



# Automobile et Développement durable

## Energies et motorisations

---

- 1) Le développement durable
- 2) Energies et émissions de CO<sub>2</sub>
- 3) Comparaison de technologies énergie-motorisation
- 4) Evolutions des technologies conventionnelles des véhicules
- 5) Prospective des énergies et des motorisations



# Automobile et Développement durable

## 1) Les points concernés

---

- Sécurité routière (et confort)
- Déchets et Recyclage
- Pollution de l'air "classique" (santé) et Bruit
- **Energie et Emissions de GES (climat)**
- Le Changement climatique



# Automobile et Développement durable

## 1-1) Sécurité routière et Confort

---

- Augmentation de la masse moyenne des véhicules : + 130 kg en 10 ans
  - renforcement des structures (chocs), airbag, ABS ...
  - augmentation des dimensions (habitabilité bas de gamme)
  - généralisation du "confort" sur toutes les gammes (bas)
- Augmentation des consommations d'énergie :
  - électrique : mécatronique, électronique ...
  - mécanique : climatisation (P nominale 4 à + 8 kW)
- Pénalisations sur la consommation de carburant (route - ville) :
  - masse : 0,2 à 0,4 l/100km pour 100 kg
  - électricité : 1 à 3 l/100km pour 1 kW<sub>e</sub>
  - mécanique : 0,4 à 1,2 l/100km pour 1 kW<sub>m</sub>



# Automobile et Développement durable

## 1-2) Déchets et Recyclage

---

- Directive européenne 2000/53/CE sur les VHU (véhicules hors d'usage) :
  - juillet 2003 : 4 métaux lourds proscrits (Pb, Hg, Cd, Cr hexavalent)
  - janvier 2006/2015 :
    - taux de réutilisation = 85 % / 95 % du poids
    - taux de recyclabilité = 80 % / 85 %
  
- Difficultés :
  - réutilisation de pièces : Pb de sécurité et d'environnement
  - recyclabilité : équipements multimatériaux

*(Séminaire SIA Recyclage, Equip'Auto, 18 octobre 2001)*



# Automobile et Développement durable

## 1-3) Pollution de l'air "classique" et Bruit

---

- Pollution "classique" : CO, HC, NO<sub>x</sub>, Particules  
= Effets sur la santé

Sévérification de la réglementation européenne :

- Euro3 aujourd'hui
- Euro4 en 2005, Euro5 en 2008-2010

*« les niveaux atteints sont si faibles que la mesure en devient difficile; dans certains cas, les moteurs actuels épurent l'air ambiant »*

- Bruit (pas de nouvelle norme en vue) :
  - $V < 50$  km/h : régime moteur
  - $V > 50$  km/h : contact pneu-chaussée



# Automobile et Développement durable

## 1-4) Energie et Emissions de GES

---

- Energie :
  - préserver les ressources fossiles
  - au rythme actuel de consommation, pétrole : 45 ans, gaz : 70 ans
  - mais accélération du rythme (Chine, Inde ...)
- Emissions de Gaz à Effet de Serre :  
lutter contre le Changement Climatique



# Automobile et Développement durable

## 1-5) Le Changement climatique

---

- Changement climatique =  
les conséquences de l'augmentation de la température moyenne de l'atmosphère,  
due à celle des concentrations en GES, principalement le CO<sub>2</sub>

Avec un doublement de la concentration en CO<sub>2</sub> à l'horizon 2100 (émission constante de 17 Gt/an sur le XXI<sup>ème</sup> siècle) les différents modèles climatiques conduisent à un réchauffement global de 1 à 4 °C.

Avec pour conséquences :

- Sécheresses et inondations plus sévères
- Dépérissement des forêts
- Modification de l'équilibre des espèces
- Montée des océans de 15 à 95 cm et disparition de zones côtières et d'îles
- Augmentation de la famine, des maladies infectieuses,  
des affections cardiorespiratoires ...



