/en/spm.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/en/spm.html)
- Les arguments contre ces faits sont superficiels  
<http://www.skepticalscience.com/argument.php>  
<http://www.skepticalscience.com/big-picture.html>

# Le secteur des transports pèse de plus en plus dans les émissions de GES

- Le transport est la 3<sup>ème</sup> source mondiale d'émission de GES
- Sa contribution aux émissions de CO2 continue de progresser

Europe	MtCO2		Avg. annual growth rate (2009/1990)	Shares	
	1990	2009		1990	2009
<b>Total CO2</b>	4 035	3 529	-0.7%	100%	100%
<b>Power Generation</b>	1 491	1 270	-0.8%	37%	36%
<b>Transport</b>	<b>744</b>	<b>905</b>	<b>+1.0%</b>	<b>18%</b>	<b>26%</b>

Source : IEA (2011)

# Les réductions d'émissions dans les transports passent a priori par trois canaux

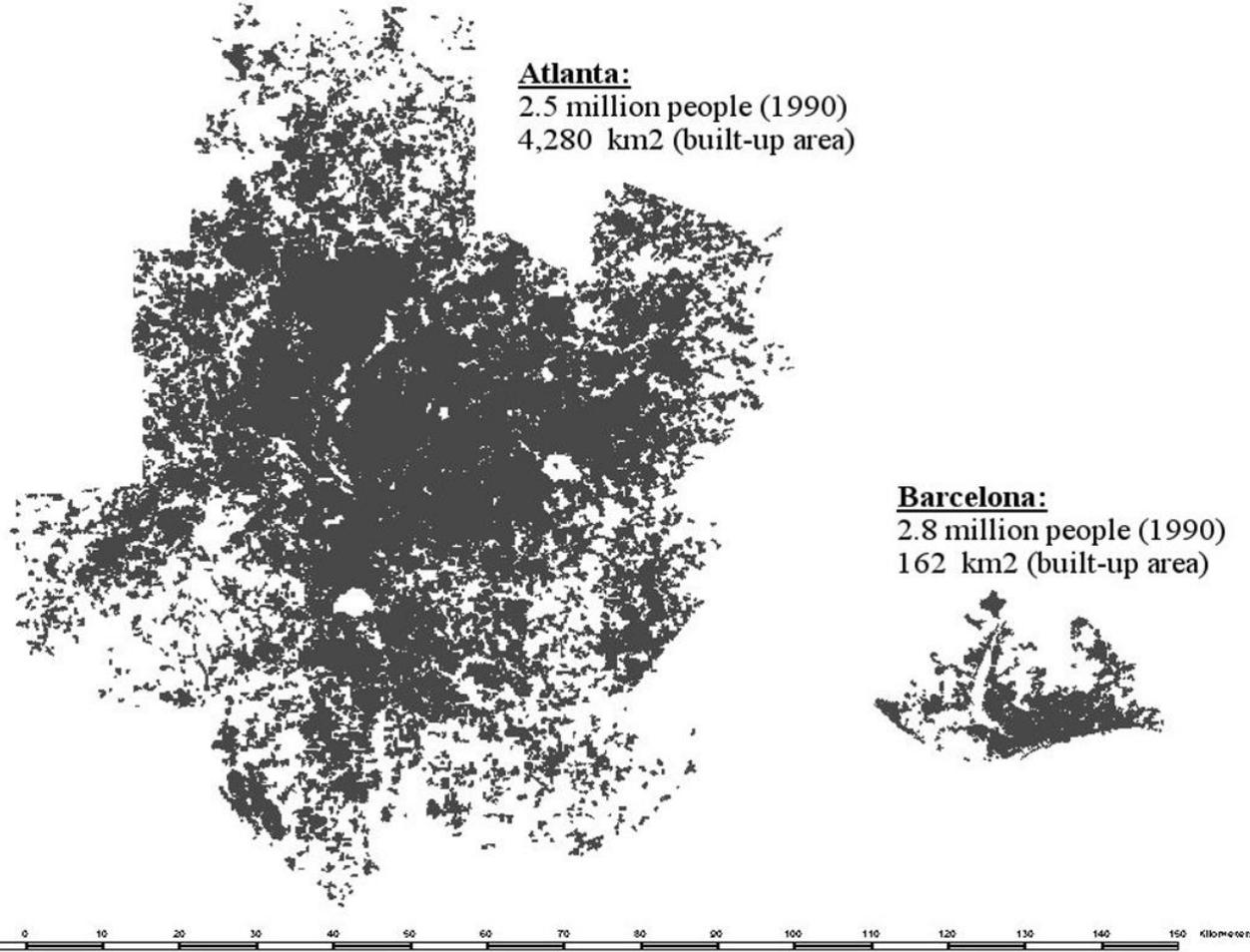
---

L'évolution des émissions peut se décomposer en :

1. **Volume** de transport (passagers×km)
2. **Structure** (véhicules privés, TC, modes doux...)
3. **Intensité** (kWh/100km de chaque mode, et tCO<sub>2</sub>/kWh)

# La taille des villes joue un rôle important dans le volume et la structure de transports

The Built-up Area of Atlanta and Barcelona Represented at the Same Scale



**Lower emissions in Barcelona because of:**

**1 - Shorter travel distance;**

**2 – Easier use of public transport:**

Barcelona has 99 km of metro line.

To provide the same accessibility to metro in Atlanta, 3400 km would be necessary.

# Dans une France bien desservie en TC, la voiture privée est le moyen de transport dominant

IdF: 61% des pkm en VP (STIF, 2005. Compte déplacements de voyageurs en Ile de France)

	Structure en %		Niveau en G pkm	Evolution en %
	2000	2007	2007	2006-2007
<b>Voitures particulières</b>	<b>83.4</b>	<b>82.6</b>	727.8	0.6
<b>Transports collectifs</b>	16.6	17.4	153.2	2.5
dont Transports urbains	3.7	4.1	36.1	2.4
Ferroviaire	7.2	7.9	69.1	1.8
Routier	3.9	3.9	34.8	5.3
Aérien	1.8	1.5	13.2	0.3
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>881.1</b>	<b>0.9</b>

Source : Caicedo, Emmanuel, Carlmo Colussi, Karine Gormon, Françoise Jacquesson, Guillaume Wemelbeke, et Frédérique Boccara. 2008. En 2007, hausse de la mobilité des voyageurs et des transports de marchandises. *SESP en bref*.

# En France, 40% de la population est localisée dans une zone peu propice au TC

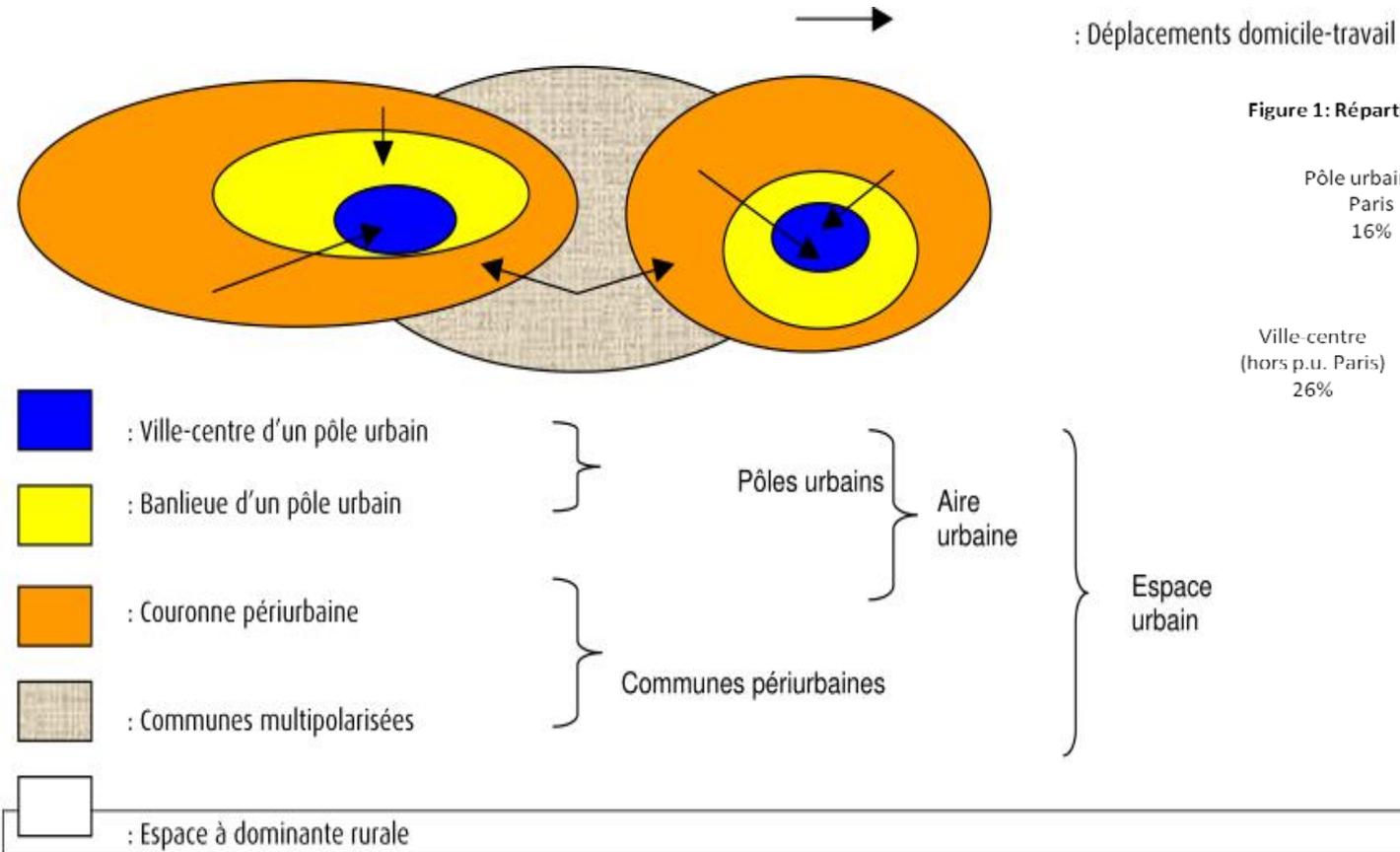
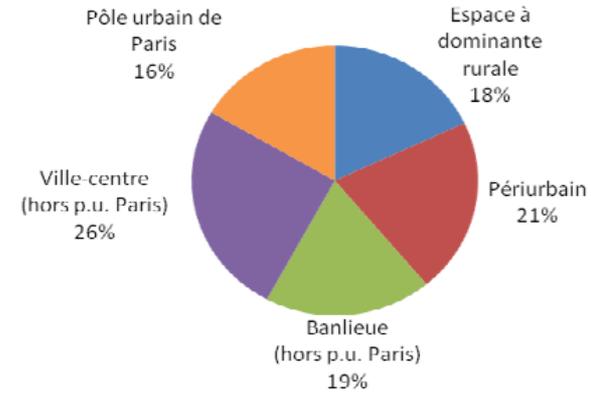


Figure 1: Répartition des ménages par zone de résidence



Ville centre: Bordeaux, Lyon

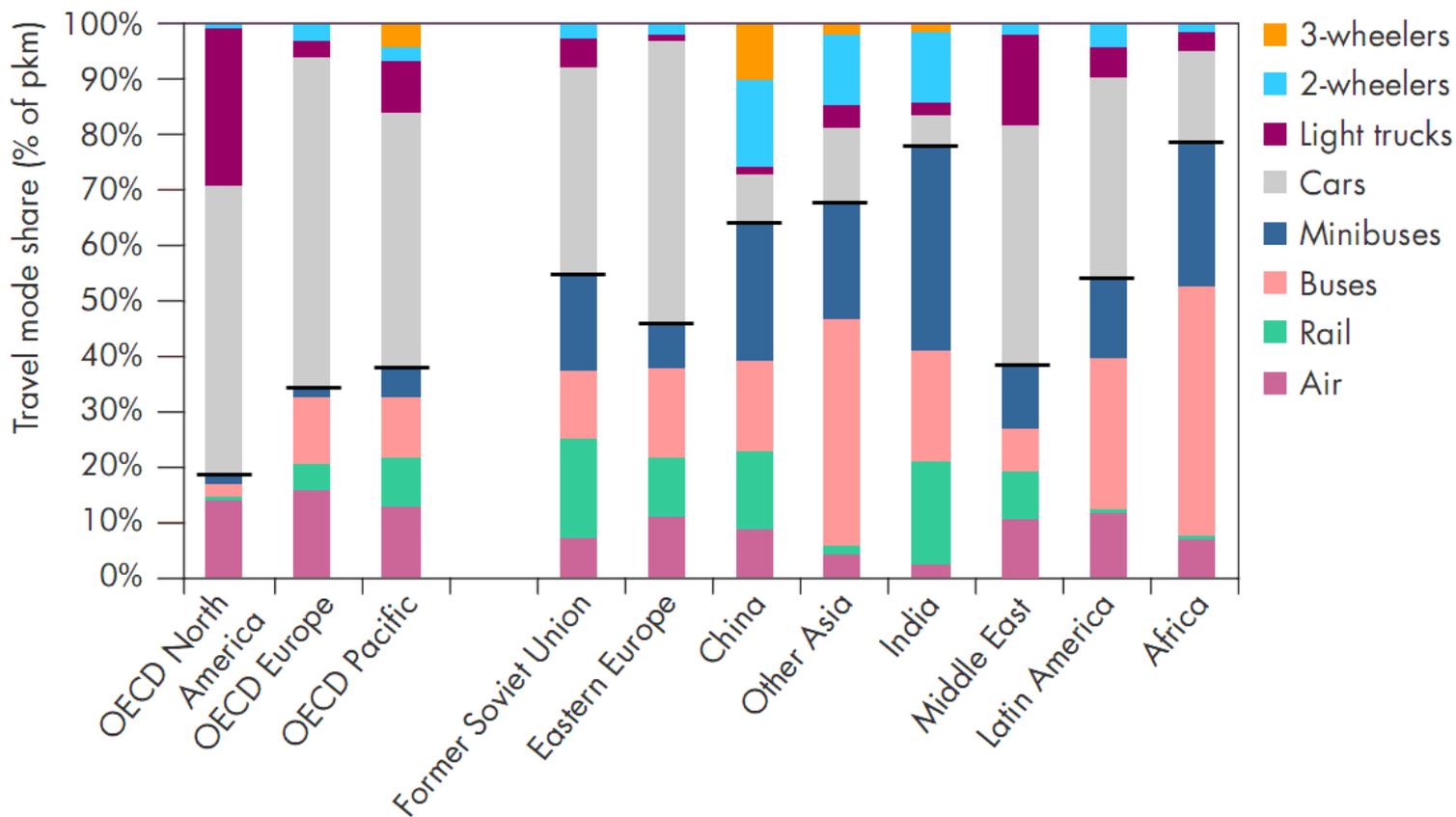
Banlieue: Vincennes, Champs sur Marne

Péri urbain: Fontainebleau, Rambouillet

Rural : Saint Michel, Dauville

# La part des transports en commun reste faible en OCDE

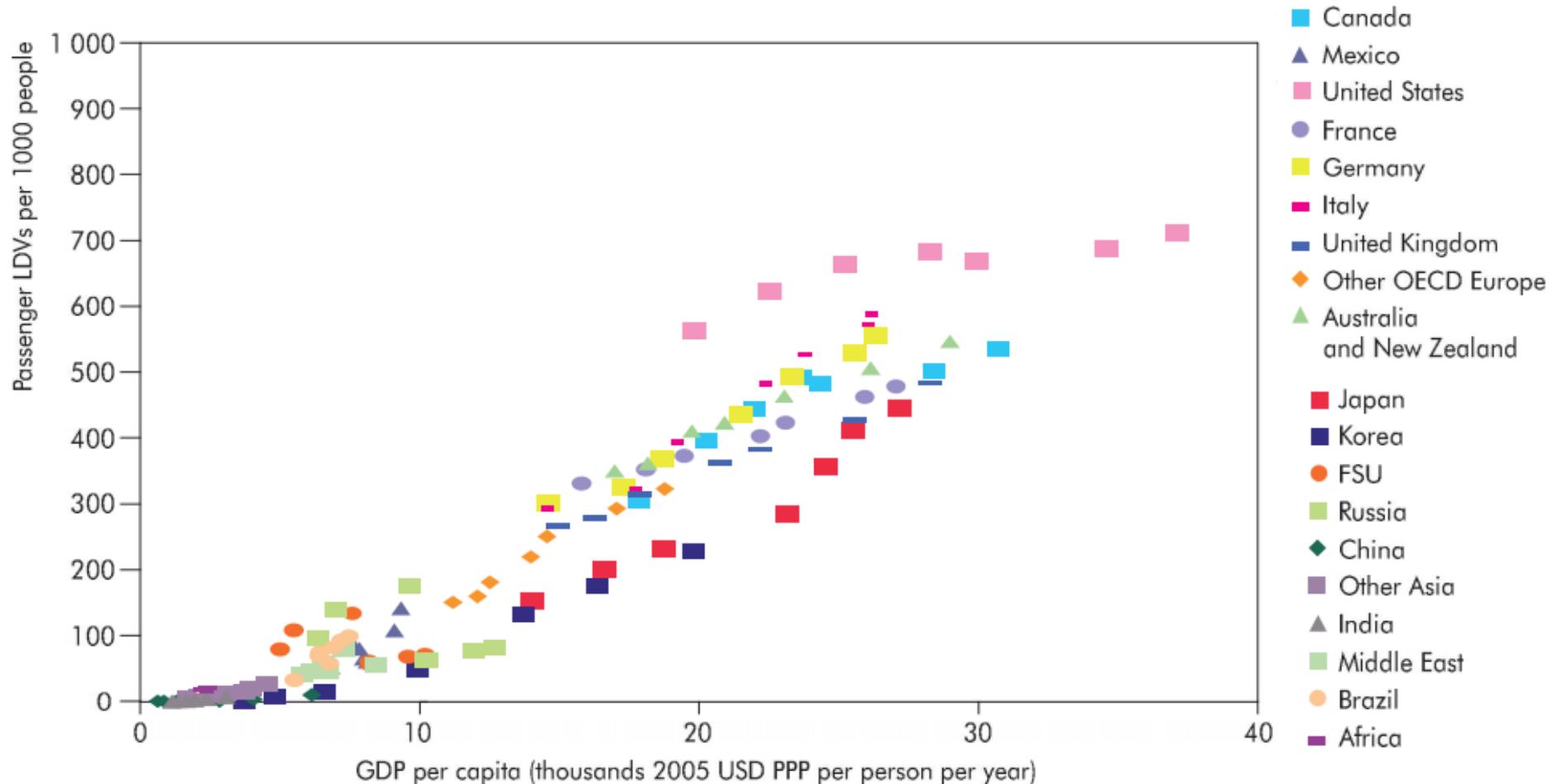
► Motorised passenger travel split by mode, 2005



Source: IEA, 2009. Transport Energy and CO<sub>2</sub>: Moving towards Sustainability., Paris, France: Organisation for Economic Co-operation and Development.

# ... et devrait diminuer dans les pays en développement

Passenger LDV ownership and personal income, 1970-2005



Source: IEA Mobility Model database.

