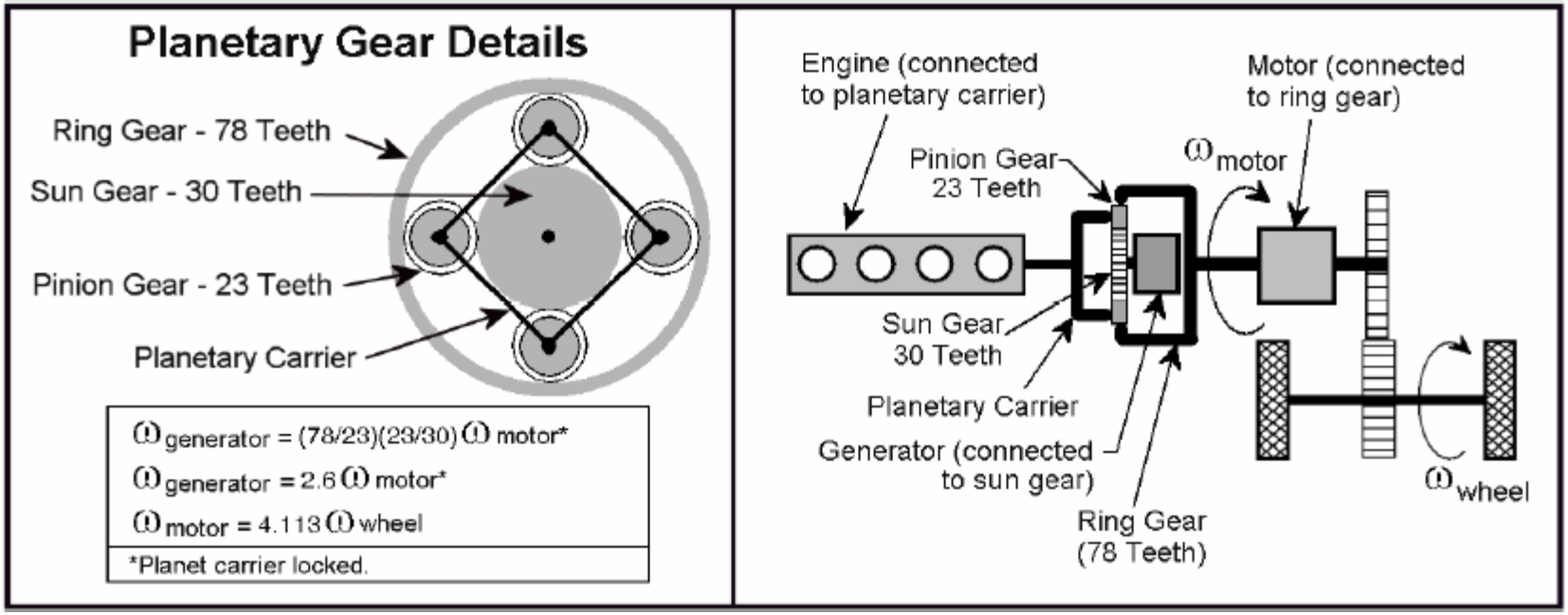
Stratégie de la conversion d'énergie de la Toyota Prius

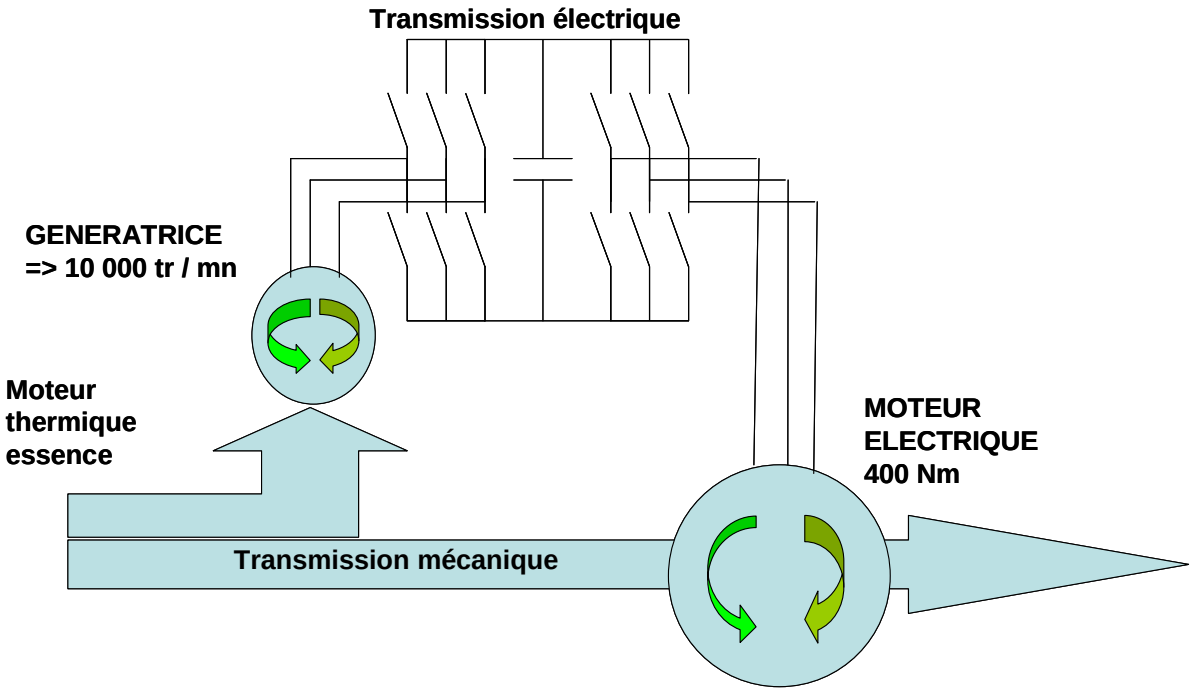
Daniel Chatroux, CEA – LITEN Grenoble

Source principales des données :
« Evaluation of 2004 Toyota Prius Hybrid Electric Drive System »
de Oak Ridge National Laboratory

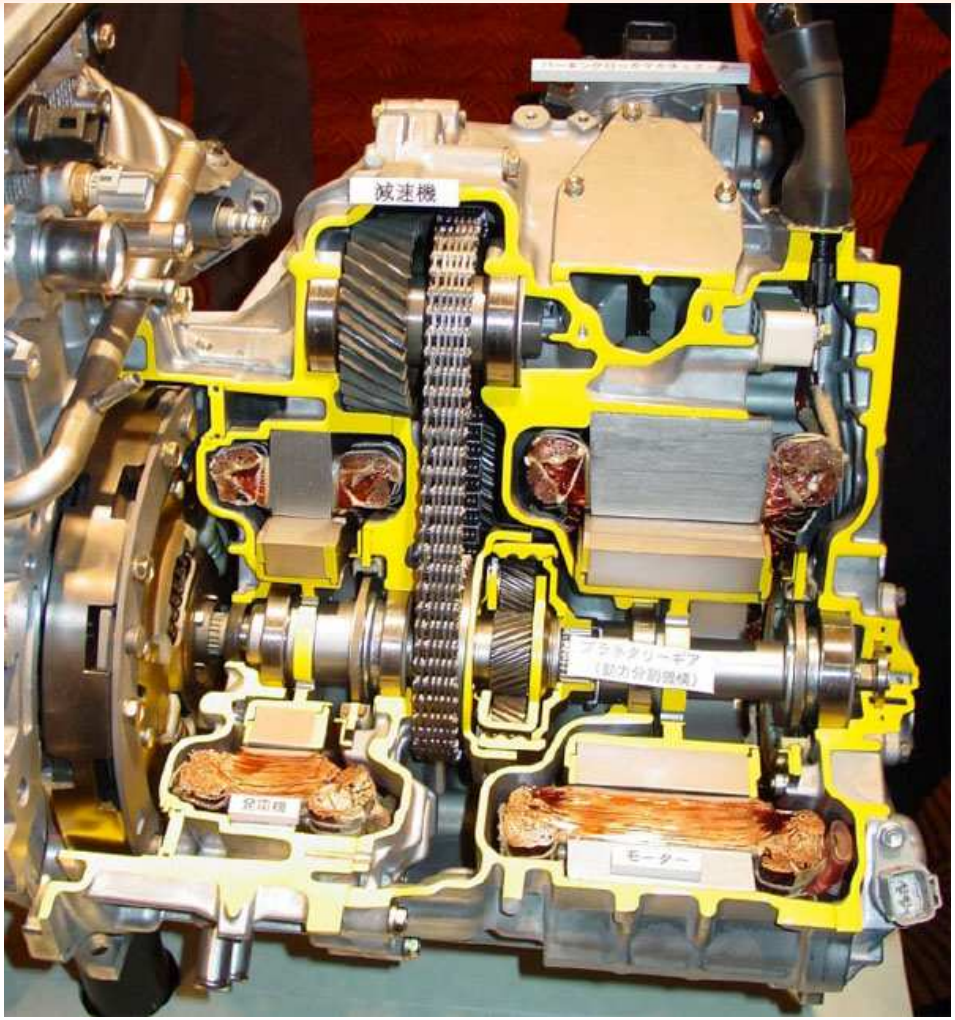
1 octobre 2008



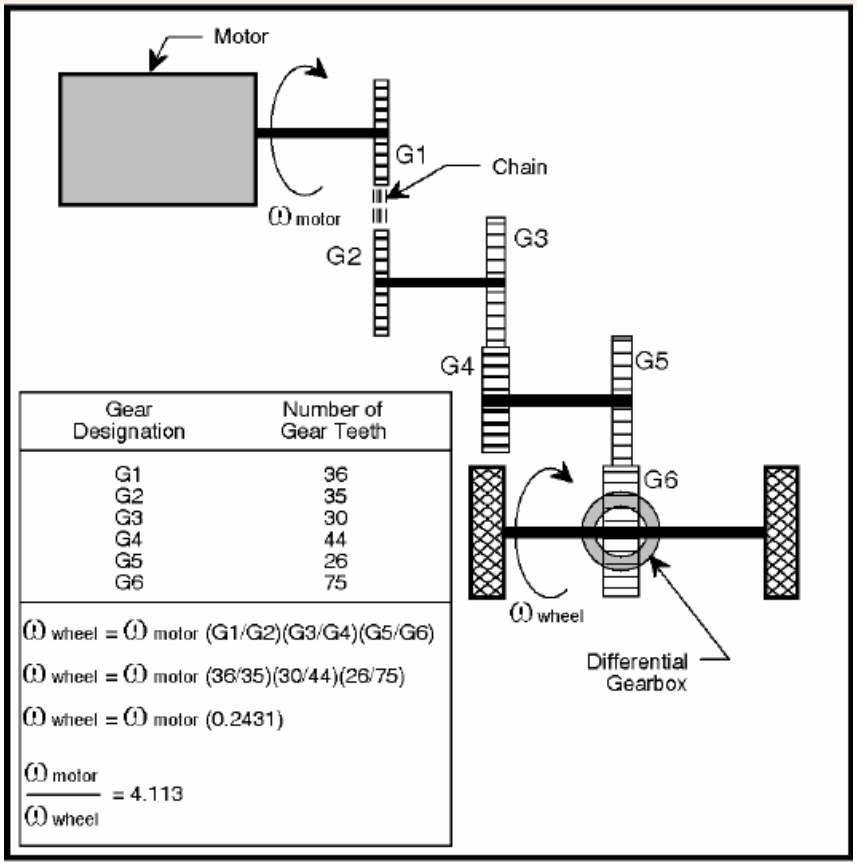
- **Transmission de puissance sans boîte à vitesse :**
  - **1ère voie : transmission mécanique**
  - **2ème voie : transmission électrique en parallèle**
  - **Pilotage par le couple de la génératrice (courant)**



