



**Ambassade de France au Japon
Service pour la Science et la Technologie**

4-11-44, Minami-Azabu, Minato-ku, Tokyo 106-8514

Tél. : 81-3-5420-8800

Fax : 81-3-5420-8920

Mail : sst@ambafrance-jp.org

URL : <http://www.ambafrance-jp.org>

Domaine	: Transports
Document	: Dépêche
Titre	: Le véhicule propre au Japon : cadre politique, législatif et technologique
Auteur	: Etienne Joly,
Date	: 30 mai 2005
Contact SST	: Etienne Joly, Chargé de Mission Transport et Génie Civil, transport@ambafrance-jp.org
Numéro	:

Mots-clefs	: voiture propre, véhicule propre, hybride, pile à combustible, carburants alternatifs, voiture électrique, hydrogène, émissions, oxydes d'azote, particules, diesel, post traitement, dioxyde d'azote, gaz à effet de serre, Kyoto.
Résumé	: Depuis 20 ans la politique japonaise s'est tournée de façon significative vers les économies d'énergie et la protection de l'environnement. Dans le domaine des véhicules le gouvernement a mis en place un système de régulation très sévère sur la motorisation diesel dans un premier temps. Mais c'est depuis la fin des années 1990, lorsque la société a pris conscience des risques liés au réchauffement de la planète causé par les émissions de gaz à effets de serre, que le mouvement s'est accéléré. Depuis la ratification des accords de Kyoto, les pouvoirs publics japonais ont mis en place aux niveaux national et régional des politiques très strictes pour parer la pollution créée par le transport et le secteur automobile japonais a développé et industrialisé des technologies très innovantes pour faire face aux problèmes environnementaux causés par les véhicules à moteur. Grâce à certaines technologies comme l'hybride avec le succès de la Toyota Prius ou encore les véhicules à piles à combustibles, le Japon gagne un rôle prééminent dans le secteur du véhicule propre.

NB : Toutes nos publications sont disponibles auprès de l'Agence pour la Diffusion de l'Information Technologique (ADIT), 2, rue Brûlée, 67000 Strasbourg (<http://www.adit.fr>).

Sommaire

Sommaire	2
Introduction	3
A Cadre politique et législatif	4
I Politique menée par le gouvernement	4
1) Les lignes directrices pour la prévention des risques liés au réchauffement de la planète (1998)	4
2) La loi de restriction des émissions en oxydes d'azote et en particules (NOx/PM Laws)	5
3) Plan d'action pour le développement et la promotion des LEV	5
II Standards mis en place	7
1) Emissions des véhicules diesel	7
2) Emissions des véhicules à essence	8
3) La consommation des véhicules	8
III Mesures de promotion du véhicule propre	8
B Les technologies de la voiture propre	10
I Les véhicules à motorisation traditionnelle	10
1) Le diesel	10
a- Le catalyseur 4-voies	10
b- Combustion à faible compression	12
c- L'injection homogène contrôlée (HCCI)	12
d- L'injection à commande piezo-électrique	12
2) L'essence	14
a- Le contrôle des valves	14
b- Double allumage à commande électronique	14
II L'hybride thermique/électrique	14
III Les voitures électriques et les carburants alternatifs	15
1) Voiture électrique	15
a- Utilisation du véhicule électrique	15
b- Les modèles	16
c- Le projet Eliica	16
2) L'hydrogène	16
3) Autres carburants alternatifs :	21
a- L'éthanol et le méthanol	21
b- Véhicules au Gaz Naturel (GNV)	21
c- Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL)	21
d- Le diméthyl-éther (DME)	21
Sommaire des annexes	23
Glossaire	43
Liens	46
Table des figures	47
Index des tableaux	48

Introduction

Depuis 20 ans la politique japonaise s'est tournée de façon significative vers l'économie d'énergie et la protection de l'environnement. Les émissions d'oxydes d'azote et de particules des véhicules diesel ont été accusées d'avoir une part très importante dans la pollution de l'air dans les zones urbanisées. Cela a conduit le gouvernement à mettre en place un système de régulation très sévère sur la motorisation diesel depuis la fin des années 1980. Mais c'est depuis la fin des années 1990, lorsque la société a pris conscience des risques liés au réchauffement de la planète causé par les émissions de gaz à effets de serre, que le mouvement s'est accéléré. Avec la ratification des accords de Kyoto, la politique environnementale dans les transports au Japon s'est intensifiée dans la baisse des émissions de polluants et s'est élargie à la baisse de la consommation ainsi qu'à la recherche de nouveaux types de carburants.

Pour la protection de l'air, pour limiter les émissions de gaz à effet de serre ou pour anticiper les problèmes liés à la baisse des ressources en énergies fossiles, le concept de « véhicule propre » qui répond à ses trois problématiques, au Japon comme dans d'autres pays industrialisés, a récemment pris une place prépondérante lorsque l'on aborde les questions du développement et du progrès.

Ces dernières années, les pouvoirs publics japonais ont mis en place aux niveaux national et régional des politiques très strictes pour parer la pollution créée par le transport et le secteur automobile japonais a développé et industrialisé des technologies très innovantes pour faire face aux problèmes environnementaux causés par les véhicules à moteur. Grâce à certaines technologies comme l'hybride avec le succès de la Toyota Prius ou encore les véhicules à piles à combustibles, le Japon gagne un rôle prééminent dans le monde du véhicule propre.

Dans ce rapport nous exposerons dans une première partie les composantes principales qui constituent le cadre politique et législatif du véhicule propre au Japon. Nous développerons les points principaux abordés par les politiques environnementales pour le transport menées par le gouvernement et les mesures qui se sont concrétisées c'est à dire les standards sur les émissions et la consommation des véhicules à moteur régulièrement sévérés et les compensations fiscales et systèmes subventions des autorités pour encourager l'achat de véhicules peu polluants.

Dans une seconde partie nous présenterons les technologies développées au Japon. Les motoristes améliorent sans cesse les véhicules essence et diesel, mais la véritable amélioration attendue à moyen terme au Japon est le véhicule hybride qui connaît pour le moment un essor remarquable. Le Japon dévoile ses perspectives d'avenir avec les carburants alternatifs qui sont en même temps une solution environnementale et une façon de se désolidariser des énergies fossiles.

A Cadre politique et législatif

I Politique menée par le gouvernement

La politique du gouvernement pour limiter les nuisances environnementales occasionnées par le transport motorisé est organisée sur trois grands axes : les lignes directrices pour la prévention des risques liés au réchauffement de la planète, les lois PM/NOx qui régulent les émissions des véhicules diesel et le plan d'action pour promouvoir l'utilisation de véhicules moins polluants.

1) Les lignes directrices pour la prévention des risques liés au réchauffement de la planète (1998)

Le *Global Warming Prevention Headquarters* dirigé par le Premier Ministre Koizumi a été créé en 1997 afin de mettre en place des mesures en vue de se conformer aux exigences du Protocole de Kyoto. En 1998, le comité rédige une série de recommandations appelée *Measures to Prevent Global Warming toward 2010* qui propose d'atteindre les objectifs fixés par le protocole de Kyoto grâce à une meilleure utilisation des transports, une meilleure gestion du trafic, à l'amélioration des circuits de distribution et au développement des transports en commun. Mais les points forts de ce texte pour le transport concernent les mesures visant à :

- Renforcer les standards de la consommation de carburant : Amélioration de 15% à 20% de la consommation des véhicules en 2010 (par rapport aux niveaux de 1995);
- Promouvoir l'utilisation et le développement des *Clean Energy Vehicle* (CEV) - les véhicules à zéro émission - ; des *Low Emission Vehicles* (LEV) - les voitures à faibles émissions - ainsi que des *Fuel Efficient Vehicles* (FEV) - véhicules à faible consommation -.

Cette volonté se traduit par une série de mesures visant à :

- L'aide au développement de ce type de véhicules;
- La promotion de l'usage des véhicules déjà disponibles (entre autre grâce au remplacement du parc automobile de l'administration);
- La mise en place de standards de mesure et de classification des LEV;
- L'encouragement du développement et de l'usage des FEV.

2) La loi de restriction des émissions en oxydes d'azote et en particules (NOx/PM Laws)

Les émissions en oxydes d'azote (NOx) et en particules constituent l'une des principales problématiques créées par le secteur des transports en milieu urbain. Ainsi, en 2003, le Ministère de l'Environnement (MoE) a fixé les standards sur les émissions auxquels doivent se contraindre les véhicules diesel commercialisés en 2005. Ces standards, créés en 1980, voient leurs niveaux baisser au fur et à mesure des révisions mais les niveaux fixés en 2003 sont parmi les plus sévères de la planète.

3) Plan d'action pour le développement et la promotion des LEV

En Juillet 2001, le MLIT (Ministère du Territoire, des Infrastructures et des Transports), le METI (Ministère de l'Economie, du Commerce et de l'Industrie) et le MoE (Ministère de l'Environnement) ont lancé un plan d'actions pour la promotion et le développement des LEV. Ce plan a pour lignes directrices :

- Mettre en circulation 10 millions de LEV avant 2010 (voir Fig.I-1) : c'est à dire d'une part les véhicules propres (*Clean Energy Vehicles*) à gaz naturel, électrique, hybride (essence/batterie), méthanol et d'autre part les véhicules traditionnels atteignant les standards de consommation de 2010 et qui respectent les standards d'émissions en oxydes d'azote et d'hydrocarbure.
- Aider au développement de la prochaine génération de LEV c'est à dire les véhicules à pile à combustible (objectif : introduction de 50 000 véhicules avant 2010) et les motorisations diesel ultra-propres, les systèmes hybrides avancés et les moteurs diméthyl-ether -DME- pour les camions.

Les objectifs de ce plan dégagent trois grandes idées sur la façon dont le gouvernement japonais conçoit sa stratégie sur le véhicule propre. D'abord à court et moyen terme, comme le montre la Fig.I-1, ce seront des véhicules à essence traditionnelle qui remplaceront le parc automobile actuel puisque sur ces 10 millions de LEV (à comparer aux 75 millions environ de véhicules en circulation aujourd'hui), à peine plus d'un tiers seront des CEV. Ces véhicules suivront des normes beaucoup plus strictes en terme d'émissions et de consommation, mais le gouvernement japonais n'envisage pas une rupture importante avec le moteur thermique (même s'il faut souligner l'importance qu'il donne au développement des véhicules hybrides thermique/électrique). Ensuite, plusieurs solutions technologiques (électrique, gaz liquéfié) sont supportées. Même si les véhicules hybrides occupent plus de la moitié du nombre estimé des CEV en circulation en 2010, sa part (60%) baisse par rapport à 2001 (environ 70%) notamment au profit des véhicules à gaz naturel. Enfin, 50 000 véhicules à pile à combustible en 2010, comptés dans la Fig.I-1 dans les véhicules hybrides, est un objectif très optimiste qui souligne la confiance qu'accorde le Japon à cette technologie.

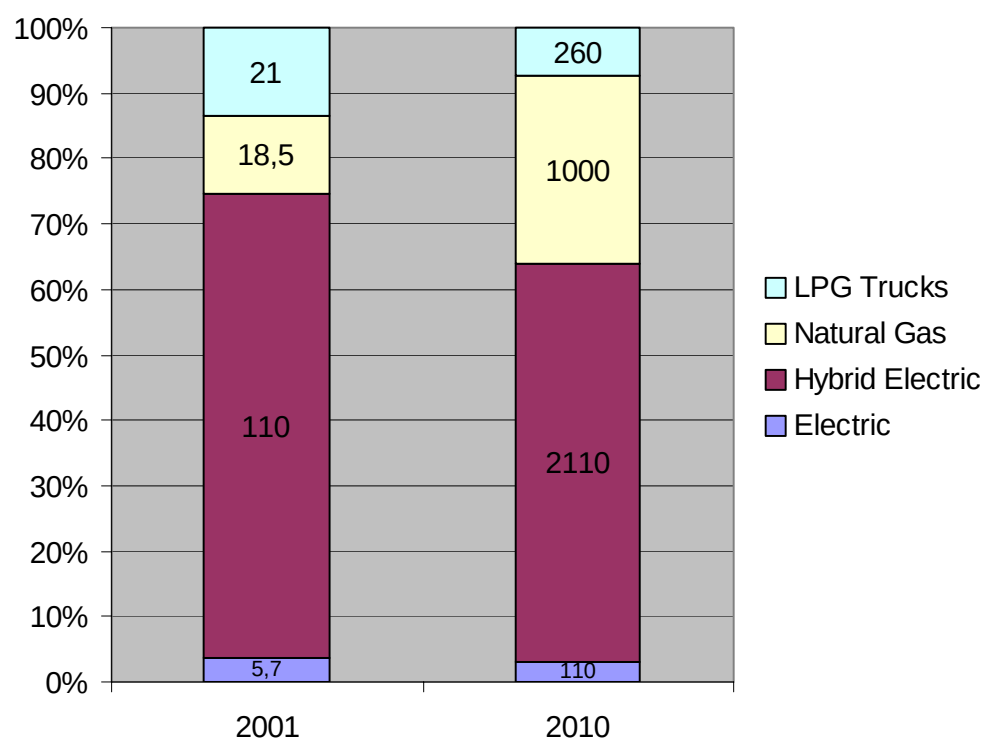


Fig. I-1 Les véhicules propres au Japon en 2010

Répartition des types de véhicules propres en circulation (*Clean Energy Vehicle*) en 2001 (155 000 au total) et 2010 (estimation, 3,48 millions), en milliers de véhicules (Source METI)

II Standards mis en place

Les mesures décrites précédemment ont donné lieu à la mise en place d'un cadre législatif très stricte pour réguler les émissions des véhicules diesel et des véhicules essence ainsi que leur consommation.

1) Emissions des véhicules diesel

La réglementation sur les émissions des véhicules diesel est dirigée par trois cadres réglementaires :

D'abord les limites fixées par le Ministère de l'Environnement (voir Annexe 1, Tab.A-1-2-3) sur les émissions des véhicules commercialisés. Aujourd'hui, ces limites fixent par catégories de véhicules, les émissions des véhicules neufs c'est à dire commercialisés à partir de la date d'entrée en application des standards. A l'heure actuelle, nous entrons dans les standards de 2005, totalement en vigueur à partir de la fin de cette année.