# Les réductions d'émissions dans les transports passent a priori par trois canaux

---

L'évolution des émissions peut se décomposer en :

- Difficile et lent** {
1. **Volume** de transport (passagers×km)
  2. **Structure** (véhicules privés, TC, modes doux...)
  3. **Intensité** (kWh/100km de chaque mode, et tCO<sub>2</sub>/kWh)

# Le véhicule électrique (VE), une solution potentielle, mais critiquée

---

- Consommation énergétique très réduite
  - L'essence contient 34MJ/L
  - 1 MJ = 0.28 kWh
  - L'essence contient 9.5kWh/L
  - 20 kWh/100km = 2.1 L<sub>essence</sub>/100km
- Moindre exposition aux aléas des marchés pétroliers (prix et disponibilité)

## Critiques:

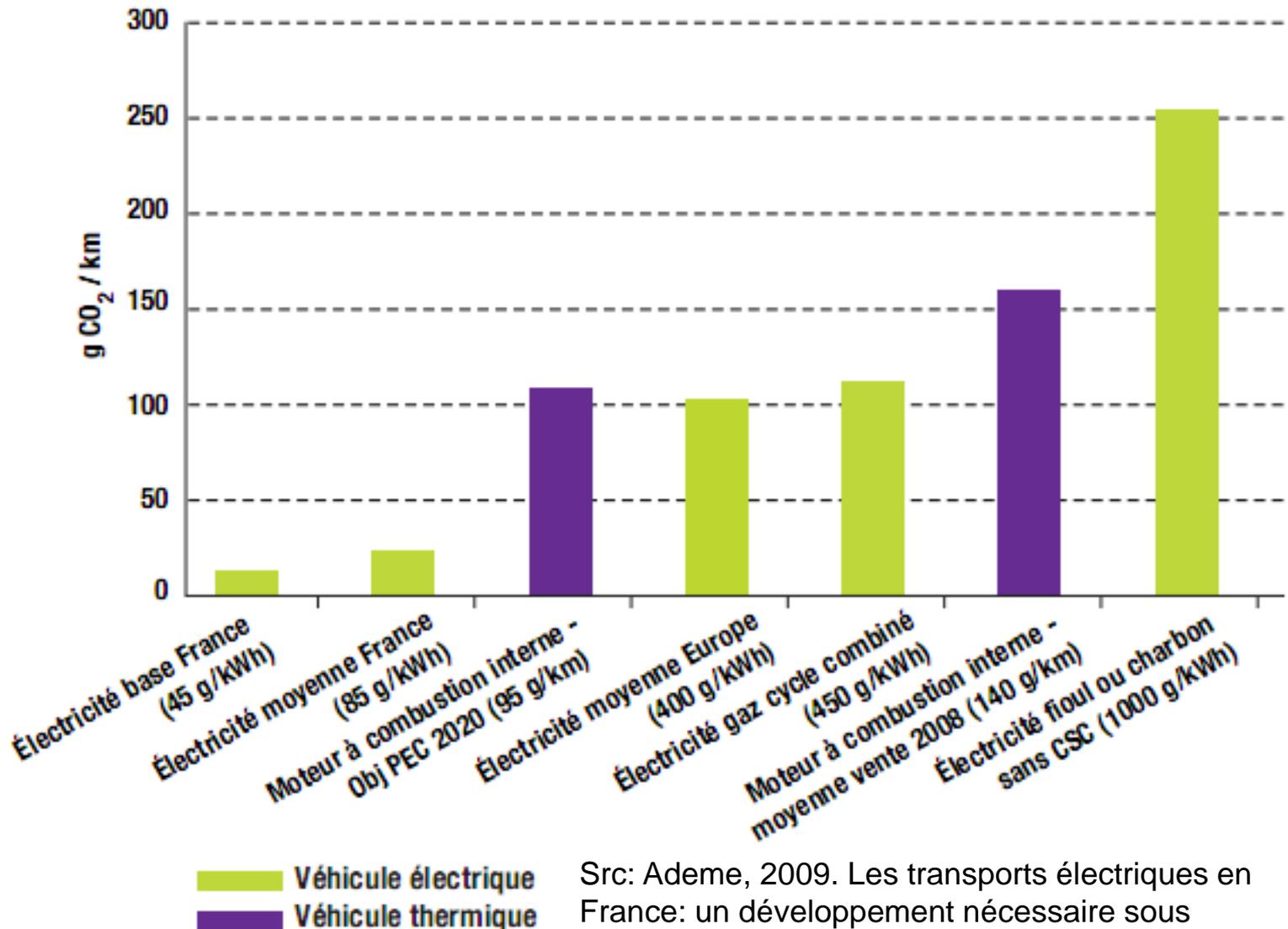
1. Interactions avec le secteur de production d'électricité (contenu carbone? Infrastructure?)
2. Autonomie limitée des véhicules ? (Environ 150 km)
3. Coût du carbone économisé (*batteries trop chères?*) ?

# Plan de cette présentation

---

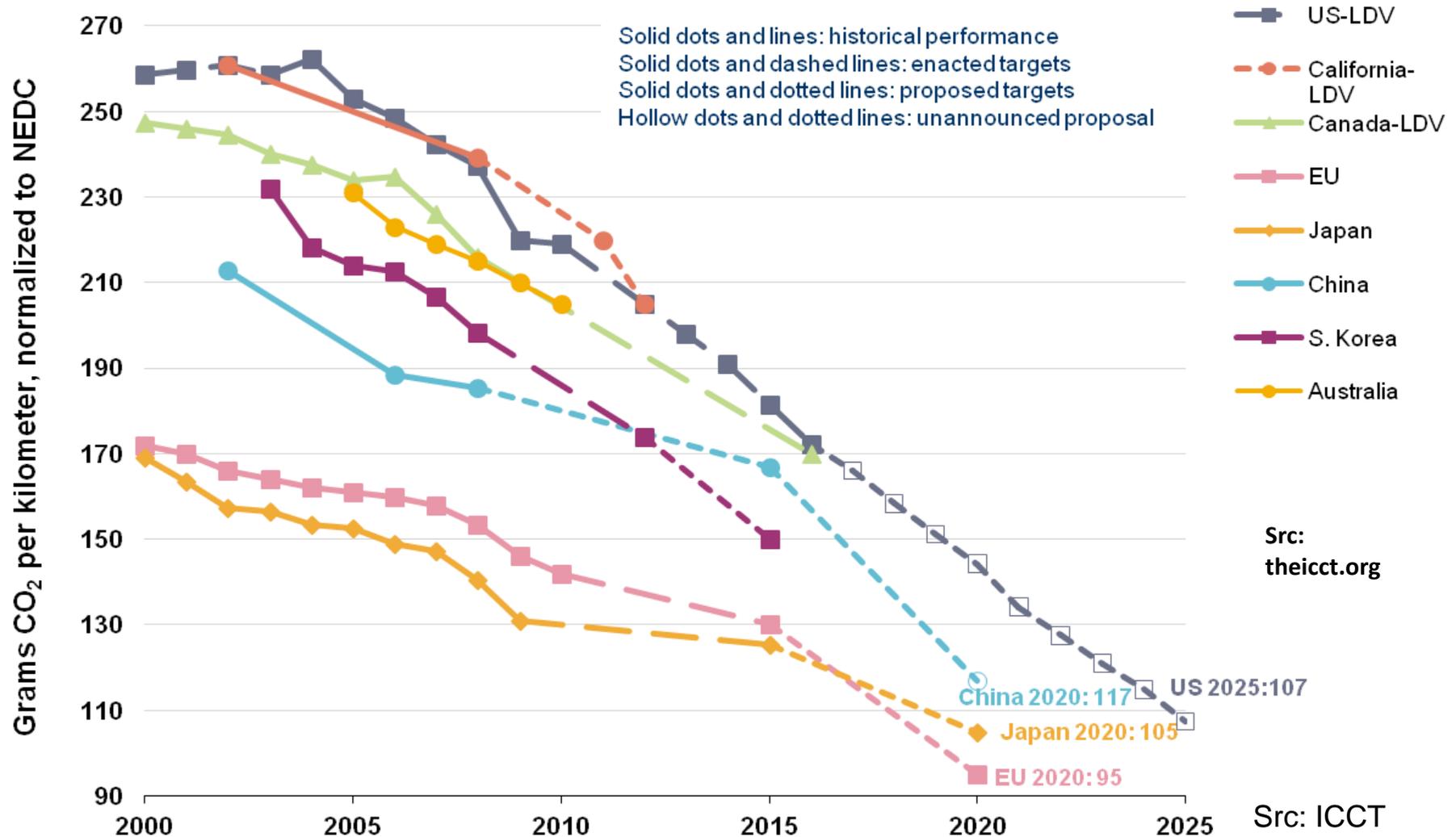
1. **Le transport est la 3<sup>ème</sup> source d'émission de GES et contribue à la dépendance pétrolière.**
2. Le véhicule électrique permet-il de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES)?
3. La voiture électrique est-elle compatible avec les usages en termes de mobilité?
4. Quel serait l'impact pour la production et distribution d'électricité?
5. Le coût de la tonne de CO2 évitée grâce aux VEx est-il trop élevé?
6. Quel est le rôle de l'incertitude qui pèse sur les prix futurs du pétrole, de l'électricité et du carbone ?

# Émissions du puits à la roue des véhicules thermiques et électriques : situation actuelle



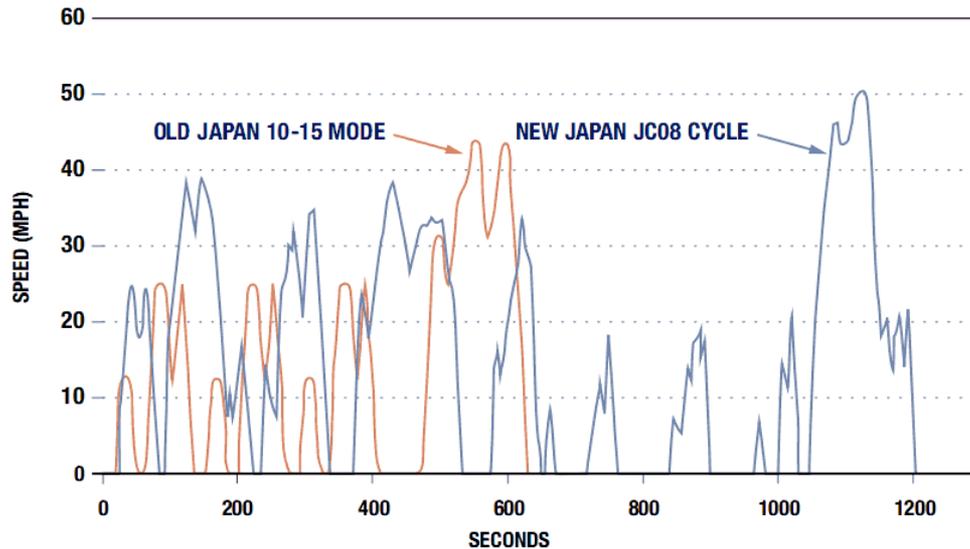
Src: Ademe, 2009. Les transports électriques en France: un développement nécessaire sous contraintes. Ademe & vous - Stratégie & études (21)

# Dans certaines régions du monde, la consommation moyenne des véhicules privés est et sera contrainte par des normes

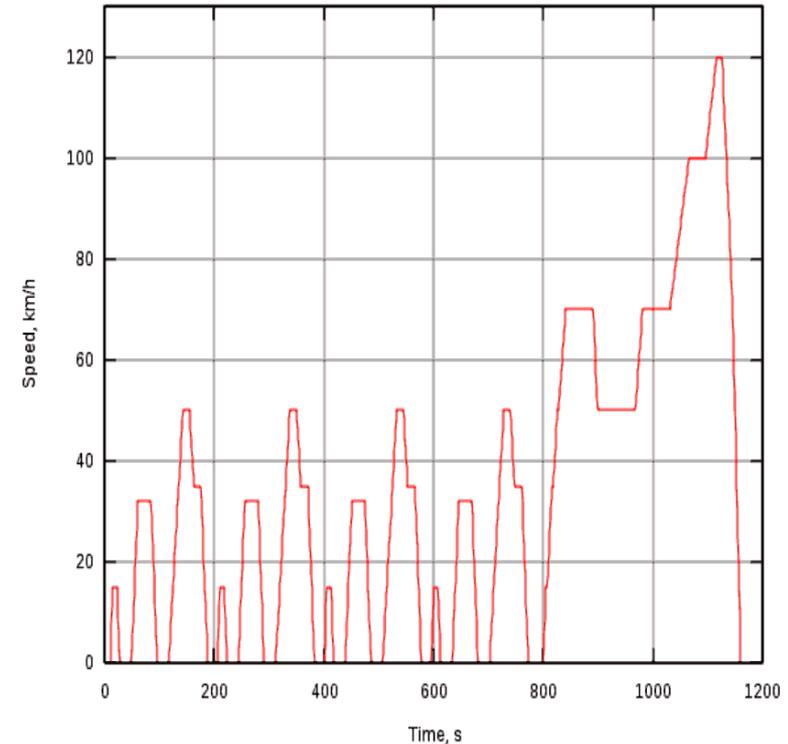


21 [1] China's target reflects gasoline fleet scenario. If including other fuel types, the target will be lower.  
 [2] US and Canada light-duty vehicles include light-commercial vehicles.

# (Il s'agit d'une consommation *fiscale*, plutôt que de la consommation réelle)



Cycle Japonais



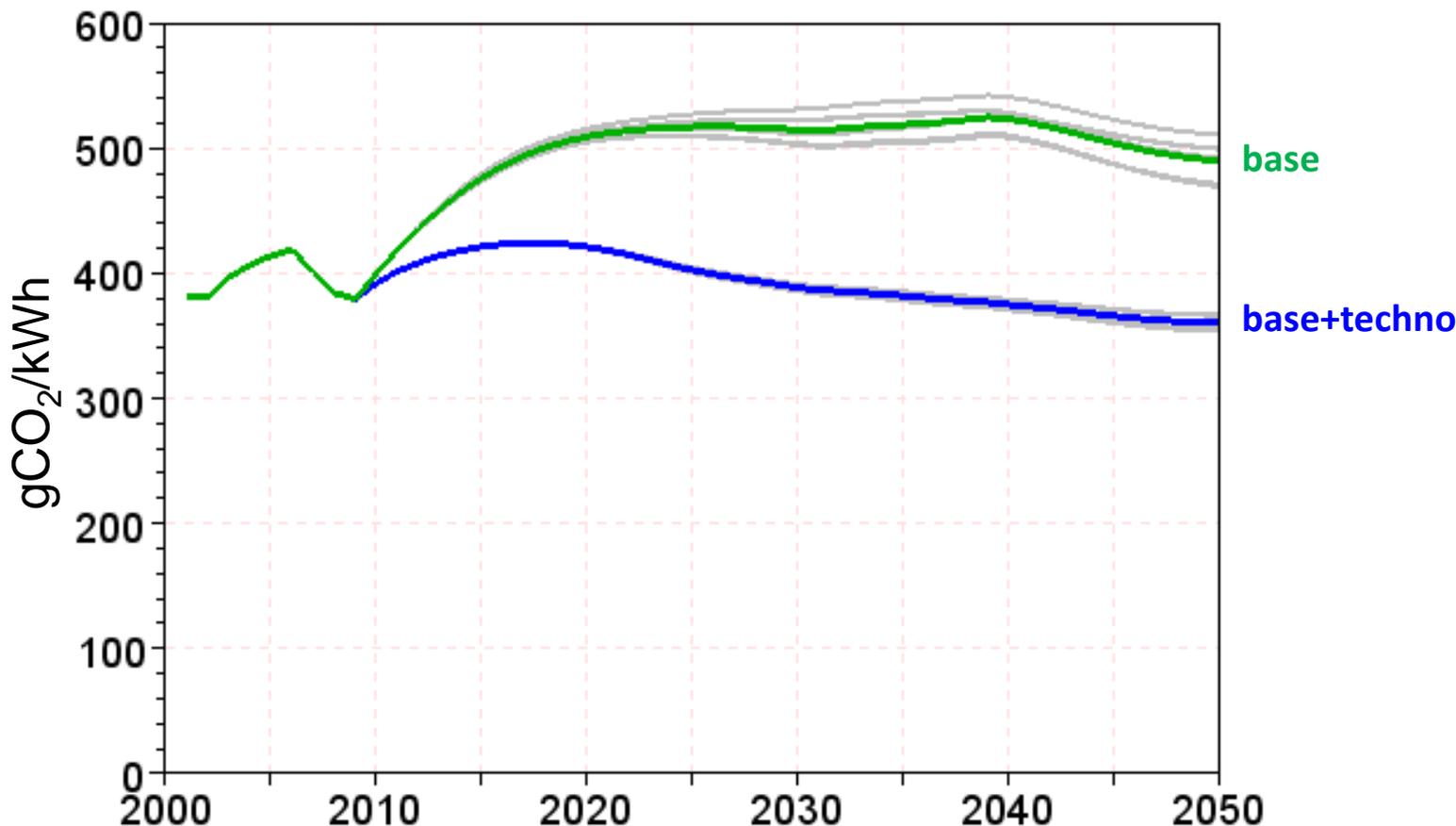
Cycle Européen

La comparaison des cycles n'est pas triviale:

- Feng, A. & Sauer, A., 2004. Comparison of Passenger Vehicle Fuel Economy and GHG Emission Standards Around the World, Pew Center on Global Climate Change.
- An, F. et al., 2007. Passenger Vehicle Greenhouse Gas and Fuel Economy Standards: A Global Update, Washington DC: The international council on clean transportation.

# L'avantage environnemental du VE : anticiper l'évolution du parc de production électrique

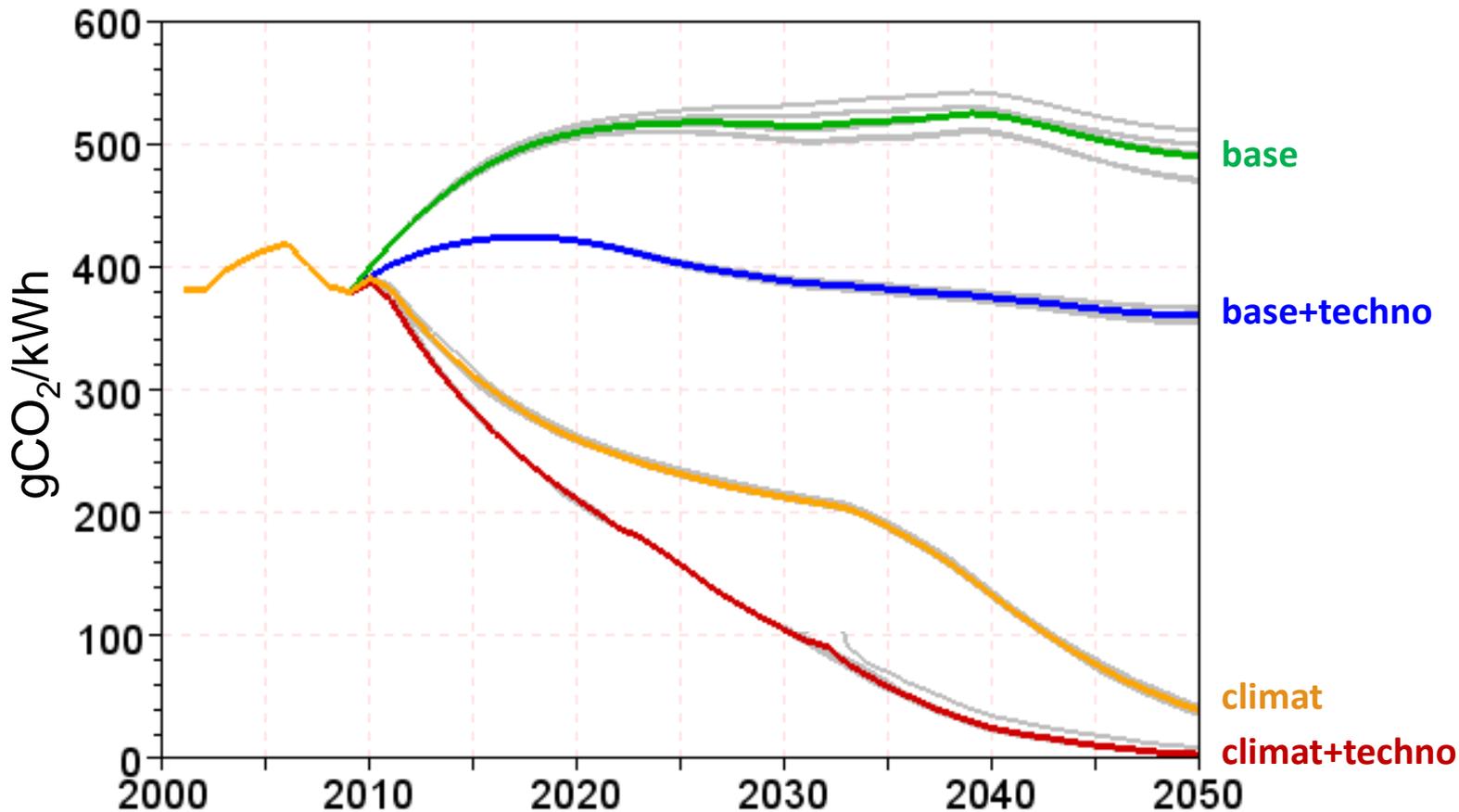
Contenu carbone de l'électricité, Europe



