

Les véhicules électriques

- Principes et applications

D. TISSIER





Exemples de véhicules électriques

Les véhicules électriques



Navires électriques (50MW)
à source Diesel, gaz ou nucléaire



Trains (10MW)



Les véhicules électriques



Tram (300kW)



Métro (450kW)



Petit camion électrique (6kW)



Bus (200kW)

Les véhicules électriques



VL (20 à 80kW)



Scooter (3kW)



Vélo électrique hybride (1kW)



Vélo à assistance électrique (250W)



Intérêt de l'alimentation électrique des véhicules

Tous les avantages du moteur électrique

Très haut rendement (90 à 95%)

- Donc taille plus petite
- Consommation plus faible
- Système de refroidissement très simple

**2,7 millions de véhicules
dans le monde en 2018**

Deux sens de rotation

Couple à l'arrêt

Pas de démarreur

Pas de boîte de vitesses ou embrayage

Souplesse de réglage et de contrôle du couple et de la vitesse

Très faible bruit

Pas de consommation à l'arrêt

Pas de filtre (air, essence, etc.)

Pas de fuite d'huile ou d'essence

Pas de risque d'explosion du réservoir

Coût plus faible

**70 km
pour 1 €**

Inconvénient : taille des batteries

La part du transport dans la consommation énergétique

- **Consommation mondiale d'énergie**

- 59kWh par jour et par habitant
- **soit 140 000TWh par an d'énergie primaire**
- dont 69% d'énergie finale (96 600TWh)
- et seulement 11,7% d'énergie électrique (16 370TWh)
- **87% de l'énergie primaire est non renouvelable.**

- **Transports : 27 000TWh**

- soit 19,3% de l'énergie primaire
- ou 28% de l'énergie finale

-
- Énergie primaire : tirée directement d'une ressource naturelle
 - Énergie finale : commercialisée (électrique ou "à la pompe")
 - 1 tep = 11 600kWh
 - 1 baril = 1700kWh

La part du transport dans la consommation énergétique

- **En France**
- **Consommation nationale d'énergie**
 - 142kWh par jour et par habitant
 - 51830kWh par an et par habitant
 - soit 3370TWh par an d'énergie primaire**
- dont 63% d'énergie finale (2120TWh)
- et seulement 14,8% d'énergie électrique (500TWh)
- **Transports : 612TWh ou 52,7Mtep**
 - soit 18,2% de l'énergie primaire
 - ou 31% de l'énergie finale
 - environ 25% en transports électriques

La part du transport dans la consommation énergétique

- **En France**

Transports : 612TWh par an

- Avec déjà environ 25% en transport électrique
- et 75% en véhicules « thermiques », soit 460TWh

- **Si tous ces véhicules devenaient électriques, il faudrait très approximativement :**

pour $460 \times 30\% = 140$ TWh mécaniques

avec moteur électrique de rendement 90% au lieu de 30% :

$140 / 90\% = 160$ TWh électriques à fournir en plus par nos centrales électriques (actuellement environ 500TWh par an) soit 32%.

Les combustibles usuels

P.C.I. des combustibles :

Bois **2 à 4kWh/kg**

Charbon **7 à 9kWh/kg**

Fuel **11,6kWh/kg** (essence 12kWh/kg)

Gaz naturel **17kWh/kg**

Hydrogène **34kWh/kg**

Uranium naturel **116 000kWh/kg**

(**Batterie Li-Ion** **0,18kWh/kg**)



Alimentation en énergie des véhicules électriques



Caténaire 25kV - 50Hz (ferroviaire RTE)

Caténaire 1500V CC (ferroviaire)

Caténaire 600 à 750V CC (métro, tram, bus)

Batteries (VL, scooter, vélo)

Pile à combustible H2 (VL, etc.)

**Alternateur embarqué à moteur thermique
(véhicules hybrides, navires, trains)**

D'où vient cette énergie ?

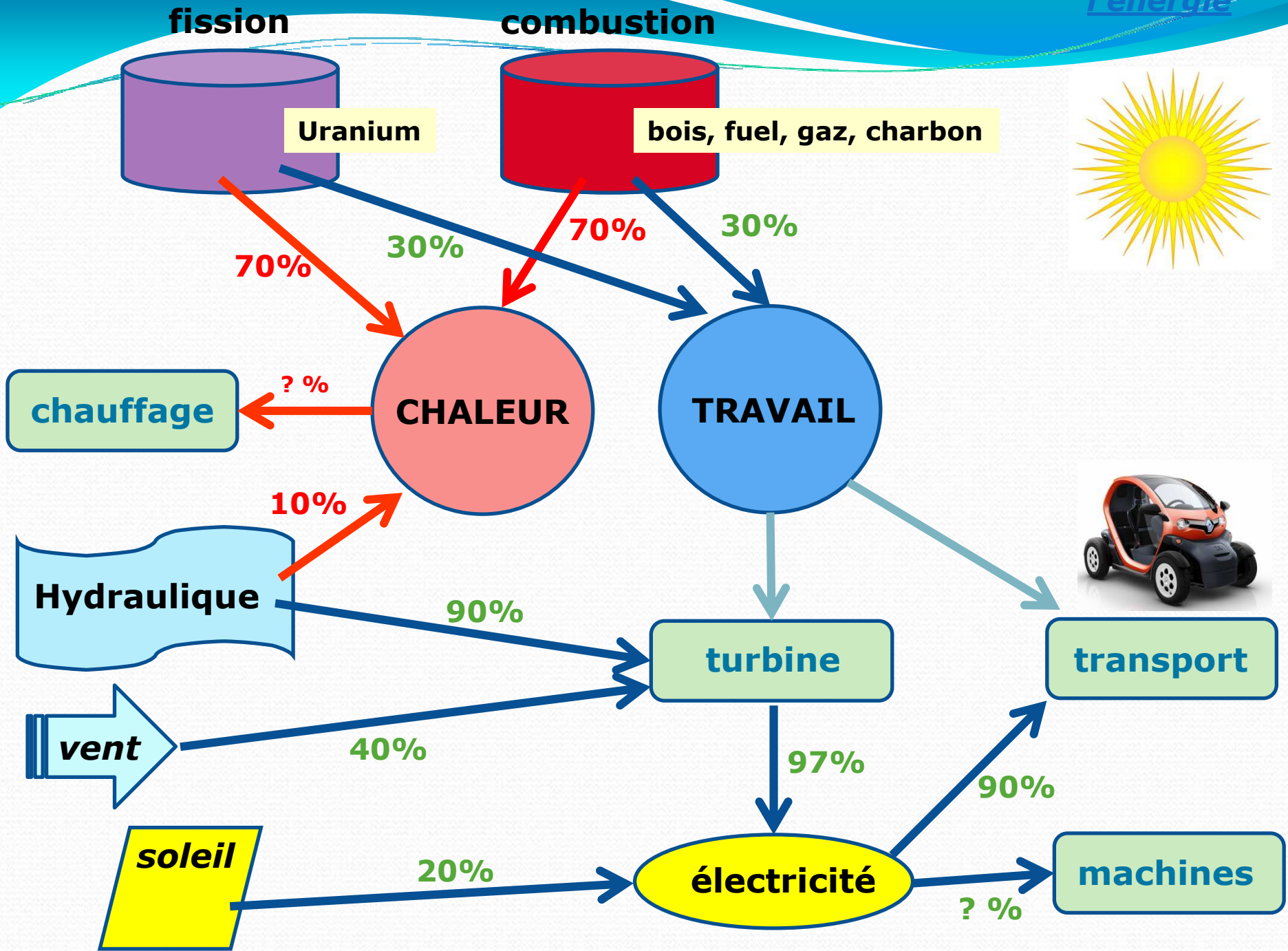
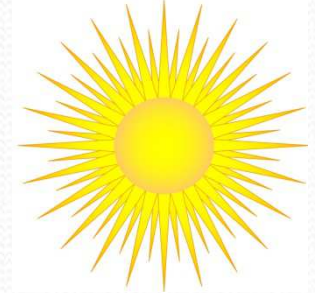


Caténaires :
du réseau de distribution électrique

Batteries :
charge à partir du réseau

Pile à combustible H₂ :
production d'hydrogène
(à partir d'hydrocarbures et d'eau ou d'électricité)

Alternateurs embarqués :
gas-oil, gaz, uranium



Comparaison des consommations d'énergie

Consommation d'énergie primaire *“du puits à la roue”*

Voiture essence Mégane 1,6l 0,54 kWh/km
en kWh thermique avec rendement de moteur 30%
sans arrêt au feu rouge !