# Automobile et Développement durable

## 1-6) Le Changement climatique

---

### Gaz à Effet de Serre d'origine anthropique *(protocole de Kyoto)*

#### Gaz à effet direct

CO <sub>2</sub>	gaz carbonique
CH <sub>4</sub>	méthane
N <sub>2</sub> O	oxyde nitreux
HFC	hydrofluorocarbones (*)
PFC	hydrocarbures perfluorés (*)
SF <sub>6</sub>	hexafluorure de soufre (*)

#### Origine

Combustion d'énergie fossile
Fermentation, combustion
Agriculture, industrie, transports
Réfrigération, aérosols
Industrie
Industrie

*(\*) substitués des CFC chlorofluorocarbones*



# Automobile et Développement durable

## 2) Energie et émission de CO<sub>2</sub>

---

- Combustion des hydrocarbures
- Comparaison de sources d'énergie

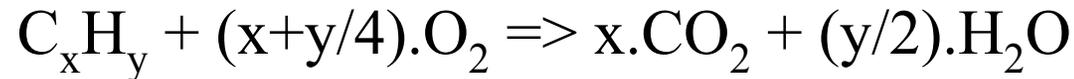


# Automobile et Développement durable

## 2-1) Combustion des hydrocarbures

---

Equation chimique de la combustion :



Rapport entre masse de CO2 et masse de carburant :

$$R_1 = mCO_2/mCarb = 44/(12+r) \quad \text{où } r = y/x$$

- pétrole: 3,17 - gaz naturel: 2,75

Rapport entre masse de CO2 et énergie fournie :

$$R_2 = mCO_2/(mCarb*PC) = 44/[(12+r)*PC]$$

où PC = pouvoir calorifique (MJ/kg)

- pétrole: 74,4 - gaz naturel: 58,4 g CO2/MJ



## Automobile et Développement durable

### 2-2) Comparaison de sources d'énergie

---

<b><u>Energie</u></b>	<b><u>MJ / kg</u></b>	<b><u>g de CO<sub>2</sub> / MJ</u></b>
<b>Essence</b>	<b>42,7</b>	<b>73,8</b>
<b>Gazole</b>	<b>42,5</b>	<b>75,0</b>
<b>Gaz Naturel</b>	<b>47,7</b>	<b>58,4</b>
<b>GPL</b>	<b>46,1</b>	<b>65,6</b>
<b>Méthanol</b>	<b>19,7</b>	<b>70,0</b>
<b>Electricité (Centrale gaz naturel / Pile comb.)</b>	<b>24,0 / 20-43</b>	<b>116,0 / 70-74</b>



# Automobile et Développement durable

## 3) Technologies énergies/motorisations

---

- Bilan global énergie / émission de CO<sub>2</sub>
- Comparaison à l'utilisation du véhicule



# Automobile et Développement durable

## 3-1) Energies / motorisations : Bilan global

---

- Bilan CO<sub>2</sub> : fabrication – utilisation – fin de vie (ACV)
- Energies :
  - extraction (pétrole ...) et/ou production (H<sub>2</sub> ...)
  - conditionnement (gaz ou H<sub>2</sub> comprimé ...) et distribution (transport ...)
- Motorisations :
  - procédés de fabrication véhicules et composants
  - utilisation des véhicules
  - recyclage



## Automobile et Développement durable

### 3-2) Energies / motorisations : Utilisation

<i>Energie et motorisation</i>	<i>CO<sub>2</sub> relatif</i>	<i>Observations</i>
AC Essence actuel	100	Base
Essence injection directe (IDE)	90-85	Développements en cours
AC GPL	90-85	Surcoût - Fiscalité promotionnelle
Diesel (préchambre)	90	
Electrique batteries   *Charbon *Nucléaire	85 0	Performances inférieures (autonomie, vitesse) Surcoût -Aides financières
Diesel injection directe (IDD)	80	
Hybride parallèle Essence	80	(Toyota Prius) -Coût réel double de Base
AC Gaz naturel	75	Surcoût -Fiscalité promotionnelle
Diesel + Diester 30 %	75	Surcoût -Fiscalité promotionnelle
Electrique Pile à combustible + reformeur (essence)	50	A l'horizon 2020 ? Coût actuel prohibitif Pb Production, distribution, stockage H <sub>2</sub>