Src: Cired

# L'avantage environnemental du VE : une question de cohérence du raisonnement

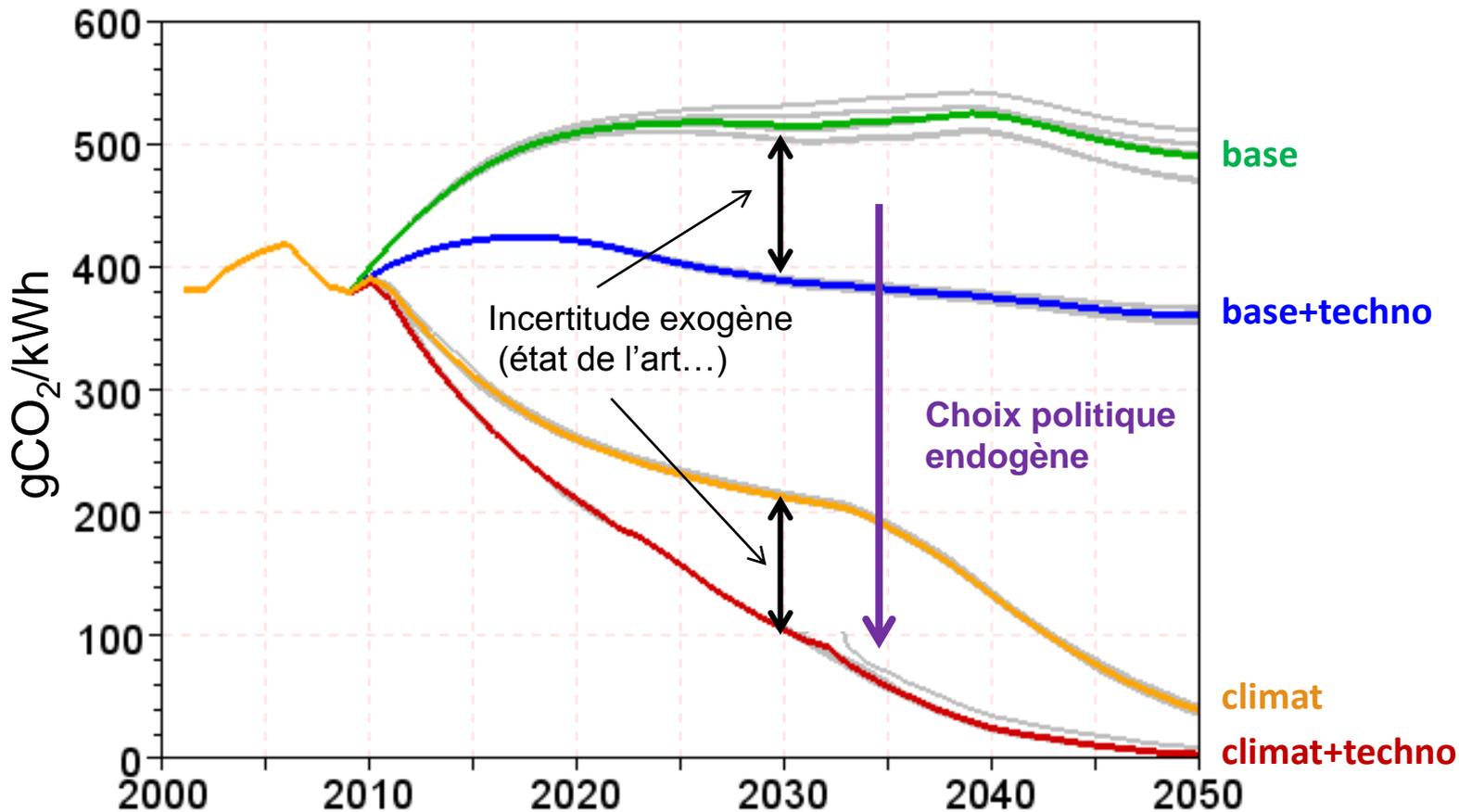
Contenu carbone de l'électricité, Europe



Src: Cired

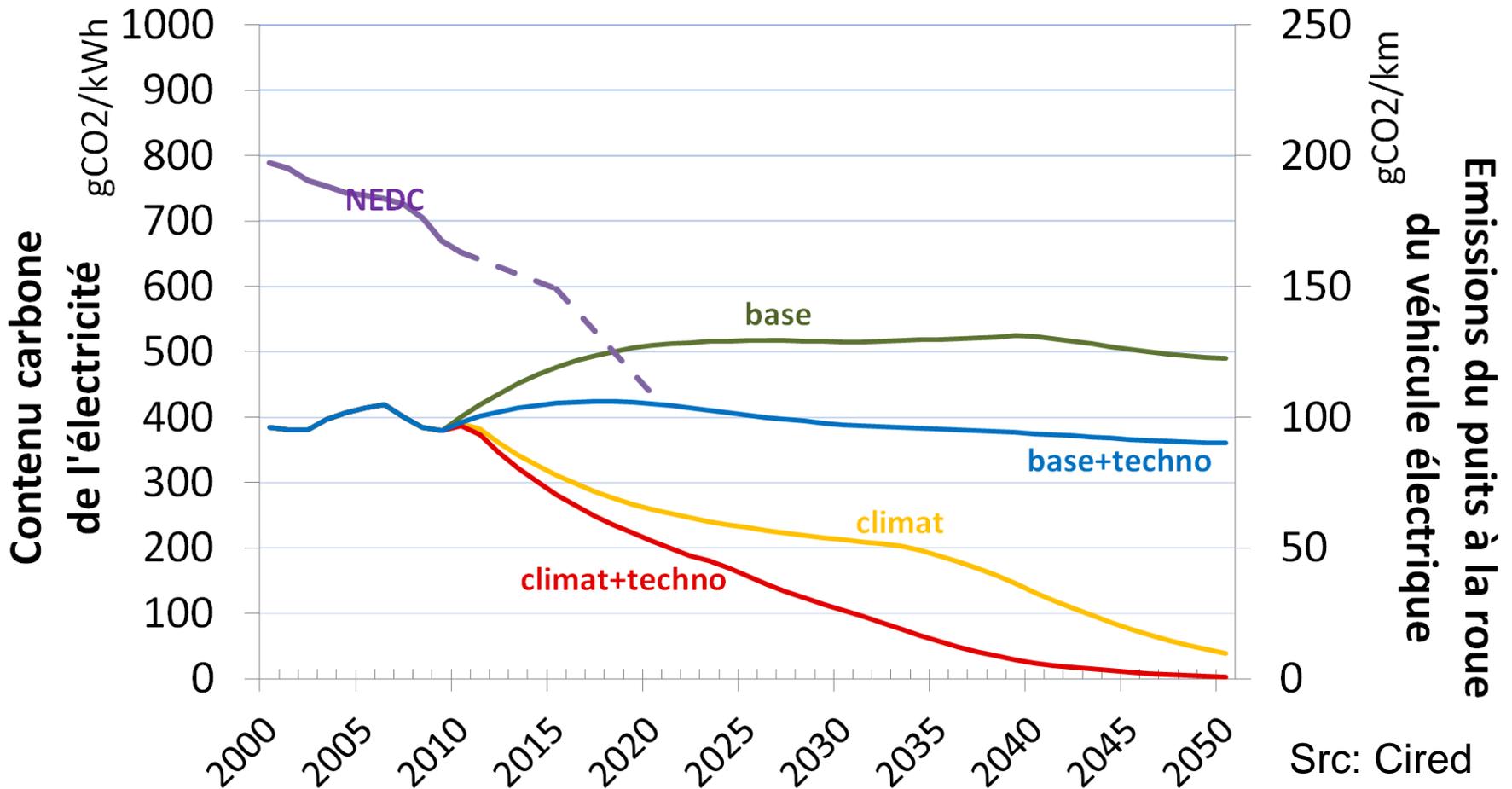
# L'avantage environnemental du VE : une question de cohérence du raisonnement

Contenu carbone de l'électricité, Europe



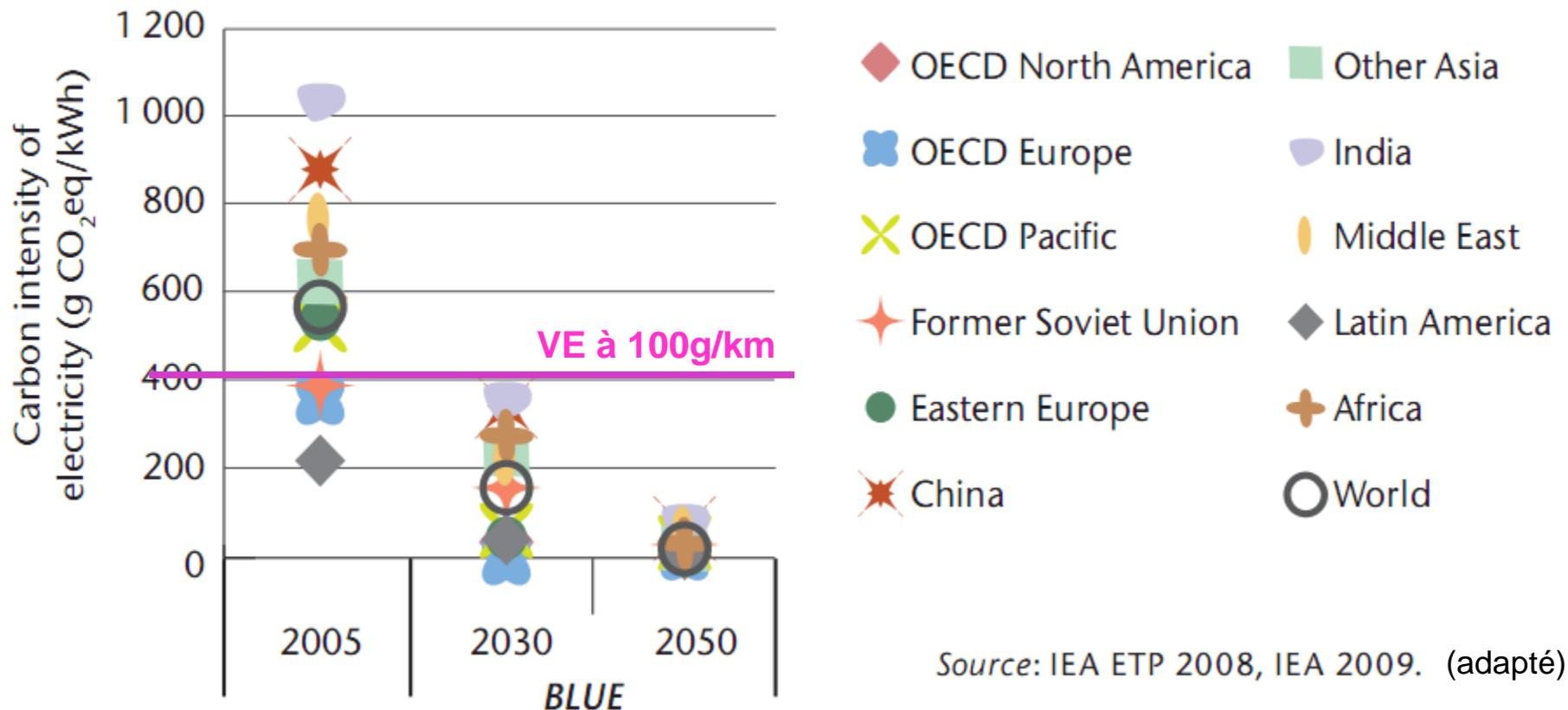
Src: Cired

# En Europe, un avantage des maintenant qui s'accroîtrait dans le temps en cas de politiques climatiques



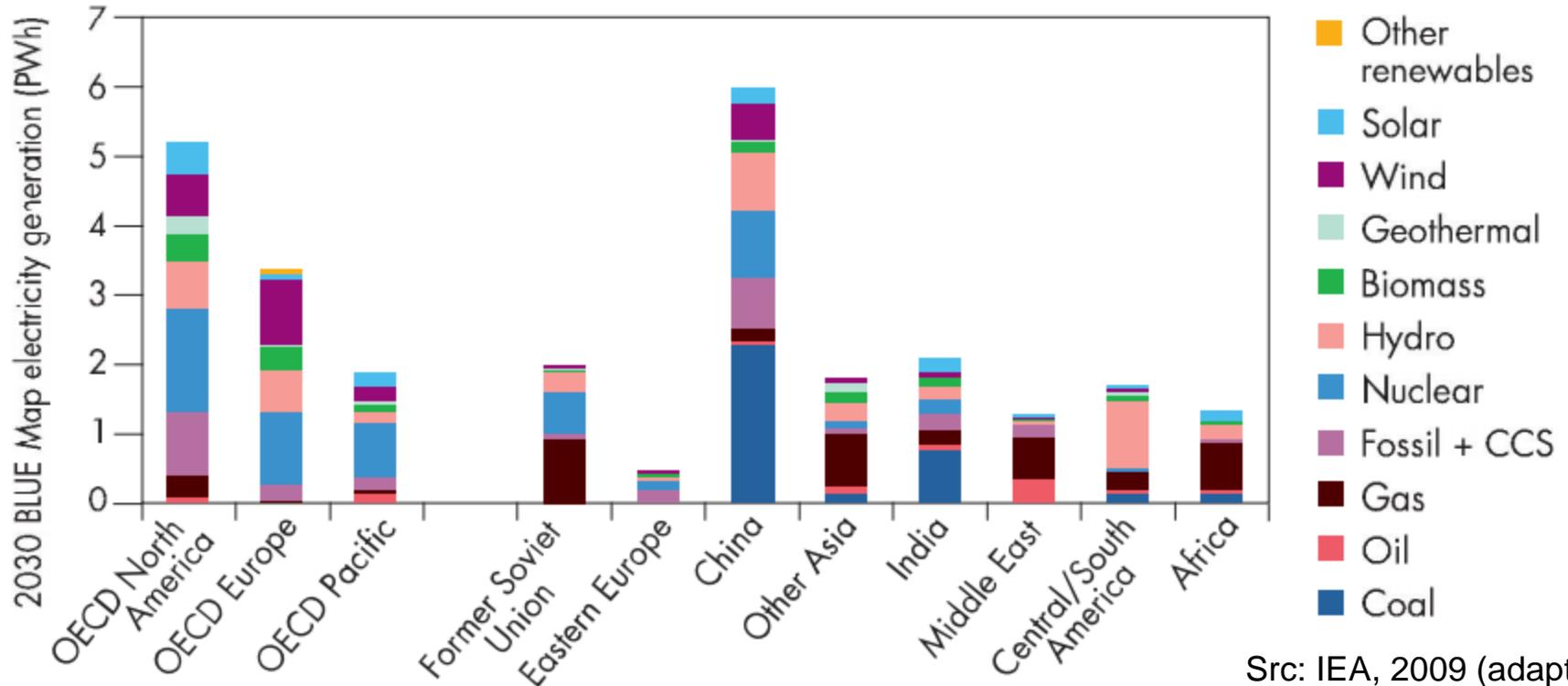
# La stabilisation du climat passe de toutes façons par la « décarbonisation » de l'électricité mondiale

## CO<sub>2</sub> intensity of electricity generation by region, year



# Cette tendance est acceptée dans la communauté scientifique et reposerait sur un panier de technologies décarbonées

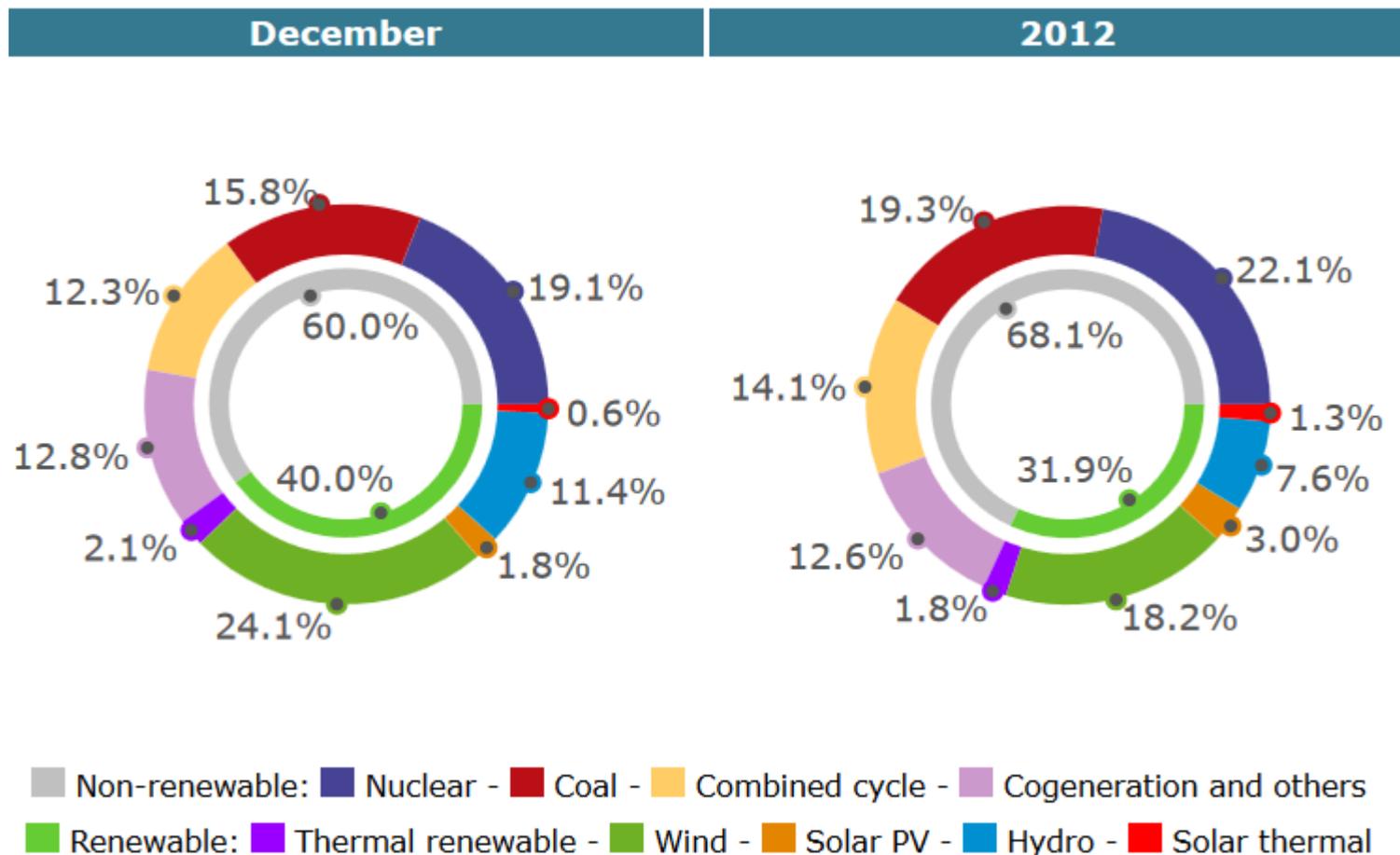
BLUE Map electricity generation in 2030 by region and fuel type



Src: IEA, 2009 (adapté)

