



*INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE  
SUR LES TRANSPORTS ET LEUR SECURITE*

*LABORATOIRE TRANSPORTS ET ENVIRONNEMENT*

DOSSIER INRETS-LTE, JPR, 21/09/2000

## *La dépendance pétrolière et l'énergie dans les transports routiers – Travaux de l'INRETS*

Sur la question de l'énergie, les transports routiers sont confrontés à deux problèmes préoccupants :

- à moyen terme (10 ans), celui de la limitation des émissions de gaz à effet de serre, principalement le CO<sub>2</sub>;
- à plus long terme, celui de la réduction de la dépendance énergétique, en égard au renchérissement du pétrole et au risque de raréfaction des ressources.

Après un exposé de la question de l'énergie en association avec l'effet de serre – réduction de la consommation des véhicules, diversification des sources d'énergie et nouvelles motorisations, perspectives sur les énergies et les modes de propulsion, ce dossier présente les principaux travaux de l'INRETS dans les domaines concernés.

## **I. L'énergie dans les transports routiers et l'effet de serre**

Le pétrole fournit 99% des carburants pour les véhicules routiers. La forte croissance du trafic dans tous les pays industrialisés conduit à une augmentation importante de la consommation de carburant : en France cette consommation devrait passer de 30 Mt en 1990 à 55 Mt en 2010; elle correspond aujourd'hui à la moitié des importations de pétrole.

Au rythme actuel de la consommation mondiale des ressources fossiles, les ratios entre les réserves prouvées et la production annuelle s'établissent à environ 230 pour le charbon, 70 pour le gaz naturel et seulement 45 pour le pétrole. Cependant la consommation de pétrole des pays en développement comme la Chine devrait augmenter très fortement dans un futur proche, ce qui va rapprocher l'échéance de la raréfaction des ressources si de nouveaux gisements, présentant des conditions d'exploitation économiques acceptables, ne sont pas découverts. Dans cette hypothèse, le pétrole commencerait à manquer d'ici une vingtaine d'années.

Avant d'envisager des limitations à caractère plus ou moins autoritaire des consommations d'énergie, les solutions techniques consistent d'une part à réduire fortement les consommations des véhicules, d'autre part à diversifier les sources d'énergie. Ces solutions répondent aussi bien au problème de la dépendance énergétique qu'à celui des émissions de gaz à effet de serre.

### **I.1 Réduction de la consommation des véhicules**

Une réduction significative des consommations unitaires des véhicules routiers, associée à la limitation des émissions de polluants, peut être obtenue par diverses actions simultanées, dans le cadre d'une conception globale optimisée :

- travaux de base sur les moteurs thermiques : combustion en mélange pauvre, injection directe diesel et essence, réduction des frottements mécaniques, suralimentation, admission et distribution variables;
- réduction de la puissance absorbée par les auxiliaires de fonctionnement ou de confort, comme : actuateurs, alternateur, ventilateurs, pompes, compresseurs (climatisation);
- diminution de la puissance et de la cylindrée des moteurs associée à l'allègement du véhicule, tout en répondant aux impératifs de sécurité (résistance au choc et aux déformations);
- gestion électronique de l'ensemble des fonctions et des organes du groupe motopropulseur, incluant la transmission de puissance; gestion de l'énergie électrique.

Parmi les moyens "non techniques" de réduction de la consommation d'énergie, touchant ici l'ensemble des déplacements motorisés, on peut citer :

- différentes taxations pratiquées aujourd'hui ou en projet dans certains pays : sur les carburants, sur les places de stationnement, sur l'accès aux centres urbains, sur l'usage des infrastructures;
- le transfert vers des modes de transport plus économiques en énergie (voie ferrée pour les marchandises, transports en commun de personnes) qui ne peut avoir un impact sensible que moyennant des mesures d'accompagnement très volontaristes;

- les restrictions de la circulation aujourd'hui pratiquées dans les centres de nombreuses métropoles, pour lutter contre la pollution de l'air;
- la meilleure exploitation des infrastructures routières (détection des incidents et des encombrements, régulation et répartition des flux de trafic), le développement d'outils informatiques et télématiques pour améliorer la fluidité de la circulation;
- l'aménagement du territoire conçu pour limiter le nombre de déplacements (trajets domicile-travail).

## **I.2 Diversification des sources d'énergie**

La diversification des sources d'énergie qui, aujourd'hui, se heurte à des problèmes de rentabilité économique, sera rendue possible par le renchérissement ou la raréfaction du pétrole; elle concerne les motorisations suivantes :

- les véhicules équipés de moteurs thermiques conventionnels, avec des adaptations nécessaires aux carburants alternatifs;
- les véhicules électriques pour lesquels la source d'énergie devra aussi être diversifiée, en évitant le recours aux centrales thermiques et aux centrales nucléaires;
- les véhicules hybrides, qui sont à motorisation thermique-électrique.