# Automobile et Développement durable

## 4) Evolutions des technologies conventionnelles

---

- Bilan énergétique d'un véhicule
- Essai européen normalisé : évaluation des progrès ?
- Projets de réglementation européenne de l'émission de CO<sub>2</sub>
- Evolution des motorisations (moteurs, transmissions)
- Evolution des composants et auxiliaires (électrification, 42 V)



# Automobile et Développement durable

## 4-1) Bilan énergétique véhicule

---

- En fourniture de puissance : forces appliquées
- En décélération et arrêt : gestion de l'injection
- Auxiliaires : les puissances absorbées



# Automobile et Développement durable

## 4-1-1) Forces appliquées

---

- Aérodynamique :  $F_a = 0.5\rho.SC_x.V^2$
- Roulement :  $F_r = R.Mg.\cos\alpha$
- Potentielle :  $F_p = Mg.\sin\alpha$
- Cinétique :  $F_c = 0.5M.\Delta(V^2)$

Puissance totale :  
 $(F_a+F_r+F_p+F_c).V$

- Voies pour réduction de la demande de puissance :
- $SC_x$  : limite atteinte
  - $M$  : -100 kg d'ici 2005 (900 kg) et -100 kg d'ici 2010 (800 kg)
  - $V$  : ?



# Automobile et Développement durable

## 4-1-2) Décélérations - arrêts

---

- Comportement des motorisations actuelles :
  - consommation de carburant en décélération
  - consommation au ralenti
  - plus de 10 % de la consommation totale en ville
- Question à se poser pour les véhicules du futur
  - va augmenter dans l'avenir (saturation du trafic)



# Automobile et Développement durable

## 4-1-3) Auxiliaires

---

- Sur voiture particulière, en moyenne annuelle :
  - climatisation : + 0,5 l/100km (\*)
  - éclairage : + 0,1 l/100km ?
  - etc.
  
- Sur un autobus : + 10 l/100km ?