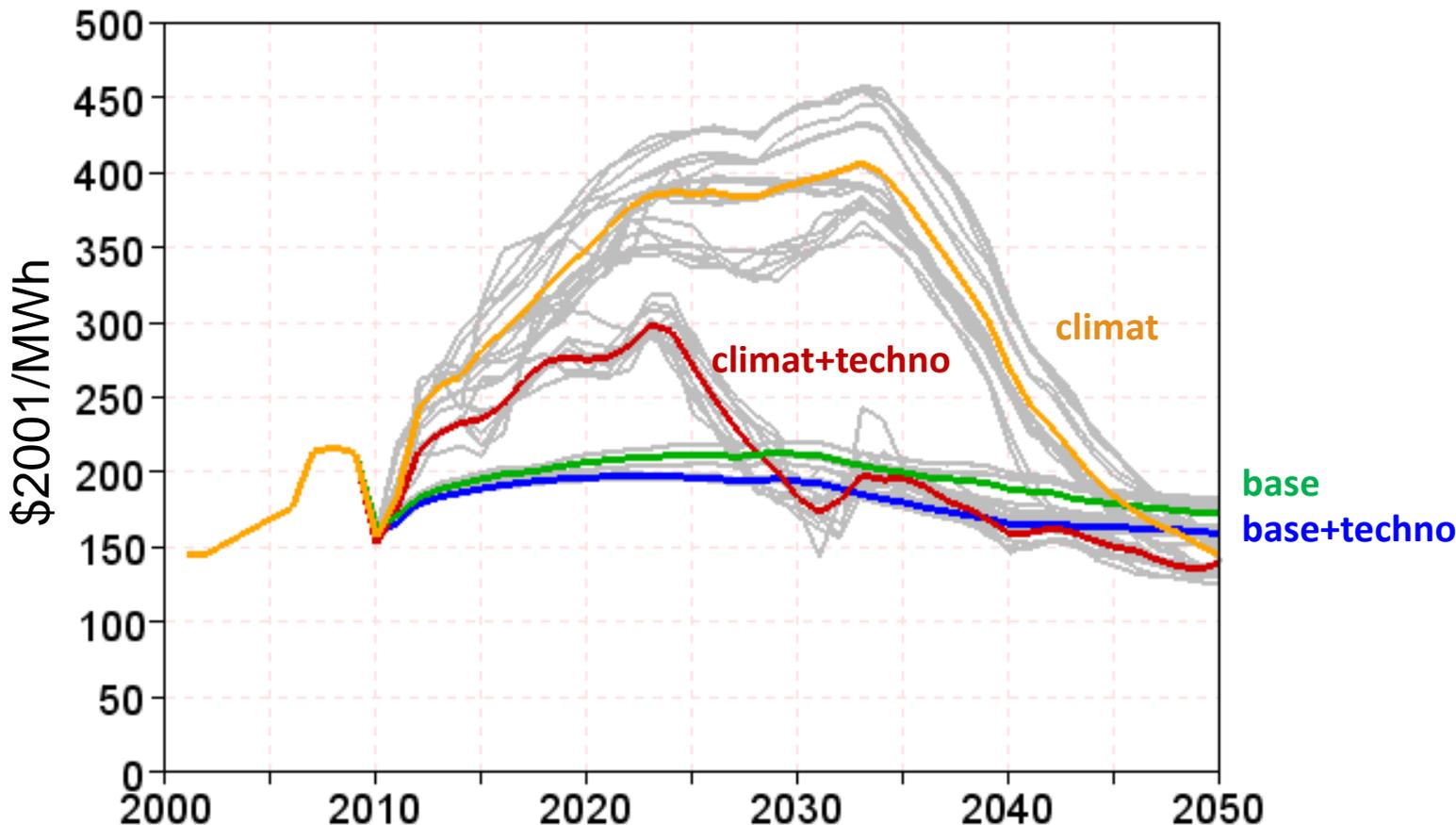
# Produire de l'électricité à partir de renouvelables intermittents intermittente est réaliste, réalisable et techniquement faisable

Net generation mix in Spain, from <http://www.ree.es>



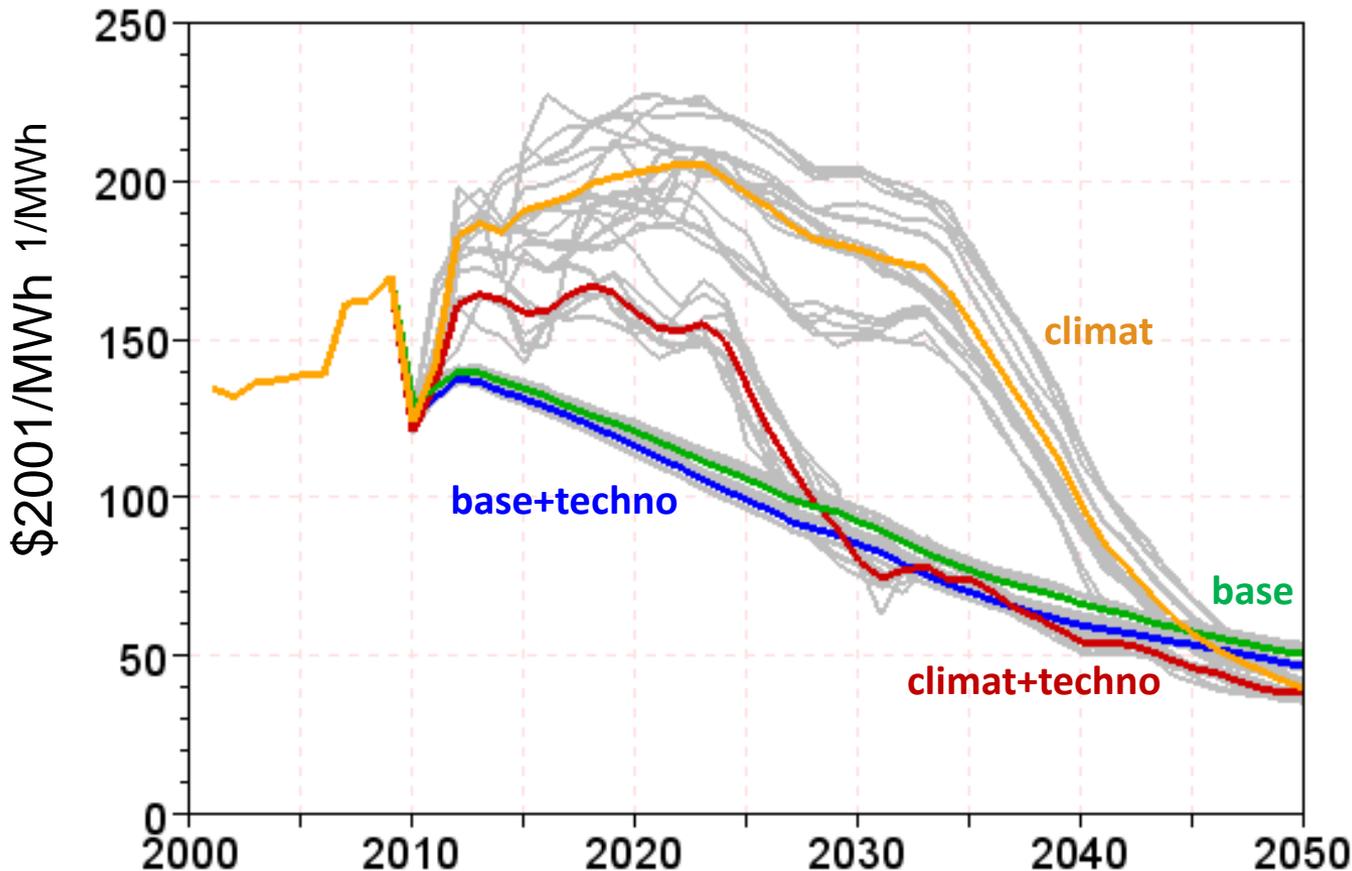
# L'électricité se décarbone au prix d'une augmentation transitoire et modérée du prix *nominal* de l'électricité

Prix de l'électricité en Europe



# Corrigés de la progression des revenus, ces prix ne sont pas très élevés

Prix de l'électricité en Europe



# Sans électricité décarbonnée, difficile de lutter contre le réchauffement

---



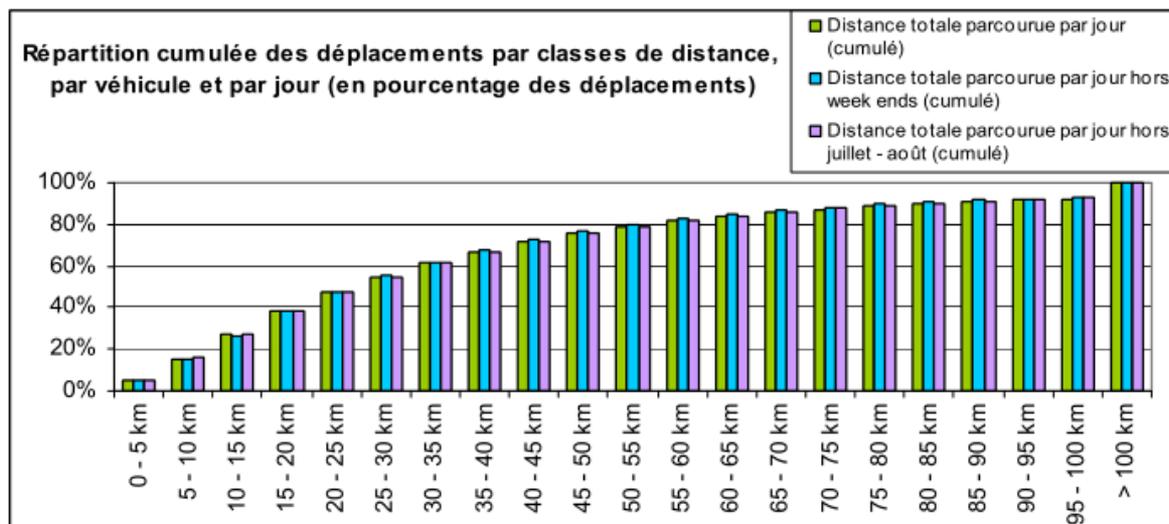
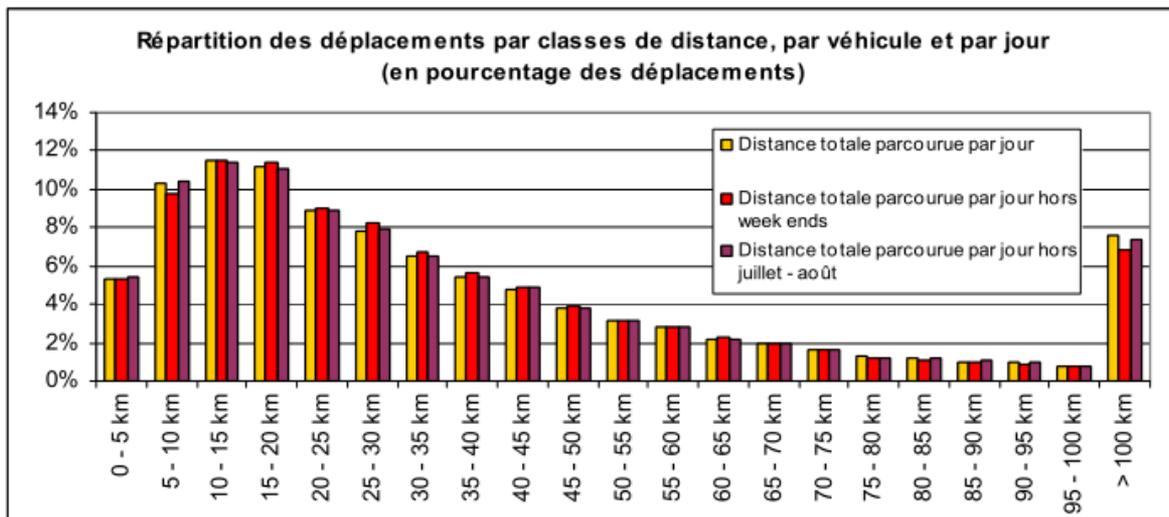
# Plan de cette présentation

---

1. Le transport est la 3<sup>ème</sup> source d'émission de GES et contribue à la dépendance pétrolière.
2. **Le véhicule électrique permet de réduire les émissions de GES en profitant de la décarbonisation de l'électricité.**
3. La voiture électrique est-elle compatible avec les usages en termes de mobilité?
4. Quel serait l'impact pour la production et distribution d'électricité?
5. Le coût de la tonne de CO2 évitée grâce aux VEx est-il trop élevé?
6. Quel est le rôle de l'incertitude qui pèse sur les prix futurs du pétrole, de l'électricité et du carbone ?

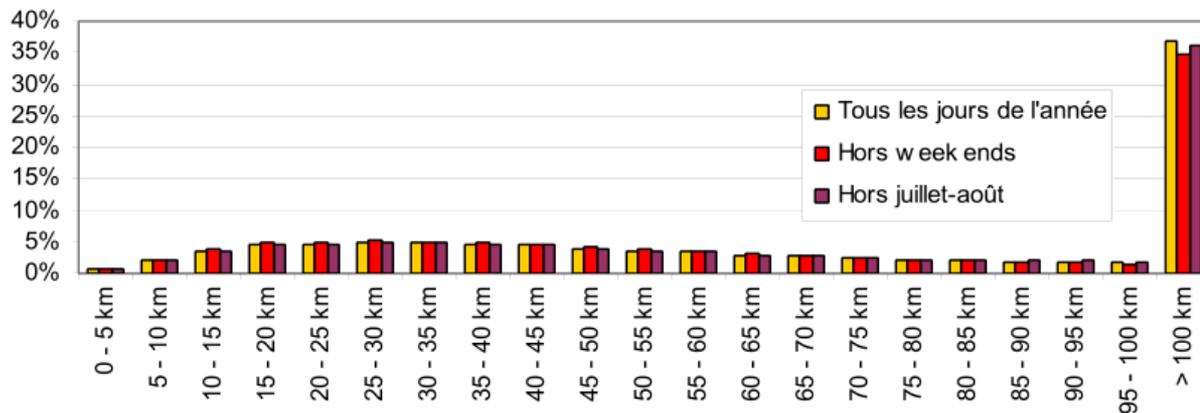
# Autonomie : un faux problème ?

Répartition en pourcentage de déplacements

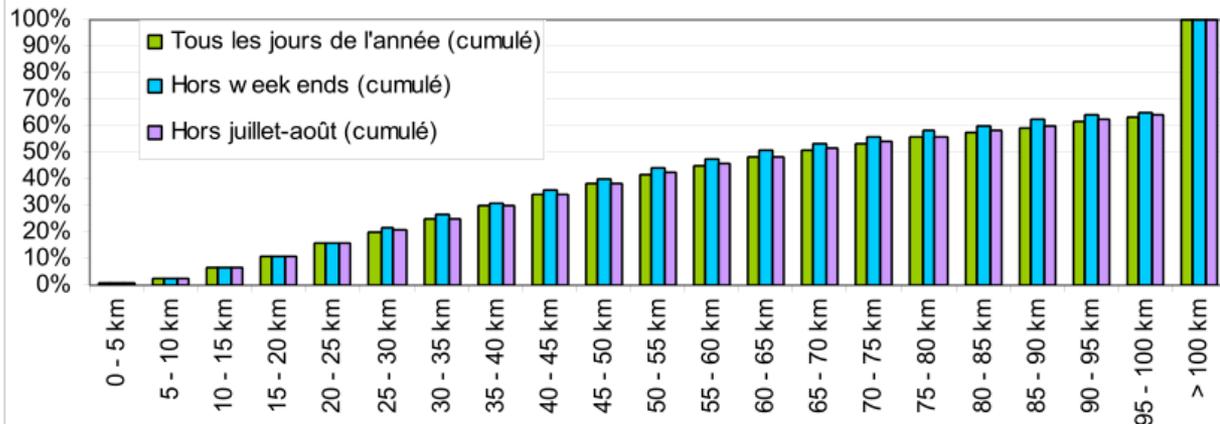


# Les déplacements courte distance représentent deux tiers de la mobilité

Répartition des distances parcourues par classes de distance, par véhicule par jour (en pourcentages\*kilomètres/somme des kilomètres)



Répartition cumulée des distances parcourues par classes de distance, par véhicule par jour (en pourcentages\*kilomètres/somme des kilomètres)

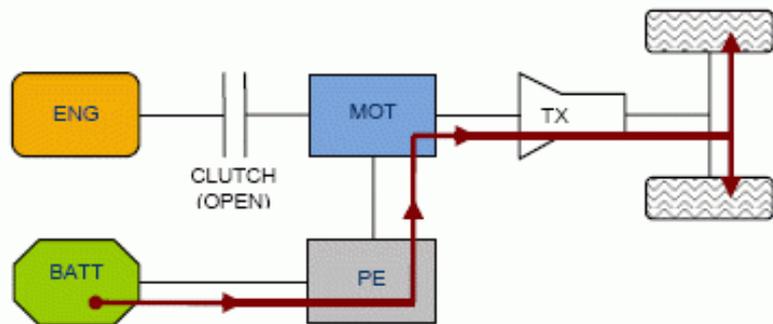


# Cout des batteries, autonomie : réfléchir en termes d'électrification des véhicules personnels

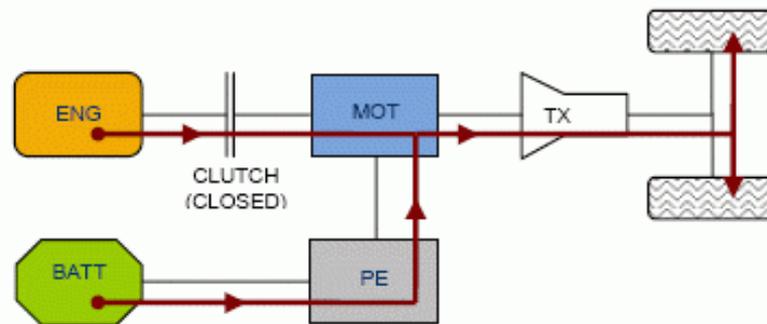
---



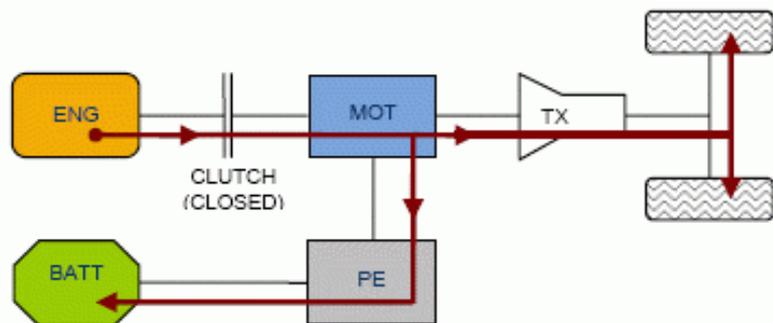
# Fonctionnement d'un véhicule hybride



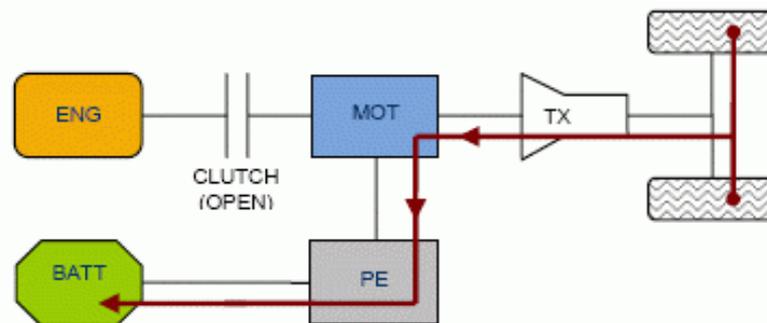
(a): electric only.



(b): hybrid / electric assist.



