

23

QUELLES TECHNOLOGIES FUTURES POUR LES TRANSPORTS EN EUROPE ?

*Contribution au groupe "Technologies-clés"
de la Commission européenne*

Jacques Theys



Liberté • Égalité • Fraternité

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

ministère de l'Écologie,
du Développement et de
l'Aménagement durables

23

**QUELLES TECHNOLOGIES FUTURES
POUR LES TRANSPORTS
EN EUROPE ?**

*Contribution au groupe "Technologies-clés"
de la Commission européenne*

Jacques Theys

Novembre 2007

SOMMAIRE

PRÉFACE (Elie FAROULT, Commission européenne)	7
---	---

AVANT-PROPOS	9
--------------------	---

PARTIE I : L'INNOVATION DANS LES TRANSPORTS ET SES ENJEUX EUROPÉENS: DE QUELLES TECHNOLOGIES PARLE-T-ON ?

1. Paradoxes et spécificités de l'innovation dans les transports	13
2. Le rôle des transports dans l'économie et la société européennes: quelques éléments de cadrage	16
3. Un large éventail de technologies envisageables, mais une grande difficulté à les hiérarchiser	18
4. Les dynamiques de long terme: constantes historiques et discontinuités	18
5. Quatre visions contrastées des Technologies-clés pour le futur	23
6. Conclusions de la première partie	26

PARTIE II LA PERCEPTION EUROPÉENNE ET INTERNATIONALE DES ENJEUX POLITIQUES ET TECHNOLOGIQUES À MOYEN TERME POUR LES TRANSPORTS: UN ÉTAT DES LIEUX SÉLECTIF DES RÉFLEXIONS RÉCENTES

1. Une vision politique des enjeux européens: le « Livre blanc » de 2001 et ses incidences technologiques	31
2. Les perspectives industrielles: les visions à 2020 des « plates-formes technologiques »	35
3. Les exercices de foresight récents: quelques illustrations	45
4. Quelques conclusions	53

PARTIE III TENDANCES, RUPTURES ET QUESTIONS CLEFS À L'HORIZON 2030-2050: VERS UNE MUTATION RADICALE OU UNE CRISE DES TRANSPORTS EUROPÉENS

1. Un bref retour sur les années 1970-2000: quelles significations donner à l'inflexion de la décennie 90?	57
2. L'évolution tendancielle des transports dans l'Europe élargie à l'horizon 2030: éléments de cadrage chiffrés de la Commission européenne	60
3. Quelques tendances ou incertitudes majeures à l'horizon 2030-2050: une approche qualitative	62
4. L'évolution à long terme des marchés: quelles conséquences d'un « basculement » au profit des pays émergents?	67
5. Le défi de l'énergie et de l'environnement: pourra-t-on éviter une rupture radicale dans les systèmes de transport?	71
6. Conclusion: quels enjeux pour les transports à l'horizon 2030-2050?	76

PARTIE IV
QUELS ENJEUX TECHNOLOGIQUES MAJEURS À MOYEN ET LONG TERME :
ÉLÉMENTS DE HIÉRARCHISATION

1. Quelles technologies pour le futur ? Un inventaire et quelques propositions de priorités	79
2. Un enjeu majeur : les technologies énergétiques et de réduction de l'effet de serre	84
3. Les enjeux et verrous liés aux nouvelles technologies de l'information et de la communication à travers le cas des applications satellitaires (GALILEO)	92
4. Conclusion	95

PARTIE V
LE POSITIONNEMENT INTERNATIONAL DE LA RECHERCHE EUROPÉENNE
ET L'ÉVOLUTION DES PROGRAMMES COMMUNAUTAIRES

1. Les transports : le premier secteur de recherche privée en Europe	99
2. Les orientations de la recherche publique européenne et son positionnement international	104
3. Le positionnement de l'Europe sur quelques « Technologies-clés » : un retard préoccupant sur les technologies émergentes majeures	109
4. Conclusion de la partie V et analyse SWOT de la recherche sur les transports	115

CONCLUSIONS FINALES ET RECOMMANDATIONS

ANNEXES :

ANNEXE 1 : QUELQUES CARACTÉRISTIQUES DE LA RECHERCHE AUTOMOBILE EN FRANCE (FUTURIS)	123
ANNEXE 2 : CONTROVERSES ET INCERTITUDES TECHNOLOGIQUES SUR L'UTILISATION DE L'HYDROGÈNE ET DE LA PILE À COMBUSTIBLES DANS LES TRANSPORTS TERRESTRES (TECHNOPOLIS)	129
ANNEXE 3 : LES BIOCARBURANTS DE SECONDE GÉNÉRATION : DES PERSPECTIVES CONTROVERSÉES	139

PRÉFACE

Elie Faroult

Conseiller Scientifique – (Scientific officer)

Commission Européenne – Direction Générale de la Recherche

Unité K 2 (Prospective Scientifique et Technologique)

Ce rapport de Jacques Theys a été produit dans le cadre d'un groupe d'experts européens de haut niveau réfléchissant sur l'avenir de la recherche sur les technologies clés à l'horizon de 2025.

Ce groupe composé d'une vingtaine de spécialistes représentant différents champs de recherche (des nanotechnologies aux sciences cognitives) ou différents secteurs d'activités (des transports à la santé) a fourni 18 rapports plus un rapport de synthèse qui a tenté de dégager des enseignements communs aux différents domaines et de suggérer quelques lignes d'actions pour les politiques et stratégies possibles au niveau européen¹.

Le rapport de Jacques Theys sur les transports est de ce point de vue assez exemplaire.

Il a tout d'abord permis de préciser, dans ce secteur spécifique, la complexité d'une analyse sérieuse des conditions et des enjeux du développement des innovations technologiques ; complexité caractérisée d'abord par le nombre considérable des technologies et des fonctions à intégrer, mais aussi par l'extrême cohérence, et donc l'inertie, des systèmes techniques concernés, leur caractère hybride (combinant apports publics et privés, logiques de produits et de réseaux ...), et finalement le rôle central que joue dans leur fonctionnement l'utilisateur lui-même. La conclusion principale de cette dernière partie est de privilégier, pour le futur, une approche délibérément systémique et prospective.

L'analyse qui suit de la dimension européenne témoigne d'une connaissance approfondie par l'auteur des positions (à travers les documents

officiels de la Commission) et des éventuelles orientations possibles telles que préfigurées par les travaux des plates formes technologiques comme des différents exercices spécifiques à certains sous secteurs du transport (maritime, ferroviaire...). L'une des conclusions importantes de cette analyse insiste sur le lien et l'impact croisé entre le secteur des transports et les questions environnementales et énergétiques. Là encore seule une approche systémique permettrait de développer des solutions pertinentes et efficaces.

*L'une des principales qualités de ce rapport est aussi – tout en utilisant largement les projections des modèles économétriques et des approches prévisionnelles – de laisser une large place à une réflexion ouverte et créative de type prospectif sur les possibles « ruptures » pouvant introduire des scénarios innovants. Les conclusions qu'en tire l'auteur s'inscrivent ainsi naturellement dans l'une des préconisations majeures du groupe « Technologies-clés » qui est de **développer une « approche duale » de la recherche européenne** donnant une part égale aux enjeux et opportunités de court terme et à une prise de risque à plus long terme sur les technologies de rupture.*

Le lecteur trouvera enfin dans ce document un ensemble de données quantitatives sur la comparaison Europe-États-Unis-Japon (mais aussi Chine et Inde) qui permettent, en conclusion, de suggérer quelques propositions pour orienter la recherche européenne dans ce secteur des transports-de manière à consolider et développer les forces, réduire les faiblesses, anticiper les menaces et profiter des opportunités actuelles de la recherche technologique.

¹ Les dix huit rapports sont disponible sur le site de la Commission européenne. Le rapport de synthèse a été publié en 2005 sous le titre : « *Creative system disruption: towards a research strategy beyond Lisbon* » Key Technologie expert group.

Ce rapport qui a été largement disséminé, dans les différentes Directions de la Commission européenne est un élément solide de réflexion et de décision pour les orientations qui devraient être au cœur des politiques futures de transports aussi bien que celles de l'énergie ou de l'environnement tant au niveau européen que de celui au niveau des différents pays membres.

Ministère de l'Écologie, de l'Énergie,
du Développement durable, et de
l'Aménagement du territoire
Aménagement
et du Développement durable

Direction de la Recherche et de
l'animation scientifique et technique

Centre de Prospective et de Veille
Scientifique et Technologique

Commission européenne
Direction Générale de la Recherche

Unité K2
[Prospective scientifique
et technologiques]

Groupe d'experts technologies-clés

QUELLES TECHNOLOGIES FUTURES POUR LES TRANSPORTS EN EUROPE ?

**Contribution au groupe
"Technologies-clés" de la Commission européenne**

Jacques Theys

* Rapport réalisé par la Commission européenne en 2005 et publié avec son autorisation dans sa version française, en 2007

Ce document, consacré aux **technologies futures de transport**, constitue l'un des volets d'un exercice ambitieux lancé par la Commission européenne¹ en 2005 visant à déterminer des « **Technologies-clés pour le futur** » dans des domaines aussi différents que les technologies génériques (biotechnologies, nanotechnologies...), certaines disciplines scientifiques (comme les sciences sociales...) ou des secteurs d'activité comme l'énergie, l'environnement ou la mobilité.

À l'évidence, il existe des différences de nature très profondes entre ces champs de recherche et d'innovation qui rendent difficile la comparaison. D'où la nécessité de rappeler dans une introduction générale et **première partie** ce qui fait la spécificité de l'innovation dans le domaine des transports et de poser la question : de quelles Technologies-clés parle-t-on ?

Une **deuxième partie** fait une cartographie de la perception actuelle des enjeux technologiques dans le domaine des transports par les différents acteurs européens (entreprises, Commission européenne, administrations nationales,...).

Une **troisième partie** tente de hiérarchiser les questions clefs à long terme à partir des tendances et ruptures mises en évidence par les travaux de prospective.

Une **quatrième partie** propose une première hiérarchie des Technologies-clés pour l'ensemble des modes de transport et précise les enjeux correspondants dans trois domaines : l'environnement et l'effet de serre, les nouvelles technologies de la communication et de l'information et les « technologies de rupture ».

Enfin, une **cinquième et dernière partie** apporte quelques éléments d'évaluation sur le positionnement européen de la recherche en matière de transports et fait une analyse de l'évolution récente des programmes communautaires.

Tous ces éléments sont finalement récapitulés sous la forme d'un bilan « **SWOT** » des forces et faiblesses de la recherche européenne et de recommandations pour les politiques futures de recherche.

Le message essentiel qui s'en dégage est la nécessité, au niveau européen, d'adopter **une stratégie duale de recherche-développement** accordant une attention égale, d'une part, à la multiplicité des opportunités d'innovations socio-techniques à court terme ouvertes notamment par les NTIC ; et de l'autre aux innovations de rupture à long terme sans lesquelles une crise durable des systèmes de transport ne pourra être évitée.

¹ Projet lancé à l'initiative de la DG Recherche (division « Foresight » et politiques de la science). Publié en 2006 par la Commission sous le titre "Creative system disruption: towards a research strategy beyond Lisbon", [key technologies expert group]. Le rapport de synthèse est disponible à l'Office des publications des Communautés européennes (EUR 21968).

EXECUTIVE SUMMARY

With almost 15% of the jobs and 40% of commercial exports, transports constitute an essential sector for competitiveness and dynamism of the European economy. They also represent a major issue for the integration of a widened European space, the improvement of daily life and of local – or overall environment. The leadership acquired by Europe in this field – from aeronautics to high-speed trains while passing through cars and services, has been made possible, for 30 years only by active innovation policies: the paradox is that although representing almost a quarter of European private research, transports do not appear like an advanced technology sector probably because they are diffusers and users rather than «generators» of new techniques.

Key technologies for the future of transports cannot be envisaged simply in continuity of these last years dynamic. They have also to take account of the possibility of discontinuities or ruptures at the horizon of the next 30 years in relation to the change of scale of “mobility spaces” with the massive integration of new information technologies, the new Asian markets and competition and especially to climate risks and shortage of oil provision. Regarding the possibility than in 2030 **only** transports uses the oil available it will not be enough to develop “incremental” technologies as it was the case in the previous decades; but **voluntary transition strategies towards rupture technologies will also have to be conceived.**

Resting on the results of technological platforms and on a foresight analysis of the key tendencies and issues by 2030, this report proposes, from this double continuity and rupture point of view, a reasoned list of **25 key-technologies for the future of transports**. In the absence of more detailed information, the assessment of the scientific and technological potential of Europe covers however only some of these technologies and elements of overall assessment. It reveals a diversified situation: on the one hand strong innovation dynamics carried by major companies (ten of the twenty more important private research budgets are found in transports); on the other hand a weakness and a major dispersal of public or – European research – and an alarming delay of Europe on technologies which are emergent – like the fuel cell.

The report concludes by six major recommendations: work out “transition” strategies in the long run by major issue (energy, greenhouse effect, enlargement, vulnerability of transport...); carry out detailed quantified assessments of public and private research programmes in the various European countries; focus the European research programmes (7th PCRD) on emergent technologies “ruptures”) and on tools or techniques useful to the implementations of European policies; evaluate the impact on the transports of emergent technologies (nanotechnologies...); and finally create a European research and dissemination network on innovations comparable to Transport Research American Board, created in 1925.

Première partie

**L'INNOVATION DANS LES TRANSPORTS
ET SES ENJEUX EUROPÉENS :
DE QUELLES TECHNOLOGIES PARLE-T-ON ?**

L'INNOVATION DANS LES TRANSPORTS ET SES ENJEUX EUROPÉENS : DE QUELLES TECHNOLOGIES PARLE-T-ON ?

I. PARADOXES ET SPÉCIFICITÉS DE L'INNOVATION DANS LES TRANSPORTS

L'innovation dans le domaine des transports soulève un **paradoxe majeur** : près du quart de la recherche privée européenne y est consacré² ; dix des vingt entreprises ayant les plus importants budgets de recherche en Europe appartiennent à ce secteur³, que ses performances classent parmi les plus innovants en Europe ; et pourtant les transports n'ont pas – comme les nanotechnologies, la microélectronique ou les biotechnologies – l'image d'un domaine de technologies avancées, porteur d'inventivité et de créativité fortes.

Ce paradoxe tient à deux caractéristiques remarquables :

- D'une part, les transports sont beaucoup plus un **secteur d'intégration de technologies externes** que la source de technologies spécifiques ou génériques diffusantes⁴. Il faut se rappeler par exemple que l'informatique et l'électronique représentent aujourd'hui 30 % de la valeur d'une automobile (demain 50 %) ; et que l'airbag a été l'un des premiers domaines d'application des nanotechnologies. En revanche, ce qui constitue la spécificité de l'innovation dans le domaine des transports, c'est d'abord la capacité à maîtriser la conception, l'assemblage ou « l'ingénierie » de **systèmes complexes** – les « objets » comme les avions, les automobiles ou les systèmes de gestion de trafic étant, en effet, parmi les plus complexes qui puissent être utilisés⁵ (voir schéma n° 1). En conséquence, les logiques de coût et d'organisation des processus de production y jouent un rôle majeur⁶.

- La deuxième caractéristique est qu'il s'agit – contrairement aux

nanotechnologies ou aux biotechnologies – d'un **domaine d'activité arrivé à maturité**, dans lequel les systèmes techniques existants ont atteint une très forte cohérence interne et une très grande sophistication – rendant difficiles les innovations de « rupture ».

Ces spécificités posent d'emblée deux questions pour un exercice sur les Technologies-clés :

- comment intégrer les *innovations « extérieures »* qui jouent un rôle de plus en plus déterminant dans les dynamiques d'évolution des transports⁷ ?

- quelle place donner à l'*innovation « incrémentale »* qui conditionne une bonne part de la compétitivité de l'industrie européenne à moyen terme, par rapport aux *innovations de rupture* qui seront probablement nécessaires à long terme pour faire face aux problèmes de l'énergie et de l'effet de serre ?

- Une troisième spécificité importante de l'innovation dans le domaine des transports tient au **caractère très largement hybride – à la fois privé et public – des biens et services concernés**. D'un côté il s'agit d'un secteur majeur de la consommation avec des « produits » soumis à une concurrence très forte et présents sur l'ensemble du marché mondial. De l'autre, il s'agit de biens et services dont l'usage est très largement déterminé par l'action publique intervenant à de multiples échelles – l'existence d'externalités nombreuses, la nécessité d'infrastructures lourdes fonctionnant à rendement croissant, l'occupation de l'espace public, l'importance des problèmes de conges-

2 Source : Science and Engineering indicators, US National Foundation, 2004.

3 Source : The 2004 EU Industrial R&D Scoreboard, European Commission, DG Research.

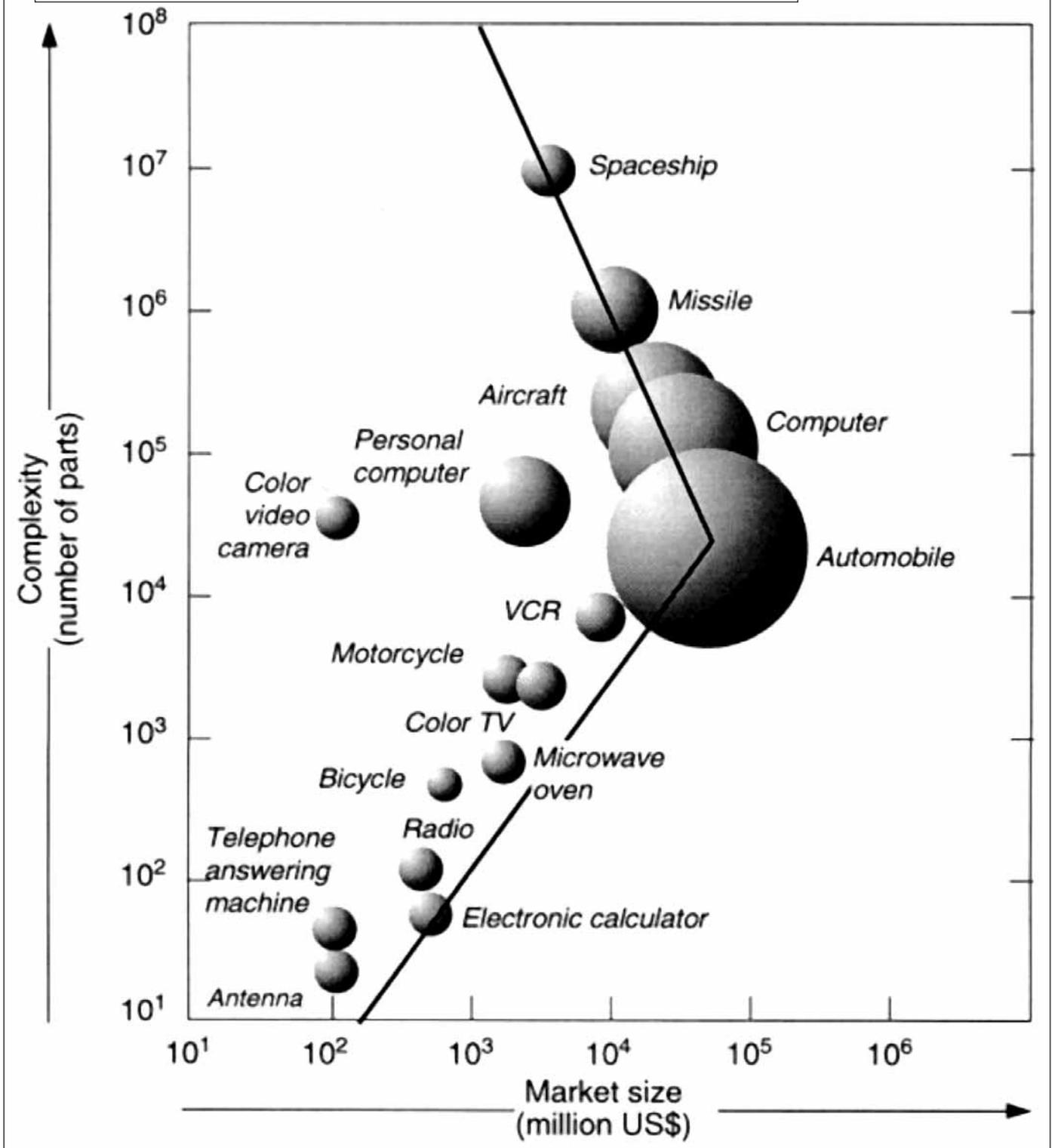
4 On doit remarquer cependant que les innovations majeures en matière de motorisation (machine à vapeur, moteur à combustion interne, moteur à réaction...) ont eu des effets très importants sur le reste de l'industrie.

5 En 1990, une voiture moderne comportait plus de 30 000 « composants », un Boeing 747 environ 3,5 millions (AYRES) – voir le schéma n° 1.

6 Les transports ont ainsi été à l'origine de beaucoup de concepts en matière d'organisation industrielle (« Fordisme », « Taylorisme », « Toyotisme », « juste à temps », « zéro défaut » ...).

7 Les nouvelles technologies de l'information et de la communication ont, par exemple, été à la source d'une bonne part des progrès techniques récents constatés dans et l'aéronautique.

Schéma n° 1 : Les transports, exemple par excellence des systèmes techniques complexes



I Taille des marchés en millions de dollars et complexité des systèmes (nombre de pièces par item).

Source : AYRES, NAGAYAMA et FUNK, cité par Arnolf Grübler in « Technology and global change », Cambridge University Press, et IIASA, 1998.

tion et de sécurité... justifiant des régulations publiques fortes – et dans certains cas, le recours à des opérateurs publics. Cette hybridation induit des caractéristiques originales en matière d'innovation dont il faut tenir compte :

- le rôle important des infrastructures, leur très longue durée de vie et leur nécessaire dépendance de la puissance publique ;
- la très grande complexité des systèmes de décision avec une multiplicité d'acteurs publics et privés – constructeurs, opérateurs, concep-

teurs, régulateurs, usagers... – intervenant à toutes les échelles ;
– et enfin, des mécanismes de marché forcément influencés par la réglementation et les financements publics.

Ces caractéristiques spécifiques – qui concernent moins les produits que les services et usagers – posent, là encore, un **dilemme important en termes de priorité de recherche** et de détermination des « Technologies-clés » :

– faut-il privilégier une logique de compétitivité et d'adaptation des technologies futures au marché mondial, en limitant les interférences publiques à la normalisation ?

– ou faut-il hiérarchiser les priorités en fonction de finalités publiques précises, telles que, par exemple, la mise en œuvre du Livre blanc européen sur les transports, adopté en 2001 ?

On est là naturellement face à une bifurcation majeure.

• Cette dichotomie public/privé ne doit pas enfin faire oublier une quatrième et dernière caractéristique de l'innovation dans le domaine des transports, qui est **le rôle central de l'utilisateur dans le fonctionnement et la performance finale des systèmes techniques concernés**. Tout le monde sait, par exemple, le rôle que jouent les comportements et les spécificités culturelles dans la sécurité routière – avec 80 % des accidents dus à des erreurs humaines, mais surtout des différences entre pays considérables. On pourrait à l'infini multiplier les analyses montrant qu'une très large part des avantages ou des inconvénients liés aux différentes technologies alternatives de transport sont liés à des pratiques ou à des décisions qui leur sont en partie extérieures : par exemple, aux États-Unis, l'amélioration très significative de l'efficacité énergétique des automobiles entre 1970 et 1990 (+ 30 %) a été très largement compensée par la « montée en gamme » du parc, la hausse de la

mobilité (+ 10 %) et surtout la baisse du nombre de passagers par voiture (- 20 %) – ce qui explique que finalement les émissions de carbone aient augmenté de 20 % pendant cette même période⁸.

La question de la place à accorder aux usagers est une question essentielle qui se pose non seulement pour une réflexion sur les Technologies-clés (quel champ prendre en compte ?) mais aussi en termes de stratégie et d'orientation du système technique futur en matière de transport :

– faut-il privilégier une vision qui « découple » les performances techniques des usagers, en favorisant parallèlement les solutions réduisant les interventions humaines (pilotage automatique, bridage des moteurs, autoroutes automatisées, véhicules guidés sans conducteur...) ;

– ou faut-il considérer que les usagers et leurs pratiques font partie intégrante des systèmes techniques de transport, ce qui conduit nécessairement à élargir les champs de recherche aux valeurs, aux comportements, aux capacités cognitives, aux modes de vie et d'organisation sociale, à l'appropriation des technologies... ce qui est naturellement une optique très différente.

• En résumé, on voit bien, à ce stade, qu'il y a au moins deux conceptions très contrastées d'un exercice sur les Technologies-clés en matière de transport :

– une conception relativement étroite, centrée sur la compétitivité des produits et la performance en amont des techniques ;

– *et une conception beaucoup plus large et systémique, qui intègre les politiques publiques et les comportements des usagers et laisse une certaine place à l'innovation sociale comme moteur important des changements futurs.*

Ces observations générales doivent naturellement être replacées dans un contexte européen.

⁸ Source : Arnolf Grüber – « *Technology and global change* », Cambridge University Press, 1998.

II. LE RÔLE DES TRANSPORTS DANS L'ÉCONOMIE ET LA SOCIÉTÉ EUROPÉENNES : QUELQUES ÉLÉMENTS DE CADRAGE

Si les transports constituent pour l'Europe un champ de recherche et d'innovation prioritaire – tant au niveau des programmes nationaux qu'au niveau communautaire⁹, c'est d'abord parce qu'il s'agit d'un **secteur économique majeur**, essentiel à l'emploi et à l'économie et à l'intégration européenne, et dans lequel les entreprises de notre continent ont acquis des avantages comparatifs significatifs au niveau mondial. C'est aussi parce que les Européens ont pris récemment conscience des défis « gigantesques » auxquels les transports allaient être confrontés dans les décennies à venir avec la **raréfaction du pétrole et la croissance de l'effet de serre...** Et sans doute finalement parce que les nouvelles technologies apparaissent comme une des solutions les plus efficaces face à ces défis.

• Sans anticiper la prospective, il suffit de citer quelques chiffres pour se rendre compte de l'importance actuelle de ces enjeux (**voir aussi le tableau n° 1**).

Les transports en Europe c'est en effet aujourd'hui :

- 40 % des exportations et 70 milliards d'euros d'excédents de la balance commerciale européenne ;
- 12 % de la valeur ajoutée ;
- un quart de la recherche/développement des entreprises ;
- 14 % des emplois et des dépenses des consommations des ménages¹⁰ ;
- un marché de 750 milliards d'euros (dont 620 pour les automobiles) ;
- près de 30 % de la flotte maritime mondiale et des passagers aériens transportés ;
- une mobilité annuelle de 5 000 milliards de passagers-kilomètre et de plus de 1 000 milliards de tonnes-kilomètre transportées.

Mais aussi :

- 50 000 victimes dans les accidents de la route ;

- au moins 50 millions de personnes exposées à des niveaux de bruit supérieur à 65 décibels ;
- entre 1 et 4 % de l'usage des sols ;
- 28 % des émissions de CO₂ ;
- 35 % de la consommation d'énergie ;
- et 70 % de la consommation de pétrole.

• Historiquement, les transports ont toujours eu un rôle important dans le développement économique de l'Europe. Deux chercheurs ont montré récemment, par exemple, qu'ils avaient été un facteur majeur de la croissance allemande pendant la période de reconstruction – expliquant, selon eux, la moitié de l'augmentation du PIB dans les quatre décennies d'après-guerre¹¹. Même si une bonne part des infrastructures sont désormais construites en Europe de l'Ouest, et si les taux de motorisation ont atteint dans beaucoup de pays les niveaux proches de la saturation, tous les facteurs convergent pour laisser penser que le développement et la gestion des transports vont continuer à être des enjeux déterminants pour l'Europe dans les années à venir, puisqu'il s'agit à la fois dans les 20-30 ans à venir :

- de maintenir durablement la compétitivité d'un secteur essentiel pour l'emploi et l'exportation en Europe ;
- de s'adapter à la mondialisation et à la reconfiguration des flux d'échange qui en résulteront ;
- de créer un espace européen intégré et sans frontière, condition indispensable au succès de l'élargissement ;
- de répondre à une demande de mobilité fortement accrue à l'horizon 2030 – tant pour les voyageurs (+ 50 %) que pour les marchandises (+ 80 %) ;
- de préserver un certain modèle européen d'équilibre territorial et d'équité sociale dans l'accès aux services ;
- de poursuivre les gains en sécurité, tout en prenant en compte les nou-

9 Il faut rappeler que le budget de recherche communautaire consacré aux transports s'est élevé à 1,7 milliard d'euros de 1998 à 2002.

10 Dont 7,5 millions d'emplois dans le secteur des « services de transport » (voir tableau n° 1).

11 Source : Baum et Kurte, recherche citée dans le rapport « *Mobility 2030* » publié en 2004 par le *World Business Council for sustainable development*. La période concernée est 1950-1990.

Tableau n° 1 : Un aperçu des transports européens en 2002

Employment	The transport services sector employed about 7.5 million persons in the EU-25. 61% of them worked in land transport (road, rail, inland waterways), 2% in sea transport, 5% in air transport and around one third (32%) in supporting and auxiliary transport activities (such as cargo handling, storage and warehousing, travel and transport agencies, tour operators).
Household expenditure	Private households in the EU-25 spent 745 billion or roughly 14% of their total consumption on transport. About one sixth of this sum (124 billion) was spent for purchased passenger transport services, the rest (621 billion) for private transport (mainly cars).
Goods transport	The demand for the four transport modes road, rail, inland waterways and pipelines in the EU-25 added up to 2158 billion tkm or 4764 tkm per person. Road accounted for 72.0% of this total, rail for 16.4%, inland waterways for 6.0% and pipelines for the remaining 5.6%. These figures, however, do not include maritime transport, for air transport. For the EU-15, maritime transport alone had a share of almost 41 %.
Passenger transport	Intra-EU-25 and domestic transport demand using passenger cars, buses & coaches, railways as well as tram & metro was ca. 5092 billion pkm or 11240 pkm per person. Passenger cars accounted for 82.5% of this total, buses & coaches for 9.5%, railways for 6.8% and tram & metro for 1.1 %. These figures, however, do not include air transport which, in the EU-15, had a share of 5.7% of total transport performance.
Transport growth	<u>Goods transport</u> : ca. 2.4% per year (1995-2002). <u>Passenger transport</u> : ca. 1.7% per year (1995-2002).
Safety	<u>Road</u> : 49719 persons killed in the EU-25 (fatalities within 30 days), 38604 of which in the EU-15. <u>Rail</u> : 121 passengers killed in the EU-15.

Source : EUROSTAT.

veaux risques liés à la vulnérabilité croissante des systèmes de transport ;
– et enfin, d'éviter l'éventualité d'une crise majeure liée à la pénurie de pétrole et à l'aggravation de l'effet de serre dans un contexte tendanciel de croissance des émissions de CO₂ et de croissance des

consommations d'énergie d'un tiers en 2030.

C'est naturellement cette possibilité de crise qui – comme on le verra – surdétermine une grande majorité des exercices de prospective technologique sur les transports faits à l'échelle européenne et mondiale.

III. UN LARGE ÉVENTAIL DE TECHNOLOGIES ENVISAGEABLES, MAIS UNE GRANDE DIFFICULTÉ À LES HIÉRARCHISER

□ On sait déjà que pour répondre à ces défis européens, il faudra faire à l'horizon 2020-2030 des progrès considérables – de 40 à 50 % pour les coûts de production, ou les émissions unitaires de CO₂¹² de 75 % pour la sécurité routière... (voir en partie II et III).

□ On sait aussi que pour cela, il faudra concevoir, mobiliser, adopter, ouvrir au marché tout un ensemble de technologies nouvelles allant de la pile à combustible jusqu'aux applications de GALILEO en passant par l'électronique de puissance, les nouvelles technologies de l'information, les matériaux composites, les nanotechnologies, les biocarburants...

□ L'offre potentielle de technologies nouvelles telle qu'elle est évaluée par les experts est a priori considérable : c'est, en tout cas ce qui apparaît dans « l'inventaire des innovations de transport les plus prometteuses » réalisé il y a quelques années par l'Institut de Prospective Technologique de Séville¹³ (voir le tableau n° 2 suivant).

□ Mais malgré la multiplication récente des exercices de « foresight », des « roadmaps », des « plates-formes » technologiques, il est très difficile aujourd'hui d'avoir

une vision claire de la contribution potentielle – ou même souhaitable – de ces technologies aux enjeux qui sont identifiés :

– parce que les *techniques restent fortement controversées* et ne sont pas nécessairement compatibles ;

– parce que les informations dont on dispose sur leur coût, leur impact, leur marché potentiel, leur difficulté de mise en œuvre... sont – sauf exception – très fragmentaires ;

– parce que les solutions techniques sont presque toujours en concurrence avec des actions sur la demande ;

– enfin et surtout, parce que les objectifs fixés sont en partie contradictoires (comme par exemple les gains en énergie et ceux en sécurité et en confort)¹⁴, et qu'en général ces objectifs ne sont pas hiérarchisés.

Il n'y a donc pas actuellement *une* stratégie qui domine manifestement toutes les autres : c'est une situation qui finalement n'est pas anormale si l'on considère que *l'on est peut-être dans une phase de transition historique entre deux « systèmes » de transport sensiblement différents.*

IV. LES DYNAMIQUES DE LONG TERME : CONSTANTES HISTORIQUES ET DISCONTINUITÉS

Une des difficultés majeures pour un exercice sur les Technologies-clés en matière de transport est, qu'à l'évidence, les enjeux cités précédemment n'ont ni la même portée ni la même temporalité. Certaines s'inscrivent dans la continuité des demandes actuelles du marché et des normes existantes – et sont déjà très largement internalisées dans les programmes de recherche en cours. D'autres, au contraire, laissent ouverte la possibilité de ruptures et de discontinuités radicales à long terme. Quel horizon privilégier ? Faut-il inscrire la prospective dans la continuité des tendances ou dans la

discontinuité majeure ? Les historiens ou les économistes qui se sont intéressés aux dynamiques de long terme dans les transports suggèrent une voie intermédiaire. La plupart de leurs analyses¹⁵ font en effet le constat que malgré l'importance des substitutions périodiques entre modes, **les évolutions dans ce domaine sont marquées par des régularités remarquables** à la fois dans les comportements et les formes ou rythmes de changement. Quelle que soit la perspective adoptée – recherche des continuités ou des discontinuités – il est important d'avoir en mémoire ces régularités, ces

12 Les chiffres s'appliquent essentiellement à l'automobile. Pour les camions, par exemple, l'objectif de réduction des émissions unitaires de CO₂ n'est que de 10 %.

13 Source : Van Zuylen, Weber KM, Shiner Eriksson E, A – « Options to support the introduction of new technologies and their applications on transport policy ». Repris dans le n° 48 de la revue de l'IPTS, 2000.

14 La sécurité, en augmentant le poids des véhicules, est un obstacle majeur à la mise sur le marché de véhicules à très basse consommation (3 litres au 100). Il en est de même pour la climatisation.

15 Voir en particulier les travaux de Cesare Marchetti de l'IASA et notamment l'article préparé pour le colloque de Milan (Infrastructure, Ambiente, Sviluppo), intitulé « Space, Time and Movement », 1996.

Tableau n° 2 : Les innovations de transport « les plus prometteuses »

Catégories	Technologies (phase d'innovation)
Technologies multimodales	<ul style="list-style-type: none"> • Information multimodale sur les déplacements (2,3) • Information multimodale sur la planification de trajets (2,3) • Terminaux intermodaux de transbordement (3,4) • Terminaux intermodaux de passagers (2,3) • Services de transport multimodaux (2,3) • Système de réservation pour les modes de transport (2) • Système d'information pour la coordination des modes (2) • Système d'information pour identifier les préférences et les habitudes des voyageurs (1)
Technologies de l'information	<ul style="list-style-type: none"> • Systèmes de paiement intelligents (3,4) • Cartes à puce (3,4) • Systèmes d'authentification (2,3) • Accès mobile à Internet (4) • Téléactivités (4)
Route	<p>a) Génériques</p> <ul style="list-style-type: none"> • Systèmes de propulsion de pointe (2,3,4) • Propulsion électrique et hybride (3,4) • Pile à combustible (2,3) • Voiture électrique urbaine (3) • Planification dynamique des itinéraires (3) • Système embarqué d'information sur le trafic (4) • Péages électroniques (4) • Systèmes de navigation (4) • Systèmes de contrôle du trafic (4) • Système de gestion des emplacements de stationnement (4) • Véhicules guidés automatisés (2,3) • Systèmes d'aide à la conduite (2,3,4) • Conduite programmable (2) <p>b) Passagers</p> <ul style="list-style-type: none"> • Véhicules propulsés par l'homme (4) • Nouveaux systèmes de transport en commun individualisé à haut débit (2,3) • Covoiturage (4) • Partage de véhicule (4) <p>c) Marchandises</p> <ul style="list-style-type: none"> • Trains routiers (4) • Télématique du transport de marchandises (3,4) • Systèmes innovants de création d'infrastructures souterraines pour le transport de marchandises (2,3)
Rails	<ul style="list-style-type: none"> • Recyclage et mise à niveau des matériaux usés (train urbain) (3) • Technologies de la pile à combustible et de la batterie (systèmes de rails à la demande) (2,3) • Nouveaux systèmes de rails pour de nouveaux concepts de transport (ex. train à lévitation magnétique et transport en commun individualisé à haut débit) (2,3) • Systèmes de gestion du trafic et utilisation des technologies de l'information avec des GNSS (systèmes mondiaux de navigation par satellite). • Systèmes de communication sans fil et réseaux de communication informatique (Internet, LAN, WAN) destinés aux passagers des grandes lignes et aux trains interurbains (3,4) • Réduction du poids et de la résistance à l'avancement (3,4) • Trains pendulaires à grande vitesse (3,4) • Technologies de gestion de diverses tensions (3,4) • Métros légers et convoyeurs de personnes (3,4)
Air	<ul style="list-style-type: none"> • Megallner (12) • Tiltrotor (2) • Turbopropulseurs améliorés (3) • Transport commercial supersonique (2,3) • Dirigeables (2,3) • Aéroplanes supersoniques (3) • Systèmes de dégivrage (3) • Gestion du trafic aérien (3)
Voies maritimes/cours d'eau	<ul style="list-style-type: none"> • Bateaux entièrement électriques (2,3) • Transbordeurs maritimes rapides pour le transport de passagers (3,4) • Transbordeurs rapides de navigation intérieure pour le transport de passagers (3,4) • Canots de navigation intérieure (2)

Source van Zuylen et al. (2000), Les chiffres entre parenthèses font référence à la phase d'innovation à laquelle se trouve la technologie :

1 = technologie en phase d'invention,

2 = phase d'essai,

3 = première application pratique,

4 = introduction sur le marché,

5 = maturité et utilisation,

6 = déclin ou remplacement par une nouvelle technologie.

« *invariants* » – ne serait-ce que pour mettre en question leur globalité future.

A. L'invariance des comportements : faut-il croire aux déterminismes de la croissance et de la vitesse ?

Si l'on jette un regard sur les deux siècles passés, on constate une croissance relativement régulière des vitesses de transport (+ 3 % par an), une hausse parallèle des distances parcourues et une baisse presque systématique des coûts de transport. En deux siècles, la mobilité *motorisée* a ainsi été multipliée par 1 000, les coûts baissant d'un facteur 100 à 600 selon les calculs¹⁶.