- **Deux machines synchrone à aimants et deux onduleurs :**
  - **Génératrice haute vitesse (jusqu'à 10 000 tr/mn)**
  - **Moteur fort couple 400 Nm => démarrage véhicule**
  - **Moteur thermique 110 Nm**



➢ **Une transmission continument variable (CVT) à haut rendement commandé électriquement**

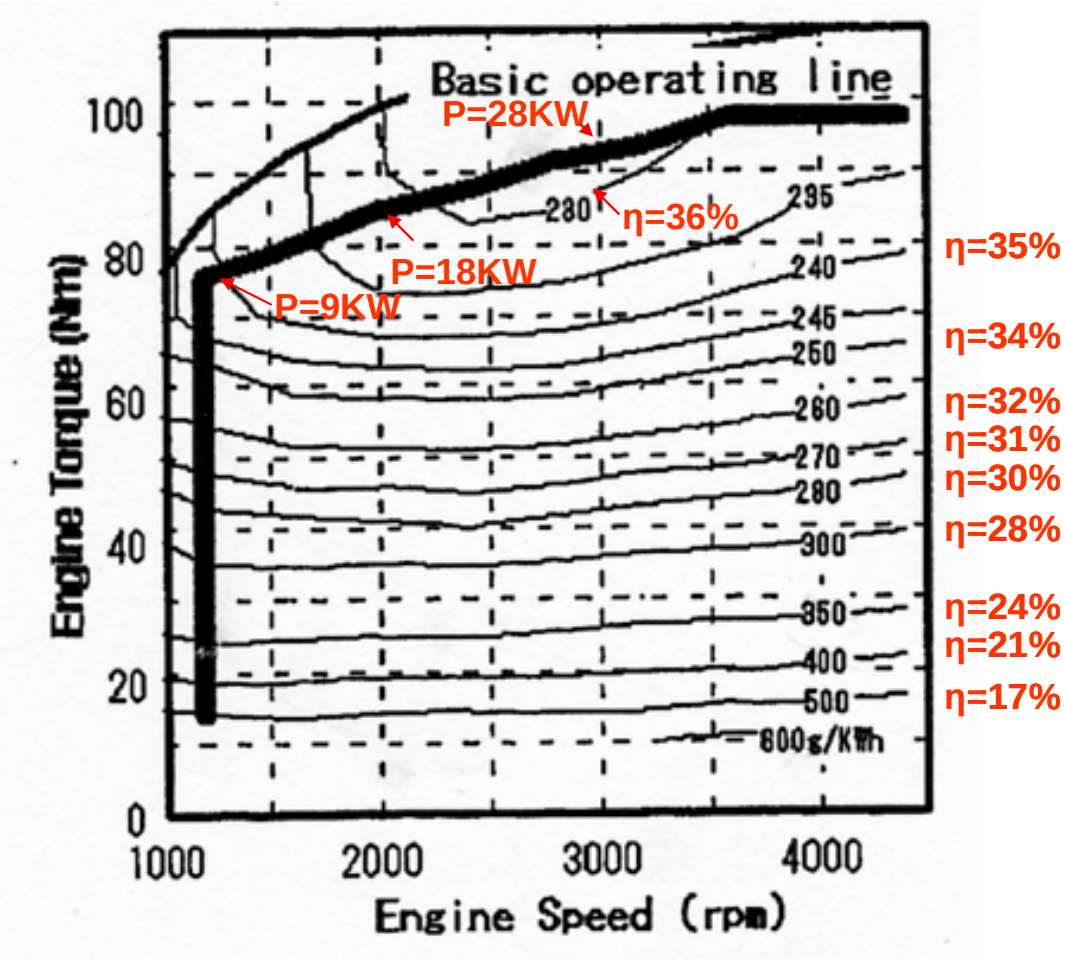


- **Pas de boîte à vitesse ni mécanique ni automatique**
  - ⇒ **bloc moteur thermique moteur électrique - générateur**
  - ⇒ **transmission par chaîne**
  - ⇒ **réduction par pignons**

➢ **Transmission à variation continue commandée électriquement à très faibles pertes**

- **Moteur essence**
- **Moteur thermique toujours utilisé au meilleur régime**
- **Evite les pertes par pompage (aspiration / papillon)**
- **Cycle Atkinson (amélioration)**
- **Coût moteur essence**

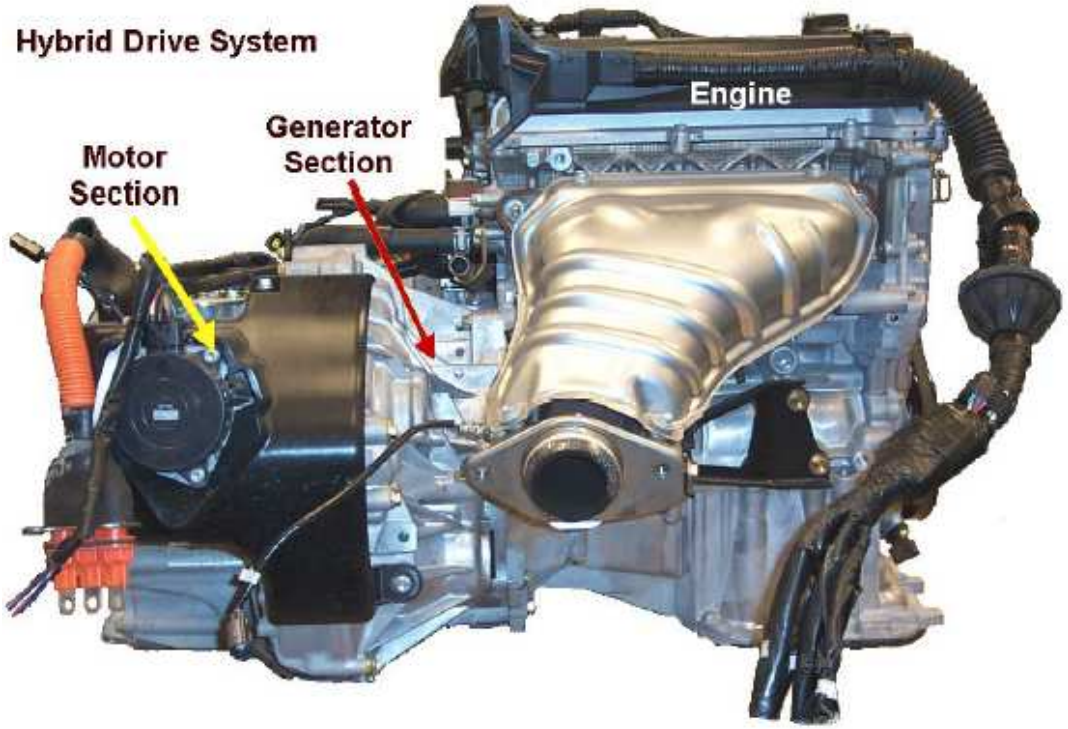
C1, 107, Toyota AYGO



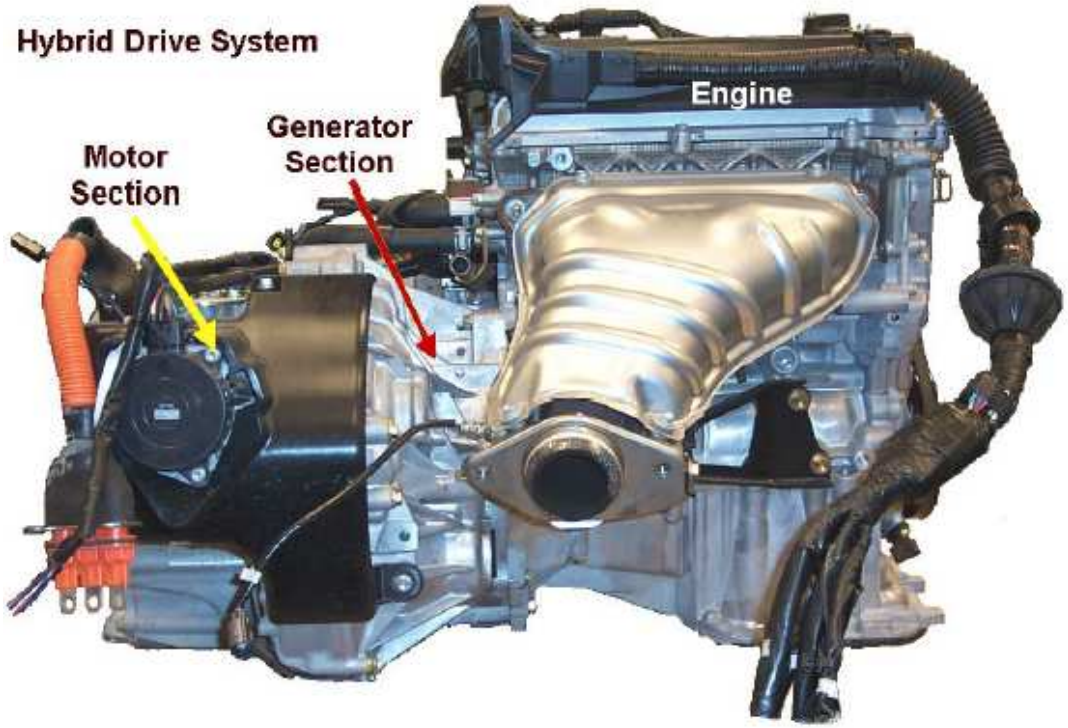
1. CVT
2. moteur thermique optimisé qui ne fonctionne que dans les zones de fortes charges (fort couple) à bon rendement

➢ rendement global de la Toyota PRIUS est comparable à celui d'un véhicule diesel à injection directe (en énergie et non en litres)

- 1litre diesel = 10 KWh => 2,6 Kg de CO2
- 1litre essence = 9 KWh => 2,4 Kg de CO2
  => Coût ??