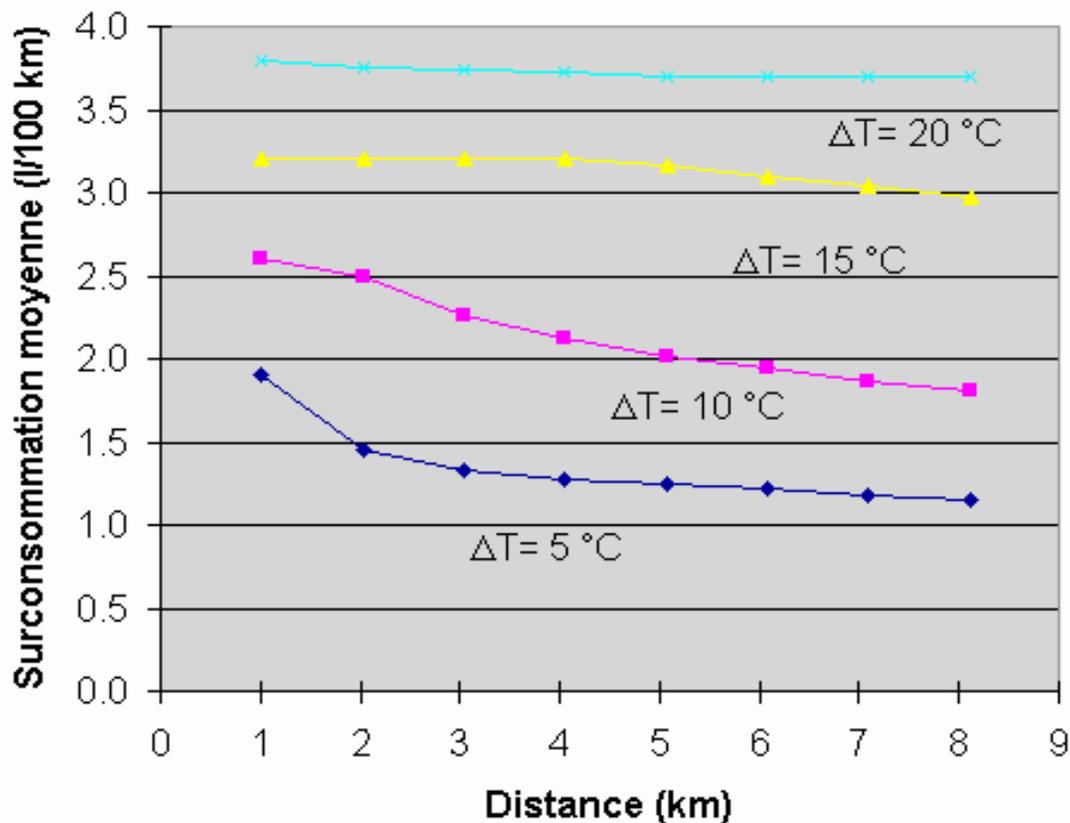
---

(\*) analyse paramétrique suivante ...



# Automobile et Développement durable

## 4-1-4) Auxiliaires : climatisation automobile



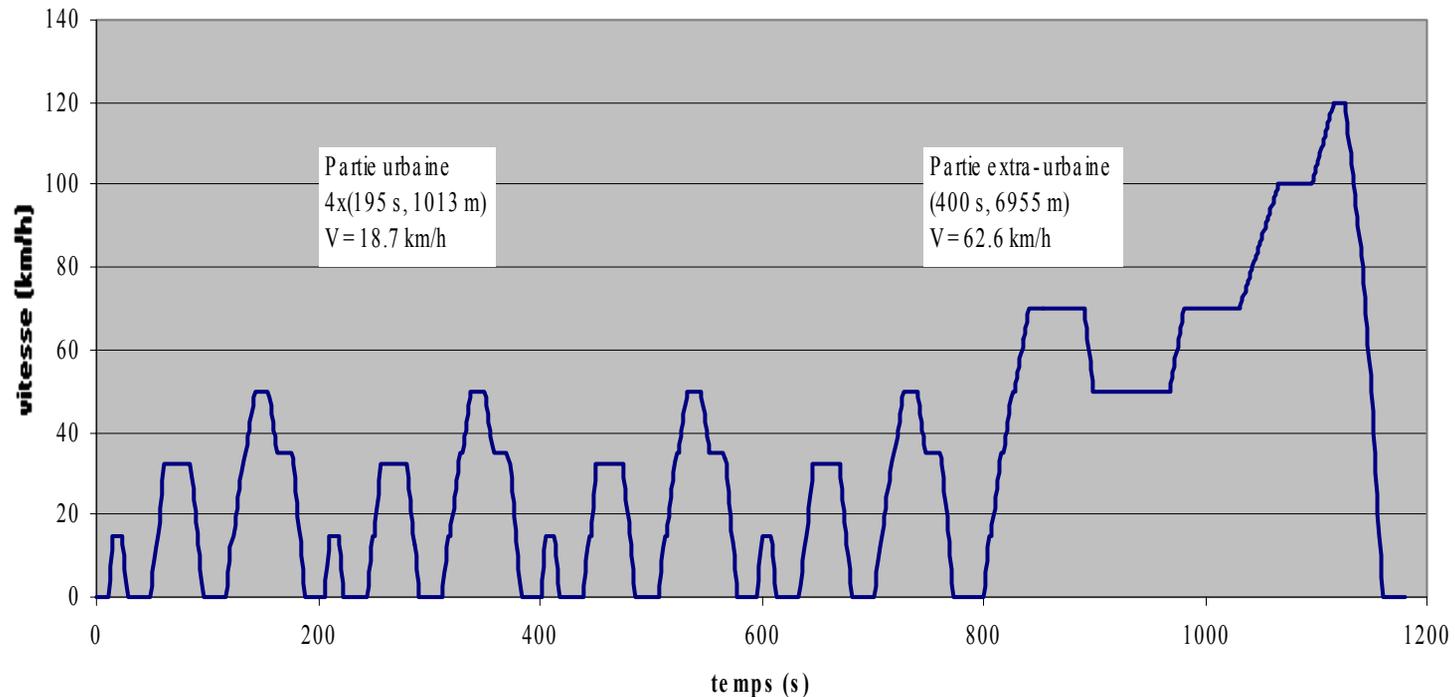
*Voiture bas de gamme, moteur 1.4i, compresseur à cylindrée fixe,  
moyenne cumulée sur cycles urbains =  $f(T_{ext} - T_{int})$*