Ce qui est remarquable, c'est qu'inversement, les temps de transport et les dépenses qui lui sont consacrées sont eux restés relativement stables. Une observation que l'on peut également faire à l'échelle géographique – en comparant des pays ayant des niveaux de vie différents : c'est ce qu'on appelle la « conjecture de Zahavi »¹⁷.

Certains experts¹⁸ ont tiré de ces régularités remarquables la conclusion d'une relation étroite et déterministe entre la croissance, la valeur du temps, la vitesse et les distances parcourues : si l'on adoptait effectivement cette hypothèse « déterministe », la valeur du temps et la mobilité à l'échelle mondiale pourraient – à budget constant – être multipliées par 4 d'ici 2050 ; l'hypothèse d'accroissement de vitesse ayant par ailleurs comme conséquence une hausse considérable de la part mondiale de l'avion (ou de tout mode de transport ayant une vitesse supérieure à 600 km/h) – qui rejoindrait celle de la voiture (38 % contre 42 %).

On mesure naturellement la valeur heuristique d'une telle « conjecture » et ses conséquences pratiques si elle se vérifiait effectivement (**voir l'encart n° 1**).

Peut-on fonder une prospective sur de tels invariants historiques ? Il est

intéressant de noter que cette vision déterministe suscite au moins deux controverses :

– pour certains experts, la « loi de Zahavi » aurait plus une valeur « régionale » qu'universelle ; ce qui veut dire qu'il y aurait non pas un mais plusieurs modèles de comportements face au temps de transport et à la vitesse, modèles entre lesquels il faudrait choisir¹⁹.

– il n'est plus désormais impossible que les transformations profondes de « l'environnement » des transports conduise dans les décennies à venir à un *renversement de la tendance historique à la baisse des coûts et à l'augmentation de la vitesse* – ce qui naturellement aurait des conséquences sur la demande, et indirectement sur les choix modaux... et les technologies.

En tout état de cause, les tendances historiques conduisent tout exercice actuel sur les Technologies-clés à *attacher une attention particulière à l'évolution et au futur des modes rapides de déplacement* – avions ou successeurs des TGV. À titre d'information, le *tableau n° 3* apporte quelques estimations raisonnées sur les prévisions futures d'évolution de la mobilité au niveau mondial ; des prévisions qui, sans infirmer les hypothèses de Schaffer, laissent envisager à l'horizon 2050 entre un doublement et un triplement de la mobilité mondiale – avec des taux de croissance moyens sur cinquante ans de 1,7 % pour la mobilité des personnes et de 2,3 % pour celle des marchandises.

B. Des constantes historiques dans les dynamiques d'innovation : quelles leçons en tirer pour le futur ?

Il n'y a pas, semble-t-il, que les comportements qui obéissent à des invariants dans le domaine des transports : c'est également le cas pour les *dynamiques d'innovation* – c'est du moins la conclusion que l'on peut tirer de l'analyse qui en a été faite récemment par *Ruud Filarski*, à partir de l'expérience des Pays-Bas et

16 La mobilité globale (non motorisée et motorisée) n'a, quant à elle, augmenté que d'un facteur 10 (Arnolf Grübler, *op. cit.*).

17 Source : Zahavi et Talvitie (1980) : « Regularities in travel, time and money expenditures » ; in : *Transportation research record*, 750, 13-19.

18 Andreas Shaffer et David G. Victor – « The future mobility of the world population », in « *Transport research* », Part A 34 (2000), Pergamon Press.

19 Source : Yves Crozet.

Encart n° 1 : Transport aérien : comment concilier les 4 « facteurs 4 » ?

Si l'on accepte les hypothèses de Schaffer, la mobilité aérienne devrait être multipliée par au moins 4 d'ici 2050, et son coût relatif réduit dans les mêmes proportions. La part de marché du transport aérien devrait ainsi croître aux dépens de la voiture. Sachant que chaque passager voyageant en avion émet 4 fois plus de CO₂ qu'en voiture, Vincent Bagard, chercheur au LET à Lyon s'est interrogé récemment sur la compatibilité de ces évolutions avec un autre facteur 4 : la réduction des émissions de CO₂ qu'il faudrait atteindre d'ici 2050 pour réduire sensiblement les risques liés à l'effet de serre.

Tableau n° 3 : Quelques estimations sur la croissance de la mobilité mondiale* à l'horizon 2030-2050

Horizons Modes	Taux de croissance par an	
	2000-2030	2000-2050
Transport de voyageurs		
Total monde	1,6%	1,7%
Total OCDE-Europe	1%	0,8%
Voitures	1,7%	1,7%
Avions	3,5%	3,3%
Trains	2,4%	2,2%
Bus	-0,1%	-0,1%
Deux roues	2,1%	1,9%
Transport de marchandises		
Total monde	2,5%	2,3%
Total OCDE-Europe	1,9%	1,5%
Véhicules légers	3%	2,7%
Camions	2,7%	2,4%
Trains	2,3%	2,2%
Croissance démographique	1%	-
Croissance Démographique (Europe)	0,1%	-
PNB (Monde)	3%	-
PNB (Europe)	1,9%	-

* hors navigation
Source : WBCSD, 2004.

d'un regard sur trois siècles d'évolution du système de transport européen²⁰.

En 350 ans, le système de transport européen a changé radicalement quatre fois. Or, constate Ruud Filarski, ce processus de transformation s'est à chaque fois produit dans des conditions et selon une direction remarquablement stables :

1) Les transports sont devenus constamment moins coûteux, plus rapides et plus confortables, rendant possible une forte croissance de la mobilité ;

2) Les arbitrages des usagers dans leur choix de mode de transport sont restés remarquablement constants. Les passagers ont toujours privilégié la vitesse, le statut, le confort, l'autonomie et la sécurité. Pour le transport de marchandises, la rapidité, la fiabilité (« juste à temps »), la qualité des « ruptures de charge », le porte à porte, la fréquence, la flexibilité et enfin la transparence des responsabilités ont toujours joué un rôle important – plus que le coût lui-même ;

3) De manière générale, le statut, la vitesse et le confort ont été privilégiés par rapport aux coûts de transport

20 Source : Ruud Filarski, "The rise and decline of transports systems", Ministry of transport and public works, Netherlands, TRC, 2004.

Tableau n° 4 : Le transport de passagers aux Pays-Bas et en Europe depuis deux siècles : les étapes du développement

Période	Phase pionnière	Phase de croissance rapide	Phase de domination
1800-1840	Chemins de fer Bateau à vapeur Voiture à vapeur	Diligence	Péniche tirée par bateau
1840-1870	Voiture à vapeur Bicyclette	Chemins de fer Bateau à vapeur	Péniche Diligence
1870-1910	Automobile Avion Autocar	Tramway Bicyclette	Chemins de fer
1910-1980	Avion Dirigeable	Automobile Bus	Bicyclette Tramway Chemins de fer
1980-2000	Véhicules guidés automatiques Modes divers	Avion	Automobile

Source : Filarski, 1997, 2004.

(d'où le relatif échec des « moyens de transport pour les pauvres ») ;

4) *Les nouveaux moyens de transport ont tous suivi une même trajectoire de développement en quatre phases successives : une phase pionnière, une phase de développement rapide, une phase de dominance et une phase de déclin.* C'est ce qu'illustre le tableau n° 4. En général, l'ensemble du cycle s'est étendu sur deux siècles²¹.

5) *La plupart des nouveaux modes de transport qui ont réussi à émerger l'ont fait dans des conditions semblables* : un processus de développement initial très graduel et prudent avec essais-erreur (investissement et prise de risque limité, expérimentation de nombreuses technologies candidates, gestion raisonnée des courbes d'apprentissage...) ; une croissance garantie dans des « niches » protégées ; l'intéressement d'un premier groupe bien ciblé d'utilisateurs reposant notamment sur des effets de différenciation sociale et de « statut » ; et enfin, la diffusion dans un second groupe d'utilisateurs beaucoup plus large, assurant le passage à la phase de développement rapide ;

6) En dépit de ces quelques « success stories », l'histoire des nouvelles technologies de transport a d'abord été une *histoire d'échecs*, la plupart des technologies nouvelles ne parvenant pas à la fin de la phase pion-

nière, notamment parce qu'elles présentaient trop de risques par rapport à des technologies concurrentes²² ;

7) Il a fallu, la plupart du temps, plus d'un demi-siècle pour passer de la phase pionnière à la phase de domination (50 ans pour le bus et le vélo, 70 ans pour la voiture et l'avion). La longueur de ce décalage est due à la nécessité de réunir trois conditions : dans un premier temps, la technique doit être suffisamment fiable et adaptée aux besoins des usagers ; ensuite, des infrastructures et des équipements doivent être construits pour la rendre « opérationnelle » ; enfin, les processus de production et de commercialisation doivent être rationalisés pour que la technique devienne accessible au plus grand nombre ;

8) On note cependant quelques exceptions à la lenteur de ce processus, comme par exemple le passage du tramway à cheval au tramway électrique aux États-Unis²³ ou celui du train au TGV en Europe. Dans les deux cas, les nouvelles technologies ont utilisé les infrastructures existantes ;

9) Dans la plupart des cas, les forces du marché ont été beaucoup plus déterminantes pour orienter les processus de changement que les politiques publiques. En particulier, la plupart des politiques gouvernementales qui ont cherché à ralentir les processus de transition ont échoué. Cela ne veut pas dire, naturellement,

21 Voir sur cette succession des modes les travaux de Marchetti et Grübler réalisés à l'IIASA.

22 On peut penser au dirigeable, à l'aérotrain, à l'avion supersonique, à la voiture électrique mais aussi au train diesel à grande vitesse, au tramway à batterie, au tramway à air comprimé, à la voiture à vapeur, au bateau volant... (source : Filarski).

23 Source : Marc Kay J. P. – « *Tramways and Trolleys: the rise of urban mass transport in Europe and the United States* », Princeton University Press, 1976 (cité par Filarski).

que les financements publics d'infrastructures n'ont pas été importants ;

10) Il a toujours été historiquement très difficile de déterminer le futur probable de techniques pionnières et quasiment impossible d'anticiper raisonnablement l'apparition de techniques entièrement nouvelles.

■ Pour Ruud Filarski, les mêmes invariants devraient jouer pour les techniques futures, à une seule exception majeure : il est probable que les politiques publiques, soutenues par la pression de l'opinion et du contexte, joueront un rôle accru vis-à-vis des dynamiques de marché et que les finalités publiques (santé, environnement, sécurité) seront mieux prises en compte. Mais cela ne remet pas fondamentalement en cause une dynamique de changement qui, pour l'essentiel, se caractérise par la lenteur et l'aversion au risque.

■ Cette vision « conservatrice » rejoint les conclusions – déjà évoquées – tirées par les sociologues de l'innovation²⁴. Trois critiques conduisent néanmoins à s'interroger sur leur pertinence pour le futur :

– face à un facteur essentiel d'inertie qui est la nécessité de changer d'infrastructure, il semble exister aujourd'hui une variété beaucoup plus large de stratégies et de techniques qui devraient permettre de jouer sur

la compatibilité et la valorisation de l'existant : on peut penser au couplage puces électroniques/satellites pour la gestion du trafic, ou aux piles à combustible sans réseau de distribution spécifique²⁵ ;

– le contexte actuel de mondialisation et de concurrence entre État et grandes entreprises favorise au moins autant la prise de risque que les stratégies de prudence : intérêt d'être « prime mover » (« winner take all »), autonomie stratégique et financière des multinationales, différenciation des politiques nationales²⁶, capacité à mieux mutualiser les risques, poids croissant du risque « inversé » (risque des stratégies d'immobilisme)²⁷... ;

– l'analyse sous-estime l'influence et les effets d'accélération ou de frein que peuvent jouer les *processus cognitifs* – par exemple à travers les « plates-formes technologiques » ou les « foresights » : effet de mobilisation et de stabilisation des stratégies d'acteurs autour de *référentiels communs*.

Ces critiques ne diminuent cependant pas l'intérêt majeur de cette analyse des grands invariants historiques : mettre l'accent sur quelques grands déterminants de l'innovation comme le couplage produit/infrastructures, les stratégies de niches, les processus d'apprentissage, ou des invariants dans la demande.

V. QUATRE VISIONS CONTRASTÉES DES TECHNOLOGIES-CLÉS POUR LE FUTUR

La vision que donne Filarski de l'innovation dans les transports est convaincante, mais ce n'est pas la seule. Il n'est pas étonnant qu'une approche historique centrée sur la transition entre modes mette en exergue le poids des inerties et la prudence des trajectoires de changement. Comme on l'a déjà rappelé, **la plupart des grands « objets technologiques » – l'automobile à combustion interne, le TGV... – constituent des « systèmes techniques » fortement stabilisés parce qu'ils réunissent trois atouts majeurs** : une grande cohérence technique interne – sans cesse « optimisée » ; une intégration et une compatibilité

très étroite avec l'ensemble de « l'environnement » extérieur (solidifié par le réseau), et une énorme capacité à assimiler les technologies nouvelles à partir du moment où elles sont complémentaires²⁸. Tant que l'on raisonne **mode par mode**, avec des configurations aussi fortement stabilisées, les seules options futures qui apparaissent sont, soit la sophistication de l'existant par des techniques incrémentales, soit le basculement radical vers d'autres techniques ou d'autres modes totalement alternatifs.

• La vision des options futures change cependant très sensiblement si l'on sort des logiques modales

24 Elle est aussi confirmée par l'échec récent de technologies ou concepts de rupture comme le MAGLEV, ou SUISSMETRO (voir sur ce projet les analyses de M. Perret, École polytechnique de Lausanne).

25 Par exemple, la stratégie de Toyota en matière d'ITS est volontairement centrée sur les véhicules, sans donc supposer une révolution des infrastructures. La sélection des innovations peut alors être faite par le marché, sans attendre des décisions politiques.

26 Par exemple, la décision chinoise de mettre en place un train à sustentation magnétique pour desservir l'aéroport de Shanghai, a relancé l'intérêt pour le projet allemand du Transrapid.

27 L'expression de « risque inversé » a été utilisée par Philippe Roqueplo à propos de la réception en France du problème des pluies acides et de la pollution de l'air dues aux automobiles dans les années 80.

28 Source : E. de Vanville et J.-J. Chanaron, « Vers un système automobile européen », Paris, Economica, avril 1971.

Tableau n° 5 : Quatre visions contrastées des technologies « clefs pour le futur »

Vision de l'innovation Vision des transports	Innovation de « complément »	Innovation de « rupture »
Approche « modale »	1. Comment optimiser les performances des modes existants ? (ex : amélioration du moteur à combustion interne).	2. Quelles technologies de rupture ? (ex : piles à combustible, nano-technologies...).
Approche systémique et fonctionnelle	3. Quel « chaînon ou maillon manquant » pour remplir des fonctions non assurées (ex : moyen rapide de déplacement par rail entre 300 et 600 km/h) ?	4. Comment « recomposer les systèmes de transport pour assurer leur « durabilité » (effets de composition d'innovations techniques et sociales) ?

pour considérer les transports comme un **système global** devant assurer un certain nombre de fonctions (communications, vitesse requise pour tel ou tel besoin, sécurité...).

C'est cette vision systémique fonctionnelle que l'on a, par exemple, lorsqu'on cherche à concevoir une politique intégrée de transport sur un territoire – comme l'illustre le schéma suivant (schéma n° 2) tiré d'un exercice de *foresight* mené en Angleterre sur les « zones de calme en centres urbains » (« *Smart cities, clear zones* »)²⁹.

Dans une telle perspective fonctionnelle, il s'agit plutôt de s'interroger sur les articulations entre composantes de système (fonctionnement de l'intermodalité, organisation urbaine, ...) ou sur les éventuels « *maillons ou chaînons manquants* » (techniques entièrement nouvelles qu'il faudrait créer pour remplir une fonction non satisfaisante).

- La vision change aussi considérablement si l'on accepte de considérer, comme Michel Frybourg l'a proposé récemment³⁰, que **l'innovation de rupture** ne se réduit pas nécessairement à un changement radical de technologies en *amont* (pile à combustible, nanotechnologie, supraconductivité...), mais qu'elle peut se situer à l'*aval*, au niveau des performances, et résulter de *l'effet de com-*

position d'une accumulation d'innovations incrémentales. Dans cette dernière perspective, proche de la vision systémique ou fonctionnaliste précédente, l'innovation apparaît beaucoup plus comme une *innovation sociale*, un changement de mode d'organisation ou de mode d'usage des techniques que comme l'émergence d'une technologie radicalement nouvelle.

Si l'on croise les deux oppositions, approche « modale » ou « systémique » d'une part ; recherche de la « complémentarité » ou de « l'innovation de rupture » de l'autre, on aboutit à quatre visions très contrastées des options « technologiques » susceptibles d'être classées et hiérarchisées dans un exercice sur les Technologies-clés, comme le synthétise le tableau n° 5.

Il n'y a donc pas une mais quatre versions différentes de ce que pourrait être un exercice de technologie-clef appliqué aux transports : le problème est qu'à chacune de ces visions correspond une méthode totalement différente !³¹

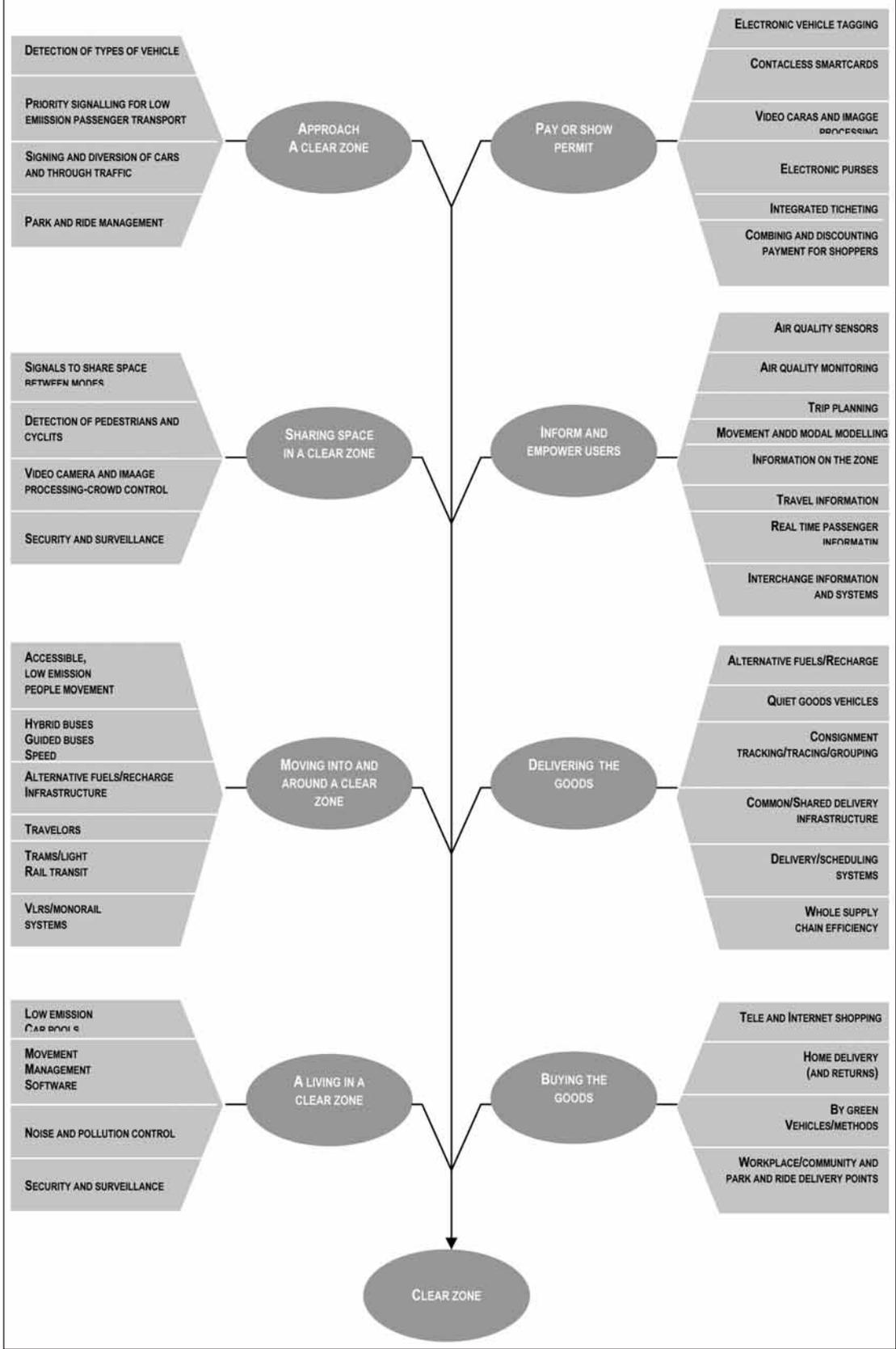
□ À cette première série d'options liées aux incertitudes sur le *champ des techniques à prendre en compte*, s'en ajoute en outre une seconde, encore beaucoup plus fondamentale qui résulte de *l'ambiguïté de la notion de Technologies-clés : la perspective est en effet très diffé-*

29 Source : Department of transport, environment and regions, and Department of trades and industry – Foresight « *Smart cities, clear zones* », April 1999, England.

30 Source : Michel Frybourg, « *L'innovation de rupture* », La documentation française, PREDIT, 2002.

31 Les plates-formes technologiques correspondent plutôt à la première, l'analyse « morphologique » à la troisième, la prospective et la méthode des scénarios à la quatrième. La deuxième approche nécessite de combiner les trois autres.

Schéma n° 2 : Un exemple d'approche systémique des transports : le foresight « Clear zones, technology tree » anglais



Source : Department of transport, environment and regions, and Department of trades an industry – Foresight « Smart cities, clear zones », April 1999, England.

rente selon qu'il s'agit d'évaluer l'offre existante de technologie par rapport à des critères prédéfinis de compétitivité ou d'intérêt scientifiques à court terme (OPTIQUE DE L'OFFRE) ; ou ce qui est très différent, de hiérarchiser des besoins technologiques futurs en fonction d'objectifs à long terme – ce qui suppose de faire une prospective de

la demande (« OPTIQUE DE LA DEMANDE FUTURE »).

Compte tenu des changements majeurs que devraient connaître les transports d'ici trente ans il semble difficile de faire l'économie d'une approche prospective par la demande et d'un investissement spécifique sur les technologies de rupture.

VI. CONCLUSIONS DE LA PREMIÈRE PARTIE

La principale conclusion que l'on peut tirer de cette longue introduction est que la réflexion sur les Technologies-clés dans le domaine des transports pose un problème – *non résolu* – de méthodes (voir le schéma n° 3).

Les spécificités du secteur – maturité économique, importance des horizons de long terme, effets d'inertie, rôle des usagers et des politiques publiques, importance de l'innovation sociale... imposent de ne pas limiter la réflexion sur les Technologies-clés à une hiérarchisation des besoins technologiques à un horizon de moyen terme par mode – réflexion qui est d'ailleurs déjà très largement faite par les plates-formes technologiques très fortement structurées dans ce domaine (voir partie II). *Il faut aussi laisser la place à des visions plus systémiques et prospectives.*

C'est ce qui explique que la suite du document soit divisée en quatre parties :

– la *seconde partie* fait une synthèse de la perception des enjeux à moyen

terme par les acteurs européens (Livre blanc de la Commission européenne, plates-formes technologiques, exercices nationaux de « foresight ») ;

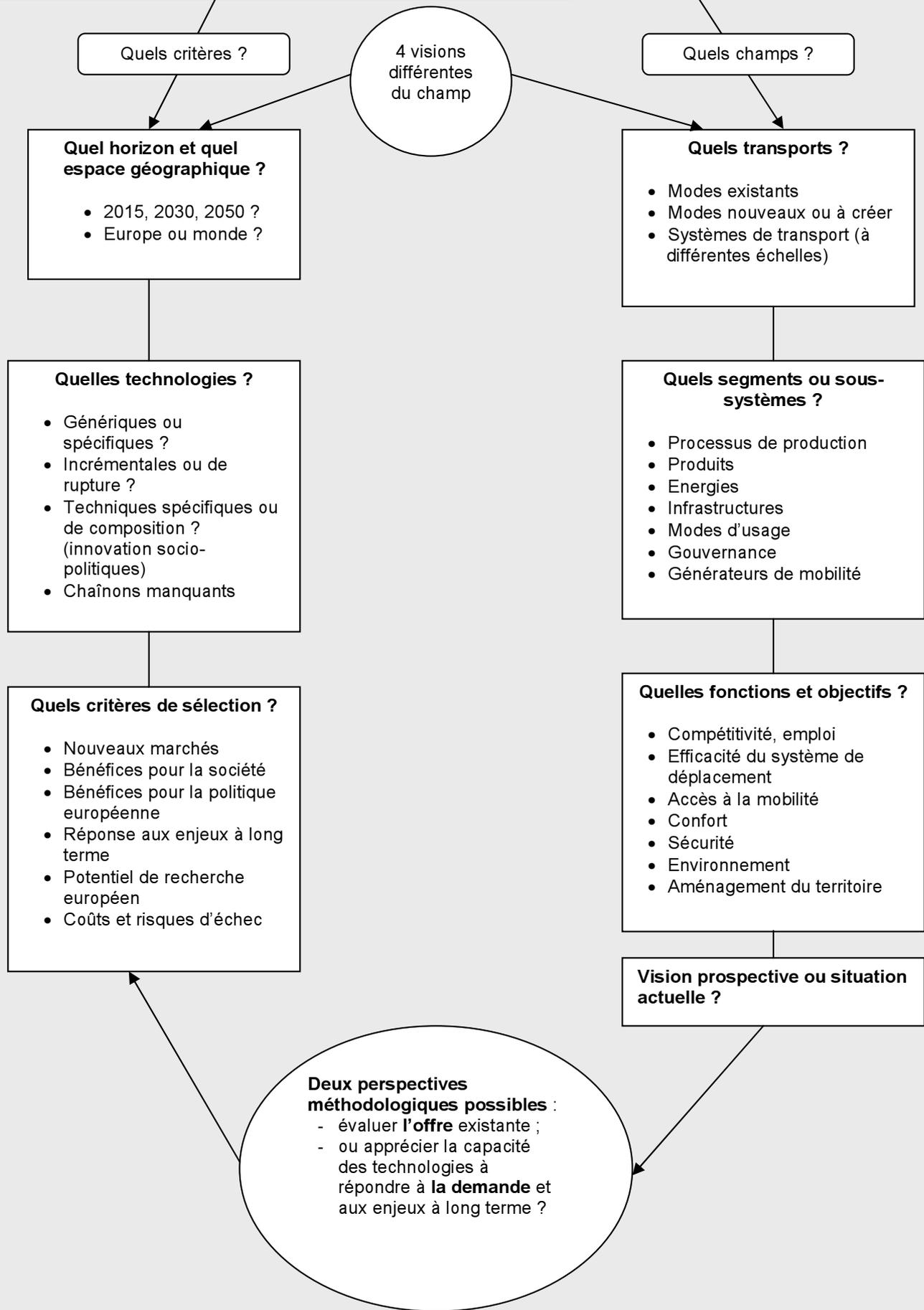
– une *troisième partie* rassemble des éléments de prospective à long terme ;

– une *quatrième partie* en tire des conclusions en terme d'enjeux technologiques, en mettant l'accent sur les transports intelligents et les techniques de rupture liées à l'énergie et à l'effet de serre (notamment la pile à combustible) ;

– une *cinquième partie* apporte enfin, quelques informations sur le positionnement international de la recherche européenne et sur l'évolution des programmes communautaires.

C'est sur la base de ces différents matériaux que la *conclusion* du document propose finalement une *première liste de « Technologies-clés »* et une analyse des forces et faiblesses de la recherche européenne (matrice « SWOT ») – destinée surtout à ouvrir le débat.

Schéma n° 3 : De quelles « Technologies-clés parle-t-on ? »



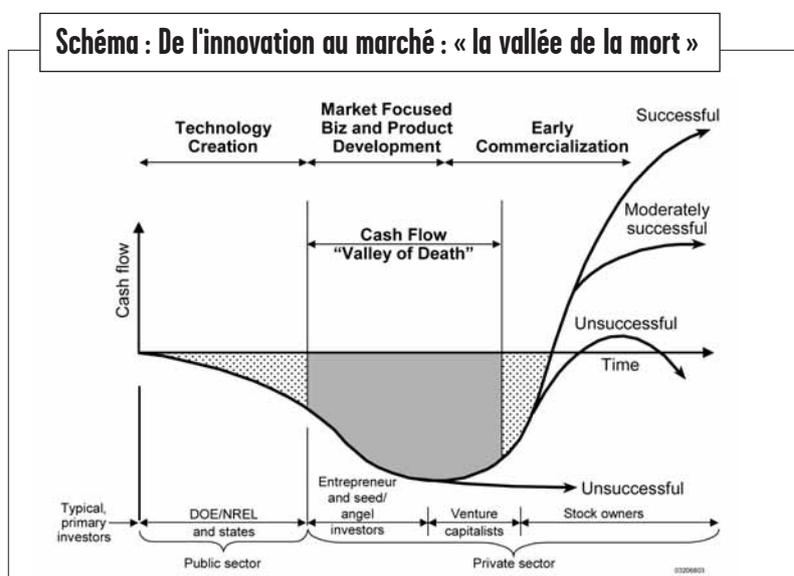
ANALYSES DES BARRIÈRES À L'INNOVATION ET EXERCICES DE TYPE « TECHNOLOGIES CLÉS » : DEUX VISIONS CONTRASTÉES DE LA PROSPECTIVE TECHNOLOGIQUE

■ C'est dans la nature des exercices de type « Technologies-clés » de mettre en avant la richesse et la diversité des promesses futures attendues de la technologie. La vision qui s'en dégage pour l'avenir est très différente de celle qui résulte généralement de l'autre versant des travaux de prospective technologique – qui lui s'attache, au contraire, à mettre en évidence la multiplicité des **barrières** de toute nature qui s'oppose au déploiement des innovations majeures, et a fortiori aux « innovation de rupture »¹.

Une vision plus réaliste des stratégies de recherche voudrait que l'on articule les deux analyses – ce qui est rarement fait (et ne l'est pas dans le présent document).

■ Sur ce second versant de l'analyse des barrières à l'innovation, une métaphore de plus en plus utilisée dans la littérature anglo-saxonne est celle de la « **vallée de la mort** » – qui se réfère à la difficulté que rencontrent, à un certain moment, les investisseurs pour passer de l'innovation à la commercialisation des produits. Comme le montre le schéma ci dessous², il s'agit d'une période de tension maximale entre, d'un côté, des demandes de « cash-flow » très fortes – nécessaires pour passer de la recherche au développement ou à la démonstration – et, de l'autre la rémanence de très lourdes incertitudes sur les marchés, les réglementation futures ou les performances technologiques attendues. Certains auteurs estiment que près de 95 % des nouvelles technologies n'arrivent pas à franchir cette « vallée de la mort ». Et sont donc incapables de survivre à la transition allant de l'innovation au succès commercial.

■ Dans le cas des alternatives au pétrole, où les inerties, dues (notamment) à la taille « gigantesque » des marchés sont considérables, et où les incertitudes aussi bien techniques qu'économiques ou politiques le sont également, on peut penser que le franchissement de cette « vallée de la mort » va être particulièrement difficile, avec des transitions longues à anticiper et à aménager.



Source : Revised from Murphy and Edwards (2003, Fig. 1, p.16).

* Comme exemple remarquable de ces travaux sur les barrières à l'innovation, voir la publication récente de l'OAK RIDGE LABORATORY: *Carbon lock-in; Barriers to deploying climate change mitigation technologies*. Novembre 2007.

** Source : MURPHY L. and P. EDWARDS, *Bridging the valley of Death: Transitioning from Public to Private Sector Financing*. National Renewable Energy Laboratory, GOLDEN, CO, 2003.

Deuxième partie

**LA PERCEPTION EUROPÉENNE ET INTERNATIONALE
DES ENJEUX POLITIQUES ET TECHNOLOGIQUES
À MOYEN TERME POUR LES TRANSPORTS :
UN ÉTAT DES LIEUX SÉLECTIF
DES RÉFLEXIONS RÉCENTES**

LA PERCEPTION EUROPÉENNE ET INTERNATIONALE DES ENJEUX POLITIQUES ET TECHNOLOGIQUES À MOYEN TERME POUR LES TRANSPORTS : UN ÉTAT DES LIEUX DES RÉFLEXIONS RÉCENTES

Le secteur des transports a fait l'objet dans les années récentes d'un nombre considérable de réflexions, à la fois politiques et scientifiques, dans lesquelles tous les acteurs impliqués – entreprises, institutions publiques, structures de programmation de la recherche, organisations non gouvernementales... – ont exprimé leurs priorités et leurs « visions à moyen terme ».

Il est à l'évidence impossible, dans un exercice sur les Technologies-clés, de ne pas tenir compte de cette diversité des perceptions et attentes ainsi exprimées par les acteurs.

C'est ce qui justifie cette deuxième partie, relativement longue, consacrée à un « état des lieux » des représentations par les acteurs européens (et plus marginalement internationaux) des enjeux politiques et

technologiques à moyen terme dans le domaine des transports.

Cet « état des lieux », volontairement sélectif, commence d'abord par rappeler les objectifs de la politique européenne qui ont été définis par le « Livre blanc » publié en 2001.

Il synthétise ensuite les principales orientations proposées par les industriels à travers les plates-formes technologiques mises en place sur les différents modes (aériens, maritime, transport routier, ferré).

Enfin, sont présentés, à titre d'illustration, quelques exercices majeurs de « Foresight » publiés récemment par les institutions européennes (ERANET Transport...), nationales (États-Unis, Grande-Bretagne, France) ou internationales (Agence Internationale de l'Énergie).

I. UNE VISION POLITIQUE DES ENJEUX EUROPÉENS : LE « LIVRE BLANC » DE 2001 ET SES INCIDENCES TECHNOLOGIQUES

Publié en 2001 par la Commission, le *Livre blanc sur la politique des transports à l'horizon 2010*³² dessine ce qui devrait être l'agenda de la politique européenne dans les prochaines années. À la veille d'un élargissement qui devrait accroître substantiellement la demande de mobilité, il propose un certain découplage entre croissance économique et croissance des transports – ce qui constitue un virage dans la politique européenne.

Une part non négligeable de la réussite de ce programme d'action repose sur l'innovation technologique : c'est

la raison pour laquelle il est important de s'y référer dans une réflexion sur les technologies de l'avenir, même si l'horizon du document est clairement à moyen terme.

A. Le diagnostic

L'hypothèse majeure sur laquelle repose le « Livre blanc » est celle d'un prolongement de la tendance historique à la hausse de la demande de transport – sous l'effet combiné de la croissance économique, de la mondialisation et, surtout, de l'élargisse-

³² White Paper, « *European transport policy for 2010: Time to decide* », European Commission, 2001.

ment de l'Europe. À l'horizon 2010³³, la demande européenne de transport devrait ainsi croître de 24 % pour les déplacements de personnes, de 38 % pour les marchandises – et de 50 % pour les transports routiers.

Dans les dix ans à venir, le système européen de transport devra donc améliorer ses performances à la fois pour répondre à ces pressions quantitatives et pour satisfaire les exigences qualitatives croissantes des entreprises ou des consommateurs en termes de vitesse, de confort, de sécurité, de fiabilité ou d'environnement. Il devra en particulier s'adapter aux conséquences de l'élargissement.

■ Le défi à moyen terme posé par la progression de la demande future n'apparaît néanmoins considérable que parce que s'y ajoute une seconde hypothèse forte faite par le « Livre blanc » : celle d'un **risque croissant de dysfonctionnement et de blocage de ce système européen de transport** à l'horizon des dix prochaines années.

Si les transports ont su historiquement accroître leur productivité de 3 % par an depuis deux siècles, c'est, en grande partie grâce à une substitution progressive des modes les plus adaptables et rapides – le transport routier et aérien – aux modes plus contraints et lents : la navigation intérieure, le rail, les transports collectifs urbains, la marche à pied... La part du rail dans l'Europe des 15 est ainsi passée entre 1970 et 2002 de 21 à 8 % pour les marchandises et de 10 à 6 % pour les passagers³⁴. Et elle devrait encore décroître, si rien n'était fait, d'ici 2010.

L'analyse faite par le rapport de la Commission est que désormais cette dynamique de transfert modal au profit de la route et du transport aérien crée plus de dysfonctionnements et de blocages que d'efficacité :

– 10 % du réseau routier européen est affecté par la congestion, dont le coût économique pourrait doubler à l'horizon 2010 et atteindre 1 % du PIB communautaire³⁵ ;

– 16 des plus grands aéroports européens sont partiellement saturés avec plus de 30 % des vols affectés par des retards supérieurs à ¼ d'heure ;

– la vitesse moyenne du transport ferroviaire de marchandises est à peine de 18 km/h et 20 % du réseau ferré est lui aussi saturé ;

– l'insécurité routière continue chaque année de provoquer 40 000 victimes³⁶ et son coût est aujourd'hui estimé à 2 % du PNB européen ;

– la construction de nouvelles infrastructures – notamment aéroportuaires, se heurte à des obstacles croissants sur une part de plus en plus étendue du territoire européen ;

– à l'échelle locale, la qualité des services publics de transport se dégrade et la dépendance automobile devient préoccupante, avec presque partout des « parts de marché » de la voiture avoisinant les 80 %³⁷.

Toutes ces raisons conduisent à faire du rééquilibrage modal un enjeu majeur pour la politique européenne des transports à l'horizon 2010.

Plus globalement, c'est l'ensemble du système européen de transport qui apparaît comme fonctionnant très en deçà de ce qui serait optimal dans un espace économique réellement intégré – soit parce que l'interopérabilité des réseaux n'est pas assurée, soit parce qu'il subsiste de nombreux « chaînons manquants » dans les infrastructures existantes : constatant qu'à peine 20 % des projets relatifs au « Réseau transeuropéen de transport » ont été réalisés, le rapport considère que c'est la performance d'ensemble des transports européens qui est menacée à terme, et avec elle, la compétitivité économique ou l'aménagement du territoire européen.

Face à ce risque, il s'agit d'aller vers une conception globale de la performance du système européen des transports, valorisant au mieux les complémentarités d'usage entre modes et prenant en compte toutes les dimensions – coûts et avantages économiques, qualité pour l'utilisateur, impacts sur l'environnement, intégration européenne, compétitivité internationale...

□ Dans cette conception globale, le développement durable et la contribution à la lutte contre l'effet de serre ont naturellement leur place. Et les conséquences pour l'environnement

33 Par rapport à l'année de base 2000.

34 Source : Eurostat, EU Energy and transport in figures, statistical pocket book 2004, European commission.

35 Plus globalement, la Commission évalue à 4 % du PIB européen l'ensemble des coûts externes liés aux transports ; coûts couverts à 30 % pour la route et 40 % pour le rail.

36 33 000 en 2004. Ces chiffres concernent l'Europe des 15.

37 En pourcentage des transports motorisés.

ment des transports constituent en effet, elles aussi, une des préoccupations majeures du « Livre blanc ».

Sur ce thème, l'essentiel du diagnostic tient en quatre constats ou hypothèses très clairs :

– les transports européens sont actuellement responsables de près de 30 % des émissions de CO₂ et plus des deux tiers de la consommation de pétrole ;

– les prévisions envisagent qu'à l'horizon 2010 ces émissions de CO₂ dues aux transports auront augmenté de 50 % par rapport à 1990³⁸ – alors qu'elles diminuent dans la majorité des autres secteurs ;

– à eux seuls les transports routiers représentent 84 % de ces émissions ;

– la contribution des transports aériens à l'effet de serre, aujourd'hui proche de 6 à 7 % pourrait à long terme être d'un même ordre de grandeur que celle de la route³⁹.