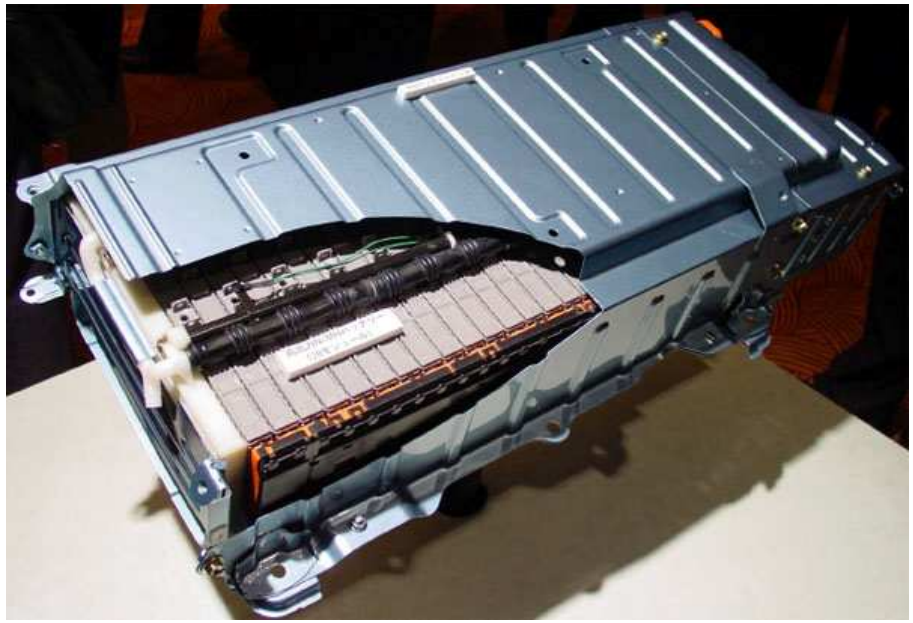


3. **Un moteur électrique toujours lié aux roues**
4. **Un moteur thermique découplé des roues**
   - **Traction électrique pure possible**
   - **Bonne récupération en décélération, sans perte de freinage par le moteur thermique**
   - **Possibilité d'accélération instantanée indépendamment de la CVT (en utilisant la batterie)**
   - **Voiture peu dynamique si batterie déchargée**



5. **La batterie de 1,2 KWh n'est utilisée que si elle est strictement indispensable et dans un mode de fonctionnement en microcycle 60 Wh.**

- **usages de très courtes durées ou de courtes distances (quelques centaines de mètres)**
- **phases de marche/arrêt à faible vitesse en ville,**
- **récupération d'énergie à la décélération,**
- **aide à l'accélération / dynamique moteur + CVT**
- **pas de récupération en descente (énergie trop importante)**
- **pas d'aide au moteur thermique dans les côtes (énergie trop importante)**



6. Microcycles : un coût d'usage batterie divisé par cinq

Coût d'utilisation d'un stockage batterie : coût d'acquisition de la batterie (par rapport à son énergie stockée) divisé par le nombre de cycles cumulés que la batterie peut réaliser au cours de sa vie. => exemple photovoltaïque autonome

- **Batteries NiMH (Toyota PRIUS)**
  => 1,5 €/kWh pour 1000 cycles à 80 % de profondeur de décharge,
  estimation de prix client à 1,5 k€/kWh, soit 6% du prix véhicule).
- **Un litre d'essence = 9 kWh**
  => 0,6 €/kWh d'énergie mécanique (ou électrique)
  (avec 1,4 €/l pour du SP95 et un rendement de 25 %).
- **Usage sur véhicule électrique ou hybride plug-in non rentable, aujourd'hui, sauf en ville**
- **Mais : Coûts batteries ↓↓ Performances ↑↑**
  (PRIUS = ½ marché mondial NimH) => actions Toyota
- **Batteries LiFePO4 : Sûreté, coût matériaux / oxyde de Cobalt**

6. Microcycles : un coût d'usage batterie divisé par cinq

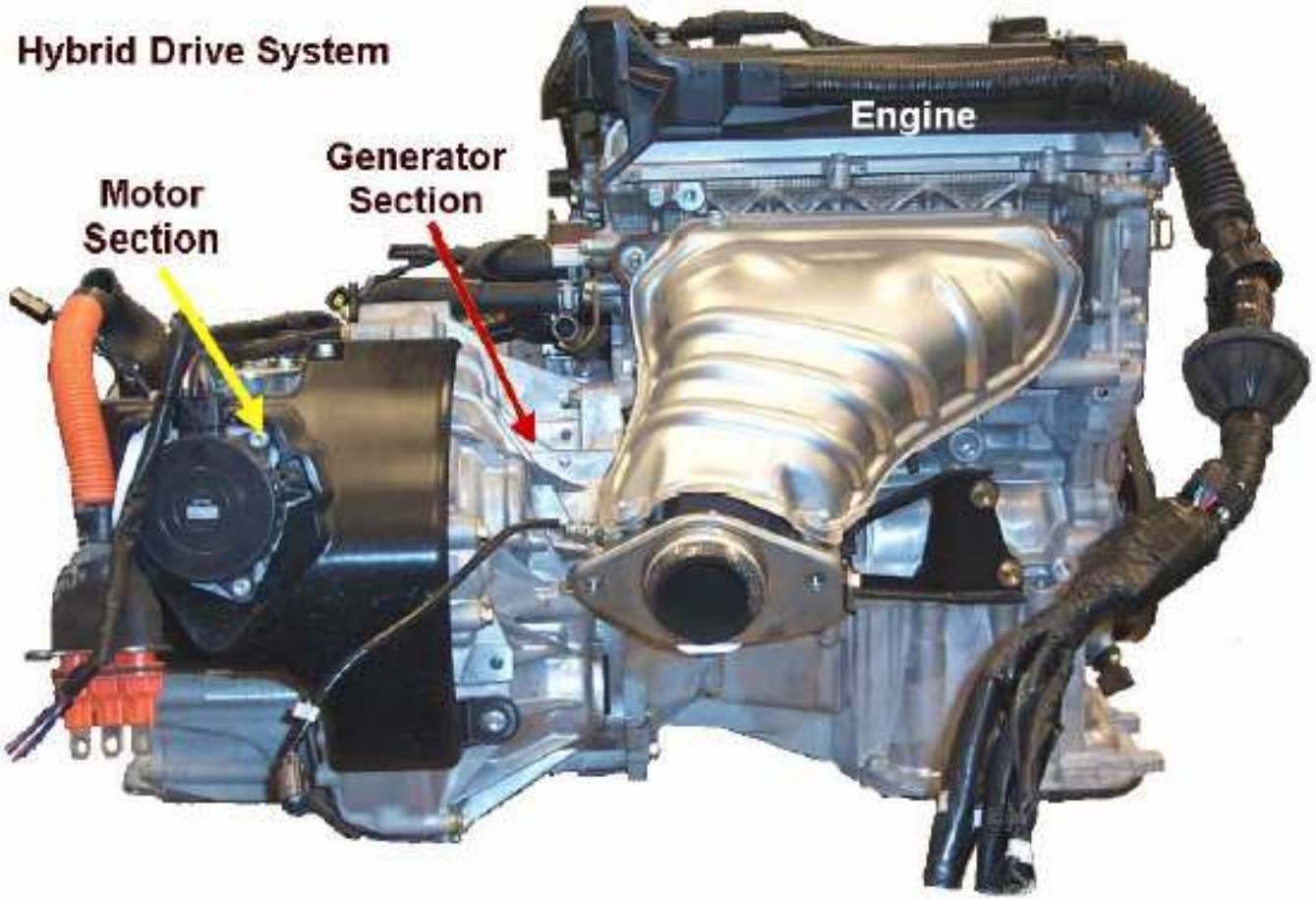
Coût d'utilisation d'un stockage batterie : coût d'acquisition de la batterie (par rapport à son énergie stockée) divisé par le nombre de cycles cumulés que la batterie peut réaliser au cours de sa vie.

- **Pour des micro-cycles de 5 %, une batterie NiMH peut effectuer 100 000 cycles.**
  Le coût de l'énergie stockée se trouve divisé par 5, soit environ 0,3 €/kWh.
- **Sur la PRIUS, cet usage en microcycle de 5% (dans une fenêtre de 20% aux alentour de 60% d'état de charge) permet de diminuer d'un facteur cinq le coût d'usage du stockage de l'électricité et de rendre celui-ci compétitif par rapport à l'énergie issue de l'essence.**
- **5% = une voiture verte à l'affichage**

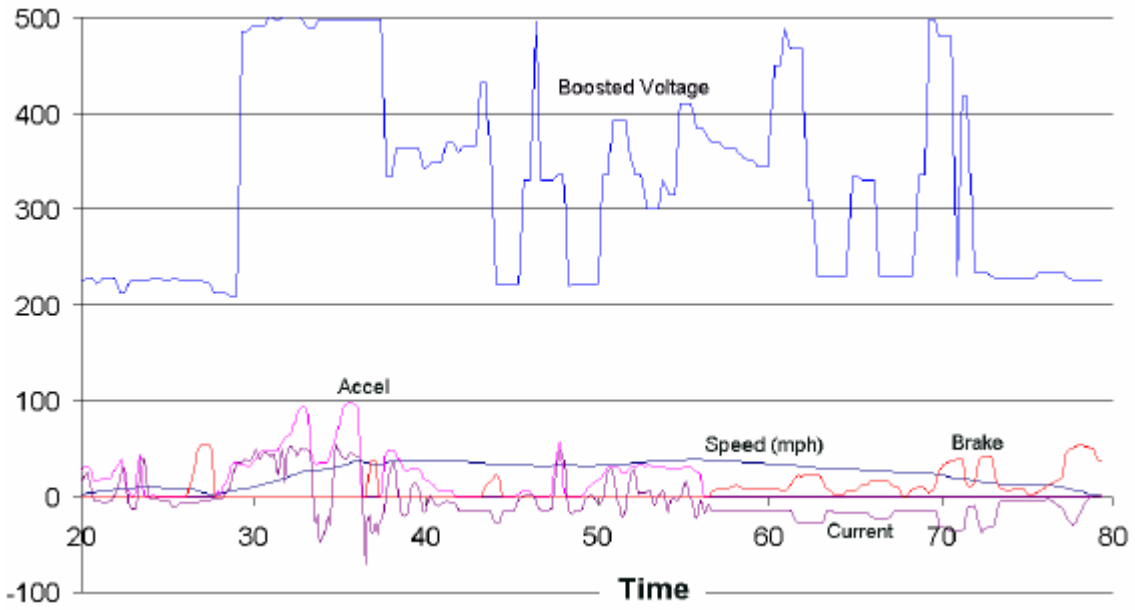
7. Une consommation en ville fortement abaissée

En ville : roulage à faible vitesse en électrique sur une courte distance, puis recharge par le moteur thermique utilisé dans les zones à bon rendement

- **Consommation en ville fortement abaissée (PRIUS : conso. ville = conso mixte + 20%, diesel + 30%, moteur essence classique +50-60%)**
- **Coût d'usage compétitif (carburant + usure batterie).**
- **Avantage important de la technologie.**
- **La gestion thermique du moteur et du pot catalytique est très bien maîtrisée => très faible niveau de pollution (104 g/Km sur cycle mixte).**



- **Intégration système poussée, imbrication de la mécanique et de l'électrique**