- A partir de 2009, le Ministère de l'Environnement prévoit une restriction drastique des émissions des véhicules diesel (voir Annexe1, Tab.A-4-5-6).
- Ensuite, en 1992, le MoE met en place une série de mesures "spéciales dédiées à la réduction des émissions totales en oxydes d'azote par les véhicules dans certaines régions" appelée *The Motor Vehicle NOx Law*. L'objectif est d'accélérer le remplacement du parc des véhicules diesels en circulation afin que les standards les plus récents soient appliqués le plus tôt possible dans les zones les plus urbanisées. En juin 2001, le MoE met en place une révision de cette loi plus restrictive et prend en compte les dégagements de particules (*Particule Matter*, PM) appelée *Automobile NOx/PM Law*. Ainsi, ne sont autorisés à rouler dans les régions spécifiées (métropole de Tokyo, préfecture d'Aichi (Nagoya), préfectures d'Osaka, de Kanagawa, de Saitama et de Hyogo) les véhicules conformant aux standards fixés aux véhicules commercialisés en 1997/1998 (dans le cas des véhicules lourds, par exemple, la limite est de 4,5 g/kWh pour les oxydes d'azote et 0,25 g/kWh pour les particules).
- Enfin, le gouvernement métropolitain de Tokyo a mis en place en 2001, dans le cadre plus général du programme des « Mesures contre la pollution des véhicules », un programme d'accélération de la *NOx/PM Law* afin de que le parc de véhicules – non particuliers- circulant dans et par sa région adopte des standards d'émissions en particules plus sévères que ceux appliqués au moment de leur commercialisation. Entrée en vigueur en 2003, cette loi locale sur les émissions des véhicules diesel appelée *Tokyo retrofit programme* a été rapidement appliquée dans les préfectures voisines : Saitama, Chiba... (voir Annexe1 Tab.A-7)

2) Emissions des véhicules à essence

Le Ministère des Transports (MLIT) et le Ministère de l'Environnement fixe les standards sur les émissions des nouveaux véhicules à essence. Les standards pour 2005 (voir Tab.I-1 et Fig.I-2) ont été fixés en 2003 et les véhicules qui sont en deçà des niveaux définis à hauteur de 50% et de 75% sont différenciés respectivement par les appellations de véhicules à ultra-faibles émissions (U-LEV, *Ultra-Low Emission Vehicle*) et super ultra-faibles émissions (SU-LEV) et leur acquisition peut donner droit à des réductions sur les taxes automobiles.

Le MoE prévoit l'incorporation de limites sur les émissions en particules à partir de 2009 dans ce système de certification (voir Annexe1, Tab.A-9).

3) La consommation des véhicules

Aujourd'hui, les véhicules particuliers et camions (à l'exception des poids lourds), ont des objectifs de réduction de la consommation à atteindre avant 2005 ou 2010 (Tab. I-2). L'effort total à effectuer en moyenne correspond à une baisse de 22,8% par rapport au niveau de 1995 pour les véhicules cités précédemment et 14,9% (par rapport aux niveaux de 1995) pour les poids lourds.

III Mesures de promotion du véhicule propre

Le Japon a associé à un cadre de règles restrictives sur les émissions et la consommation une politique de mesures pour inciter les consommateurs (qu'il s'agisse d'entreprises ou de particuliers) à utiliser des véhicules plus respectueux de l'environnement.

Il existe au Japon trois types d'incitations financières pour promouvoir l'introduction des véhicules propres:

- Les subventions : le MoE prend en charge la moitié du surcoût occasionné par l'achat d'un véhicule propre (c'est à dire fonctionnant au gaz naturel, avec un système hybride ou électrique, essentiellement les bus). En outre, le coût de la location d'un véhicule à pile à combustible est pris en charge pour moitié par le MoE. Les subventions allouées par le MoE sont destinées uniquement aux collectivités locales et leur budget (environ 2,3 millions d'euros) est nettement inférieur à celui des autres ministères (environ 18 millions d'euros pour le MLIT et 67 millions d'euros pour METI, ces subventions étant destinées aux entreprises) ;
- Les allégements de taxes, sur la possession d'un véhicule ;
- Les prêts à un taux avantageux pour l'achat d'un véhicule propre.

D'autres programmes sont en place comme la promotion des transports publics, la réorganisation du trafic routier, des campagnes pour promouvoir l'arrêt complet du moteur lorsque le véhicule est arrêté ou des mesures spéciales pour l'accès aux sites touristiques.

nouveau mode	Véhicules particuliers (2005)	Camions légers (2007)
Monoxyde de carbone (CO)	1,15	4,02
HCNM (Hydrocarbures hors méthane)	0,05	0,05
Oxydes d'azote (NOx)	0,05	0,05

Tab. I-1 Standards sur les émissions des véhicules à essence
(Source : METI, le mode indique la procédure de test (10/05, nouveau ou JE05 sont trois modes différents))

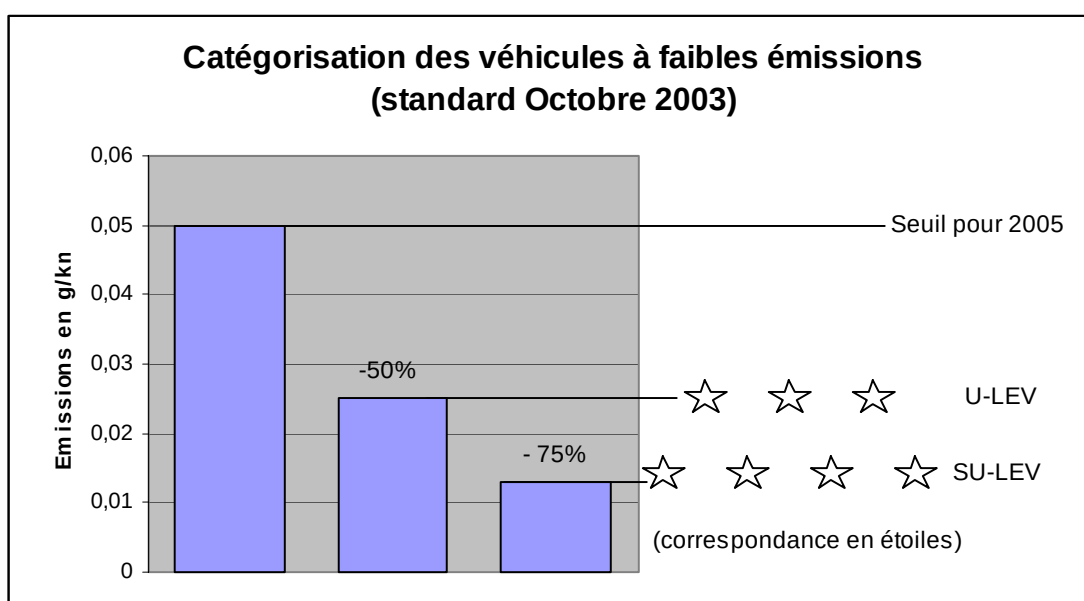


Fig. I-2 Classification des véhicules LEV depuis 2003
En ordonnées, émission en g/km pour les NOx et pour les HCNM (Source METI)

	Année effective	Niveau exigé	Niveau en 2002
Essence	2010	15,1 km/L	14,6 km/L
Diesel	2005	11,6 km/L	10,5 km/L
GPL	2010	9,8 km/L	8,8 km/L

Tab. I-2 Niveaux sur la consommation
(Source METI)

B Les technologies de la voiture propre

La politique menée par le gouvernement japonais pour contraindre le parc automobile à produire moins de polluants et à réduire sa consommation a conduit les industriels japonais à mettre en place de nombreuses solutions technologiques innovantes et parfois très audacieuses. La composition du parc de véhicules motorisés japonais (comme le montre le tableau page suivante) montre que l'actualité du secteur est le moteur à combustion traditionnel dont les performances environnementales ont été beaucoup améliorées. Cette réalité industrielle ne transmet cependant pas une image fidèle de l'ensemble des efforts technologiques de l'industrie japonaise qui se traduisent aussi par des solutions en marge de la motorisation essence ou diesel. Le Japon a une avance considérable dans certaines technologies comme l'hybride dont Toyota et Honda détiennent le monopole ou encore les véhicules à pile à combustible. La recherche dans les carburants alternatifs est aussi une priorité qui s'est traduite par des investissements très importants dans la recherche de nouveaux combustibles dont l'hydrogène, à côtés au gaz de pétrole liquéfié ou encore le gaz naturel, prend la place de favori.

I Les véhicules à motorisation traditionnelle

Les Japonais se distinguent depuis longtemps dans la conception de moteur à essence. Les développements effectués dans ce domaine (contrôle des soupapes, systèmes d'allumage...) se concentrent vers l'amélioration de son rendement afin de limiter les émissions de CO₂. Le diesel est pratiquement absent du marché au Japon mais les constructeurs restent très présents dans ce domaine afin de gagner le marché européen pour lequel il est incontournable.

1) Le diesel

Le diesel est très peu développé pour les voitures particulières au Japon à cause d'une réglementation très restrictive. Ainsi, les technologies diesel sont soit développées pour le transport de marchandise (train, camions) ou bien pour les véhicules commercialisés en Europe. Malgré le handicap créé par l'éloignement du marché, de nombreux constructeurs japonais comme Isuzu, Toyota ou Mitsubishi sont, ou ont été, tout de même très présents sur certaines technologies clés du diesel (rampe commune, technologies post-traitement, *down-sizing*) et les retardataires comme Honda, qui a commercialisé son premier moteur diesel il y a à peine plus d'un an, font des efforts remarquables pour rattraper leurs concurrents.

a- Le catalyseur 4-voies

Le catalyseur 4 voies est la dernière génération de système de traitements des gaz d'échappement des moteurs diesel. 4 voies sous-entend un système qui traite les particules, les hydrocarbures (HC), le monoxyde de carbone (CO) et les oxydes d'azote (NO_x). L'innovation réside dans l'association d'un système de traitement des NO_x, déjà utilisé pour les voitures à essence, avec un filtre à particules.

Le système DPNR (*Diesel Particulate-NOx Reduction System*, voir Annexe2) mis au point par Toyota, associe un piège à NOx avec un filtre à particules et traite de cette façon deux des problèmes environnementaux causés par la propulsion diesel.

	2001	2002	2003	2004
Véhicules hybrides	50 556	74 255	90 876	132 118
Véhicules au gaz naturel comprimé	7 811	12 012	16 561	20 638
Véhicules électriques	3 800	4 700	5 600	7 700
Véhicules au méthanol	176	132	92	57
Véhicules à moteur à combustion (faible consommation ou faibles émissions, FEV et LEV)	569 170	2 081 379	4 472 323	6 962 491
Total du nombre de véhicules à faibles émissions (1)	631 523	2 172 478	4 585 452	7 123 004
Nombre total de véhicules (2)	72 369 917	73 066 952	73 631 557	74 071 066
Rapport (1)/(2)	0,9%	3,0%	6,2%	9,6%

Tab. II-1 Le parc motorisé (nombre de véhicules quatre roues en circulation) japonais entre 2001 et 2004
(source METI)

b- Combustion à faible compression

Les moteurs diesel fonctionnent avec des taux de compression plus élevés que ceux des moteurs essence. Le taux de compression est situé typiquement entre 18:1 et 25:1 sur les moteurs diesel actuels. Plus le taux de compression est élevé et plus le moteur est puissant, seulement, une tendance à baisser le taux de compression dans les cylindres des moteurs diesel commence à apparaître. Le premier moteur de Honda, le i-CTDi récemment commercialisé, a un taux de compression ramené à 16,7:1. Cela permet de diminuer les vibrations, le bruit et de diminuer la consommation à vitesse et charge moyenne, puisqu'une compression moins élevée entraîne une résistance à l'entraînement moins importante. La perte de puissance peut-être compensée par l'action d'un turbocompresseur à géométrie variable qui permet de fournir du couple et de la puissance dès que le moteur à une demande en charge.

c- L'injection homogène contrôlée (HCCI)

Toyota a mis au point le « Unibus », un système d'injection homogène HCCI (*Homogeneous Charge Compression Ignition*). L'objectif est de pulvériser le carburant en plusieurs temps afin d'obtenir un mélange homogène entre l'air et le carburant dans la chambre de combustion (voir Fig.II-1). Cela permet d'obtenir une combustion avec des flammes moins chaudes, ce qui produit moins de suies et de NOx (Fig. II-2). Le système est essentiellement adapté aux gammes faibles et moyennes de charges et de régimes pour lesquelles le HCCI pourrait réduire presque totalement les émissions de NOx et de particules tout en maintenant un bon rendement.

La combustion HCCI est un domaine largement étudié par les constructeurs et plusieurs concepts différents sont en développement. Le PCI de Mitsubishi et le Unibus de Toyota, qui fonctionnent sur le même principe d'injection prématurée, se démarque particulièrement par le compromis acceptable qu'il propose entre la diminution des NOx et particules produites et l'augmentation des CO, HC et la surconsommation occasionnées. Il faut aussi souligner l'importance de la précision de l'injection (effectuée par des injecteurs piezo), le rôle joué par la compression variable (ratio compris entre 12:1 et 21:1) et le contrôle des gaz recyclés sur l'efficacité de ce système.

d- L'injection à commande piezo-électrique

L'injection est un domaine dans lequel de nombreuses améliorations peuvent être encore apportées. La précision, la pression et la gestion des intervalles des injections sont des paramètres sur lesquels reposent plusieurs concepts prometteurs pour la diminution de l'impact environnemental des motorisations diesel. La commande piezo-électrique de l'injection, dont Denso, équipementier japonais, prévoit de débiter la production en 2005, offrira la possibilité de commander des injections à intervalles de 0,1 milliseconde et à des pressions de 2000 bar (le modèle prévu de Denso pour 2005 sera à 1800 bar).