Si les problèmes de pollution locale sont finalement peu évoqués, le « Livre blanc » rappelle finalement une conclusion qui fait aujourd'hui très largement consensus : c'est en très grande partie de la maîtrise des systèmes de transport que dépendra la capacité (ou pas) de l'Europe à mettre en place le protocole de Kyoto – et, plus largement, à prévenir les changements climatiques. Tout le défi est de rendre la prise en compte de cet enjeu majeur compatible avec celui de l'élargissement – et de l'amélioration de l'offre de mobilité, ce que tentent de faire les 60 propositions du rapport.

B. Les orientations proposées

Le « Livre blanc » fait le pari d'une possible conciliation entre des transports européens compétitifs et une mobilité durable en 2010. Il s'agit pour cela de parvenir à un certain **découplage** entre croissance économique et développement de la mobilité routière ou aéronautique – essentiellement grâce à un meilleur équilibre entre modes. La solution, considérée comme peu réaliste, qui consisterait à imposer un « rationnement » des déplacements, est écartée au profit d'une approche plus systé-

mique et intégrée articulant étroitement quatre grandes orientations :

– *un rééquilibrage modal au profit du rail et du maritime ;*

– *une stratégie ciblée de réduction des « goulets d'étranglement » et de la congestion ;*

– *une attention forte aux attentes des usagers ;*

– *et enfin, un meilleur positionnement de l'Europe au niveau mondial.*

□ C'est probablement en matière de **rééquilibrage modal** que l'objectif est le plus ambitieux, puisqu'il s'agit d'inverser la tendance historique au déclin relatif du rail en faisant passer sa part de marché en 2010 de 6 à 10 % pour les passagers et de 8 à 15 % pour les marchandises. Cela suppose des conditions très exigeantes : une multiplication par 3 de la productivité des transports ferrés, une interopérabilité et une intermodalité qui fonctionnent véritablement à l'échelle européenne, des gains de 50 % en énergie et en pollution, un contrôle plus strict de l'application des réglementations dans le transport routier et finalement une maîtrise significative du développement des transports aériens. Dans ce dernier domaine, il s'agit par exemple de diviser par deux les émissions de CO₂ ou la perception des niveaux de bruit (-10 décibels) et de réduire de 80 % les émissions d'oxyde d'azote – toujours à l'horizon 2010 – ce qui est considérable.

□ L'intermodalité, indispensable au développement du rail, est également une réponse importante au second défi identifié par le « Livre blanc » : celui de la **congestion** et, plus généralement, de la *réduction des « goulets d'étranglement »* qui font obstacle à une véritable intégration des réseaux et des systèmes de transport à l'échelle du territoire européen élargi. À travers le développement des « autoroutes de la mer », de la constitution de « corridors de fret », des nouvelles technologies de la communication ou d'une meilleure intégration des fonctions logistiques⁴⁰, il s'agit de **créer une véritable complémentarité entre mer, fleuve, rail... et route.**

38 Passant de 739 millions de tonnes en 1990 à 1 113 en 2010.

39 Si l'on prend en compte les émissions globales de gaz à effet de serre, au-delà du seul CO₂ (oxydes d'azote...).

Ce n'est néanmoins qu'un des volets de la stratégie proposée par le « Livre blanc » – qui comprend également la relance des réseaux trans-européens de transport⁴¹, l'organisation du « ciel unique européen », une politique harmonisée de tarification de l'usage des infrastructures de liaison intégrant les coûts externes, et finalement une meilleure régulation des trafics (grâce aux outils de positionnement comme GALILEO ou à une utilisation généralisée des technologies de l'information et de la communication). Le simple gain attendu du développement des transports intelligents est estimé à 20 % en termes de temps de trajet et de 5 à 10 % en termes d'augmentation de la capacité des réseaux.

□ À travers la tarification ou les technologies de la communication, ce sont les logiques d'usage et de comportement des usagers qui sont mises en avant. Pour la première fois en effet, le « Livre blanc » fait de la **satisfaction et de la responsabilité des usagers** un enjeu central de la politique européenne des transports. Il s'agit d'abord de répondre aux attentes croissantes des européens en termes de *sécurité* – sécurité routière, sécurité aérienne, sécurité des tunnels, vulnérabilité au terrorisme... Pour la sécurité routière, l'objectif est ainsi particulièrement ambitieux puisqu'il est proposé de diviser par deux d'ici 2010 le nombre des victimes des accidents de la route (40 000 en 2001)⁴². Il s'agit aussi d'améliorer l'accès – et donc le coût – à des transports collectifs de meilleure qualité, ce qui suppose là encore plusieurs conditions : une bonne information, des moyens de paiement « faciles », une régulation efficace des services publics et une extension de l'offre, notamment en matière de transports urbains. Il est intéressant de remarquer que c'est à propos de la qualité des transports urbains que le « Livre blanc » évoque les thèmes de l'effet de serre et de la pollution locale.

□ Cette attention particulière aux usagers n'est pas contradictoire avec un dernier enjeu évoqué par le « Livre blanc », qui est le **renforcement des positions européennes dans la « régulation » des transports et le**

flux d'échange à l'échelle mondiale. La Commission fait en effet l'hypothèse que sans stratégie offensive au niveau mondial, la volonté européenne de construire « un modèle durable de développement des transports » aurait de grande chance de se révéler finalement vaine. Il s'agit donc à la fois d'affirmer la place de l'Europe dans les grandes institutions de régulation des transports à l'échelle mondiale (OMI, OIAC, OMC, ...) et de prévenir les conséquences de pratiques déloyales de concurrence : dumping social dans les transports routiers, risques pour la sécurité maritime liés aux pavillons de complaisance, déséquilibre entre l'Europe, la Chine et les États-Unis en matière de transports aériens... Le projet GALILEO s'inscrit clairement dans cette perspective d'affirmation de l'Europe sur le « marché » mondial des transports – tout en étant un outil indispensable à la régulation d'une bonne part du trafic européen.

C. Les enjeux technologiques mis en évidence par le « Livre Blanc »

L'exemple de GALILEO est significatif de l'importance donnée par le « Livre blanc » à l'innovation en matière de transport. « Celle-ci, peut-on lire dans le rapport, *“provides an excellent opportunity to integrate the transport modes, optimise their performance, make them safer and help make the european transport system compatible with sustainable transport development”* ».

Si l'on fait la liste des actions proposées par la Commission, il est intéressant de constater, en effet que la plupart d'entre elles supposent des solutions technologiques innovantes (voir le tableau n° 6). Il n'est pas étonnant, dans ces conditions, qu'il soit finalement recommandé « *de maintenir au minimum constant l'effort de recherche européen fait dans ce domaine des transports dans la période 1998-2002 à la hauteur de 1,7 milliard d'euros* » (dont plus d'un milliard pour l'aéronautique). Parmi les technologies considérées par la Commission elle-même comme les plus prometteuses, et sur lesquelles elle souhaite que soient concentrés les

40 À la fois entre modes et entre opérateurs logistiques, entreprises et distributeurs.

41 Notamment dans la perspective de l'élargissement.

42 33 000 en 2004. Ces chiffres concernent l'Europe des 15.

efforts de recherche, il faut néanmoins remarquer qu'une grande majorité concerne les nouvelles technologies de l'information et de la communication : les techniques de positionnement (dont GALILEO), les véhicules ou infrastructures intelligentes, « l'e-Europe », les systèmes de gestion de trafic, la mise en réseau des informations et des moyens de paiement⁴³... En comparaison, la place donnée aux technologies énergétiques ou environnemen-

tales est sensiblement moins apparente. On pourrait s'étonner de cette dissymétrie si l'on oubliait ce qui fait l'originalité majeure de l'approche adoptée par le « Livre blanc » : considérer les transports européens comme un *système global* et privilégier la régulation de ses dysfonctionnements et déséquilibres majeurs – ce qui renvoie finalement, à une logique de réseau, de maîtrise des trafics et donc d'information.

II. LES PERSPECTIVES INDUSTRIELLES : LES VISIONS À 2020 DES « PLATES-FORMES TECHNOLOGIQUES »

À côté de la vision politique exprimée par le « Livre blanc », on dispose également, dans le domaine des transports, d'une explicitation claire des enjeux perçus par les industriels à travers les « *visions à 2020* » des *plates-formes technologiques*.

Entre 2002 et 2004, quatre documents *stratégiques* à 2020 ont en effet été élaborés et publiés pour chacun des grands modes de transport :

- rapport de l'*European rail research advising council* (ERRAC) en septembre 2002 ;
- agenda stratégique de l'*Advising council for aeronautics research in Europe* (ACARE) en octobre 2002, puis début 2005 ;
- « Masterplan » de l'*European maritime industry* (ERAMAR) également en octobre 2002 ;
- et enfin, la vision 2020 de l'*European road transport research advising council* (ERTRAC) en juin et septembre 2004.

À la lecture de ces documents, on constate (**voir tableau n° 7**) une très grande similitude de préoccupation avec, de manière quasiment « mimétique », une structuration des priorités autour de cinq grands thèmes communs :

- l'innovation dans la conception et la production ;
- l'environnement ;
- la sécurité et la sûreté ;
- la qualité de service pour les usagers ;

– et enfin, la gestion « intelligente » de la mobilité (grâce à une intégration des technologies de l'information et de la communication...).

Les quatre stratégies définissent un *agenda des technologies à développer d'ici 2020* pour atteindre des objectifs normatifs préalablement définis – en classant ces innovations par horizon de temps (2005-2010-2015-2020). Pour les transports terrestres et ferrés, un effort a par ailleurs été fait pour classer les recherches par ordre de priorité.

Il est naturellement impossible de présenter en détail ces documents très denses et précis. Dans la perspective d'une hiérarchisation des Technologies-clés, on se limitera à identifier quelques priorités ou « *innovations de rupture* » pour les différents modes – aérien, maritime, terrestre...

A. Le transport aérien (ACARE)

Avec 25 à 30 % de la capacité aéroportuaire et du trafic aérien mondial et plus de 40 % de la clientèle transportée et du marché de la construction aéronautique⁴⁴, le transport aérien constitue un atout majeur pour l'économie européenne. Mais les défis auxquels il est confronté sont tout aussi considérables : croissance forte du trafic (4 à 5 % par an), hausse du prix du carburant, risques liés au terrorisme, saturation des capacités aéroportuaires et du ciel européen, concurrence du « low cost », compétition technologique américaine...

43 Source : Annexe IV du « Livre blanc » – *Technological development and intelligent transport systems*.

44 50 % pour les avions commerciaux de moyenne ou grande capacité.

Tableau n° 6 : Le « Livre blanc » et ses incidences technologiques

Actions proposées dans le « Livre blanc »	Incidences technologiques
I. Rééquilibrage modal	
1. Contrôle renforcé du transport routier de marchandises.	Tachygraphe digital (2003) et utilisation de GALILEO.
2. Ouverture et interopérabilité des réseaux ferrés européens.	Locomotives multicourant, harmonisation des systèmes de signaux, système ERTMS (European rail traffic management system).
3. Multiplication par 3 de la productivité du rail.	Nouvelles formes de motorisation. Electronique de puissance. Trains de 2 000 tonnes.
4. Amélioration de la sécurité et division par 2 des nuisances dues au chemin de fer.	Technologies de sécurité passive (« safetrain ») ou active (suivi des convois). Contrôle des émissions diesel. Application de l'ERTMS.
5. Développement des « corridors de fret » pour le rail.	Systèmes de transport à grande vitesse pour les marchandises (TGV fret). Application des NTIC et de GALILEO.
6. Amélioration de la sécurité aérienne et organisation d'un ciel unique « européen ».	Nouvelles techniques de positionnement et de guidage. Systèmes de sécurité embarqués.
7. Réduction de 50 % des émissions de CO ₂ et de la perception du bruit des transports aériens (-10 Db).	Nouveaux moteurs plus économes et moins bruyants.
8. Sécurisation et aménagement des aéroports.	Nouvelles techniques de reconnaissances des passagers. Systèmes d'embarquement ou débarquement adaptés aux avions de grande capacité.
9. Réduction des « mouvements » sur les aéroports.	Avions de plus grande capacité (A 380).
10. Développement du cabotage maritime (« Autoroute de la mer »).	Navires plus rapides.
11. Meilleur contrôle de la sécurité maritime et navires plus « sûrs ».	Navires à double coque. Techniques de positionnement et de monitoring (identification des navires...).
12. Harmonisation des normes techniques pour le transport par voie d'eau.	
13. Développement de l'intermodalité. Programme « Marco Polo ».	Systèmes efficaces de chargement déchargement des camions sur les trains ou les navires. Containers harmonisés (voir 15).
14. Modernisation et intégration des chaînes logistiques.	Intégration des NTIC dans les chaînes logistiques et les entreprises de transport.
15. Harmonisation européenne des containers.	

Tableau n° 6 : suite

II. Réduction de la congestion et suppression des « goulets d'étranglement »	
16. Nouveaux projets trans-européen de transport dans le domaine ferroviaire.	Trains à grande vitesse. Nouvelles techniques en génie civil (perçement des tunnels...).
17. Nouvelles infrastructures non ferroviaires (RTET).	Nouvelles techniques de génie civil.
18. Développement de sources nouvelles de financement pour les réseaux trans-européens ; transferts de ressources de la route vers le rail.	
19. Meilleure gestion du trafic.	Véhicules et infrastructures « intelligents ».
20. Taxation de l'usage des infrastructures en fonction des coûts externes.	Systèmes fiables et peu coûteux de péage. Techniques de positionnement couplées avec des « puces » embarquées.
III. Amélioration de la qualité des transports pour l'utilisateur	
21. Interopérabilité des moyens de paiement.	Monétique – billétique.
22. Information intermodale des passagers.	e-Europe. Equipement des villes, des infrastructures et des usagers en techniques de communications avancées.
23. Division par 2 de la mortalité due aux accidents de la route.	Sécurité active (limitateurs de vitesse, véhicules intelligents...) ou passive. Boîtes noires. Routes « intrinsèquement sûres » (« zéro accident »).
24. Sécurité des tunnels.	Systèmes efficaces d'alerte, de prévention et d'intervention en cas d'accident.
25. Echange de « bonnes expériences » sur la qualité des transports urbains.	Nouvelles techniques de transport urbain (transports guidés...).
26. Réduction de la pollution locale due aux transports motorisés.	Systèmes de piégeages des particules. Moteurs à plus faibles émissions. Techniques de gestion des trafics.
27. Développement de transports propres et économes comme réponse à l'effet de serre.	Nouvelles motorisation ou nouveaux carburants (hybrides, piles à combustible, moteurs optimisés, biocarburants, GNV, GPL, BTL...).
IV. Meilleur positionnement de l'Europe dans le monde	
28. Maintenir à son niveau actuel le partage modal dans les pays de l'élargissement (35 % de rail).	
29. Participer au système mondial de régulation des transports.	
30. Développer le système GALILEO.	Satellites et applications.

Tableau n° 7 : Les grands enjeux par mode : la vision des plates-formes technologiques

Transport aérien (ACARE)	Transport terrestre (ERTRAC)
<ul style="list-style-type: none"> • Qualité et coût de service pour l'utilisateur • Environnement • Sécurité • Efficacité du système de déplacement • Sécurité 	<ul style="list-style-type: none"> • Mobilité des personnes et des biens • Sécurité et sécurité • Environnement, énergie et ressources • Compétitivité de l'appareil productif (conception et production des véhicules)
Transport ferré (ERRAC)	Transport maritime (ERAMAR)
<ul style="list-style-type: none"> • Interopérabilité des réseaux européens • Mobilité intelligente • Sécurité et sécurité • Environnement • Innovation dans les matériaux et les méthodes de production 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Construction navale <ul style="list-style-type: none"> - conception - processus de production - recyclage - nouveaux navires - sécurité et environnement - formation 2. Transport maritime <ul style="list-style-type: none"> - logistique et intermodalité - environnement - sécurité et sécurité - intégration des NTIC dans la gestion des déplacements - formation des équipages

L'une des conclusions majeures de la stratégie à 2020 proposée par l'*Advisory Council for Aeronautics Research in Europe* est que ces défis ne pourront être à long terme surmontés sans des ruptures importantes à la fois dans les technologies futures et dans les concepts applicables à l'ensemble du transport aérien.

□ À côté d'un agenda détaillé des recherches à réaliser par grand domaine (environnement, sécurité, qualité de service...) – voir tableau n° 8 – les industriels mettent ainsi l'accent sur **plusieurs innovations conceptuelles à développer impérativement d'ici 2020** :

- de nouveaux paradigmes en matière de système de transport (« new concept for routing, airport systems and flow management » e.g. « Vertiport ») ;
- de nouveaux concepts pour le transport de fret (« specific configuration fully automated ») ;
- de nouveaux concepts pour le transport de passagers (jets privés supersoniques, « aile volante », « preloaded passenger modules » ...) ;
- de nouveaux concepts pour les avions à hélice (« Tiltrotor ») ;

- une nouvelle conception des moteurs (« inter-cooled recuperated engines », « constant volume engines », « inducted pan engines » ...) ;
- une reconception des aéroports (« clusters of airspace », new « hubs and spokes » philosophies...) ;
- et enfin, de nouveaux concepts en matière de gestion du trafic (« control by airspace volume, dynamic sectorisation, collaborative decision making » ...).

□ À cela s'ajoute une liste de **ruptures technologiques** également indispensables à l'horizon 2020 :

- des techniques d'« auto-séparation » des couloirs aériens (« airborne spacing », « self separation assurance ») ;
- des systèmes automatiques d'auto-protection contre toutes les situations à risque (attaques hostiles ou suicides, collision, perte d'attention des pilotes...) ;
- des systèmes de vision « tout temps » (« total vision cockpit, vision airport tower » ...) ;
- des techniques d'approche et d'atterrissage totalement automatiques ;
- des carburants alternatifs ;

- des dispositifs d'autonomisation des avions par rapport aux systèmes de contrôle au sol (« changing rules between aircraft and ground in the air transport system ») ;
- des systèmes électroniques facilitant l'enregistrement des passagers (« hassle free check-in ») ;
- et enfin, des systèmes automatiques de retour au sol des avions en cas d'attaque terroriste.

ACARE estimait en 2002 à 100 milliards d'euros supplémentaires le coût des recherches nécessaires d'ici quinze ans pour progresser dans ces « innovations de rupture ». En 2005, une seconde version de la stratégie proposant une approche plus globale a fait passer cette estimation à 170 milliards sur 20 ans (voir l'encart n° 2).

Tableau n° 8 : Les technologies du futur dans le transport aérien : la vision « 2020 » d'ACARE

Issues	2010	2015	2020
Quality and affordability	<ul style="list-style-type: none"> ▪ One man cockpit ▪ Flying office ▪ Aircraft/Truck/Train compatible ▪ Pure freighter configuration ▪ Interoperable architecture 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Supersonic business jet 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fully integrated digital engineering ▪ Airport of the future ▪ Pure freight – Fully automatised aircraft ▪ Implementation of new functions in 24 months
The environment	<ul style="list-style-type: none"> ▪ All composite aircraft ▪ Ultra high bypass engine ▪ Tilt rotor validation ▪ Physics/C&D 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ New air traffic management system ▪ Flight procedure technology of 2nd generation ▪ New combustion ▪ The green factory 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Flying wing ▪ Novel aircraft engine architecture ▪ Alternative fuels?
Safety	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Synthetic 3D vision ▪ Airborne traffic situation awareness ▪ New separation awareness ▪ Vortex & cabin detector ▪ Position computation trajectory prediction ▪ Product dependability assurance ▪ Better knowledge foundations (for the crew) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Methods/systems for crew awareness ▪ Real time ground/crew assistance ▪ Airborne separation management ▪ Airport customisation ▪ Impact fire and heat protection ▪ Action plans for hazard prevention ▪ Applications for technicalogy implementation training 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Self separation assurance ▪ External hazards protection systems ▪ Permanent automatic approach ▪ Mastering human performances in ATS
Air transports system efficient	<ul style="list-style-type: none"> ▪ System wide CDM processes ▪ Intermodality (airport performances) ▪ New business model (airport) ▪ Novel airport architecture and overall process integration ▪ Cooperative design of European ATM system 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Flexible and dynamic use of airspace ▪ Datalink (air-ground, air-air...) ▪ Air traffic situation awareness ▪ Enhanced airside & landside processes ▪ New runway & sequencing of airport traffic ▪ Virtual airport clusters ▪ Standard data specifications for a seamless European ATA system 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cooperative ATC with increasing delegation of A/C ▪ New ATC paradig ▪ Advanced and enhanced axe weather capabilities ▪ New concepts and techniques for security and passengers movements ▪ Vertical take off and landing feeder operation
Security	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cabin control biometrics & air ground communication ▪ Ground zone protected from hostile air craft ▪ No misuse or ATC facilities 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Automatic air craft flight to assigned airfield ▪ passengers intelligence data base ▪ Safe control of hacked aircrafts 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Protection of wide areas from intrusion

Encart n° 2 : Acare 2 : un nouvel agenda de recherche pour le transport aérien à l'horizon 2020

Après la publication en 2002 d'un premier rapport stratégique, l'*Advisory Council for Aeronautics Research in Europe* (ACARE) a publié début 2005 une seconde stratégie plus ambitieuse révisant à la hausse les investissements en recherche nécessaires pour les transports aériens : *ce n'est plus 100 milliards d'euros qui sont considérés comme nécessaires pour maintenir la compétitivité industrielle dans les vingt prochaines années mais 170 milliards*. Le premier agenda (SRA 1) se concentrait essentiellement sur les technologies embarquées (voir le tableau n° 8). La nouvelle version (SRA 2) propose une approche plus globale prenant en considération tous les acteurs et « maillons » des transports aériens depuis les usagers jusqu'aux systèmes de surveillance du trafic en passant par les aéroports, les usines d'assemblage, les sous-traitants... (approche « gate to gate »). Trois scénarios sont envisagés : un scénario de forte croissance, avec un trafic aérien multiplié par 3,5 entre 2000 et 2020 ; un scénario à forte contrainte environnementale, beaucoup plus modéré ; et un scénario « *Bloc building* », dans lequel les tensions internationales sont fortes et l'investissement faible. À ces scénarios sont liés des « concepts cibles » (HLTC : High Level Target Concepts) qui correspondent à cinq axes du système de transport : ciblés sur le client, sur l'amélioration des durées moyennes, sur l'environnement, sur la réduction des coûts et enfin sur la sécurité. Les technologies correspondantes, et en particulier les *technologies de rupture*, sont développées selon ces axes et seront réajustées en fonction des différents scénarios.

L'*Advisory Council* plaide pour une diversification des partenaires financiers et pour une flexibilité dans les priorités thématiques du PCRD.

Un nouveau dispositif, le « Joint european technology initiative » (JETI) est également proposé pour établir des passerelles entre le 7^{ème} et le 8^{ème} PCRD et rendra ainsi possible une programmation à long terme. Cela pose la question du pilotage d'un tel programme sur le long terme.

B. Le transport maritime

Situé également dans un marché mondial en forte croissance (3 à 4 % de hausse du trafic par an), le transport maritime est sans doute moins exposé que le transport aérien à des défis extrêmes (saturation de l'espace, sécurité, environnement...), mais est confronté à des enjeux économiques considérables en termes à la fois d'offre commerciale (même si celle-ci a été augmentée de 50 % avec l'élargissement récent)⁴⁵ et de compétitivité de la construction navale, face à des pays comme la Corée, le Japon et demain l'Inde et la Chine⁴⁶. C'est cette dissymétrie qui explique que la stratégie à 2020 élaborée par l'industrie maritime soit plus orientée vers les innovations en matière de produit ou de techniques de production que vers la gestion de la mobilité.

Même si une part non négligeable de la « vision » élaborée par ERAMAR porte sur la gestion des déplacements (meilleure efficacité des chaînes logistiques et de l'intermodalité, utilisation des NTIC, sécurité et service aux passagers...), la priorité est en effet donnée à l'innovation dans l'ensemble du « cycle de vie » des « produits » destinés à la navigation depuis la conception jusqu'au recy-

clage en passant par les processus de construction navale, les nouveaux types de bateaux ou les techniques de propulsion.

□ Sont ainsi considérés comme des champs d'innovation ou de recherches prioritaires :

- la modernisation des techniques de conception ;
- l'amélioration de la productivité dans les processus de construction navale⁴⁷ (automatisation, robotisation, « groupware ») ;
- la modularité des composants, les techniques lasers de découpage, les nouvelles techniques d'assemblage par adhésifs, etc.) ;
- l'utilisation de nouveaux matériaux (composites...) ou traitements de surface ;
- la « recyclabilité » des navires ;
- la réduction des émissions de polluants « classiques » (particules diesel, CFC utilisés en réfrigération, déchets...) ;
- les accroissements de puissance et la conception de navires plus rapides (bateaux de croisière, ferries mais aussi cargos...) ;
- et enfin, la conception de navires « structurellement » sûrs (application systématique des analyses de risque

45 Notamment avec l'entrée de Malte et de la Pologne.

46 En 2002, la Construction navale européenne occupait le troisième rang mondial derrière le Japon et la Corée (en incluant la Pologne dans l'Europe).

47 Avec comme objectif une baisse de 40 % des coûts et de 25 % des délais de fabrication.

pour la conception et le fonctionnement de bateaux intrinsèquement sûrs et insubmersibles).

□ Dans le domaine des techniques de propulsion et de motorisation, une certaine place est donnée aux technologies de rupture avec comme idée majeure la « marinisation » des techniques d'efficacité énergétique et de limitation des émissions de CO₂ développées dans le secteur des transports terrestres.

Est ainsi évoquée la perspective de recherches futures sur des thèmes comme :

- la propulsion « hybride » (« dual fuel energy ») ;
- les turbines à gaz ;
- la pile à combustible combinée avec les turbines à gaz ou les carburants dérivés du gaz.

L'horizon de temps nécessaire pour de tels développements futurs n'est cependant pas fixé avec précision et il ne semble pas que l'industrie maritime veuille jouer dans ces domaines énergétiques un rôle de précurseur ou de « prime mover ».

C. Le transport ferroviaire

Pour les transports ferroviaires, les enjeux prioritaires se situent moins aux niveaux des capacités et des techniques de production qu'à ceux de la qualité de service, de la demande et de l'ouverture des réseaux. Il n'est pas étonnant, dans ces conditions, que la « vision à 2020 » élaborée par le « Conseil européen de recherche sur les transports ferrés » (ERRAC) mette beaucoup plus l'accent que les transports maritimes sur la **gestion de la mobilité**, avec trois des grands axes stratégiques proposés sur cinq consacrés à :

- l'*interopérabilité des réseaux* ;
- la *mobilité « intelligente »* ;
- et la *sécurité des trafics*.

• Dans la perspective tracée par le « Livre blanc » européen (voir *supra*), il s'agit essentiellement – pour rendre le transport par rail plus attractif – de *construire un réseau de transport ferré réellement intégré au*

niveau européen, en supprimant tous les obstacles à l'interopérabilité des infrastructures, des véhicules, des modes d'accès et de paiement, des informations, etc.

En découlent un certain nombre de priorités majeures à l'horizon 2020 :

- passer à un stade d'opérationnalisation et de simplification du système européen de gestion du trafic ferré (ERTMS), en introduisant des techniques modernes de positionnement (GALILEO) ;
- rendre techniquement opérant 15 000 kilomètres de « corridors de fret » transeuropéens (techniques de couplage automatiques...) ;
- concevoir des véhicules et systèmes de propulsion compatibles avec les différents réseaux (« Tool kit to enhance interoperability and modularity ») ;
- mettre en place des règles d'utilisation des réseaux également compatibles d'un réseau à un autre ;
- généraliser et rendre accessible l'**information multimodale** ;
- optimiser les systèmes d'information utiles aux opérateurs (pour le fret ou le transport de voyageurs) ;
- et enfin, mettre en place des techniques de **sécurité active et passive** plus performantes, à la fois pour compenser les risques de défaillance humaine et pour éviter les accidents « externes » (intrusion sur les voies...).

□ Cette préoccupation majeure attachée à la gestion de la demande et de la mobilité s'accompagne néanmoins d'un second volet de propositions centré sur les **techniques de propulsion et le matériel roulant**.

Dans ce domaine des véhicules futurs, la stratégie définit là aussi clairement des priorités (voir **tableau n° 9**) :

- en *priorité 1*, les interactions « rail-roue » et les sciences de la conception ;
- en *priorité 2*, les systèmes intégrant des fonctionnalités complexes (mécatronique) et les matériels et solutions hybrides (composants modulaires, composites, « improved core material for multilayer sandwiches », « fibre

Tableau n° 9 : Les enjeux prioritaires dans le domaine du ferroviaire : la vision des industriels

Axe de la recherche	Priorités 1 et 2	Horizon*	Priorités 3 et 4	Horizon*
Interopérabilité	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ERTMS niveau 3 ▪ Corridors de fret ▪ Boîte à outil de l'interopérabilité ▪ Règles opératoires 	(1) (2) (2) (2)		
Mobilité intelligente	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Information multimodale ▪ Information des opérateurs (fret et passagers) 	(1) (1)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Information des usagers fret ▪ Information des usagers voyageurs 	(1) (1)
Sécurité et sûreté	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Diffusion d'une culture de la sécurité ▪ Recherche sur les facteurs humains ▪ Sécurité intrinsèque des réseaux 	(1) (1) (2)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sécurité des systèmes d'information ▪ Outils de modélisation et simulation 	(1) (2)
Environnement	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Réduction du bruit ▪ Réduction des émissions de polluants « classiques » 	(2) (2)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Efficacité énergétique ▪ Conception environnementale des véhicules ▪ Développement des technologies émergentes 	(2) (2) (2)
Matériaux, véhicules et méthodes de production innovantes	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Interactions rail-roue ▪ Techniques et outils de conception ▪ Matériels et systèmes avec des fonctionnalités intégrées ▪ Solutions « hybrides » 	(2) (1) (1) (2)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Meilleure logistique des systèmes de production ▪ Nouveaux matériaux ▪ Systèmes de production innovants ▪ Nouveaux revêtements de surface 	(1) (2) (1) (1)

Légende :

* horizon 1 : avant 2010

horizon 2 : avant 2020

reinforced plastic skin sandwiches for 3D and large 2D components », « metallic skin sandwiches for large structural components », ...) ;

– en *priorité 3*, les innovations dans les circuits logistiques de production et dans les nouveaux matériaux (aluminium, fibres, céramiques, bio fibres, résines, adhésifs...) ;

– et enfin, en *priorité 4*, les nouvelles techniques de production (automatisation, usines « pilotes » ...) et les innovations en matière de traitement de surface.

• Dans le domaine de l'environnement, l'enjeu majeur clairement défini est celui du **bruit** – avec des défis liés à la fois à l'accroissement des vitesses de roulement et à la sévèrisation des normes européennes (réduction de 10 décibels pour le bruit de nuit).

en revanche qu'en troisième priorité (**voir le tableau n° 9**), loin derrière le bruit et la réduction des pollutions classiques. Sont citées comme technologies devant être explorées les piles à combustible, les moteurs hybrides, les « super capacités », les cellules solaires photovoltaïques (sur le toit des usagers), les techniques passive de stockage de l'énergie pour la climatisation et les matériaux isolants. Aucune de ces thématiques n'occupe une place centrale dans la stratégie d'ERRAC.

• Le tableau n° 9 récapitule l'ensemble de ces orientations stratégiques en précisant l'horizon attendu de mise sur le *marché* des innovations proposées⁴⁸.

D. Les transports routiers et l'automobile

Assurant 80 % des déplacements individuels et 45 % de celui des mar-

48 Deux horizons sont distingués : avant 2010 (1), ou avant 2020 (2).

Les économies d'énergie ou la lutte contre l'effet de serre n'apparaissent

chandises⁴⁹, les transports routiers et l'automobile constituent naturellement un enjeu majeur en matière d'innovation sur les transports. L'industrie européenne y consacre d'ailleurs 20 milliards d'euros par an – ce qui fait de ce secteur le premier en termes d'investissement en R&D à l'échelle européenne.

Partant d'une prévision de croissance à l'horizon 2020 de près du tiers pour la mobilité automobile et de 7 % pour le fret routier, la stratégie définie en 2004 par « l'European Road Transport Research Advisory Council » assigne à la recherche des objectifs ambitieux pour les deux prochaines décennies⁵⁰ :

- une meilleure adaptation des véhicules à la diversité des usagers (personnes âgées...);
- une baisse de la mortalité routière de 75 %⁵¹;
- une réduction des émissions de CO₂ au niveau des véhicules de 40 %;
- une réduction du bruit de 10 décibels;
- des émissions de polluants « locaux » proches de zéro;
- la mise sur le marché de moteurs à hydrogène avant 2020;
- un taux de recyclabilité proche de 95 %;
- une réduction de moitié du délai existant entre la conception et la mise sur le marché des nouveaux véhicules;
- et une baisse sensible des coûts de fabrication et de commercialisation.

□ Pour répondre à ces défis, une cinquantaine d'axes de recherche sont proposés répartis en *quatre grands champs* : la gestion de la mobilité, l'environnement, la sécurité et les techniques de production.

Ce qui est particulièrement intéressant dans cet agenda – du point de vue d'un exercice sur les Technologies-clés – c'est que les cinquante axes de recherche ont été hiérarchisés sur la base de deux critères : « *le bénéfice à en attendre pour la société* » et « *les difficultés de mise en œuvre* »⁵². On peut donc faire une typologie en quatre catégories de ces

recherches sur la base d'un croisement de ces deux critères. C'est ce qui est fait dans le tableau n° 10.

La catégorie la plus pertinente du point de vue des « Technologies-clés » est, semble-t-il, celle qui regroupe les recherches dont les bénéfices sont élevés mais difficiles à mettre en œuvre. On y trouve notamment :

- *l'analyse des relations transport/aménagement du territoire/urbanisme*;
- *le transport de marchandises en ville*;
- *la protection des populations les plus vulnérables*;
- *la gestion des situations d'urgence (en cas d'accident)*;
- *l'économie de l'hydrogène et la pile à combustible*;
- *la réduction du bruit des véhicules*;
- *l'insertion des infrastructures dans l'environnement*;
- *les processus coopératifs de production*;
- *et les procédures pré-planifiées de production de nouveaux modèles.*

On remarque qu'en dehors de la pile à combustible et du bruit, la plupart de ces enjeux, considérés comme difficiles à atteindre, ne sont pas purement des enjeux technologiques.

La stratégie définie par ERRTRAC illustre ainsi particulièrement ce qui fait la spécificité de la problématique de l'innovation dans les transports : la difficulté à séparer ce qui relève de la technologie et de l'évolution des comportements d'acteurs.

E. Que conclure de ces visions à 2020 ?

Au risque de réduire la richesse de ces quatre visions – pour la plupart provisoires⁵³ – on se limitera, pour conclure ce « survol », à trois remarques :

- il existe un consensus assez large sur les enjeux majeurs « environnement », « sécurité », « compétitivité », « service aux usagers » – enjeux qui sont transversaux aux différents modes et regroupent ceux mis en évidence par le « Livre blanc » ;

49 Tout mode pris en compte y compris maritime (45 %).

50 Source : Ertrac, Stratégie research agenda, december 2004.

51 Dont 1/3 pourrait être réduite grâce à la recherche.

52 Les « *bénéfices pour la société* » incluent les considérations relatives à l'énergie, l'environnement, la qualité de vie, la sécurité, etc., la compétitivité européenne. Les « *difficultés de mise en œuvre* » ont trait à la maturité des technologies, les coûts de mise en œuvre, les compétences, ou l'horizon de temps. Les notes vont de 1 à 5 (source : Ertrac, Stratégie research agenda overview, octobre 2004).

53 ACARE, par exemple, élabore actuellement une nouvelle version de sa stratégie (voir l'encart n° 2).

Tableau n° 10 : Les axes de recherche prioritaires pour les industriels des transports routiers

Bénéfices élevés, mise en œuvre « maîtrisée »	Bénéfices élevés, mise en œuvre difficile
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nouveaux concepts de mobilité (4,5 – 2,5) ▪ Compréhension des besoins et demandes futures de mobilité (4 – 1) ▪ Optimisation des chaînes logistiques (3,5 – 2) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aménagement du territoire et planification urbaine (4,5 – 4,5) ▪ Transport de marchandises en ville (3,5 – 4)
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Rôle des comportements et du facteur humain dans les accidents (3,5 – 3,5) ▪ Véhicules intelligents et assistance à la conduite (4 – 3) ▪ Procédures et outils d'évaluation de l'impact des accidents – essais biomécaniques (3,5 – 2) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Protection des populations vulnérables (4 – 3,5) ▪ Gestion des situations d'urgence et de crise (4 – 3,5) ▪ Sécurité « sur mesure » (adaptée aux besoins de personnes spécifiques)
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Outils d'analyse stratégique pour le choix d'options énergétiques ou de motorisation (3,5 – 1) ▪ Véhicules à basse émission (polluants locaux) (4 – 3) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pile à combustible et carburants pour la production d'hydrogène (4 – 3,5) ▪ Véhicules peu bruyants (4 – 3,5) ▪ Insertion des infrastructures dans l'environnement (4,5 – 4,5)
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Prévisions et monitoring des performances pour les sous-systèmes véhicules/infrastructures. Contrôle de qualité – analyses du cycle de vie (4 – 1) ▪ « Ergonomie » des processus de production (« people friendly processes ») (4,5 – 2) ▪ Nouveaux processus de production (flexibles, automatisés...) ▪ « Recyclabilité » des véhicules (3,5 – 1) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Processus de coopérations de production – groupware (3,5 – 3,5) ▪ Evolutions de modèles pré-planifiés - nouvelles générations - (3,5 – 4,5) ▪ Nouvelles technologies de maintenance et de monitoring – systèmes électroniques (4 – 4)
Bénéfices modérés, mise en œuvre « maîtrisée »	Bénéfices modérés, mise en œuvre difficile
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Systèmes et politiques de gestion de la mobilité (3 – 3) ▪ Bases de données et systèmes d'information sur le trafic (2 – 1) ▪ Réseaux « ségréatifs » - dédiés ou prioritaires (2,5 – 2,5) ▪ Service de transport à domicile - home delivery (1,5 – 1) ▪ Véhicules spécifiquement urbains. Nouveaux concepts de véhicules (1,5 – 1,5) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Interfaces multimodales (3 – 3,5) ▪ Infrastructures de fret dédiées – autoroutes ferroviaires (2 – 3,5)
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Infrastructures intrinsèquement sûres (3 – 2,5) ▪ Sécurité des carburants (1,5 – 1,5) ▪ Systèmes de protection des passagers - air-bags... (2,5 – 2) ▪ Intervention post crash (2,5 – 1) ▪ Sécurité des marchandises (2,5 – 2) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Route « intelligente » (3 – 4,5) ▪ Nouvelle architecture des véhicules – intrinsèquement sûrs (3 – 4,5) ▪ Sécurité, vulnérabilité des infrastructures (2,5 – 3,5)
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nouveaux carburants et moteurs ICE économes en énergie (2,5 – 3) ▪ Véhicules hybrides (2,5 – 2) ▪ Optimisation du trafic (1,5 – 2,5) ▪ Usage soutenable des ressources (1,5 – 2) ▪ Carburants issus de la biomasse (2 – 3) 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Banques de données sur les marchés (2,5 – 2) ▪ Prototypage rapide ou virtuel (2 – 3) ▪ Knowledge management (2,5 – 2) ▪ Nouveaux concepts de production et de processus (3 – 2,5) ▪ Nouveaux matériaux (2,5 – 3) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Concepts modulaires pour la construction d'infrastructures (2,5 – 4,5) ▪ Outils de conception et de simulation pour des processus flexibles de production (2,5 – 3,5)

* La première note concerne les bénéfices pour la société (1 à 5), la seconde les difficultés de la recherche (1 à 5).