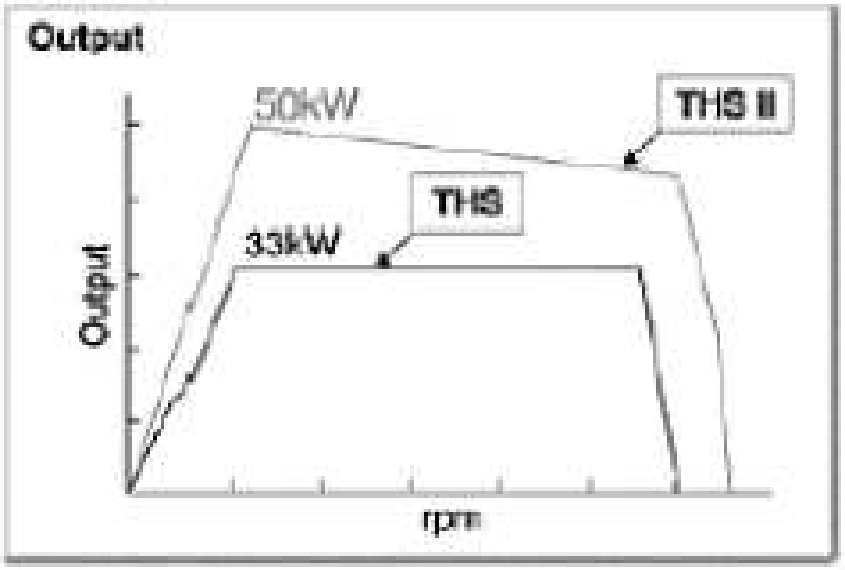
- **Toyota PRIUS 2004**

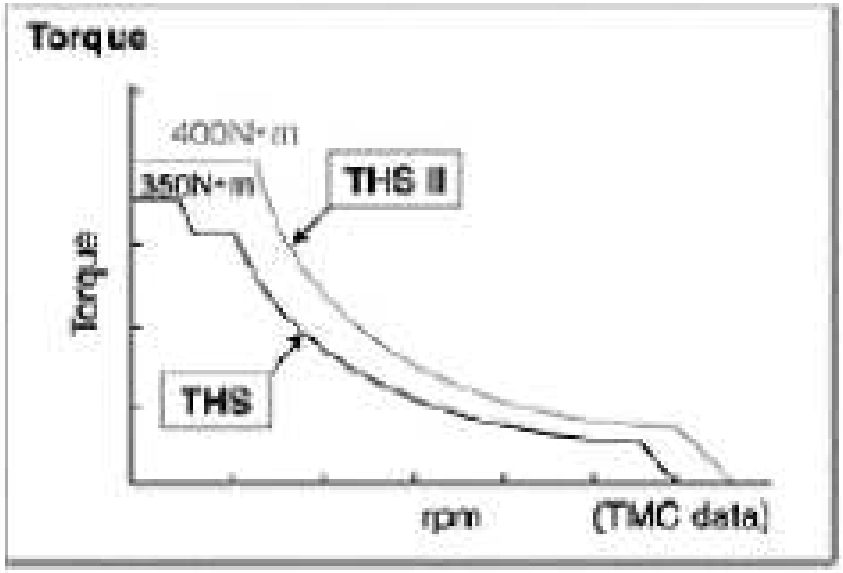
  ⇒ le bus continu n'est plus la tension batterie

  ⇒ transfert de puissance à tension variable de 200 V à 500 V

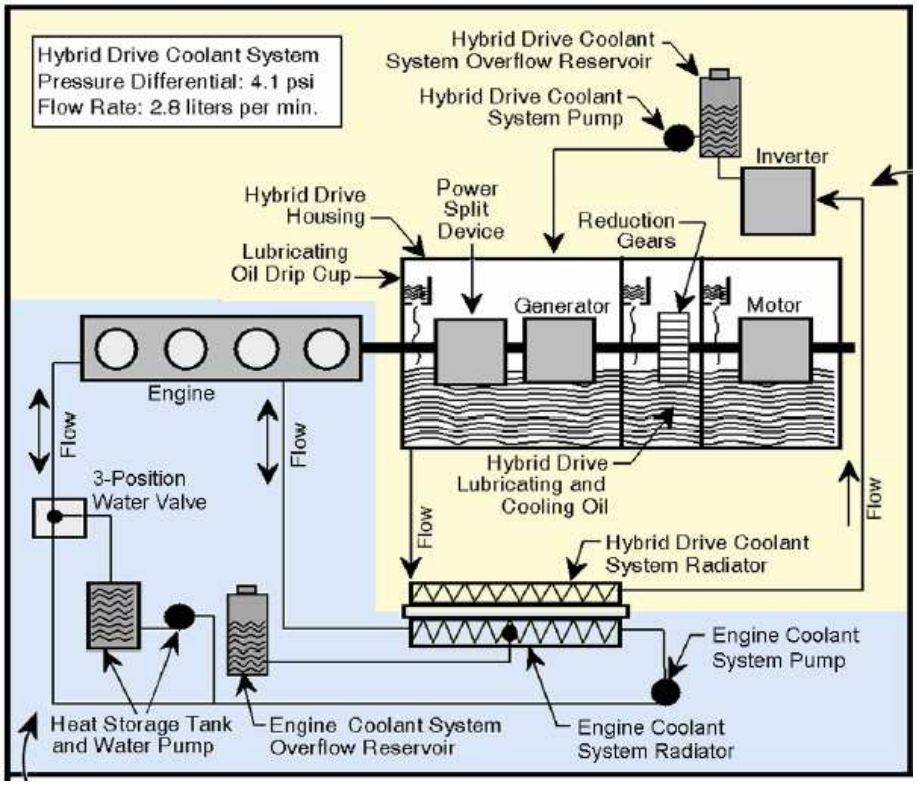
  ⇒ convertisseur élévateur/abaisseur en sortie de batterie

  ⇒ optimisation du moteur électrique (couple, plage de vitesse)





- **Évolution du couple et de la puissance entre les deux versions de la Toyota PRIUS**
  - **le confort <u>et</u> la performance**
  - **<u>rupture</u> par rapport au compromis confort / performance**
  -



- **Deux circuits de refroidissement à eau glycolée**

  ⇒ un pour le moteur avec un stockage thermique pour limiter la pollution au redémarrage

  ⇒ un pour l'électronique de puissance et le carter moteur – générateur

  ⇒Moteur et générateur refroidis par l'huile (barbotage) Bobinage classe H (180°C)

CONCLUSION

1. L'hybridation parallèle à dérivation de puissance de la Toyota PRIUS est en premier lieu une Transmission Continument Variable électrique à haut rendement. Le point clé de gain en consommation de la Toyota PRIUS sur route n'est pas lié à l'utilisation de la batterie, mais à l'utilisation d'une transmission continûment variable (CVT) électromécanique qui est constituée d'un train épicycloïdal, d'une machine électrique plutôt haute vitesse utilisée principalement en génératrice et d'un moteur électrique à fort couple.

2. La CVT permet de n'utiliser le moteur essence que dans les zones de forte charges (couples) à haut rendement (limitation des pertes de pompage). C'est un moteur essence optimisé, c'est tout.

3. La CVT et le moteur essence optimisé qui ne fonctionne que dans les zones de fortes charges (fort couple) à bon rendement
permet un rendement global de la Toyota PRIUS qui est comparable à celui d'un véhicule diesel à injection directe (en énergie et non en litres)

CONCLUSION

4. Le moteur électrique est toujours lié aux roues.
   Il assure les transitoire de puissance en utilisant la batterie.
   Le moteur thermique est découplé des roues.

5. La batterie de 1,2 KWh n'est utilisée que si elle est strictement indispensable et dans un mode de fonctionnement en microcycle 60 Wh.
   - usages de très courtes durées ou de courtes distances (qq. 100m)
   - phases de marche/arrêt à faible vitesse en ville,
   - récupération d'énergie à la décélération,
   - aide à l'accélération.
   - pas de récupération en descente (énergie trop importante)
   - pas d'aide au moteur thermique dans les côtes (énergie trop importante)

6. Sur la PRIUS, l'usage de la batterie en microcycle de 5% (dans une fenêtre de 20% aux alentour de 60% d'état de charge) permet de diminuer d'un facteur cinq le coût d'usage du stockage de l'électricité et de rendre celui-ci compétitif par rapport à l'énergie issue de l'essence.

7. Le plug-in ne doit pas être encore rentable, mais doit le devenir avec les progrès batterie et la baisse des coûts de vente. Le critère principal est le coût d'usage.

CONCLUSION

8. Une consommation en ville fortement abaissée. En ville, le roulage à faible vitesse en électrique sur une courte distance, puis la recharge par le moteur thermique utilisé dans les zones à bon rendement permet une consommation en ville fortement abaissée
(PRIUS : conso. ville = conso mixte + 20%, diesel + 30%, moteur essence classique +50-60%)
Ceci se fait à coût d'usage compétitif (carburant + usure batterie) et est un avantage important de la technologie.

9. La gestion thermique du moteur et du pot catalytique est très bien maîtrisée => très faible niveau de pollution

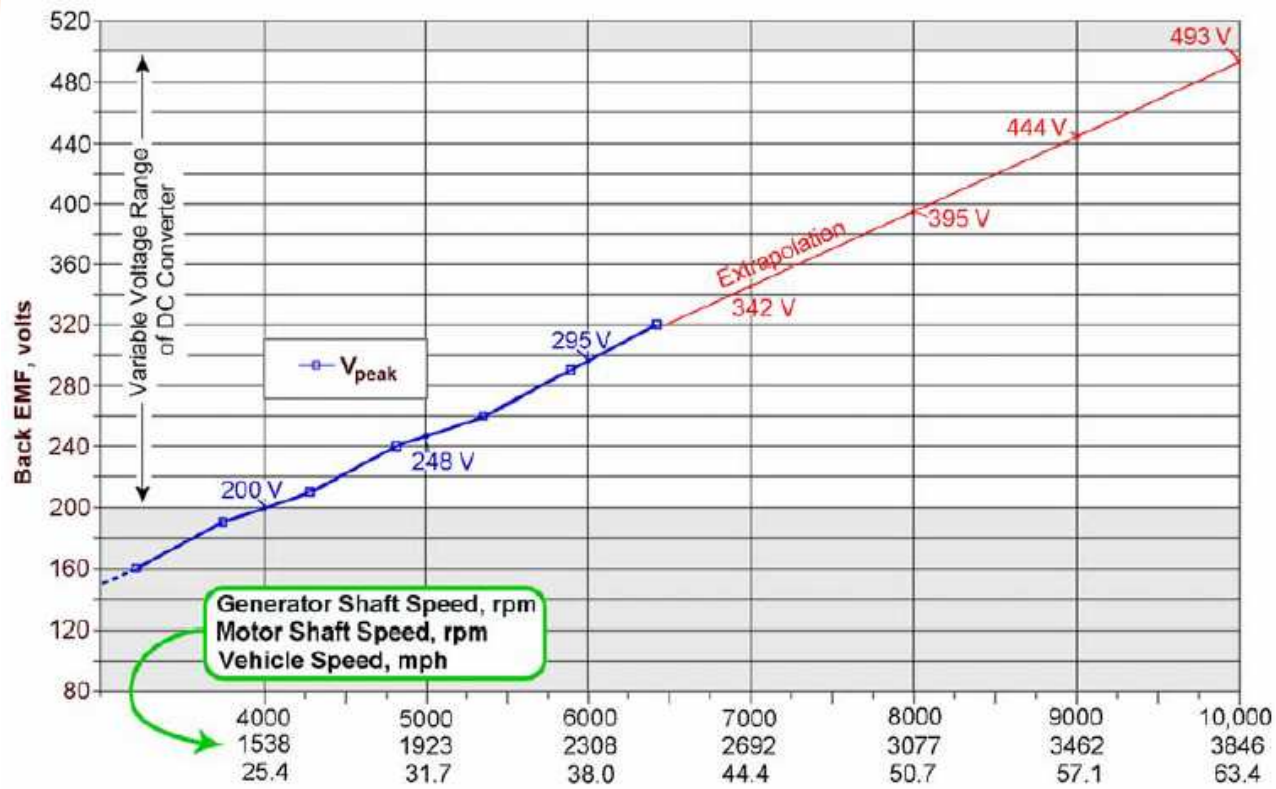
10. La gestion thermique de la batterie est très optimisée (conçues comme un échangeur)

11. L'intégration dans un seul boîtier de toute l'électronique de puissance permet un fort gain en intégration en mutualisant les fonctions de refroidissement et de découplage. Elle simplifie les aspects de Compatibilité Électromagnétique. L'électronique de puissance utilise des schémas classiques. Il y a eu un grand travail technologique (choix des technologies de composants par rapport à température, technologies de réalisations, refroidissement, intégration des fonctions)

