



L'énergie en transport

Pétrole • Combustion • GES • Électricité...

CIV6707A

Par Pierre-Léo Bourbonnais

*Certains contenus sont présentés avec la permission et la participation de **Bruno Detuncq**, professeur au département de génie mécanique*

L'énergie

À quoi sert l'énergie ?

Produire du travail (W)

- ▶ Transport | Énergie mécanique ...

Produire de l'énergie thermique (Q)

- ▶ Chauffage | Procédés industriels ...

Cybernétique

- ▶ Communication | Contrôle | Calculs | Électronique...

Énergie primaire

Fossiles

- ▶ Combustibles solides (charbon, bois...)
- ▶ Combustibles liquides (pétrole...)
- ▶ Combustibles gazeux (gaz naturel...)
- ▶ Combustibles nucléaires (fission)

Renouvelables

- ▶ Énergie hydraulique
- ▶ Énergie solaire
- ▶ Énergie éolienne
- ▶ Énergie nucléaire (fusion)

Énergie secondaire

Énergie électrique

Hydrogène (sur la terre)

- ▶ ce sont des transporteurs d'énergie, ils doivent être fabriqués, moyennant une perte inévitable (rendement < 100%)

Problématique

Comparaison difficile entre les sources d'énergie et leur rendement

Base étalon la plus utilisée dans le commerce de l'énergie : **la tonne de pétrole équivalente (TOE)**

Équivalences calorifiques importantes :

- ▶ Un million de tonnes de pétrole égale approximativement :
 - ▶ chaleur : 40×10^{12} BTU ou 10 000 téracalories
 - ▶ comb. solides : $1,5 \times 10^6$ tonnes de charbon
 - ▶ comb. gazeux : $1,111 \times 10^9$ m³ de GN
 - ▶ électricité : 12×10^9 kWh (un million de tonne de pétrole produit environ 4×10^9 kWh dans une centrale thermique moderne)

Les combustibles fossiles



- 1. Quand a débuté la formation du charbon/pétrole?**
- 2. Quelle est la consommation mondiale par jour?**
- 3. Quelle est la production mondiale par jour?**
- 4. Pour combien de temps en avons-nous?**

Le charbon et le pétrole

Formation du charbon

Dégradation des forêts du passé

- Période carbonifère (280 millions d'années)
 - Durée : \approx 50 millions d'années
- Période crétacé (135 millions d'années)
 - Durée : \approx 65 millions d'années

Formation du pétrole et du gaz naturel

Décomposition de phytoplanctons (végétaux) et zooplanctons (animaux) par sédimentation

Dépôts successifs durant des millions d'années :

- Roche mère > Roche magasin



Réserves (combustibles fossiles)

Réserves prouvées: qui peuvent être produites avec les techniques actuelles, au prix actuel et selon l'état du monde politique et économique actuel (90% de chance d'être produites).

Réserves probables: qui ont des chances d'être produites avec les techniques actuelles, au prix actuel et selon l'état du monde politique et économique actuel (50% de chance d'être produites).

Réserves possibles: qui peuvent être développées si conditions favorables (10% de chance d'être produites)

Charbon (2009): **826 000 millions de tonnes** (environ **119 ans** aux rythmes de production et de consommation de 2009)

Pétrole (2011): **1383 milliards de barils** (**1526** en incluant les sables bitumineux du Canada) (environ **46 ans** aux rythmes de production et de consommation de 2011). On estime entre 5500 et 7000 milliards de barils la quantité totale sur la planète.

Gaz naturel (2009): **187 trillions de m³** (environ **63 ans** aux rythmes de production et de consommation de 2009)

Calcul des rejets de CO₂

Exemple avec essence régulière | **Indice octane 87**

6,5% **Heptane** C₇H₁₆ — 0,688 kg/L

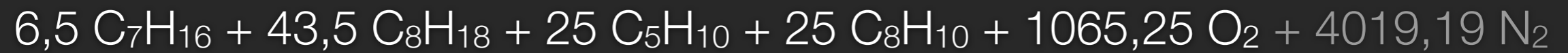
43,5% **Iso-octane** C₈H₁₈ — 0,696 kg/L

25% **Cyclo-pentane** C₅H₁₀ — 0,751 kg/L

25% **Éthyl-benzène** C₈H₁₀ — 0,867 kg/L

Densité moyenne pondérée: 0,752 kg/L





718,5 moles de C + 1387 moles de H = 10 kg d'essence = 13,26 L

718,5 moles de CO₂ = 31,6 kg de CO₂  **2,36 kg CO₂ / L** d'essence

Équation de combustion

Moteur à combustion interne | Essence régulière Octane 87

Essence

2,4 kg CO₂ / L

Diesel

2,6 kg CO₂ / L

~ **8%** de plus

CO₂ rejeté par litre

Source: http://www.carte-grise.org/explication_calcul_bilan_co2.htm

Essence

Jetta 2011

9,1 L / 100 km en ville

6,0 L / 100 km sur route

Diesel

Jetta TDI 2011

6,7 L / 100 km en ville

4,6 L / 100 km sur route

~ **25%** de moins

Consommation d'essence

Source: http://www.carte-grise.org/explication_calcul_bilan_co2.htm

Émissions de GES



- 1. Par kilomètre parcouru et pour un même type de véhicule, lequel dégage le moins de CO₂ ?**
- 2. Combien de % moins ?**

Diesel

~ **20%**

de moins de CO₂ / km en ville

~ **17%**

de moins de CO₂ / km sur route

Rejets de CO₂ par km

Source: http://www.carte-grise.org/explication_calcul_bilan_co2.htm

Comparaison voitures/bus/métro

Données de départ

Voiture

- ▶ Taux moyen d'occupation des voitures: **moins de 1,25 passagers par véhicule**
- ▶ Consommation d'essence moyen des véhicules: **9 L/100 km** au Québec en 2007 (Réel: plutôt 10 L/100 et +)
- ▶ Masse d'un véhicule standard: **1300 kg** / Masse d'un autobus NovaBus LFS: **12 000 kg**
- ▶ Essence: **2,4 kg CO² / L** (La grande majorité des voitures québécoises sont à essence pour l'instant)
- ▶ Diesel: **2,6 kg CO² / L** (**25% plus de km parcourus** avec la même quantité de litres)
- ▶ Autobus Diesel: **entre 50 et 80 L/100 km** (très variable et peu de données disponibles...) Prenons **65 L/100 km**
- ▶ Métro: **5,5 millions de km / an** et consommation électrique de **290 GWh / an**, masse d'un wagon: **26 080 kg**
- ▶ Voiture électrique (Nissan Leaf): autonomie de **112 km** en moyenne après tests, batterie de **24 kWh**, masse: **1521 kg**
- ▶ Équivalent CO₂ Hydro-Québec (hydroélectricité): **7,2 g de CO₂ / kWh**
- ▶ Équivalent baril de pétrole: 1 baril = 1700 kWh environ, mais prendre plutôt ces valeurs:
 - ▶ Essence: **32 MJ/L**
 - ▶ Diesel: **36,4 MJ/L** (1 kWh = 3,6 MJ)

Émissions de GES

Voiture Essence | Voiture Diesel | Bus Diesel | Nissan Leaf | Métro de Montréal



Énergie par km parcouru (kWh/km) ?