– les technologies de l'information et de la communication constituent une bonne part des réponses aux différents problèmes ainsi évoqués ;
– les stratégies privilégient d'abord les solutions opérationnelles à moyen terme, ce qui fait le plus souvent passer en arrière-plan les « technologies de rupture » comme la pile à combustible. Seuls les responsables des trans-

ports aériens affichent clairement la nécessité de transformations profondes – dans les techniques mais aussi dans les concepts – pour faire face aux défis qui seront ceux de 2020.

C'est une vision assez différente qui se dégage des exercices de *foresight* réalisés sur le même thème dans les années récentes.

III. LES EXERCICES DE FORESIGHT RÉCENTS : QUELQUES ILLUSTRATIONS

À côté de la vision politique exprimée par le « Livre blanc » et de la vision des industriels européens présentée à travers les plates-formes technologiques, on ne peut pas ne pas tenir compte également des réflexions très riches menées récemment dans le cadre des « *Foresights* » nationaux ou internationaux sur le thème des transports.

Le problème est que les transports ont suscité depuis quelques années énormément de travaux de ce type à toutes les échelles⁵⁴. On se limitera donc ici arbitrairement à cinq illustrations choisies d'abord pour la diversité de leurs approches et leur focalisation sur la technologie : le récent DELPHI mené dans le cadre de « *l'ERANET transport* », la « *Vision 2050* » du National Science and Technology Council américain ; les « *100 Technologies-clés françaises* » ; le « *Foresight Vehicles* » anglais ; et enfin, les préconisations de l'Agence internationale de l'énergie sur « *les technologies énergétiques du futur* ».

A. Les priorités de recherche de l'ERANET « Transport » (2004)

Mis en place en 2003, l'ERANET « Transport » rassemble 16 pays européens qui se sont associés pour coordonner leurs efforts en matière de recherche sur les transports. Pour identifier les priorités en matière de coopération européenne, un questionnaire « DELPHI » a été lancé en fin 2004. Il donne une bonne illustration des préoccupations des différents pays sous un angle précis qui est celui de la contribution de la recherche aux politiques publiques.

Six grands enjeux ont été identifiés et précisés par les réponses au questionnaire :

1. L'accès à la mobilité et l'équité sociale

C'est une des originalités de l'ERANET de mettre l'accent sur les risques d'exclusion et d'inégalité liés à la fois au vieillissement démographique et à la dépendance automobile, mais aussi aux conséquences des politiques de transport : effets de la tarification et des choix en matière de services publics, ou surcoûts liés à l'introduction de nouvelles technologies. Un surcroît d'innovation en matière de service aux usagers, de tarification ou de maîtrise de l'étalement urbain, devrait permettre d'atténuer ces risques.

2. L'adaptation des transports aux nouveaux contextes économiques

De nouvelles connaissances apparaissent comme nécessaires pour mieux anticiper les conséquences de la mondialisation des échanges, de la dérégulation des transports, de la crise des finances publiques, et surtout de la hausse durable du prix du pétrole. Face à ces bouleversements, d'importants progrès en matière de coût des infrastructures, d'efficacité des processus industriels, de logistique ou d'ingénierie financière apparaissent comme indispensables.

3. La sécurité et la sûreté

Des avancées considérables sont à attendre des nouvelles technologies – aides à la conduite, systèmes anticollision, sécurité intrinsèque des véhicules, utilisation du GPS... Mais il reste un décalage majeur entre sécurité perçue et sécurité réelle, et sur-

54 On pourrait évoquer, notamment, au niveau européen les très nombreux travaux de l'IPTS de Séville et les multiples *Foresights* lancés à l'initiative de la DG TREN et de la DG Recherche.

tout de nouvelles vulnérabilités apparaissent : vulnérabilité de personnes fortement exposées (piétons, personnes âgées...), terrorisme, fragilité des systèmes complexes, effets secondaires des innovations technologiques (allongement des véhicules, perte de vigilance...). Il faut intégrer ces nouvelles vulnérabilités dans une conception globale de la sûreté.

4. L'efficacité des systèmes de transport

Les défis à surmonter pour aller vers une meilleure efficacité des systèmes européens de transport sont multiformes : réduction de la congestion par une meilleure gestion des trafics, développement de l'intermodalité et de l'interopérabilité, standardisation des composants pour les véhicules ; harmonisation des normes, tarification plus efficace, optimisation de la logistique et du fret ferré... C'est un enjeu majeur pour l'Europe – dans la perspective de l'élargissement.

5. La satisfaction des usagers

Comme le Livre blanc européen, les experts au sein de l'ERANET ont comme préoccupation importante de « mettre l'utilisateur au centre du système des transports européens ». Il s'agit à la fois de prendre en compte la diversité des demandes de tous les usagers – y compris des demandes liées aux loisirs – et d'intégrer progressivement le consommateur dans les processus de production des produits (« customisation »).

Une partie de la réponse réside dans l'amélioration et l'ouverture des systèmes d'information – qui doivent permettre à tout moment d'optimiser et d'orienter les décisions des utilisateurs.

6. L'environnement

Dans ce domaine d'intérêt majeur pour les Européens, d'autres préoccupations que le bruit des transports routiers ou l'effet de serre lié à l'automobile, devraient pouvoir être mieux pris en compte. C'est le cas, par exemple, de la pollution de l'air local ou des impacts écologiques de l'aviation. Les technologies semblent exister mais on constate qu'elles restent peu utilisées et souvent mal acceptées.

Les participants de l'ERANET mettent ainsi en conclusion l'accent sur quelques priorités de recherche :

- la prise en compte de la dimension sociale dans les politiques de tarification et de transport urbain ;
- l'anticipation de la crise du pétrole ;
- l'impact de la « dérégulation » des transports européens ;
- l'interopérabilité et ses conditions ;
- les applications de GALILEO ;
- les stratégies d'harmonisation des normes techniques ;
- la qualité du fret ferroviaire ;
- l'information multimodale ;
- l'acceptation des nouvelles technologies.

Il s'agit, comme on le constate, de questions à l'interface entre la technologie et la socio-économie de l'innovation.

B. La « vision 2050 » du National Science and Technology Council américain (2001)

Publiée aux États-Unis en février 2001⁵⁵, la « vision 2050 », élaborée par le *National Science and Technology Council* et le *Federal Transport Advisory Group*, a la particularité de proposer une vision « holistique » et totalement intégrée du système américain de transport à l'horizon des prochaines décennies. L'objectif n'est pas de proposer une stratégie précise de recherche⁵⁶ mais plutôt de donner une cohérence d'ensemble à un projet de transformation en profondeur du système actuel de transport.

Partant d'une hypothèse pessimiste sur la capacité du système américain de transport à faire face à la fois à une multiplication par trois d'ici 2050 de la demande de mobilité, à une stagnation des investissements et à une crise du pétrole⁵⁷, le *Transport Advisory Board* propose une « vision à cinquante ans » reposant sur quatre piliers :

- l'accès de tous à la mobilité, en tout temps et tout lieu ;
- une circulation avec zéro mort et zéro blessé ;

55 Source : « *Vision 2050 – An integrated national transportation system* » – Federal Transportation and Advisory Group and National Science and Technology Council, février 2001.

56 La vision est complétée par un autre rapport du National Science and Technology Council publié en 2000 : « *National Transportation Strategic Research Plan* », articulé autour de six axes : « Human performance and behavior », « Advanced materials and structures », « Computer, information and communication systems », « Energy, propulsion and environmental engineering », « sharing and measurement » et enfin, « Analysis, modeling, design and construction tools ».

57 Les transports consomment 13 millions de barils par jour de pétrole, soit l'équivalent de la production domestique américaine et de la moitié des importations. La « vision » prévoit le « peak oil » en 2020.

– la non dépendance énergétique des États-Unis ;

– et enfin, la « compatibilité » à l'environnement.

Le système à concevoir dans cette perspective peut se résumer à six « i » : « intégré », « intermodal », « inclusif », « intelligent », « innovant », « international ».

Le concept central de la vision est celui d'*intégration*. Il s'agit – essentiellement grâce aux nouvelles technologies de l'information – d'assurer une complémentarité ou une substitution totale entre les quatre grands modes de « transport » : le terrestre, le maritime, l'aérien... et les télécommunications. L'« e-économie », le télétravail, la téléportation, les télé-opérations sont ainsi explicitement intégrés à la politique de transport – ce qui est la grande originalité de cette vision.

Dans ce cadre global, la vision comprend trois grands axes : la mobilité, la sécurité et l'environnement (énergie).

- En matière de **mobilité**, il s'agit avant tout de « décroisser » les différents modes pour aller vers plus d'efficacité globale grâce à l'interopérabilité de réseaux, une intermodalité effective, une meilleure information, des lieux d'échange, l'utilisation du GPS, de véhicules intelligents, des outils performants de modélisation... Il s'agit ainsi de substituer des échanges virtuels aux déplacements... quand cela est possible.

- En matière de **sécurité et de sûreté**, la priorité est donnée à la connaissance de comportements humains, aux « interfaces homme/machine », et à l'adaptation des véhicules aux besoins et capacité des opérateurs ou usagers. L'éducation, les aides à la conduite, l'automatisation des véhicules, les techniques de sécurité intrinsèque, les systèmes de détection des risques... doivent être développés en intégrant cette dimension humaine, l'objectif étant de prendre en compte simultanément les véhicules, les infrastructures, l'environnement... et les usagers, dans tout effort de conception de nouveaux systèmes de transport. La vision anticipe par ailleurs de

nouvelles menaces liées au terrorisme (c'était avant septembre 2001 !).

- Enfin, en matière d'**environnement et d'énergie**, un équilibre est proposé entre des avancées technologiques radicales (décarbonisation des carburants, transition vers une économie de l'hydrogène, véhicules électriques...) et des politiques de maîtrise de la mobilité (substitution des télécommunications au transport, promotion de formes urbaines plus compatibles avec l'environnement...).

□ On retrouve ce souci de l'équilibre dans les pistes de recherche proposées qui vont des techniques de communication et de simulation aux sciences sociales et économiques... en passant par les nouveaux matériaux, les nanomatériaux ou les nouvelles technologies de propulsion.

Le message que cherche finalement à transmettre ce court document est ainsi parfaitement clair : *il ne peut y avoir de recherche sur les transports futurs que systémique et globale.*

C. L'exercice français des « 100 Technologies-clés » (2000)

Mené sous l'égide du ministère français de l'Industrie en 1999-2000, l'exercice « 100 Technologies-clés à l'horizon 2005 » est à la fois beaucoup plus limité dans ses ambitions et son horizon que la vision 2050 – puisqu'il s'agit de hiérarchiser des technologies à un horizon de dix ans et plus vaste, puisque les transports ne sont qu'un des secteurs pris en compte parmi une dizaine d'autres.

L'intérêt de l'exercice est qu'il conduit à sélectionner un nombre limité de « Technologies-clés » correspondant à la fois aux attentes du marché et à l'offre d'innovation ou de recherche existantes. Il s'agit des **12 technologies suivantes** :

- l'architecture électrique ;
- l'architecture électronique (informatique répartie et multiplexage dans les véhicules) ;
- les problèmes de compatibilité électromagnétique ;

- les composants électroniques de moyenne puissance ;
- la sûreté des systèmes (embarqués et des infrastructures) ;
- l’ergonomie de l’interface homme-machine (pilotage des véhicules ou d’installations) ;
- l’amélioration des performances énergétiques d’ensemble de véhicules (moteur à fort rendement, allègement, gestion du trafic, ...) ;
- les piles à combustible ;
- les véhicules intelligents et communicants ;
- les moteurs thermiques et la réduction des émissions (filtres à particules, carburants alternatifs, injection directe...) ;
- les capteurs intelligents ;
- et enfin, l’élaboration de composites et de nouveaux matériaux.

Parmi l’ensemble des analyses et évolutions qui accompagnent cet effort de hiérarchisation, deux conclusions se dégagent tout particulièrement :

- ***on ne dispose pas aujourd’hui de l’information nécessaire pour arbitrer entre les différentes technologies en concurrence sur les nouvelles formes de motorisation et de stockage de l’énergie*** (véhicules électriques, hybrides, pile à combustible...) ;
- **« l’électrique-électronique »** constitue pour presque la totalité des technologies évoquées un point critique, avec comme enjeu majeur la sûreté de fonctionnement de systèmes intelligents de plus en plus automatisés et intégrés.

Comme dans la plupart des autres rapports, on constate une dissymétrie de nature entre la question des alternatives énergétiques et tous les autres enjeux technologiques.

D. Le « Foresight vehicles technology roadmap » anglais (2004)

Le « Technology Roadmap » sur les véhicules routiers, publié récemment par le ministère du Commerce et de l’Industrie (DTI) anglais et la *Society of Motors Manufacturers (SMMT)*⁵⁸ se situe dans une perspective beaucoup plus opérationnelle, mais aussi sur un

champ beaucoup plus limité que l’exercice français sur les « Technologies-clés », puisqu’il s’agit de définir une stratégie de recherche précise à l’horizon 2020 pour les seuls véhicules routiers. Cet exercice de « roadmap » n’est lui-même qu’un des éléments d’un programme de *Foresight* sur les véhicules commencé en 1996 – avec, comme dans tous les « roadmaps » – deux préoccupations majeures : fixer consensuellement des objectifs à atteindre et définir les étapes, les « courbes d’apprentissage », nécessaires pour y parvenir.

Les objectifs proposés à 2005, 2010, 2020 sont comparables à ceux de la plate-forme européenne ERTRAC et des travaux, assez voisins, menés au niveau européen par le réseau Furore⁵⁹. Soit notamment en 2020 :

- une division par deux des coûts de production des véhicules ;
- une baisse de 40 % de la mortalité ;
- un taux de satisfaction des usagers de 85 % ;
- une baisse de moitié de la pollution classique de l’air, de 6 décibels pour les niveaux de bruit et une émission de 90 grammes de CO₂ par kilomètre pour les véhicules.

Pour réaliser ces objectifs, la « roadmap » cible les progrès technologiques nécessaires sur *cinq grands champs clés* (« key technology areas ») :

- l’architecture et l’amélioration des performances de moteurs (*engine and powertrain*) ;
- les motorisations « alternatives » : hybrides, piles à combustibles, nouveaux carburants ;
- les nouveaux développements dans le « software », les capteurs, l’électronique et la télématique ;
- les progrès dans les structures et les matériaux ;
- et enfin, les techniques de conception et de fabrication.

Dans chacun de ces cinq champs les options techniques sont précisées – ainsi que naturellement leur horizon de mise sur le marché (**voir le tableau n° 11**)⁶⁰.

58 Source : « *Foresight vehicle technology roadmap* », version 2.0, 2004, Society of Motors Manufacturers.

59 *R&D Technology Roadmap*, Furore, Future Road Vehicle Research, 2003, EARPA, www.furore-network.com.

60 Pour des raisons de simplification, le tableau ne précise pas ces horizons temporels (2010-2015-2020) qui sont pourtant au cœur de l’exercice.

La grande originalité de l'approche est de chercher une *intégration maximale de toutes les fonctions* et de tous les objectifs (réduction des coûts, économie d'énergie, sécurité...) au niveau le plus opérationnel possible, qui est celui des grands sous-systèmes techniques : moteurs, carburants, structure, software... D'où par exemple, une attention particulière à des aspects généralement peu pris en compte comme l'intégration des piles à combustible dans l'architecture globale des véhicules (« *fuel cell auxiliary systems* »), la recherche d'une meilleure compatibilité et d'une réduction des coûts de l'ensemble des « software », ou encore la mise en place de « circuits » courts de décision entre les ateliers de fabrication et les consommateurs (ateliers « flexibles »). C'est l'amorce d'une *approche systémique raisonnée* de l'ensemble véhicules/infrastructures/usagers/constructeurs.

E. La stratégie de recherche de l'Agence Internationale de l'Énergie à 2050

Toutes les réflexions précédentes ont en commun de partir d'une perspective sectorielle qui est celle des transports. On ne peut cependant ignorer la masse tout aussi considérable de « Foresights » qui abordent les transports à travers une autre perspective : celle de l'énergie.

Dans cet ensemble de réflexions, la plus remarquable et opérationnelle publiée récemment est celle de l'Agence Internationale de l'Énergie – « *Energy Technology for a sustainable future* », dans laquelle une attention particulière est portée au problème des transports⁶¹.

Face à la perspective d'une augmentation à l'horizon 2030 de 50 % des émissions de CO₂ et de la consommation de pétrole du aux transports, le rapport de l'AIE s'attache à définir « le portefeuille » de technologies et d'actions qui pourraient d'ici 2050 « fournir la fondation d'un développement durable des transports pour l'ensemble des pays de l'OCDE ».

La perspective est celle de changements radicaux puisqu'il s'agit

d'évoluer progressivement vers un système de transport qui reposera principalement sur d'autres énergies que le pétrole et dont les émissions de CO₂ seront très faibles (moins du tiers de la situation actuelle) et à la limite proche de zéro.

Faute de pouvoir refléter la richesse de ce document, on se limitera aux messages essentiels et aux conclusions en termes de recherche.

Le premier message porte sur les *performances* des différentes technologies susceptibles de réduire les émissions de CO₂. **Pour l'AIEA, seules trois technologies, la propulsion électrique, la pile à combustible fonctionnant avec des énergies non fossiles (ou avec des systèmes de captation du CO₂) et les biocarburants issus de la biomasse ligneuse ou cellulosique, seront susceptibles d'apporter à terme des gains significatifs en réduction des émissions de CO₂** (gains supérieurs à 90 %). *Elles constituent donc pour le futur les technologies essentielles (voir l'encart n° 3).*

Viennent ensuite – avec des gains potentiels maximaux supérieurs ou égaux à 50 % – la propulsion hybride, l'allègement du poids des véhicules et les biocarburants diesel issus des cultures (oil ...).

En revanche, les gains à attendre d'une meilleure efficacité des moteurs actuels, du gaz naturel, du gaz de pétrole liquéfié (LPG), du diméthyl ether (DME), de l'éthanol ou du méthanol (au stade actuel des technologies) ne pourront être que plus modestes (entre 10 et 30 %).

- Le deuxième message est qu'*aucune stratégie durable ne pourra reposer sur une technologie unique* et qu'il faudra donc nécessairement les combiner en s'attachant, notamment, à articuler efficacement des solutions de court ou moyen terme (efficacité des moteurs actuels, véhicules hybrides...) et des solutions de long terme.

- Le troisième message est qu'*en ce qui concerne les technologies de rupture* comme la pile à combustible ou les nouveaux biocarburants, il

61 Source : International Energy Agency, *Energy for a sustainable Future, Transport, Technology briefs*, 2004.

Tableau n° 11 : Technology and research directions for future road vehicles (UK)

Main themes	Roadmap (selected illustrations)
I. Engine & powertrain	
Thermal & mechanical efficiency	<ul style="list-style-type: none"> • Gasoline direct injection • Camless engines • Electronic drive train • Zero warm-up time • Downsized boosted engines
Performance and driveability	<ul style="list-style-type: none"> • Engines capable of running on almost any kind of weather • Automated manuals with complex strategies • Active control adapting to driving and road conditions
Emissions	<ul style="list-style-type: none"> • Downsized engines • Particulate traps • Fuel diesel HCCI • After treatment modelling tools • Integrated starters
Recyclability and durability	<ul style="list-style-type: none"> • 100 % recyclability • Smart on board diagnostics • Zero maintenance powertrain • Scaled for life engines
Weight and size	<ul style="list-style-type: none"> • New lightweight materials • Reduced size cooling systems • Increasing use of plastics/composites • Use of nano materials
Safety	<ul style="list-style-type: none"> • Power control systems • Pit lane technology to limit vehicle speed
II. Hybrid electric and alternative fuelled vehicles	
Fuel access	<ul style="list-style-type: none"> • “Niche” development (2010) • Fleet development (2020) • FC components increasing system efficiency • Hydrogen storage and cost
Hybrid powertrain	<ul style="list-style-type: none"> • Mild hybrids • Full hybrids • Low cost electric motors • In hore fast battery charging
Advanced internal composition engines	<ul style="list-style-type: none"> • GDI • Downsize boosted engines • Multi fuel engines • Intaxe charge cooling • Optimum cycle (HCCI/CAI)
Electric and electronics (for energy and drive systems)	<ul style="list-style-type: none"> • Improvement of auxiliary (FC) • Low cost of electric motors • Electric braking • Magnetic materials for hybrid/fuel cells • High voltage vehicle systems • High power density energy storage • Advance network control systems
Alternative fuels	<ul style="list-style-type: none"> • LPG, CNG, Biofuels (20 %, 2020) • Seal materials for biofuels • Home fueling capability (CNG) • Bio diesel infrastructures development • H₂ from nuclear energy
System integration and infrastructure	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluation procedures for component performances • System approach to vehicles design • Zero emission hydrogen refuelling • Vehicle thermal management • Integrated management of energy between all systems
Design and manufacture	<ul style="list-style-type: none"> • Supplier led vehicle concept • Tools for rapid prototyping • High specific strength materials • Low cost driving simulators

III. Advanced software and sensors	
Shift to software	<ul style="list-style-type: none"> • Low cost adaptating cruise control • New sensors • 360° vehicle sensing • Lane keeping support • Minimum cost routing • Neural network software
Access and use of vehicles	<ul style="list-style-type: none"> • Electronic vehicle identification • Intelligent speed adaptator fully automatised • Road user charging devices • Smart card entry • Biometric drivers recognition
Architecture and reliability	<ul style="list-style-type: none"> • Infrastructure/vehicle cooperative systems • Effective intermodal systems • Common architecture systems used by all manufacturers
Human vehicle interaction	<ul style="list-style-type: none"> • Adaptative systems for older drivers • Voice technologies • Compensation for human errors (driving impairment monitors) • External control of vehicle speed • Sensors for position management
Information management	<ul style="list-style-type: none"> • Reliable traffic datas • Mobile boardband internet • Real time traffic information • Anti terrorism prevention • Managed travels
IV. Advanced structures and materials	
Safety	<ul style="list-style-type: none"> • Harmonized passive and active safety systems & standards • Better absorption in crashes • Flimsy vehicles for urban operation • On board performance monitoring
Product configuration and flexibility	<ul style="list-style-type: none"> • Modularisation • Multiplex electronics • Up gradable vehicles • Short term reconfigurations (leisure...)
Economics	<ul style="list-style-type: none"> • Cheaper low weight structural materials • Integral noise damdening • Advance in coasting technologies • Elimination of paintshop
Environment	<ul style="list-style-type: none"> • "Life cycle" management • Emphasis on recyclability • Re use of components • Improved high strength lightweight structures • New magnesium alloys • Weight savings in parallel with new fuels, fuel cells...
Manufacturing systems	<ul style="list-style-type: none"> • Highly modular flexible platforms • Modularisation • Customer configurable and modular vehicles • Lower volume vehicles using low investment technics • Design for dismanting • Microfactories
V. Design and manufacturing processes	
Life cycle	<ul style="list-style-type: none"> • Simple polymer high strength structural composites • Modular vehicles • Zero waste (100 % recyclability) • Design for dismanting • Reuse components • Up gradeable vehicles
Manufacturing	<ul style="list-style-type: none"> • New metrics for manufacturing systems & simulation tools • No paint shops • Off live virtual prototyping • Class a thermoplastics • "Cameleon" cars • Customer informed design • Low investment manufactures for more flexibility micro factories • Platform sharing
Integration	<ul style="list-style-type: none"> • Modularisation of systems • Easy parts change • Multi functions structures – integrated electronics • Modular engines and transmissions • Collaborative knowledge sharing

Encart n° 3 : Essential long-term technologies

Electric and Hybrid Vehicle Systems: Hybrid vehicles are nearly commercial, but substantial cost reductions are still needed for these vehicles to eventually become “standard equipment” on new light-duty and heavy-duty road vehicles. Improvements that allow systems to provide greater power while preserving the fuel efficiency benefit are also needed. Purely electric vehicles and “pluggable” hybrid electric vehicles (which can be recharged using external sources of electricity) are unlikely to become commercial without improvements in batteries (below).

Fuel Cell Systems: Although much R&D and testing of fuel-cell propulsion systems for vehicles is underway world wide, these systems are still in the early stages of development. Needed advances include greater power density, less costly and lighter materials, and streamlined system designs, the ability to mass-produce propulsion systems, and improvements in system reliability and in ability to handle real-world driving conditions.

Electricity Storage Technologies: The energy density of batteries remains relatively low. Better batteries with higher energy storage density at lower cost will be important to hybrid vehicles, electric vehicles, and probably fuel-cell vehicles as well. (The latter are likely to include regenerative braking and even full hybrid systems for maximum efficiency.) Fundamental research is focusing increasingly on alternatives to batteries, such as ultra capacitors and flywheels. A major breakthrough in one of these areas will provide an important boost to virtually all “next-generation” vehicle technologies.

Hydrogen Storage Technologies: As mentioned above for batteries, a major shortcoming of advanced vehicle technologies, compared with today’s conventional vehicles, is the need for energy storage on board the vehicle. For hydrogen and electric vehicles, the required storage volume may be twice the size of that used in today’s gasoline-powered vehicles, for a similar driving range. New hydrogen storage systems, involving much higher pressures or dissolution in a ceramic matrix, are being researched with the hope that, eventually, much higher storage densities can be achieved.

Hydrogen Production and Distribution Technologies: A key consideration “upstream” of hydrogen-powered vehicles will be where this hydrogen comes from and how it is delivered to vehicles. There are many possibilities, ranging from reforming hydrogen on-board vehicles to producing it at fuelling stations (from natural gas or electricity) to producing it at central stations and shipping it to fuelling stations using trucks or pipelines. All options have strengths and weaknesses and need to be tested and compared, although some approaches, such as reforming hydrogen from natural gas without accompanying CO₂ capture and storage, clearly will not result in near-zero upstream emissions. Even for zero-emissions options (such as electrolysis using renewably-generated electricity), it is unclear whether a zero-emissions approach to producing hydrogen for transport makes sense when there is still the opportunity to replace non-zero-emissions generation of electricity for other purposes. Integrated system studies of transitions to zero-emission electricity systems are needed to address this question.

Cellulosic Ethanol Production Technologies: Today, most ethanol in IEA countries is produced from starch or sugar crops. Much greater overall efficiency, and lower greenhouse gas emissions, could be achieved if the cellulosic parts of plants (or plants composed mainly of cellulose) could be converted to alcohol. A variety of approaches are being researched to do this, and to increase the net efficiency and lower the costs of known processes. Approaches include acid hydrolysis and enzymatic hydrolysis. The concept of “bio-refineries” is being developed, whereby industrial plants are designed to make use of all parts of a plant (sugar, starch, and cellulose), and co-products are used to the maximum extent possible. Resulting products can include fuels, chemicals, plastics and electricity. This approach could reduce net costs for ethanol production substantially. It could even reduce net CO₂ emissions to below zero, if, for example, co-generated electricity displaced high-emissions electricity from other sources.

Source : AIE, 2004.

faut dès à présent aborder simultanément les questions liées à la motorisation et aux véhicules, celles relatives à la production des nouvelles énergies et celles qui touchent aux réseaux d’approvisionnement. L’AIEA recommande également de ne pas dissocier la problématique des transports, de celle plus globale de l’énergie – notamment pour optimiser la répartition des énergies disponibles entre demandeurs finaux.

□ Ces trois messages centraux se traduisent par des recommandations précises en matière de recherche appliquée ou fondamentale.

Douze axes de recherche apparaissent ainsi comme prioritaires :

- l’efficacité énergétique des véhicules et des moteurs ;
- l’optimisation des déplacements (autoroute automatique, transports guidés, systèmes de navigation...)
- le consentement à payer des consommateurs pour les nouvelles technologies ;
- les techniques de production de la biomasse et le développement de technologie à bas coût pour la production et le stockage d’hydrogène ;
- l’évaluation précise du rôle potentiel de l’éthanol à base de cellulose et

des autres biocarburants à base de biomasse ;

- les systèmes de distribution multi-carburants ;
- la captation du CO₂ ;
- les utilisations des nouvelles énergies comme l'hydrogène et les biocarburants dans le transport aérien ;
- les modèles d'allocation optimale des énergies « clefs » – biomasse, électricité, hydrogène entre les transports et les autres secteurs ;
- l'application des nanotechnologies

(notamment pour le stockage de l'hydrogène) ;

- les nouveaux matériaux (pour l'allègement des véhicules) ;
- et enfin, l'électrochimie de base (pour la mise au point de nouvelles batteries).

Comme on le constate, il s'agit de recommandations très utiles – et argumentées – dans la perspective des Technologies-clés pour les transports. On y reviendra donc dans la quatrième partie de ce document.

IV. QUELQUES CONCLUSIONS

Même si l'état des lieux précédent est volontairement limité, il permet néanmoins de tirer quelques conclusions qualitatives intéressantes sur la représentation des enjeux politiques et technologiques liés aux transports par les acteurs européens :

- on constate, d'abord, une très grande profusion et richesse des réflexions qui couvrent, en fait presque tout le spectre possible des enjeux liés aux transports (sauf, peut être les problèmes sociaux, les questions de gouvernance et les stratégies de réduction de la mobilité) ;

- même si toutes les composantes et toutes les finalités du domaine sont abordées (depuis la compétitivité des industries jusqu'au service aux usagers en passant par l'intermodalité ou la sécurité), on observe que *l'environnement* et les problèmes d'*énergie* sont au cœur de la plupart des exercices, ce qui positionne souvent l'efficacité des matériaux, la pile à combustible et les biocarburants en première ligne ;

- en dehors du domaine de l'énergie, les propositions se situent plutôt dans le registre des *améliorations incrémentales* (ou des innovations dans les « process ») avec un rôle majeur joué par les technologies de l'information et le « software ». Peu de ruptures majeures sont citées dans les concepts ou dans la mise

sur le marché de modes entièrement nouveaux, sauf dans le domaine de l'aviation (« aile volante » ...) ;

- peu de travaux analysés proposent des *hiérarchies* de Technologies-clés clairement explicites – sauf la plateforme ERTRAC et l'exercice sur les Technologies-clés réalisé en France. Les données sur le coût des recherches à réaliser ou sur le positionnement comparatif de la recherche européenne par rapport à son concurrent sont très rares ;

- enfin, on constate qu'en dehors du *Foresight* anglais sur les véhicules et du rapport de l'AIE sur l'énergie, **la plupart des analyses ne prennent pas explicitement appui sur des travaux de prospective.**

C'est sans doute dû, pour partie, au fait que les approches sont majoritairement normatives et opérationnelles – avec comme enjeu, la recherche de solutions consensuelles (et non l'exploration de problèmes nouveaux). Mais cela reflète aussi *une difficulté plus générale qui est celle de l'articulation entre des approches systémiques des transports (qui est, par exemple, celle du « Livre blanc ») et des approches plus technologiques qui restent essentiellement marquées par la séparation des modes (aériens, maritimes, routiers, ...).*

Troisième partie

**TENDANCES, RUPTURES
ET QUESTIONS CLEFS
À L'HORIZON 2030-2050 :
VERS UNE MUTATION RADICALE
OU UNE CRISE DES TRANSPORTS EUROPÉENS ?**

TENDANCES, RUPTURES ET QUESTIONS CLEFS À L'HORIZON 2030-2050 : VERS UNE MUTATION RADICALE OU UNE CRISE DES TRANSPORTS EUROPÉENS ?

Une des conclusions de la partie précédente est que la perception des enjeux technologiques futurs par les acteurs européens s'est – jusqu'à présent – relativement peu appuyée *explicitement* sur des travaux de prospective à long terme.

Pourtant – même dans l'optique qui est celle des Technologies-clés – la prospective présente au moins deux intérêts qui ne sont pas négligeables : d'abord **permettre de mieux définir les horizons « critiques »** et les degrés d'urgence pour les éventuelles actions à engager dans les années à venir ; ensuite et surtout, **éviter une approche trop réductionniste des enjeux** qui seront ceux des transports au cours du demi-siècle à venir.

Les transports sont, avec l'énergie et l'environnement, l'un des domaines qui a été le plus exploré par la prospective dans les années récentes⁶². Il est naturellement hors de question d'en faire un panorama – même synthétique – dans ce document. On se limitera donc ici à quelques éclairages

partiels avec comme perspective directement opérationnelle, d'en dégager en conclusion, *une liste restreinte d'enjeux clefs pour les transports à l'horizon 2030.*

Cinq points seront successivement abordés :

- l'expérience historique des années 1970-2000 (avec une interrogation sur la portée des inflexions apparues dans la décennie 90) ;

- la présentation de données de cadrage chiffrées sur la période 2000-2030 (à partir des scénarios transport-énergie élaborés par la Commission européenne⁶³ ;

- une approche plus *qualitative*, mais également brève des principales tendances ou ruptures possibles également à l'horizon 2030 ;

- quelques éléments d'analyse plus précis sur le thème énergie – effet de serre (avec la perspective d'une crise majeure pour le système de transport d'ici 2020-2030) ;

- et enfin, quelques données de synthèse sur les perspectives mondiales (en termes de mobilité et de marché).

I. UN BREF RETOUR SUR LES ANNÉES 1970-2000⁶⁴ : QUELLES SIGNIFICATIONS DONNER À L'INFLEXION DE LA DÉCENNIE 90 ?

Les années 1970-2000 ont été sans aucun doute décisives pour les transports européens, qui ont connu pendant cette période un développement remarquable en termes à la fois de marché, de technologie, d'extension des infrastructures, de qualité de service et finalement de croissance de la mobilité.

Dans un contexte d'ouverture internationale, de hausse des revenus, d'augmentation des loisirs et d'extension des villes, les progrès technologiques et la baisse des coûts relatifs de l'énergie et

de l'accès aux transports ont rendu à la fois nécessaires et possibles un doublement de la motorisation⁶⁵ et une multiplication par deux et demi de la mobilité automobile. Les mêmes facteurs couplés avec la croissance économique, l'internationalisation des échanges et les transformations de la chaîne logistique (juste à temps, production à flux tendus...) se sont traduits par un *quasi triplement des transports routiers de marchandises et des transports maritimes internationaux.*

62 Pour une première approche et comparaison des modèles européens à long terme, on peut se référer à l'analyse faite récemment dans le cadre du réseau ESTO : « *Policy support tools for Transport Issues* », IPTS, European Commission, 2004. À cela s'ajoutent de nombreux travaux nationaux et internationaux de prospective et en particulier la publication récente du WBCSD : « *Mobility 2030, meeting the challenges to sustainability overview* », 2004.

63 Source : « *Energy and transport outlook to 2030* », EC, 2004.

64 Les données concernent uniquement l'Europe des 15.

65 En 30 ans le nombre de voitures pour 1 000 habitants est passé de 200 à 470 – ce qui, par ménage, correspond à un taux de motorisation de 80 %.

Ce développement a été – comme on l’a vu à travers le « Livre blanc » – très inégal selon les modes (**ce que montrent aussi les tableaux n° 12 et n° 12 bis**). La part de marché du rail a ainsi sensiblement régressé, tant pour les voyageurs (de 10,5 % à 6 %) que pour les marchandises (20,7 % à 7 %). La navigation intérieure a stagné et les transports urbains n’ont augmenté que de 50 %. Inversement, la mobilité aérienne a été multipliée par 8 et la part de marché des transports aériens a quasiment atteint en 2000 celle des transports ferrés pour les déplacements de personnes.

□ Ces évolutions ont été rendues possibles par une amélioration considérable de la productivité et des performances de la plupart des modes : le nombre d’avions en circulation dans le ciel européen a pu être maintenu constant malgré l’énorme croissance du trafic⁶⁶ ; le nombre de tués sur la route a été en 30 ans divisé par deux malgré un triplement de la mobilité ; la pollution unitaire des voitures a été divisée par un facteur 50 à 100 ; *la puissance de calcul à bord de certains véhicules s’est accrue au point d’être aujourd’hui équivalente à celle d’un airbus des années 80 !*

Néanmoins, ces progrès n’ont pas été suffisants pour compenser l’augmentation de la mobilité, ou celle de la puissance et du poids des véhicules (une multiplication par cinq de la puissance des automobiles !) – si bien que la part des transports dans la consommation de pétrole est passée en 20 ans de 40 à 70 % et la contribution à l’effet de serre de 20 à près de 30 %. S’ajoutant à une congestion chronique et aux menaces latentes de crise des transports urbains, l’émergence dans les années 90 de la question de l’effet de serre a mis en évidence la fragilité d’un modèle de développement des transports fondé

pendant 30 ans sur une baisse des coûts et un accès facile au pétrole.

□ Dans une large mesure, les années 1990-2000 se sont situées dans la prolongation de ces tendances de long terme – avec, en particulier, une croissance soutenue des transports routiers, favorisée par une nouvelle baisse de leur coût d’usage de 20 % et un contexte économique relativement satisfaisant. Mais *cette dernière décennie a été aussi marquée par des inflexions notables* :

– la baisse continue de la part modale du rail a été stoppée (à l’inverse de ce qui s’est passé dans les nouveaux « entrants » européens) ;

– les prix relatifs de l’essence et du diesel ont augmenté – contrairement à la décennie précédente (+ 15 %) ;

– les performances en matière de sécurité et de dépollution « locale » se sont notablement accélérées (15 000 décès en moins sur les routes, au lieu de 8 000 dans la décennie précédente) ;

– les investissements en matière d’infrastructures se sont réduits (1 % du PIB européen) ;

– les émissions unitaires de CO₂ par les automobiles ont été diminuées de 10 % (ce qui n’a pas empêché néanmoins une augmentation sensible de la contribution des transports à l’effet de serre) ;

– enfin, les nouvelles technologies de positionnement et d’aide à la navigation des véhicules ont fait une percée importante (même si l’Europe est restée très en retrait par rapport au Japon et aux États-Unis : 7 % contre plus de 50 % au Japon).

Toute la question est de savoir si ces inflexions constituent l’amorce d’un changement structurel dans la dynamique d’évolution des transports ou si elles sont liées à des facteurs purement conjoncturels.