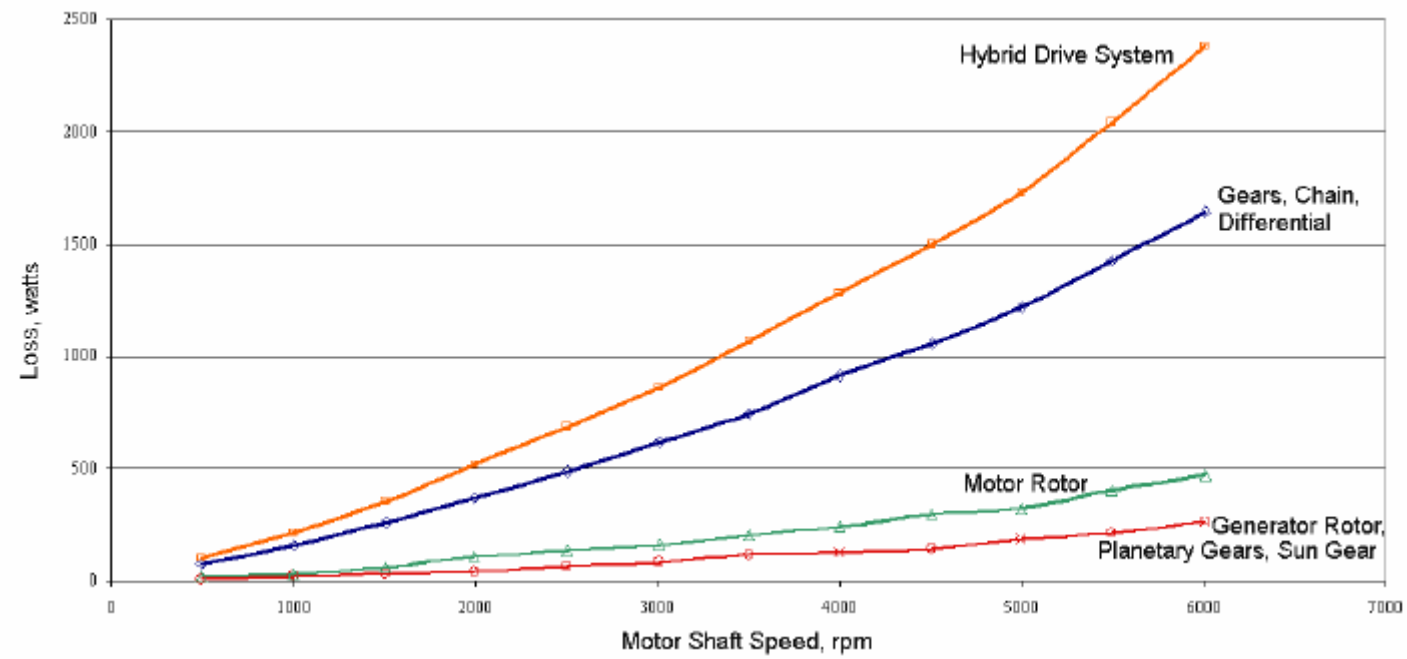
Subassembly	Property Description	Property Value
Engine	Type Maximum output Maximum torque	1.5 liter gasoline (high-expansion ratio cycle) 57 kW at 5000 rpm 115 Newton meter (Nm) at 4200 rpm
Motor	Type Maximum output Maximum torque	Type Synchronous alternating current (ac) permanent magnet (PM) motor 50 kW between 1200 and 1540 rpm 400 Nm between 0 and 1540 rpm
System*	Maximum output Maximum torque at 22 km/h or lower	82 kW at 85 km/h and higher 478 Nm
Battery	Type Construction Voltage Power output	Nickel-metal hydride 28 each 7.2V modules connected in series 201.6V 21 kW
*Maximum combined engine and hybrid-battery output and torque constantly available within a specified vehicle speed range.		

- **Moteur à aimants permanents à fort couple à bas régime**
- **Générateur à aimants permanents**
- **Convertisseur élévateur en sortie de la batterie**
- **Tension du bus d'énergie variable de 200 V à 500 V**

- **Boîtier onduleurs et convertisseurs compacts intégrés**
  - **Onduleur redresseur du générateur**
  - **Onduleur moteur**
  - **Convertisseur élévateur de la batterie NiMH**
  - **Convertisseur pour le réseau 13,8 volts**
  - **Onduleur de climatisation**



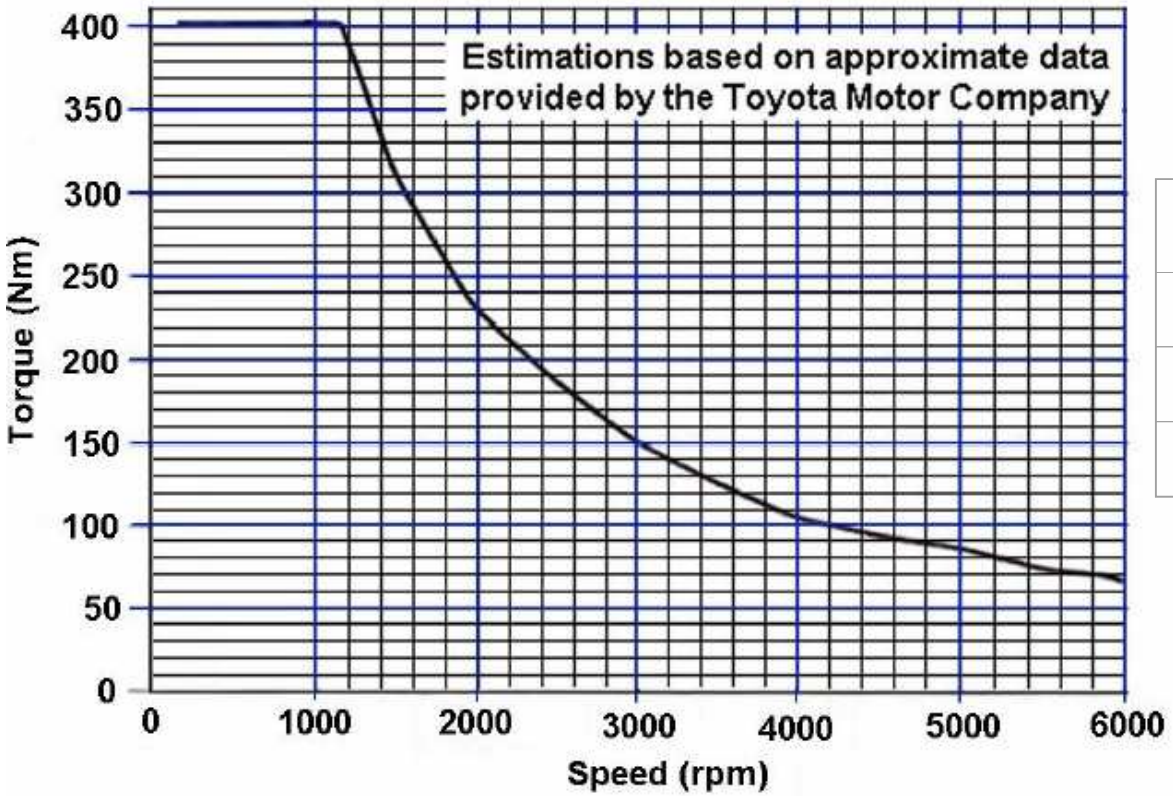
- **Courbe de la FEM du générateur en fonction de la vitesse de rotation moteur, donc de la vitesse véhicule**
- **Adéquation entre cette FEM et la tension variable du bus continu (200V – 500V)**
- **La tension du bus augmente lorsque la vitesse véhicule augmente**
- **La tension du bus monte à 500 V lors des phases d'accélération et de récupération au freinage**



Subassembly	Contribution to Loss, %
Reduction Gears and Drive Chain	68
Motor Rotor	21
Generator and Planetary Gears	11

- **Faibles pertes de l'ensemble (générateur, train épicycloïdal, transmission par chaîne et pignons)**