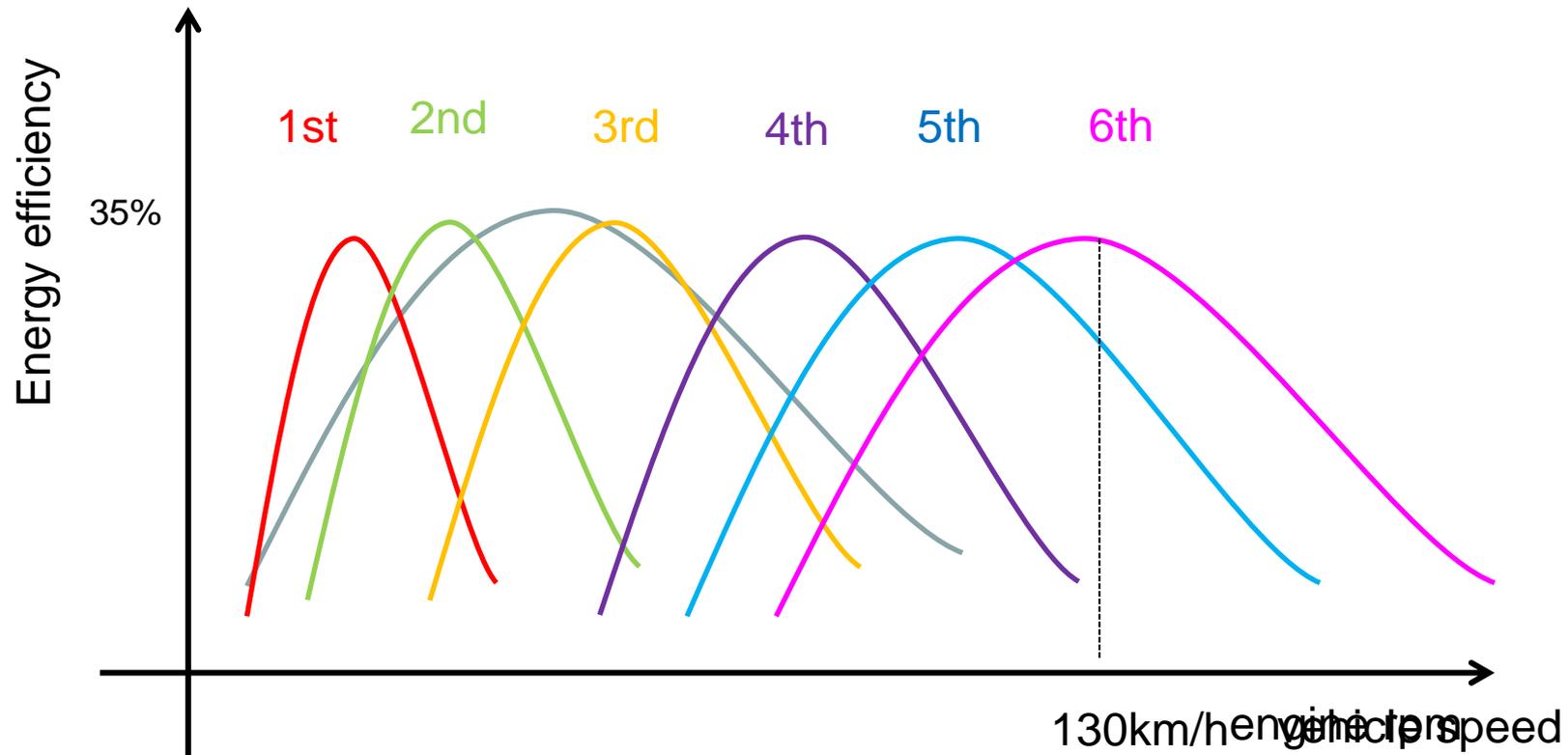
(c): battery charging.



(d): regenerative braking.

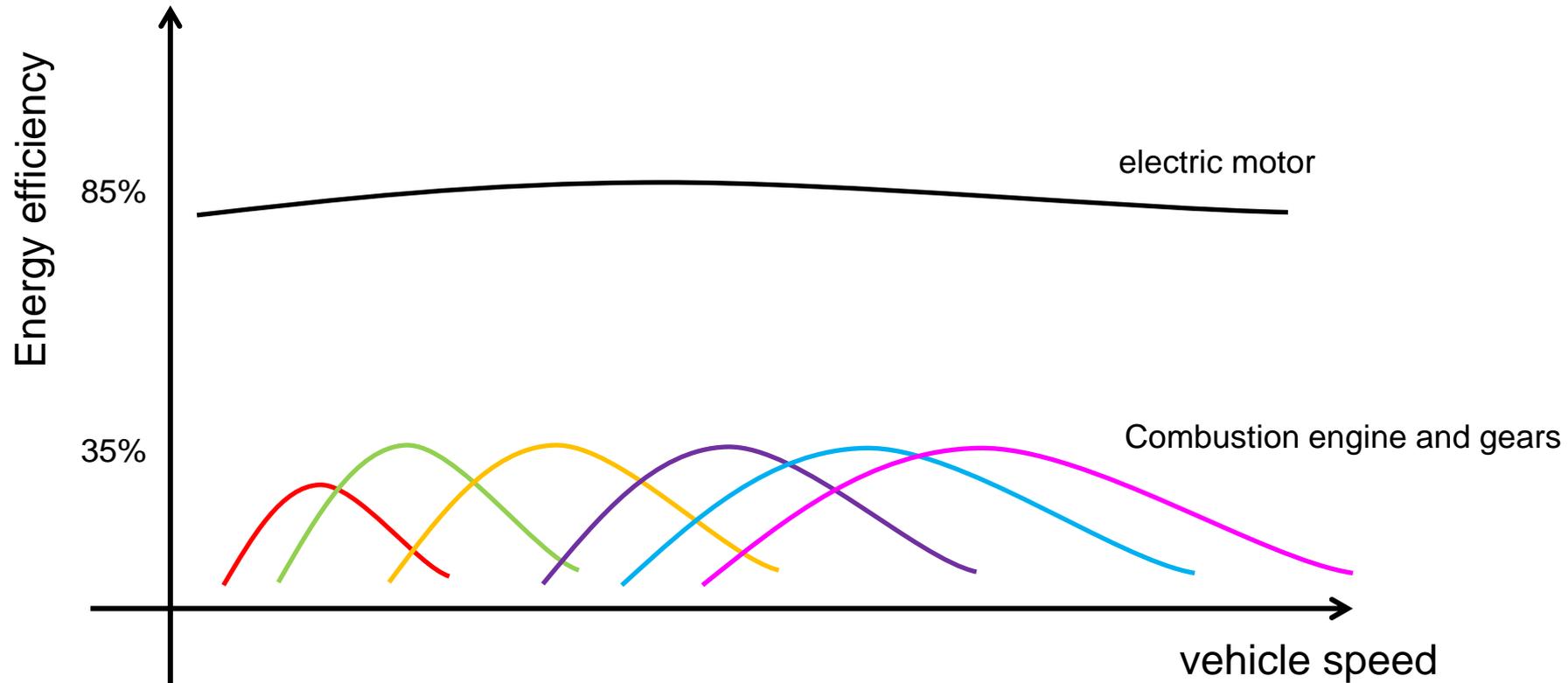
Src : Wikimedia

# Le rendement d'un moteur thermique dépend de sa fréquence de rotation



Gears are for comfort (smooth and powerful accelerations) and energy efficiency (ideally frequently driven speed are at the optimal yield of a gear)

# Le rendement d'un moteur électrique est beaucoup plus constant



Gears are for comfort (smooth and powerful accelerations) and energy efficiency (ideally frequently driven speed are at the optimal yield of a gear)

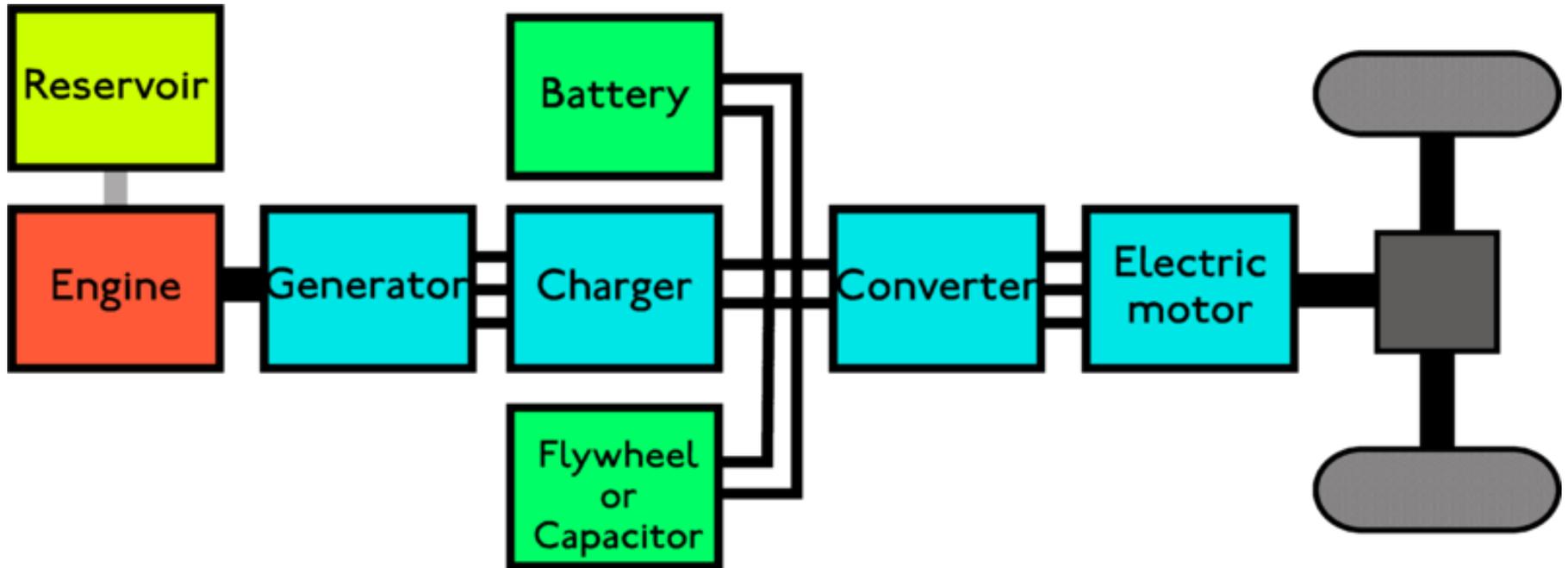
# Les technologies « hybrides » réduisent le cout de la batterie et augmente l'autonomie

---

1. Les voitures hybrides
  - . Un moteur électrique assiste le moteur thermique pendant les phase d'accélération
  - . Permet d'économiser de l'essence(Toyota Prius (1997), Ford Escape (2004))
2. Les hybrides rechargeables (*plug in hybrid*)
  - . Peuvent être rechargés sur une prise électrique
  - . Peuvent rouler 20 à 60 km sans bruler d'essence(BYD F3DM (2004) )
3. Les voitures électriques (*battery electric vehicle*)
  - . Doivent etre rechargées sur une prise
  - . Parcourent rarement plus de 150km(Nissan Leaf(2010), Renault Fluence(Jan2012))
4. Les voitures électriques avec *Range Extender*  
*Extended Range Electric Vehicle*
  - .Font des économies sur la batterie
  - .Embarquent un MCI bon marché et ont une autonomie illimitéeChevy Volt (2010)

# Extended range ou hybride série : le véhicule du futur?

---



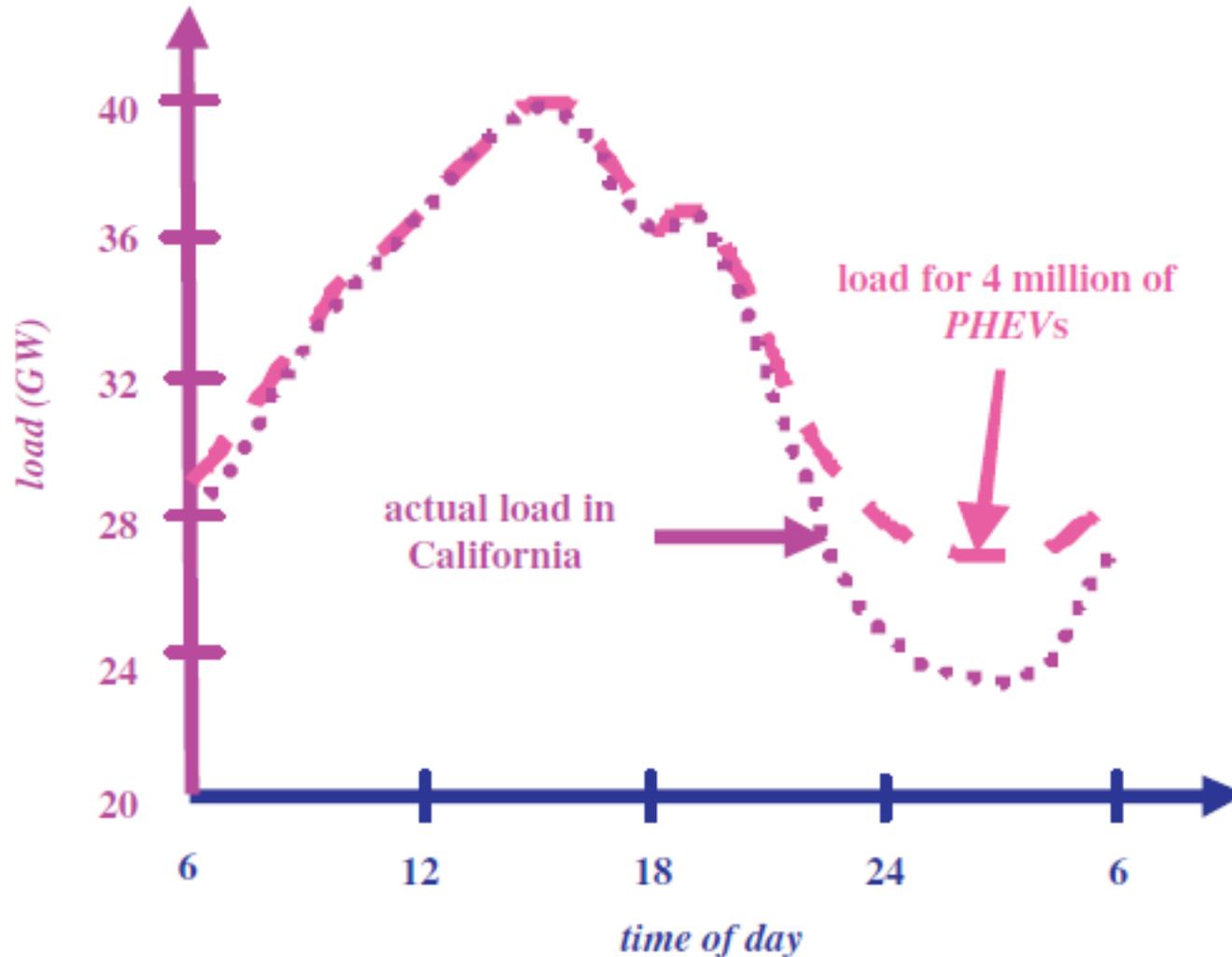
Src : Wikimedia

# Plan de cette présentation

---

1. Le transport est la 3<sup>ème</sup> source d'émission de GES et contribue à la dépendance pétrolière.
2. **Le véhicule électrique permet de réduire les émissions de GES en profitant de la décarbonisation de l'électricité.**
3. Quel serait l'impact pour la production et distribution d'électricité?
4. La voiture électrique est-elle compatible avec les usages en termes de mobilité?
5. Quel est le rôle de l'incertitude qui pèse sur les prix futurs du pétrole, de l'électricité et du carbone ?
6. Le coût de la tonne de CO2 évitée grâce aux VEx est-il trop élevé?

# La recharge de nuit rendrait service au parc de production



# Des bornes de recharge rapide sont peut-être nécessaires...

---

Énergie stockable dans une batterie



25 à 35 kWh ( 100 à 200 km )

Prise domestique



puissance

temps de recharge

3 kW

→ Une nuit

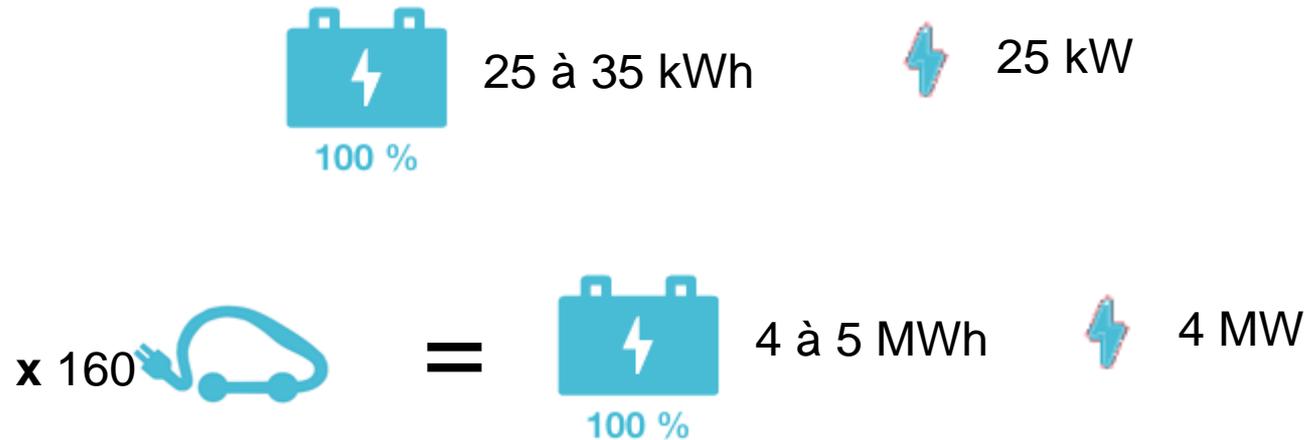
Borne de recharge rapide



25 kW

→ 1 h

# ...d'où un problème de puissance locale



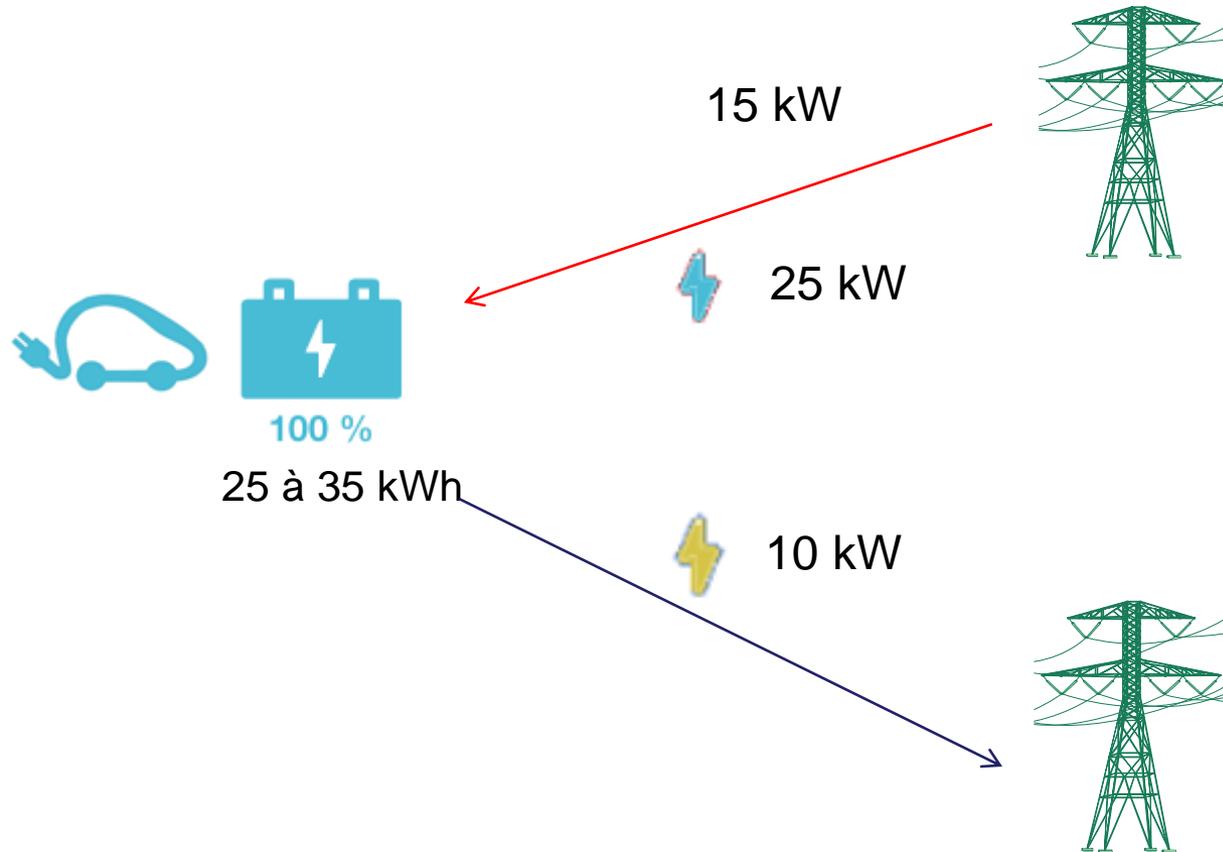
## Le déséquilibre énergie/puissance du VE...