Voiture électrique (*selon la production d'électricité*) :
en kWh primaire avec rendement de moteur 90%

- source centrale thermique 0,53 kWh/km
- source éolienne 0,18 kWh/km

et, avec rendement de batterie de 95% :
environ **0,19kWh/km**

Calcul de la consommation au km

Voiture à essence (consommation seule 6l/100km) :

à 0,06 l/km et 0,75kg ess/litre

$0,06 \times 0,75 = 0,045$ kg ess./km

avec PCI de l'essence de 12kWh/kg

Soit finalement $0,045 \times 12 = 0,54$ kWh thermique/km

À la roue, avec un rendement du moteur de 30%

$0,54 \text{ kWh/km} \times 30\% = 0,162$ kWh mécanique/km

mais avec un moteur électrique de rendement 90%

on aura $0,162 / 90\% = 0,18$ kWh élec/km

Emission de CO₂ en un cycle de vie :

en gramme par kWh électrique

Nucléaire	7	durée de vie 40 ans
Hydraulique	8	40
Eolien off-shore	9	20
Eolien	25	20
Solaire	60	25
Biomasse bois	55	15
Biomasse boue	540	30
TàG cycle combiné	400	30
Charbon U.S.C.	850	30
Charbon classique	1100	40
Fuel	800	40
TàG classique	700	30

Voiture à essence (consommation seule) :

800g CO₂/kWh mécanique

Calcul de l'émission de CO₂ par kWh

Voiture à essence (consommation seule) :

130 g CO₂/km

à 0,06 l/km

⇒ 2160 gCO₂/l

0,750 kg ess./l

⇒ 2900 gCO₂/kg ess.

12 kWh/kg

⇒ 242 gCO₂/kWh thermique

ou 812g CO₂/kWh mécanique

Emission de CO_2 :
"du puits à la roue"



Voiture essence Mégane 1,6l 184 g CO_2 /km

Voitures électriques (selon la production d'électricité) :

Fluence-ZE (charbon Europe) 128 g CO_2 /km

Fluence-ZE (mix Europe) 62

Fluence-ZE (EDF) 12

Fluence-ZE (éolien) 0



Le stockage d'énergie des véhicules

Stockage d'énergie électrique

Batteries d'accumulateurs

	<i>Wh/kg</i>	<i>η%</i>	<i>cycles</i>	<i>V par élément</i>
Plomb	30	70	300	2V
Ni-Cd	50	80	1000	1,2V
Ni-MH	80	75	1000	1,2V
batteries au Lithium				
Li-Ion	180	90	300	3,7V
Li-Polym.	170	90	800	3,7V



Lithium :

Matériau peu coûteux et abondant
Mines d'extraction peu nombreuses :
Chili, Argentine, Bolivie (salars)

La recharge des batteries

(réf. RENAULT-ZE)

1. Charge complète 100% sur borne Wall-Box : 6 à 8h
2. Charge rapide partielle sur borne 400V-63A : 80% en 45mn
ou autonomie de 50km en 10mn
3. Echange automatisée de la batterie en station de distribution : 3mn

24 heures sur une prise de courant classique (E/F)

14 heures sur une prise de courant renforcée

10 heures sur une borne de recharge résidentielle de 3 kW

5 heures sur une borne de recharge résidentielle de 7 kW

3h20 sur une borne de recharge de 11 kW

1h40 sur une borne de recharge de 22 kW

45 mn sur une borne de recharge rapide (80 % de l'autonomie recouvrée)

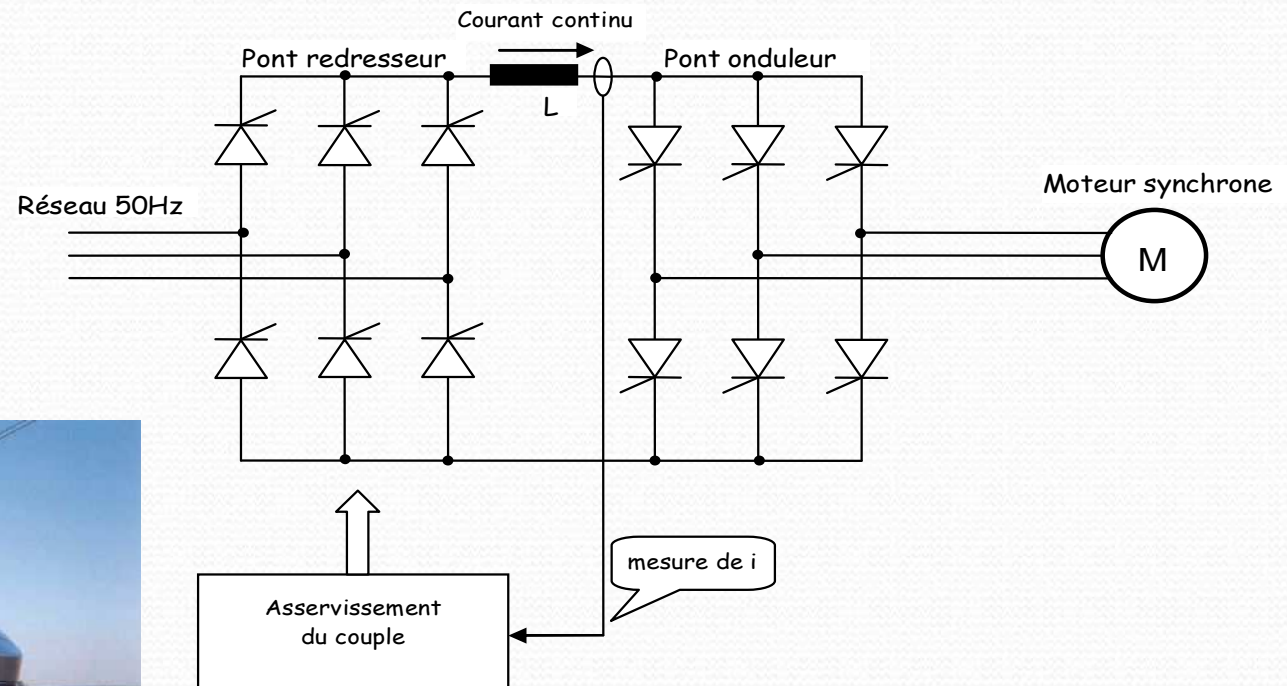


La motorisation électrique

La motorisation

En grande puissance (navires, trains) :