  ⇒ pertes principales dues à la transmission mécanique

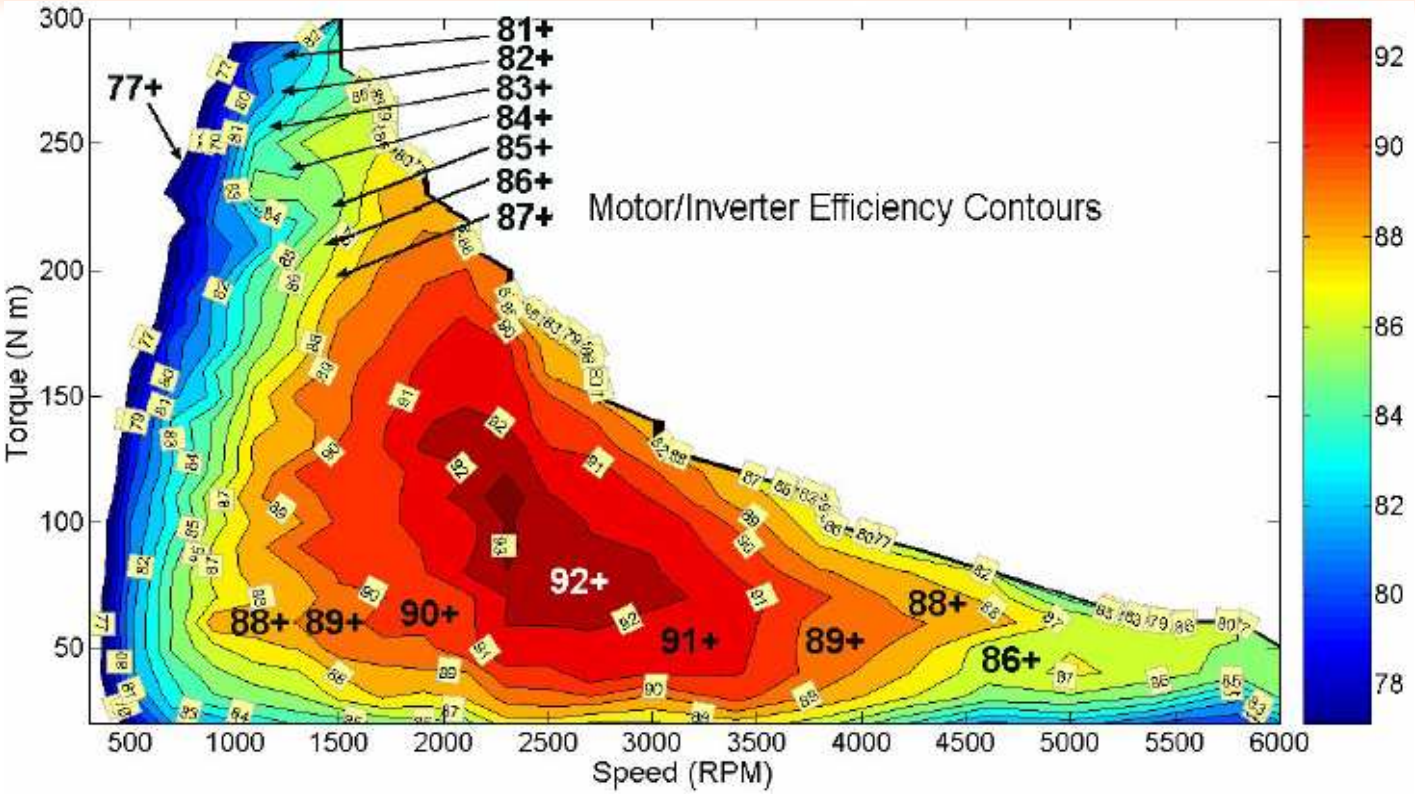


Current, (A)	Maximum Torque, (Nm)
75	140
150	260
250	400

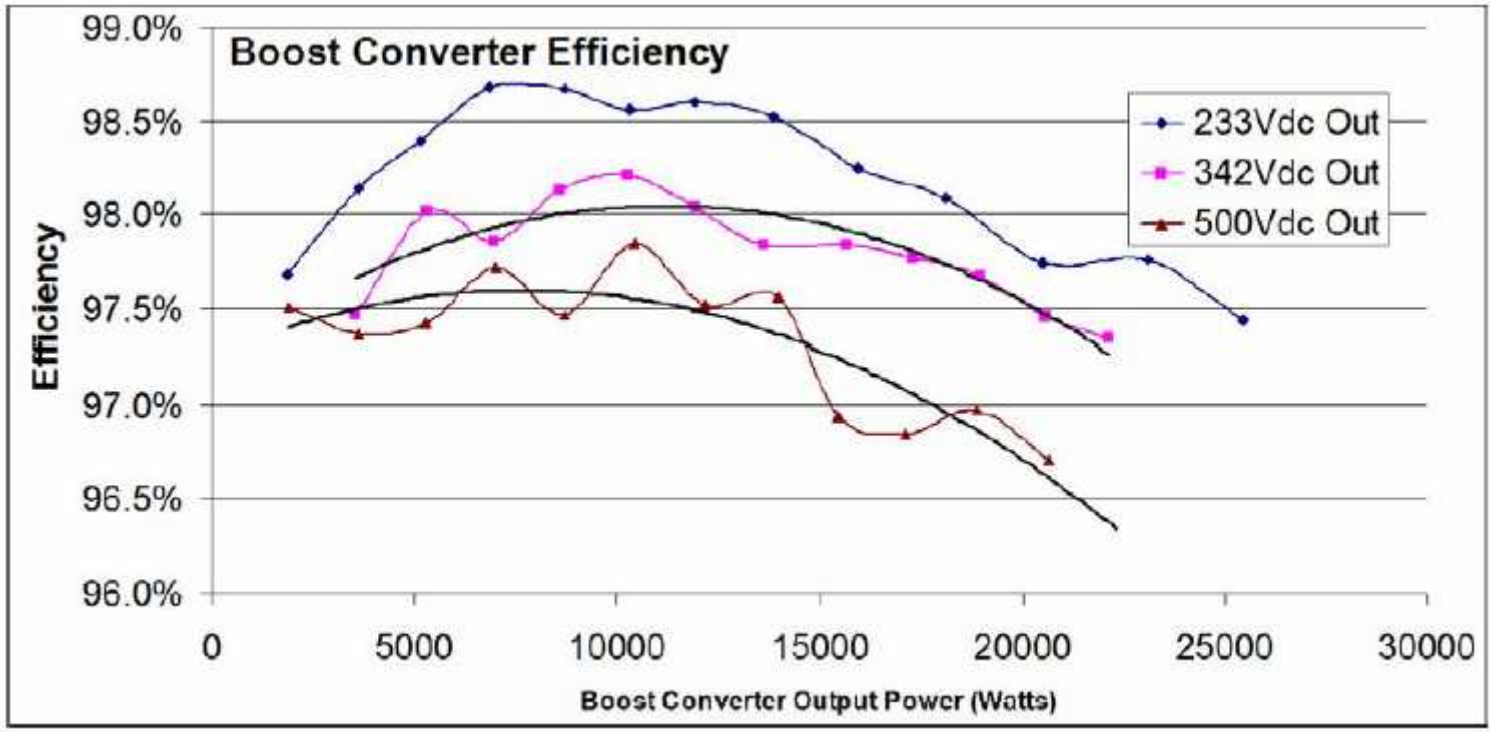
- **Courbe de couple du moteur électrique**

  ⇒ **400 Nm de 0 à 1200 tr/mn**

  ⇒ **couple du moteur thermique : 115 Nm à 4200 tr/mn**

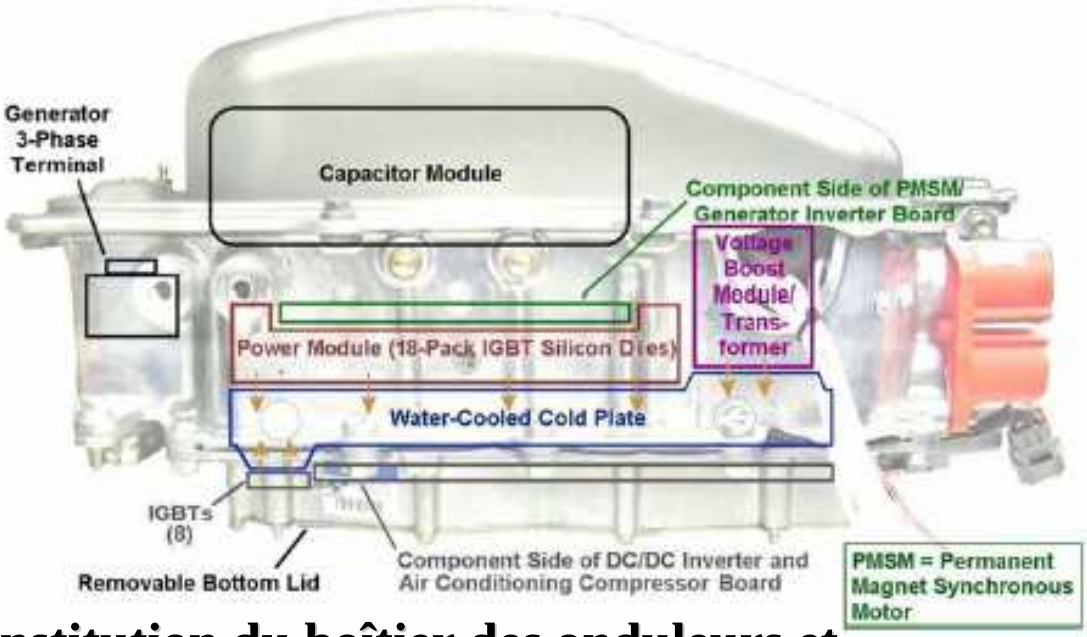


- **Carte de rendement du système moteur onduleur**
- **zone de bon rendement étendue, optimisation machine**



- **Courbe de rendement de l'élévateur entre la batterie et le bus continu (200 V- 500 V) en fonction de la puissance**
  - **Rendement élevé (>96,7 %)**
  - **Optimisation du rendement pour 10 kW**

- **Pas de test en abaisseur (récupération, recharge de la batterie)**



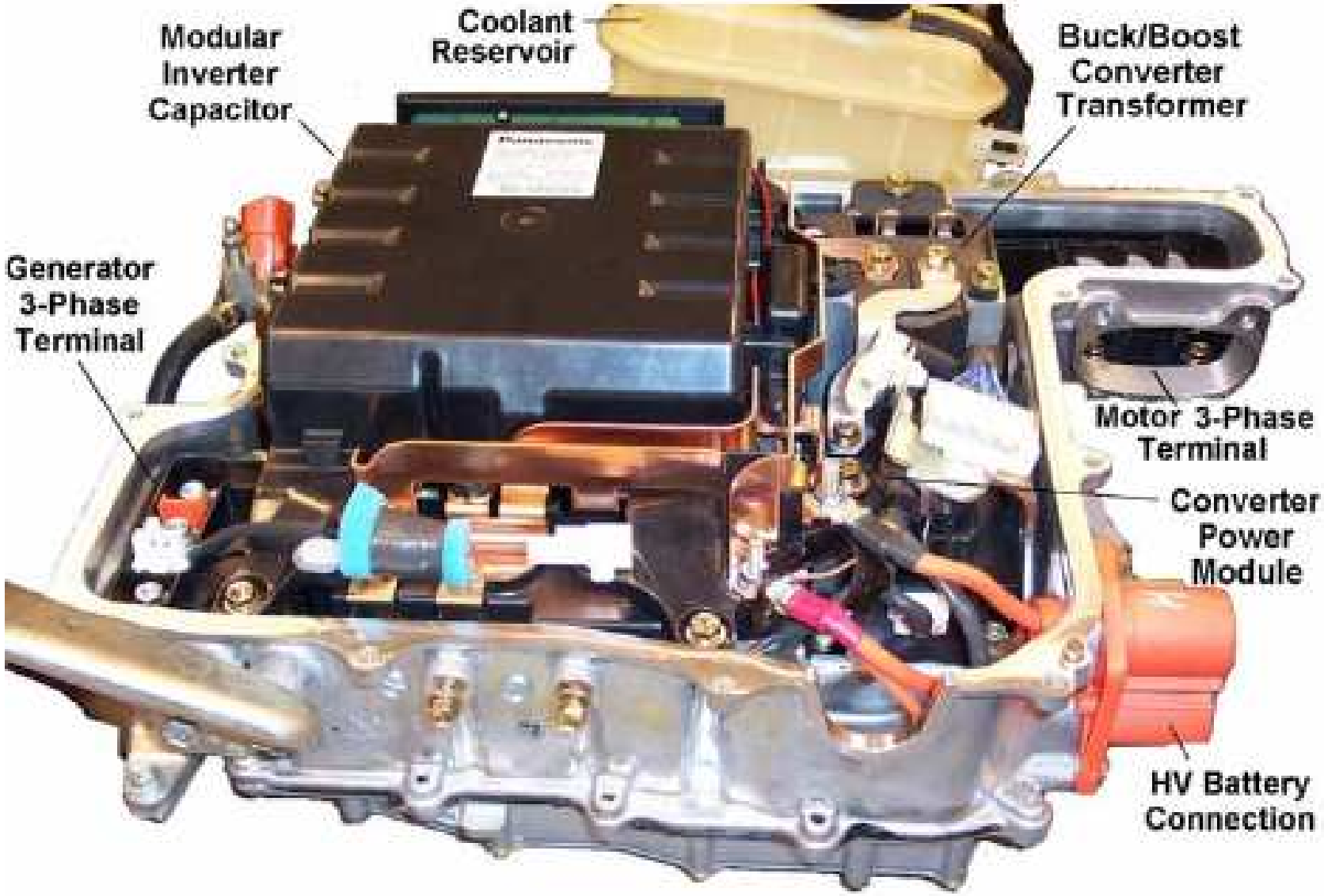
- **Constitution du boîtier des onduleurs et convertisseurs**
- **Plaque à eau <u>double face</u>**

Partie haute

- **Onduleur redresseur du générateur**
- **Onduleur moteur**
- **Convertisseur élévateur de la batterie NiMH**