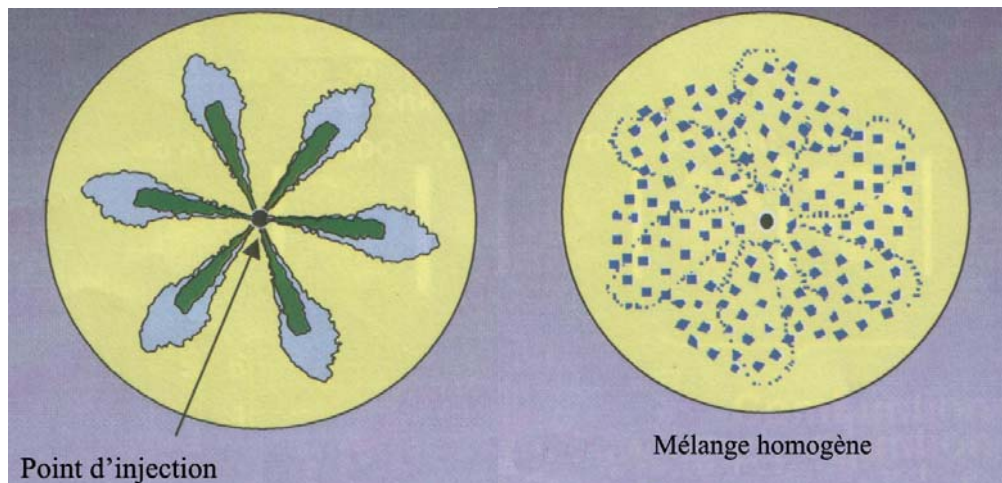
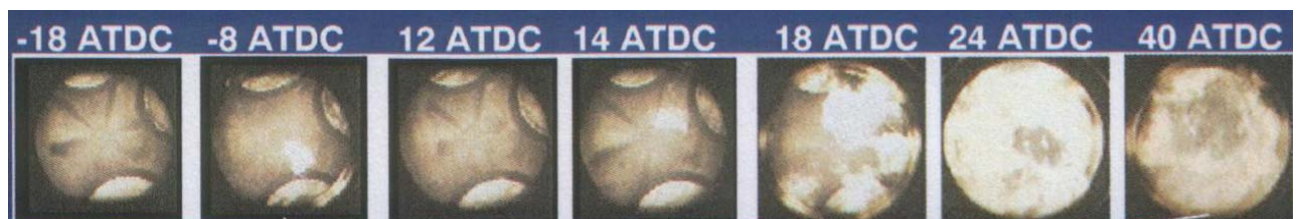
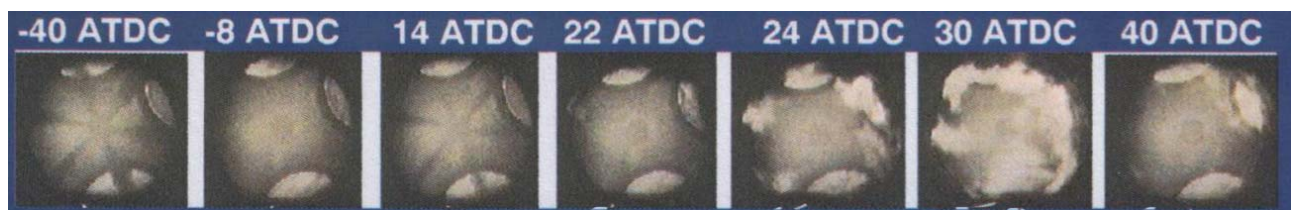


Fig. II-1 Différences d'homogénéité du mélange

A gauche une injection directe unique et à droite la vue du mélange après une double-injection par le système Unibus (schéma montrant l'intérieur du cylindre vu du bas ; source Toyota)



Combustion dans un cylindre après une injection : Les trois dernières photos montrent un cylindre très illuminé par les flammes de la combustion. A noter les « effets de bords », ricochets du carburant sur le cylindre, un effet que tentent de limiter les développements récents effectués dans les angles d'injections très aigus.



Combustion dans un cylindre après une double-injection par le système Unibus de Toyota : On remarque qu'une première injection est effectuée bien avant et les trois dernières photos montrent moins de flammes que dans la séquence précédente.

Fig. II-2 L'injection homogène contrôlée provoque moins de flammes

(photos successives de l'intérieur du cylindre vu du bas de l'injection à la combustion, ATDC : *after top dead center*, 0 degré étant le point mort haut)

2) L'essence

L'essence occupe plus de 99% du marché de l'automobile japonaise parce qu'il jouit d'une meilleure réputation environnementale que le diesel. Pourtant, les récentes implications du Japon dans une politique de baisse des émissions de gaz à effet de serre poussent les motoristes à améliorer le rendement des moteurs essence afin de baisser les rejets de CO₂. Parmi les réalisations récentes on peut noter l'amélioration du système de contrôle des valves et le double allumage à commande électronique.

a- Le contrôle des valves

C'est à Honda que l'on doit le premier système de contrôle de la variation des valves en 1981 : le VTEC (*Variable Valve Timing and Lift Electronic Control*). Le VTEC et sa récente extension i-VTEC, « i » pour « intelligent », est un système de contrôle du temps de levée des soupapes. L'objectif est de contrôler aussi précisément que possible le mélange air/essence et l'échappement des gaz en fonction du régime et de la charge du moteur. Le principe est basé sur la synchronisation des soupapes d'admissions sur celles des soupapes d'échappement grâce à un dispositif mécanique contrôlé électroniquement qui modifie le profil des cames. L'ouverture des soupapes d'admission est, de cette façon, ou retardée ou avancée. D'autre part, l'admission est aussi contrôlée par l'ouverture des deux soupapes pour les hauts régimes et d'une seule pour les bas régimes. La combinaison du système i-VTEC et de l'injection directe permet un meilleur contrôle de la combustion grâce à une injection et un mélange air/essence synchronisés sur le régime et la charge du moteur. Cela permet d'obtenir des gains à la fois en termes d'économie de carburant, d'émissions et aussi de puissance et de couple. Des systèmes similaires existent chez les concurrents de Honda (*Variable Valve Lift* chez Nissan, *Variable Valve Timing with Intelligence* chez Toyota).

b- Double allumage à commande électronique

Chez Honda, tandis que les i-VTEC sont conçus pour des moteurs de cylindrées comprises entre 2,0 à 2,4 litres, les i-DSI sont conçus pour des moteurs de véhicules plus petits (cylindrées entre 1,2 et 1,5 litres). Le i-DSI (*Dual and Sequential Ignition*) détermine le point d'allumage en fonction du régime et de la charge du moteur. L'architecture du système se base sur un double-système d'allumage, c'est à dire avec deux bougies fonctionnant en séquentiel ou simultanément. L'objectif est de permettre une combustion rapide quel que soit le régime du moteur. Le Honda Jazz 1,4 L obtient de cette façon l'une des meilleures performances en terme de consommation avec un score de 5,7L/100 km en cycle mixte (source ADEME).

II L'hybride thermique/électrique

En 2004, la commercialisation de la Prius 2 a marqué la concrétisation de la technologie dite « hybride » (entendre hybride moteur thermique/moteur électrique). L'hybride débute véritablement avec la commercialisation de la Prius en 1997 suivie par celle de l'Insight de Honda. A l'heure actuelle, ces deux constructeurs japonais sont les seuls à proposer leur propre système hybride : THS (*Toyota Hybrid System*) pour Toyota et IMA (*Integrated Motor Assist*) pour Honda. D'autres constructeurs (Nissan, Ford, GM...) ont décidé de commercialiser des véhicules hybrides grâce à

des accords commerciaux passés avec l'un ou l'autre des deux groupes japonais. L'avantage concurrentiel conféré par cette avance peut être modéré par l'importance actuelle du marché, l'enjeu technologique est important pour réduire les surcoûts occasionnés, indispensable pour la diffusion en masse de l'hybride. Les récentes avancées technologiques, notamment dans les batteries, ont permis à Toyota de surmonter les problèmes rencontrés avec la première génération de Prius (détérioration de la batterie) et d'offrir un modèle de deuxième génération acceptable pour le marché en termes de prix et de performances. Cependant, le surcoût de l'hybride est mieux perçu par le consommateur si l'on compare un modèle à propulsion traditionnelle à un véhicule hybride équivalent. Comparaison que l'on peut d'ores et déjà effectué avec les Civic et Accord, qui sont des modèles proposés avec une motorisation hybride et une motorisation standard (commercialisées par Honda). (Voir Annexe 3).

Les performances actuelles et les possibilités offertes par l'hybridation sont reconnues mais la percée de la technologie sur le marché va beaucoup dépendre de la capacité des constructeurs à diminuer les coûts de production occasionnés par la multiplication et la complexification des éléments.

(L'hybride est décrit de façon plus détaillée (système, différences entre IMA et THS...) dans l'annexe 3)

III Les voitures électriques et les carburants alternatifs

1) Voiture électrique

a- Utilisation du véhicule électrique

Comme le montre le tableau Tab.II-1, les voitures électriques ont une part très faible du marché de l'automobile. L'idée d'une voiture qu'il faut recharger ne fait pas l'unanimité chez les constructeurs japonais. L'autonomie très faible et le temps de chargement très long des batteries (à comparer avec l'autonomie et au plein d'un véhicule traditionnel) conduit les industriels à favoriser l'emploi d'une pile à combustible ou d'un moteur thermique (comme les hybrides) pour recharger la batterie.

La voiture électrique actuellement au Japon s'emploie essentiellement dans les programmes de location. Il s'agit de mini-voitures et le succès du système ne repose pas uniquement sur le véhicule mais surtout sur le système de réservation qui doit être le plus intelligent possible. On n'envisage pas ici le véhicule mais un mode de transport, ce qui est complètement différent du mode de consommation actuel de l'automobile – qui est prévue pour un usage individuel-, on se trouve ici dans un système qui se situe entre le véhicule individuel et le transport en commun.

Les constructeurs japonais développent des véhicules électriques et les commercialisent. Cependant, à l'instar de la Colt EV de Mitsubishi annoncé récemment, les constructeurs attendent dans le développement de véhicules électriques des retombées technologiques dans d'autres domaines comme les hybrides et les voitures à pile à combustible et pas une solution de remplacement aux véhicules actuels.

La voiture électrique offre un moyen de transport sans émissions de gaz, peu encombrant et dédié à des déplacements dans un périmètre limité. Avec une extension à grande échelle d'un réseau de location de mini-voitures électriques, on peut

considérer ce type de véhicule comme un bon outil de la mobilité urbaine dans la mesure où il s'agit d'un moyen de transport pour de faibles distances, peu polluant et occupant peu de place pour le stationnement. Cependant les programmes de réseaux de voitures électriques existent mais sont peu nombreux.

b- Les modèles

Mitsubishi a annoncé en début d'année fiscale 2005 le développement d'une version entièrement électrique de sa Colt. Le prototype actuel fonctionne avec deux moteurs montés derrière chacune des roues arrières et l'électricité est stockée dans une batterie lithium-ion. L'ambition du constructeur est clairement de capitaliser de l'expérience dans la motorisation électrique en vue de retombées dans de futurs véhicules hybrides ou à pile à combustible. Les véhicules proposés par les constructeurs sont en général des mini-voitures. On peut citer la Nissan Hyper-mini (voir Fig. II-3, page suivante), les Suzuki Alto EV et Every EV, les Daihatsu Atrai EV et Hijet EV ou encore la Toyota E-com.

c- Le projet Eliica

Avec une vitesse de pointe à plus de 350 km/h l'Eliica (*Electric Lithium-Ion Battery Car*) fait figure d'exception dans le paysage des véhicules électriques. L'Eliica n'est pas une voiture commercialisée, c'est un projet dirigé par le Professeur Shimizu de l'Université Keio. Le Prof. Shimizu s'est consacré au développement de véhicules électriques et l'Eliica est son dernier projet en date. L'objectif est de rompre avec l'image portée par les voitures électriques actuelles en battant les voitures thermiques traditionnelles sur leurs terrains d'excellence : la vitesse et l'accélération. Les deux véhicules sortis du laboratoire du Prof. Shimizu ont battu deux records : un record de vitesse (370 km/h) et un record d'accélération (160 km/h en 7 secondes contre plus de 9 secondes pour une Porsche 911 turbo) et le laboratoire désire pousser encore plus loin les capacités de leurs voitures. Les voitures du laboratoire se distinguent par leur aspect original causé par son architecture (voir Fig. II-4 page suivante et Annexe 4). Les moteurs électriques sont positionnés derrière chacune des 8 roues (cela s'appelle le *in-wheel motor*, formule très en vogue dans les concept-car à pile à combustible comme le Toyota Fine-N) et les batteries au lithium font partie intégrante du plancher. Le châssis prend alors une forme très différente (voir Annexe 4, Fig.A-21) des voitures traditionnelles dont l'architecture est conditionnée par le bloc moteur et les organes de transmission.

2) L'hydrogène

L'hydrogène est abordé de deux façons différentes dans l'industrie automobile japonaise. La première approche, largement majoritaire, est l'emploi de l'hydrogène pour approvisionner une voiture à pile à combustible (PAC). La seconde est la combustion directe de l'hydrogène dans un moteur, approche initiée par BMW, qui est menée par Mazda au Japon dans le cadre de son projet RX8-H2. Les constructeurs japonais développent leurs véhicules à pile à combustible dans le cadre du projet JHFC.

Le JHFC :

Le Japan Hydrogen Fuel Cell Demonstration Project est un projet financé par le Ministère de l'Industrie japonais, METI, qui a pour objectif d'évaluer la faisabilité du développement de la filière hydrogène pour le transport particulier. Le projet fait fonctionner 12 stations à hydrogène dans la région autour de Tokyo qui servent à réapprovisionner les quelques 47 véhicules à PAC qui ont rejoint le programme. Différents modes de production sont étudiés sur ces sites ainsi que les moyens de transport de l'hydrogène.



Fig. II-3 Nissan Hypermini

Voiture électrique deux places, 100km/H et 130 Km d'autonomie



Fig. II-4 Les deux voitures du projet Eliica

Un design extérieur original à cause de leurs huit roues, leurs blocs d'éclairage. Le modèle de gauche a atteint les 160 km/h départ arrêté en 7,0 secondes et le modèle de droite a réussi à rouler à 370 km/h (Source Eliica)

L'hybride PAC

Le choix des constructeurs est dirigé sur les véhicules hybride (voir Fig.II-5), c'est à dire que, de la même façon qu'une Prius ou un Insight, la batterie vient servir de source de stockage.

Les PAC embarquées dans les véhicules japonais sont des PEM, dont le fonctionnement est schématisé Fig.II-7. L'énergie est créée grâce à la réaction inverse de l'électrolyse de l'eau. L'hydrogène en se séparant en protons va libérer des électrons et former de cette façon un courant électrique. L'oxygène de l'air va se séparer sur l'électrode positive pour former de l'eau avec les protons qui auront traversé la membrane.

Le principe de base est relativement simple mais la réalisation pratique est beaucoup plus complexe. Les schémas de la figure II-7 mettent bien en exergue le rôle de la membrane PEM sur laquelle repose le flux des protons. Les séparateurs, dans lesquels circulent les gaz doivent permettre une circulation optimale mais doivent aussi se faire le plus fin et léger possible (une PAC est une association d'une multitude de ces cellules). L'un des principaux freins au développement industriel de cet élément, outre la complexité de son montage, est que la réaction nécessite l'emploi d'un catalyseur pour obtenir des résultats suffisants, et ces catalyseurs sont plus ou moins coûteux et/ou fragiles. (L'hybride PAC est plus détaillé dans l'Annexe 5).

Mazda RX-8 à hydrogène

Mazda poursuit une route différente de celle de ses concurrents concernant l'hydrogène. Le constructeur a présenté au *Tokyo Motor Show* de 2003 une version à hydrogène de son coupé sport RX-8. Il n'y a pas de pile à combustible dans cette voiture : l'hydrogène est directement brûlé dans le moteur. Cela permet à Mazda de produire un modèle proche du modèle essence d'origine. Les grandes différences, schématisées figure II-8 page suivante, résident dans le coffre dans lequel se trouve le réservoir à hydrogène sous pression (décrit dans l'annexe 5) et un circuit de circulation dédié à l'hydrogène qui achemine le combustible du coffre au moteur. Le circuit à essence n'a pas été supprimé pour permettre au moteur de fonctionner à l'essence et à l'hydrogène. Cela permet, selon le constructeur, de fournir une véritable solution à moyen terme, période pendant laquelle les infrastructures d'approvisionnement en hydrogène ne seront pas généralisées. Le moteur de la RX-8 est un moteur particulier puisqu'il s'agit d'un moteur à pistons rotatifs appelé moteur Wankel, du nom de l'ingénieur allemand qui l'a inventé (voir Fig.II-9, page suivante).