Énergie par unité de masse-km (kWh/kg-km) ?

Émissions de GES par passager-km ?

Véhicules hybrides

Caractéristiques principales

- ▶ Combine un moteur à essence et un moteur électrique
- ▶ La plupart utilisent la régénération au freinage
- ▶ Certains utilisent la technologie démarrage/arrêt (start-stop) pour éteindre le moteur à essence lorsque la voiture est à l'arrêt
- ▶ Le moteur à essence est plus petit que sur un véhicule conventionnel

Types de véhicules hybrides

Propulsion

- ▶ Parallèle (Honda Insight)
- ▶ En série (Chevrolet Volt)
- ▶ Série-parallèle (Toyota Prius)
- ▶ PHEV (Hybride branchable / Plug-In Hybrid)

Niveau d'hybridation

- ▶ Complet
- ▶ Léger
- ▶ Micro

Véhicules hybrides

Hybride parallèle

Caractéristiques

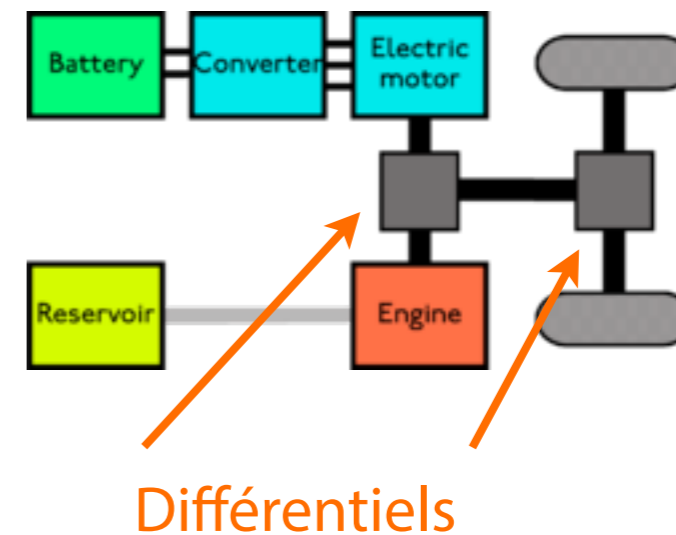
- ▶ Le **moteur à essence** et le **moteur électrique** (5 à 25 kW) connectés à la **même transmission mécanique**
- ▶ Ils peuvent tous les deux transmettre de la **puissance en même temps**
- ▶ Le moteur électrique, combiné à un générateur (même unité), remplace l'alternateur et le moteur de démarrage (petit moteur électrique dans les véhicules conventionnels)
- ▶ 2 sous-catégories
 - ▶ Moteur électrique dominant
 - ▶ Moteur à essence dominant

Avantages

- ▶ Utilisation de la **régénération au freinage**
- ▶ Meilleure efficacité de la direction assistée et de l'air climatisée
- ▶ Peut utiliser une **plus petite batterie**
- ▶ Plus **efficace en autoroute**

Exemples

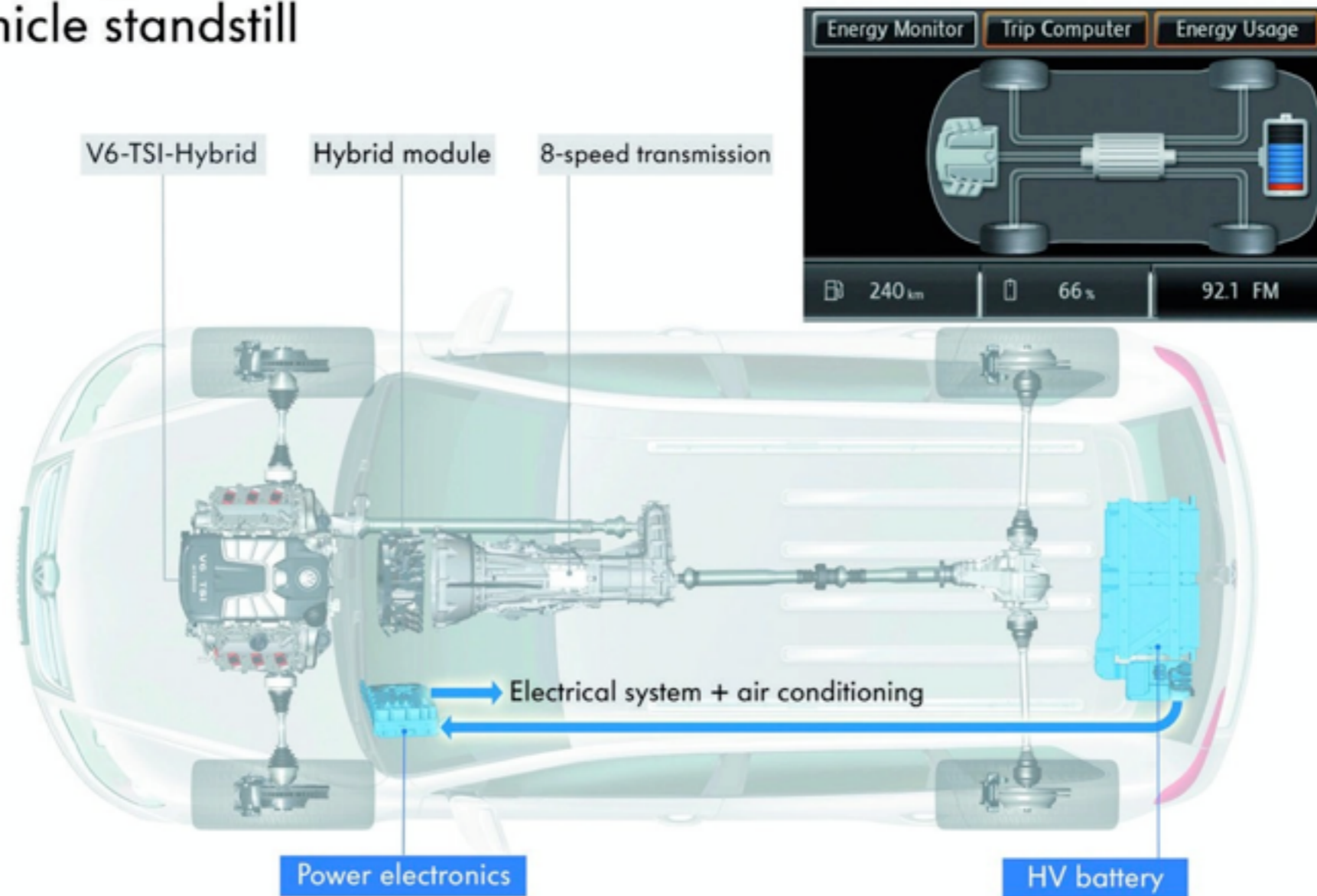
- ▶ Honda: Integrated Motor Assist (IMA)
- ▶ GM: BAS Hybrid (Chevrolet Malibu)