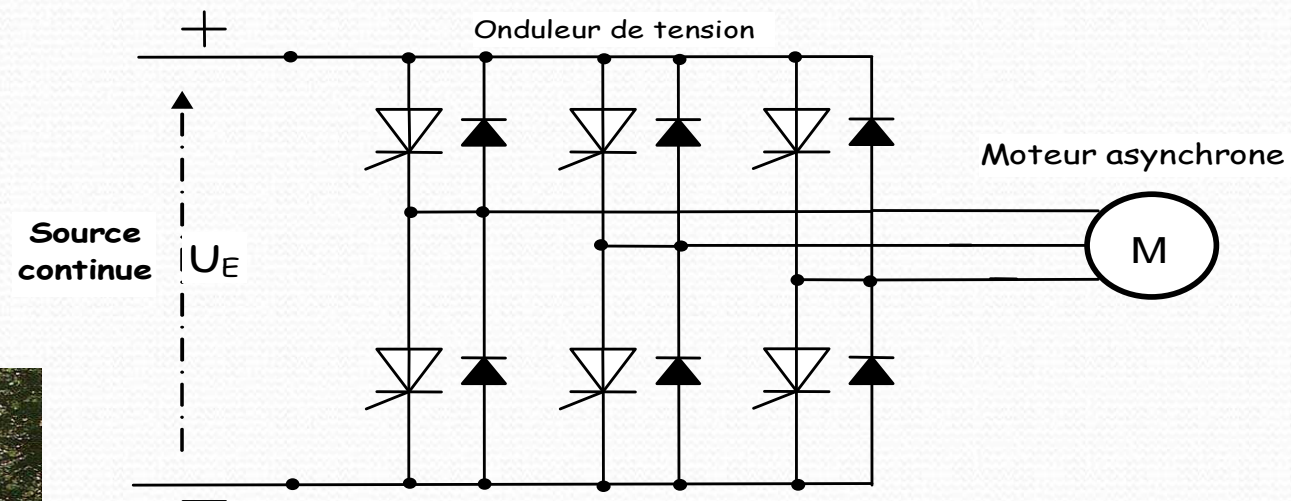
Moteurs synchrones (de 1 à 20MW par moteur)
avec onduleur de courant :



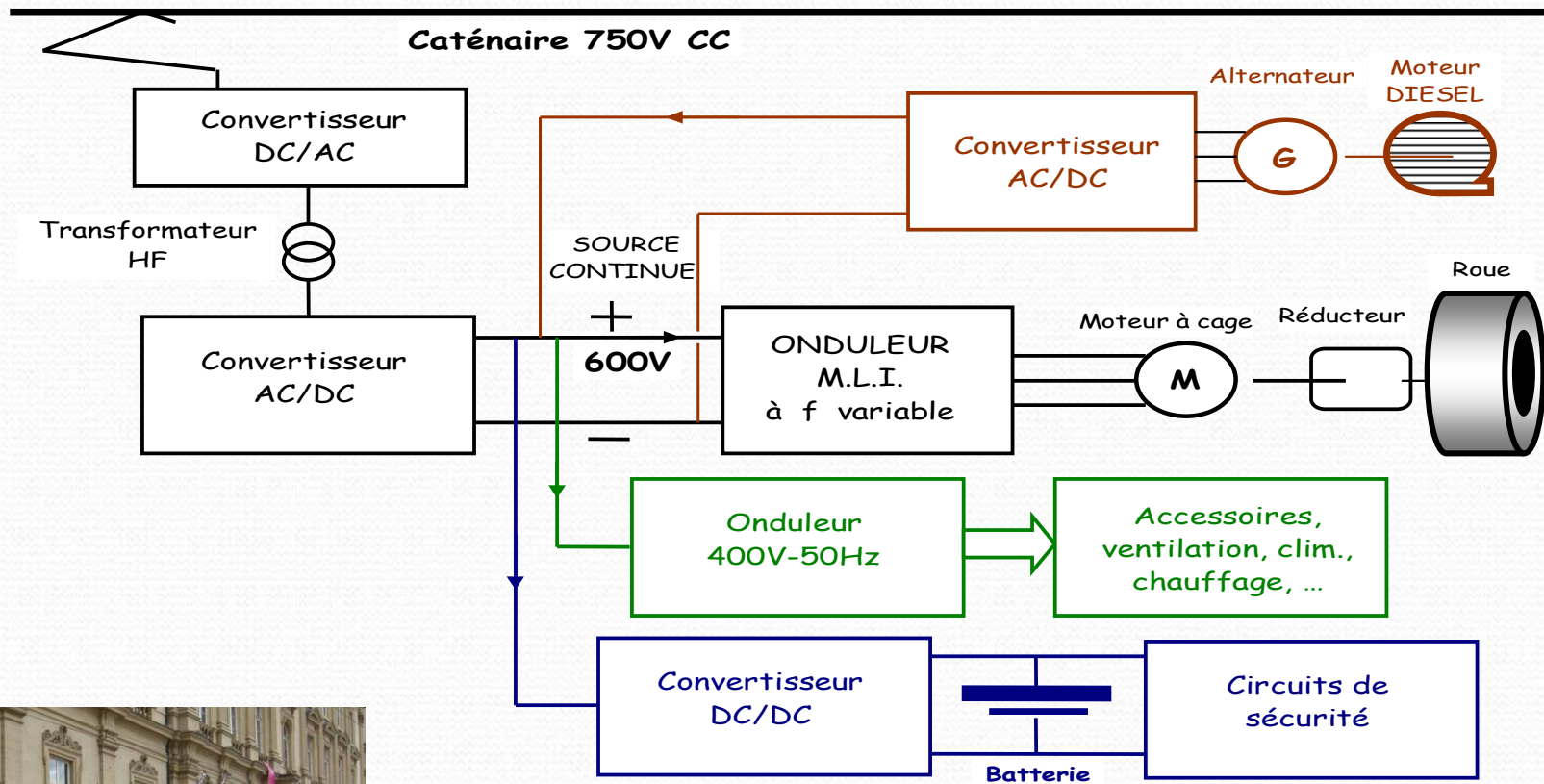
La motorisation

En moyenne puissance (métro, bus, tram) :

Moteurs asynchrones alimentés en courant alternatif triphasé avec onduleur de tension :



Véhicule sous caténaire



Le véhicule électrique

Transport de fret urbain :

Maxity électrique
RENAULT Trucks - P.V.I.

Véhicule utilitaire 4,5t
Vitesse maxi : 90km/h
Moteur asynchrone 47kW 270N.m
Batterie Li-ion 614V-65Ah 42kWh
Autonomie : 100km