Le moteur Wankel a posé de nombreux soucis à Mazda (dernier constructeur à le développer) à cause des problèmes d'étanchéité que pose son architecture. Avec le moteur de la RX-8 à essence, Mazda avait fait de nombreux efforts pour palier à ces problèmes en adoptant des joints très performants. Cependant, l'emploi de l'hydrogène risque d'accentuer les problèmes d'étanchéité.

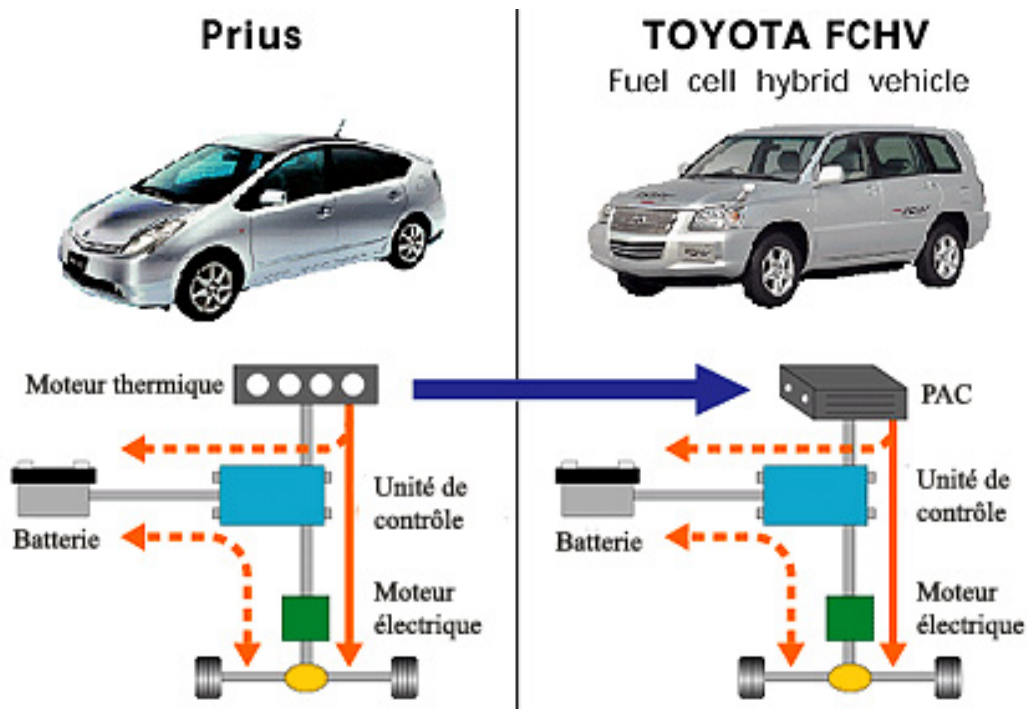


Fig. II-5 Comparaison hybride Prius et hybride FCHV
Le concept est globalement le même, la PAC remplace le moteur thermique.
(Source Toyota)

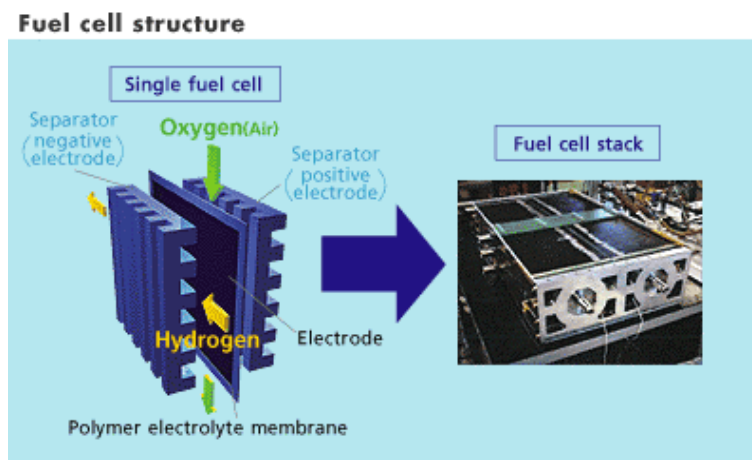


Fig. II-6 Schéma d'une cellule
Plusieurs cellules (à g.) sont assemblées pour former la PAC (photo de droite ; Source Toyota)

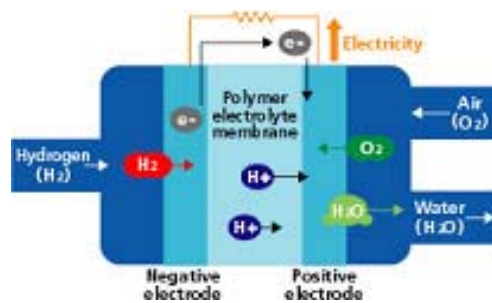


Fig. II-7 La réaction dans la PAC
Pour créer un courant électrique, on utilise la réaction opposée à l'électrolyse de l'eau. (Source Toyota)

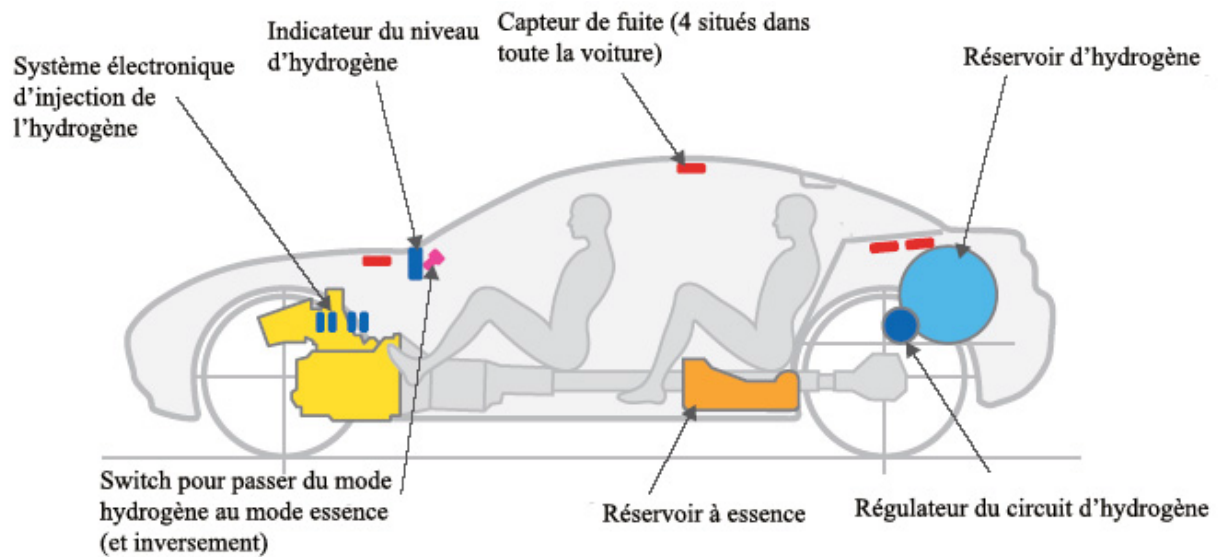


Fig. II-8 Mazda RX-8 à hydrogène
Schéma de la coupe du véhicule, en couleurs ses éléments principaux

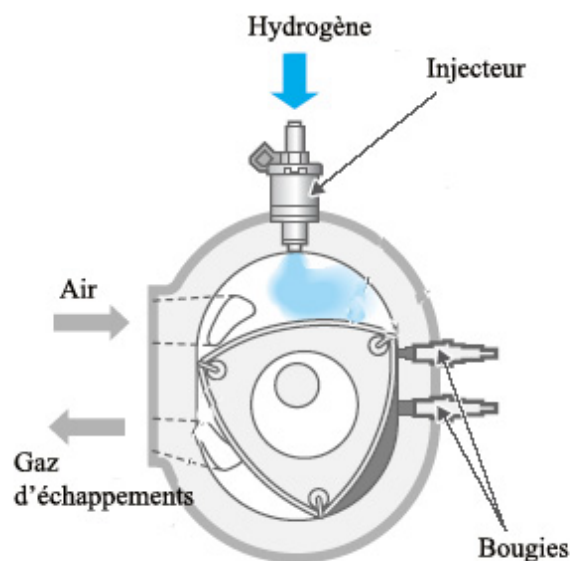


Fig. II-9 Coupe d'un piston du moteur Wankel de Mazda
(qui possède deux pistons l'un derrière l'autre)

Le triangle au centre est le rotor. L'espace entre le rotor et le stator (contour) crée les chambres dont le volume varie au cours du mouvement, ce qui permet d'effectuer les phases, identiques à celles d'un moteur essence (injection, compression, combustion...), de façon quasi continue.

3) Autres carburants alternatifs :

a- L'éthanol et le méthanol

Les alcools comme l'éthanol et le méthanol peuvent être utilisés comme carburant. Ces carburants, mis à part quelques bus, ne sont pas utilisés au Japon comme le montre le tableau I-1 (57 véhicules produits en 2004).

b- Véhicules au Gaz Naturel (GNV)

Le Japon possède actuellement un parc roulant de plus de 18 000 véhicules fonctionnant au gaz naturel. Les GNV font faces à des inconvénients: la densité d'énergie faible, la nécessité de développement à grande échelle d'infrastructures lourdes ou encore la qualité variable du combustible d'une région à une autre.

c- Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL)

Le GPL, du point de vue environnemental, possède l'avantage de produire beaucoup moins d'hydrocarbures, d'oxydes d'azote ou de monoxyde de carbone qu'un véhicule à essence. Cependant, son usage au Japon (290 000 véhicules en 2003, source : Institut Français du Pétrole) est pratiquement exclusivement utilisé par les taxis qui ont reçu des subventions pour la conversion à partir du diesel.

d- Le dyméthyl-éther (DME)

Le dyméthyl-éther est un carburant « propre » de synthèse qui peut s'utiliser dans des moteurs diesel et qui est potentiellement, à un autre niveau, capable de servir de source pour la génération d'hydrogène. Le procédé de fabrication est le fruit de recherches japonaises menées dès 1989 et qui avaient pour objectif de réutiliser les gaz chauds des hauts fourneaux des aciéries. Le DME, du point de vue des émissions (peu de NOx, pas de fumées) et des émissions de CO2 (voir Fig.II-10), pourrait être un carburant très compétitif par rapport au diesel.

Comme il ne nécessite pas de piège à particules, le coût d'un véhicule au DME pourrait devenir acceptable dans le cadre d'une production à grande échelle, surtout dans le secteur des camions. Un système d'injection et un réservoir spécifiques représentent tout de même des freins à la commercialisation de véhicules au DME.

Le DME peut être produit à partir de gaz naturel, de biomasse ou de charbon. Un consortium d'entreprises s'est regroupé autour du groupe japonais JFE Holding afin d'évaluer les différentes technologies de production du DME et les voies de diffusion du combustible dans les transports, l'industrie... Le Groupe Total dirige un programme pilote de production de DME au nord du Japon à Kushiro.

Le coût de production est encore élevé actuellement et la commercialisation à grande échelle du combustible dans le domaine du transport, à l'instar du GPL et du Gaz Naturel, dépendra aussi du développement des infrastructures pour l'approvisionnement des véhicules.

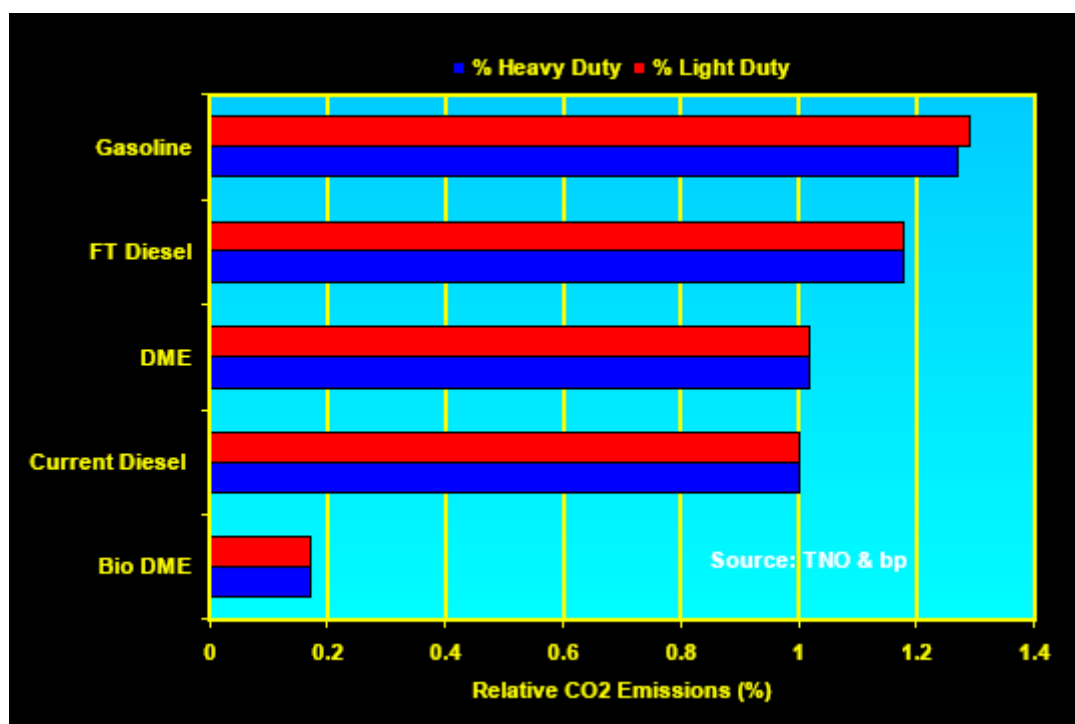


Fig.II-10 Emissions de CO2, du puits à la pompe
(Source IDA, International DME Association)

Sommaire des annexes

<i>Annexe 1 Limites sur les émissions des véhicules diesel (2003-2009) et essence (2009).....</i>	<i>24</i>
<i>Annexe 2 Le DPNR.....</i>	<i>26</i>
<i>Annexe 3 Motorisation hybride</i>	<i>27</i>
<i>Annexe 4 Eliica</i>	<i>39</i>
<i>Annexe 5 Hydrogène.....</i>	<i>41</i>

Annexe 1 Limites sur les émissions des véhicules diesel (2003-2009) et essence (2009)