66 Source : Livre blanc européen, *op. cit.*

Tableau n° 12 : Performance by mode for passenger transport : EU-15
Billion passenger-kilometres 1970-2002

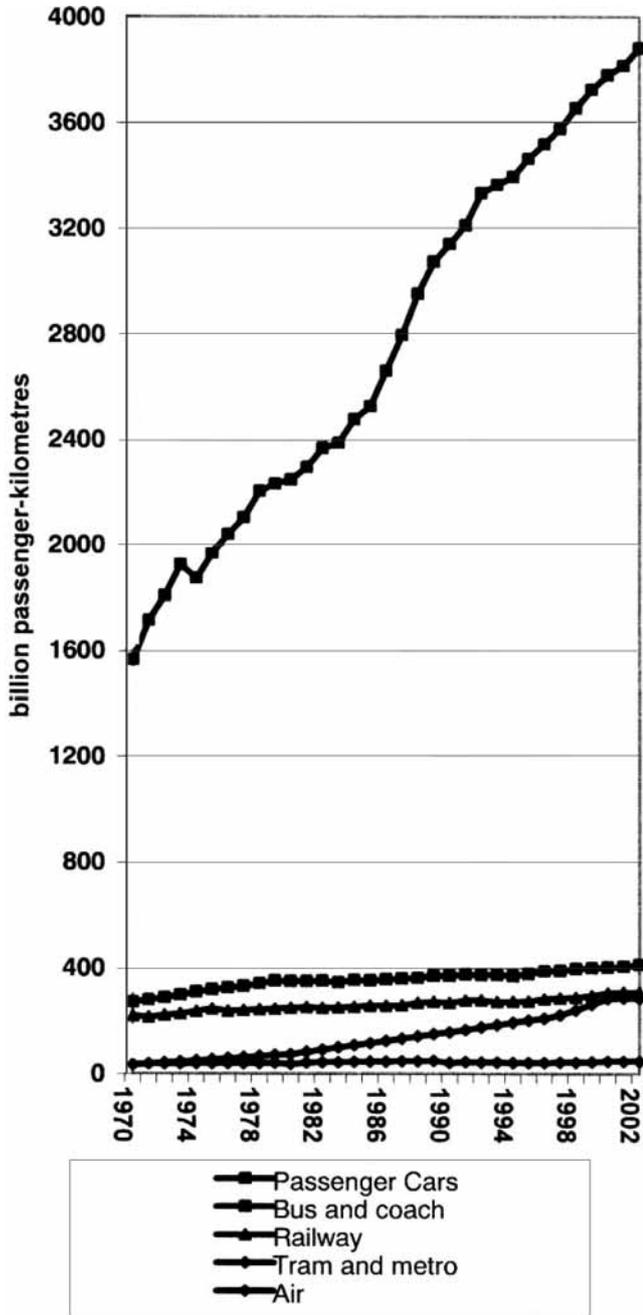
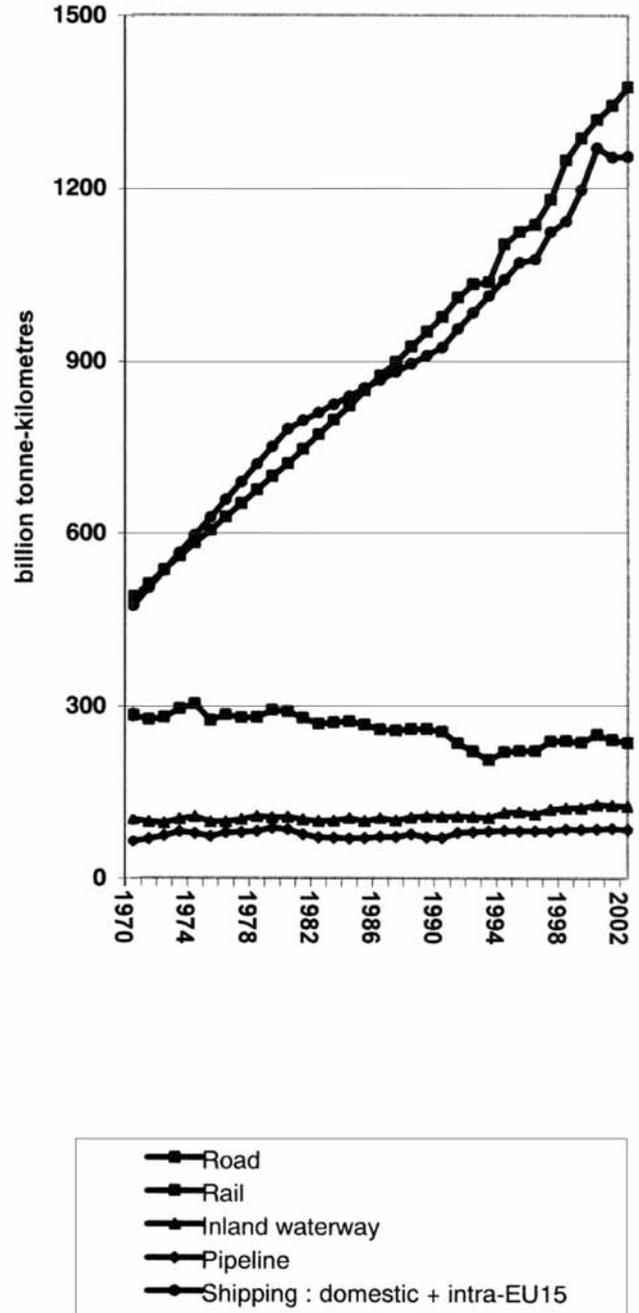


Tableau n° 12 bis : Performance by mode for freight transport : EU-15
Billion tonne-kilometres 1970-2002



Source : Eurostat, Transport and energy figures, 2004.

II. L'ÉVOLUTION TENDANCIELLE DES TRANSPORTS DANS L'EUROPE ÉLARGIE À L'HORIZON 2030 : ÉLÉMENTS DE CADRAGE CHIFFRÉS DE LA COMMISSION EUROPÉENNE

Le scénario tendanciel récemment élaboré par la Commission européenne pour éclairer ses orientations en matière de transport et d'énergie⁶⁷ partage plutôt l'hypothèse d'une inflexion durable, mais très progressive, du système européen de transport, conduisant à un certain rééquilibrage au profit du rail, un découplage modéré entre croissance et mobilité (surtout pour les voyageurs), une forte hausse de l'efficacité énergétique pour les transports de passagers⁶⁸, et une augmentation – restant modeste – du prix du pétrole ou des taxes sur les transports.

• **En 30 ans, la mobilité « tendancielle » devrait ainsi être multipliée par 1,5 – au lieu de 2,5 dans les trois décennies précédentes** – celles des automobiles par 1,8 (au lieu de 2,5) et celle des transports routiers de marchandises par un peu plus de deux – au lieu de 3 entre 1970 et 2000 (voir le tableau n° 13). La baisse de l'élasticité des transports par rapport à la croissance devrait en outre être continue tout au long de la période.

• Compte tenu des gains importants en matière d'efficacité énergétique pour les transports de personnes, la hausse tendancielle de la consommation d'énergie et des émissions de CO₂ serait – toujours dans ce scénario de référence – limitée à 30-35 %. Il n'en reste pas moins que l'on serait très loin de l'objectif de réduction fixé par la conférence de Kyoto et que dans cette hypothèse tendancielle, les

transports resteraient – de très loin – les premiers contributeurs à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre en Europe.

Trois autres observations majeures découlent de ces évolutions tendancielles :

– en 2030, la part modale du transport aérien dépasserait de très loin celle du chemin de fer pour les déplacements de voyageurs ;

– la consommation énergétique des avions atteindrait, en conséquence, plus de la moitié de celle des automobiles ;

– celle des camions et des bus serait, quant à elle, largement supérieure (200 millions de TEP au lieu de 160)
– une inversion totale par rapport à la situation actuelle.

• On mesure à travers ces chiffres les enjeux technologiques que représenteront demain le transport aérien et le transport routier de marchandises – avec, pour celui-ci, un problème croissant lié à la logistique urbaine (transport de marchandises en ville)⁶⁹.

Même si elles ont l'inconvénient de ne pas tenir compte des transports internationaux (et donc de l'essentiel du transport maritime), ces hypothèses tendancielles constituent le socle prospectif majeur sur lequel il est possible de construire une hiérarchisation des enjeux technologiques futurs pour l'Europe. Il est utile, néanmoins de les compléter par quelques analyses plus qualitatives.

67 Source : « *Energy and transport outlook to 2030* », EC, 2004.

68 Notamment en raison de l'accord volontaire des constructeurs automobile réduisant de 25 % les émissions unitaires de CO₂ entre 1996 et 2008.

69 Dans certaines villes, le transport de marchandises en ville serait d'ores et déjà responsable de la moitié des émissions de polluants (et plus pour les particules).

**Tableau n° 13 : Prévisions d'évolutions de la mobilité dans l'Europe des 25 d'ici 2030.
Impacts sur l'énergie et l'effet de serre**

Indicateurs	1990	2000	2030	2030/2000	Taux de croissance /an
▪ PNB (milliards d'euros)	7315	8939	18020	2,02	2,36 %
▪ Population (M. hb)	441	453	458	1,01	0 %
▪ Mobilité voyageurs (GPK)	4685	5520	8546	1,55	1,5 %
Transports publics routiers	485	494	556	1,12	0,4 %
Automobile	3594	4292	6475	1,80	1,4 %
Transport ferré voyageurs	408	402	538	1,34	1,9%
Transport aérien voyageurs	170	298	923	3,09	3,8%
Navigation intérieure et maritime voyageurs	29	34	54	1,56	1,6 %
Kilomètre/personne/an	10618	12174	18637	1,52	1,5 %
▪ Mobilité marchandises (GTK) (intérieure)	1762	2147	4042	1,86	
Camions	1064	1483	3132	2,11	
Transport ferré marchandises	440	368	453	1,23	
Navigation intérieure	258	297	457	1,53	1,5 %
Tonnes/unité de PIB	241	240	224	0,93	
▪ Energie finale (G. Tep)	1014	1077	1392	1,30	0,9%
Energie finale transports	273 (27 %)	333 (31 %)	449 (32 %)	1,35	1 %
Consommation énergie automobile	138	157	161	1,03	
Consommation énergie transports publics	7,7	7	6,4	0,91	
Consommation énergie camions	83	108	200	1,85	
Consommation énergie rail	8,8	9	6,2	0,7	
Consommation énergie avions	29	45	72	1,6	1,6 %
Consommation énergie navigation et maritime	7	5,4	7,8	1,44	
▪ Efficacité énergétique passager	39	39	28	0,7	
Efficacité énergétique marchandises	52	54	51	0,95	
▪ Emissions de CO ₂ (MT) total	3805	3671	4324	1,16	0,5 %
Emissions de CO ₂ transport	794	970	1261	1,30	0,9 %
% CO ₂ transport		27%	30 %		

Source : DG Transport énergie, Commission européenne, 2002 et 2004.

III. QUELQUES TENDANCES OU INCERTITUDES MAJEURES À L'HORIZON 2030-2050 : UNE APPROCHE QUALITATIVE

Tout en fournissant un cadre de référence indispensable, les prévisions chiffrées précédentes ont l'inconvénient de lier l'évolution des transports à un nombre réduit de grands déterminants « macro-économiques » – la démographie, le taux de croissance, le taux de motorisation des ménages... La vision est malheureusement beaucoup plus complexe et incertaine si – comme le font les travaux de prospective – on introduit d'autres dimensions comme la géopolitique, les évolutions sociétales ou la géographie des déplacements.

S'il y a en effet parmi les prospectivistes un assez large accord sur les grandes tendances prises isolément (voir le tableau n° 14), leur combinaison ouvre la possibilité de trajectoires très contrastées d'évolution des transports à l'horizon 2030-2050, certaines constituant des ruptures très fortes par rapport aux dynamiques antérieures. Pour des raisons de commodité, il paraît utile de séparer dans l'inventaire (très sommaire) de ces tendances et ruptures ce qui est technologique et ce qui ne l'est pas.

A. Les tendances et incertitudes socio-économiques

Au-delà des différences de situations nationales ou entre l'Europe des 15 et les nouveaux pays de l'élargissement, il y a actuellement un consensus assez large sur les tendances d'évolution suivantes à l'horizon 2030 :

1. Au niveau mondial, la mobilité devrait croître au cours des 30 ou 50 prochaines années à un rythme comparable à celui qu'a connu l'Europe dans les années 1970-2000 – soit un doublement en 50 ans pour les passagers et un triplement pour les marchandises⁷⁰.

2. Cette croissance devrait être sensiblement moindre dans l'Europe des 25, malgré l'élargissement et le « rattrapage » des taux de motorisa-

tion dans les pays de l'Europe centrale et orientale. Elle pourrait être en effet du même ordre que la croissance économique pour les marchandises et sensiblement moindre pour les passagers – ce qui correspond à un certain « *découplage* » (respectivement + 80 % et + 50 % en 30 ans !).

3. En conséquence de cette dissymétrie, la croissance de la mobilité locale ou régionale devrait être sensiblement inférieure à celle des trafics liés au commerce ou aux échanges internationaux (ce qui est le cas pour l'essentiel du trafic aérien et maritime, pour 50 % du fret ferroviaire et 40 % du fret routier).

4. Les transports ferrés rapides pourraient voir leur trafic doubler ou même tripler, ce qui n'empêcherait pas une baisse de la part de marché du rail pour les transports de voyageurs à l'échelle de l'Europe des 25.

5. Les demandes sociales de sécurité, de confort, de différenciation des produits et des services devraient déterminer de manière croissante les comportements et les attitudes des consommateurs – à côté des critères habituels de coût et de gain de temps.

6. La simple mise en œuvre des normes et des accords d'ores et déjà décidés, et la convergence des politiques européennes, devraient conduire – à un coût économique globalement réduit (sauf pour l'effet de serre)⁷¹, à des améliorations sensibles d'efficacité pour la *sécurité* des transports et les *pollutions locales*.

7. Dans un contexte de difficulté économique, d'accroissement des personnes âgées ou des familles monoparentales, de périurbanisation et de ségrégation urbaine, les arbitrages faits en matière de politique des transports (sévérification des normes, dérégulation des services publics...) pourraient, inversement, avoir des effets très négatifs sur l'accès à la mobilité (*effets d'exclusion*).

70 Source : WBCSD, « *Mobility 2030 : meeting the challenges to sustainability* », 2004.

71 On évalue aujourd'hui le coût d'intégration des nouvelles normes européennes en matière de dépollution et de sécurité à environ 1,5 % du prix des produits et matériels de transport.

Tableau n° 14 : Quelques tendances d'évolution de l'offre et de la demande de transport à l'horizon 2030

Economie	Environnement/Energie
<ul style="list-style-type: none"> • Croissance mondiale de 3 % par an et de 2 % en Europe. • Poursuite de la mondialisation et développement du commerce international. • « Big shift » vers l'Asie. • Elargissement européen à 30. • Harmonisation mondiale des normes. • Dérégulation des transports. • Croissance des taux de motorisation à l'Est et au Sud et stabilisation à l'Ouest. • Instabilités géopolitiques et terrorisme. 	<ul style="list-style-type: none"> • Hausse du prix de l'énergie de 2 à 3 % par an. • Normes antipollution plus sévères. • « Peak oil » en 2020-2030. • Croissance de 50 % en 2030 du CO₂ lié aux transports. • Recarbonisation de l'énergie. • Difficultés croissantes de localisation des infrastructures et des aéroports (Nimby).
Démographie et société	Technologies
<ul style="list-style-type: none"> • Stagnation démographique en Europe. • Vieillesse de la population. • Désynchronisation du travail. • Nouveaux modèles familiaux (more single persons). • Poursuite de la métropolisation. • Etalement des villes et intégration ville/campagne dans des grandes « régions urbaines ». • Diversification de la consommation des ménages et croissance des dépenses liées à la communication, aux loisirs et à la santé. • Hausse des valeurs liées à la santé, à la sécurité, à l'environnement. • Demande accrue de confort. • Accroissement des inégalités sociales et de l'exclusion. 	<ul style="list-style-type: none"> • Nouvelles techniques de positionnement et de traçabilité. • Techniques de motorisation propres (hybride, piles à combustible...). • Nouveaux matériaux (plus légers). • Véhicules et infrastructures « intelligents ». • Electronique de puissance. • Autodiagnostic, capteurs intelligents. • Modularisation et interopérabilité. • Automatisation. • Information partagée et télématique embarquée.
Mobilité	
<ul style="list-style-type: none"> • Demande croissante de mobilité mais ralentissement par rapport aux années 70-2000. • Parts de marché accrues des transports routiers, aériens et maritimes. • Multiplication par 3 du transport aérien en 2030. • Renchérissement du coût relatif des transports (notamment en coût d'usage). • Hausse de la congestion. • Tarification généralisée de l'usage des infrastructures. • Problèmes chroniques de financement des transports publics. 	

8. En dépit d'une certaine modification de la géographie des flux (et des politiques intermodales), les systèmes de transport devraient continuer dans les décennies à venir à être confrontés à trois problèmes géographiques majeurs : l'adaptation de l'offre à la situation des « grandes régions urbaines », la congestion des grands axes de trafic et l'organisation intermodale des grandes plates-formes de passagers ou de fret (plates-formes logistiques ou aéroportuaires, ports maritimes).

9. Enfin, il y a un consensus général pour penser que le *financement des transports* devrait être de plus en

plus réalisé par une contribution des usagers et par des partenariats public-privé.

• Quels que soient la force de ces tendances et le consensus dont elles font l'objet, *ce qui semble cependant devoir caractériser le plus la période qui s'ouvre, c'est le poids des incertitudes et finalement les risques de rupture.*

Au vu des travaux de prospective existants, on constate en effet que ces incertitudes sont extrêmement nombreuses et qu'elles concernent à la fois :

– le *contexte géopolitique* : instabilités politiques, régionales, éventualité d'un retour au protectionnisme, incertitudes sur la construction européenne, risques liés au terrorisme, éventualité de nouvelles infrastructures trans-régionales (traversée du détroit de Gibraltar, ...);

– l'*environnement* : risque avéré ou pas de changement climatique, date du « peak oil » pétrolier ;

– l'*économie mondiale* : évolution de la spécialisation internationale de l'Europe ; poids futurs des pays « émergents » ; stratégie des « acteurs » et des entreprises multinationales ;

– l'*évolution des coûts des transports*, avec à la fois des tendances à la baisse (« low cost », voiture économique, extension des « pavillons » de complaisance, dérégulation des services...) et la perspective d'un renversement de la tendance historique à la réduction de ces coûts (hausse des carburants, internalisation des coûts externes, coût des nouvelles motorisations, régulation des transports routiers...);

– l'*évolution des vitesses* avec d'un côté ceux qui font l'hypothèse d'une poursuite de la tendance historique à l'accroissement des vitesses et de l'autre, ceux qui estiment que celles-ci ont atteint une limite (réduction des vitesses et des puissances sur les routes, coûts marginaux trop élevés des gains en vitesse pour chaque mode, préférence moindre pour les gains de temps...);

– la stabilité (ou l'instabilité) des « *business models* » pour les formes innovantes de transports : *low cost* pour les transports aériens, nouveaux services de mobilité urbaine (voiture partagée, transports à la demande...), partenariats public-privé... ;

– la rapidité plus ou moins grande d'*introduction des nouvelles technologies* (et leurs impacts) ;

– et enfin, le *changement des attitudes et des comportements des usagers et des responsables publics par rapport aux transports* : acceptabilité ou pas des nouvelles technologies, consentement à payer, atténuation – ou pas – de l'importance attachée au statut et à la propriété, usage passif ou actif

de l'information, continuité ou basculement générationnel des modèles de mobilité⁷².

■ Si l'on croise ces différentes incertitudes, on constate que **le système européen de transport va être exposé dans les 30 ans à venir à un certain nombre de risques de rupture de grande ampleur qu'il faut pouvoir anticiper** :

– un risque « *environnemental* » lié à l'accélération de l'effet de serre et à une éventuelle pénurie de pétrole ;

– un risque « *économique* » lié à la perte de compétitivité de l'économie européenne ou à sa marginalisation (perspective de crise économique en Europe et de délocalisation des industries de fabrication des matériels de transport) ;

– un risque de « *panne de la demande* » lié à une éventuelle dérive des coûts, à une baisse de revenus et des budgets publics et à une réorientation des dépenses de consommations des ménages ;

– et enfin, un risque « *d'inadaptation structurelle de l'offre* » lié à l'incapacité d'adapter le système de transport européen à la nouvelle géographie des flux (échec de l'interopérabilité des réseaux, panne des réseaux trans-européens, absence de transfert modal...).

Dans quelle mesure les technologies pourront permettre d'anticiper ces risques de rupture et de crise majeure : c'est naturellement une question centrale pour un exercice sur les Technologies-clés.

B. Les tendances et incertitudes technologiques à long terme

Plus encore que dans la période 1970-2000, l'innovation technologique va constituer un des déterminants majeurs de l'évolution des transports dans les 30 à 50 ans à venir – et ceci quel que soit le mode de transport concerné.

Sans prétendre être exhaustif, on peut résumer ces perspectives d'évolution technologiques à une vingtaine de grandes tendances

⁷² Source : Actes du séminaire sur « *La prospective de l'automobile* », Maison de l'Amérique latine, 21-22 janvier 2003, publiés dans les Dossiers du CPVS n° 6, ministère français de l'Équipement.

structurées en quatre grands domaines : la gestion de la mobilité, les matériels de transport, l'amélioration de l'environnement et de l'efficacité énergétique et enfin, les processus de production.

■ En restant extrêmement schématique, on peut décrire ces **vingt tendances** comme suit :

1. Le développement des *techniques de positionnement, d'identification des usagers et des véhicules, de traçabilité* des produits et de surveillance des flux : applications de GALILEO, reconnaissance des passagers, techniques de « scanning » et d'identification des marchandises (NFID), puces intégrées aux véhicules, systèmes de péages « électroniques », tachigraphes...

2. L'application aux transports des techniques les plus avancées *d'échange et de traitement de l'information* : bases de données, modèles de simulation, informations géographiques, informations intermodales, NTIC appliquées à la logistique et à la « supply chain management », télématique embarquée, wi-fi, téléphonie mobile de 3^{ème} génération, véhicule « communicant », billétique et monétique...

3. La généralisation et la modernisation des *systèmes de guidage et de navigation* utiles à l'optimisation et à la sécurité des trafics : « route intelligente », application de ERTMS à la gestion du trafic ferré, nouvelles techniques de surveillance aérienne...

4. L'extension des *dispositifs anticollision ou de sécurité active* : contrôle automatique des distances entre véhicules, « auto-séparation » des couloirs aériens, aides à la conduite, limiteurs de vitesse, meilleure ergonomie de l'interface homme-machine.

5. L'accroissement de la *capacité des véhicules* et la sophistication des systèmes d'« attelage » : camion 60 tonnes, trains de 1 500 tonnes avec attelage électronique, avions de grande capacité (500 à 1 000 passagers, A 380...).

6. Le développement de nouveaux moyens de transport à grande vitesse : train à *grande vitesse* atteignant 350 à 400 km à l'heure, « Fast ferries », hydroptères (et de manière beaucoup moins probable, trains à sustentation magnétique (MAGLEV) et avions supersoniques).

7. Le passage à une *nouvelle « génération » de systèmes électriques et électroniques* : multiplexage des circuits, transformation des organes mécaniques des véhicules en systèmes mécatroniques, composants électriques et électroniques de moyenne ou forte puissance (alimentation électrique 42 volts...), commande sans fil (« drive by wire » ...), intelligence artificielle et informatique répartie, locomotives multicourant...

8. La mise au point de systèmes de *pilotage et de visibilité « tout temps »* : « cockpit vision » dans les transports aériens, nouveaux systèmes d'éclairage infrarouge ou laser pour les véhicules, nouveaux radars...

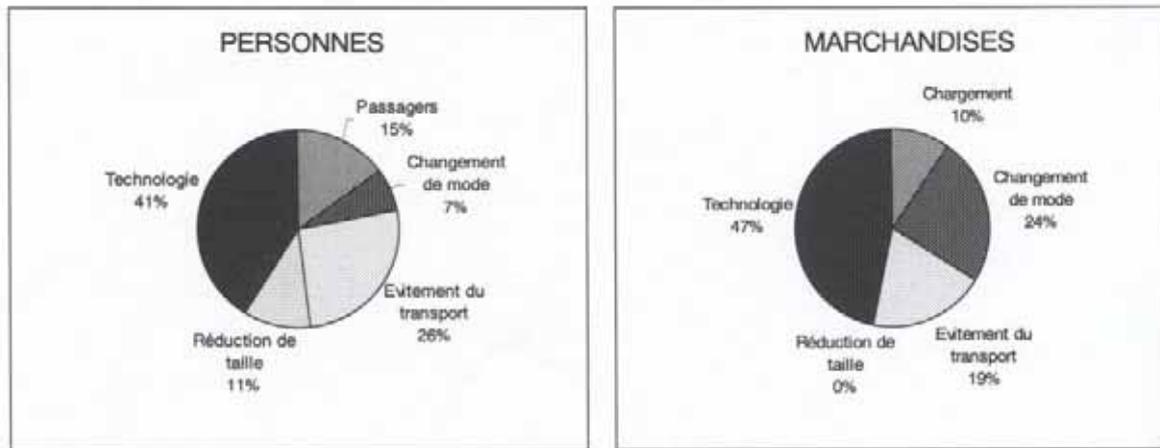
9. Le développement des systèmes de *transport automatique* guidés : transports urbains guidés, voitures sur rail électronique sans conducteur, avions à pilotage entièrement automatique, wagons automoteurs pour le transport de petits colis et éventuellement automatisation des chemins de fer...

10. Le recours à de *nouveaux matériaux* permettant un allègement des véhicules et un accroissement des taux de recyclage : matériaux composites, matériaux « intelligents », nouveaux polymères, nouvelles techniques de collage et de traitement des surfaces, matériaux structuraux, revêtements nanostructurés.

11. De nouveaux systèmes de *capteurs* permettant d'aller progressivement vers un « auto-diagnostic » ou une « auto-réparation » des véhicules (dont la nano-instrumentation).

12. Des *techniques de combustion « propre » beaucoup plus efficaces en terme énergétique* : cycles optimisés (HCCI/CAI), « downsizing »,

Schéma n° 4 : Apports prévus de divers facteurs pour atteindre une réduction de 80 % des émissions de dioxyde de carbone dans les transports, comparativement aux niveaux de 1990 dans les pays membres de l'OCDE en 2030



injection directe haute pression, combustion homogène, conduite économique assistée...

13. L'adaptation des techniques *anti-pollution* (ou « *anti-bruit* ») aux nouvelles exigences réglementaires : pièges à particules pour les moteurs diesel, moteurs ou systèmes de roulement silencieux, post traitement des polluants non réglementés, recirculation des gaz d'échappement (EGR), réduction catalytique sélective (SCR).

14. Le développement des *biocarburants* ou des carburants alternatifs au pétrole (GNV...).

15. La mise progressive sur le marché et l'amélioration des performances des techniques alternatives au moteur à combustion interne : véhicules *hybrides*, véhicules électriques *piles à combustible* et le développement des techniques de fabrication, distribution et *stockage de l'hydrogène*.

16. L'utilisation de nouveaux *systèmes de stockage de l'énergie* (supercapacité, volants d'inertie...).

17. *L'automatisation* et la *robotisation* des processus de production.

18. La conception et l'extension généralisée « *de systèmes modulaires* » et de composants *hybrides* ou intégrés permettant un assemblage rapide et flexible des structures.

19. Le développement de *nouvelles techniques de conception et de formes « coopératives »* de fabrication : « *goupware* », outils de simulation et de réalité virtuelle, échanges de données informatisées, méthodes de prototypage rapides, tests de performance performants...

20. Et enfin, la transition progressive vers des *formes plus flexibles de production* permettant des « *circuits courts* » entre unités de production et consommateurs : « *customérisation* » des produits, petites usines flexibles...

Naturellement, toutes ces technologies n'ont pas la même probabilité de développement et pour quelques-unes, les perspectives sont extrêmement incertaines : après l'arrêt du Concorde, il est difficile par exemple d'imaginer le retour du supersonique. L'évolution vers des trains magnétiques semble aussi aujourd'hui difficilement envisageable. Et la rentabilité des routes à sustentation automatisées – qui supposerait des infrastructures dédiées apparaît généralement comme très aléatoire.

Mais on peut penser que **globalement les futurs systèmes de transport vont pouvoir bénéficier d'opportunités technologiques tout à fait considérables** – à condition naturellement d'être capables d'assurer l'intégration de fonctionnalités extrêmement diverses et malheureusement parfois contradictoires. Plus que jamais, les

transports seront donc demain des systèmes complexes – de formidables « matrices d'intégration » de fonctions et de techniques multiples.

□ *Cela ne veut pas dire cependant que ces technologies pourront être la solution unique aux problèmes auxquels les transports vont être exposés d'ici 30 à 50 ans.* Les constructeurs automobiles eux-mêmes – à travers la plate-forme ERTRAC – évaluent à 30 % la contribution possible des nouvelles techniques aux défis de la sécurité routière⁷³. Les experts de l'OCDE participant au projet EST (*Environmentally Sustainable Transports*)⁷⁴ ont – de leur côté – récemment estimé que l'apport

de la technologie à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ne devrait pas dépasser à l'horizon 2030 40 % pour la mobilité des personnes et 50 % pour les transports de marchandises – dans l'hypothèse la plus optimiste (voir le schéma n° 4).

Ces deux estimations rejoignent l'observation majeure faite en première partie de ce document : on ne peut dissocier dans le domaine des transports les technologies des systèmes socio-techniques plus vastes dont ils ne sont qu'une des composantes.

Et ces systèmes ont naturellement une composante de *marché* à laquelle il faut aussi s'intéresser.

IV. L'ÉVOLUTION À LONG TERME DES MARCHÉS : QUELLES CONSÉQUENCES D'UN « BASCULEMENT » AU PROFIT DES PAYS ÉMERGENTS ?

Les technologies futures ne devront pas seulement répondre aux défis qui seront ceux de l'Europe des transports de demain : elles devront aussi être adaptées aux évolutions à venir d'un *marché* – qui plus encore dans un domaine qu'ailleurs – sera fondamentalement mondialisé – et progressivement dominé par le poids des pays « émergents ».

Naturellement, il est hors de question dans ce court document de faire une étude de marché de chacune des technologies susceptibles d'être commercialisées à l'horizon de 20-30 ans. On se limitera, là encore, à quelques éléments de cadrage généraux relatifs aux grands secteurs concernés : d'abord l'automobile, puis l'aéronautique, et enfin – beaucoup plus brièvement – les autres modes de transport.

A. Tendances et ruptures du marché de l'automobile

Il faut rappeler au préalable, que l'automobile représente le plus vaste marché mondial de consommation – avec un chiffre d'affaires annuel global qui, si on intègre les équipements, est de l'ordre de 2 000 milliards d'euros et un montant d'exportation qui en 2002 était de 620 milliards de dollars, soit 10 % des exportations

mondiales tous secteurs confondus et 14 % des exportations de produits manufacturés. Dans cet ensemble, les pays européens ont aujourd'hui un rôle majeur puisqu'ils représentent 30 % de la production et du marché et 50 % des exportations. Mais seul un tiers de ces exportations est effectué hors de l'espace communautaire ; l'Amérique de Nord reste le premier marché mondial ; tandis que le Japon, réalise, de loin, la plus grand excédent commercial⁷⁵.

À l'échelle mondiale, la croissance future de la demande automobile sera surtout déterminée par la dynamique d'évolution des taux de motorisation qui se produira dans les pays émergents de l'Est européen, de l'Amérique du Sud et surtout des pays asiatiques (Inde, Chine, Indonésie...). En revanche, on peut penser que dans les pays de l'OCDE le marché sera surtout un marché de renouvellement lié à l'introduction d'innovations technologiques importantes et à la normalisation. C'est un processus de rattrapage qui s'est d'ailleurs déjà amorcé depuis une quinzaine d'années, puisque durant cette période la demande n'a augmenté que de 15 % en Europe au lieu de 40 % à l'échelle mondiale. Les prévisions dont on dispose à moyen terme – pour la période 2005-2010 – montrent qu'on

73 Source : Strategic Research Agenda, ERTRAC, décembre 2004, *op. cit.*

74 Source : Projet EST, OCDE, www.oecd.org/env/ccst/est
Il faut rappeler que sur les 600 millions d'automobiles vendues dans le monde entre 1996 et 2006, un million seulement ont été des véhicules hybrides et 10 des flex-fuel, utilisant partiellement des biocarburants (source CFCA).

75 83 milliards de dollars d'excédent en 2002 contre 50 pour l'Europe et un déficit de 110 milliards pour les États-Unis (source : GATT – OMC).

Tableau n° 15 : Les taux de motorisation dans le monde au début et à la fin des années 90*

Régions	Périodes	Voitures		Véhicules (y compris : véhicules utilitaires)	
		1989	1997	1989	1997
Europe de l'Ouest		345	381	387	440
Europe centrale et orientale		65	98	98	140
Amérique du Nord		399	365	523	533
Japon		263	350	396	498
Asie (hors Japon)		6	14	28	48
Monde		83	90	110	130

* Taux de motorisation pour 1 000 habitants.

Source : CFCA

Tableau n° 16 : L'évolution du marché mondial de l'automobile et de la production par grande région économique (en %)

	Europe (25)	ALENA (EU+Canada +Mexique)	Japon	Corée	Asie (hors Japon et Corée)	Reste du monde
2003	30 %	33 %	10 %	3 %	16 %	8 %
2010-2015	27 %	29 %	8 %	2 %	24 %	10 %
2050	1/3			2/3		
2003	30 %	27 %	17 %	5 %	14 % (6 % Chine)	7 %
2010-2015	27 %	26 %	14 %	4 %	20 %	9 %

Source : CFCA et ALII.

est dans une phase d'amplification de ce processus de rattrapage puisqu'il est envisagé en cinq ans une croissance des immatriculations de 45 % en Chine, 35 % en Inde, 25 % en Afrique, 10 % en Europe centrale et orientale – mais seulement de 4 % en Europe de l'Ouest et quasiment de 0 % au Japon. À ce rythme, les « pays émergents » représenteront 40 % du marché mondial en 2010 et il est plus que probable que **cette part des pays émergents dépassera 50 % avant 2020 (voir le tableau n° 16)**.

Si l'on prend en compte les *taux de motorisation actuels (voir le tableau n° 15)* et si l'on fait l'hypothèse qu'en 2050 le taux de motorisation moyen aura atteint la moitié de celui qui

existe aujourd'hui dans les pays de l'OCDE on peut estimer qu'à cette date le parc automobile mondial sera proche de 2 milliards de véhicules, soit environ deux fois et demi le parc actuel (780 millions). Cette hypothèse prudente conduit à penser qu'à *cet horizon, plus des 2/3 du marché mondial seront dans les pays émergents* et notamment en Asie⁷⁶. Cela pose naturellement deux questions majeures :

– *quelles seront les normes dans ces « marchés émergents » – notamment dans le domaine des émissions de gaz à effet de serre ?*

– *ira-t-on ou pas vers une différenciation des coûts et des produits pour tenir compte de la spécificité des marchés des pays du Sud – avec pour*

76 Certains font l'hypothèse d'un parc mondial supérieur à 3,5 milliards de véhicules en 2050. Source : Graham May. "Europe's automotive sector at a crossroads", Foresight, Vol. 6, novembre 2004.

conséquence une différenciation forte des technologies « embarquées » dans les véhicules ?

La question se pose également de savoir quelles seront les conséquences de ces évolutions du marché sur les structures et la localisation de la production. À l'heure actuelle, moins de 20 % de la production mondiale est réalisée dans les pays émergents – sous l'égide d'entreprises qui restent essentiellement européennes, américaines ou japonaises. Mais la conjonction de droits de douane importants et de coûts de transport élevés favorise une relocalisation des lieux de production près des marchés⁷⁷ ; et il est probable que d'ici 2020, près du tiers des véhicules seront assemblés ou produits dans les pays émergents – y compris les pays de l'élargissement. Le **gouvernement chinois** prévoit ainsi une capacité de production à l'horizon 2010-2015 de l'ordre de 14 millions de véhicules, un chiffre très supérieur au Japon et, à ce même horizon **l'Inde** devrait, elle aussi, devenir un acteur majeur de la construction automobile. Il est difficile aujourd'hui de savoir dans quelle mesure ces véhicules seront – ou pas – exportés sur le marché mondial ou s'il seront essentiellement destinés au marché intérieur : mais on ne peut exclure qu'un tel changement dans les structures mondiales de la production ne conduise à des dynamiques d'innovation entièrement nouvelles, par exemple dans la mise au point de véhicules peu coûteux à l'achat ou de véhicules spécifiquement urbains (la Chine investit actuellement très fortement sur le véhicule électrique)⁷⁸.

□ En dehors de ces évolutions géographiques tout à fait majeures, il faut ajouter que le secteur de l'automobile et son marché devraient être par ailleurs fortement touchés par des transformations internes touchant aux processus de production ou à la nature des produits, avec, par exemple, un poids croissant de l'électronique et des technologies de l'information dans la valeur ajoutée globale (50 % en 2050) ou un rôle croissant des équipementiers notamment dans l'innovation et la recherche. Il faut en retenir que les

systèmes d'acteurs intervenant dans l'innovation vont être à terme profondément modifiés.

B. L'évolution du marché aéronautique

Comme l'automobile, l'aéronautique est également un secteur d'exportation majeur pour l'Europe, avec un excédent commercial de l'ordre de milliards d'euros en 2004 et une part de marché mondial proche de 50 %. Les différences avec l'automobile sont néanmoins importantes : un marché sensiblement plus faible, un système de production essentiellement dominé par deux constructeurs et des taux de croissance de la demande beaucoup plus élevés (5,3 % par an pour les passagers d'ici 2024, 6 % pour le fret)⁷⁹.

Les prévisions faites à la fois par Boeing et Airbus envisagent pour les deux prochaines décennies un *doublément de la flotte commerciale en circulation*, ce qui devrait conduire à la mise sur le marché de 17 000 nouveaux appareils pour une valeur globale – sur l'ensemble de la période 2004-2023 – de 2 000 milliards de dollars⁸⁰.

Là encore, on constate l'importance de l'Asie Pacifique dans l'évolution de ce marché futur : la région devrait représenter (en valeur) 34 % des commercialisations futures, contre 29 % pour l'Amérique du Nord, 27 % pour l'Europe et 10 % pour le reste du monde. Ceci est dû en grande partie au grand dynamisme du marché chinois (+ 8 % par an de croissance des transports aériens). À eux seuls, la Chine, les États-Unis et la Grande-Bretagne pourraient ainsi d'ici 20 ans constituer 40 % du marché mondial des nouveaux avions.

S'il existe entre Airbus et Boeing une controverse sur l'importance future du marché des avions très gros porteurs (*type A 380*), celui-ci ne devrait pas dépasser, dans l'hypothèse la plus optimiste, plus de 7 % du nombre total des nouveaux avions, avec, là encore, une part importante du marché situé en Asie.

77 La question de la libéralisation du commerce dans le domaine automobile pourrait faire l'objet de négociation future dans le cadre de l'OMC. À l'heure actuelle, les droits de douane sont de 0 % au Japon, 8 % en Europe, 50 % en Inde, 35 % en Chine...

78 Les pays émergents qui étaient en déficit structurel pour le commerce automobile il y a 10 ans, sont devenus en excédent en 2002 (CEPII, 2005).

En 2006, la production d'automobiles en Chine était déjà voisine de celle des États-Unis (9 millions contre 10.4)

79 Source : Global market forecast (Airbus) et Boeing Current market outlook 2004.

À plus long terme, l'avion devrait conserver encore pendant une longue période des marges de progression importantes dans les pays émergents : le nombre de voyages par an est aujourd'hui en moyenne 100 fois moins important en Inde qu'aux États-Unis et 40 fois moins en Chine.

□ Comme pour l'automobile, on peut s'interroger sur les *conséquences de cette future géographie des marchés sur la localisation à long terme de l'industrie aéronautique mondiale*.

En fait, la situation apparaît comme très différente de l'automobile, car au moins à moyen terme, ni la Chine, ni la Russie, ni l'Ukraine, ni d'autres pays « émergents » ne semblent en mesure de développer des pôles autonomes de construction d'avions commerciaux réellement compétitifs par rapport aux deux constructeurs mondiaux que sont Boeing et Airbus. La Russie envisage de recréer en 2006 une entreprise à partir de ce qui subsiste de l'industrie ancienne, mais sa production en 2003 n'a représenté que 3 % de la production d'Airbus et de Boeing. La Chine – de son côté – se limite, pour l'instant, à un rôle de sous-traitance pour les deux constructeurs, et privilégie la mise en place d'infrastructures (aéroports, systèmes de surveillance aérienne...). Mais il est difficile de dire si cette stratégie ne sera pas profondément modifiée à long terme !