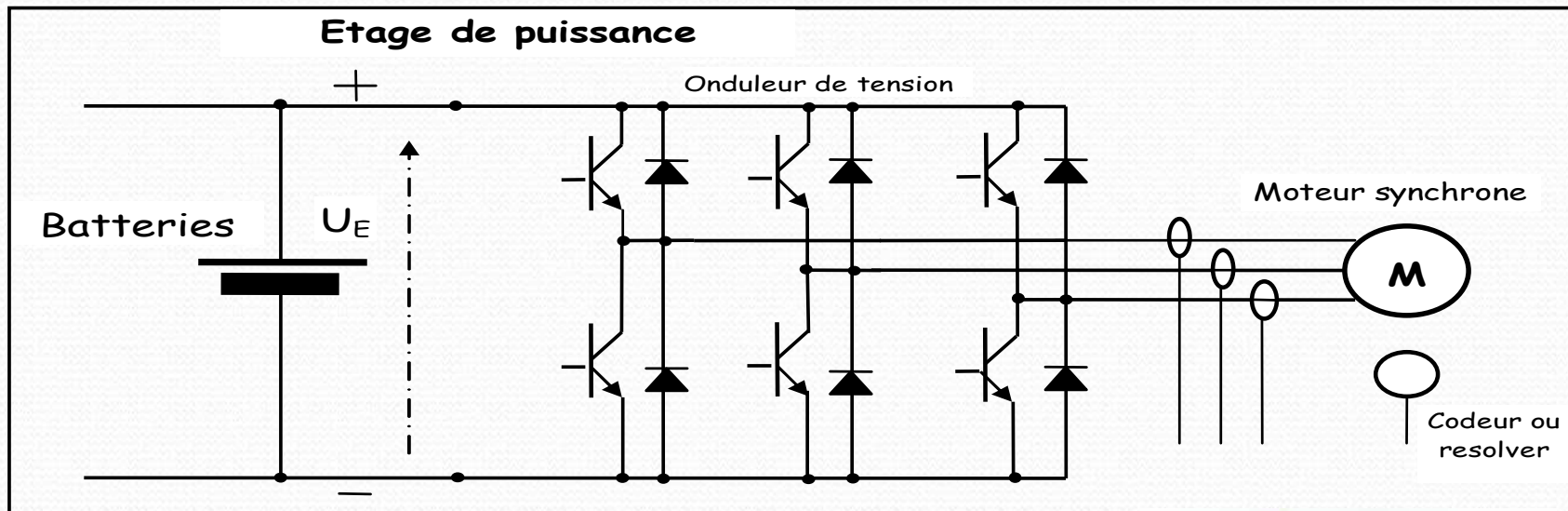
Maxity (RENAULT Trucks –



La motorisation

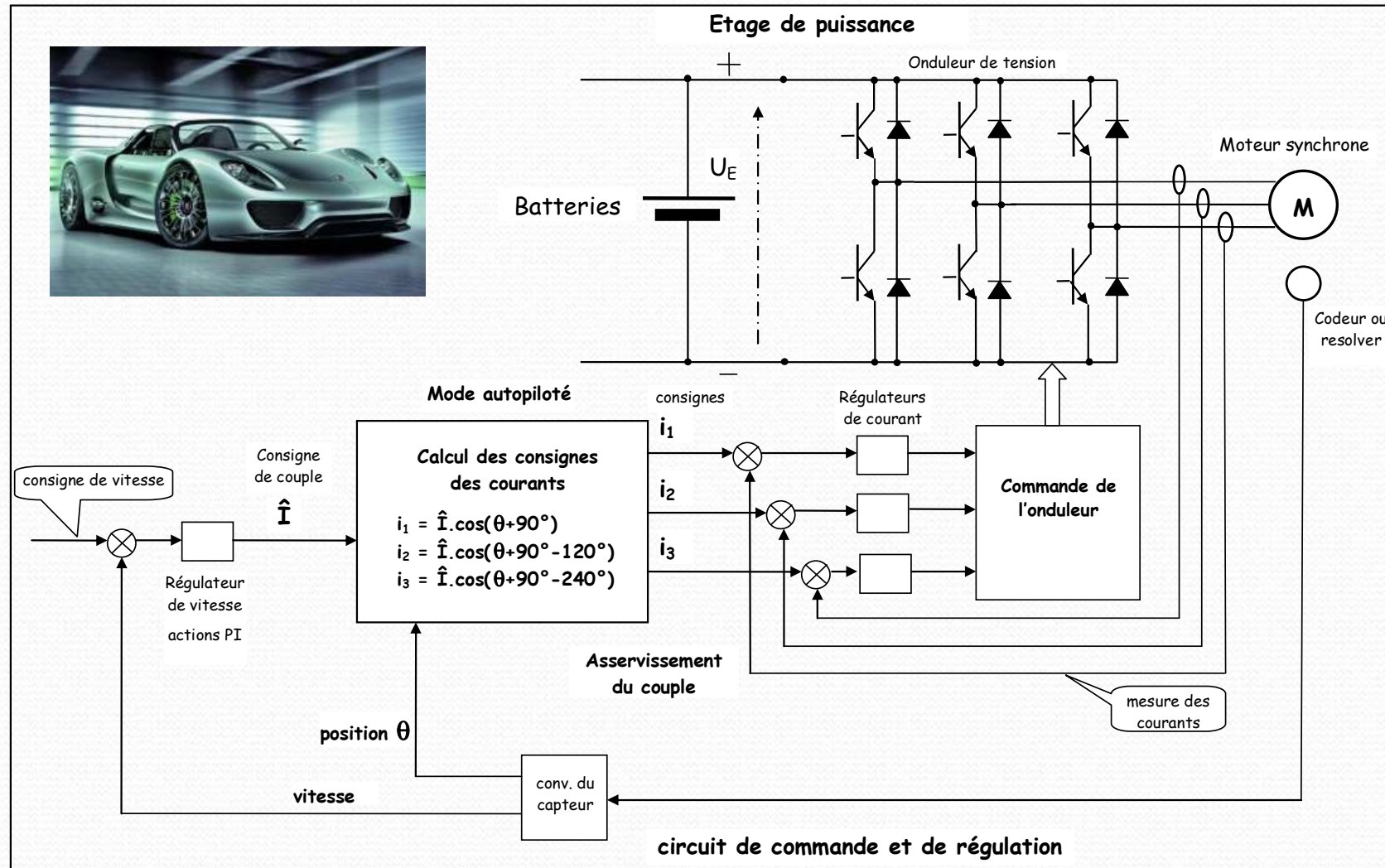
En petite puissance (voitures, scooters, etc.) :

Moteur synchrone triphasé à aimants (*brushless*) ou à rotor bobiné, avec onduleur de tension



La motorisation

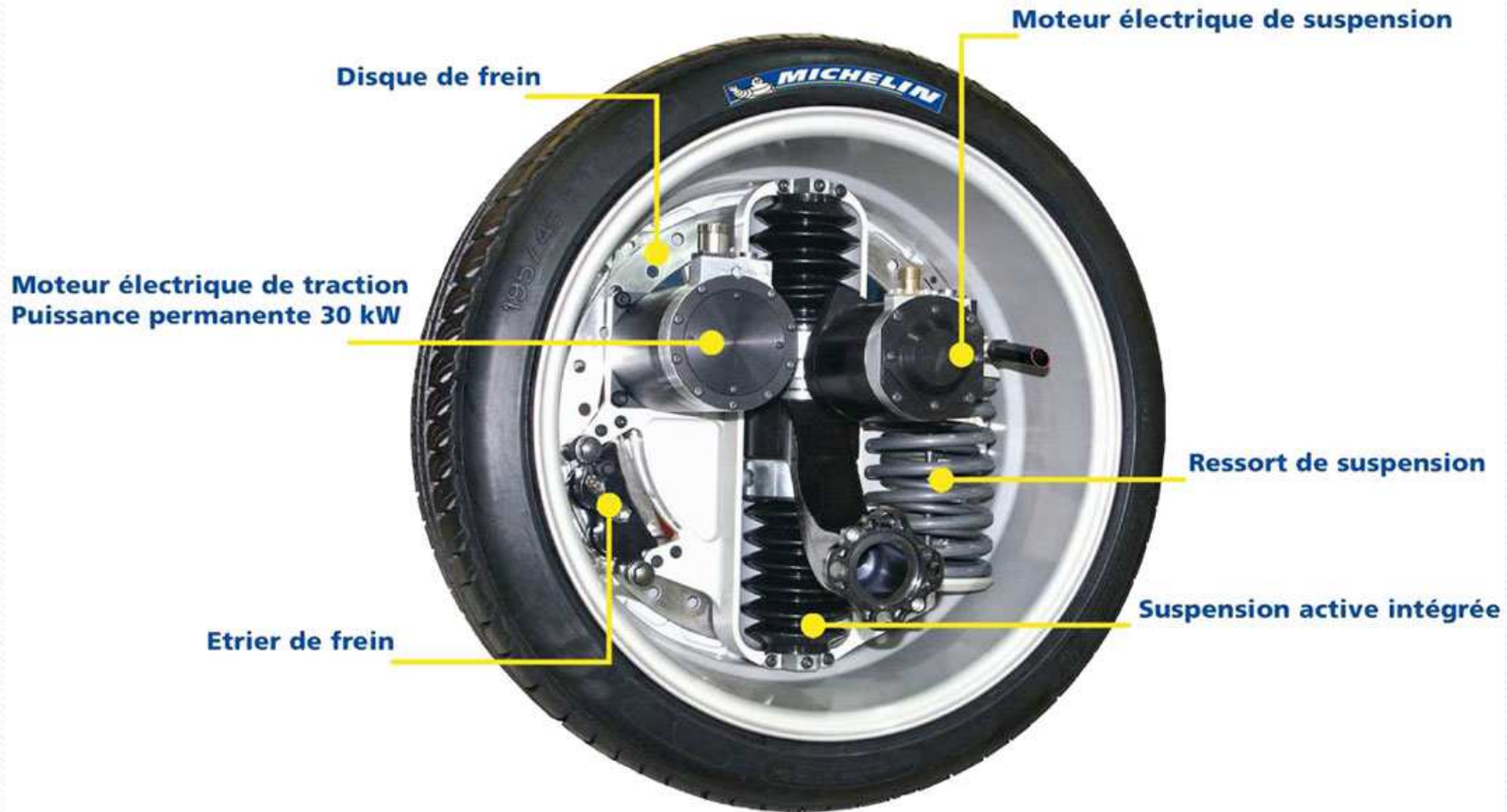
Moteur synchrone à aimants rotoriques (*brushless*)