Nouveau mode, g/km	Véhicules particuliers (<1265kg)	Véhicules particuliers (>1265kg)
Monoxyde de carbone	0,63	0,63
Hydrocarbure (hors méthane)	0,024	0,024
Oxydes d'azote	0,14	0,14
Particules	0,013	0,014

Nouveau mode, g/km	Véhicules commerciaux (<1700kg)	Véhicules commerciaux (>1700kg)
Monoxyde de carbone	0,63	0,63
Hydrocarbures (hors méthane)	0,024	0,024
Oxydes d'azote	0,14	0,25
Particules	0,013	0,015

Mode JE05 g/kWh	Véhicules lourds(>3500kg)
Monoxyde de carbone	2,22
Hydrocarbures (hors méthane)	0,17
Oxydes d'azote	2,0
Particules	0,027

Tab. A-1-2-3 Standards sur les émissions diesel, niveaux de 2003

(Source : MOE, le mode indique la procédure de test (10/15, nouveau ou JE05 sont trois modes différents))

Nouveau mode, g/km	Véhicules particuliers
Monoxyde de carbone	0,63
Hydrocarbure (hors méthane)	0,024
Oxydes d'azote	0,08
Particules	0,005

Nouveau mode, g/km	Véhicules commerciaux (<1700kg)	Véhicules commerciaux (>1700kg)
Monoxyde de carbone	0,63	0,63
Hydrocarbures (hors méthane)	0,024	0,024
Oxydes d'azote	0,08	0,15
Particules	0,005	0,007

Mode JE05 g/KWh	Véhicules lourds(>3500kg)
Monoxyde de carbone	2,22
Hydrocarbures (hors méthane)	0,17
Oxydes d'azote	0,7
Particules	0,01

Tab.A-4-5-6 Standards sur les émissions des véhicules diesel, niveaux de 2009

(Source : MOE, le mode indique la procédure de test (10/05, nouveau ou JE05 sont trois modes différents))

Catégories	Réduction en 1ère période (2003)	Réduction en 2ème période (2005)
Véhicules qui respectent les standards de 1989/1990 (ou qui sont en deçà)	60%	70%
Véhicules qui respectent les standards de 1993/1994	30%	40%
Véhicules qui respectent les standards de 1997/1998/1999	n.a.	30%

Tab. A-7 Les exigences du plan du *retrofit* de la métropole de Tokyo
(source www.dieselnet.com)

	Emissions en particules
Véhicules particuliers	0,005 g/km
Camions légers	0,005 g/km
Camions (intérieurs à 1700 kg)	0,005 g/km
Camions (entre 1700 kg et 3500 kg)	0,07 g/km
Camions (supérieur à 3500 kg)	0,01 g/kWh

Tab. A-8 Standards sur les émissions en particules des véhicules essence en 2009
(source METI)

Annexe 2 Le DPNR

Le moteur diesel, fonctionne en combustion pauvre c'est à dire avec plus d'air dans le mélange air/carburant qu'il n'est nécessaire pour brûler tout le combustible. Cela résulte en une consommation optimisée et une faible production d'imbrûlés et on retrouve ainsi peu de CO et de HC dans les échappements. Par contre, les oxydes d'azote y sont en grande quantité. Pour parer à ce problème, le piège à NOx, comme un filtre, va retenir les NOx lors du passage des gaz (voir Fig.A-1). Grâce à l'action d'un catalyseur situé sur la surface du piège, le monoxyde d'azote va s'oxyder avec l'oxygène et se fixer sous forme de nitrate dans la céramique. Se pose alors le problème de la régénération du piège : il faut pouvoir déstocker le nitrate régulièrement. Le système de Toyota libère les NOx piégés lors d'un cycle « artificiel » en combustion riche du moteur. Le système va, pendant un temps limité, augmenter la part de combustible dans le mélange air/carburant afin que les gaz d'échappement libèrent des hydrocarbures et surtout du CO. Ces composants vont venir libérer les composés azotés du piège et réduire le dioxyde d'azote pour produire de l'azote et du CO₂. De l'oxygène actif est libéré avec le dioxyde d'azote et vient oxyder les particules dans le filtre situé en aval du piège à NOx.

Les cycles en combustion riche entraînent une augmentation de la consommation ce qui pose une contrainte de plus au problème des échappements des moteurs diesel : il faut trouver le meilleur compromis consommation/échappement NOx. De plus, le principe du piège à NOx fonctionne aussi très bien avec les oxydes de soufre qui peuvent alors obstruer les pores du piège et réduire dramatiquement la durée de vie du système. Cela implique l'emploi d'un carburant à très faible teneur en soufre (l'emploi de systèmes de désulfuration serait pour le moment beaucoup moins efficaces).

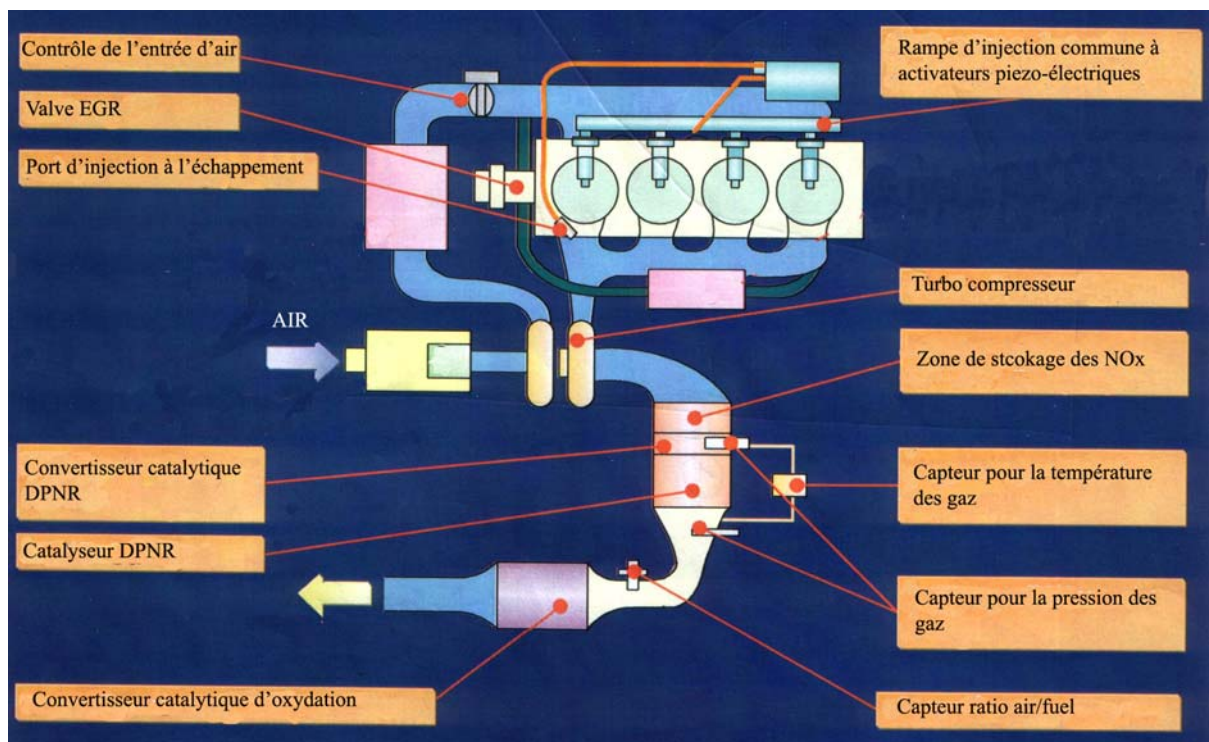


Fig. A-1 Le DPNR, système post-traitement de Toyota
(Source Toyota)

Annexe 3 Motorisation hybride

Principe de l'hybride

Le principe de l'hybride thermique/électrique est d'associer l'autonomie, la puissance et la souplesse de l'utilisation du moteur thermique avec le couple et le fonctionnement « propre » du moteur électrique. Pour cela, le THS (*Toyota Hybrid System*, le système hybride de Toyota) et l'IMA (*Integrated Motor Assist*, système hybride de Honda) optimisent l'emploi du moteur thermique grâce à l'action d'un moteur électrique et d'une batterie. Le principe se décompose en deux temps :

- Lorsque la puissance nécessaire pour faire avancer le véhicule est faible, le moteur thermique fonctionne à une puissance plus élevée que la puissance nécessaire (mais à un rendement supérieur) et l'énergie en excès va être stockée dans la batterie;
- Lorsque la demande en puissance va être importante, le moteur électrique vient aider le moteur thermique afin d'éviter à ce dernier de fonctionner dans une plage de puissance dans laquelle son rendement est détérioré.

A partir de ce principe on distingue plusieurs façons d'associer le moteur thermique et le moteur électrique qui sont le montage série, le montage parallèle et le montage série/parallèle (voir Fig.A-2-3-4, pages suivantes).

Dans le cas du montage en série, le moteur électrique dirige seul la rotation des roues tandis que le moteur thermique fournit l'énergie pour alimenter le système en électricité. Dans le cas du montage en parallèle, le moteur thermique fournit l'essentiel de la puissance mécanique et le moteur électrique appuie le moteur essence pendant les fortes demandes en charge (accélération et démarrage). Dans les deux cas, l'objectif est de fournir de l'énergie de source électrique à des moments où le moteur thermique a des rendements faibles, mais chaque montage apporte ces avantages et ces inconvénients. Comme principaux inconvénients on peut souligner le manque de puissance pour un montage en série et l'absence de mode entièrement électrique pour le montage parallèle. Le système adopté par la Prius de Toyota est l'hybride série/parallèle, qui veut concilier les avantages des deux systèmes.

La réunion des deux systèmes est possible, comme le montre le schéma de la figure A-3, grâce au *Power Split Device* qui dirige l'énergie mécanique fournie par le moteur vers le générateur pour alimenter la batterie et vers les roues pour faire bouger le véhicules.

Les systèmes hybrides peuvent aussi permettre de réduire la consommation des véhicules en coupant le moteur thermique à l'arrêt (voire ne faire fonctionner que le moteur électrique sur les vitesses faibles) et en récupérant l'énergie pendant les phases de freinage.

La Prius 2 combine tous les modes (gestion du rendement, récupération, arrêt du moteur thermique et fonctionnement sur moteur électrique à faibles vitesses) mais d'autres combinaisons sont possibles pour réduire la consommation. Par exemple, le *Stop&Go* de PSA ne combinent que l'arrêt du moteur thermique avec la récupération au freinage.

Pour cette raison on distingue plusieurs gammes de véhicules hybrides, comme l'illustre la figure A-5 (p.29), de la plus simple (Toyota Vitz avec coupage du moteur thermique à l'arrêt) à la plus complète dite *full hybrid* (Toyota Prius2).

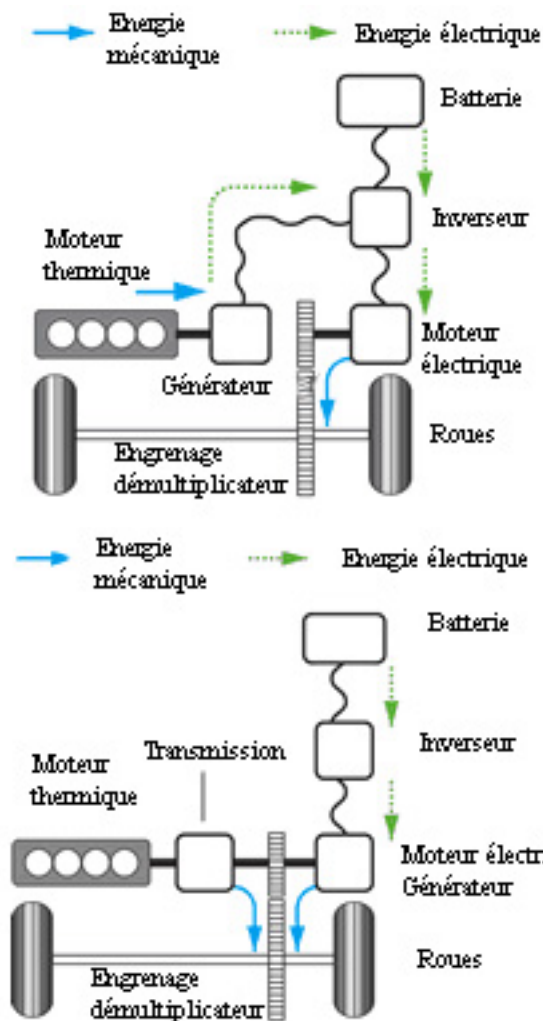


Fig. A-2 Schéma explicatif du fonctionnement de l'hybride
Hybride en série (à g.) et hybride en parallèle (à d.) (source Toyota)

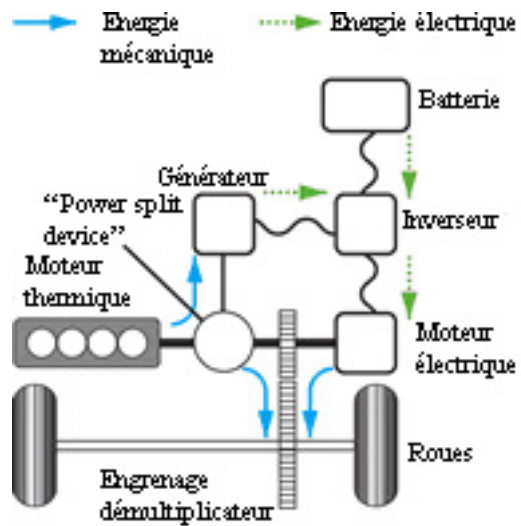


Fig. A-3 Le montage série/parallèle

Le véhicule profite des avantages des deux systèmes (Source Toyota)

	Performances en consommation				Performances en conduite	
	Arrêt du moteur	Récupération de l'énergie	Gestion des opérations	Efficacité globale	Accélération	Haut régime
Série	●	⊙	●	●	○	○
Parrallèle	●	●	○	●	●	○
Série/ parrallèle	⊙	⊙	⊙	⊙	●	●

⊙ Excellent ● Bon ○ Inférieur

Fig. A-4 Comparaison des systèmes hybrides selon Toyota
(Source Toyota)

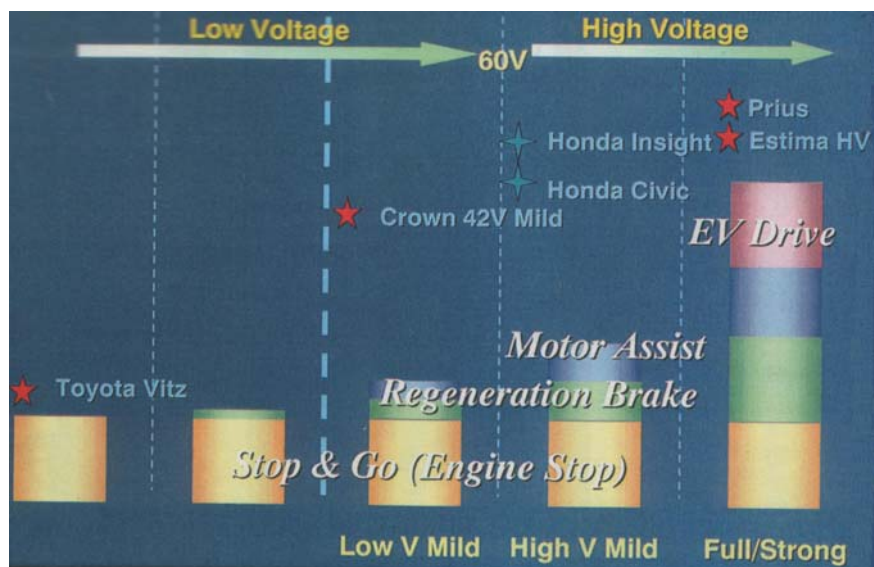


Fig. A-5 Les différents systèmes hybrides

Le schéma montre l'efficacité (en gain d'économie de carburant) de chaque mode hybride et la position de véhicules sur le marché : *Stop and Go* en jaune (arrêt du moteur thermique en stationnement), le freinage régénératif en vert (le modèle de PSA combine le jaune et le vert, il se trouve donc dans la deuxième colonne), assistance par un moteur électrique en bleu (IMA se trouve dans la catégorie regroupant les trois modes jaune, vert et bleu) et le mode purement électrique en mauve (la Prius se trouve dans la dernière colonne regroupant tous les modes). (Source Toyota)

Si on distingue deux grands types d'hybride à l'heure actuelle qui sont THS et IMA, il est difficile de mettre en avant une philosophie plus qu'une autre parce que les solutions développées, même au sein d'un seul constructeur, sont multiples.