- 4 MW  $\approx$  2 000 ménages
- Consommation d'énergie électrique  $\approx$  200 ménages

## ... pourrait faire augmenter les coûts de l'électricité pour tout le monde

- Entre 1 000 et 2 500 € par VE en infrastructure (renforcement et bornes)
- Augmentation du TURPE : « *l'ensemble des consommateurs paieraient le déséquilibre entre puissance et énergie pour les utilisateurs de véhicules électriques* » (ERDF 2009).

# Baisser brusquement la puissance de recharge équivaut à restituer une partie de la puissance



# 150 VE virtuellement agrégés donnent ainsi 1MW en permanence

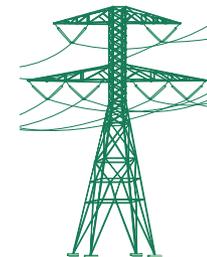
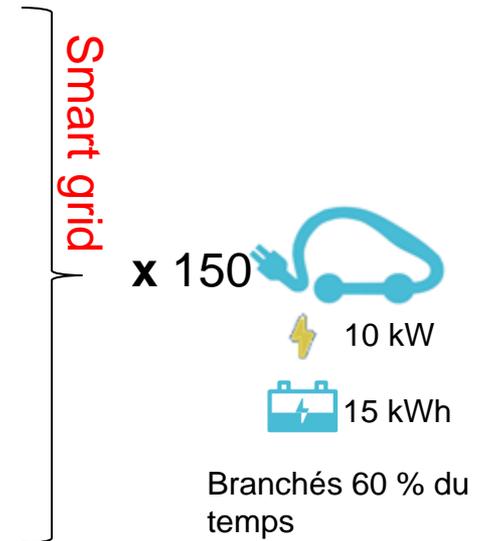
## Comportement existant

- Les voitures sont garées 95% du temps
- Les heures de pointe mobilisent moins de 20 % des voitures
- 80 % des trajets < 80 km

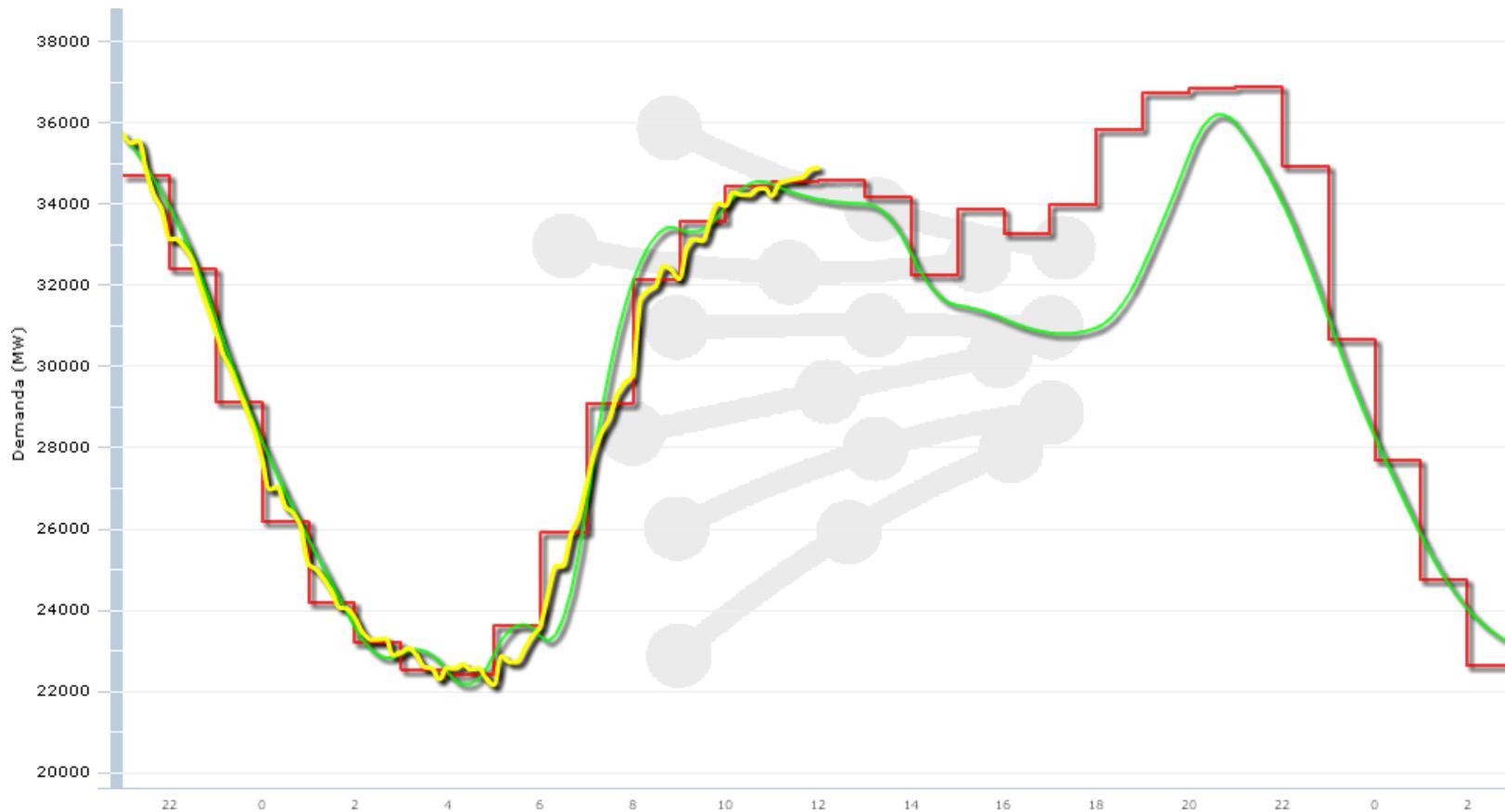
+

## Incitation économique et infrastructure

- Trois quarts des VE à l'arrêt branchés

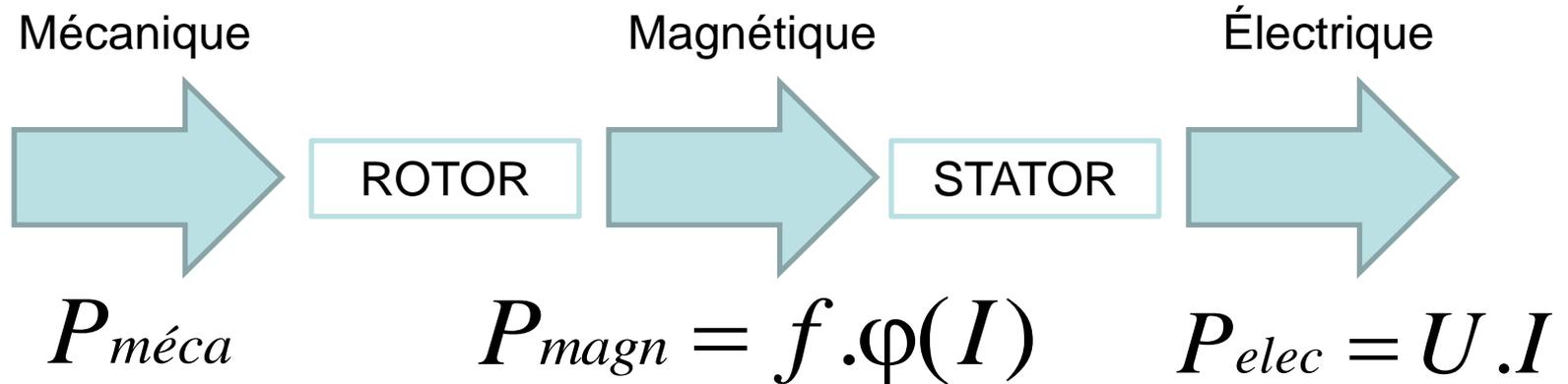


# Les marchés de l'électricité fonctionnent notamment sur des prévisions



Demanda (MW) a las 12:00 de 23/03/2010 ■ Real = 34897 ■ Prevista = 34130 ■ Emisiones CO2 (t/h) = 6793

# La fréquence sur le réseau oscille en permanence en fonction du bilan puissance produite-puissance demandée



1. La demande augmente
2.  $I$  augmente
3.  $P$  reste constant
4.  $\Phi(I)$  augmente
5.  $f$  diminue

1. La centrale veut rétablir  $f$
2. Elle augmente  $P_{méca}$
3.  $f$  augmente
4.  $P_{magn}$  augmente
5.  $P_{elec}$  augmente

La variation de fréquence part en inertie du rotor  $P_{méca} - P_{elec} \propto J \times \frac{df}{dt} \times f$

Fréquence réglée  $\Leftrightarrow$  Production = demande

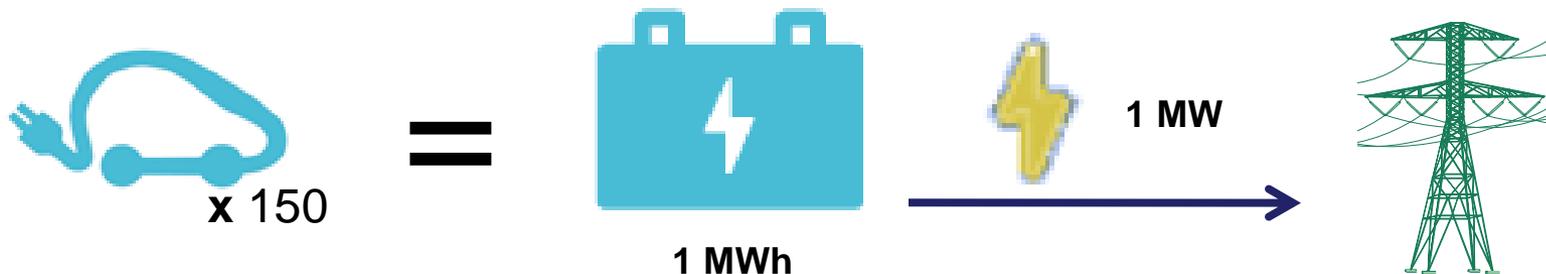
# La fréquence sur le réseau oscille en permanence en fonction du bilan puissance produite-puissance demandée

---

## Real Time Frequency Data - Last 60 Minutes



# Les VE branchés peuvent absorber ces chocs sur le réseau



## Utilisation possibles

  
x 150 000

1. Réserves primaires et secondaires (réglage puissance/fréquence)

1. Flottes captives (La Poste)

2. Aggrégation de particuliers par Smart grid

  
x 100 000

2. Sauvetage du réseau (réglage tertiaire)

\$

Jusqu'à 500\$/an/VE ?

## V2G et réserves de puissance: pour en savoir plus

---

- Kempton, W. & Tomic, J., 2005. Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue. *Journal of Power Sources*, 144(1), p.268-279.
- Brooks, A.N., Propulsion, A.C. & Division, C.A.R.B.R., 2002. *Vehicle-to-grid demonstration project: Grid regulation ancillary service with a battery electric vehicle*, California Environmental Protection Agency, Air Resources Board, Research Division.
- RTE. 2004. Chapitre 4 – Contribution des utilisateurs aux performances du RPT. Documentation Technique de Référence. Avril.

# Lithium et terres rares: pas de tensions sur le long terme

---

- Lithium et terres rares représentent une infime partie de la masse et du coût des VE
- Les réserves de lithium mondiales permettent d'équiper plusieurs centaines de millions de véhicules électrique

Evans, R. Keith. "An abundance of lithium," Mars 2008.

- Les tensions sur le lithium ont été mises en avant par l'industrie du zinc...

Tahil, William. The Trouble with Lithium Implications of Future PHEV Production for Lithium Demand. Meridian International Research, 2007.

- ... qui propose des batterie au zinc!
- Les terres rares sont moins rares que le chrome ou le plomb par exemple (mais plus de 95% de la production mondiale est aujourd'hui chinoise!)

# Plan de cette présentation

---

1. Le transport est la 3<sup>ème</sup> source d'émission de GES et contribue à la dépendance pétrolière.
2. Le véhicule **électrifié** permet de réduire les émissions de GES en profitant de la décarbonisation de l'électricité.
3. **L'enjeu est l'électrification des véhicules en général, pas juste le VE.**
4. Le coût de la tonne de CO2 évitée grâce aux VEx est-il trop élevé?
5. Quel est le rôle de l'incertitude qui pèse sur les prix futurs du pétrole, de l'électricité et du carbone ?

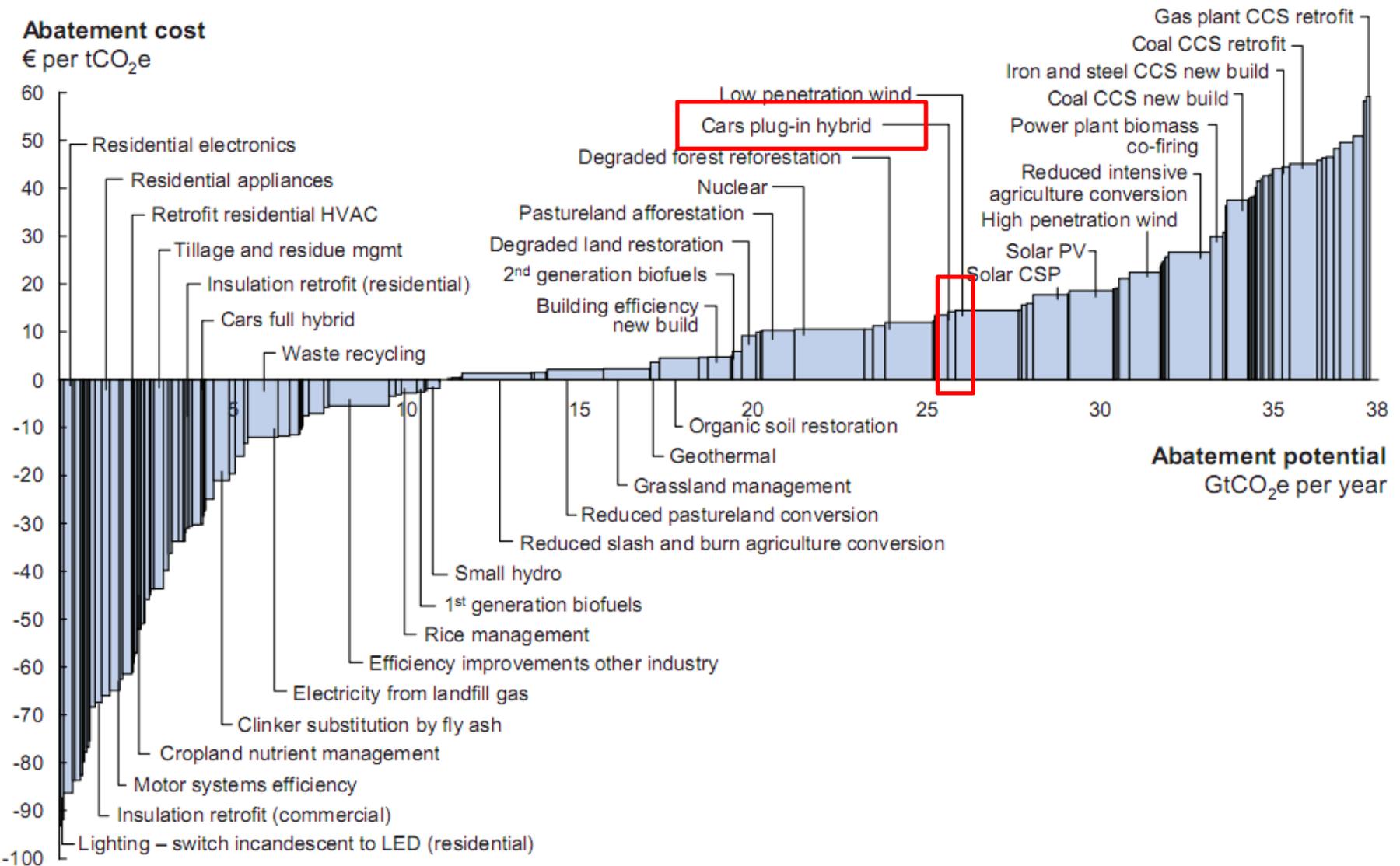
# Un argument qui oublie les *effets dynamiques*

---

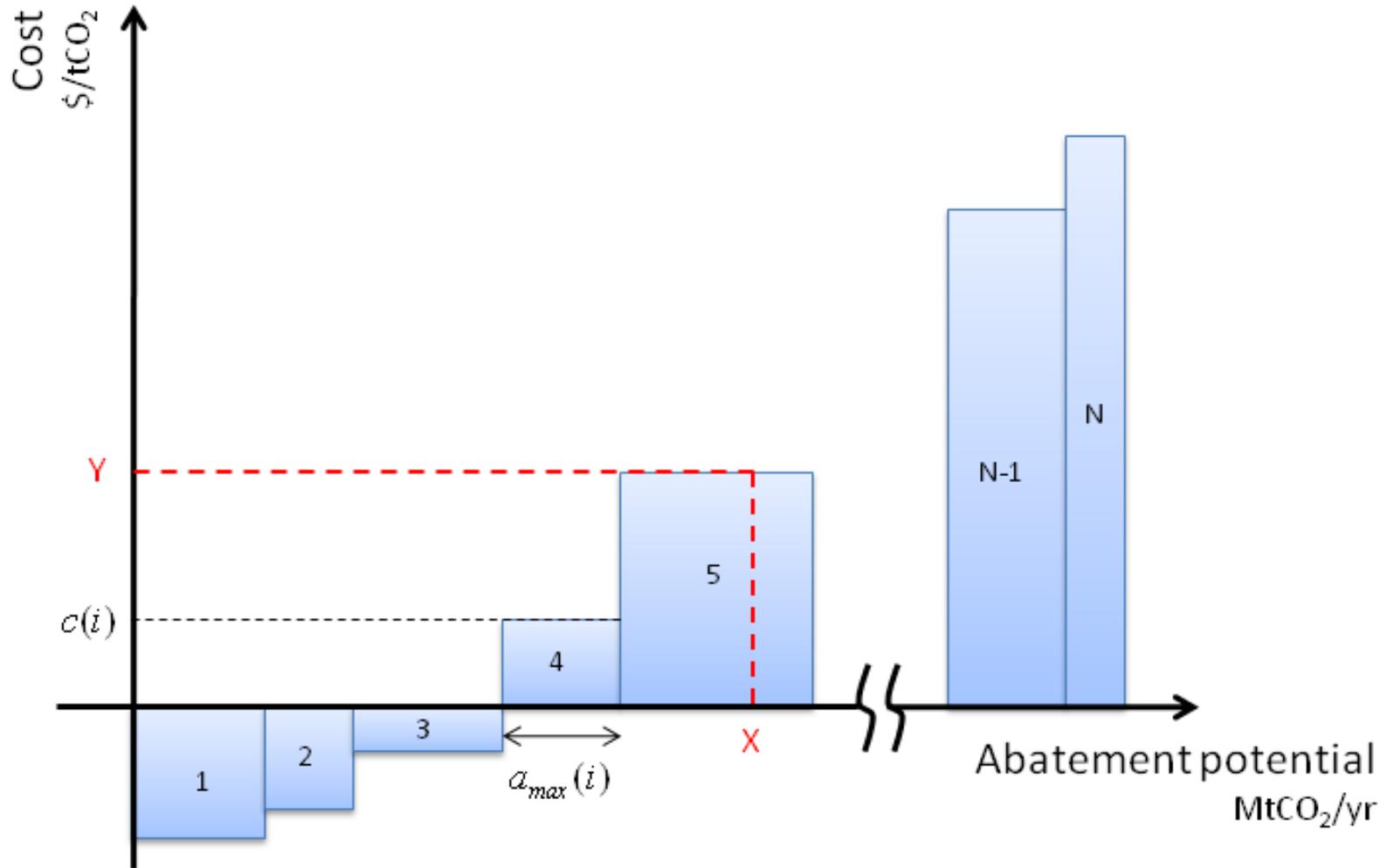
*En l'état des technologies disponibles, [...] la voiture électrique, [...] ne résiste pas à la comparaison entre son coût pour la collectivité et leur bénéfice écologique exprimé par les 32 euros par tCO<sub>2</sub> évités.*