Véhicules hybrides

Hybride parallèle

Driving States: Vehicle standstill



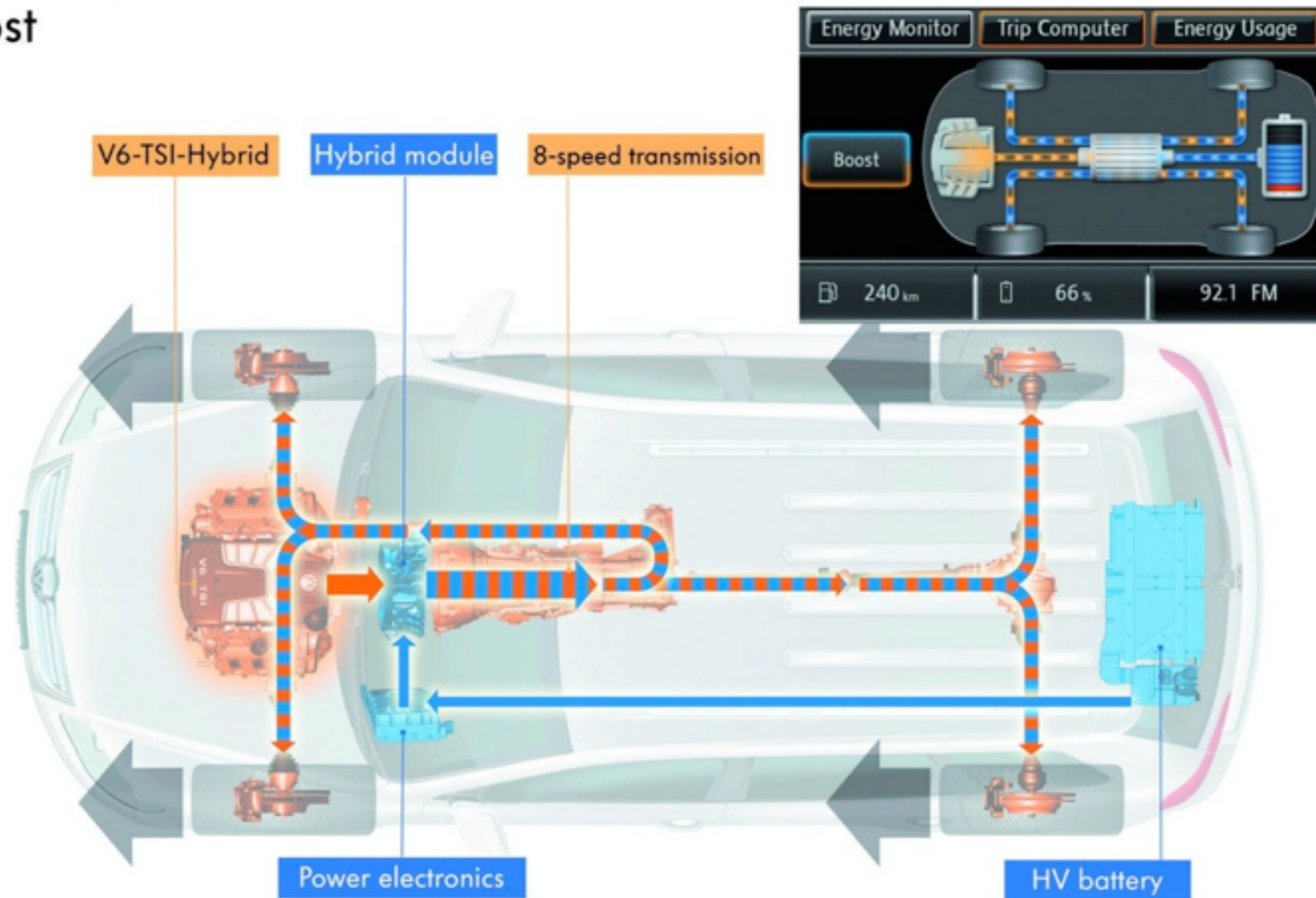
Source: Volkswagen (Touareg V6 TSI Hybrid)

Véhicules hybrides

Hybride parallèle

Driving States:

Boost

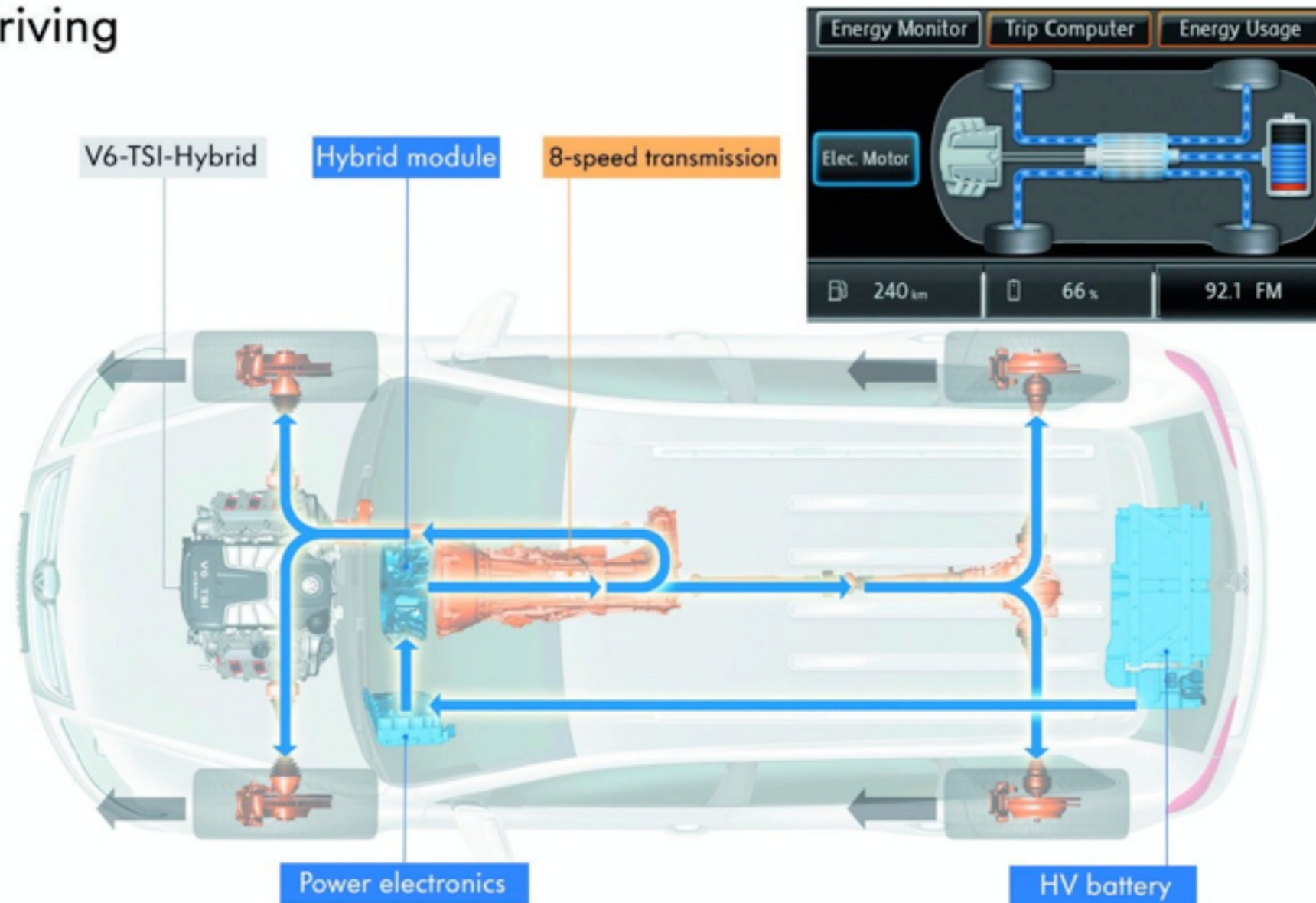


Source: Volkswagen (Touareg V6 TSI Hybrid)

Véhicules hybrides

Hybride parallèle

Driving States: E-driving

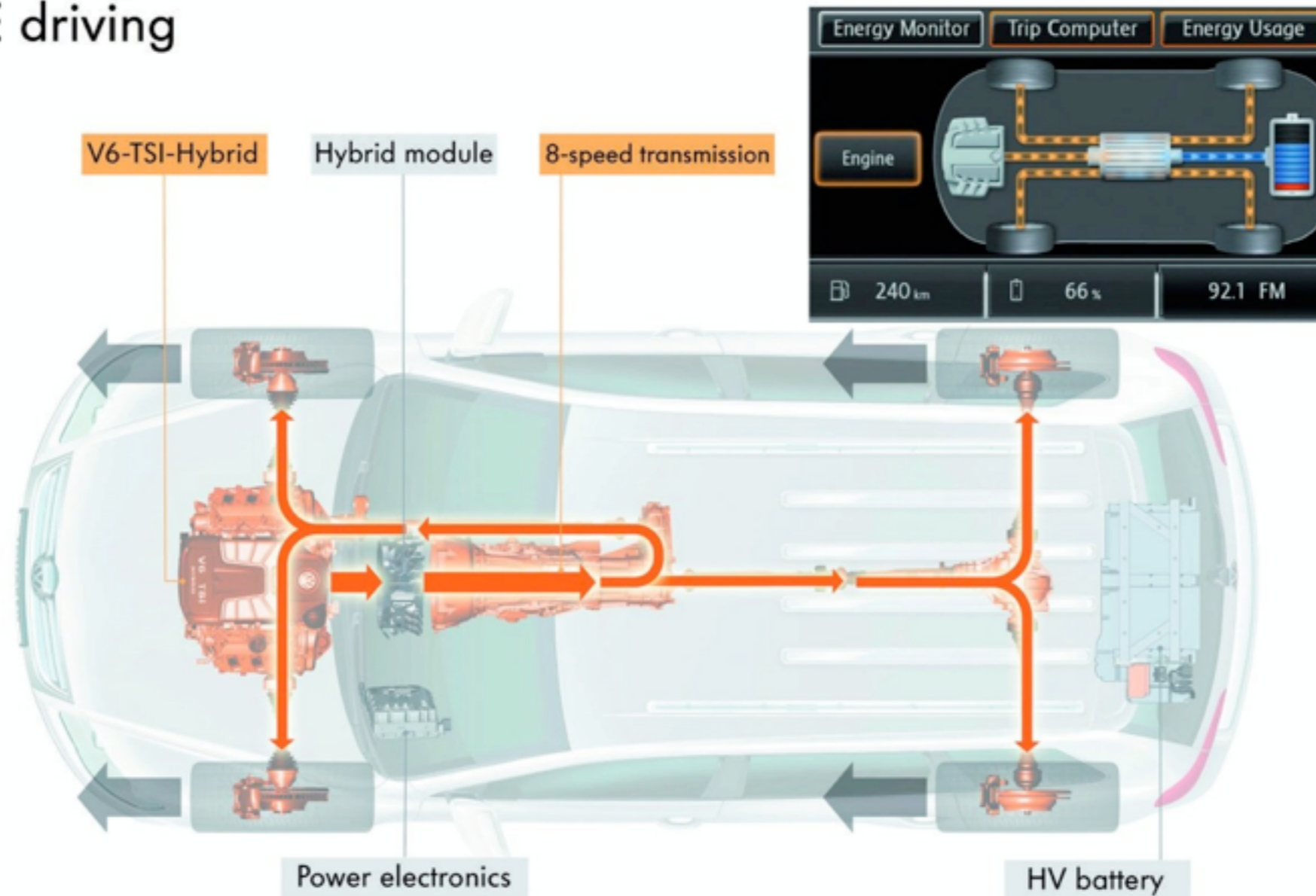


Source: Volkswagen (Touareg V6 TSI Hybrid)