La Prius

La Prius fonctionne en mode semi-parallèle ou série/parallèle (voir les figures précédentes), c'est à dire que le moteur électrique sert à la fois à seconder le moteur thermique pendant les charges importantes et à le remplacer pendant un fonctionnement à faibles vitesses. Cela permet d'avoir pendant les premiers mètres de démarrage ou bien pendant un fonctionnement au ralenti (trafic intense) un fonctionnement purement électrique. Comme l'illustre le schéma Fig.A-6, le fonctionnement de la Prius 2 repose sur 7 systèmes principaux qui composent la transmission mécanique et le système électrique.

1- La transmission mécanique (Fig.A-7-8):

La puissance fournie par le moteur essence est transmise à la fois aux roues et au générateur. Pour se faire, les deux moteurs et le générateur sont reliés par le *power split device*, un engrenage planétaire. Comme le décrit le schéma ci-dessus, le moteur thermique active le porte-satellite. Les pignons d'attaque entraînent le mouvement dans deux directions : sur la couronne extérieure liée au moteur électrique et à l'arbre de puissance (c'est à dire vers les roues) et sur le pignon central lié au générateur. De cette façon, à partir du moteur thermique le système va créer deux routes, une route électrique via le générateur et une route mécanique vers les roues. Typiquement, le moteur thermique va fournir de l'énergie pour les roues et pour le générateur qui va transmettre l'énergie sous forme électrique à l'unité de contrôle. Si la batterie est suffisamment rechargée, l'énergie électrique est re-dirigée sur le moteur électrique.

2- Système électrique(Fig.A-8) :

Le système électrique est l'un des éléments clé du succès actuel de la Prius2. La gestion de la puissance électrique s'est vue améliorée au travers de l'amélioration des éléments du système depuis la première génération de Prius mais aussi par le changement du potentiel électrique passé à 500V (à comparer aux 276V de la Prius1). L'unité de contrôle maintient le potentiel électrique à 500V afin d'améliorer l'autonomie de l'ensemble du système puisqu'il permet à puissance égale de fournir un courant plus faible (qu'un système à potentiel plus faible) et de limiter les pertes par effet joule (proportionnelles au carré de l'intensité du courant).

Un inverseur est chargé de transformer le courant continu de la batterie en courant alternatif pour le moteur électrique.

La durée de vie ainsi que la densité d'énergie de la batterie ont été étendues sur la Prius2. La durée de vie, pour laquelle on ne voit pas les performances du système se détériorer, dépasserait la durée de vie estimée du véhicule et la densité d'énergie a été améliorée de 35% par rapport à la Prius1. Les cycles de charge et de décharge sont très contrôlés afin de toujours se maintenir dans un intervalle de charge qui ne détériore pas la batterie. Cette batterie nickel métal-hydrure est utilisée dans la voiture à pile à combustible de Toyota : la FCHV.

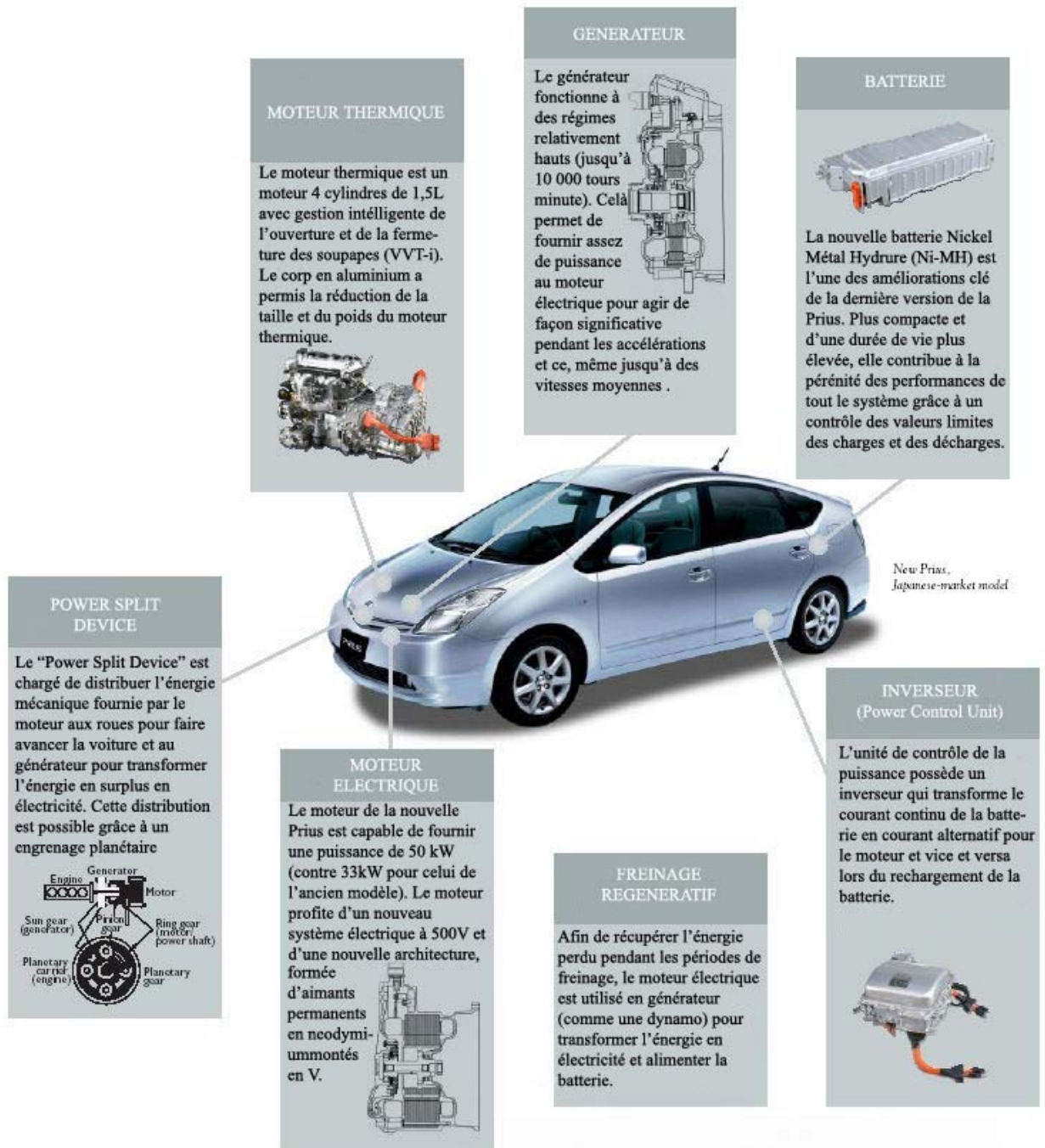


Fig. A-6 Les composants clés de la Prius2
(Source Toyota)

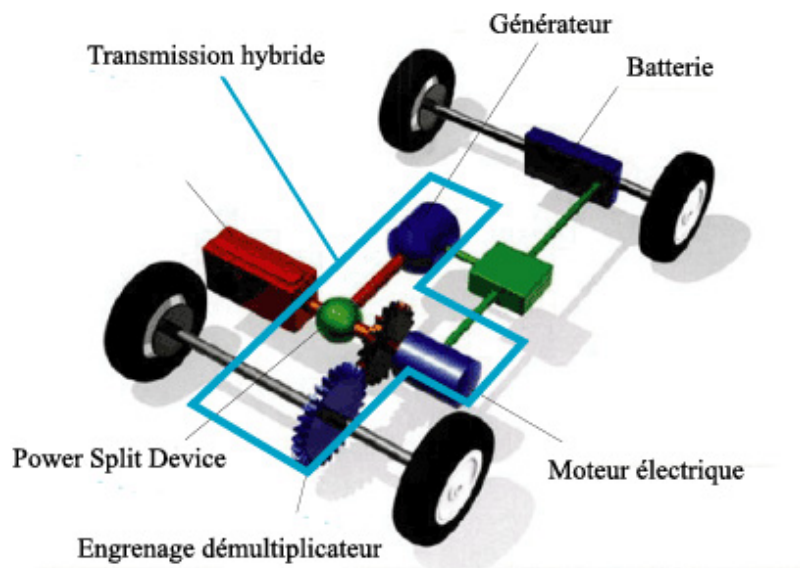


Fig. A-7 Position des composants de la Prius
(Source Toyota)

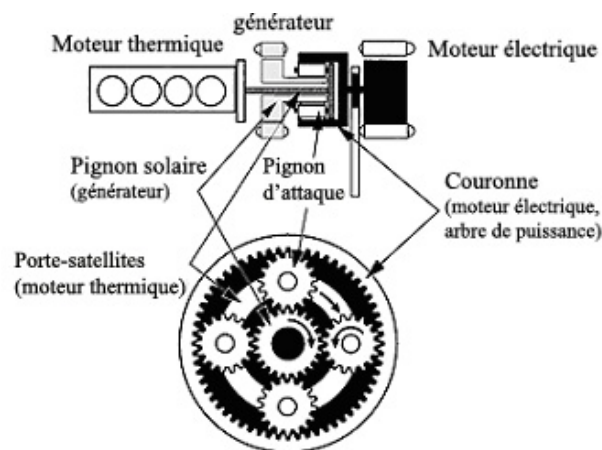


Fig. A-8 Le Power Split Device

Grâce à ce système, le moteur thermique peut varier sa vitesse relative aux roues. (Source Toyota)



Fig. A-9 L'unité de contrôle de la puissance (à g.) et la batterie (à d.)
(Source Toyota)

L'organisation du système de la Prius2 se comprend essentiellement grâce aux comparaisons que l'on peut faire avec la première génération de Prius, ce type de voiture étant unique. L'*Integrated Motor Assist* de Honda repose sur une approche relativement différente de celle de son concurrent.

Honda IMA (Fig.A-10) :

La technologie IMA (*Integrated Motor Assist*) a été pour la première fois commercialisée en 1999 sur le modèle deux places Insight vendu à 14000 exemplaires jusqu'à maintenant. A l'époque, le véhicule avait obtenu le meilleur score mondial en consommation de sa catégorie avec 2,8 L/100 km en mode 10/15. Depuis, le constructeur a commercialisé d'autres modèles comme le Civic Hybrid ou le Accord Hybrid. La stratégie de Honda sur l'emploi de l'hybride est très vaste puisque le constructeur envisage à la fois l'association de l'IMA avec les moteurs i-VTEC (gestion électronique de l'ouverture et la fermeture des soupape) et avec les moteurs i-DSI (gestion électronique de l'allumage).

IMA et Insight :

Honda a démarré la commercialisation de système hybride IMA avec l'Insight, développé exclusivement pour accueillir le système hybride. Nous décrirons dans cette partie l'IMA en même temps que l'Insight.

L'Insight associe un moteur électrique et un moteur thermique de trois cylindres VTEC de 1 litre à combustion linéaire. Le moteur électrique situé entre le moteur thermique et la transmission sert d'appoint lors des fortes accélérations, de source pendant le démarrage et de générateur lors de la récupération de l'énergie lors du freinage. Le couple important du moteur électrique sert, comme le système de Toyota, à améliorer le rendement du véhicule lors des bas régimes et des accélérations.

L'Insight a été conçue selon une philosophie doublement différente de celle de Toyota. D'abord, l'Insight a été exclusivement conçue pour l'hybride, comme la Prius il est vrai mais, sa forme et son architecture ont été développées en vue d'améliorer au maximum la consommation du véhicule : composants légers, coefficient de pénétration dans l'air très compétitif, ce qui en fait un véhicule d'exception dédié à un marché particulier (deux places).

La seconde différence avec la Prius est beaucoup plus pertinente et repose sur le fonctionnement de l'IMA. L'hybride de Honda est un hybride pur parallèle, c'est à dire que le moteur électrique ne peut pas fonctionner indépendamment du moteur thermique. Cela l'empêche de fonctionner en mode purement électrique mais, d'un autre côté, cela offre une architecture beaucoup plus simple : un seul moteur/générateur et pas d'engrenage planétaire.