La motorisation

Les Moteurs-roues

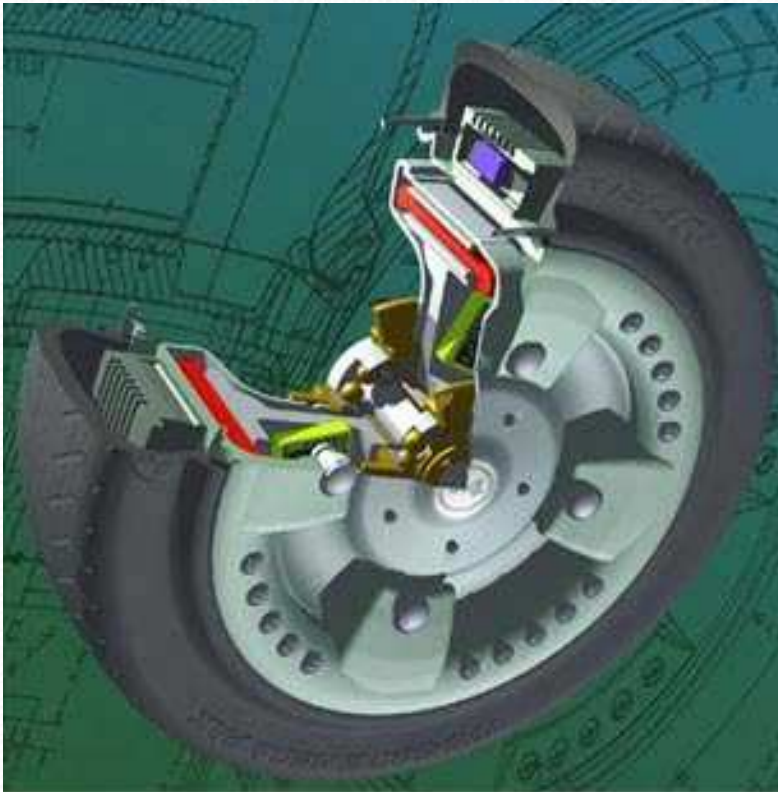
HEULIEZ WILL



Active Wheel (MICHELIN)