*Vers l'éclatement de la bulle verte? Le Monde du 26 Janvier 2010*

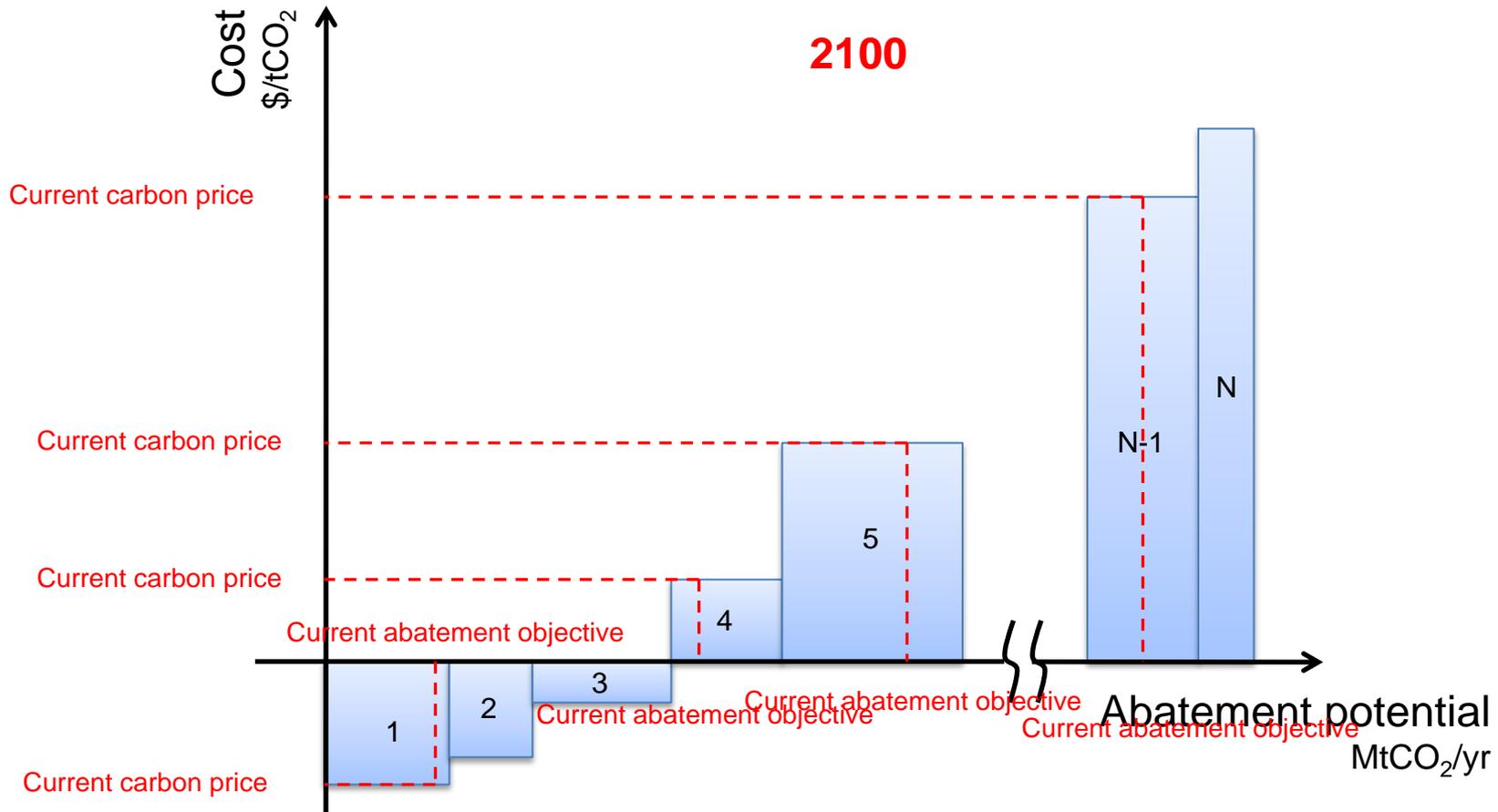
# Marginal Abatement Cost Curve (MACC) de l'économie mondiale (McKinsey 2007)



# Those curves are interpreted as *merit-order* curves...

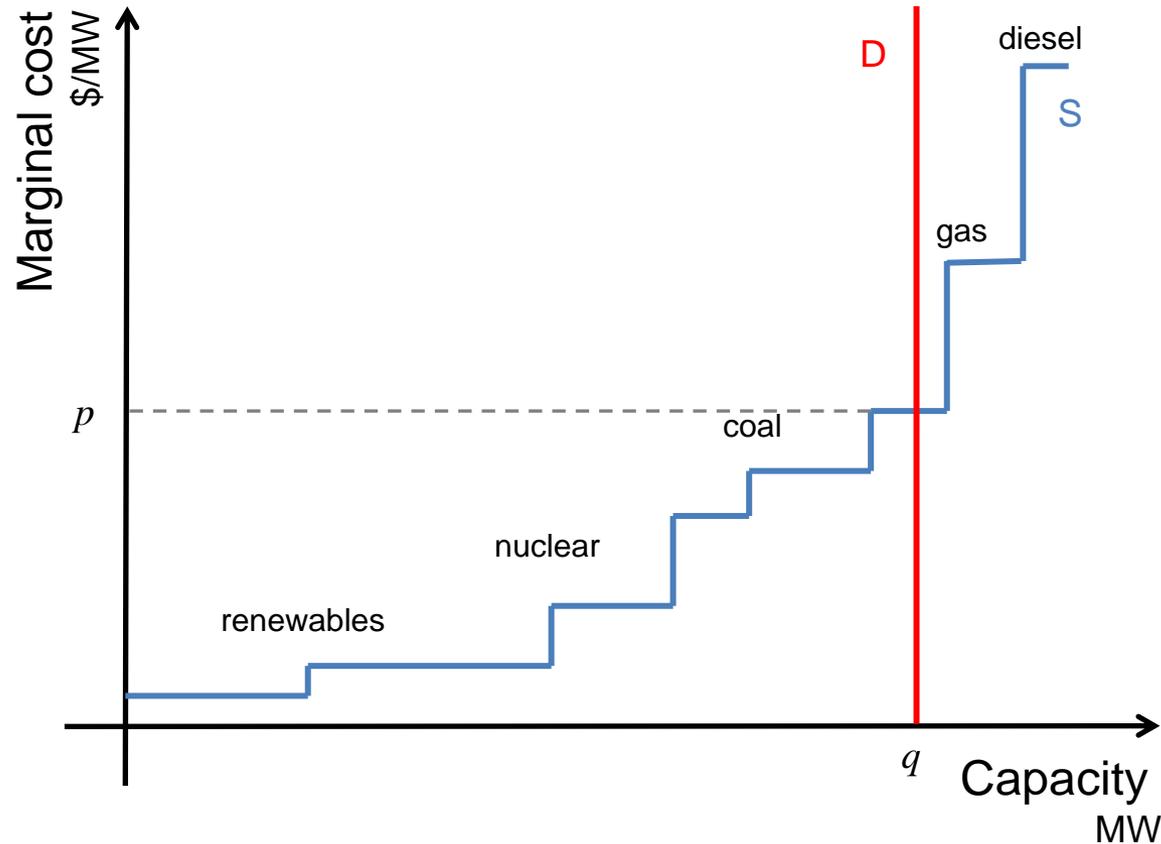


...meaning the abatement activities should be implemented in this particular order



(The MACC could evolve through time (e.g. learning by doing))

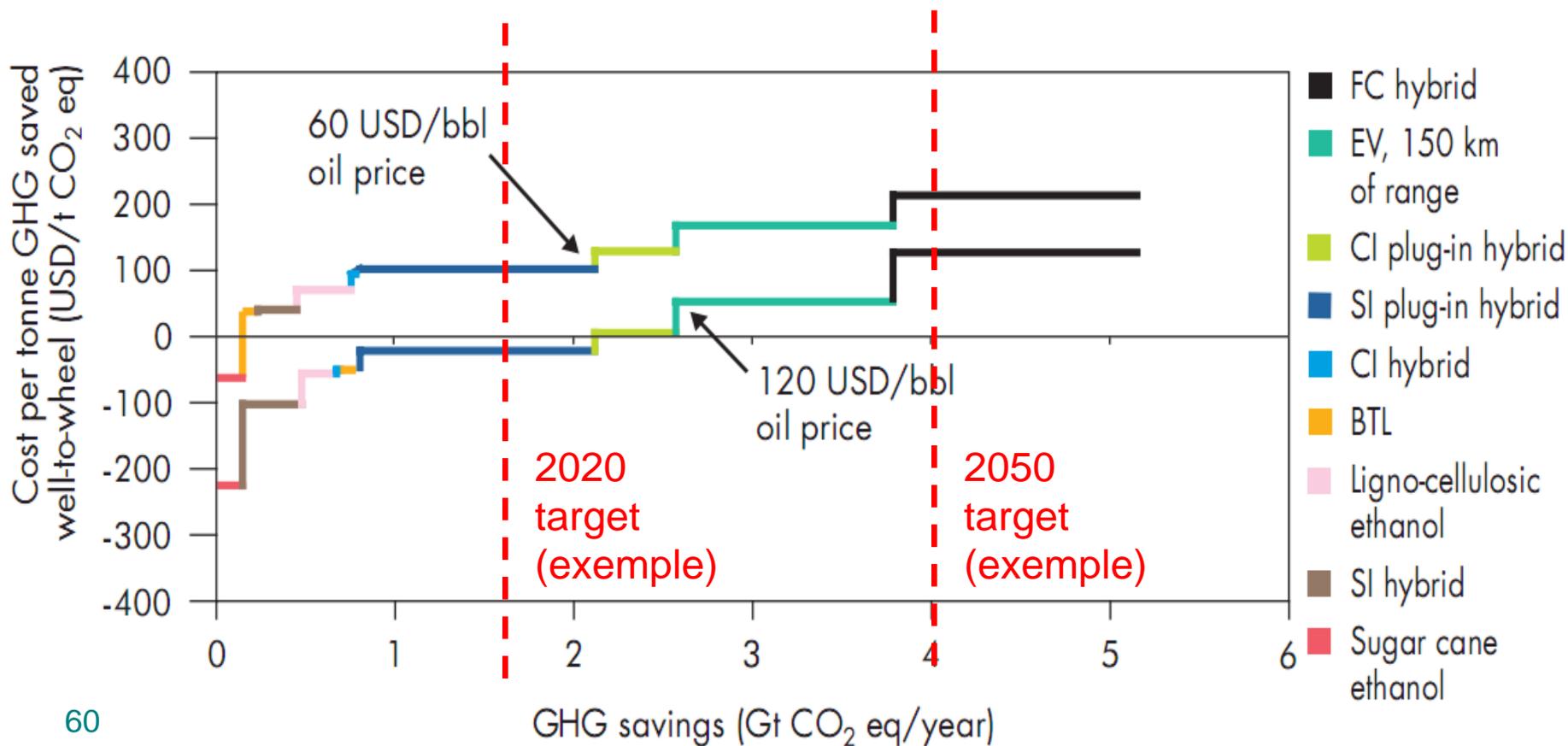
# Merit-order curves should represent options that are available instantaneously



The question here is how to use the immediately available plants to satisfy the demand for the next *minutes*, *not* to choose investments for the next *decade*

# Marginal Abatement Cost Curve (MACC) dans l'automobile (IEA 2009)

**Figure ES-3** ► GHG reductions in BLUE Map for light-duty vehicles and fuels: contribution and estimated cost per tonne by vehicle and fuel type in 2050

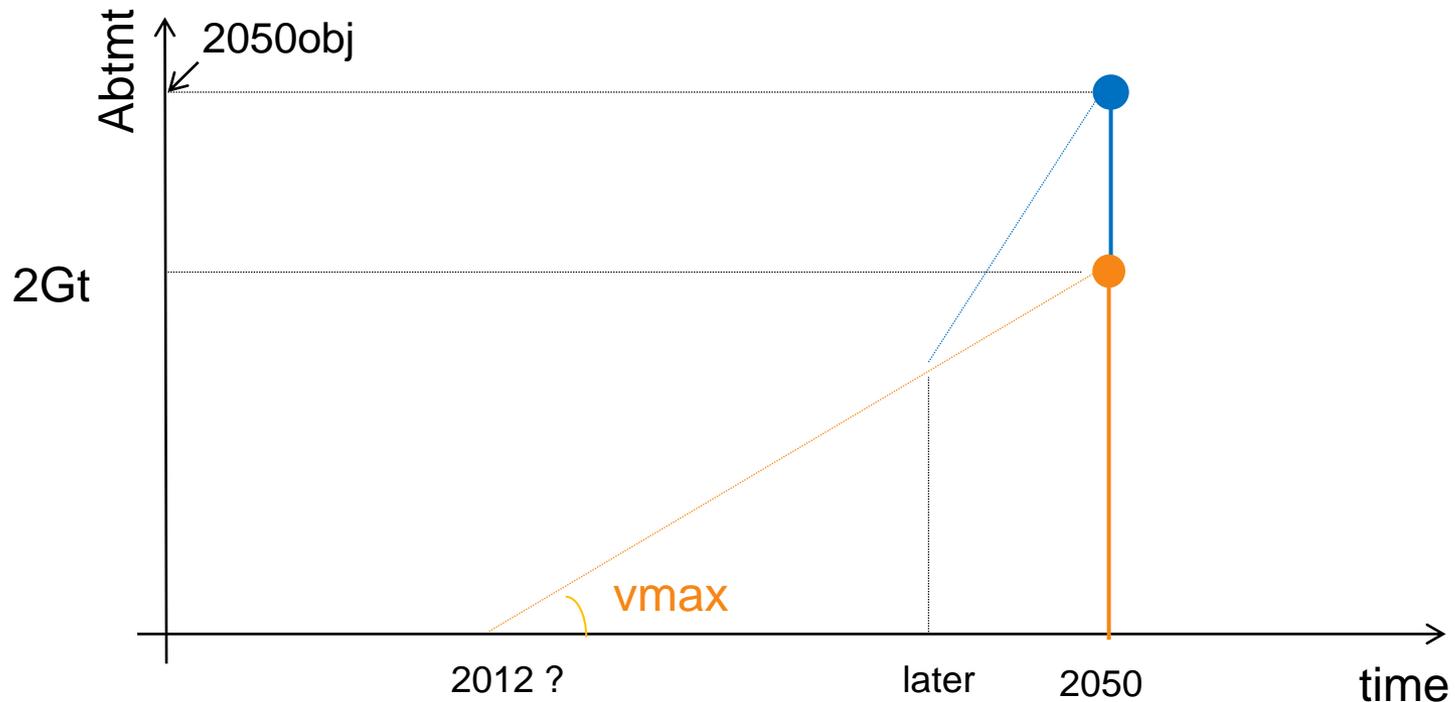


# When Starting with the Most Expensive Option Makes Sense

---

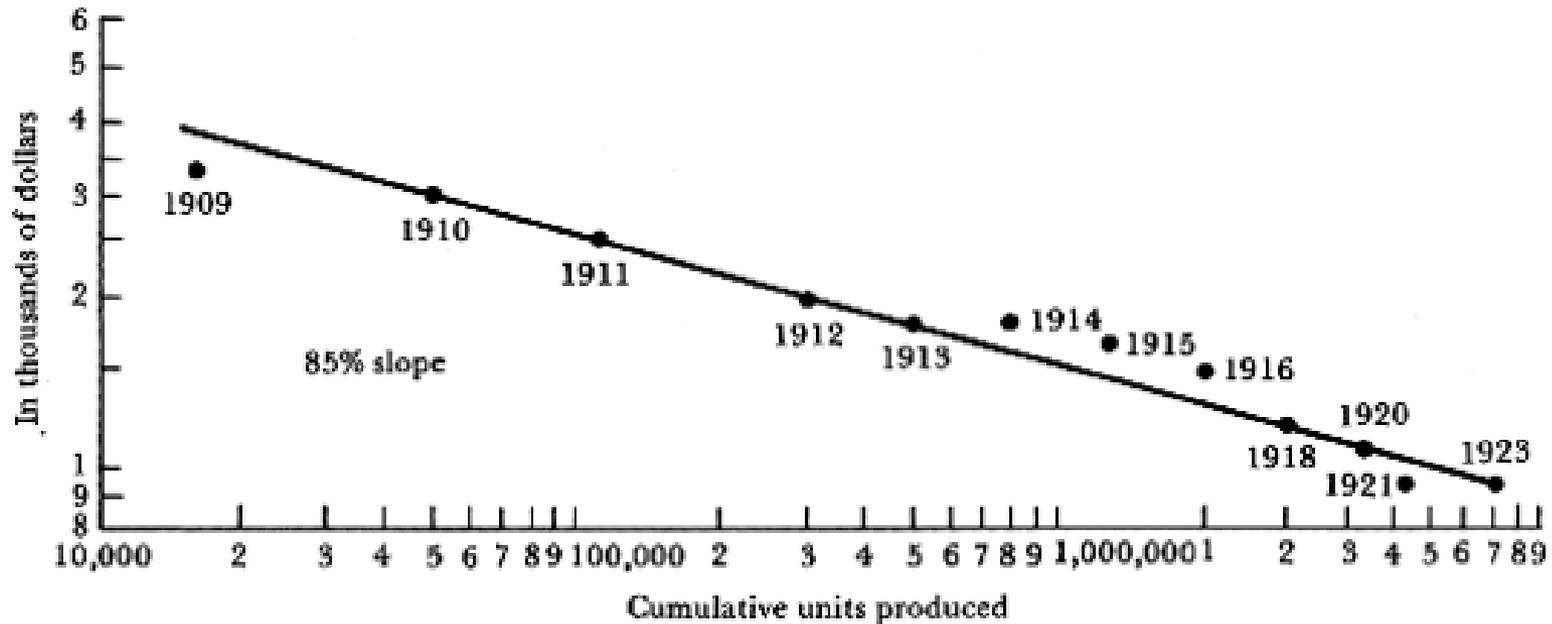
1. MACCs are not merit-order curves: listed activities may take decades to implement (eg: building retrofitting, switching from ICE to EV)
2. Extending MAC curves with inertia changes the optimal order of abatement options
3. Abating through expensive but high-inertia options in the short term may be optimal

# When there is inertia, starting with the most expensive option makes sense...



1. Assume that one knows that the optimal abatement from expensive electric vehicles in 2050 should be 2Gt
2. Deploying that much EVs takes time (this point does *not* take LBD into account, doing so would exacerbate our message, see del Rio Gonzalez 2008)
3. We should start to implement EVs now
4. Cheaper but faster-to-implement options (smooth driving habits?) required in 2050 may enter later

# Les technologies émergentes sont soumises au *learning by doing*



Price of Ford Model T 1909 - 1923 (in constant 1958 US\$) versus cumulative units produced (learning or experience curve). On average, for each doubling of cumulative production, prices dropped by 15 percent. Source: W.J. Abernathy and K.Wayne. Limits of the learning curve. Harvard Business Review, September - October 1974.

# Plan de cette présentation

---

1. Le transport est la 3<sup>ème</sup> source d'émission de GES et contribue à la dépendance pétrolière.
2. Le véhicule électrifié permet de réduire les émissions de GES en profitant de la décarbonisation de l'électricité.
3. L'enjeu est l'électrification des véhicules en général, pas juste le VE.
4. **Il ne faut pas implémenter les options d'abattement par ordre de coût croissant: changer la flotte automobile par des Vex prendrait du temps, et on peut commencer maintenant**
5. Quel est le rôle de l'incertitude qui pèse sur les prix futurs du pétrole, de l'électricité et du carbone ?