Les sources d'énergie de remplacement pour les véhicules routiers pourront être :

- le gaz naturel, notamment sous forme comprimée, carburant pour les moteurs thermiques;
- le charbon qui permet d'élaborer des carburants synthétiques;
- l'électricité pour alimenter les moteurs électriques;
- l'hydrogène qui pourra alimenter des moteurs thermiques ou des piles à combustible\*.

*\* des prototypes de pile fonctionnent aujourd'hui à l'essence ou au méthanol, grâce à un reformeur*

## **I.3 Effet de serre**

En se limitant aux technologies de motorisations actuelles ou en développement, et aux sources d'énergie disponibles aujourd'hui, les différentes solutions peuvent être comparées en termes d'émission unitaire relative de gaz à effet de serre, les véhicules routiers étant presque exclusivement concernés par le CO<sub>2</sub>.

Par rapport au moteur à essence actuel, les diminutions d'émission de CO<sub>2</sub> obtenues avec le diesel, l'essence à injection directe ou le GPL (- 15%), l'hybride parallèle, le diesel à injection directe ou le gaz naturel (- 25%), méritent d'être signalées. D'autres solutions technologiques autorisent des gains encore plus importants (annexe 1). Cependant le choix d'une solution ne peut se faire sans tenir compte des contraintes d'environnement portant sur d'autres polluants comme les oxydes d'azote NOx et les particules (considération défavorable au diesel classique).

## **I.4 Perspectives sur les énergies et les modes de propulsion**

La disponibilité et l'utilisation des différentes sources d'énergie, associées aux motorisations correspondantes, seront notamment déterminées par les considérations suivantes :

- la durée d'exploitation de chaque ressource, jusqu'à "épuisement",
- les priorités d'utilisation affectées aux différents secteurs consommateurs (industrie, transports, résidentiel et tertiaire),
- l'intensité des contraintes de préservation de l'environnement et d'économie d'énergie.

Cela permet d'envisager pour le futur différents scénarios pour les transports routiers, qui aboutissent aux perspectives suivantes sur les énergies et les modes de propulsion (annexe 2) :

- *Disponibilité de chaque source d'énergie pour les véhicules routiers :*
  - pétrole (incluant essence, gazole et GPL) jusqu'en 2020;
  - gaz naturel jusqu'en 2035;
  - carburant issu du charbon jusqu'en 2050;
  - électricité au-delà (hydrogène ?).
- *Modes de propulsion et sources d'énergie pour les voitures et pour les camions (ces différentes sources prenant le relais au fil du temps) :*
  - voitures thermiques jusqu'en 2020 utilisant le pétrole jusqu'en 2015, le gaz naturel à partir de 2005, le charbon à partir de 2015;
  - voitures hybrides parallèle de 2005 à 2030, avec les mêmes énergies que ci-dessus;
  - voitures électriques à partir de 2010 (batteries, puis piles à combustible à partir de 2015);
  - camions thermiques jusqu'en 2025, utilisant le pétrole jusqu'en 2020, le gaz naturel à partir de 2005, le charbon à partir de 2015;
  - camions hybrides série de 2010 à 2045, avec les mêmes énergies que ci-dessus;
  - camions électriques à partir de 2015 batteries, puis piles à combustible).

De tels scénarios, qui doivent être pris avec de grandes précautions, fournissent des indications sur les domaines technologiques dans lesquels les recherches devraient être soit ralenties, soit accélérées en fonction des périodes d'application envisagées.

## **II. Les travaux de l'INRETS-LTE**

Les travaux de l'INRETS-LTE s'inscrivent bien dans le cadre des orientations présentées dans l'exposé des questions de l'énergie dans les transports routiers et de l'effet de serre (chapitre I).

Les recherches portant sur la consommation d'énergie des véhicules routiers sont menées selon trois approches complémentaires :

- expérimentations en situation réelle pour déterminer les usages des véhicules, les conditions de fonctionnement des groupes motopropulseurs et celles des auxiliaires;
- expérimentations en laboratoire sur bancs d'essais (banc véhicule, bancs moteur ...) où sont reproduites les conditions réelles de fonctionnement et où sont caractérisés les organes et les composants;
- modélisations de véhicules, organes et composants, et calculs sur ordinateur.

Des travaux significatifs, mettant en œuvre depuis plusieurs années des moyens humains et matériels importants, méritent d'être signalés.

### **II.1 Recherches sur l'utilisation réelle des véhicules**

Après la mise au point des méthodes et des moyens matériels, les conditions d'usage et les conditions de fonctionnement d'une centaine de véhicules sur plusieurs centaines de milliers de kilomètres ont été enregistrées (études EUREV de l'INRETS, programmes européens COST319, MEET, Modem, Hyzem). Les données recueillies ont fait l'objet d'analyses statistiques et ont permis d'élaborer des cycles représentatifs des conditions d'usage et de fonctionnement en situation réelle (par opposition aux cycles réglementaires).