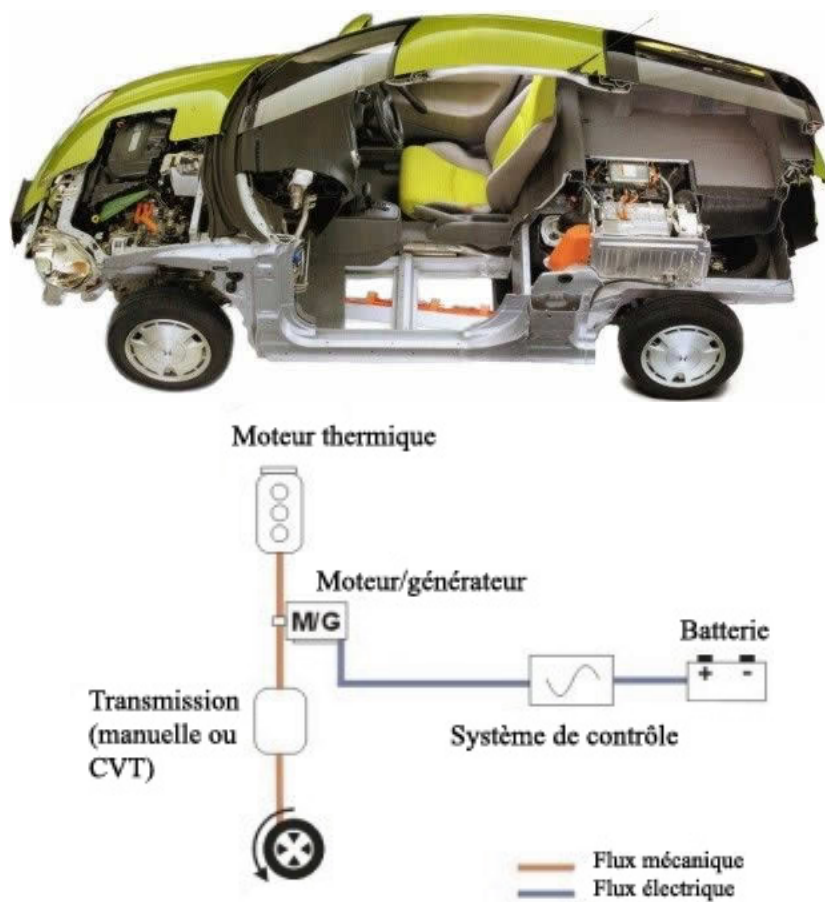


Fig. A-10 Une coupe de l'Insight et un schéma de son système hybride
(source www.insightcentral.net)

Les liaisons mécaniques et électriques sont plus simples que celles de la Prius. Le système électrique est un système à haut potentiel (144V) qui repose sur trois parties principales : la batterie, le moteur et le système de contrôle. La batterie est une batterie nickel-métal hydrure de 144V fournie par Panasonic et le moteur, un moteur à aimants permanents à courant continu. L'électronique de contrôle consiste en un module de gestion des charges de la batterie, un module de contrôle du moteur et une unité de contrôle de la puissance. La tension du système électrique ainsi que la gestion de la puissance sont différentes entre l'Insight et la Prius, mais ce qui est plus intéressant est de comparer les différences entre les modes de fonctionnement (voir Fig. 11-18, pages suivantes).

Honda avec son IMA a devancé Toyota sur l'application de l'hybridation d'un modèle, c'est à dire de proposer une motorisation hybride comme on propose une motorisation diesel. Avec la Civic Hybrid et l'Accord Hybrid, Honda fait le premier pas et dévoile sa stratégie de l'hybride qui consiste à associer l'IMA à d'autres véhicules et avec d'autres moteurs.

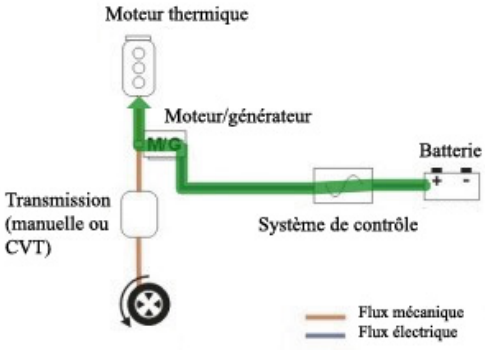
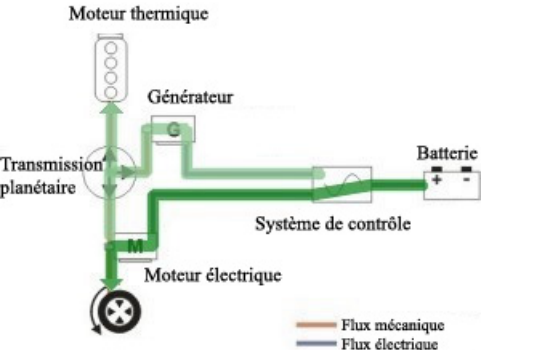
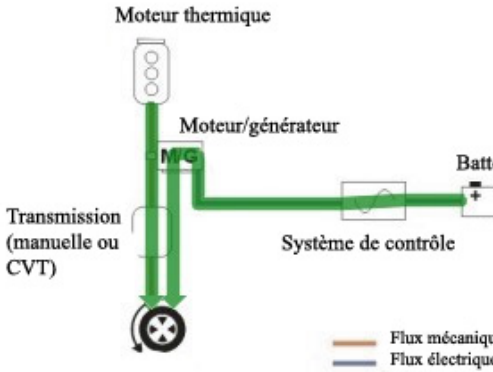
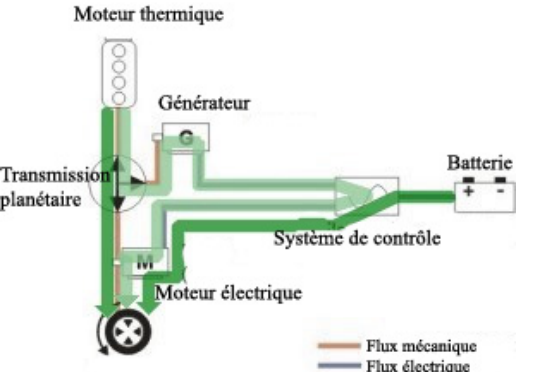
Le Civic Hybrid :

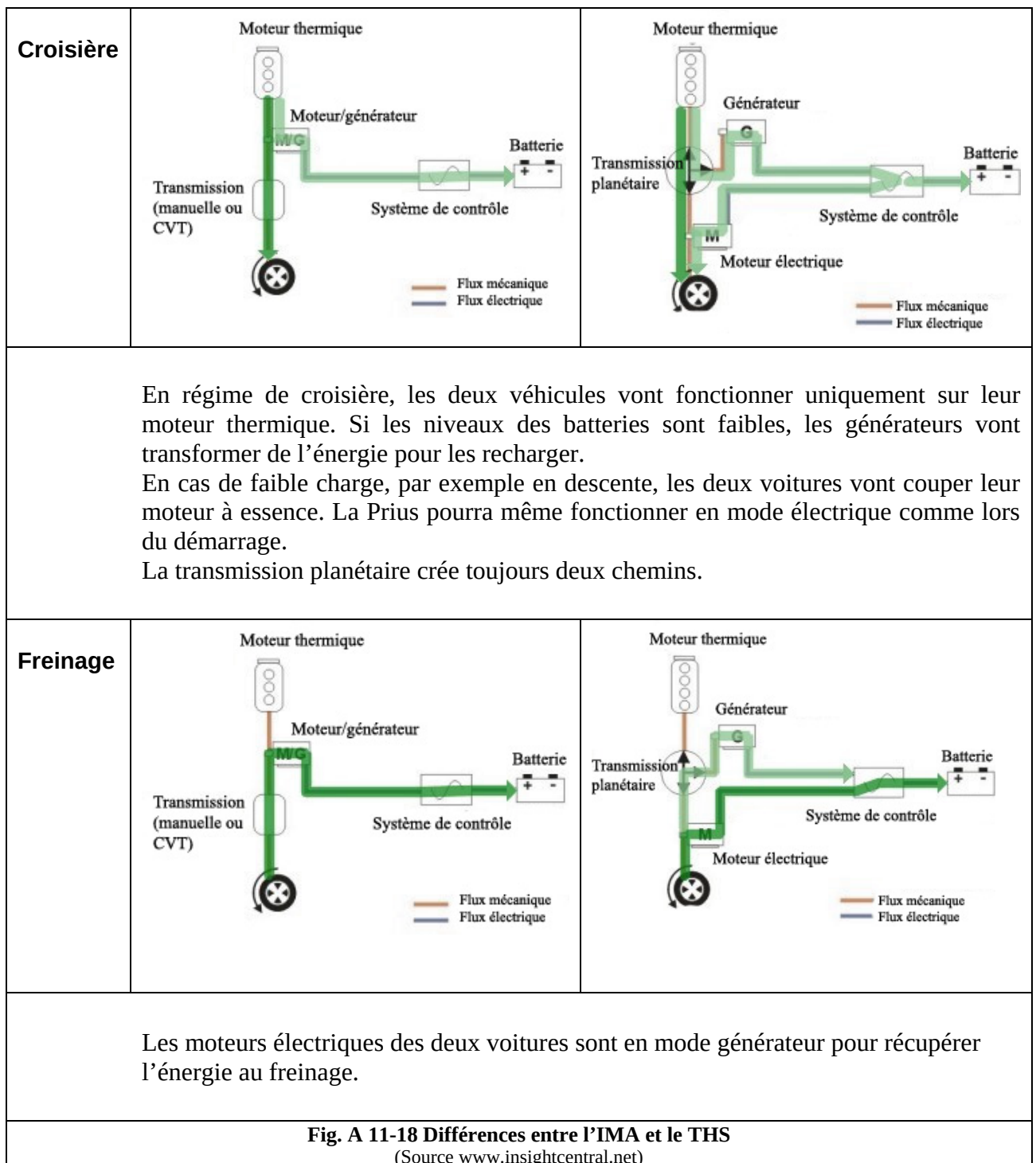
Le Civic Hybrid, plus jeune de deux ans que la Insight profite d'un nouveau système IMA qui permet à cette berline d'atteindre 4,9 l/100 km en cycle mixte (source : ADEME). La source principale de la voiture est un moteur i-DSI à combustion linéaire de 1,3 L avec un système VTEC. Le système VTEC de contrôle des soupapes permet de bloquer trois des quatre pistons afin de limiter les pertes par frottement lors de la décélération et d'augmenter la récupération de l'énergie par le générateur.

Le Accord Hybrid :

Cette imposante berline commercialisée est le dernier modèle hybride en date proposé par Honda ; elle est animée par un moteur 6 cylindres i-VTEC de 255ch. Comme la Civic Hybrid, le système i-VTEC permet de contrôler les cylindres du moteur de façon à gérer au mieux la consommation du véhicule en fonction des besoins. A l'arrêt, le moteur thermique est éteint et démarre rapidement sur trois cylindres et le moteur électrique en appui. Les six cylindres seront enclenchés si la demande en puissance est encore importante. En phase de croisière, la voiture fonctionne sur trois cylindres avec trois cylindres et le moteur électrique en réserve de besoins en fortes accélérations. Selon le constructeur, la consommation atteindrait 8,1 l/100 km en ville et 6,1 l/100 km sur autoroute à comparer avec une Accord 2 litres qui consomme 10.7 l/100km et 6,5 l/100km (source : ADEME).

La comparaison entre les deux véhicules est intéressante pour décrypter la philosophie du constructeur puisque (en mettant de côté le critère économique puisque le sur-coût occasionné par l'hybride sur ce véhicule est très important) tout en étant plus performant que le 2 litres en terme de consommation, le modèle 3 litres 6 cylindres hybride développe 100 chevaux de plus.

En vert : les flux d'énergie	Insight	Prius
Démarrage	 Le moteur thermique est démarré par le moteur électrique.	 La voiture fonctionne en mode électrique à faible vitesse puis son moteur thermique est démarré. La transmission planétaire fonctionne en permanence raison pour laquelle un flux remonte vers le générateur.
Accélération	 En cas de forte charge, le moteur thermique et le moteur électrique fonctionnent de concert et de l'énergie est puisée de la batterie.	 Comme l'IMA, les deux moteurs fonctionnent ensemble. De l'énergie est fournie au générateur et transmise au moteur électrique.
Source www.insightcentral.net		



Annexe 4 Eliica

Les records ne sont pas les seuls objectifs officiels du projet puisque la voiture a été conçue pour être tout à fait fonctionnelle (l'habitacle peut accueillir 5 personnes confortablement, Fig.A-19-20) et le laboratoire ne cache pas ses ambitions de commercialiser des véhicules. Seulement, les partenaires industriels pour la production à grande échelle des véhicules manquent à l'appel selon Prof. Shimizu, les constructeurs traditionnels se cantonnent à leur modèle de véhicule selon lui (moteur, transmission...). La philosophie de l'Eliica se fonde sur une approche nouvelle, l'équipe a voulu partir d'une feuille blanche. La forme de la voiture s'en est trouvée tout à fait originale : huit roues, pas de bloc moteur...

Les deux voitures sont différentes (moteurs de 60 kW dans un cas et de 80 kW dans un autre, types de batteries différents ...) mais elles reposent sur la même architecture : derrière chacune des huit roues est positionnée les moteurs électriques (qui peuvent développer jusqu'à 800 ch), les batteries font partie intégrante du plancher (Fig.A-21, page suivante). Cette configuration permet de gagner énormément d'espace et d'offrir moins de contraintes que la configuration traditionnelle des véhicules à essence (à cause du moteur et du réservoir). Les *concept-cars* Toyota Fine-N ou GM Sequel ont une conception proche de ce type de configuration avec les réservoirs d'hydrogènes et les batteries dans le plancher et les moteurs dans les roues.

Il y a de nombreux obstacles qui s'opposent à la commercialisation de ces véhicules (outre leur prix encore prohibitif). D'une part, certains composants, comme la carrosserie en plastique, ne peuvent pas être envisagés dans le cadre d'une production à grande échelle; ensuite, il y a un record que le projet aura du mal à rattraper : celui de l'autonomie. L'autonomie actuelle est de 300 km (en théorie) et la recharge à 70% des batteries est atteinte en 30 minutes (avec un autre type de batterie le même niveau peut être atteint en 4 minutes). L'Eliica montre que l'autonomie reste encore un frein dans l'absolu pour le développement des véhicules électriques si on envisage pour ces véhicules un emploi équivalent à ceux des véhicules essence. C'est pour cette raison que les constructeurs actuels se tournent vers les mini-voitures purement électriques (dans le cadre de programmes de partage ou de location) ou les véhicules hybrides avec un moteur thermique ou une pile à combustible pour recharger la batterie.