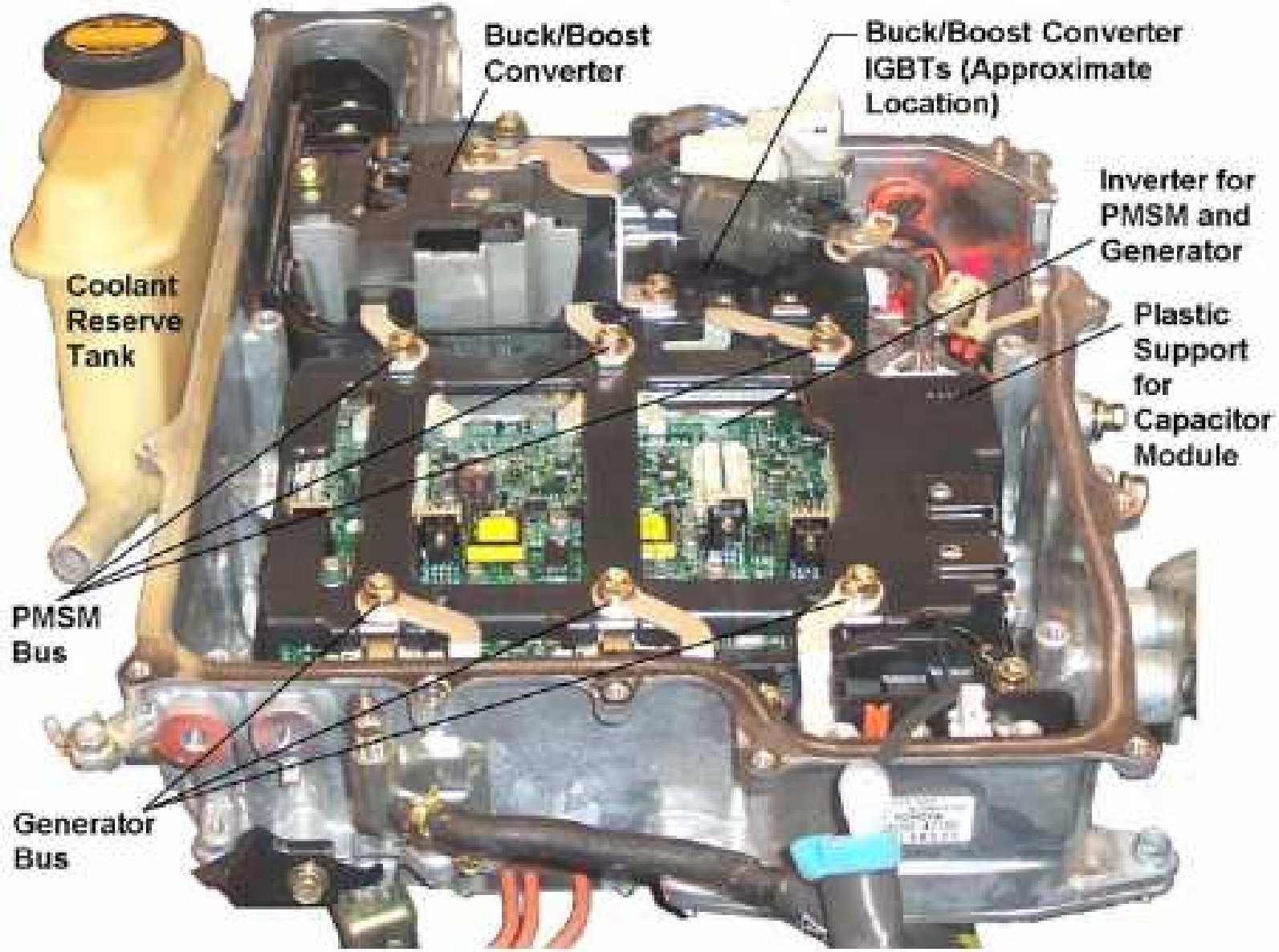
Partie basse

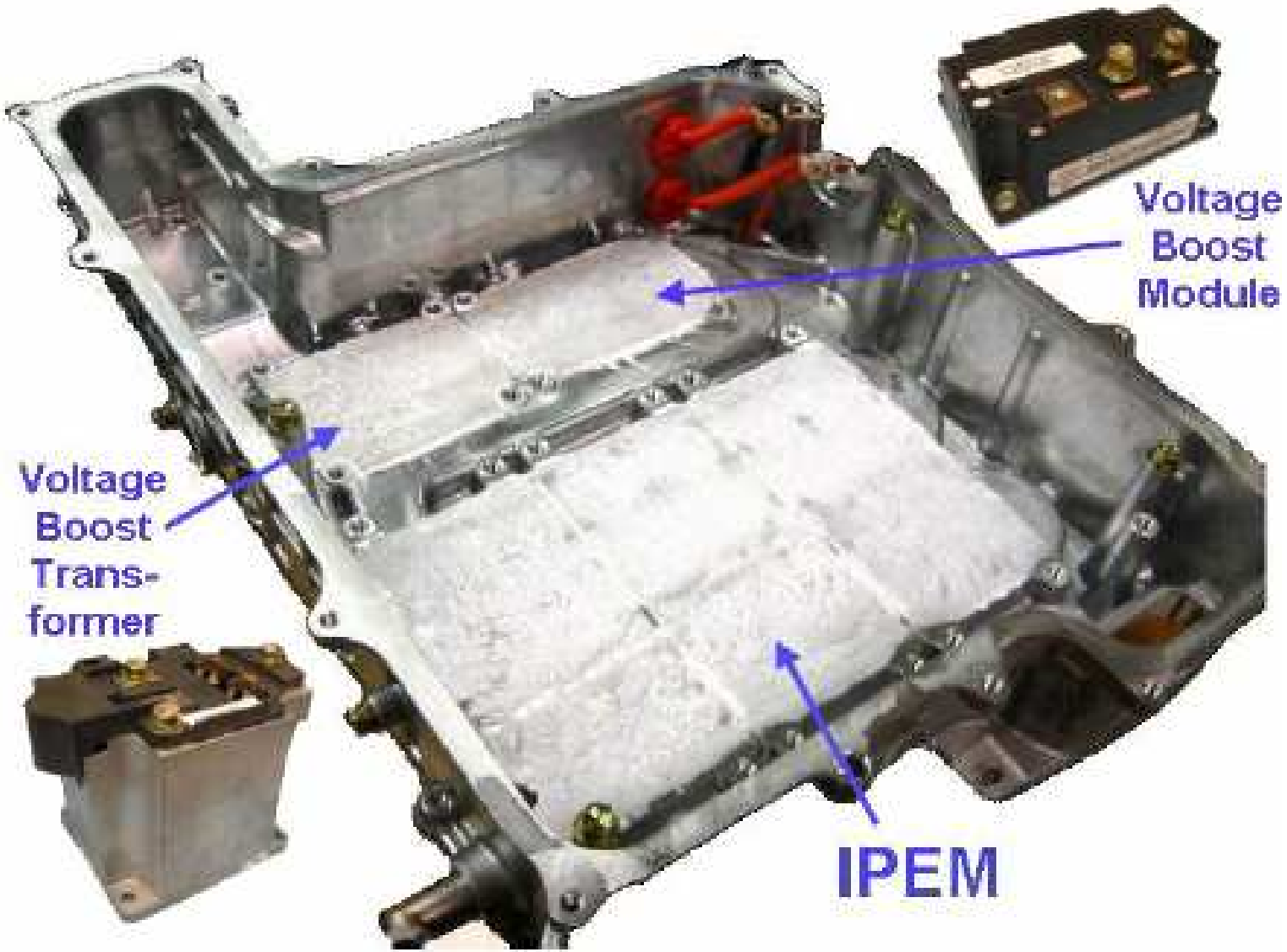
- **Convertisseur pour le réseau 13,8 volts**
- **Convertisseur de climatisation**

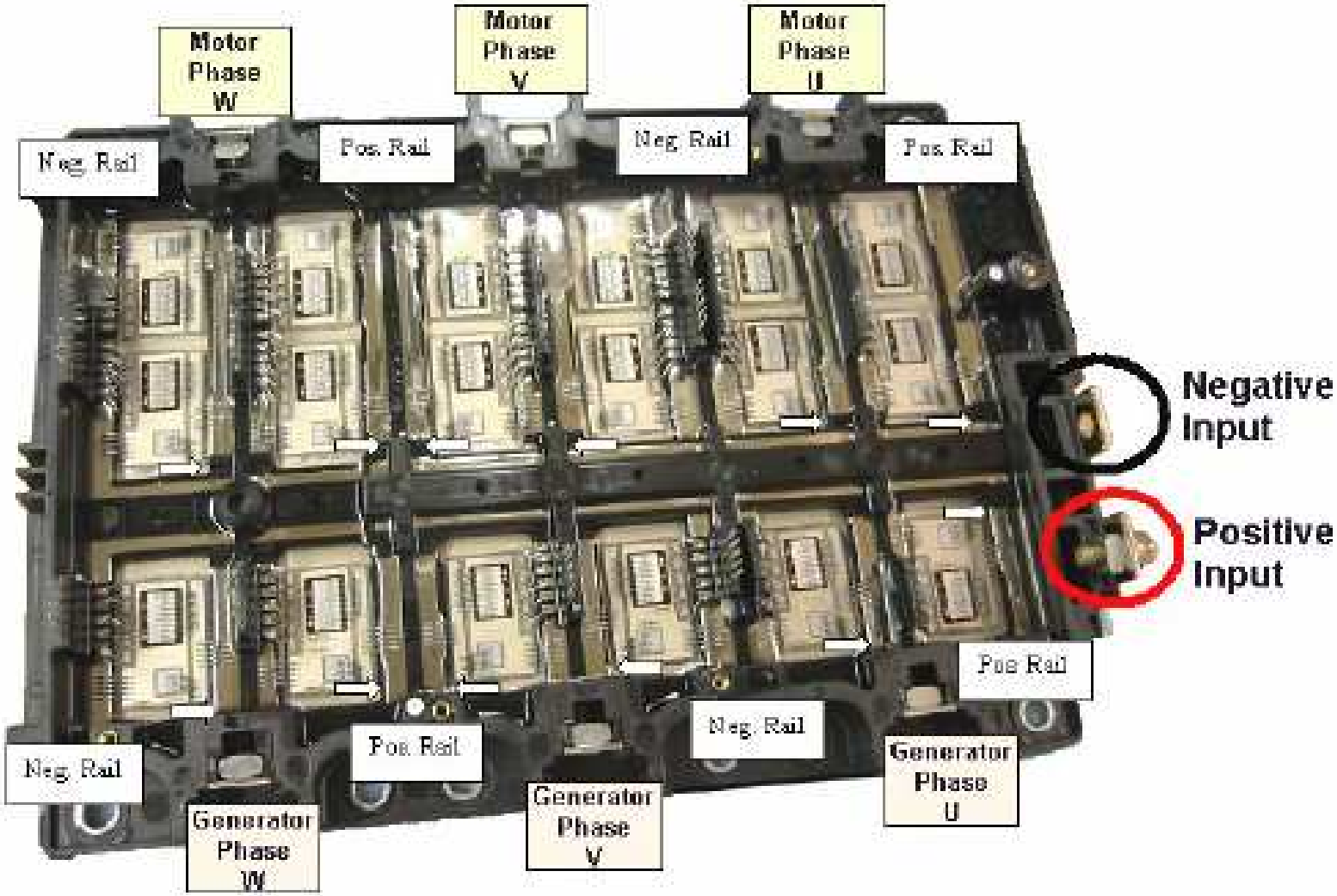

Modular Inverter Capacitor
Coolant Reservoir
Buck/Boost Converter Transformer
Generator 3-Phase Terminal
Motor 3-Phase Terminal
Converter Power Module
HV Battery Connection