# Automobile et Développement durable

## 4-2-1) Cycle européen voitures

Cycle européen ECE15-0A





# Automobile et Développement durable

## 4-2-2) Caractéristiques du cycle

---

- Banc à rouleau, inertie équivalente #  $P_{vide} + 25 \text{ kg}$
  - Aucun auxiliaire (éclairage, climatisation ...)
  - Vitesse imposée identique pour toutes les gammes
  - Fonctionnement à faibles régimes et puissances du moteur
- Le cycle actuel ne permet pas d'évaluer les progrès technologiques :
- sur les auxiliaires
  - sur les motorisations, en dehors des zones de fonctionnement du cycle
  - cas de motorisations nouvelles (découplage moteur-roues) ?
- Etudes expérimentales en usage réel, modélisations /calculs



# Automobile et Développement durable

## 4-3-1) Projet réglementation émission CO<sub>2</sub>

---

- Emissions de CO<sub>2</sub> mesurées sur le cycle
- Valeurs limites par constructeur, moyennes pondérées par les ventes (1) :

Date	g de CO <sub>2</sub> par km (1)	Essence (2) l/100km	Diesel (2) l/100km
(Actuel)	170 g	7,2	6,5
2008	140 g	5,9	5,3
2012	120 g	5,1	4,6
2015 ?	90 g	3,8	3,4

(2) Consommations équivalentes selon carburant



# Automobile et Développement durable

## 4-3-2) Evolutions nécessaires

---

### Pour respecter les valeurs limites d'émissions de CO<sub>2</sub> :

- diésélisation de la gamme – moteurs à injection directe
- augmentation de l'offre en bas de gamme, faible consommation
- allègement des véhicules
- augmentation du rendement des moteurs
- réduction de la puissance absorbée par les auxiliaires
- développement de nouvelles motorisations



# Automobile et Développement durable

## 4-4) Evolution des motorisations

---

- Moteurs thermiques (essence et diesel)
- Hybridation (légère, forte)
- Motorisations électriques (batteries, piles à H<sub>2</sub>)
- Transmissions



# Automobile et Développement durable

## 4-4-1) Moteurs thermiques

---

- Pertes thermiques échappement : # 40 % énergie du carburant
  - turbo à géométrie variable
  - détente prolongée (cycle)
- Pertes mécaniques : jusqu'à # 15 % de l'énergie
  - états de surface (piston-cylindre)
  - lubrification
- Cycle thermodynamique : rendement boucle HP, pertes BP
  - compression variable (essence, faible charge)
  - distribution variable (admission, échappement)
- Combustion :
  - essence à auto-inflammation CAI (rendement à faible charge)
  - diesel à combustion homogène HCCI (NOx et particules)



# Automobile et Développement durable

## 4-4-2) Motorisations hybrides

---

- Hybride série  $\Leftrightarrow$  transmission électrique : véhicule à usage exclusivement urbain
- Hybride parallèle  $\Leftrightarrow$  addition (ou non) des couples
  - intérêt en circulation urbaine ou routière (aucun sur autoroute)
  - nécessité de récupérer l'énergie de décélération

**Hybridation légère** : alterno-démarrreur + batterie + "downsizing" ?

- alterno-démarrreur : intégré au volant moteur (ou entraîné par courroie)
- stop and go (arrêt du moteur thermique) + "Booster" ?
- Pb alimentation des auxiliaires à l'arrêt (électrification – batteries ou supercapacités)

**Hybridation forte** : ex. Toyota Prius

- 2 moteurs : essence 43 kW (V limitée sur autoroute), électrique 30 kW
- 1 batterie NiMH 21 kW (autonomie # 20 km en ville), 1 génératrice 15 kW
- 1 train épicycloïdal

*NB : moteur à essence optimisé (compression variable de 4,8 à 9,3 – détente prolongée)*



# Automobile et Développement durable

## 4-4-2) Toyota Prius



*Essais INRETS :*

<i>CO2 (g/km)</i>	<i>Ville</i>	<i>Route</i>	<i>Autoroute</i>
Toyota Prius	140	130	155
Moyenne 13 E	200	160	155

*NB : consommation sur cycle ECE15-0A de 5,2 à 6,6 l/100 km, selon état de charge batterie*



# Automobile et Développement durable

## 4-4-3) Motorisations électriques

---

- Batteries : l'autonomie augmente avec le coût
  - => pb-acide : 70 km, Ni-Cd : 100 km, ... Li-ion : 200 km, Trifluorure de Li (produit Rhodia) : 400 km ?
  