Fig. A-19-20 Eliica, vue intérieure

La finition de l'intérieur de l'un des véhicules exprime la volonté du laboratoire de commercialiser leur projet.
(Source Eliica)

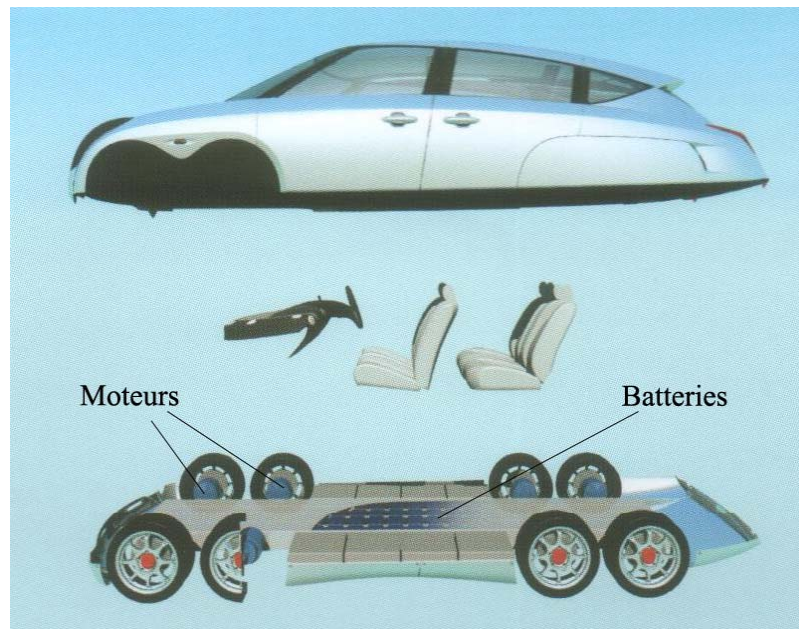


Fig.A-21 L'architecture du concept Eliica
(Source Eliica)

Annexe 5 Hydrogène

Le système électrique :

Unité de contrôle, batterie, moteur... les éléments et le fonctionnement du système reposent sur des principes proches des véhicules hybrides et électriques (Fig. A-22). De cette façon, les développements effectués dans les véhicules hybrides et électriques auront des retombées sur les développements des véhicules à PAC. Ces incidences se font déjà remarquer, notamment dans les batteries.

La batterie :

La batterie a le même rôle que dans une voiture hybride thermique/électrique, c'est à dire stocker l'énergie récupérée lors du freinage et les surplus de la PAC lorsque le régime du véhicule est plus faible que cette dernière. La voiture à PAC de Toyota le FCHV emploie une batterie NiMH proche de celle utilisée dans sa Prius. Le X-Trail FCV de Nissan est lui équipé d'une batterie au lithium « compacte », fruit des recherches de ce constructeur dans les véhicules électriques. Honda, qui a développé le FCX, n'a pas employé une batterie mais un super condensateur développé par ses propres laboratoires. L'utilisation du condensateur n'est pas une nouveauté, certains camions hybrides emploient déjà cet élément comme deuxième source. La densité d'un condensateur est en théorie plus faible qu'une batterie mais offrent d'autres avantages comme la longévité et des cycles de charges et de décharges rapides.

Le réservoir :

Le réservoir soulève de nombreux problèmes. Il doit surmonter les problèmes générés par la pression du gaz (et les aspects de sécurité qui lui sont associés) en étant très résistant, il est très volumineux à cause de la densité énergétique de l'hydrogène et il est confronté à de nombreux problèmes d'étanchéité.

Il est possible d'améliorer la densité énergétique de l'hydrogène en comprimant toujours plus le gaz. Les constructeurs ont déjà développé des réservoirs à 70 Mpa (contre 25 Mpa et 35 Mpa pour les véhicules en circulation actuellement). Mais des moyens moins traditionnels, mais dont l'efficacité et la rentabilité sont incertaines, sont en cours d'étude : nanotubes de carbone, hydrogène liquide...

La pile à combustible :

La PAC est bien sûr l'élément déterminant du succès de ces véhicules. Baisser le coût, améliorer l'efficacité et la longévité, les enjeux auxquels doivent faire face les constructeurs sont primordiaux pour pouvoir commercialiser les véhicules à PAC. Toyota, Honda puis, plus récemment, Nissan développent maintenant en interne leur propre pile et ont abandonné leurs fournisseurs externes. Honda a réussi avec le développement de sa première PAC en 2003 à baisser le coût de production de la pile en simplifiant sa conception et à améliorer ses performances, notamment au démarrage à froid : les véhicules de Honda peuvent maintenant démarrer à des températures très basses (dès -20°C).

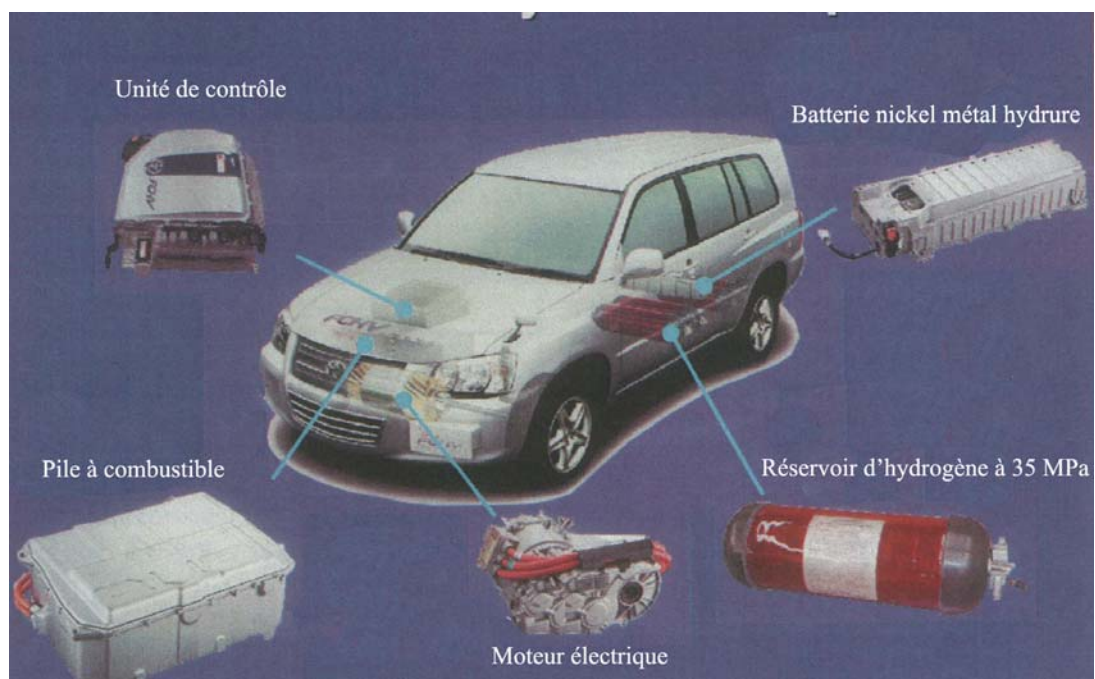


Fig. A-22 Voiture à PAC, éléments principaux
Les éléments clés de la Toyota FCHV (Source Toyota)

Glossaire

Accord	Berline de Honda
ADEME	Agence française de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
ATDC	<i>After Top Dead Center</i> , désigne la date à laquelle est observé un évènement (dans un moteur) après le passage au point mort haut du piston dans la chambre de combustion. Dans notre cas, il s'agit des dates auxquelles ont été prises les photos.
CEV	<i>Clean Energy Vehicle</i>
Charge du moteur	La charge correspond à la demande faite au moteur
Civic	Voiture de Honda
CO	Monoxyde de carbone, un polluant toxique produit par les moteurs
CO2	Dioxyde de carbone, gaz à effet de serre
Colt	Voiture de Mitsubishi
Denso	Equipementier japonais
DME	Diméthyl-éther composant chimique potentiellement utilisable comme carburant ou comme source pour la production d'hydrogène
Down-sizing	Tendance dans la conception des moteurs qui consiste à optimiser la combustion ce qui se traduit par une baisse de la cylindrée
DPNR	Diesel Particulate-NOx Reduction System, catalyseur 4 voies de Toyota
Eliica	<i>Electric Lithium Ion Battery Car</i> , projet de voiture électrique de l'Université Keio
FCHV	<i>Fuel Cell Hybrid Vehicle</i> , véhicule à pile à combustible de Toyota
FCX	Véhicule à pile à combustible de Honda
FEV	<i>Fuel Efficient Vehicle</i> , véhicule à faible consommation
Fine-N	Véhicule à pile à combustible de Toyota (concept-car)
GNV	Véhicules au gaz naturel
GPL	Gaz de pétrole liquéfié
HC	Hydrocarbures
HCCI	<i>Homogeneous Charge Compression Ignition</i> , injection homogène dans les moteurs diesel
HCNM	Hydrocarbures non méthaniques
i-DSI	Système de double allumage des bougies contrôlé électroniquement
IFP	Institut Français du pétrole
IMA	<i>Integrated Motor Assist</i> , système hybride de Honda

Insight	Modèle hybride de Honda
JARI	<i>Japan Automobile Research Institute</i> , laboratoire japonais (financé par l'industrie automobile et le METI) qui effectue des recherches dans le domaine de la sécurité et de l'environnement pour l'élaboration de standards
JFE	Japan Fe : <i>Japan Steel Engineering</i> , groupe japonais autour duquel se sont regroupés des industriels pour développer le DME (voir plus haut)
JHFC	<i>Japan Hydrogen Fuel Cell Demonstration Project</i> , projet qui évalue la faisabilité du développement de la filière hydrogène pour le transport
LEV	<i>Low-Emission Vehicles</i> , véhicules à faibles émissions
METI	<i>Ministry of Economy, Trade and Industry</i> , le Ministère de l'Economie, du Commerce et de l'Industrie
MLIT	<i>Ministry of Landscape, Infrastructures and Transport</i> , le Ministère du Territoire, des Infrastructures et des Transports
Modes : 10/15 ; nouveau ; JE05	Ces modes désignent les procédures de test avec lesquels sont évalués l'autonomie et les émissions de chaque véhicule mis sur le marché japonais. Le "nouveau" mode correspond au mode qui succède au mode 10/15 et le JE05 correspond à un test réservé aux poids lourds.
MoE	<i>Ministry of Environment</i> , le Ministère de l'Environnement
Moteur Wankel	Moteur à piston rotatif, du nom de son inventeur : l'ingénieur allemand Felix Wankel
Ni-MH	Nickel métal hydrure, qualifie un type de batterie
NOx	Oxydes d'azote, le terme désigne le NO et le NO2
PAC	Pile à combustible
PCI	<i>Premixed Compressed Ignited combustion</i> , système de combustion de Mitsubishi
PM	<i>Particulate Matters</i> , désigne les particules rejetées par les véhicules diesel
Power Split Device	Pièce qui accorde les mouvements du moteur thermique, du moteur électrique et du générateur dans la Prius de Toyota
Prius	Voiture hybride de Toyota
Rampe commune	Système d'injection directe pour les moteurs diesel
Régime du moteur	Vitesse du moteur
RX-8	Voiture de Mazda
Sequel	Concept car de General Motor
THS	<i>Toyota Hybrid System</i> , système hybride de Toyota
Unibus	Système HCCI (voir plus haut) de Toyota
VTEC	<i>Variable Valve Timing and Lift Electronic Control</i> , système de contrôle électronique de synchronisation de la levée des soupapes de Honda
VVL	<i>Variable Valve Lift System</i> , système de contrôle électronique de la synchronisation de la levée des soupapes de Nissan

VVT

Variable Valve Timing and Lift Electronic Control, système de contrôle électronique de la synchronisation de la levée des soupapes de Toyota

X-Trail FCV

Version à pile à combustible du X-Trail (4x4 de Nissan)

Liens au Japon

Denso	www.denso.co.jp/ja/	L'un des principaux équipementiers japonais
Eliica	www.eliica.com	Voitures électriques
Honda	Site général: world.honda.com Sur les technologies (hybrides...) : http://world.honda.com/automobile/	Automobiles
Insight central	www.insightcentral.net	Site indépendant sur l'Insight
JARI	www.jari.or.jp	Institut de Recherche sur l'automobile
JFE	www.jfe-holdings.co.jp/en/dme/05-jituyo.html	Diméthyl-éther
JHFC	www.jhfc.jp	Hydrogène
METI	www.meti.go.jp	Normes
MLIT	www.mlit.go.jp	Normes
MoE	www.env.go.jp/en/	Normes
Nissan	Site général: www.nissan.co.jp Sur les technologies: http://www.nissan-global.com/EN/TECHNOLOGY/index.html	Automobiles
Toyota	Site général: www.toyota.co.jp Sur les technologies: http://www.toyota.co.jp/en/tech/	Automobiles

Table des figures

<i>Fig. I-1 Les véhicules propres au Japon en 2010</i>	6
<i>Fig. I-2 Classification des véhicules LEV depuis 2003</i>	9
<i>Fig. II-1 Différences d'homogénéité du mélange</i>	13
<i>Fig. II-2 L'injection homogène contrôlée provoque moins de flammes</i>	13
<i>Fig. II-3 Nissan Hypermini</i>	17
<i>Fig. II-4 Les deux voitures du projet Eliica</i>	17
<i>Fig. II-5 Comparaison hybride Prius et hybride FCHV</i>	19
<i>Fig. II-6 Schéma d'une cellule</i>	19
<i>Fig. II-7 La réaction dans la PAC</i>	19
<i>Fig. II-8 Mazda RX-8 à hydrogène</i>	20
<i>Fig. II-9 Coupe d'un piston du moteur Wankel de Mazda</i>	20
<i>Fig. II-10 Emissions de CO₂, du puits à la pompe</i>	22
<i>Fig. A-1 Le DPNR, système post-traitement de Toyota</i>	26
<i>Fig. A-2 Schéma explicatif du fonctionnement de l'hybride</i>	28
<i>Fig. A-3 Le montage série/parallèle</i>	29
<i>Fig. A-4 Comparaison des systèmes hybrides selon Toyota</i>	30
<i>Fig. A-5 Les différents systèmes hybrides</i>	30
<i>Fig. A-6 Les composants clés de la Prius2</i>	32
<i>Fig. A-7 Position des composants de la Prius</i>	33
<i>Fig. A-8 Le Power Split Device</i>	33
<i>Fig. A-9 L'unité de contrôle de la puissance (à g.) et la batterie (à d.)</i>	33
<i>Fig. A-10 Une coupe de l'Insight et un schéma de son système hybride</i>	35
<i>Fig. A 11-18 Différences entre l'IMA et le THS</i>	38
<i>Fig. A-19-20 Eliica, vue intérieure</i>	40
<i>Fig. A-21 L'architecture du concept Eliica</i>	40
<i>Fig. A-22 Voiture à PAC, éléments principaux</i>	42

Index des tableaux

<i>Tab. I-1 Standards sur les émissions des véhicules à essence.....</i>	<i>9</i>
<i>Tab. I-2 Niveaux sur la consommation.....</i>	<i>9</i>
<i>Tab. II-1 Le parc motorisé (nombre de véhicules quatre roues en circulation) japonais entre 2001 et 2004</i>	<i>11</i>
<i>Tab. A-1-2-3 Standards sur les émissions diesel, niveaux de 2003.....</i>	<i>24</i>
<i>Tab.A-4-5-6 Standards sur les émissions des véhicules diesel, niveaux de 2009</i>	<i>24</i>
<i>Tab. A-7 Les exigences du plan du retrofit de la métropole de Tokyo.....</i>	<i>25</i>
<i>Tab. A-8 Standards sur les émissions en particules des véhicules essence en 2009</i>	<i>25</i>