Véhicules hybrides

Hybride parallèle

Driving States: ICE driving

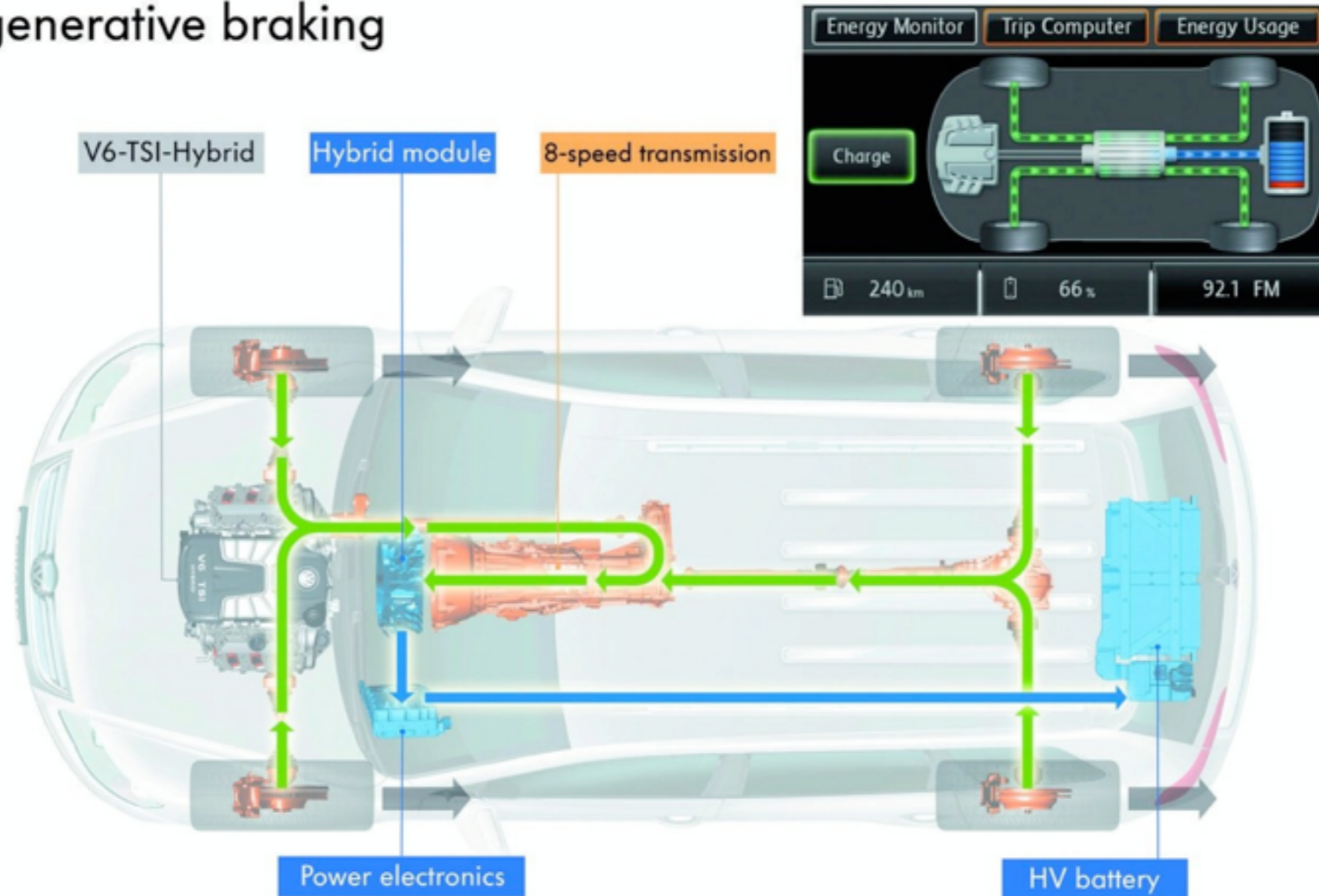


Source: Volkswagen (Touareg V6 TSI Hybrid)

Véhicules hybrides

Hybride parallèle

Driving States: Regenerative braking



Source: Volkswagen (Touareg V6 TSI Hybrid)

Véhicules hybrides

Hybride en série

Caractéristiques

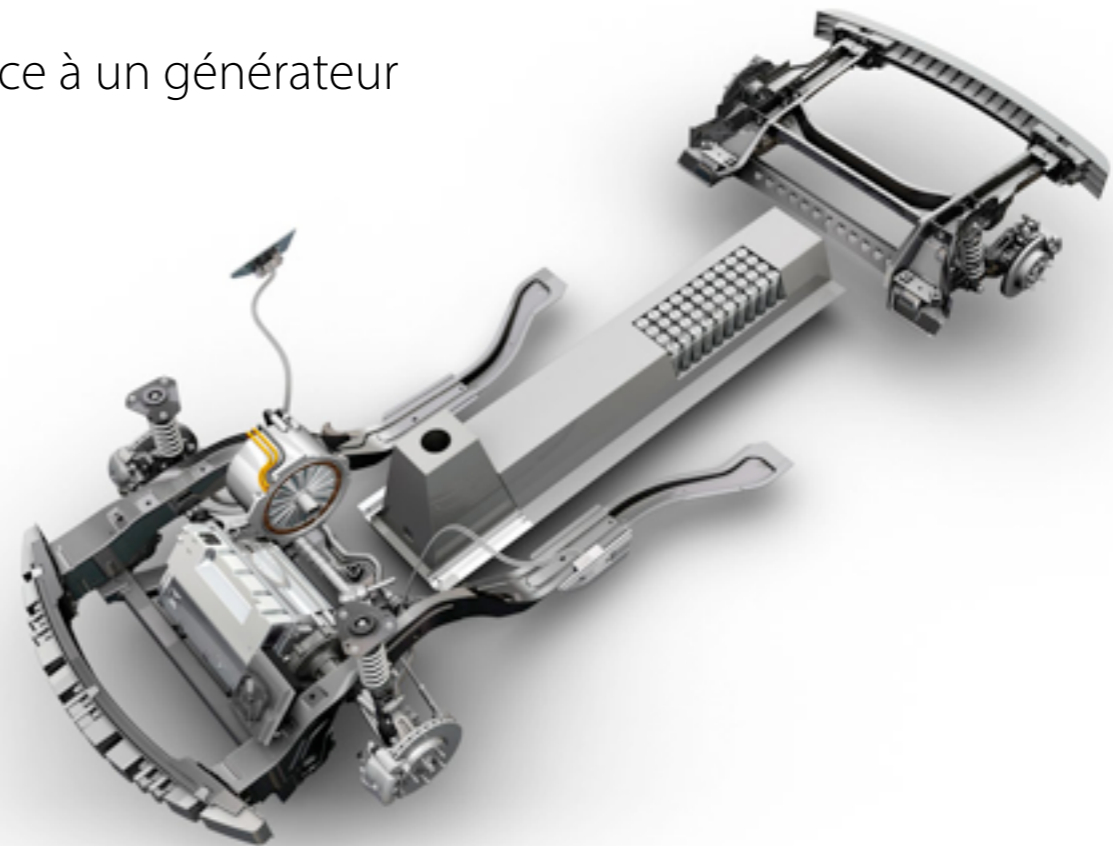
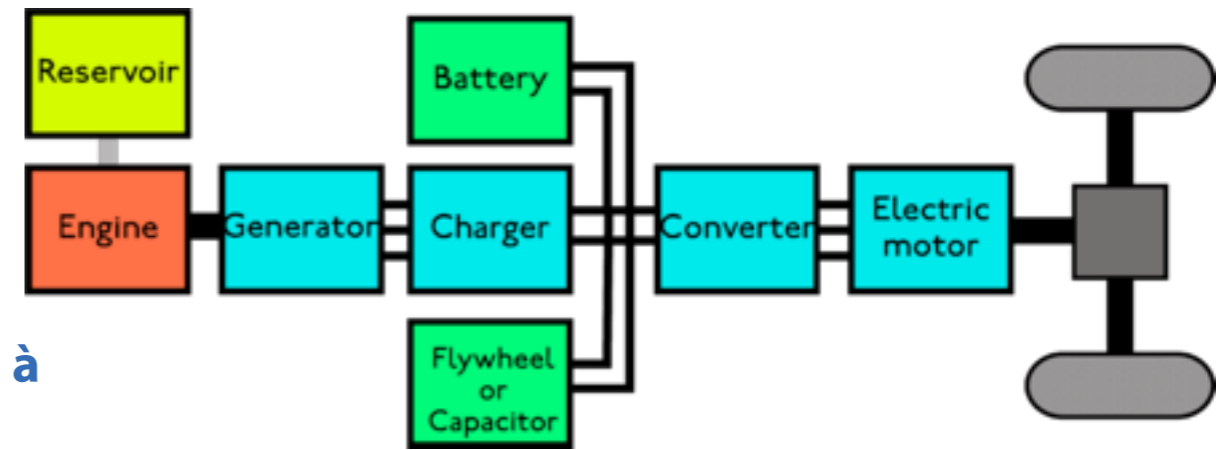
- ▶ **Considérés davantage comme des véhicules électriques à autonomie améliorée**
- ▶ Seul le **moteur électrique sert à la propulsion**
- ▶ Le **moteur à essence sert à recharger la batterie** grâce à un générateur
- ▶ **Aucune transmission** (pas de vitesses)
- ▶ Concept vient des locomotives Diesel