C. Les autres modes

Dans tous les autres secteurs autres que l'aéronautique et l'automobile, la position de l'Europe sur les marchés mondiaux est importante, même si les situations sont relativement contrastées :

– dans le **domaine ferroviaire**, deux des quatre principaux constructeurs mondiaux – Alstom et Siemens⁸¹ – sont européens et l'Europe représente 40 % du marché mondial, contre 30 % pour l'Asie Pacifique et 17 % pour les États-Unis. C'est cependant le marché asiatique qui connaît la plus forte croissance – de l'ordre de 8 % pour le train comme le métro ;

– dans le secteur de la **construction navale**, l'Europe n'arrive qu'au troisième rang mondial, derrière le

Japon et la Corée – et ceci malgré l'entrée récente de la Pologne⁸² dans l'espace communautaire. Sur un chiffre d'affaire annuel de 30 milliards d'euros, 50 % sont exportés. Le commerce maritime connaît une croissance comparable à celle de l'aéronautique (4 à 5 % par an) mais les armateurs européens – qui contrôlent 27 % de la flotte mondiale – sont fortement concurrencés par leurs homologues asiatiques ;

– Pour les **transports publics** (hors métro), la part du marché mondial ouverte à la concurrence reste limitée (50 milliards d'euros sur 300). Globalement, l'organisation des marchés reste essentiellement « régionale » (avec une présence *relativement* faible des entreprises européennes hors d'Europe).

Parmi les domaines qui connaissent les plus fortes croissances, il faut noter enfin tout ce qui concerne l'*électro-nique embarquée* et les *systèmes de transports intelligents* – dont le chiffre d'affaire devrait être multiplié par 2,5 ou 3 d'ici 2015⁸³ – ainsi que les *applications de GALILEO* dont le marché futur est estimé par la Commission européenne à 12 milliards d'euros en 2010 et 28 milliards en 2020⁸⁴.

□ On peut conclure ce court éclairage sur les marchés futurs par trois constats :

– les marchés liés aux transports vont continuer à connaître une croissance relativement importante d'ici 2020-2030, mais ils seront tirés par une demande beaucoup plus mondiale qu'européenne ;

– les industriels européens occupent encore aujourd'hui une position centrale sur ces marchés mondiaux ;

– mais cette position ne pourra être maintenue que si l'Europe parvient à tirer parti de la croissance asiatique, qui représentera à terme une part déterminante de la demande et – au moins pour l'automobile et la construction navale – de la production.

Il résulte de toutes ces évolutions que le « centre de gravité » du secteur des transports va naturellement se déplacer vers l'espace mondial et les besoins des pays « émergents », notamment asiatiques.

80 La flotte commerciale devrait passer en 20 ans de 17 000 appareils à 35 000.

81 Les deux autres étant Bombardier (Canada) et un constructeur japonais.

82 Le secteur de la construction navale représente aujourd'hui en Europe 400 000 emplois. C'est le leader mondial en terme de *turnover* et pour la fabrication de navires « complexes ».

83 On prévoit que le marché des systèmes de transports intelligents appliqués à l'automobile devrait atteindre 90 milliards de dollars dès 2010.

V. LE DÉFI DE L'ÉNERGIE ET DE L'ENVIRONNEMENT : POURRA-T-ON ÉVITER UNE RUPTURE RADICALE DANS LES SYSTÈMES DE TRANSPORT ?

Sauf ruptures technologiques de grande ampleur, il est à craindre que les perspectives de marché précédentes ne soient à terme en grande partie incompatibles avec les risques liés à la raréfaction du pétrole et à l'augmentation de l'effet de serre – deux risques considérés aujourd'hui par les experts comme également majeurs et probables à l'horizon 2030. Soumis à des tensions énergétiques et environnementales croissantes, *tous les systèmes de transport – et en particulier la route et les transports aériens – auront à engager une transition difficile.*

A. 2030 : un horizon critique pour le pétrole, le gaz et l'effet de serre

□ Au rythme actuel de croissance, la consommation mondiale de pétrole devrait être doublée en 2030⁸⁵, triplée ou quadruplée en 2050. La plupart des scénarios tendanciels dont on dispose⁸⁶ envisagent, en conséquence, une consommation cumulée de pétrole et de gaz sur les cinquante prochaines années, qui est très proche des réserves prouvées actuelles – 140 giga teps pour le pétrole et 150 pour le gaz. Il est donc très probable que les pics de production de pétrole et sans doute de gaz interviendront bien avant 2050. Comme par ailleurs aucun investissement important d'augmentation des capacités de production et de raffinage n'a été effectué depuis les années 90, on peut s'attendre, au moins pendant 15-20 ans, à des tensions chroniques sur les marchés du pétrole et du gaz, avec des prix en forte hausse.

□ Il existe néanmoins des controverses importantes sur la date probable du « **peak-oil** » (c'est-à-dire la date à laquelle le rythme d'extraction dépassera celui de la mise à disposition de nouvelles ressources), controverses essentiellement liées aux différences d'estimation – de 1 à 3 – sur le montant des ressources addition-

nelles⁸⁷. Les pessimistes envisagent ce « **peak-oil** » en 2005-2010, les optimistes en 2050. Si l'on retient la position moyenne adoptée par la Commission européenne, *les stocks de pétrole disponibles devraient commencer à baisser entre 2010 et 2020, ceux du gaz entre 2020 et 2030*⁸⁸.

□ 2030 constitue également un horizon critique pour l'effet de serre. Dans une hypothèse tendancielle, les émissions de CO₂ devraient, à l'échelle mondiale, être multipliées par 2 entre 2000 et 2030⁸⁹ – mais par 3 en Asie, celle-ci représentant en 2030 plus de 40 % du total mondial (contre 13 % pour l'Europe). Or, les analystes estiment que pour stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre à un niveau raisonnable (650 ppmv en 2100), il faudrait *absolument* inverser la courbe des émissions *avant* 2030 et ne pas dépasser à cet horizon 2030 1,4 fois le niveau atteint en l'an 2000 (voir le schéma n° 5), ce qui est très en deçà du doublement attendu.

B. Des enjeux majeurs pour les transports

Extrêmement vulnérables au pétrole – dont ils consomment la moitié de la production mondiale⁹⁰ – et responsables d'une bonne part de l'accroissement des émissions de gaz à effet de serre, les transports sont naturellement particulièrement concernés par les deux défis précédents.

Dans 30 ans en Europe – et ceci malgré des gains en efficacité énergétique importants⁹¹ – les transports représenteront un tiers des émissions de CO₂ et 75 % de la consommation du pétrole.

Les experts évaluent que, compte tenu de la date probable du « peak oil » et de la baisse prévisible de la production, les transports pourraient à eux seuls absorber avant 2030 la totalité des ressources de pétrole « conventionnelles » et avant 2050

84 Source : ANAE – Un système de positionnement, GALILEO, Paris 2003.

85 Entre 2000 et 2030, la consommation d'énergie primaire devrait passer de 10 giga à 18 giga teps, et celle du pétrole de 3 à 6 giga teps.

86 Notamment les deux scénarios de l'IPCC « Croissance et progrès technologique » et « Régionalisation » ainsi que le scénario « Développement durable » de l'Agence Internationale de l'Énergie.

87 Les pessimistes estiment ces ressources additionnelles à 300 giga barils, les optimistes à 881, chiffres qu'il faut comparer aux 1 800 giga barils correspondant aux ressources identifiées.

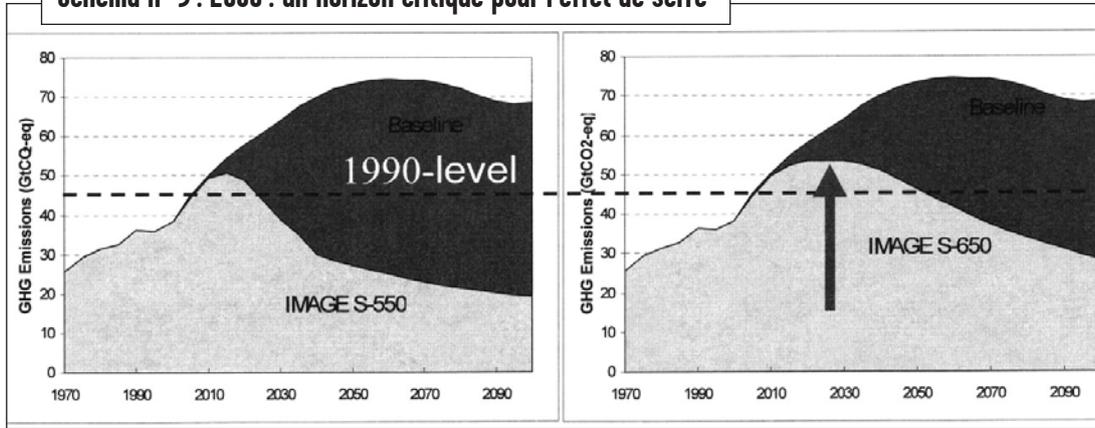
88 Source : European Energy and Transport Trends to 2030 – janvier 2003 – *op. cit.*

89 Pour passer de 23 giga tonnes à 44, toujours selon les scénarios de la Commission (modèle Pôle).

90 70 % aux États-Unis, 35 % en Asie.

91 30 % pour les voitures, 20 % pour l'aviation, 15 % pour les camions. Source : scénarios

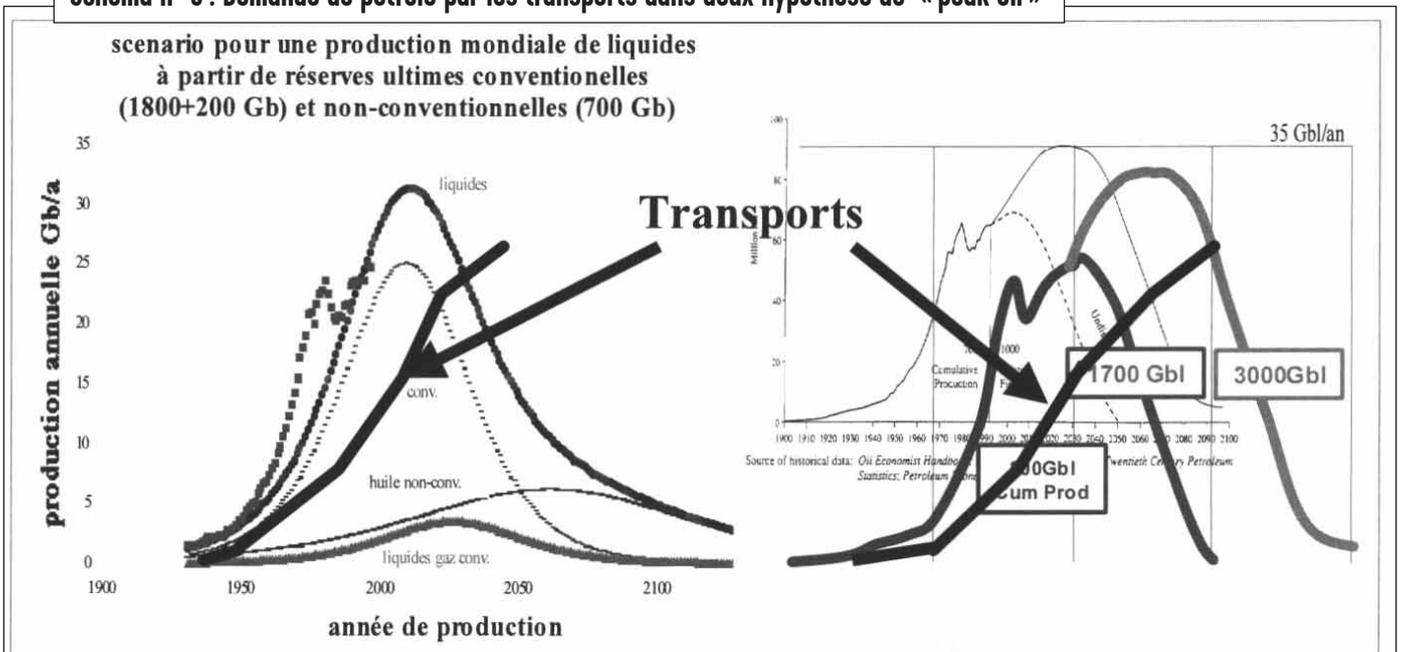
Schéma n° 5 : 2030 : un horizon critique pour l'effet de serre



Horizons critiques de mise en œuvre des politiques de réduction de l'effet de serre pour deux niveaux d'objectifs : 550 PPMV et 650 PPMV de CO₂ en 2100.

Source : National Institute for Public Health and the Environment (Netherlands).

Schéma n° 6 : Demande de pétrole par les transports dans deux hypothèse de « peak oil »



Source : Laherrère_Petroconsultants

Source : Barnes-OIES.

toutes les ressources conventionnelles ou pas⁹² (voir le schéma n° 6).

□ Dans le passé, l'expérience historique a montré, au moins pour l'automobile, qu'un *découplage* était possible entre la croissance des transports et la consommation de pétrole : c'est ce qui s'est passé après la crise de 1973, avant le retournement du milieu des années 80 où les gains en efficacité ont été plus que compensés par la « montée en gamme » et l'augmentation de la puissance des véhicules, leur alourdissement (lié en partie à la sécurité), les équipements de climatisations... Après l'accord de 1998 où les constructeurs européens se sont engagés à réduire les émissions moyennes de CO₂ des véhicules à 140g/km en 2008 et 120g/km en 2010, on peut penser que la période qui s'engage va être à nouveau une phase de « découplage », avec des gains en efficacité importants – de l'ordre de 20 à 30 % (à condition de pouvoir résoudre les contradictions non surmontées dans la période précédente – poids, sécurité, climatisation...). Mais cet accord ne concerne ni les avions ni les transports routiers qui représenteront en 2030 respectivement 50 % et 120 % de la consommation globale des automobiles à l'échelle européenne et sont en valeur

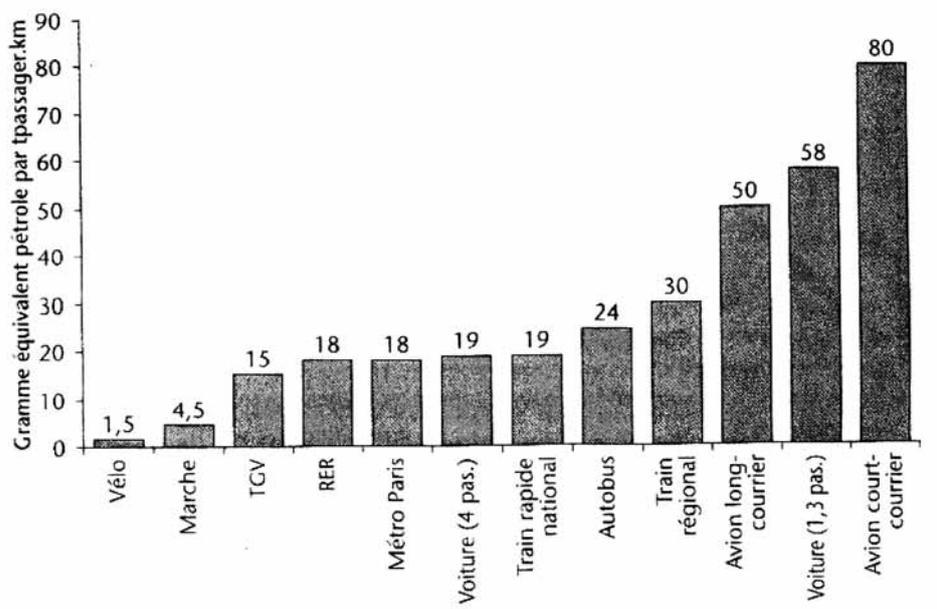
unitaire beaucoup moins « efficaces » en énergie (voir le tableau n° 17).

□ Et surtout, on sait déjà que ces gains – mêmes étendus aux autres modes que la voiture – seront insuffisants. *À long terme, les experts estiment en effet que la seule solution « soutenable » – à la fois pour l'environnement et pour les transports – est celle de la substitution du pétrole (ou du gaz) par des énergies non émettrices ou faiblement émettrices de gaz à effet de serre.* Cela exclut le charbon liquide ou les pétroles non conventionnels et ne laisse, pour l'instant, que quatre solutions envisageables :

- les *biocarburants* (et en particulier ceux issus de la partie fibreuse des plantes ou du bois) ;
- l'*hydrogène* issu d'énergies non polluantes⁹³ associé à des *piles à combustible* ;
- l'*électricité* issue d'énergies non polluantes ;
- et enfin, la *gestion de la demande de mobilité* ou le transfert vers des modes « sans pétrole ».

Dans tous les cas, il s'agit d'une rupture majeure par rapport à la situation actuelle – avec des avantages et des inconvénients qu'il faut sérieusement évaluer.

Tableau n° 17 : La consommation d'énergie des différents moyens de transport (en équivalents pétrole par passager/kilomètre)



Source : ADEME, SNCF, INRETS, Jancovici.
Source : CFCA

énergétiques de la Commission européenne.
Op. cit.

92 Source : Bertrand Château, Enerdata, « Pétrole et transport : vers un nouveau paradigme ? », Tunis, ATPG, décembre 2004.

93 Énergies renouvelables, énergies nucléaires

Tableau n° 18 : Les enjeux majeurs pour les transports européens dans les trente ans à venir

I. Economie, compétitivité, mondialisation, Europe	
1. L'adaptation des transports aux transformations du <i>système productif mondial</i> et du commerce international	5. La mise en place et l'organisation de <i>l'espace européen des transports</i> : réseaux trans-européens, interopérabilité, harmonisation tarifaire, normes, corridors, restructuration des opérations, libéralisation, gouvernance...
2. <i>La compétitivité des constructeurs et équipementiers européens</i> : productivité, baisse des coûts, anticipation des innovations, structuration mondiale.	6. La réussite de l'élargissement à l'est et vers la méditerranée.
3. Le développement de la motorisation et des nouveaux marchés dans les <i>pays émergents</i> .	7. Le désenclavement des régions isolées et <i>l'équité d'accès des territoires à la mobilité</i> . Un meilleur équilibre européen des flux et des infrastructures.
4. L'adaptation à l'augmentation des <i>flux touristiques</i> et de la mobilité internationale des passagers : organisation des « hubs », capacité des moyens de transport, systèmes de réservation...	8. <i>La vulnérabilité</i> des transports au <i>terrorisme</i> , aux <i>risques</i> « systémiques » et aux crises. La sécurité des infrastructures.
II. Environnement et énergie – maîtrise de la demande de mobilité	
9. La vulnérabilité des transports au rencherissement et à la raréfaction du <i>pétrole</i> .	14. L'économie des ressources rares (hors pétrole) et la <i>recyclabilité</i> des véhicules et infrastructures.
10. La prévention de <i>l'effet de serre</i> (réduction d'un facteur 3 ou 4 des émissions de CO ₂ et GES).	15. <i>Le découplage entre croissance et transport de marchandises</i> : remise en cause du « juste à temps », relocalisation des unités de production et de distribution, optimisation de la logistique...
11. La prise en compte des effets des transports sur la <i>santé</i> , la <i>pollution</i> , le <i>bruit</i> , les nuisances... A l'échelle régionale et locale.	16. <i>La substitution des communications au transport</i> : téléconférence, télétravail, e-commerce, e-administration...
12. La contribution des transports aux <i>aménités urbaines</i> : villes sans voiture, promotion des modes « doux » (vélos électriques...), occupation des espaces publics.	17. <i>Le découplage entre croissance et mobilité des voyageurs</i> par un meilleur aménagement des villes, des territoires et des temps de travail et de loisirs, et par des actions sur les comportements.
13. La <i>protection des espaces écologiquement sensibles</i> et l'insertion dans l'environnement des infrastructures, aéroports, plates-formes logistiques, zones portuaires...	
III. Adaptation des transports aux nouveaux demandes sociales et actions sur les comportements	
18. Une <i>meilleure anticipation et gestion de la demande globale</i> de mobilité et de moyens de transport : <i>hausse des capacités</i> , réactivité plus grande aux cycles de croissance, meilleure prévision des trafics, « business models » mieux étudiés...	22. L'adaptation des <i>services locaux de transport</i> aux évolutions des comportements de mobilité et à la « <i>régionalisation</i> » des déplacements : maîtrise des coûts, nouveaux horaires, offre de « transports à la demande », modernisation des matériels, intermodalité, services innovants...
19. L'adaptation de l'offre <i>aux demandes</i> et clientèles <i>spécifiques</i> : « customisation », flexibilité des unités de production, ségmentation des marchés, développement de véhicules « spécifiquement urbains »...	23. L'amélioration du <i>confort</i> et des <i>conditions de vie</i> dans les transports : congestion, stress, insécurité, entassement...
20. La prise en compte des besoins des <i>populations vieillissantes, vulnérables ou handicapées</i> .	24. Le développement des <i>véhicules « intelligents »</i> et « <i>communicants</i> » et l'accès des usagers aux technologies de la communication et à l'information. Couplage avec l'Internet et la téléphonie mobile, acceptabilité des nouvelles technologies...
21. La <i>réduction des inégalités d'accès aux transports et la prévention des exclusions</i> : <i>baisse des coûts</i> , aides à la mobilité des chômeurs ou exclus, anticipation des effets sociaux des politiques de transport.	25. L'amélioration de la <i>sécurité dans les transports</i> : baisse des accidents et de la mortalité, réduction des vitesses, nouveau « paradigme » (objectif « zéro mort »).

Tableau n° 18 : Suite

IV. Amélioration et restructuration de l'offre de transports	
26. Le développement de l' <i>intermodalité</i> et de l'information intermodale. L'innovation dans les interfaces entre modes (plates-formes, lieux d'échange...).	31. L'accroissement des capacités, des performances et de la vitesse des <i>transports maritimes</i> et par voie navigable.
27. L'application des <i>NTIC</i> et de <i>GALILEO</i> à la gestion « intelligente » de la mobilité : routes et infrastructures intelligentes, surveillance aérienne et maritime, optimisation des trafics, aides à la navigation, identification et positionnement des mobiles, dispositifs anti-collision.	32. Un <i>changement de paradigme et de nouvelles techniques pour le transport aérien du futur</i> .
28. La <i>modernisation des « chaînes logistiques »</i> (notamment grâce aux <i>NTIC</i> et à la traçabilité des marchandises).	33. Un accroissement de 50 % de la <i>productivité du transport ferroviaire de fret</i> : « TGV fret », réseaux dédiés, autoroute ferroviaire, grands corridors européens de fret...
29. L'organisation des <i>transports de marchandises en ville</i> et de la logistique urbaine	34. Une <i>nouvelle génération de transports ferrés rapides ou de transports guidés automatiques</i> : « TGV » à 350-400 km/h, véhicules guidés urbains à grande vitesse...
30. La conception et la mise sur le marché du « <i>camion du futur</i> » (moins polluant, plus lourd...).	35. Le développement de l' <i>autodiagnostic</i> ou de « <i>l'autoréparation</i> » des véhicules et des infrastructures : vers des transports sans « panne » et peu coûteux en entretien.
V. Gouvernance, tarification et financements	
36. La conception et la mise en œuvre de solutions adaptées pour le <i>financement des transports</i> : incitations efficaces, ressources affectées, partenariats public-privé, péages...	39. L'amélioration des <i>modes de gouvernance</i> : outils d'aides à la décision, articulation des échelles de gouvernance, intégration européenne, contrôles réglementaires, assurances...
37. L'harmonisation et l'optimisation des <i>politiques tarifaires et fiscales</i> favorisant un <i>rééquilibrage modal</i> et une réduction de la congestion : internalisation des coûts externes, péages, fiscalité cohérente des carburants...	40. La <i>démocratisation des décisions</i> et la pluralité de l'expertise : participation du public aux décisions, démocratisation de l'information et des procédures, transparence des résultats...
38. La prise en compte des intérêts européens dans les <i>politiques internationales de normalisation de concurrence</i> , ou de régulation des services publics : ouverture des marchés (OMC...), standards, normes techniques, normes sociales...	

VI. CONCLUSION :

QUELS ENJEUX POUR LES TRANSPORTS À L'HORIZON 2030-2050 ?

On peut résumer les messages-clefs de cette troisième partie sous la forme d'une liste d'enjeux pour le transport à l'horizon 2030-2050. C'est ce que fait le **tableau n° 18**.

Parmi ces enjeux, certains se situent manifestement dans la **continuité** des évolutions et des objectifs qui sont traditionnellement ou depuis quelques décennies ceux du transport (confort, sécurité, vitesse, adaptation à la demande des usagers, anti-pollution, réduction du bruit, etc.). *D'autres marquent au contraire une véritable rupture.*

Le risque le plus évident de rupture est sans aucun doute celui lié à **l'énergie et à l'effet de serre** : tous les experts s'accordent pour en faire l'enjeu majeur pour les transports à l'horizon 2050⁹⁴. Mais ce n'est pas le seul.

Les travaux de prospective résumés dans les pages précédentes conduisent à en évoquer **cinq autres** :

– le **changement d'échelle** : passage de la ville à la « région urbaine » ; des pays à l'Europe ; et de l'Europe des 15 à l'Europe des 30 et à l'ensemble du monde (et notamment à l'Asie) ;

– la **maîtrise de la complexité et des contradictions « systémiques »**, symbolisées par des mots-clefs comme « l'intermodalité », « l'interopérabilité », la « mécatronique », le « multiplexage », la « connectivité », la « compatibilité sécurité-poids-confort-efficacité énergétique », le « groupware », la « vulnérabilité systémique », le « conflit automatisation-autonomie », la « gouvernance » ... ;

– **l'intégration des transports dans la société de la communication et de l'informatique généralisée**, avec à terme comme éventuelle perspective, le passage à des systèmes de transport en grande partie automatisés ;

– la **stabilité des modèles économiques** sur lesquels reposent les activités de transport, avec comme défi la concurrence des pays du Sud ou des « low costs », la crise des financements publics, l'acceptabilité des usagers à payer pour de nouveaux services, la rentabilité des transports publics et du fret ferroviaire, le risque de surcapacité et de dumping pour le transport routier... ;

– et enfin, les **risques d'exclusion ou d'inégalités sociales** liés notamment au coût tendanciellement croissant des transports, au caractère inéquitable de l'accès à la mobilité, à la « fracture numérique », ou à l'inadaptation de l'offre par rapport aux besoins de certaines populations spécifiques (personnes très âgées, handicapés, populations isolées...).

Si l'on combine l'ensemble de ces ruptures possibles, on conçoit que les transports vont être confrontés à un problème majeur de durabilité à long terme.

Dans quelle mesure et à quelle condition la recherche et la technologie, *qui vont être fortement sollicitées*, pourront contribuer à apporter *en temps utile* des solutions à ce défi du « développement durable » des transports à l'échelle européenne ?

C'est ce qui sera discuté dans les deux parties suivantes.

ou énergies fossiles décarbonées associées au stockage du CO₂.

⁹⁴ Voir notamment, en France les résultats de la consultation prospective « Agora 2020 », lancé en 2003 par le ministère de

Quatrième partie

**QUELS ENJEUX TECHNOLOGIQUES
MAJEURS À MOYEN
ET LONG TERME :
ÉLÉMENTS DE HIÉRARCHISATION**

PARTIE IV :

QUELS ENJEUX TECHNOLOGIQUES MAJEURS À MOYEN ET LONG TERME : ÉLÉMENTS DE HIÉRARCHISATION

Sur la base des trois parties précédentes, il est possible de proposer à la fois une liste des technologies susceptibles d'être développées dans les années à venir par grand champ de domaine des transports, et des éléments de hiérarchisation correspondant aux enjeux prioritaires à long terme, mis en évidence en conclusion de l'analyse prospective.

C'est ce à quoi s'attache cette quatrième et avant-dernière partie qui comprend deux grands volets :

– en premier lieu, une *approche globale de l'ensemble des technologies « prometteuses »*, avec un essai de hiérarchisation et un éclairage spécifique sur les « technologies de rupture » ;

– et ensuite, des analyses plus spécifiques portant d'une part, sur le champ « *environnement-énergie* » et de l'autre, sur les *nouvelles technologies de l'information et de la communication*.

I. QUELLES TECHNOLOGIES POUR LE FUTUR ? UN INVENTAIRE ET QUELQUES PROPOSITIONS DE PRIORITÉS

Le constat qui se dégage des plateformes technologiques ou des exercices de *foresight* réalisés sur le champ des transports est celui d'une très grande profusion des technologies susceptibles d'être développés dans le futur – qui concernent à la fois tous les modes, tout le « cycle de vie » des produits (depuis la fabrication jusqu'au recyclage) et toutes les finalités (compétitivité, environnement, sécurité, confort...). Encore faut-il ajouter que ces perspectives technologiques n'intègrent pas – ou intègrent peu – les retombées attendues de progrès futurs dans les *technologies « génériques »* : nanotechnologies, biotechnologies, technologies de la communication de nouvelle génération, robotique, etc. Or, à l'horizon 2030, ces retombées seront sans doute considérables et il faut pouvoir les anticiper dans les priorités futures de recherche.

A. Inventaire des technologies envisageables

Prenant appui sur les plateformes technologiques, le **tableau n° 19** propose une classification des technologies ou innovations susceptibles d'être développées dans le domaine des transports à l'horizon 2020-2030 en les structurant autour de deux dimensions :

– les *composantes du système de transport concernées* (fabrication, système de propulsion, équipements, structures, infrastructures, usages...);

– les *finalités recherchées* (performances, gestion de la mobilité, environnement, sécurité et sûreté, satisfaction des usagers).

Tableau n° 19 : Les besoins et perspectives technologiques par domaine d'ici 2030

Finalités	Système productif	Moteurs, productions, carburants	Equipements et électronique	Concepts et structures	Infrastructures et réseaux	Conduite et usages
I. Performances techniques et économiques (vitesse, capacité, puissance, coût...)	<ul style="list-style-type: none"> Automatisation et robotisation. Nouvelles techniques d'aide à la conception. Knowledge management groupware. Prototypage virtuel et rapide. Modularisation. Nouvelles techniques d'assemblage/soudage/collage... Contrôle de qualité « zéro défaut ». 	<ul style="list-style-type: none"> Nouvelles propulsions : moteurs à plasma, électromagnétisme... Nouvelles technologies de traction électrique, convertisseurs de puissance. Moteurs thermiques plus puissants. Full scale annular combustion (avions). 	<ul style="list-style-type: none"> Nouvelles architectures électriques et électroniques. Mécatronique. Transmission sans fil (camless). Multiplexage. Electronique de puissance. Moteurs 42 volts (voiture). Systèmes d'attelage électroniques (trains). 	<ul style="list-style-type: none"> Nouveaux concepts d'avion : Tritolator, aile volante, avion supersonique, cargo géant... Technologies pour navires « complexes ». Fast ferries, techno superliner, fast boats. Trains rapides (Maglev, TGV 350 km/h). TGV Fret. Trains de marchandises 1500 T. Nouveaux matériaux composites, matériaux structuraux, nanomatériaux... Structures modulaires transformables. Nouveaux revêtements (ultra thin coating...). 	<ul style="list-style-type: none"> Matériaux pour les infrastructures à faible coût de maintenance. Nouvelles techniques en génie civil plus performantes. Smart pavements. Infrastructures « offshore » (ports, aéroports...). 	<ul style="list-style-type: none"> Véhicules et matériels à faible coût d'achat. Véhicules et matériels sans coût d'entretien. Produits « modulables » (« Kits »).
II. Mobilité, intermodalité, interopérabilité	<ul style="list-style-type: none"> Véhicules transformables et modularisables. Déclouisonnement des filières de production par mode (valorisation « intermodale » des technologies). Techniques nouvelles de production des données météo, géographiques ou de trafic... 	<ul style="list-style-type: none"> Compatibilité intermodale des moteurs et carburants (exemple des piles à combustible...). 	<ul style="list-style-type: none"> Interopérabilité ou standardisation des équipements électriques et électroniques. Techniques électroniques d'attelage. 	<ul style="list-style-type: none"> Nouveaux transports guidés (dont : transports urbains). Véhicules « intermodaux » - TTRM Tains, hydroptères. Techniques d'interface entre modes : plates-formes intermodales, pôles d'échange optimisés, techniques efficaces de transbordement, interfaces camions/trains/navires... Transport par container. Camions 60 T. Trains 1500 T. 	<ul style="list-style-type: none"> Interopérabilité des réseaux. Outils de simulation de trafic. Techniques d'identification des véhicules (puces...). Systèmes de péage électronique. Techniques de surveillance et de gestion du trafic : surveillance aérienne, cargo tracking systems, european rail traffic management... Techniques de gestion de « convois » : camions, trains, navires. Routes intelligentes. Routes automatisées. Voies dédiées fret-autoroutes ferroviaires. 	<ul style="list-style-type: none"> Technique de positionnement des véhicules par satellite (GALILEO). Techniques d'identification des marchandises (RFID). Systèmes d'échange, de transmission et de traitement des données et informations, Data mining, Data link, wi-fi, téléphone mobile, Internet... Systèmes d'aide à la navigation. « Free flight runway independant aircraft ». Auto-séparation des trajectoires aériennes. NTIC et supply chain management (logistique). Nouvelles techniques de signalisation.
Finalités	Système productif	Moteurs, productions, carburants	Equipements et électronique	Concepts et structures	Infrastructures et réseaux	Conduite et usages
III. Environnement et énergie	<ul style="list-style-type: none"> Processus de production « propres ». Techniques de récupération et recyclage des déchets par filière de production. 	<ul style="list-style-type: none"> Moteurs à combustion interne plus économes : downsizing, combustion homogène. Nouvelles batteries. Moteurs hybrides à bas coût. Piles à combustible (membranes, équipements, accessoires...). Energies fossiles alternatives au pétrole (gaz, charbon liquéfié...). Biocarburants. Techniques de stockage de l'énergie : volants d'inertie, supercapacités... Moteurs silencieux. Filtres à particule. Nouveaux catalyseurs et de post-traitement anti-pollution. 	<ul style="list-style-type: none"> Systèmes d'allumage économes. Systèmes de climatisation économes. Intégration des systèmes électroniques et électriques (efficacité énergétique, baisse de poids...). Systèmes d'atténuation et de masque pour le bruit (piezzo électricité...). 	<ul style="list-style-type: none"> Véhicules électriques. Petits véhicules urbains « 3 litres ». « Camion du futur » (économe et non polluant). Avions gros porteurs plus économes (A 380...). Camions 60 T. Véhicules plus légers Nouveaux matériaux plus légers, composites, polymères... Véhicules et navires recyclables à 95 %. 	<ul style="list-style-type: none"> Infrastructures enterrées (« swissmetro »). Revêtements routiers limitant le bruit de roulement. Techniques de simulation et de visualisation des impacts sur l'environnement. Péages électroniques. 	<ul style="list-style-type: none"> Décloupage croissance/environnement : transfert modal... Conduite économe : boîtes de vitesse automatique, limiteurs de vitesse, moteurs brisés... Techniques de « suivi » des véhicules (puces + satellites). Information en continue des consommateurs et usagers sur leurs impacts énergétiques et écologiques.
IV. Sécurité, sûreté, fiabilité	<ul style="list-style-type: none"> Simulateurs de vol ou de conduite. Sécurité des sites et usines de production. Robotisation des postes de travail dangereux, sécurifié du travail. 	<ul style="list-style-type: none"> Sécurité des moteurs (hydrogène, gaz, ...). Sécurité des réseaux d'approvisionnement en énergie et de stockage. Autodiagnostic des moteurs. 	<ul style="list-style-type: none"> Nouveaux radars. Nouvelles techniques de freinage (freins en carbone...). Pneumatiques plus sûrs. Redondance des systèmes électriques et électroniques. Compatibilité électromagnétique des systèmes. Sécurité des systèmes d'assistance à la conduite. Techniques de pilotage automatique. 	<ul style="list-style-type: none"> Sécurité passive, véhicules intrinsèquement sûrs. Navires insubmersibles. Sécurité du matériel de transport des matières dangereuses Autodiagnostic des véhicules, nouvelles techniques de capteurs. Autoréparation des véhicules, véhicules sans panne. 	<ul style="list-style-type: none"> Vision « zéro » en sécurité routière, sécurité intrinsèque des infrastructures. Techniques d'autoséparation des trajectoires aériennes. Techniques d'identification des conducteurs et véhicules (radars...). Route automatique. Route intelligente. Gestion des convois de véhicules (rail, ...). Transports guidés. Sécurité des tunnels. Sécurité des aéroports. 	<ul style="list-style-type: none"> Systèmes de visibilité tout temps, visibilité virtuelle, cockpit vision. Conduite automatisée. Limiteurs de vitesse. Aides à la conduite. Systèmes anticollision, ou de maintien des distances. Autoséparation des avions « free flight ». « Avionics ». Ergonomie des interfaces homme-machine. Détecteurs d'incapacité temporaires. Boîtes noires. Identification des personnes.
V. Confort, usage, attentes sociales	<ul style="list-style-type: none"> Véhicule individuel livré en « 5 jours ». Customisation de la production de véhicules (circuit court consommateur/usine). Usines « flexibles ». Stratégies de niche (véhicules « expérimentaux »). 	<ul style="list-style-type: none"> Moteurs et véhicules silencieux. Systèmes d'alimentation en carburant faciles d'utilisation. 	<ul style="list-style-type: none"> Boîtes automatiques, aides à la conduite. Véhicules sans fil (Camless). Tableaux de bord « conviviaux et lisibles ». Véhicules sans panne et entretien (ou pièce de rechange standardisées). 	<ul style="list-style-type: none"> Véhicules adaptés et accessibles pour des populations vulnérables (personnes âgées, handicapées, enfants...). Transports urbains innovants (véhicules partagés...). Petits véhicules individuels peu coûteux (vélos électriques...). Véhicules et moyens de transport plus confortables. 	<ul style="list-style-type: none"> Infrastructures « lisibles » (signalisation...). Desserte rapide des aéroports (transports guidés). Nouveaux systèmes de transports « hectométriques » (trotoirs roulants...). Séparation des voies de circulation (ou techniques efficaces de partage de la voirie). 	<ul style="list-style-type: none"> Transport et véhicules à bas coûts. Techniques de reconnaissance de la parole. Véhicules « communicants », accès à Internet, à la téléphonie mobile, à l'information. Information multimodale « ouverte » (« seamless »). Monétique et billettique – transaction électroniques. Systèmes de réservation efficaces et conviviaux. Conduite facile et convivialité des aides techniques à la conduite.

On arrive ainsi à une **liste d'environ 150 « thèmes technologiques » différenciés**⁹⁵. Il est important de noter que cette liste *n'inclut pas les recherches qui pourraient être menées dans le champ de la socio-économie des transports* (ou plus généralement des sciences sociales), *ni de la connaissance des impacts des transports sur l'environnement ou la santé*.

□ Dans cet ensemble, à peine **10 % concerne des « technologies de rupture »**. Il s'agit notamment :

- de la pile à combustible et de l'utilisation de l'hydrogène ;
- des biocarburants de seconde génération ;
- des moteurs à plasma ;
- des transports à sustentation magnétique⁹⁶ ;
- des « nouveaux » concepts d'avion (ailes volantes, avions commerciaux supersoniques de seconde génération) ;
- des applications avancées de la « mécatronique » ;
- de la « vision zéro » en sécurité routière ;
- des techniques avancées de navigation aérienne (« free flight », auto-séparation des trajectoires, vols totalement automatiques...) ;
- des systèmes de « masquage » du bruit (piezoélectricité...) ;
- ou enfin, des nouvelles techniques de stockage de l'énergie (volants d'inertie, supercapacités, nouvelles batteries...).