Les résultats sont utilisés par les industriels pour optimiser l'adaptation des véhicules aux usages réels, et par les laboratoires pour évaluer les consommations de carburant et les émissions de polluants afin d'apprécier l'impact réel (par opposition à la réglementation) des améliorations technologiques ou des carburants alternatifs (GPL, GNV, Aquazole ...).

### **II.2 Modélisations et simulations sur ordinateur**

Les connaissances nécessaires à la compréhension et à la modélisation des phénomènes physiques intervenant dans le fonctionnement et dans le comportement des organes (moteurs, transmissions, composants) des véhicules ont été acquises, ce qui a notamment nécessité des investissements matériels importants (bancs d'essais de moteurs thermiques et électriques, banc d'essais d'organes). Cela a permis de développer différents modèles de simulation, allant du suivi de cycle par un véhicule (vitesses imposées en fonction du temps) à la simulation de conduite complète sur un trajet routier quelconque avec un conducteur quelconque.

Deux logiciels en particulier sont aujourd'hui opérationnels : SIMULCO pour les véhicules à motorisation thermique (voitures, autobus, poids lourds) et VEHLIB pour les véhicules à motorisation hybride thermique-électrique (voitures, autobus ...), en série ou en parallèle (cas de véhicules innovants comme la Toyota Prius et la Nissan Tino). Ces logiciels sont validés par des expérimentations sur banc en laboratoire et sur route en situation réelle.

Ils sont utilisés pour l'analyse du bilan énergétique, le calcul des performances, de la consommation de carburant et des émissions de polluants, l'analyse des paramètres de consommation d'énergie et l'évaluation des gains apportés par différentes améliorations technologiques. De nombreux travaux ont été effectués pour les industriels (dont PSA, Renault, Renault-VI, Alstom) et sur fonds publics (ADEME notamment).

### **II.3 Consommation d'énergie des auxiliaires**

La climatisation automobile peut absorber une puissance importante à l'origine d'une surconsommation de carburant non négligeable en moyenne annuelle, alors que sa pénétration sur les nouveaux modèles ne cesse d'augmenter; la puissance électrique absorbée à bord des véhicules pour alimenter les différents auxiliaires (entraînements électriques, nouveaux composants) va probablement doubler dans les années à venir ...

L'INRETS-LTE a récemment mené des travaux d'analyse paramétrique de la consommation d'une boucle de climatisation (avec l'ADEME et l'Ecole des Mines de Paris). Ces travaux vont être poursuivis par une recherche de grande ampleur (utilisation réelle portant sur 40 voitures, analyses statistiques, cycles d'usage, études d'optimisation, évaluation de nouveaux systèmes) qui sera menée avec Valeo et avec les constructeurs dans le cadre d'un projet PREDIT de l'ADEME; cette recherche sera étendue au cas d'autres auxiliaires, en particulier l'alternateur.

Il faut insister sur le fait que tous ces auxiliaires consommateurs d'énergie, sources d'émissions supplémentaires de CO<sub>2</sub> et d'autres polluants, ne sont pas pris en considération dans les tests réglementaires (cycle ECE15-0A); ces tests ne peuvent donc rendre compte de l'évolution réelle des consommations et émissions de CO<sub>2</sub>, ce qui démontre tout l'intérêt des recherches du LTE sur l'utilisation réelle des véhicules.

### **II.4 Impacts des transports sur l'environnement**

La diminution des consommations de carburant et la limitation des émissions de gaz à effet de serre peuvent être contradictoires avec d'autres contraintes de protection de l'environnement (émissions de polluants comme NOx et particules, émission de bruit ..., qui présentent des impacts sensibles sur la santé). Par exemple, le traitement catalytique des gaz d'échappement des moteurs à essence entraîne une surconsommation de 10%; les moteurs thermiques à mélange pauvre, qui permettent une économie de carburant de 10%, présentent des émissions excessives de NOx. Il apparaît alors nécessaire de procéder à une optimisation globale, avec une analyse systémique.

Le LTE engage aujourd'hui un projet de recherche transversal de l'INRETS (programmation 2000-2004), sur le thème de la prospective et des impacts des transports sur l'environnement. Ce projet traitera notamment des questions de consommation d'énergie et d'effet de serre. Il impliquera de nombreux partenaires externes, comme l'ADEME en particulier.