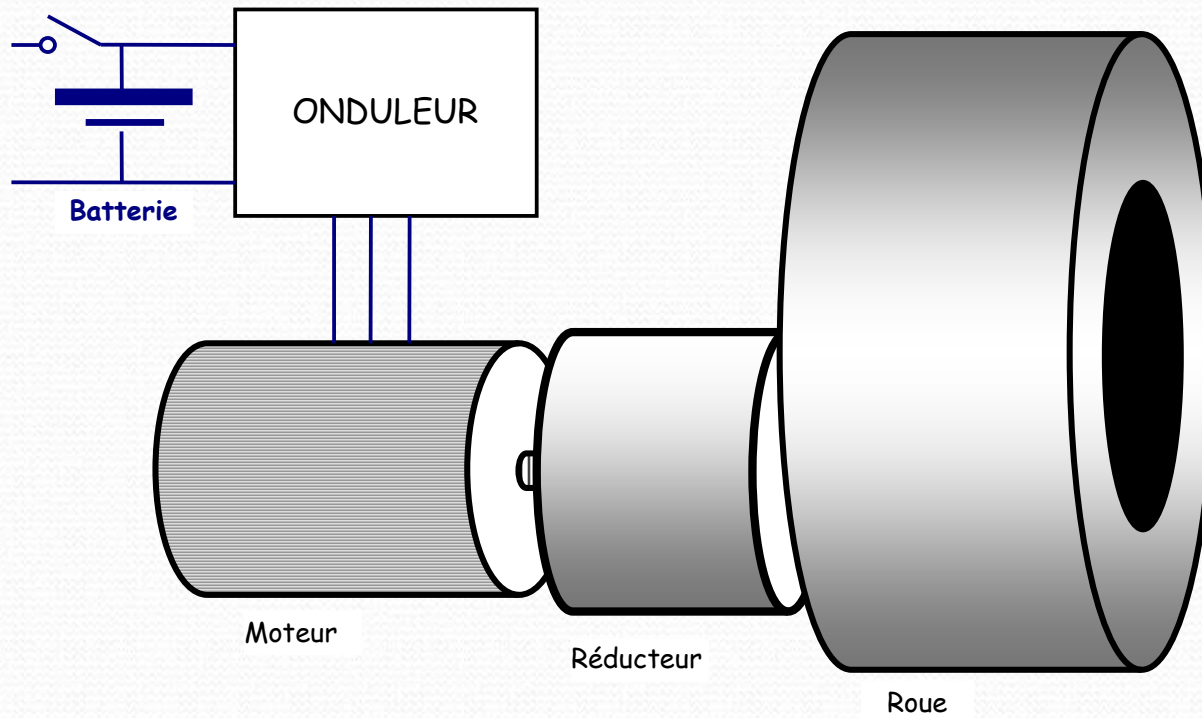
Le moteur roue TM4 – Hydro-Québec

Les Moteurs-roues



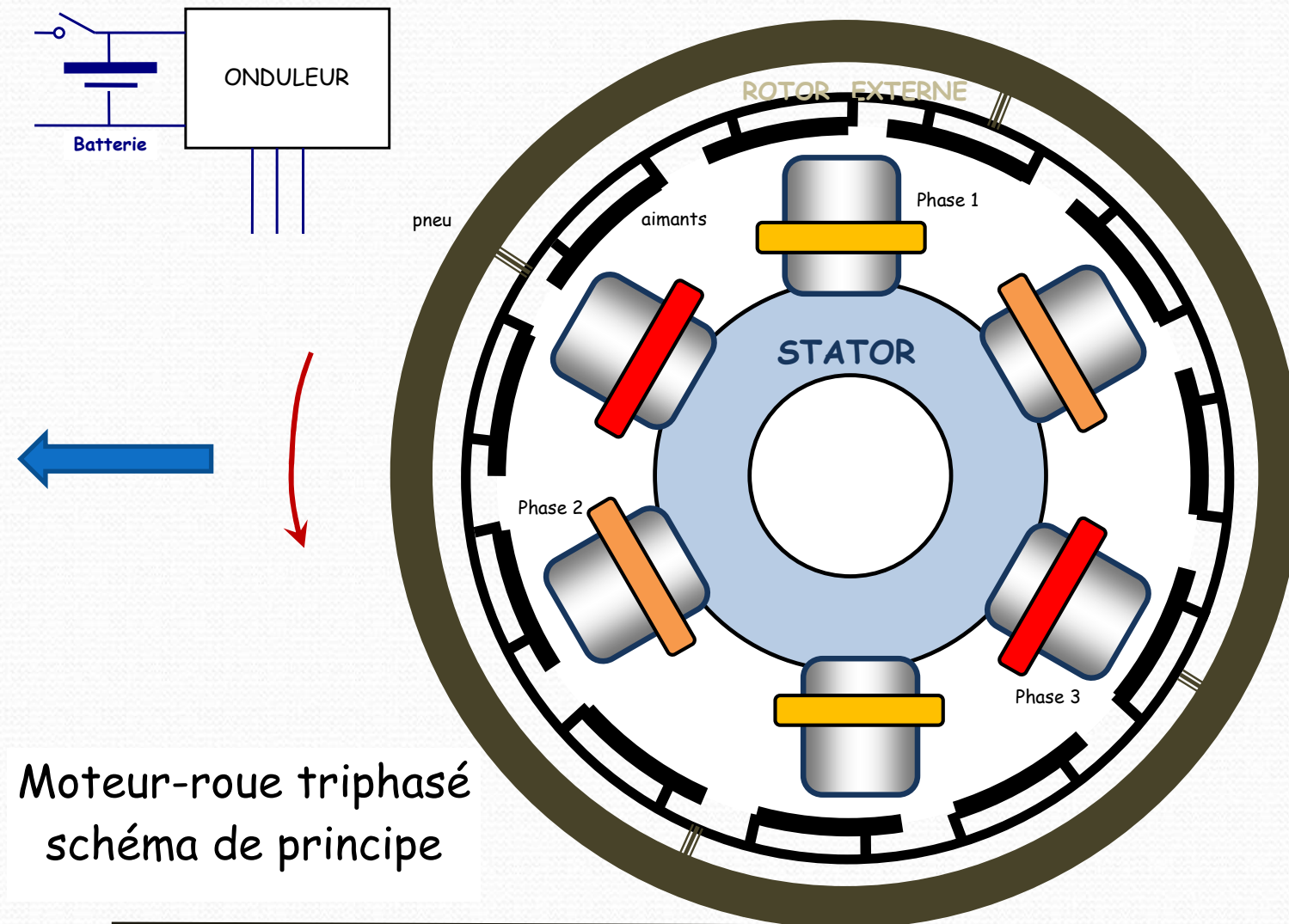
Puissance maximale 80kW
Puissance nominale à 950tr/min 18,5kW
Couple maximal 670Nm
Couple nominal à 950 tr/min 180 N.m
Rendement 96,3%
Vitesse maximale 1385 tr/min
Tension d'alimentation maximale 500 VCC

Le moteur roue

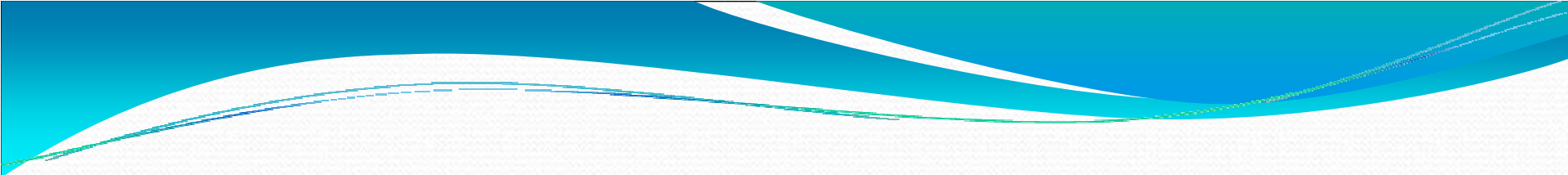


Moteur roue type *hub*

Le moteur roue intégré dans la jante



Moteur-roue triphasé
schéma de principe



Exemples de voitures électriques

La voiture électrique

Véhicules 2011 :



ZOE PREVIEW (RENAULT)

Autonomie d'environ **300km**

Vitesse maxi de 135km/h

Masse à vide : 1392kg

Prix : environ 23 700 €

Location de batteries : 79€/mois

Moteur synchrone de 60kW

Couple maxi : 222N.m

Batteries Li-Ion de 41kWh Masse : 305kg

12g CO₂/km (selon mix France)

La voiture électrique

Véhicules 2011 :

TWIZY Urban (RENAULT)

Autonomie d'environ **100km**

Vitesse maxi de 80km/h

Masse à vide : 420kg

Prix : 7440€

Location de batteries : 45€/mois



Moteur synchrone à aimants de 15kW

Couple maxi : 57N.m

Batteries Li-Ion de 6,2kWh

Masse : 100kg

7g CO₂/km (selon mix France)

La voiture électrique



Kangoo ZE (RENAULT)
Autonomie d'environ **270km**
Vitesse maxi de 130km/h
Masse à vide : 1410kg

Prix : 25 000€
Location de batteries : 72€/mois

Moteur synchrone de 44kW à 10 500tr/mn
Couple maxi : 226N.m Masse : 160kg
Batteries Li-Ion de 22kWh Masse : 305kg
12g CO₂/km (selon mix France)



Les voitures hybrides

La voiture électrique

Les véhicules hybrides :

Micro Hybride : système Stop&Start avec démarreur-alternateur et coupure automatique du moteur thermique à l'arrêt

Mild Hybrid : système Stop&Start + récupération d'énergie au freinage et assistance à l'accélération, avec batteries ou super-condensateurs

Full Hybrid : moteurs thermique et électrique

-hybride "parallèle" avec les moteurs raccordés au même arbre

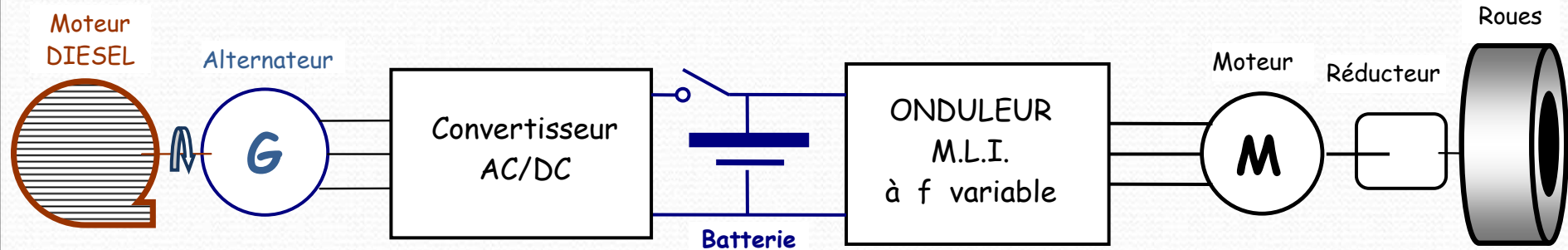
-hybride "série" : le moteur thermique entraîne un alternateur alimentant le moteur électrique de traction avec batteries ou super-condensateurs de stockage

-hybride "série-parallèle" avec train épicycloïdal (Toyota) permettant des vitesses de rotation différentes entre le moteur thermique et le moteur électrique.

Les véhicules hybrides



Véhicule hybride « série »



Modes de fonctionnement :

à vitesse élevée, moteur thermique + moteur électrique

à vitesse lente, moteur électrique seul

au freinage, la machine électrique recharge la batterie

À l'arrêt, possibilité de recharge de la batterie sur borne fixe

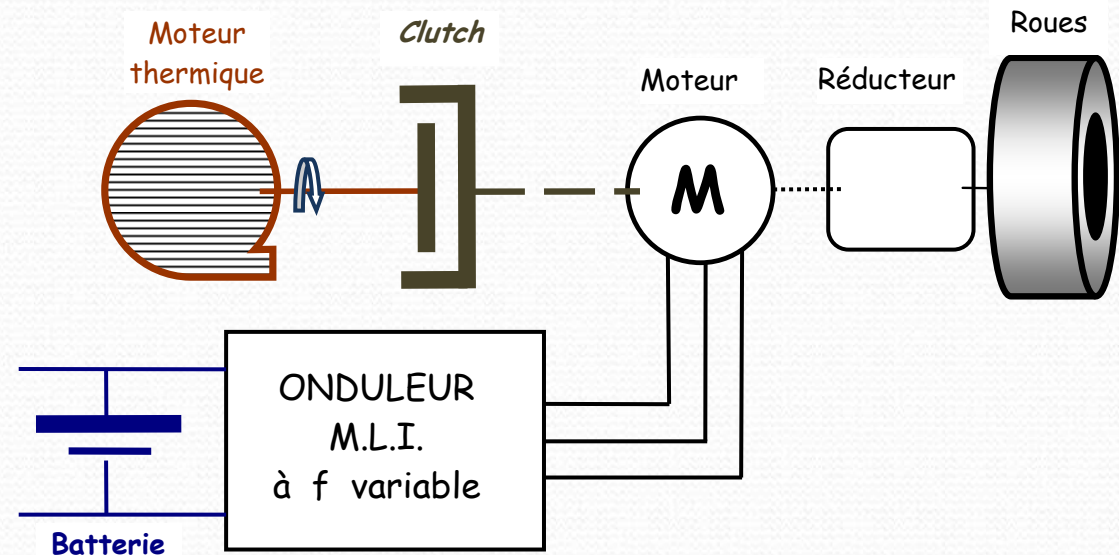
Applications : navires, trains, bus, voitures