De fait, une part essentielle des innovations à venir dans les transports viendra plutôt de la combinaison – pour une finalité bien définie – de technologies « incrémentales ».

B. Une proposition de hiérarchisation

Pour hiérarchiser l'ensemble des 150 « thèmes technologiques » précédents, ils faudrait, *dans l'idéal*, faire une *double analyse multicritères* en s'attachant d'abord à classer les enjeux à long terme pour les transports (voir la partie III), puis en croisant ces enjeux prioritaires avec des paramètres relatifs à l'offre technologique européenne (atouts, contraintes, compétitivité...).

En l'absence d'une telle analyse systématique, **il est proposé de retenir un nombre restreint (25) de Technologies-clés remplissant trois conditions essentielles :**

- leur importance pour la future politique européenne de transport telle que définie dans le « Livre blanc » ;
- leur caractère considéré comme stratégique par les différentes plateformes technologiques (voir la partie III) ;
- et enfin, leur intérêt par rapport aux enjeux prospectifs évalués dans la partie III.

En combinant ces trois critères, on aboutit à la liste des 25 Technologies-clés suivantes :

1. La *pile à combustible* et l'utilisation de l'*hydrogène*.
2. Les systèmes avancés de *stockage de l'énergie* : nouvelles batteries, volants d'inertie, supercapacités...
3. Les *biocarburants* de seconde génération.
4. Les moteurs *hybrides rechargeables*.
5. Les *nouveaux matériaux* (composites, nanomatériaux...) et l'allègement des véhicules.
6. Les techniques de *recyclage* et de *démantèlement* des véhicules et de leurs composants. La modularisation et l'interchangeabilité des matériels de transport. La conception d'infrastructures économes en matériaux et à faible coût de maintenance.
7. Les nouveaux *catalyseurs* et systèmes avancés de traitement des polluants (y compris : polluants non réglementés).
8. Les techniques d'atténuation et de « masquage » du *bruit* (bruits de propulsion, de roulement, ...).
9. L'intégration et le développement de nouvelles architectures électriques et électroniques. La *mécatronique* et l'*électronique* de *moyenne puissance*.
10. La *compatibilité électromagnétique* des équipements et signaux.
11. Les nouvelles techniques d'*identification*, *positionnement*, *surveillance* et *navigation* des véhicules et leur utilisation dans la gestion du trafic. Les applications de *GALILEO*.

l'Équipement, du Logement et des Transports (CPVS-DRAST).

⁹⁵ Il s'agit plus de champs de préoccupation technologiques que de technologies spécifiques dont l'inventaire serait trop fastidieux (par exemple pour les carburants alternatifs, des dizaines de technologies sont concernées...).

12. L'utilisation des nouvelles technologies de l'information et de la communication et des techniques RFID dans l'optimisation des « chaînes logistiques ».

13. L'interopérabilité et l'optimisation des réseaux de chemin de fer (ERTMS de 3^{ème} génération, « route roulante », gestion des convois...).

14. Les systèmes avancés de navigation et de surveillance du trafic aérien (« free flight », autoréparation des trajectoires, visibilité tout temps, nouveaux systèmes de pilotage automatique...).

15. Les systèmes d'aide à la conduite (véhicules individuels et routiers) et l'ergonomie des interfaces hommes-machines (ou des interfaces entre modes).

16. Les techniques d'interface entre modes ou « multimodes » (dont techniques d'information intermodales et modularisation).

17. La fiabilité et la résilience des systèmes complexes de transport face aux risques de vulnérabilité et de crise.

18. Le développement des capteurs intelligents et leur application à l'autodiagnostic et l'autoréparation des véhicules.

19. Les trains du futur : nouvelles techniques de motorisation, interfaces rail-roue plus performantes, locomotive multicourant, intégration des NTIC...

20. Les nouveaux concepts et paradigmes pour le transport aérien.

21. Les nouvelles motorisations et nouveaux concepts pour les navires complexes.

22. La conception et la mise sur le marché de véhicules spécifiquement urbains (guidés ou pas).

23. La conception de véhicules et systèmes de transport accessibles aux personnes à mobilité réduite (personnes âgées, handicapées...).

24. Le camion du futur (non polluant, communicant, compatible avec les autres modes...).

25. De nouvelles techniques de conception et de production pour une fabrication moins coûteuse et plus flexibles (prototypage rapide, automatisation...).

Un tiers de ces technologies concerne l'environnement et l'économie des ressources rares, un cinquième la gestion de la mobilité, le reste se partage entre l'électronique embarquée, les nouveaux concepts de véhicules, la productivité des processus de production et la gestion de systèmes complexes.

Cette hiérarchisation ne prend pas directement en compte les impacts possibles à long terme des technologies génériques (nanotechnologies, biotechnologies) ... qui devraient faire l'objet d'une approche spécifique.

C. L'impact des technologies génériques sur les transports

Dans un exercice sur les « Technologies-clés » du futur, il est impossible de ne pas tenir compte des conséquences que les technologies génériques – nanotechnologies, biotechnologies... – auront nécessairement sur les transports. C'est ce qui a conduit récemment le ministère de la Recherche allemand à lancer un programme, largement ouvert, intitulé « Nanomobil »⁹⁷, ou le « National Science and Technology Council » américain à consacrer une partie importante de sa stratégie de recherche sur les transports aux « technologies de rupture » liées aux innovations génériques.

Trois grandes catégories de ruptures « technologiques ou scientifiques » semblent ainsi devoir avoir un impact important sur l'innovation dans les transports : les nanotechnologies, les biotechnologies et les scénarios de la complexité.

• Les applications possibles des nanotechnologies, sur le champ des transports apparaissent a priori considérables. Les experts citent notamment :

- l'utilisation de matériaux nanostructurés comme catalyseurs ;
- le stockage de l'hydrogène ;
- la fabrication de piles à combustibles « portables » ;
- le développement de surfaces ou de vitres autonettoyantes ;

96 Nouvelle génération du Maglev. Cela inclut les projets de type « Swisstrom ».

97 Source : Geschäftsbereich NMT, For-

- l'invention de nouveaux matériaux composites plus solides et légers ;
- les systèmes de régulation de l'éclairage ;
- les capteurs intelligents ;
- l'optimisation de la combustion ;
- la lutte contre la corrosion ;
- l'autoréparation des véhicules ;
- la résistance au feu ;
- une nouvelle génération de pneumatiques ;
- ...

Comme pour l'ensemble des nanotechnologies on manque malheureusement aujourd'hui d'évaluations précises qui permettraient de hiérarchiser toutes ces virtualités.

- Même si elles sont beaucoup moins souvent évoquées, les **biotechnologies** pourraient aussi apporter des solutions techniques intéressantes, notamment dans le domaine des *biocarburants*. On sait qu'en termes d'émission de gaz à effet de serre, les biocarburants issus des fractions ligneuses des végétaux ou du bois sont particulièrement intéressants. Le problème est qu'aujourd'hui, les processus de transformation en liquide de ces fractions ligneuses sont économiquement peu rentables. De nou-

velles techniques de conversion thermique et biologique issues des biotechnologies pourraient améliorer sensiblement « l'économie » de ces nouveaux carburants. On peut imaginer également que les biotechnologies permettront de réduire les surfaces nécessaires pour produire et mettre en culture cette biomasse. Au plus long terme, on évoque également leur contribution à de nouveaux procédés de production de l'hydrogène à partir des algues marines.

- Enfin, il faut s'attendre à ce que le développement des **sciences cognitives et des sciences de la complexité** joue un rôle croissant dans le fonctionnement de systèmes de transport de plus en plus intelligents, sophistiqués, interconnectés – et donc fragiles et vulnérables. L'intelligence artificielle répartie et la « cyndinique »⁹⁸ pourraient être demain aussi indispensables aux transports que ne le sont aujourd'hui les technologies de la communication.

Les futurs programmes de recherche sur les transports devront tenir compte des potentialités liées à ces différentes technologies génériques en commençant par en faire une évaluation précise – qui, aujourd'hui, n'existe pas en Europe.

shungzentrum, Julich GMBH et BMBF,

II. UN ENJEU MAJEUR : LES TECHNOLOGIES ÉNERGÉTIQUES ET DE RÉDUCTION DE L'EFFET DE SERRE

Il n'est pas étonnant de constater que **parmi la vingtaine de technologies considérées comme clefs dans le domaine des transports, plus du tiers concernent l'environnement, l'énergie et l'effet de serre.** Dans une très large mesure, les grandes évolutions technologiques attendues dans ce secteur seront en effet surdéterminées par les options qui seront prises pour anticiper la raréfaction du pétrole ou le risque de changement climatique – et ceci malgré l'importance d'autres enjeux comme la compétitivité vis-à-vis des États-Unis ou de l'Asie, ou de la sécurité.

La difficulté est qu'en l'état actuel des connaissances (et des incertitudes), il n'est pas possible de privilégier une solution unique, une technologie « dominante », qui permettrait de répondre simultanément aux grands enjeux énergétiques et écologiques auxquels les transports vont devoir faire face d'ici 2030-2050 : nous entrons dans une phase de transition pendant laquelle il va falloir nécessairement explorer plusieurs voies concurrentes de recherche et d'innovation ce qui naturellement, complique la détermination et le choix de « Technologies-clés ».

Comme on le verra, certaines de ces voies d'innovation se situent délibérément dans la continuité des systèmes et des techniques existants, d'autres au contraire privilégient la rupture.

A. Stratégies de continuité ou stratégie de rupture ?

Face aux problèmes posés par l'effet de serre et le risque de pénurie de pétrole, « l'Agenda » que se sont fixés les Européens est, il faut le rappeler, extrêmement contraignant pour les transports à la fois à court terme et à long terme.

À court terme (2010-2012), il s'agira à la fois :

– de baisser de 8 % les émissions de gaz à effet de serre par rapport à

1990 (application du protocole de Kyoto) ;

– de réduire à 140 grammes par km (en 2008) puis 120 grammes (en 2012) les émissions de CO₂ des voitures particulières (engagement des constructeurs européens d'automobiles) ;

– d'introduire – à hauteur de 5,75 % l'usage des biocarburants (directive de 2003) ;

– de passer à une nouvelle génération de normes anti-pollution particulièrement rigoureuses pour les véhicules diesel (EURO V).

À plus long terme, la perspective affichée est celle d'une réduction par un facteur 3 à 4 des gaz à effet de serre et de la consommation de pétrole des transports – ce qui correspond à une consommation moyenne de moins de 3 litres au 100 pour les voitures particulières et suppose des réductions extrêmement fortes pour les poids lourds ou les avions. Cela impliquera comme objectif intermédiaire l'utilisation en 2020 d'au moins 20 % de carburants alternatifs (gaz, biocarburants, électricité)⁹⁹.

Comme le montre le schéma n° 7, on voit aujourd'hui très clairement se dessiner deux « sentiers technologiques alternatifs » susceptibles de répondre à cet agenda très ambitieux.

■ Une première voie privilégie la continuité et l'utilisation des réseaux existants de carburants et d'infrastructures. Elle articule :

– des moteurs à combustion interne plus efficaces (combustion homogène, downsizing, injection directe, etc.) ;

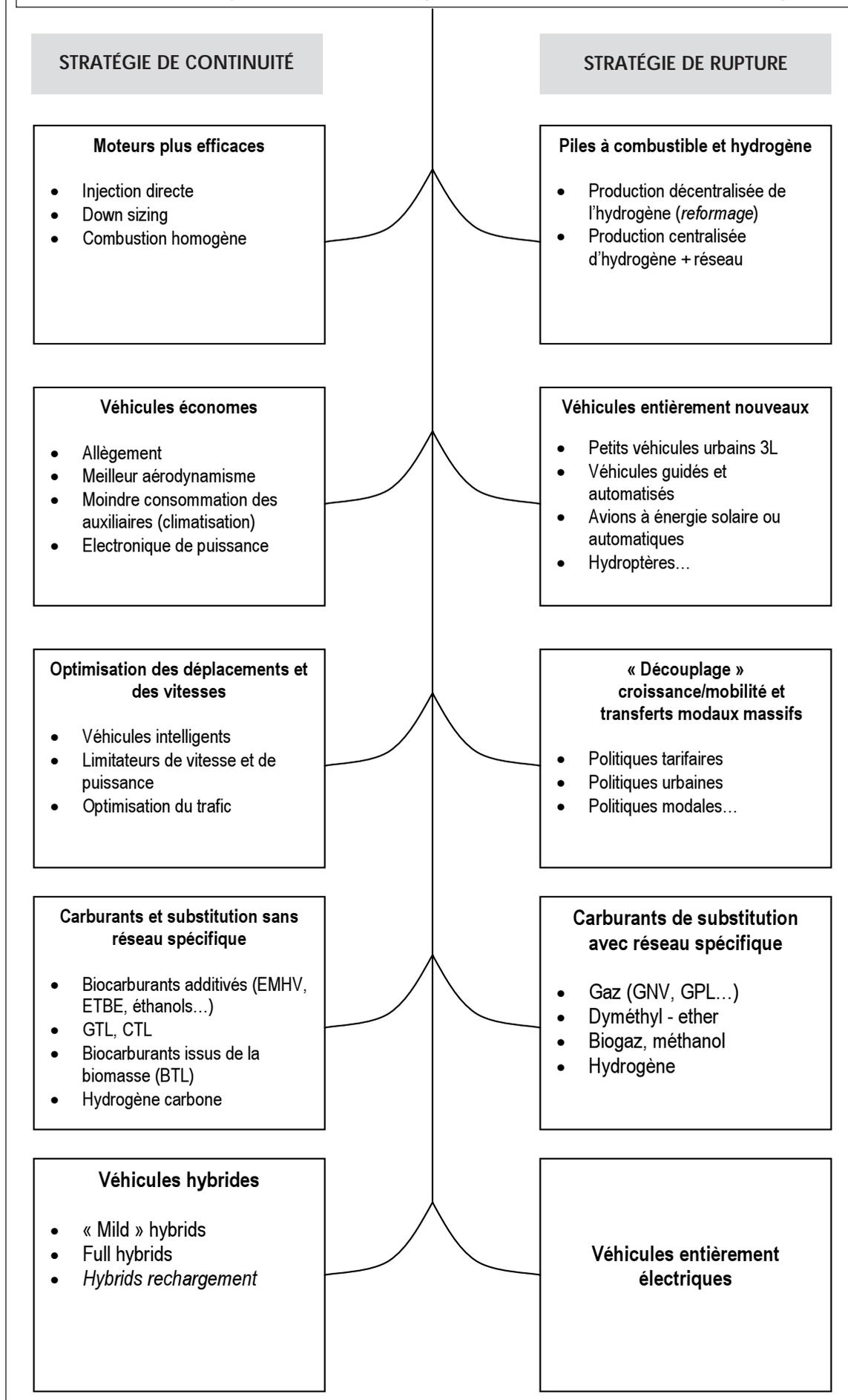
– des véhicules plus légers et économes en énergie (réduction de la consommation des auxiliaires, nouveaux matériaux, meilleur aérodynamisme...) ;

– une optimisation des trafics (régulation des vitesses, réduction de la congestion...) ;

– l'usage de carburants alternatifs de « seconde génération » avec les

2005.
98 Science des risques.

Schéma n° 7 : Deux stratégies de réduction des risques liés à l'effet de serre à la raréfaction du pétrole



réseaux de distribution existants (biocarburants, CTL, BTL, GTL...);

– et enfin, les véhicules hybrides et notamment les *hybrides rechargeables*.

■ **À cette stratégie de continuité s'opposent ceux qui considèrent qu'un basculement vers des « technologies ou solutions de rupture » est indispensable** pour éviter à long terme les risques d'impasses énergétiques ou écologiques.

On peut classer dans ces technologies ou solutions de « rupture » (voir également le schéma) :

– la *pile à combustible* et l'*utilisation de l'hydrogène* ;

– le recours à des véhicules *entièrement nouveaux* (petits véhicules urbains consommant moins de trois litres, véhicules guidés et automatisés, avions fonctionnant au solaire...);

– une *réduction de la mobilité* des véhicules utilisant du pétrole (découplage entre croissance et mobilité, transferts modaux massifs...);

– l'*usage de carburants alternatifs nécessitant leurs propres réseaux de distribution* (GPL, GNV, Dyméthyl éther, hydrogène, méthanol...);

– et enfin, les *véhicules entièrement électriques*.

■ Ces deux stratégies ne sont naturellement pas exclusives l'une de l'autre. Mais il est clair qu'elles correspondent à deux visions radicalement différentes de l'évolution future des transports – et donc des technologies correspondantes. *Le problème est qu'aucune d'entre elles prise isolément ne semble a priori à même de répondre efficacement aux défis à long terme de l'effet de serre et de la raréfaction du pétrole*. C'est ce que l'on constate lorsque l'on évalue de manière plus précise les gains attendus ou les verrous technologiques et socio-économiques liés à chaque « technique » proposée.

□ *En étant extrêmement schématique, on peut en effet différencier trois grands groupes de solutions et de techniques :*

• Un premier groupe correspond à des solutions qui sont potentiellement

efficaces en termes d'effet de serre mais dont le marché semble – pour différentes raisons – devoir rester limité. Se classent dans cette première catégorie le véhicule électrique (autonomie limitée)¹⁰⁰, les véhicules de « niche » (petites voitures urbaines, hydroptères, monorails...), les carburants gazeux (gaz de pétrole liquéfié, gaz naturel de véhicule)¹⁰¹, et les carburants « additivés » (esters méthyliques d'huiles végétales – EMHV – éthanol et ETBE). Il faut noter, cependant, que le rôle potentiel de ces derniers est controversé¹⁰².

• Un deuxième groupe de « solutions » rassemble tout un ensemble d'innovations « incrémentales » susceptibles d'améliorer globalement la performance énergétique des transports, mais dont la contribution spécifique devrait pour des raisons diverses rester limitée. À titre d'illustration, on rappellera les limites suivantes :

– les gains à attendre d'une *motorisation plus efficace* (combustion HCCI ou CAI...) ne devraient pas dépasser 5 à 10 % pour le diesel, 10 à 15 % pour l'essence ;

– les avantages liés à la « *dieselisation* » du parc devraient se trouver considérablement réduits par la nécessité de mettre en place des systèmes de « post traitement » des particules et oxydes d'azote financièrement et énergétiquement coûteux (application des normes euros) ;

– l'*allègement du véhicule*, potentiellement très efficace en termes d'effet de serre¹⁰³, restera, sauf innovation de rupture majeure, à la fois coûteux, techniquement difficile et contradictoire avec les exigences de sécurité ;

– les améliorations *aérodynamiques* entreront nécessairement en contradiction avec les besoins en termes « d'habitacle » ou d'espace ;

– tout en continuant à progresser (30 à 40 % d'ici 2050), l'*efficacité énergétique des avions* aura probablement beaucoup de difficulté à compenser, comme elle a pu le faire dans le passé, la hausse du coût du kérosène, et encore plus celle des émissions de CO₂ ;

– les gains énergétiques liés à une optimisation du trafic et des modes de conduite (véhicules et infrastructures

99 Objectif affiché par la Commission européenne dans sa stratégie énergétique.

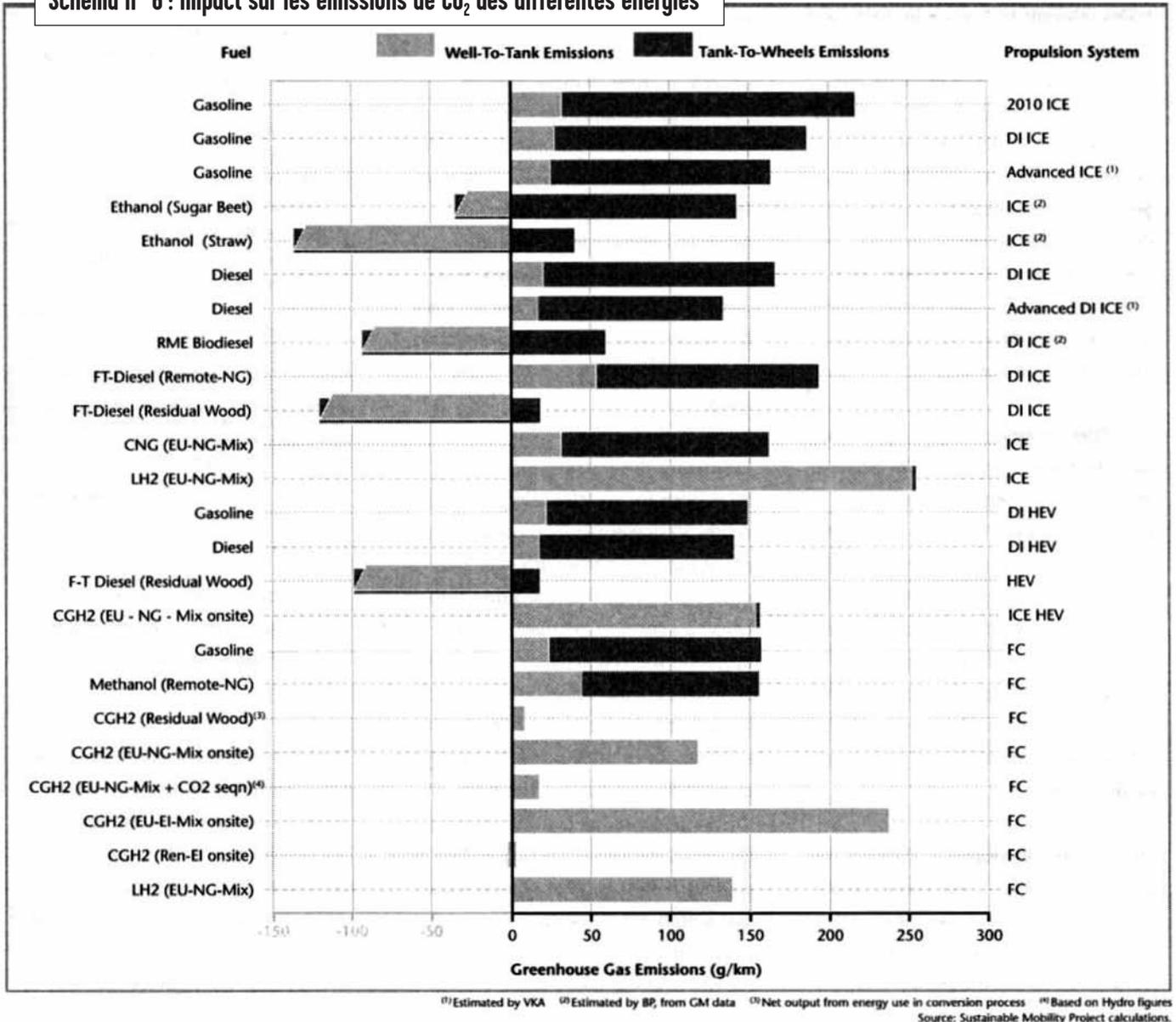
100 Même si des recherches laissent espérer à long terme une autonomie de 300 km.

101 L'usage du GPL pourrait réduire de 12 % les gaz à effet de serre, celui du GNV de 22 %. Mais l'un et l'autre présentent plusieurs inconvénients : disponibilité de la ressource (le GPL est un sous-produit du raffinage du pétrole), nécessité des réservoirs et réseaux spécifiques, problèmes de sécurité... et finalement rareté à long terme du gaz (GNV).

102 En termes d'effet de serre, les gains estimés varient de quelques pourcents (1 à 3 %) à 50 % selon ce qu'on inclut ou pas dans le bilan. Les biocarburants de « premières génération » ont en outre beaucoup d'inconvénients : leur coût (deux à trois fois le coût de l'essence), leur faible contenu énergétique (% de l'essence), leur difficulté d'usage à l'état pur, leur exigence en espace (1 ha/tep/an), et leurs impacts sur l'environnement.

103 Le gain en énergie est de 0,5 litre au

Schéma n° 8 : Impact sur les émissions de CO₂ des différentes énergies



« intelligents ») ne dépassent probablement pas 10 à 15 %.

Tout cela marque les limites des stratégies de continuité.

■ Par opposition à ces améliorations « incrémentales », un *troisième groupe de « solutions »* réunit toutes les actions et les techniques dont on peut au contraire attendre des gains très importants, à condition de lever les obstacles, également considérables, auxquels elles se heurtent nécessairement.

En s'appuyant sur les évaluations comparatives qui ont été faites aux États-Unis et en Europe – en termes d'émissions de CO₂ – sur l'ensemble de la chaîne de production et de fonctionnement des carburants et des véhicules

(« *well to wheel analysis* ») (voir schéma n° 8)¹⁰⁴, on peut faire entrer dans cette troisième et dernière catégorie les quatre technologies suivantes :

- les biocarburants issus de la biomasse ligneuse ;
- les hybrides « rechargeables » ;
- les piles à combustibles alimentées avec de l'hydrogène produit de manière centralisée ;
- et enfin, l'hydrogène carboné¹⁰⁵.

À cela s'ajoutent, naturellement, les politiques de « découplage » entre croissance et mobilité ou de transfert modal massif dont la forte efficacité a été montrée en partie III (voir le tableau n° 17).

100 km pour une réduction de poids de 100 kg.

¹⁰⁴ Source : *Well to wheels analysis of future automobile fuels and powertrains in the European context*, EUCAR, COCAWE, 2004 et WBCSD (Mobility projects).

¹⁰⁵ Produit à partir d'énergies renouvelables ou de nucléaires, « l'hydrogène carboné » est transformé en carbone « à la source » afin d'éviter les inconvénients liés au transport et au stockage d'hydrogène (combinaison d'oxyde de carbone et d'hydrogène). Source : Pierre René Bauquis, « *Quelles éner-*

Tableau n° 20 : Évaluation de la part de marché européen du véhicule automobile à hydrogène à l'horizon 2040

Régions	Périodes	Voitures		Véhicules (y compris : véhicules utilitaires)	
		1989	1997	1989	1997
Europe de l'Ouest		345	381	387	440
Europe centrale et orientale		65	98	98	140
Amérique du Nord		399	365	523	533
Japon		263	350	396	498
Asie (hors Japon)		6	14	28	48
Monde		83	90	110	130

* Chiffres basés sur une flotte de 175 millions de véhicules.

** Calcul indépendant du nombre de véhicules.

B. Trois Technologies-clés : les biocarburants issus de la biomasse, les hybrides « rechargeables » et les piles à combustible

De l'analyse précédente ressort clairement l'intérêt de *trois technologies* particulièrement prometteuses pour le futur, en termes d'économie de combustible fossile et d'effet de serre : les *biocarburants issus de la biomasse ligneuse, les moteurs hybrides rechargeables et la pile à combustible alimentée à l'hydrogène*.

En termes d'émission unitaire de gaz à effet de serre dans les transports routiers, les gains **maximaux** espérés pour ces trois technologies par rapport aux véhicules diesels ou à essence actuels sont en effet considérables : une division par 20 des émissions pour la pile à combustible¹⁰⁶, par 10 pour les biocarburants et par 2 à 4 pour les hybrides rechargeables (selon les estimations). En termes de « part de marché » pour les carburants et modes de propulsion du futur chacune a un potentiel de l'ordre du tiers du parc automobile européen en 2050, comme l'évaluent, par exemple, les experts européens pour la pile à combustible alimentée à l'hydrogène (**tableau n° 20**)¹⁰⁷.

Les piles à combustible et les biocarburants ont en outre l'avantage de pouvoir être théoriquement utilisés par tous les modes de transport (y compris l'aérien).

□ Le problème est qu'aucune de ces trois technologies n'est actuellement

mature, que toutes vont se heurter à des verrous technologiques et socio-économiques importants, qu'elles ne pourront émerger qu'au prix d'efforts de recherche continus et considérables et qu'elles ne seront mises sur le marché que si elles sont susceptibles d'avoir un développement industriel « de masse », ce qui suppose des conditions de coût et d'acceptabilité précises.

□ **L'hybridation**, dans toutes ses versions (« mild » ou « full » hybrid, hybride en série ou en parallèle, fonction « stop and start », « alternodémarrateur booster » ...) apparaît comme une *solution de transition idéale* vers des solutions alternatives à la combustion interne. D'ores et déjà, les véhicules existants sur le marché (250 000 Prius vendues fin 2004) permettent des gains en CO₂ de l'ordre de 30 à 35 % par rapports aux moteurs à essence¹⁰⁸ ; et l'on pourrait atteindre des émissions encore inférieures pour les hybrides diesels (90g de CO₂ par kilomètre).

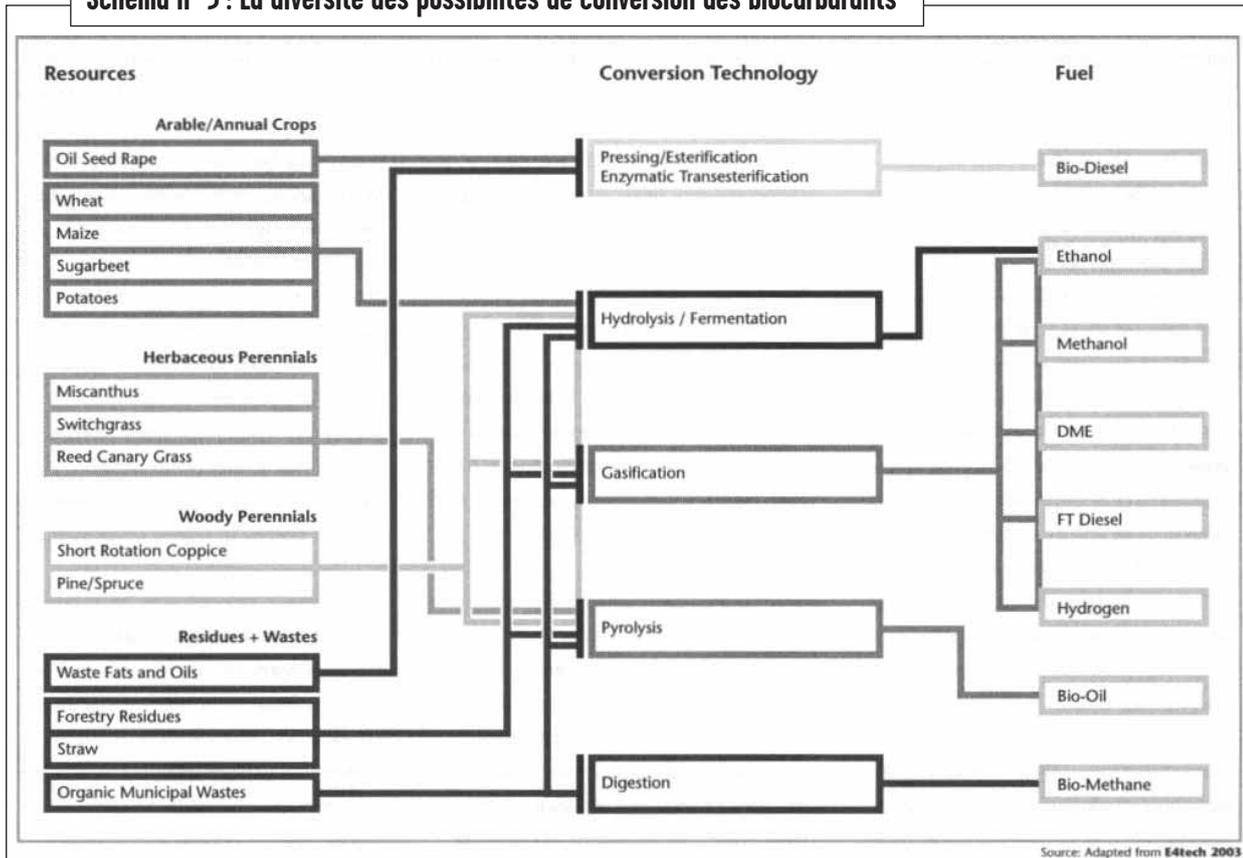
À plus long terme, une nouvelle génération d'hybrides à plus grande autonomie dite « *plug-in* » devrait permettre, grâce à des batteries supplémentaires, de faire le plein d'électricité aux heures creuses, ce qui rendrait possible (si l'électricité produit sans carbone) des gains en CO₂ compris entre 50 et 70 % (selon le degré d'autonomie des batteries – 35 km au 105). Une étude américaine faite récemment par l'EPRI¹⁰⁹ estime le surcoût de cette nouvelle génération d'hybrides à 4 200 euros

gies pour le transport au XXI^e siècle ? », IFP, Cahier de l'économie, n° 55, octobre 2004.

106 Avec de l'hydrogène comprimé issu du nucléaire.

107 Source : Commission européenne, « *Hydrogen energy an fuel cells – a vision of our future* », 2003.

Schéma n° 9 : La diversité des possibilités de conversion des biocarburants



Source : E4 TEC, 2003.

par véhicule pour une autonomie de 35 kilomètres (HEV 20) et 7 500 pour 105 kilomètres (HEV 60), mais la hausse du coût du pétrole pourrait rendre le coût d'usage final de ces véhicules très rentable.

En dehors de ces problèmes de coûts, plusieurs obstacles devraient néanmoins limiter l'efficacité globale des moteurs hybrides rechargeables : les difficultés pratiques de recharge des batteries, leur maintenance dans le temps, les problèmes de fabrication à grande distance, leur faible application aux autres modes que la voiture (transports de marchandises, transport aériens...). C'est ce qui conduit à penser qu'il s'agira surtout d'une solution de transition.

□ Beaucoup d'espoirs sont également mis sur les **biocarburants de « seconde génération »** (*biomass to liquid fuels*) obtenus à partir du bois, de la paille, ou des déchets de culture du blé, du colza ou du tournesol déjà utilisés pour produire des biocarburants « cloniques »¹¹⁰. Comme le montre le schéma n° 9 suivant, un des intérêts de ces biocarburants est

qu'ils peuvent être transformés en une grande diversité de combustibles – dont le FI diesel et l'hydrogène.

En dehors des problèmes techniques non résolus, l'utilisation de ces biocarburants de seconde génération se heurte cependant, là encore, à des obstacles considérables :

- d'abord, leur coût (2 à 3 fois le coût actuel du diesel) ;
- ensuite, l'immense complexité des filières productives à mettre en place ;
- enfin et surtout, leur exigence en termes de consommation d'espace (entre 0,6 et 1 hectare par TEP par an !).

Une estimation récemment réalisée par l'*Institute for Energy and Environment* de Berlin¹¹¹ a montré que le potentiel maximal exploitable à l'échelle de l'Europe des 30 était de l'ordre de 30 % des besoins en carburants en l'an 2000 (c'est-à-dire sensiblement moins en 2030-2050), pour un coût se situant entre 600 et 800 euros par tep. Cela supposerait que tous les déchets de biomasse et 17 % de l'espace européen dispo-

108 104 g de CO₂ par kilomètre pour la prius.
109 Source : EPRI.

110 Le BTL, combustible liquide, est issu, par une réaction de type Fisher-Tropish, à partir du gaz lui-même synthétisé à partir de la biomasse.

Tableau n° 21 : La possibilité d'utilisation de l'hydrogène dans les différents modes de transport

	CGH ₂	LH ₂	PEM	SOFC	AFC	H ₂ -ICE	H ₂ -GT	H ₂ -SIGT
Car/ van/ bus propulsion	+	+	+		Niche	+	-	-
Long-haul truck	-	(±)	+		-	(+)	-	-
Car/ van/ bus/ truck APU	(±)	(±)	+	+	-	-	-	-
Small vehicle (scooter, bike, NEV etc.)	+	-	+		(+)	+	-	-
Tramway/ regional train	+	+	+		-	(+)	-	-
Boat/ small ship	+	±	+		+	+	-	-
Large ship	-	(+)	(+)	(+)	-	+	(+)	+
Ship APU	(±)	+	+	+	(-)	(-)	(-)	-
Small airplane	(+)	+	(+)	-	-	(+)	+	-
Large airplane	-	+	(-)	-	-	-	+	-
Airplane APU	(-)	+	+	+	-	-	+	-

Source : IPTS, 2004.

nible soient mobilisés pour cet usage, ce qui est extrêmement ambitieux.

□ Pour la **pile à combustible et l'utilisation de l'hydrogène**, on est dans une situation où à la fois les gains attendus et les obstacles à surmonter sont encore plus considérables. L'hydrogène et la pile à combustible auraient – selon l'avis d'une majorité d'experts – vocation à se substituer à long terme aux carburants et modes de propulsion actuels. L'hydrogène présente en effet des avantages décisifs dans le domaine des transports :

- une disponibilité théorique quasi infinie ;
- une remarquable « plasticité » par rapport à l'ensemble des autres énergies¹¹² ;
- une très grande « compacité » énergétique par unité de masse ;
- un excellent rendement mécanique (par rapport au moteur à combustion interne) ;

– pratiquement pas d'émissions de gaz à effet de serre au niveau de la propulsion des véhicules ;

– et enfin, la possibilité d'être utilisé dans tous les modes de transport (comme le montre le **tableau n° 21**)¹¹³.

Malheureusement, ces avantages sont compensés par un ensemble d'inconvénients tout aussi importants – qui expliquent que l'hydrogène n'ait pas été utilisé jusqu'à présent à grande échelle dans les transports¹¹⁴ :

- en raison de sa très faible compacité énergétique par unité de volume, l'hydrogène a besoin de « réservoirs » dont la masse est de l'ordre de vingt fois la sienne (sauf sous sa forme liquéfiée) ;
- il est facilement inflammable et pose des problèmes de sécurité considérables ;
- c'est un gaz que l'on sait mal stocker : son stockage sous forme liquide

111 « Alternative Biofuels for France and Germany », ASPO, Berlin, mai 2004.

112 Vecteur énergétique, l'hydrogène peut être produit à partir d'une multiplicité d'énergies différentes et être ensuite transformé en un grand nombre d'énergies diverses.

113 Boeing a ainsi lancé en 2003 un programme de recherche sur son utilisation dans le transport aérien (source : IPTS de Séville – « Potential for hydrogen as a fuel for transport in the long term (2020-2030) », mars 2004).