- Piles à H<sub>2</sub> :
  - coût actuel # 100.000 F/kW !
  - 3 filières pour H<sub>2</sub> : comprimé (autobus), liquéfié ou reformeur d'essence à bord du véhicule (Mercedes NECAR, PSA-Renault)
  - comparaison des filières en émission de CO<sub>2</sub> selon :
    - le procédé de fabrication (électrolyse, vaporeformage ...),
    - le conditionnement,
    - le "mix" de production d'énergie (par pays, continent).
  
- => le reformeur apparaît aujourd'hui comme la meilleure filière pour la moyenne européenne



# Automobile et Développement durable

## 4-4-4) Transmissions

---

- 2 types :
    - à variation continue du rapport
    - à rapports discrets (mécanique ou automatique)
  - Objectif : optimisation du rendement de la chaîne de traction en tout point de fonctionnement
- ⇒ Gestion du GMP (cartographie moteur et demande de puissance)
- ⇒ Développement des transmissions :
  - mécanique robotisée (à 5 rapports ou plus ...)
  - avec embrayage piloté pour le passage automatique des rapports

*(les autres types de transmission ont des rendements mécaniques moins bons)*



# Automobile et Développement durable

## 4-5) Evolution des composants et auxiliaires

---

- Electrification des auxiliaires pour mini CO<sub>2</sub>; 2 raisons principales :
  - l'optimisation énergétique en instantané nécessite un contrôle logiciel (électronique)
  - toutes les pertes mécaniques augmentent avec la vitesse de rotation : découplage nécessaire

*L'alternateur reste à entraînement mécanique : électrotechnique, refroidissement par eau*
  
- Composants et auxiliaires concernés :
  - contrôle moteur : injection (cycle thermo, pollution), distribution variable (et compression)
  - thermique moteur et lubrification : pompes électriques
  - compresseur de climatisation
  - direction assistée, freins, suspension ?
  
- Augmentation prévisible de la puissance électrique absorbée : x5
  
- Conséquences sur la tension du réseau : 42 V
  - réduction des pertes par effet Joule (divisées par 9 à P égale)
  - coexistence (temporaire ?) d'un réseau 12 V (éclairage ...) : convertisseur 42 V/14 V



# Automobile et Développement durable

## 5) Prospective Energies/motorisations

---

- Contraintes climatiques : réduire [la concentration] de CO<sub>2</sub>
  - l'hypothèse 2x[CO<sub>2</sub>] à l'horizon 2100 est remplacée aujourd'hui par 4x[CO<sub>2</sub>]
  - pour stabiliser la [CO<sub>2</sub>] à son niveau actuel, il faudrait réduire dès maintenant les émissions de 60 % !
- Scenario proposé :
  - 2000-2020 : perfectionnement des motorisations thermiques E/D
  - 2010-2015 : développement de l'énergie Hydrogène, application aux moteurs thermiques
  - 2010-2050 : développement de nouveaux systèmes de production d'énergie (énergie libre)  
application aux transports et aux autres secteurs
  - 2015-2050 : batteries à forte densité d'énergie; véhicules électriques
  - 2020-2030 : abandon progressif de la consommation d'hydrocarbures
  - 2030-2050 : diffusion des piles à combustible (Hydrogène) dans le secteur des transports  
motorisations électriques
  - 2030-2050 : période de grande transition énergétique pour tous les secteurs énergétiques
  - après 2050 : arrêt total de la consommation de ressources fossiles (hydrocarbures et charbon)  
arrêt de la fission nucléaire



# Automobile et Développement durable

.....

---

Merci pour votre attention !