## - Annexe 1 -

**Energies, motorisations et effet de serre des véhicules routiers**

Parmi les six catégories de gaz à effet de serre retenus dans le protocole de Kyoto, les véhicules routiers sont essentiellement concernés par le gaz carbonique CO<sub>2</sub>. Dans le cas des voitures particulières, les différentes solutions technologiques de motorisation et de source d'énergie peuvent être classées selon leurs émissions relatives de CO<sub>2</sub> (avec pour base 100 les motorisations à essence actuelles) :

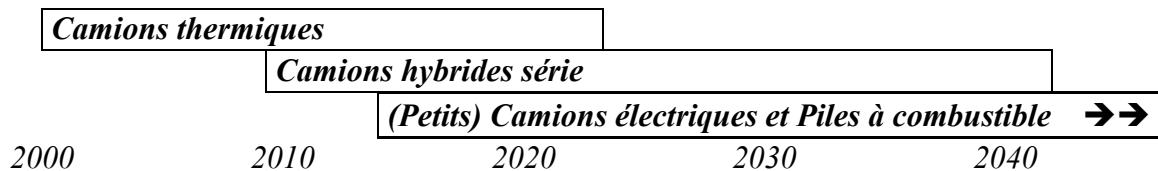
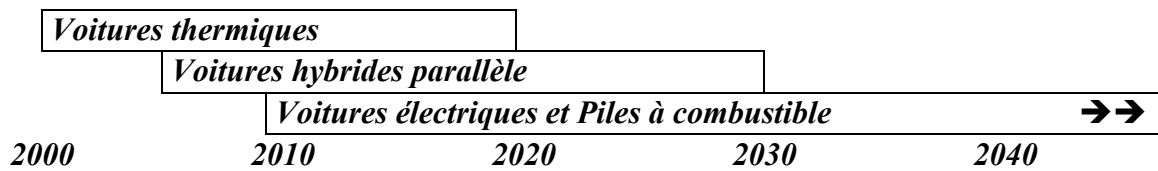
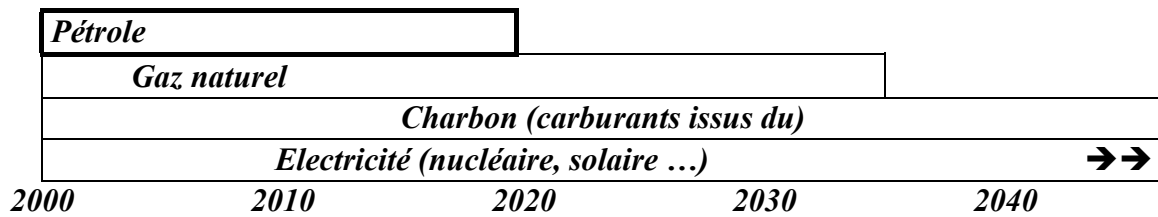
<b>Energie et motorisation</b>	<b>CO<sub>2</sub> relatif</b>	<b>Observations</b>
Essence actuel	100	Base
Essence injection directe (IDE)	85	
GPL	85	Surcoût -Fiscalité promotionnelle
Electrique batteries *Charbon	85	Performances inférieures (autonomie, vitesse) Surcoût -Aides financières
Diesel (préchambre)	85	
Hybride parallèle Essence	80	Toyota Prius -Coût réel double de la Base
Diesel injection directe (IDD)	75	
Gaz naturel	75	Surcoût -Fiscalité promotionnelle
Diester 30 %	75	Surcoût -Fiscalité promotionnelle
Hybride parallèle IDE	70	
Hybride parallèle Diesel	70	
Hybride parallèle IDD	60	
Electrique Pile à combustible + reformeur (essence, méthanol)	40	A l'horizon 2015 ? Coût actuel prohibitif Pb Production, distribution et stockage du H <sub>2</sub>
Electrique batteries *Nucléaire	0	Performances inférieures (autonomie, vitesse) Surcoût -Aides financières

\*Charbon, \*Nucléaire = électricité produite par une centrale au charbon, nucléaire

Pour une motorisation donnée, par exemple le moteur à allumage commandé de base, l'émission de CO<sub>2</sub> est proportionnelle au produit de la consommation par un coefficient qui est fonction du rapport hydrogène/carbone du carburant; ce coefficient vaut 3,17 pour l'essence et seulement 2,75 pour le gaz naturel (méthane).

Le choix d'une solution technologique ne peut se limiter au seul critère du CO<sub>2</sub>. Il convient de tenir compte aussi des contraintes d'environnement portant sur les autres polluants (oxydes d'azote, particules ...); ainsi apparaît l'intérêt des motorisations hybrides parallèle qui autorisent des émissions de polluants très basses, voire nulles en circulation urbaine. Par ailleurs le renchérissement du pétrole et l'appauvrissement des ressources prévisible à moyen terme (20 ans ?) peuvent donner un nouvel élan au véhicule électrique.

*Perspectives sur les énergies et les modes de propulsion*



Autres sources d'énergie ... (hydrogène pour les moteurs thermiques et pour les piles à combustible ?)