Avantages

- ▶ **Efficacité du moteur électrique plus élevée**
- ▶ **Couple excellent sur toute les plages** de vitesses
- ▶ **Mécanique plus simple** (+ efficace, + léger)
- ▶ **Accélération et roulement plus doux** (pas de changements de vitesses)
- ▶ **Freinage régénératif**
- ▶ **Peut être branché** pour recharger la batterie
- ▶ Comme le **moteur à essence** n'est pas connecté à l'axe moteur, il peut tourner à son **régime optimal**

Exemples

- ▶ Chevrolet Volt



Véhicules hybrides

Hybride Série-parallèle

Caractéristiques

- ▶ Techniquement, ce sont des hybrides parallèles
- ▶ **Incorporent un dispositif qui permet le partage de la puissance** vers les roues de façon mécanique ou électrique
- ▶ **À faibles vitesses: électrique + de couple**
- ▶ **À hautes vitesses: essence efficace** et permet de réduire l'utilisation de la batterie
- ▶ Utilisent un **cycle de combustion modifié** pour augmenter l'efficacité globale
- ▶ Toyota Prius: 2 embrayages (un pour les couples élevés, un autre pour les hautes vitesses)

Avantages

- ▶ **Mêmes que parallèle** mais:
- ▶ **Mécanique plus simple**

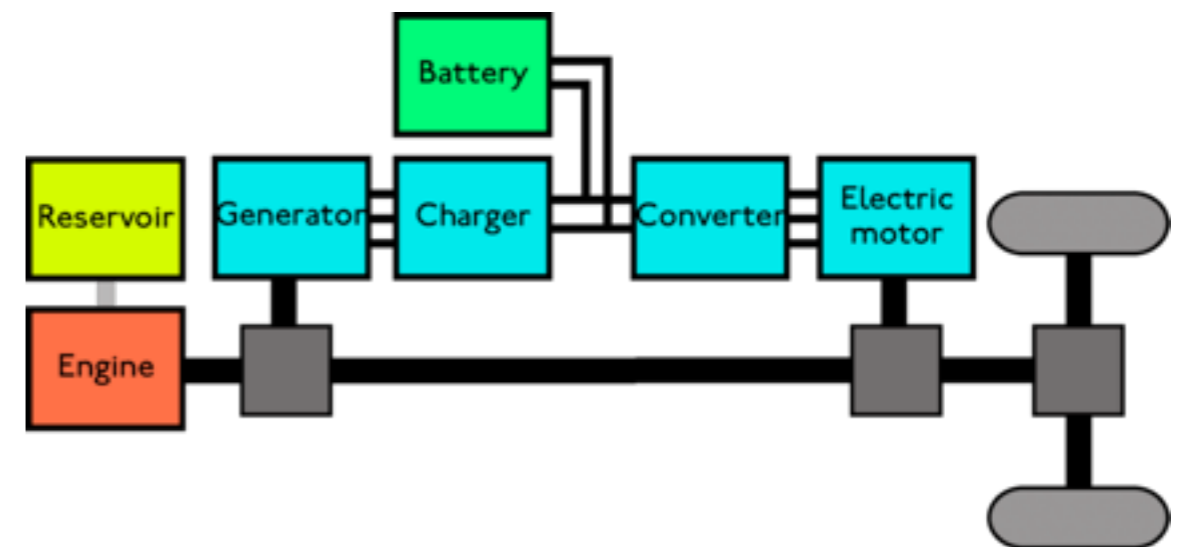
Inconvénients

- ▶ **Vitesses limitées par la vitesse maximale du moteur électrique**

- ▶ **Efficacité de la transmission plus faible à grande vitesse**

Exemples

- ▶ Toyota Prius (Hybrid Synergy Drive)
- ▶ Hybride à deux modes (Utilitaires sport GM, BMW X6 ActiveHybrid et Mercedes ML 450 Hybrid)
 - ▶ ajout de 2 engrenages planétaires et 4 embrayages au total permettant d'opérer en tout-électrique, électrique et essence ou tout essence



Véhicules hybrides

Hybride branchable (PHEV *Plug-In Hybrid-electric vehicle*)

- ▶ **Avantages des véhicules hybrides et des véhicules électriques**
- ▶ **Coût de l'électricité moins élevé que l'essence**
- ▶ **Idéal pour les courtes distances** en ville (navettage)
- ▶ Habituellement: conversion d'un modèle hybride conventionnel
- ▶ La **batterie a souvent une plus grande autonomie** (plus grosse)
- ▶ Modèles désignés en fonction de l'autonomie en mode tout-électrique
 - ▶ PHEV-20 = 20 miles en électrique
 - ▶ PHEV32km = 32 km en électrique

.