Les véhicules hybrides



HONDA Jazz hybrid

Véhicule hybride « parallèle »



Modes de fonctionnement :

à vitesse élevée, moteur thermique seul

à vitesse lente, moteur électrique seul

au freinage, recharge de la batterie

En accélération, moteur thermique + moteur électrique

À l'arrêt, possibilité de recharge de la batterie sur borne fixe

Les véhicules hybrides

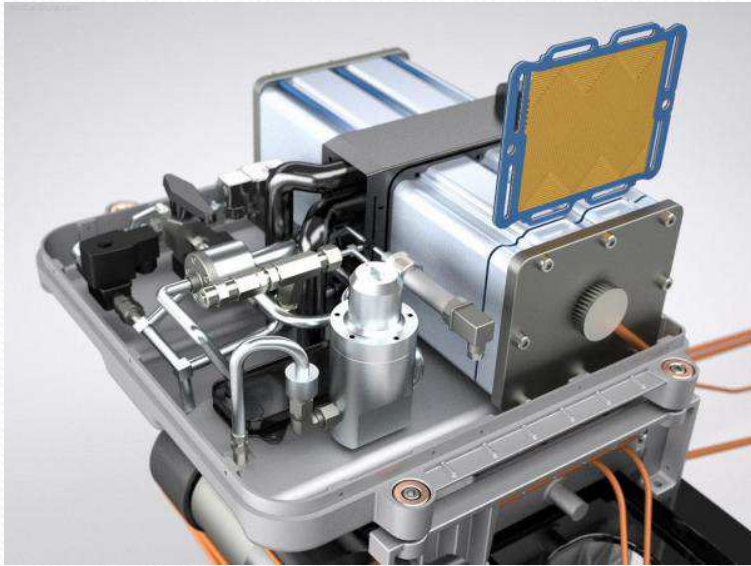


TOYOTA Prius
Puissance totale 100kW
3,8l/100km
89g CO₂/km



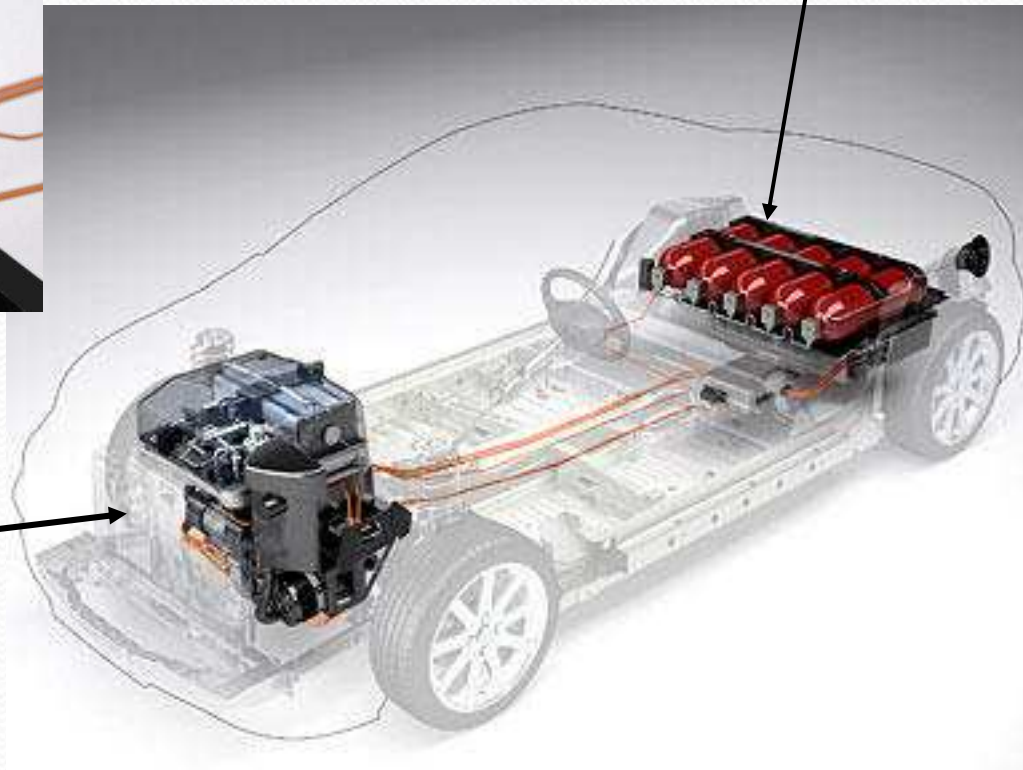
HONDA Civic 2012
Puissance totale 80kW (20kW élec)
3,8l/100km
80g CO₂/km

La PAC et son application à l'automobile



PAC

Bouteilles de H2



doc PSA

La Pile à Combustible

Principe de fonctionnement d'une PAC

P.A.C.