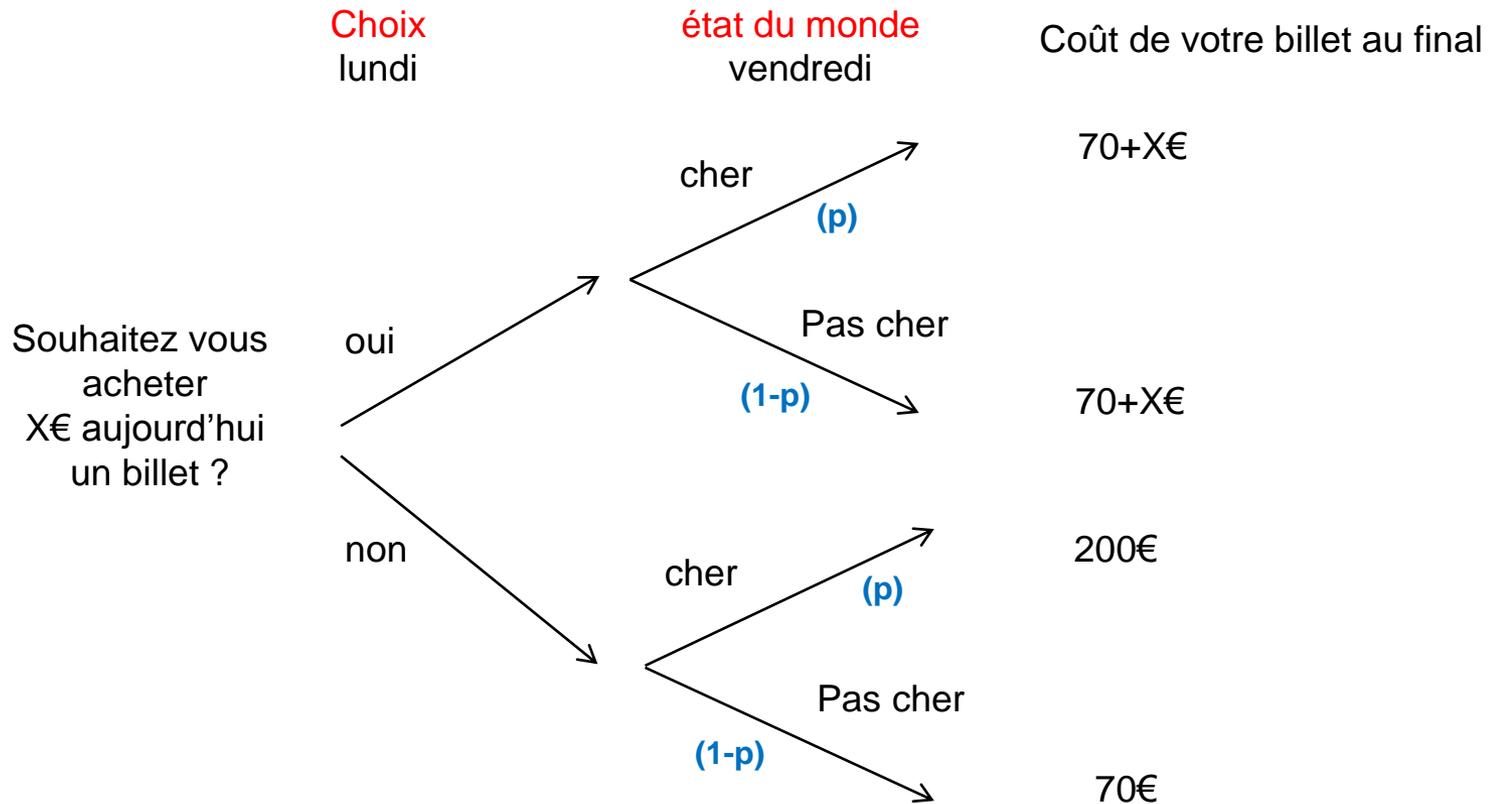
# Rappel: valeur d'une option sur un billet de train

Lundi soir, on se pose la question d'acheter un billet de train pour aller a Toulouse Vendredi

Lundi, les billets pour Toulouse sont à 70€

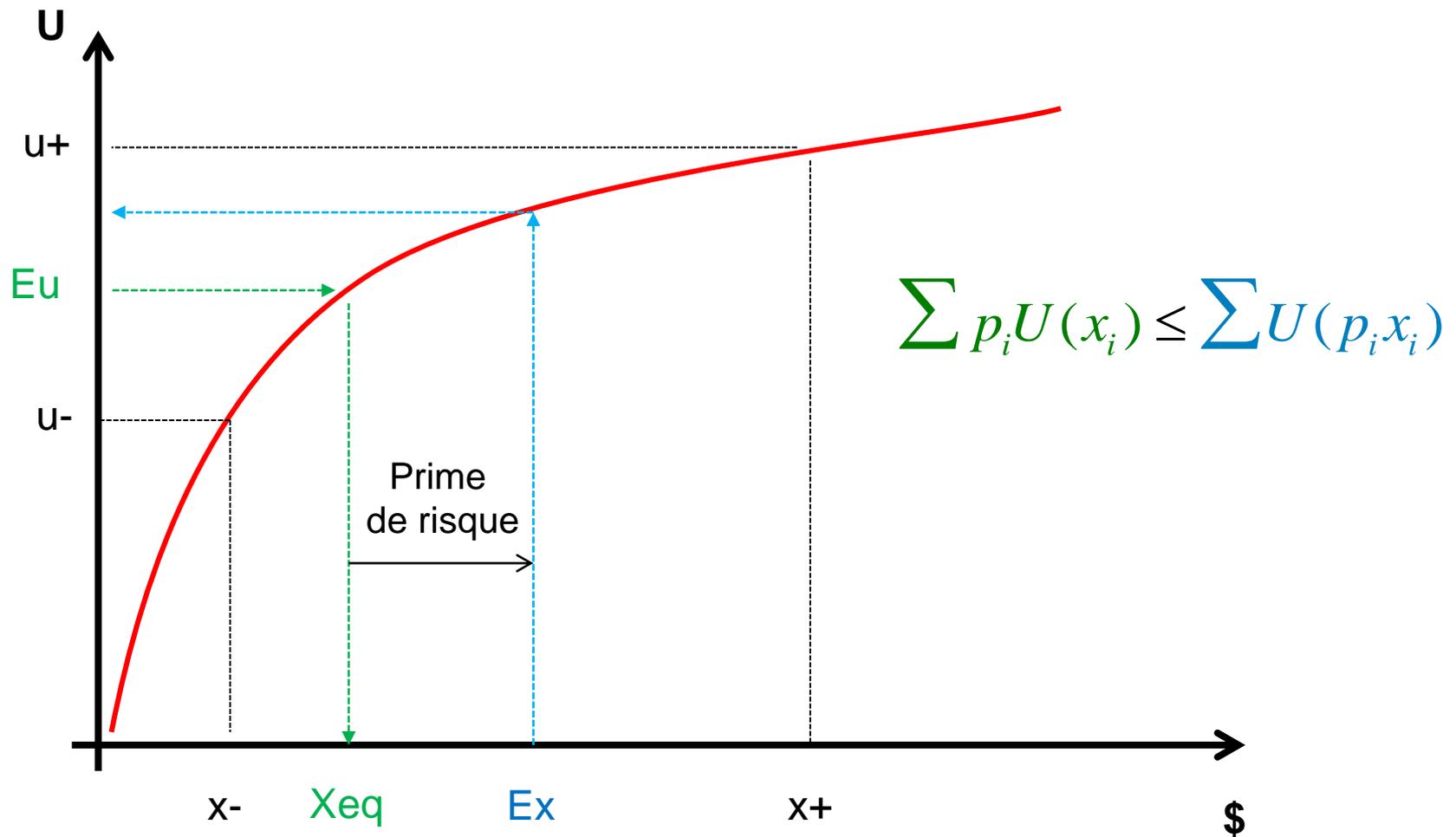
Vous pouvez prendre une option sur ces billets à X€

Vendredi, les billets seront peut-être à 70€, mais peut-être à 200€



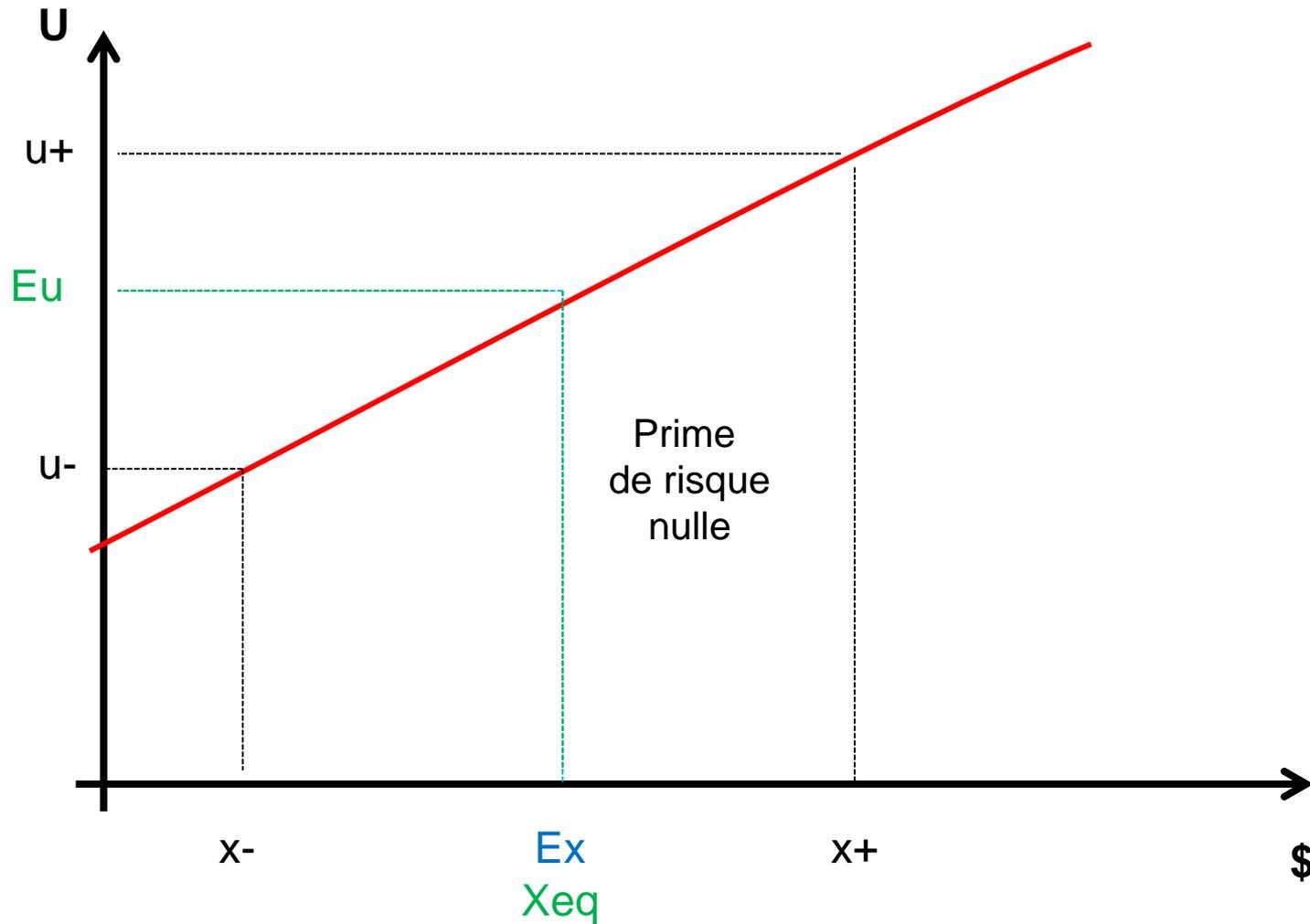
$$70+X = 200p + 70(1-p)$$
$$X^* = 130p$$

# Rappel: l'aversion au risque





# L'aversion au risque croit avec la concavité de la fonction d'utilité



# TP Scilab

---

<https://poseidon.centre-cired.fr/vogt/>

(accept the certificate)

UNZIP `tp_valeur_option.zip` on the desktop

Follow instructions on the pdf until question 18

Ask if you have any problem

# Un modèle simple du système automobile européen décrit chaque techno par son coût complet...

	Classique	Efficace	Electrique
Inv. (I)	16 500	22 000	29 000
Conso (c)	70.4	52.9	15.4

Life Cycle Cost

$$LCC = \frac{I}{\sum_{t=1}^T (1+i)^t} + L \cdot c \cdot (p + cc \cdot tx)$$

*Km/an* →  $I$   
*prix de l'énergie* →  $p$   
*contenu carbone* →  $cc$   
*taxe carbone* →  $tx$   
*actualisation* →  $\sum_{t=1}^T (1+i)^t$

# ...puis distribue les parts de marchés et calcule le coût total du système automobile

---

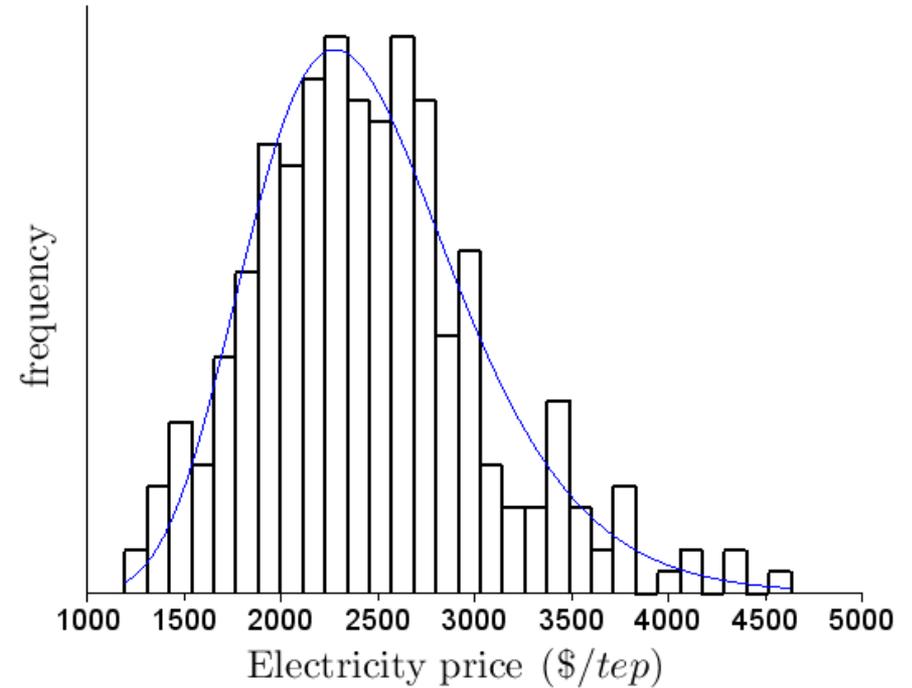
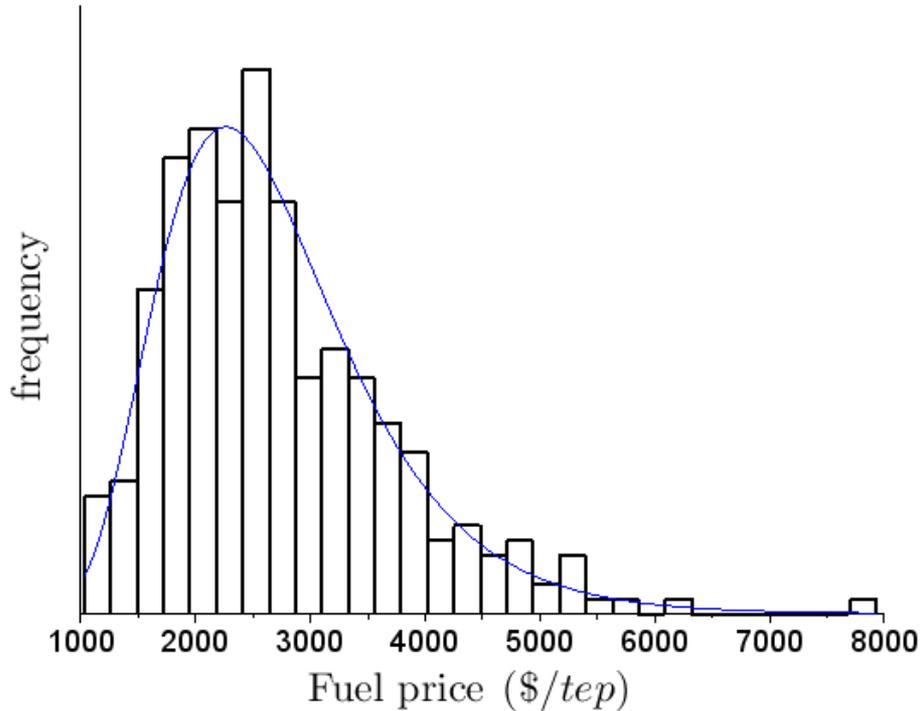
*Market Share*

$$MSH(i) = \frac{LCC(i)^{-\gamma}}{\sum_j LCC(j)^{-\gamma}}$$

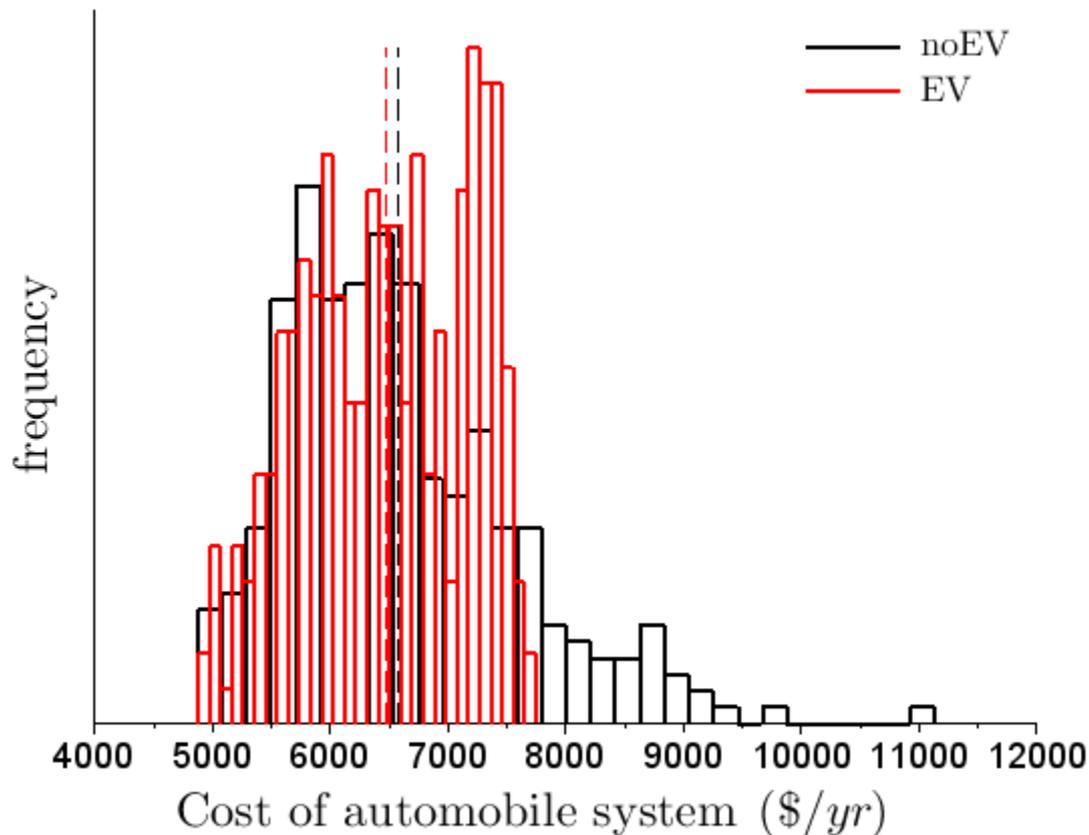
*Coût du Système Automobile*

$$CSA = \sum_i LCC(i) \cdot MSH(i)$$

# Dans un monde où les prix futurs de l'essence et de l'électricité sont incertains...



# ...le VEx joue un rôle d'assurance contre le pétrole cher...



1. La disponibilité des VE réduit le coût moyen du système automobile (CSA) (ici 100\$/an/voiture)
2. Réduit le risque d'affronter un coût trop élevé (aversion au risque)
3. Substitue la consommation de pétrole (rente de rareté payée à l'étranger) par de l'électricité (valeur ajoutée domestique)