Véhicules hybrides

Niveaux d'hybridation

Complet

- Peut fonctionner avec le moteur à essence seulement, la batterie seulement ou les deux
- Possèdent des batteries de plus grande taille
- Exemples: Prius, Ford Escape Hybrid, GM: hybrides à deux modes

Léger

- Ne peut pas fonctionner en mode tout-électrique (moteur électrique peu puissant)
- Économie d'essence plus faible que les hybrides de type complet
- Souvent simplement un véhicule conventionnel avec un moteur de démarrage surdimensionné permettant d'éteindre le moteur à l'arrêt, au freinage ou lors des ralentissements
- Le petit moteur électrique peut aider lors des accélérations
- Freinage régénératif possible
- Exemples: Première génération d'hybrides Honda, Chevrolet Silverado hybride 2005-2007

Micro (arrêt-démarrage / start-stop)

- Le véhicule éteint le moteur à essence à l'arrêt (congestion et feux de circulation)

Véhicules électriques à batterie

Voitures électriques

Caractéristiques

- ▶ Moteur(s) électrique(s) alimenté(s) par une ou des batterie(s)
- ▶ Déjà utilisées avant le moteur à essence (fin XIX^e, début XX^e)
- ▶ Certaines ont un seul moteur, d'autres des moteurs-roue

Avantages

- ▶ **Aucune émission locale**
- ▶ **Excellent pour la conduite urbaine**, le navettage et les courtes distances
- ▶ **Silencieux**
- ▶ **Seulement 5 pièces mobiles comparé à plus de 100 pour un modèle à essence** (maintenance réduite et simplifiée)
- ▶ **Coût au kilomètre très réduit**
- ▶ **Conduite plus douce**
- ▶ **Peut permettre à long terme d'équilibrer les réseaux électriques**

▶ Freinage régénératif

- ▶ **Les modèles actuels pourraient répondre aux besoins de 95% des conducteurs américains** (distances relativement courtes)

Inconvénients

- ▶ Pour l'instant: **coût d'achat élevé** (les batteries coûtent très cher encore)
- ▶ Dans les pays où l'électricité vient de la combustion de combustibles fossiles, **les gains environnementaux sont limités à l'efficacité du système global** (non négligeable par contre)
 - ▶ Exemple aux É.-U. : ~ 115 g de CO₂ / km par rapport à 250 g de CO₂ / km pour une voiture conventionnelle
- ▶ **Anxiété de l'autonomie** (pour l'instant)
- ▶ Ne règle pas vraiment la **problématique de l'espace perdu pour le stationnement et les routes**
- ▶ Les batteries sont **moins efficaces par temps froid**

Véhicules électriques à batterie

Bus électriques (autonomes)

Caractéristiques

- ▶ Certains utilisent des panneaux solaires pour la climatisation et certains dispositifs électriques
- ▶ On en profite pour utiliser des **matériaux de fabrication légers** (polymères...) pour améliorer l'autonomie de la batterie

Capabus

- ▶ Utilise des **ultra-condensateurs**
 - ▶ 40% moins cher et plus fiables, mais densité énergétique d'environ 6Wh/kg comparé à 200 Wh/kg pour les batteries Lithium-Ion à haute performance
- ▶ Se **recharge rapidement** aux stations
- ▶ Moins flexible

Avantages

- ▶ Les mêmes que la voiture électrique
- ▶ **Plus facile à rentabiliser sur l'ensemble d'un réseau**
- ▶ **Plus confortables** (*jerk* réduit)

Inconvénients

- ▶ Les mêmes que la voiture électrique
- ▶ **Plus lourds** que les bus Diesel pour l'instant (batterie lourde)

Exemples

- ▶ Bus utilisés pour les olympiques de Pékin en 2008:
 - ▶ Autonomie de 130 km avec air climatisé en fonction
 - ▶ Batteries Lithium-Ion qui consomment 0,62 kWh/km (2,2 MJ/km)
 - ▶ Les batteries sont échangées par d'autres complètement rechargées aux terminus pour permettre un fonctionnement 24h

Véhicules à hydrogène

Voiture à pile à combustible hydrogène

Caractéristiques

- ▶ Utilise une pile à combustible, qui **transforme les ions hydrogènes en électricité par réaction chimique**
- ▶ Certains modèles brûlent directement l'hydrogène

Avantages

- ▶ **Pas d'émissions locales** (seulement de l'eau)
- ▶ **Moins de chaleur produite** qu'un modèle à essence

Inconvénients

- ▶ **L'hydrogène est rare sur la terre et difficile à extraire**
(c'est une énergie secondaire encore moins efficace que l'électricité > électrolyse)
- ▶ **Pour l'instant: hydrogène extrait des combustibles fossiles** (méthane par exemple)
- ▶ **Faible quantité d'énergie emmagasinée par unité de volume** (grand réservoirs)

- ▶ **Pression d'entreposage très élevée**
- ▶ **Transport et distribution de l'hydrogène demandent des infrastructures coûteuses**
- ▶ **Fonctionnent mal par temps froid** (démarrage difficile)

Exemples:

- ▶ Honda FCX Clarity

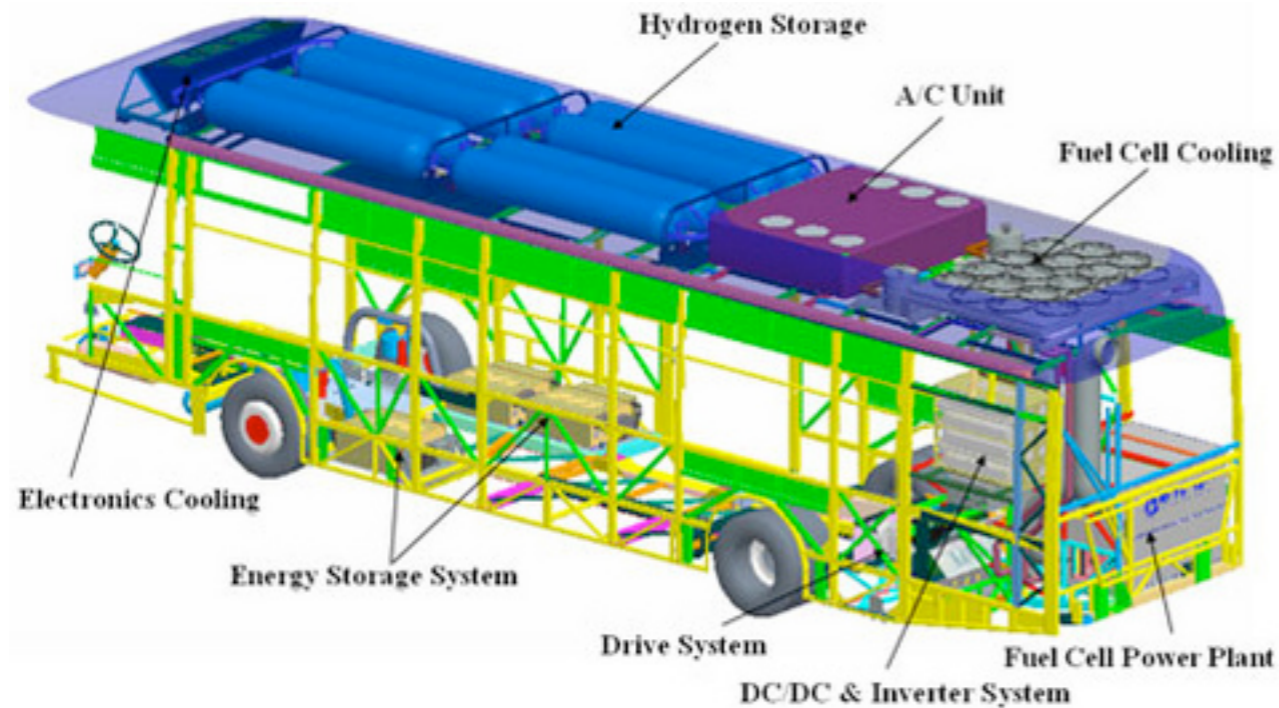


Véhicules à hydrogène

Bus à pile à combustible hydrogène

Exemples:

- ▶ Flotte de bus à hydrogène aux jeux olympiques de Vancouver en 2010 toujours en fonction à Wistler
- ▶ Plusieurs modèles en utilisation à Londres, au Brésil, en Australie, à Singapoure...



Londres



Wistler



Économie de l'hydrogène ?

Analyse de cycle de vie de l'hydrogène dans les véhicules

(Frank Kreith, 2004 | *Fallacies of a Hydrogen Economy: A Critical Analysis of Hydrogen Production and Utilization*, Journal of Energy Resources Technology)

Pour fonctionner, 2 éléments essentiels:

- ▶ On doit pouvoir produire l'hydrogène partout à faible coût et sans effets néfastes sur l'environnement
- ▶ L'hydrogène doit être concurrentiel par rapport aux alternatives (véhicules électriques à batterie, véhicules à essence, etc.)

Mais:

- ▶ Quand on regarde le cycle de vie complet, on remarque que la production, le transport et la distribution de l'hydrogène sont très coûteux et réduisent l'efficacité globale
- ▶ Pour faire réagir l'eau et produire 1 kg d'hydrogène, il faut 33,3 kWh (120 MJ) d'électricité (électrolyse) au minimum (rendement de 100% impossible en pratique)
- ▶ Le rendement total de la chaîne est d'environ 82% si on stocke l'hydrogène gazeux à haute pression, et 57% si on le stocke sous forme liquide (depuis le **gaz naturel**)
- ▶ Avec l'**électrolyse**, le rendement total de la chaîne est d'environ 31% si on stocke l'hydrogène gazeux à haute pression, et 29% si on le stocke sous forme liquide
- ▶ Transport de l'hydrogène:
 - ▶ oléoduc sous forme de gaz: il faudra modifier toutes les infrastructures pour réduire la diffusion de l'hydrogène à travers les parois
 - ▶ oléoduc sous forme liquide: beaucoup trop cher (cryogénisation des tuyaux pour garder le liquide à basse température)



120 MJ/kg d'hydrogène
si rendement = 100%

Économie de la voiture électrique ?

Au Québec

Statistiques 2009 (SAAQ)

- ▶ Nombre de véhicules de promenade (automobiles et camions légers) immatriculés en circulation: 4 202 447
- ▶ Nombre de kilomètres parcourus par véhicule en moyenne: prenons 18 000 km

Tarifs Hydro-Québec (2011)

- ▶ Un client résidentiel a consommé en moyenne 16 205 kWh en 2010 (très variable selon les clients par contre)
- ▶ 30 premiers kWh par jour: 5,45 ¢/kWh
- ▶ 30 kWh et plus par jour: 7,51 ¢/kWh

Vente d'électricité au Québec (2010)

- ▶ 169 495 GWh dont 59 534 GWh aux clients résidentiels et agricoles

Véhicule électrique

- ▶ Faire comme si tous les véhicules étaient des Nissan Leaf (0,2 kWh/km)

Économie de la voiture électrique

Au Québec



1. Quel est le pourcentage d'augmentation de production d'électricité nécessaire pour accommoder tous les véhicules personnels du Québec ?

2. Est-ce un scénario réaliste ?

3. Est-ce que ce calcul est vraiment valable ?

4. Combien coûterait 1 km parcouru en électricité au prix de 2012 ?
(Comparer au prix actuel de l'essence)

Économie de la voiture électrique ?

Au Québec

- ▶ On obtiendrait une chute drastique des GES (devoir facultatif: calculer la différence en émissions de CO₂)
- ▶ On utiliserait environ 9% plus d'électricité
- ▶ Par contre, comme on rechargerait les véhicules surtout la nuit et que les turbines d'Hydro-Québec produisent moins d'électricité la nuit à cause d'une faible demande, cela permettrait d'équilibrer le réseau
 - ▶ La puissance totale n'aurait pas à augmenter énormément
 - ▶ Les véhicules pourraient même servir à emmagasiner de l'énergie et à la redistribuer en période de pointe lorsque branchés

Mais:

- ▶ Si on veut réduire le nombre d'accidents, il faut réduire également le nombre de véhicule
- ▶ Dans la vallée du Saint-Laurent, l'espace prend de plus en plus de valeur
 - ▶ Il faut aussi réduire l'empreinte de l'automobile sur l'espace urbain et sur le paysage rural
 - ▶ Les véhicules électriques ne permettent pas de résoudre ces problématiques
 - ▶ Pour soutenir une population toujours plus grande, il faut favoriser les transport collectifs et l'autopartage, de façon à augmenter la densité urbaine et augmenter l'accessibilité

Économie de la voiture électrique ?

Dans le monde

L'impact environnemental serait amélioré, mais pas annulé, puisqu'une grande partie de l'électricité produite mondialement utilise les combustibles fossiles (charbon, gaz naturel ou pétrole)

- ▶ Efficacité des véhicules augmentée car centrale thermique plus efficace pour brûler les combustibles fossiles qu'un véhicule à essence standard
- ▶ Encore mieux si l'électricité est produite de façon renouvelable (solaire, hydroélectricité, marémotrice, éolienne, etc.)

Par contre:

- ▶ Bilan d'accidents resterait pratiquement le même
- ▶ Espace gaspillé demeure inchangé
- ▶ Transport collectif tout électrique encore plus efficace pour transporter le même nombre de gens sur les mêmes distances
- ▶ Solution technique qui ne nous libère pas des choix sociaux associés