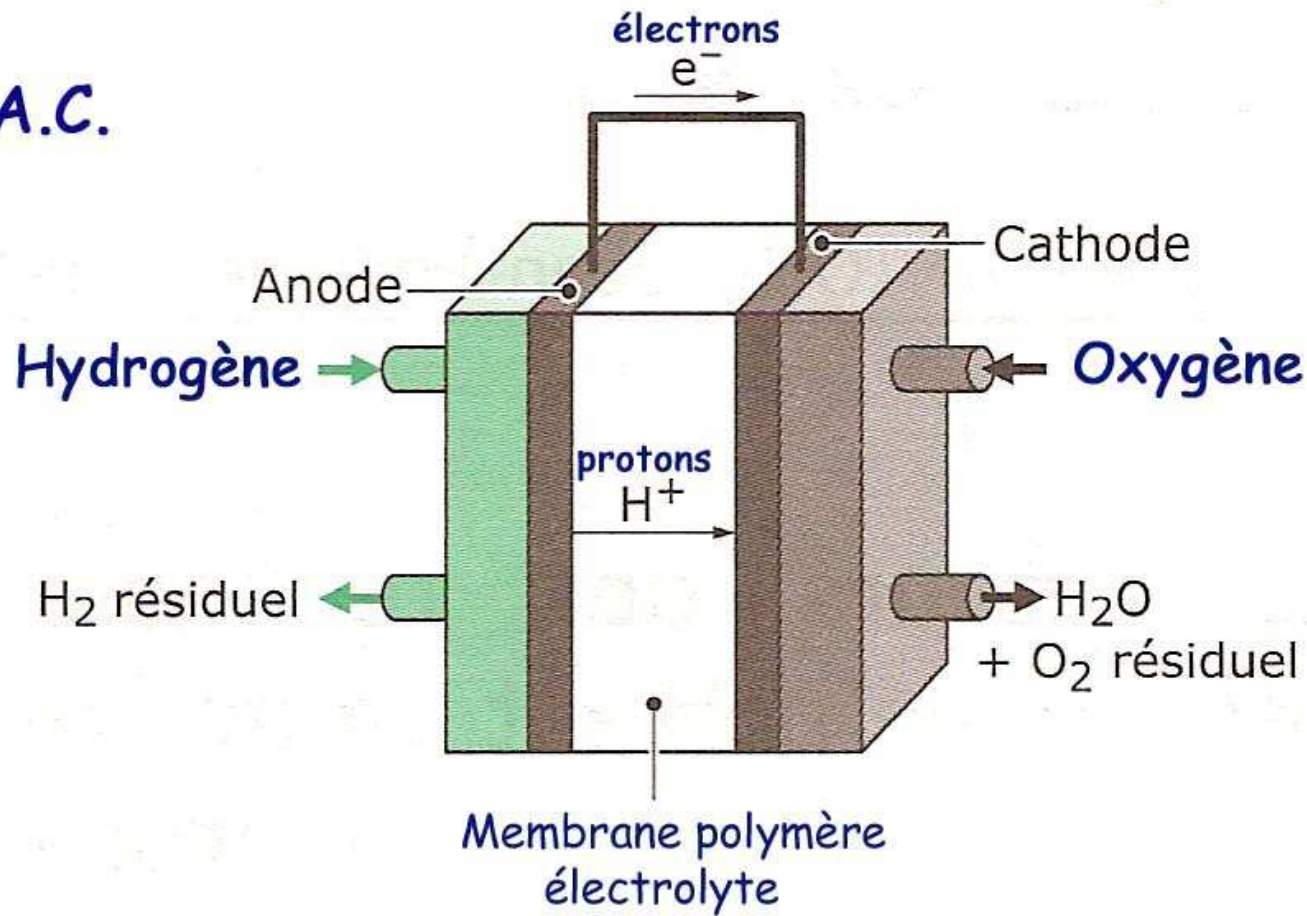
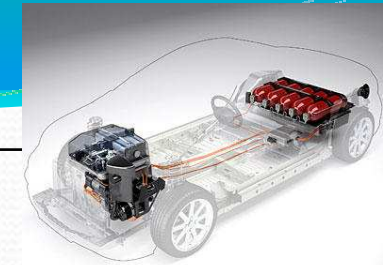


Schéma de principe d'une Pile à Combustible de type PEMFC

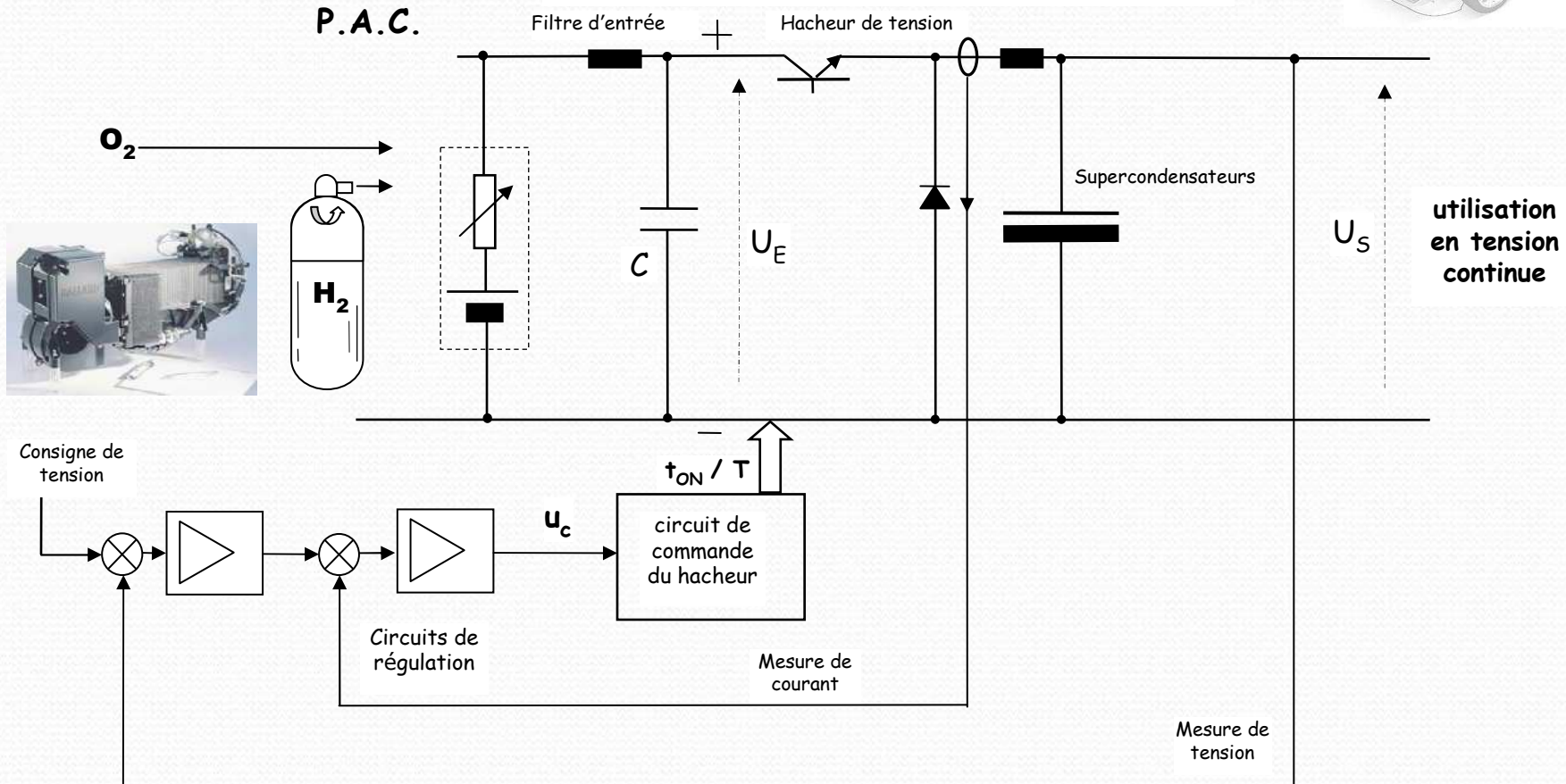
Proton exchange membrane fuel cell

Voir la présentation PowerPoint sur la PAC sur espace.ecam



Etage de puissance avec supercondensateurs

P.A.C.



circuit de commande en M.L.I.

Pile à combustible
sur installation autonome
Schéma de principe

Rendement d'une PAC a hydrogène

- **Efficacité énergétique : 40 à 60%**
- Rapport de l'énergie électrique maximale obtenue par kilo de gaz au Pouvoir Calorifique massique de l'hydrogène, soit **PC = 119.930kJ/kg**
- **ou 34kWh/kg**
- Puissance absorbée équivalente :
- **P (W) = PC (J/kg) x débit (m³/s) x 0,0899 (kg/m³)**
- **= P électrique + chaleur perdue**

Les problèmes à résoudre (2030 ?...)

**Les problèmes à résoudre
pour l'application aux véhicules automobiles :**

- 1. Production d'hydrogène**
- 2. Stockage de l'hydrogène**
- 3. Réseau de distribution**
- 4. Sécurité**
- 5. Coût**



PAC Michelin

Quelques prototypes

Peugeot Partner H2Origin

PAC de 5,5kW + Batterie Li-Ion

Stockage de H₂ dans 9 bouteilles à 700 bars

ou production de H₂ à partir d'un réservoir d'une solution aqueuse de **Borohydrure de Sodium**

→ **H₂** + résidus de borate de sodium recyclé



Les prototypes actuels



Peugeot 307CC

Moteur électrique 70kW

Concept-car PSA FiSyPAC

5 bouteilles de 15l à 700 bars = 4kg de H₂
consommation : 10g H₂/km

Batterie Li-Ion de 13kWh

Autonomie : 500km



source d'énergie renouvelable ?