Boîtier des onduleurs et convertisseurs

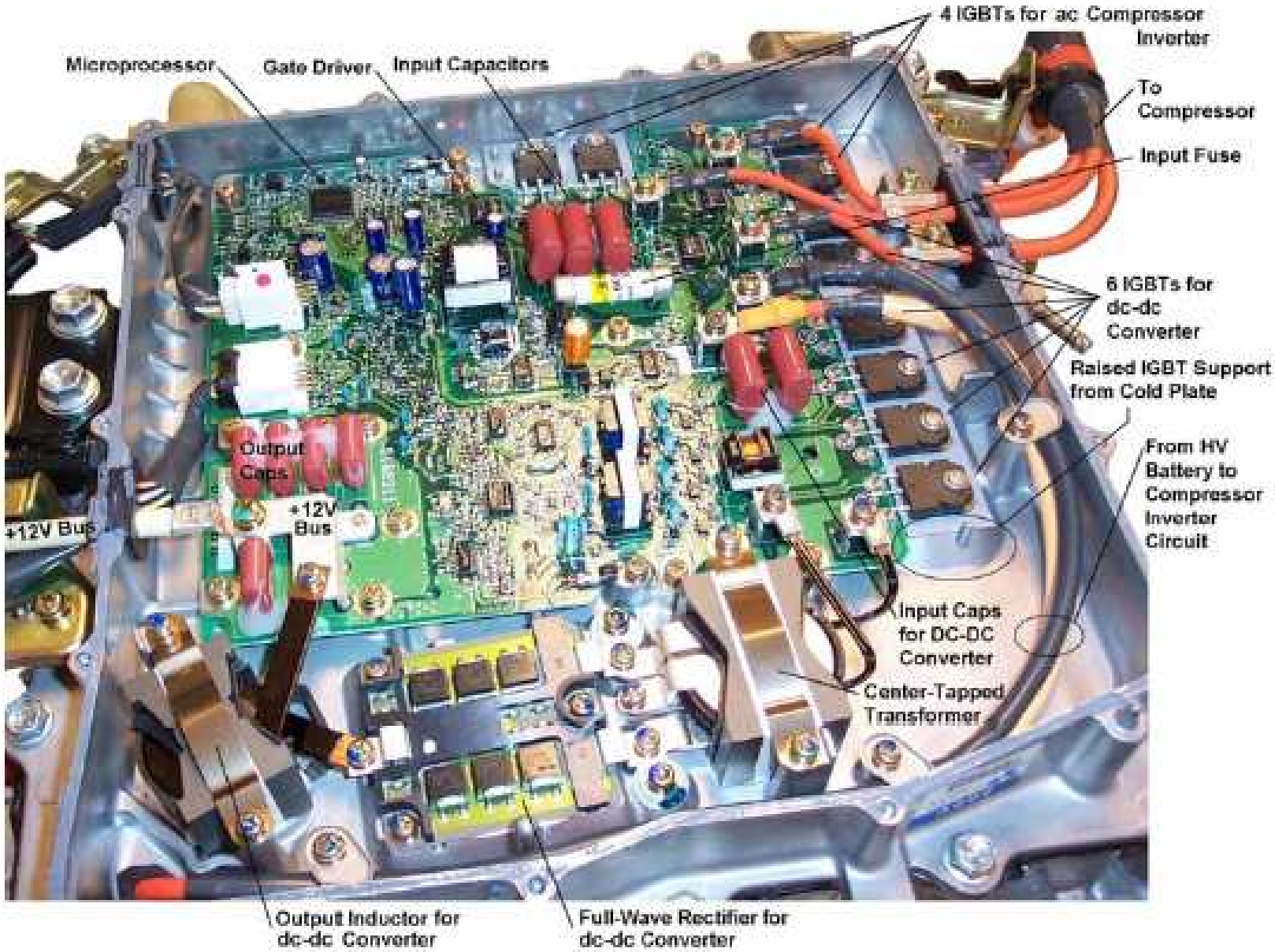
- Boîtier métallique (aluminium)
- Plaque à eau double face <u>intégrée au boîtier moulé</u>.
- IPM (Integrated Power Module) pour le convertisseur élévateur
- Inductance de l'élévateur refroidie sur plaque à eau
- IPM commun pour les onduleurs moteur et générateurs
- Condensateur de découplage unique pour toute l'électronique de puissance
- Circuit de commande de bras de pont sans isolement analogue aux composants IR montés sur la première version de la PRIUS
- Pas de filtrage CEM de type mode commun
- Liaisons électriques de puissance par barre

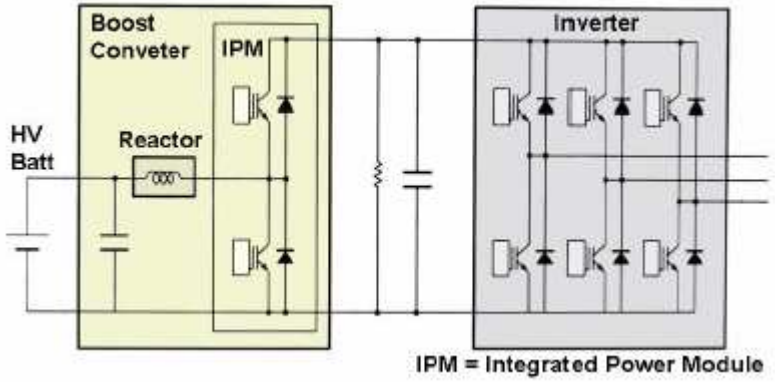

Buck/Boost Converter
Buck/Boost Converter IGBTs (Approximate Location)
Inverter for PMSM and Generator
Plastic Support for Capacitor Module
Coolant Reserve Tank
PMSM Bus
Generator Bus

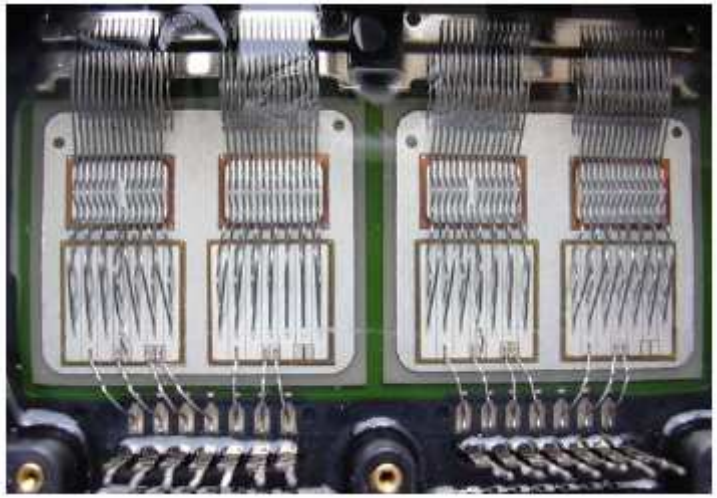

Voltage
Boost
Module
Voltage
Boost
Trans-
former
IPEM

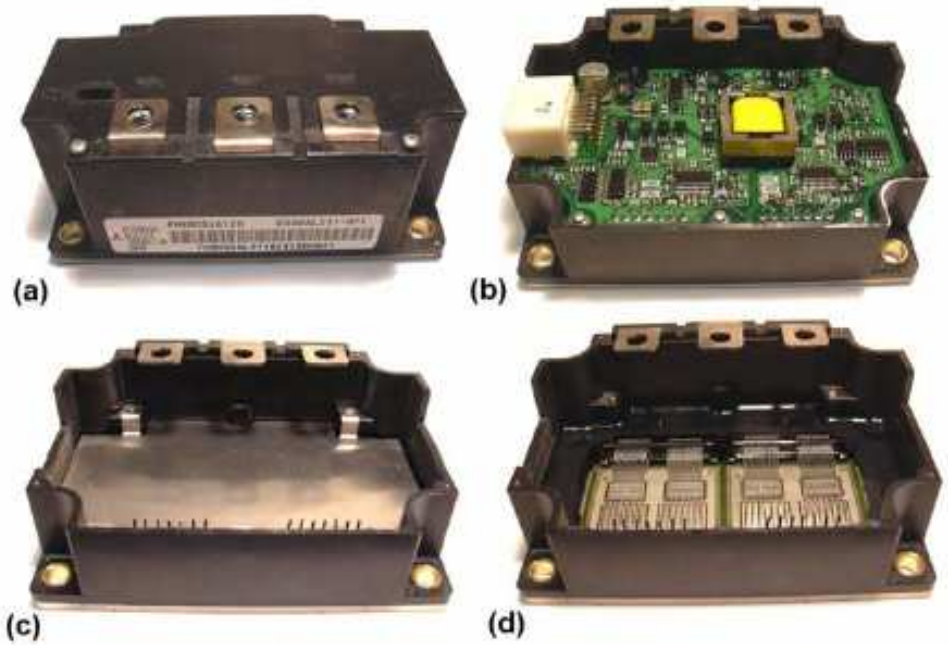


➢ **IPM (Integrated Power Module) commun pour le générateur et le moteur**


4 IGBTs for ac Compressor Inverter
Microprocessor
Gate Driver
Input Capacitors
To Compressor
Input Fuse
6 IGBTs for dc-dc Converter
Raised IGBT Support from Cold Plate
Output Caps
+12V Bus
+12V Bus
From HV Battery to Compressor Inverter Circuit
Input Caps for DC-DC Converter
Center-Tapped Transformer
Output Inductor for dc-dc Converter
Full-Wave Rectifier for dc-dc Converter

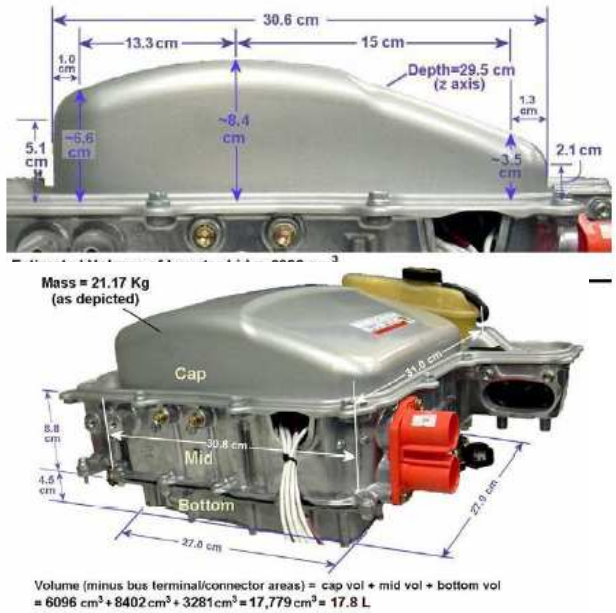






➢ **Boîtier IPM de l'élévateur/abaisseur de la batterie NiMH de puissance**

Item	Volume, L	Peak power density, kW/L	Mass, kg	Specific power, kW/kg
PMSM	15.4	3.25	44.9	1.11
Inverter/converter assembly	14.5	3.45	19.4	2.6
COOLING SYSTEM				
Full radiator assembly	4.19	-	2.05	-
Radiator: portion for hybrid cooling	1.14	-	0.55	-
Hybrid cooling water pump	~0.6	-	0.344	-
BUCK/BOOST CONVERTER				
Converter assembly (complete)	4.7	4.3	4.2	4.8
Transformer	0.74	-	2.57	-
Power module	0.38	-	0.66	-

➢ Répartition des masses et des volumes

⇒ **Les puissances spécifiques et densité de puissances sont calculées par rapport aux <u>puissances crêtes</u> et non par rapport aux puissances permanentes**