114 Alors que la pile à combustible a été inventée il y a plus d'un siècle et demi (en 1839 !). Rappelons que la pile à combustible a été utilisée pour la première fois dans la capsule GEMINI, en 1965. Source : « Moteurs, carburants, quelles évolutions sur le long terme ? », IFP, 2004, ainsi que le rapport final du High level group « Hydrogène et piles à

Tableau n° 22 : « State of the art » des différentes techniques liées à l'hydrogène

Segmentation	Recherche de base	• Prototypes • Développement	Premiers modèles commercialisés
Pile à combustible	<ul style="list-style-type: none"> • Turbine à gaz hydrogène (cryoplans) 	<ul style="list-style-type: none"> • Proton exchange membrane • Fuel cells (PMC) • H² - ice • SOFL (solid oxide fuel cells) 	
Production de l'hydrogène	<ul style="list-style-type: none"> • Séquestration du CO₂ • Photoélectricité • Production biologique (algues...) 	<ul style="list-style-type: none"> • Reformage de la biomasse • Reformage de gaz naturel sur site 	<ul style="list-style-type: none"> • Electrolyse sur site • Electrolyse centralisée • Reformage de gaz naturel centralisé • Gazéification du charbon + pétrole
Stockage de l'hydrogène	<ul style="list-style-type: none"> • Alanates • Nanotubes de carbone 	<ul style="list-style-type: none"> • Hybrides de boron • Stockage d'hydrogène liquide 	<ul style="list-style-type: none"> • Sous-produit • Compression 35 MPA • Compression 70 MPA • Hybride/métal • Stockage stationnaire
Réseaux et systèmes de distribution	<ul style="list-style-type: none"> • Grands navires porte-containers d'hydrogène liquide 		<ul style="list-style-type: none"> • Pipelines • Compression • Liquéfaction • Transport d'hydrogène gazeux ou liquide
Station de distribution, remplissage de l'hydrogène		<ul style="list-style-type: none"> • Hydrogène liquéfié • Hydrogène comprimé 35 MPA • Hydrogène comprimé, 70 MPA • Hydrogène faiblement comprimé (CCGH²) 	

Source : IPTS, 2004, *op. cit.*

pose des problèmes de « boil off » que l'on maîtrise mal ;

– son utilisation dans les piles à combustible (PEMFC), suppose des *membranes* pouvant résister à des températures de 130-160° que l'on ne sait pas, pour l'instant produire¹¹⁵ ;

– son intérêt pour l'environnement en termes d'effet de serre et d'économie de pétrole n'est substantiel que s'il est produit à partir d'énergies non carbonées qui sont soit difficiles, soit risquées à produire (renouvelables, combustibles fossiles « décarbonés », nucléaire) ;

– enfin, son coût de production reste actuellement « prohibitif », d'un facteur 10 pour la pile à combustible (par rapport au moteur à combustion interne) et d'un facteur 10 à 15 pour sa production et sa distribution par rapport au pétrole.

Si l'on ajoute à cela des obstacles matériels (disponibilité du platine comme catalyseur), logistiques (coût de la mise en place des infrastructures de distribution)¹¹⁶ et institutionnels (inadaptation des incitations à l'innovation ou à la mise sur le marché), on comprend qu'il subsiste d'importantes controverses à l'horizon duquel des véhicules à hydrogène pourraient être mis sur le marché. Probablement entre 2020 et 2030 – si l'effort de recherche, sensiblement accéléré depuis quelques années, n'est pas ralenti (voir le tableau n° 22).

☐ Compte tenu de ces limites et de ces risques, il serait déraisonnable d'orienter tous les programmes de recherche sur une technologie unique : comme on l'a déjà fait remarquer, **il n'y a pas aujourd'hui d'autre choix possible que celui de la pluralité technologique.**

combustible : une vision pour notre avenir, UE, 2003.

115 Source IPTS, *op. cit.* (Potential for hydrogen...).

116 On estime à au moins 200 milliards d'euros le coût d'une infrastructure d'alimentation en hydrogène à l'échelle européenne s'il est produit de manière centralisée. L'autre solution qui consiste à produire de l'hydrogène au niveau de chaque véhicule (« reformage » de combustibles fossiles ou de biocarburants) n'est pour l'instant pas

Cette pluralité est d'autant plus importante que des technologies comme l'hybridation « rechargeable » ou la pile à combustible ne sont pas nécessairement les mieux adaptées pour certains modes de transports décisifs en termes

de consommation de pétrole et de gaz à effet de serre – comme le transport routier de marchandises à longue distance¹¹⁷ ou le transport aérien pour lesquels des programmes de recherche spécifiques devront être engagés.

III. LES ENJEUX ET VEROUS LIÉS AUX NOUVELLES TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION ET DE LA COMMUNICATION À TRAVERS LE CAS DES APPLICATIONS SATELLITAIRES (GALILEO)

A. La révolution des nouvelles technologies de la communication

La révolution des transports des vingt dernières années a été très largement une révolution des techniques de l'information et de la communication. Progressivement, tous les domaines ont été touchés, depuis les processus de production et de conception jusqu'à la gestion de la mobilité en passant par la structure des moteurs ou des véhicules. Cette transformation profonde devrait s'accélérer dans le futur, avec l'intégration attendue de l'électronique ou des ordinateurs embarqués, des systèmes d'aide à la navigation, des techniques de communication mobiles, des techniques d'identification (RFID...), de l'intelligence artificielle répartie, du satellite...

□ L'Europe, qui a pris beaucoup de retard dans cette mutation par rapport au Japon et aux États-Unis¹¹⁸, devrait progressivement opérer son rattrapage : selon le « Telematics research group », 10 % du parc européen de voitures particulières et de véhicules utilitaires légers devrait ainsi être équipé de systèmes télématiques d'ici 2010 (contre 25 % aux États-Unis à la même date). Le marché des transports intelligents (ITS) pourrait tripler entre 2000 et 2010 (pour passer à près de 3 milliards d'euros). Les ordinateurs de bord couplés à des satellites et des bases de données devraient à terme équiper la majorité des poids lourds¹¹⁹ et des trains... Pour beaucoup des technologies concernées, *la période qui s'ouvre va être en Europe une période de décollage et de déploiement dans laquelle vont pouvoir se « loger » bon nombre d'innovations « incrémentales »*.

□ Cette évolution n'ira cependant pas nécessairement « de soi », non seulement parce qu'elle suppose la conception de services à « valeur ajoutée » qui n'existent pas encore, mais aussi parce que les « modèles économiques » applicables aux techniques et services d'information sont fragiles et surtout parce que l'intégration systématique des technologies de l'information et de la communication risque à terme de poser le problème de *l'autonomie de la conduite* et même de celle des opérateurs de transport. Là encore, on constate qu'il n'est pas possible de dissocier enjeux techniques et enjeux sociaux ou économiques¹²⁰.

B. Un enjeu majeur : la mise en place de GALILEO

□ Dans cette dynamique d'ensemble, l'événement majeur va être la mise en place à la fin de la décennie 2000-2010 de GALILEO qui devrait apporter des solutions radicalement nouvelles en termes de gestion des flottes et des trafics, d'aide à la navigation, de télépéage, de téléassistance, de télédiagnostic... ou d'alerte en situation de crise.

GALILEO illustre assez bien la problématique qui est celle de l'intégration des nouvelles technologies de l'information et de la communication dans les transports : contrairement à ce qui se passe pour la pile à combustible, **l'enjeu à moyen terme est ici moins de concevoir des technologies de « rupture » que de construire – avec l'aide de la recherche – le « système socio-technique » qui permettra de concrétiser les potentialités du satellite.**

suffisamment efficace en termes de réduction des gaz à effet de serre.

117 L'hybridation serait en revanche très adaptée pour le transport de marchandises en ville.

118 Rappelons que le taux d'équipement des véhicules neufs en système de navigation était en 2001 de 7 % en Europe contre 50 % au Japon.

119 Au lieu de 6 % en France en 2002 pour les poids lourds.

120 La mise sur le marché de voitures « rustiques » peu coûteuses risque également de remettre en cause la course à la sophistication des aides à la conduite ou

Tableau n° 23 : Forces et faiblesses des différentes technologies de positionnement des mobiles

Criteria:	GPS	GSM	AEI	Comm. tags + GPS
Location technologies:				
T&T information quality				
Provides continuous real-time location information	+	+	-	+
Provides high location information accuracy	+	-	+	
Performs well at high speed				
Compilation and complexity of target schedules	-			-
Use of universal transport unit IDs	-	-	+	+
Use of universal location format	+	?	(-)	+
Energy requirements				
Energy supply problems	-	-	+	+
Versatility				
Suitability for closed systems				
Suitability for open systems	+	+		
Can be used across different modes	+	+		-
		+		
Scalability	+	+		
Costs				
Costs of stationary infrastructure	+	+	-	+
Transport unit-variable costs	-		+	
		?	-	-
T&T transaction variable costs	-	?	-	-
System deployment, complexity and control				
System deployment and control decisions are easy to take	+	+	-	-
Complexity of data structure, data processing and distribution	+	+	-	-
Scope for value added services	-	-	+	
Development & testing needs				
Tested in a CT context		-		-
RTD needs		-		-

Source : IPTS, 1999.

• La première question qui se pose est celle de la *place du GPS par rapport aux autres techniques de positionnement concurrentes* : GSM (téléphonie mobile) ou systèmes d'identification automatiques fixes (AEI). Une recherche, faite en 1999 par l'IPTS de Séville sur les systèmes de suivi du transport combiné¹²¹, a en fait montré que le satellite avait un léger avantage comparatif par rapport au GSM (**voir le tableau n° 23**), mais qu'en définitive, les différents systèmes de positionnement étaient plutôt complémentaires.

• Une toute autre question plus prospective, est celle de *l'exploitation future des potentialités du satellite et*

des verrous qui pourraient entraver son développement.

□ Les experts reconnaissent qu'il subsiste des verrous technologiques qui devront être levés par des recherches complémentaires ou des couplages avec d'autres techniques plus matures¹²² :

- la non-disponibilité des signaux satellitaires en toutes conditions (nuages, milieu dense, tunnels...);
- la non-interopérabilité avec d'autres systèmes de communication;
- le manque de précision;
- des délais de transmission parfois trop longs;

des systèmes de navigation engagée depuis les années 90.

121 Source : IPTS, Christian Heller, « Tracking and tracing in combined road/rail freight transport », 1999.

122 Source : CMI, « Les applications des signaux satellitaires : exploration des usages envisageables à un horizon de 10 ans et rôle possible des pouvoirs publics »,

Tableau n° 24 : Les applications de GALILEO à la gestion des transports : fonctions attendues et verrous possibles

CAHIER DES CHARGES		SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES		VERROUS
1. Services de transmission				
<ul style="list-style-type: none"> Fournir des services équivalents à ceux des réseaux terrestres. S'affranchir des barrières physiques au signal. Information en temps réel normalisée et complémentaire (traduction). Réseaux spéciaux pour situation de crise. 	<ul style="list-style-type: none"> Telecom : GPRS puis UMTS, wi-fi. Terminaux : smartphones, tablet pc, portables... Terminal sat : GALILEO. Iridium/Global star. Haut débit fixe. Création d'un lien de communication temporaire. 		<p>Problèmes techniques : valider les possibilités d'interconnexion avec les autres réseaux. Coût : absence des modèles économiques. Cher et peu pratique. Reluctance des opérateurs à affecter des canaux spécifiques.</p>	
2. Aide au déplacement/navigation (guidage)				
<ul style="list-style-type: none"> Positionnement en temps réel, continu et précis (10 m). Personnalisation de la communication : langue, véhicules... Contenu : infos trafic, congestion, infos géographiques. Existence d'une base de données consultable (Internet...) comprenant des données fixes (géographiques...) et variables (accidents, trafic...) 	<ul style="list-style-type: none"> Combinaison de systèmes de positionnement et de communication. Terminal adapté : PDA, mobile, PC... Intelligence embarquée : interprétation des données d'entrée, guidage. 		<p>Manque de précision des données. Disponibilité des informations en continu non assurée. Problèmes d'interopérabilité internationale des données trafic. Chaîne de fourniture des services complexe. Coût du service et du matériel grand public.</p>	
3. Aide à la conduite de véhicules automobiles				
<ul style="list-style-type: none"> Exigence de fiabilité, réaction à la seconde et précision de 10 mètres. Trajectoires de référence sur la route. Guidage centimétrique ! Repérer la distance au véhicule qui précède. Connaitre la position des obstacles. Disposer d'une trajectoire de référence. Localisation transversale du véhicule (écart, cap) Description de la route permettant de calculer une vitesse préconisée. Localisation longitudinale des véhicules. 	<ul style="list-style-type: none"> Stéréovision par caméra, radar, laser Echanges de positions basées sur GPS. Cartes de précision, marquages sur la route, aimants. Détection des marquages par une micro caméra, localisation sur une carte par GPS. Magnétomètre (détection d'aimants) Cartes, systèmes de navigation. GPS + estime de précision décimétrique + communication véhicules. 	<ul style="list-style-type: none"> Coût radar et lidar. Absence de moyen de communication entre véhicules et manque de précision GPS. Faute de précision centimétrique, qualité des marquages, coûts des infrastructures (aimants). Manque de précision et de disponibilité GPS. Coût des systèmes de navigation, Conception des cartes. Absence de communication Wi. 		
4. Gestion de flotilles				
<ul style="list-style-type: none"> Localisation précise (entre 1 et 100 m) Interface de localisation nommée. Transmission de données fiables, sécurisation. Disponibilité très forte (lune, météo...) Équipement des objets à surveiller d'un système de détection ou d'identification précise par satellite. Types de données à recueillir nombreuses. 	<ul style="list-style-type: none"> Positionnement satellite et backup d'équipements au sol (tunnels...) EDI, GSM, SMS, DATA GPRS. Au niveau des radars : wi-fi, blue tooth et GSM compatibles, nécessaire de rendre le GPS également compatible. Navigation embarquée : utiliser les véhicules comme capteurs de trafic. Redondance des données. Data mining. 	<ul style="list-style-type: none"> Verrou, technologique : précision, zones d'ombre, autonomie électrique, interopérabilité, jointure des systèmes d'information. Disponibilité des données pas assurée (nuages, nombre de satellites trop faible). Manque d'offre et coût trop élevé des équipements. Reliance des transporteurs et multiplicité des acteurs. 		
5. Télémaintenance sur mobiles				
<ul style="list-style-type: none"> Diagnostic à distance et suivi en fonction du nombre de kilomètres parcouru, du réseau... 	<ul style="list-style-type: none"> Capteurs. Nouveaux services à envisager. Systèmes d'identification couplés à des bases de données. 	<ul style="list-style-type: none"> Interconnexion avec les systèmes à télémaintenir eux-mêmes. Coût trop élevé. 		
6. Gestion de flux de trafics...				
<ul style="list-style-type: none"> Fusion de plusieurs types de données (le satellite vient en appoint). Calcul du temps de parcours. Correction en temps réel des données 2D et 3D. Report de position des véhicules. Gouvernance totale avec précision de navigation (Europe...) 	<ul style="list-style-type: none"> Des techniques de fusion existent mais ne sont pas adaptées à la sécurité. Capteurs inertiels (coûteux). Report de position par satellite (coût plus important que les moyens terrestres). Diffusion d'EGNOS. Fiabilité des calculs de temps de parcours liée aux feux de circulation. 	<ul style="list-style-type: none"> Nécessité de mieux coupler les techniques de positionnement pour tirer partie d'EGNOS/GALILEO. Normalisation et standardisation. Implication des usagers. Coût des techniques excessif. Redevances (paiement des services). 		
7. Gestion d'accès, télépéage...				
<ul style="list-style-type: none"> Identification des mobiles. Temps réel. Positionnement suffisant (1m) en x et y (et éventuellement z). Fiabilité du signal, des informations. Etudes statistiques. Sécurisation des paiements. 	<ul style="list-style-type: none"> Analyse des images satellites en temps réel. Techniques d'identification. Gestion de bases de données et de modèles. Ajust d'une fonctionnalité de positionnement aux terminaux existants (ADA, mobile...) Système de facturation plus complexe (traçabilité). 	<ul style="list-style-type: none"> Temps de traitement des images. Identification des mobiles. Data mining, sophistiqué. Difficultés des traitements statistiques. Verrous juridiques : valeurs de preuve, liberté individuelle... Remboursement du service pour l'opérateur. 		
8. Emission d'alertes géolocalisées.				
<ul style="list-style-type: none"> Fiabilité des services. Intégration des services à des terminaux usuels (mobiles...) Systèmes experts (détection des situations de « crise », alerte...) Disponibilité et réactivité fortes. 	<ul style="list-style-type: none"> Communication haut débit + localisation. Communication par satellite du type iridium/globalstar. Utilisation des téléphones mobiles – GPS + GSM. Envoi d'un signal satellitaire sur poste local et rediffusion de l'information. 	<ul style="list-style-type: none"> Performance des satellites à améliorer. Sûreté et fiabilité de fonctionnement. Coût des transmissions. Acceptabilité d'un suivi permanent des véhicules. Coût des infrastructures. Problèmes de procédures. 		

- l'activation des signaux (non automatiques) ;
- l'insuffisance des capacités de traitement de données (data mining, modèles...) ;
- les restrictions des champs de vision ;
- ...

Mais comme dans la plupart des domaines touchant aux techniques d'information et de communication, **les verrous technologiques apparaissent finalement moins déterminants que les verrous économiques** (coûts des matériels, coûts d'exploitation, fragilité des « business models » pour les opérateurs) **ou juridiques et « politiques »** (cryptage et standardisation des informations, respect de la vie privée, définition de protocoles et procédures européennes, traduction des informations, propriété des données...).

C'est ce qui apparaît clairement dans le **tableau n° 24**.

□ La conclusion que l'on peut provisoirement tirer de cet exemple de GALILEO, est que la réussite future de la révolution de l'information dans le domaine des transports

reposera au moins sur trois types de stratégies de recherche :

- d'abord le développement du *génie logiciel* (informatique distribuée, fiabilité des échanges de données, sécurité des communications, moteurs de recherche, traduction automatique, data-mining, contenus multimédias...)

- ensuite des *progrès complémentaires* dans les techniques de positionnement et d'identification des véhicules permettant d'accroître leurs performances en termes de précision et de disponibilité ;

- enfin et surtout, le recours à des *approches finalisées et systémiques* permettant à la fois de gérer les problèmes d'*interface* (entre hommes et machines, entre modes, entre techniques...) et d'aborder de manière intégrée et stratégique la question des conditions d'usage réel de ces nouvelles techniques (modèles économiques, verrous juridiques, *acceptabilité sociale*, protocoles internationaux, politiques de standardisation...).

Cela suppose de donner toute leur place à des *recherches multidisciplinaires* structurées par des programmes finalisés.

IV. CONCLUSION

Cette quatrième partie a permis de passer d'une typologie d'environ 150 technologies à une liste de 25 « Technologies-clés » puis à une description plus détaillée de l'état de l'art ou des verrous à lever pour quelques-unes d'entre elles : la pile à combustible, les hybrides rechargeables, les applications de GALILEO... Dans l'idéal il faudrait pouvoir hiérarchiser ces 25 Technologies-clés et faire pour chacune d'entre elles, des analyses, à un niveau fin, de leur niveau de maturité et des obstacles auxquels se heurte leur développement.

À ce stade du travail, il paraît peu raisonnable de s'engager seul dans ce double effort de hiérarchisation et d'évaluation systématique des verrous

technologiques : *il faudrait pouvoir, au préalable, discuter des critères de classement et avoir une idée plus claire du niveau souhaitable de « granulométrie » des Technologies-clés.*

La seule recommandation importante que l'on puisse tirer – à partir de l'analyse du thème environnement-énergie – est la *nécessité de privilégier des approches systémiques par grands blocs de problèmes et d'enjeux* : cela impose de ne pas écarter a priori des technologies en apparence marginales mais en réalité essentielles (comme le « camion du futur ») et de ne pas séparer les verrous purement scientifiques et technologiques des obstacles socio-économiques ou institutionnels qui, dans le domaine des transports, jouent un rôle majeur.

Cinquième partie

**LE POSITIONNEMENT INTERNATIONAL
DE LA RECHERCHE EUROPÉENNE
ET L'ÉVOLUTION
DES PROGRAMMES COMMUNAUTAIRES**

LE POSITIONNEMENT INTERNATIONAL DE LA RECHERCHE EUROPÉENNE ET L'ÉVOLUTION DES PROGRAMMES COMMUNAUTAIRES

Face aux enjeux technologiques auxquels vont devoir faire face les transports dans les années à venir, quelle évaluation peut-on faire du potentiel de recherche européen ?

Il est a priori considérable, les transports constituant, en montant d'investissement, le premier secteur de recherche privée européen – avant l'électronique ou la pharmacie.

Mais l'importance de ce potentiel global ne signifie pas nécessairement que l'Europe soit effectivement bien positionnée sur les technologies d'avenir – qu'il s'agisse de la recherche des entreprises ou des programmes publics nationaux ou communautaires.

Il est donc proposé d'aborder cette cinquième et dernière partie consa-

crée au potentiel de recherche dans une triple perspective :

– Quel est aujourd'hui le potentiel global de l'industrie européenne en matière de recherche et d'innovation dans les transports ?

– Quels sont les points forts et les points faibles de la recherche publique ?

– Et enfin, quel est le positionnement *spécifique* de l'Europe sur quelques Technologies-clés comme la pile à combustible ou les technologies de l'information et de la communication (ITS) ?

Compte tenu de la faiblesse des informations disponibles et de l'immensité du champ couvert, on ne pourra, sur chacun de ces trois points, aller au-delà de quelques éclairages partiels.

I. LES TRANSPORTS :

LE PREMIER SECTEUR DE RECHERCHE PRIVÉE EN EUROPE

A. Près du quart de la recherche des entreprises européennes

Compte tenu des difficultés statistiques à imputer ce qui, dans l'aérospatial, concerne l'aéronautique civile, on peut évaluer à un chiffre compris *entre 22 et 23 % le montant consacré par les entreprises européennes à la recherche sur les transports (voir le tableau n° 25)*. Ce chiffre est à comparer à environ 17-18 % pour les États-Unis et 14 % pour le Japon¹²³. Il est fait des transports le *premier secteur de recherche industrielle en Europe, avant l'électronique (20,5 % de la R&D privée) et la pharmacie (12,5 %)*¹²⁴. En incluant l'aéronautique militaire, on atteint *en valeur absolue* un montant global de recherche européenne à peu

près équivalent à celui des États-Unis – soit environ **30 milliards d'euros**, et trois fois supérieur à celui du Japon.

Dans cet ensemble la recherche automobile et routière est très largement dominante, puisqu'elle représente à elle seule près de 17 % de la recherche privée en Europe ; l'aérospatial 7 % (3 à 4 % pour l'aéronautique civile) et la recherche ferroviaire ou maritime environ 1 %.

□ Plus concrètement, on relève que dans le tableau de bord de la recherche industrielle publié en 2004¹²⁵, **10 des 20 premières entreprises européennes en termes d'investissements R&D appartiennent au secteur des transports ou y inter-**

DRAST, ministère français de l'Équipement, 2003.

123 En incluant le spatial (privé) et l'aéronautique nucléaire, on atteint 25,3 % pour l'Union européenne, 20,7 % pour les États-Unis et 14 % pour le Japon.

124 Aux États-Unis l'électronique (37,5 %) vient largement avant les transports (18 %). Au Japon, les transports arrivent en troisième position après l'électronique (34,2 %) et les biens d'équipement (19 %). Source : OCDE et OST.

125 Source : Joint Research Center et DG Recherche monitoring industrial

**Tableau n° 25 : La place des transports dans les dépenses de R & D des entreprises :
une comparaison Europe, Japon, États-Unis**

Domaines	Union européenne		Etats-Unis		Japon	
	2000 (%)	Evolution 2000/1995	2000 (%)	Evolution 2000/1995	2000 (%)	Evolution 2000/1995
Aérospatial*	7,3 %	- 17 %	7 %	- 56 %**	0,8 %	+ 22 %
Transports terrestres et maritimes Dont : rail et maritime (estimation)	18 % (0,9 %)	+ 21 %	13,7 % (0,8 %)	+ 1 %	13,2 % (1,2 %)	+ 4 %
Total transport* (dont : spatial)	25,3 % (3 % ?)		20,7 % (3 % ?)		14 %	
Electronique	20,5 %	- 3 %	37,6 %	+ 21 %	34,2 %	+ 15 %
Volume total de R & D (milliards d'euros)	113	+ 33 %	160	+ 27 %	76	+ 24 %

Source : OST, NSF et estimation.

* Incluant le spatial sur financement privé.

** Forte diminution des programmes spatiaux.

viennent fortement : Daimler-Benz (1), Siemens (2), Volkswagen (3), Bosch (9), BMW (11), Eads (13), Peugeot (14), Renault (16), British aerospace (18), Finmeccanica (20) – avec des budgets situés pour chacun entre 5 500 et 1 200 millions d'euros. C'est une concentration tout à fait exceptionnelle, très supérieure en Europe à ce qu'elle est à l'échelle des grandes entreprises mondiales.

B. Un domaine de spécialisation technologique incontestable pour l'Europe

Si l'on prend comme indicateur la publication de brevets – soit européens, soit américains – il est incontestable que les transports constituent par rapport à d'autres activités économiques un domaine « d'excellence » technologique remarquable (voir le tableau n° 26) :

– 62 % des brevets mondiaux publiés en Europe dans le domaine des transports le sont par les pays de l'Union européenne, alors qu'en moyenne, toutes activités confondues, la part de l'Europe n'est que de 42 % ;

– pour les brevets américains, la part de l'Europe dans ce même champ

des transports est de 26 % au lieu de 17,6 % en moyenne, ce qui, là encore, marque une forte spécialisation relative.

Comme on le constate dans le tableau n° 27, cette part de l'Europe dans la publication de brevets a relativement peu varié depuis 1991, alors que celle du Japon a diminué et celle des États-Unis augmenté. L'Allemagne à elle seule représente plus de 50 % des brevets de l'Europe des 25.

- Si l'on analyse les situations et les évolutions *mode par mode* (voir le tableau n° 28) et pour les seuls brevets européens¹²⁶, on observe que la part de l'Europe est partout supérieure à 50 % – et parfois très largement comme pour la construction ferroviaire.

Il faut remarquer cependant que dans certains domaines comme le chemin de fer ou la construction maritime, les positions de l'Europe se sont fortement dégradées depuis le début des années 90.

Cet effritement pouvant à terme être préoccupant car pour l'Europe, l'avance technologique est une condition indispensable au maintien des positions concurrentielles – notam-

research : « The 2004 industrial R&D investment scoreboard ».

Tableau n° 26 : Les dépôts de brevets par les trois zones de la Triade (Europe, Etats-Unis, Japon) : la spécialisation de l'Europe dans les transports

Régions \ Brevets	Brevets « européens »		Brevets « américains »	
	Transport	Tous domaines	Transport	Tous domaines
Europe	62,4 %	44,4 %	26 %	17,6 %
Etats-Unis	17,3 %	92,4 %	40,7 %	48,7 %
Japon	12,9 %	14,9 %	23,1 %	22,2 %

Source : OST.

Tableau n° 27 : Le positionnement de l'Europe dans le domaine des technologies liées au transport : une évaluation à partir des publications de brevets

Tableau 27a : Part/monde (%) de brevets européens

Pays	1991	1993	1995	1997	1999	2001
Union européenne à 25	63,4	62,0	62,3	59,9	60,3	62,4
France	12,7	12,8	12,7	10,8	9,6	10,0
Allemagne	27,8	27,8	29,0	30,8	33,5	34,2
Royaume-Uni	7,9	6,9	6,3	5,4	4,4	4,5
Italie	6,3	5,2	4,7	4,2	4,2	4,3
Suède	2,4	2,6	2,8	2,6	2,6	2,5
Etats-Unis	15,3	16,9	18,5	20,0	19,2	17,3
Japon	15,5	13,8	10,7	11,8	12,4	12,9
Monde	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Total brevets	2 505	2 676	2 786	3 448	4 572	5 519

Tableau 27b : Part/monde (%) de brevets américains

Pays	1991	1993	1995	1997	1999	2001
Union européenne à 25	24,2	22,5	22,1	22,0	23,7	25,7
France	4,1	4,2	3,8	3,3	3,6	3,7
Allemagne	11,9	11,6	11,9	12,3	13,7	15,1
Royaume-Uni	3,3	2,7	2,5	2,5	2,4	2,6
Italie	1,6	1,3	1,1	1,0	1,1	1,3
Suède	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0	1,1
Etats-Unis	36,9	39,3	42,4	44,8	42,8	40,7
Japon	30,7	29,2	24,9	22,0	22,4	23,1
Monde	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Total brevets	3 138	3 130	3 058	3 156	3 773	4 896

Source : USPTO, traitement CHI-Research et OST.

Tableau n° 28 : Évolution de la place de l'Europe dans la publication de brevets (européens) par mode : aéronautique, transports terrestres, transports maritimes

Véhicules (en général) - Part/Monde (%) de brevets européens						
Pays	1991	1993	1995	1997	1999	2001
Union européenne à 25	63,6	63,6	63,3	61,2	63,0	64,9
Union européenne à 15	63,4	63,5	63,0	60,9	62,7	64,4
France	11,5	13,2	13,3	11,3	9,7	9,8
Allemagne	30,8	30,4	31,0	33,9	38,0	38,8
Royaume-Uni	7,4	6,7	6,2	5,0	3,9	4,0
Italie	6,6	5,4	4,8	3,8	3,8	4,0
Suède	2,1	2,1	2,6	2,2	2,4	2,2
Etats-Unis	14,1	16,3	19,1	20,6	18,6	16,1
Japon	17,7	14,7	11,4	12,3	13,0	13,9
Monde	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Total brevets	1 647	1 714	1 763	2 271	3 061	3 761
Aéronautique - Part/Monde (%) de brevets européens						
Pays	1991	1993	1995	1997	1999	2001
Union européenne à 25	56,7	55,8	55,1	43,9	44,1	52,5
Union européenne à 15	56,7	55,4	54,9	43,9	43,4	50,9
France	16,6	19,0	20,1	14,5	12,5	11,4
Allemagne	17,9	15,8	17,2	13,3	16,5	19,1
Royaume-Uni	15,0	16,0	12,6	9,7	6,5	11,0
Italie	1,7	1,0	1,7	2,3	2,5	2,8
Suède	1,6	1,8	1,2	1,9	1,9	1,9
Etats-Unis	36,8	35,5	32,1	39,7	39,8	32,2
Japon	3,3	3,3	1,7	2,1	3,2	4,3
Monde	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Total brevets	153	163	160	172	227	251
Transports routiers - Part/Monde (%) de brevets européens						
Pays	1991	1993	1995	1997	1999	2001
Union européenne à 25	59,7	56,3	57,4	56,2	55,0	55,7
Union européenne à 15	59,6	56,1	56,6	55,4	54,6	55,2
France	13,8	9,3	9,3	9,0	8,5	10,4
Allemagne	24,2	25,0	26,1	26,3	26,5	25,6
Royaume-Uni	6,2	5,1	5,5	4,9	4,6	3,9
Italie	7,0	6,4	5,7	5,8	5,8	5,7
Suède	2,7	3,6	3,1	3,1	3,1	3,3
Etats-Unis	15,0	15,0	15,2	15,7	15,6	16,3
Japon	19,6	20,9	17,5	20,6	20,1	18,8
Monde	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Total brevets	354	418	425	507	695	848
Ferroviaire - Part/Monde (%) de brevets européens						
Pays	1991	1993	1995	1997	1999	2001
Union européenne à 25	83,1	80,8	81,7	75,5	73,1	73,6
Union européenne à 15	82,8	80,6	81,2	75,3	72,7	72,4
France	19,8	13,4	11,7	9,6	9,2	10,3
Allemagne	35,2	41,0	48,7	49,3	44,4	42,4
Royaume-Uni	3,8	4,5	2,4	1,3	2,6	3,3
Italie	6,8	6,1	3,4	4,5	2,9	2,8
Suède	3,3	3,5	3,1	1,9	2,6	3,2
Etats-Unis	4,6	5,8	7,0	10,7	12,9	15,8
Japon	5,7	6,6	5,3	4,1	2,9	2,3
Monde	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Total brevets	115	129	161	179	195	220
Construction maritime - Part/Monde (%) de brevets européens						
Pays	1991	1993	1995	1997	1999	2001
Union européenne à 25	60,9	51,9	51,0	52,0	48,1	53,0
Union européenne à 15	60,7	51,2	51,0	52,0	47,5	52,4
France	12,4	10,5	7,9	7,6	7,9	10,0
Allemagne	15,2	13,8	12,1	11,0	10,2	11,4
Royaume-Uni	12,0	7,1	6,8	8,9	7,5	7,1
Italie	6,5	5,2	5,5	5,5	7,0	6,7
Suède	5,7	5,8	6,8	7,0	4,9	5,1
Etats-Unis	18,3	20,6	21,5	18,7	21,5	22,2
Japon	6,4	6,8	4,9	3,9	4,3	3,3
Monde	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Total brevets	180	188	191	223	287	307

Source : INPI et OEB, traitement par l'OST.

Tableau n° 29 : Les investissements en R&D par secteur : une comparaison Europe/reste du monde

FTSE Sector	EU Top 500		Non-EU Top 500	
	Sector R&D Investment as % of all sectors	R&D/Sales ratio (%)	Sector R&D Investment as % of all sectors	R&D/Sales ratio (%)
Automobiles & Parts	23.8	4.6	15.7	4.1
Pharmaceuticals & Biotechnology	17.0	15.2	18.5	15.1
IT Hardware	12.4	15.6	22.9	8.6
Electronic & Electrical Equipment	10.3	6.5	10.9	5.7
Chemicals	7.2	4.2	4.2	3.8
Aerospace & Defence	6.8	8.0	2.1	2.7
Engineering & Machinery	4.6	2.5	2.5	2.8
Telecommunication Services	2.8	1.0	2.0	2.5
Software & Computer Services	2.6	12.8	7.8	10.0
Oil & Gas	1.9	0.3	1.2	0.5
Others (21 sectors)	10.6	1.5	12.2	2.1
Total (31 sectors)	100	3.2	100	4.5

ment sur des marchés très ouverts comme la construction maritime.

C. Un fort potentiel d'innovation à moyen terme

Tout en se situant à la première place pour le montant global des investissements en recherche développement, les industries liées au transport consacrent à la recherche une part sensiblement moins grande par rapport à leur chiffre d'affaires (4,5 % pour l'automobile, 8 % pour l'aérospatial) que les entreprises travaillant dans la pharmacie, la biotechnologie ou l'informatique, où les ratios sont supérieurs à 15 %) (voir tableau n° 29)¹²⁷.

Comme on l'a évoqué en introduction, cela suscite naturellement des questions sur leur contribution réelle à l'innovation et sur leurs motivations à innover à moyen ou long terme.

Deux analyses récentes de la Commission européenne confirment cependant l'importance attachée à l'innovation par les entreprises européennes de ce secteur, notamment par rapport à leurs concurrents internationaux¹²⁸ :

– dans le domaine de l'automobile comme dans celui de l'aéronautique, l'investissement en recherche développement des grandes entreprises européennes est sensiblement plus important que dans les autres multinationales non européennes (voir le tableau n° 29) ;

– en termes de performances à l'innovation, le secteur des « équipements de transport » apparaît comme un des secteurs économiques les plus innovants, juste après l'électronique, l'informatique et l'industrie chimique-pharmaceutique¹²⁹ (voir le tableau n° 30).

Pour la plupart des indicateurs proposés, ces performances sont en effet au-dessus de la moyenne des secteurs¹³⁰.

Cet engagement dans l'innovation est incontestablement un des points forts de l'industrie européenne des transports.

Il ne doit cependant pas faire oublier deux « points faibles » déjà largement évoqués :

– d'une part, les activités de fabrication liées au transport jouent plus un rôle de diffusion des savoirs et des techniques, qu'un rôle de création de connaissances entièrement nou-

126 Il n'a pas été possible d'obtenir les informations pour les brevets « américains ».

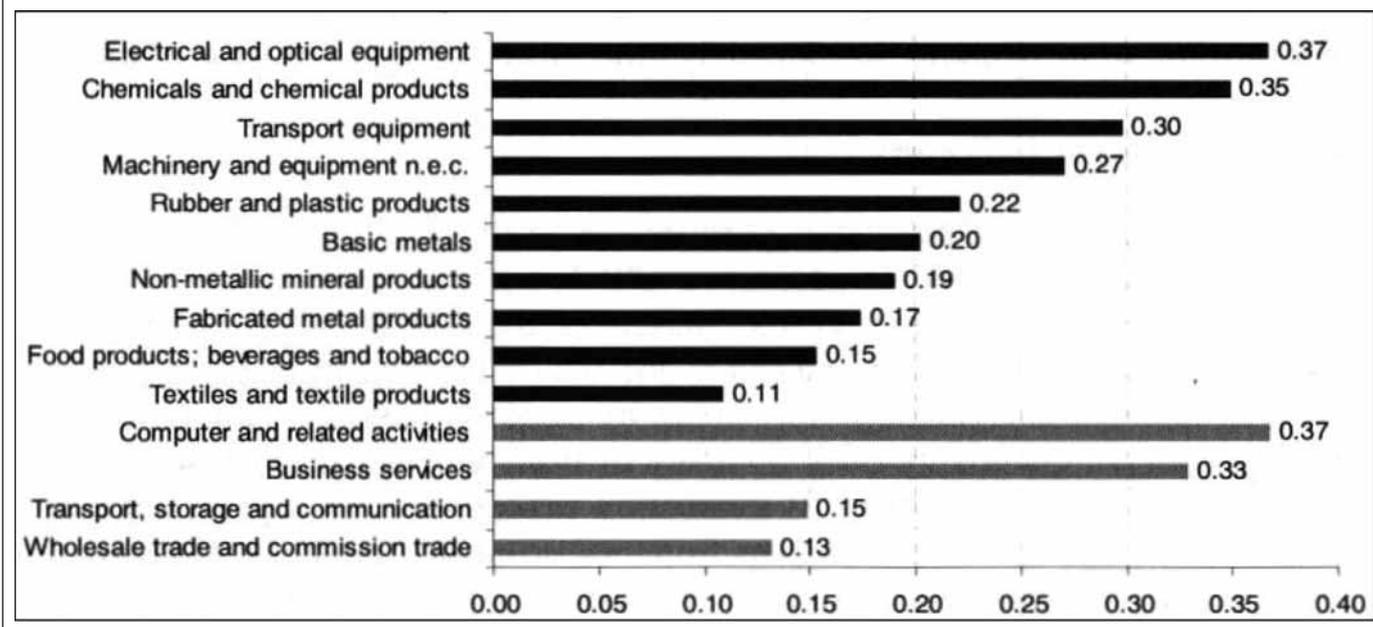
127 Source : « The 2004 EU Industrial R&D investment scoreboard », DG Recherche, 2004. Les chiffres ne concernent que les grandes entreprises.

128 Source : « The 2004 EU Industrial R&D investment scoreboard » (op. cit.) ainsi que « The European Trend Chart on innovation: exploring innovation performances by sectors » (dec. 2004).

129 Source : « Exploring innovation performances sectors », DG Recherche, décembre 2004. Le classement repose sur une quinzaine de critères.

130 C'est notamment le cas pour les dépenses d'innovation par rapport au chiffre d'affaire (5,7 % au lieu de 3,8), le pourcentage de vente de nouveaux produits (16 % au lieu de 8,6 %), le nombre d'entreprises qui déposent des brevets (15 % au lieu de 10 %), le ratio exportation sur importation (117 au lieu de 110) ; et finalement la part

**Tableau n° 30 : Les performances à l'innovation des différents secteurs économiques européens.
Le positionnement des transports**



Source : De Recherche, 2004.

velles. On est plus dans le domaine du développement que de la recherche fondamentale ou même appliquée. C'est ce qui apparaît dans le schéma suivant, également tiré du travail de comparaison intersectorielle faite récemment par la Commission européenne (schéma n° 9).

– d'autre part et surtout, il s'agit d'une innovation qui est fortement déterminée par les contraintes de production de masse et les anticipations de marché à moyen terme (voir

partie I). D'où à la fois la *difficulté des innovations de rupture et le déficit de recherche dans les domaines où la demande est faible ou aléatoire comme le transport ferré de marchandises ou les véhicules spécifiquement urbains.*

On retrouve le paradoxe, évoqué en première partie, d'un secteur économique qui est à la fois très dynamique et très conservateur en matière d'innovation – ce qui explique le rôle joué par la recherche publique et communautaire.

II. LES ORIENTATIONS DE LA RECHERCHE PUBLIQUE EUROPÉENNE ET SON POSITIONNEMENT INTERNATIONAL

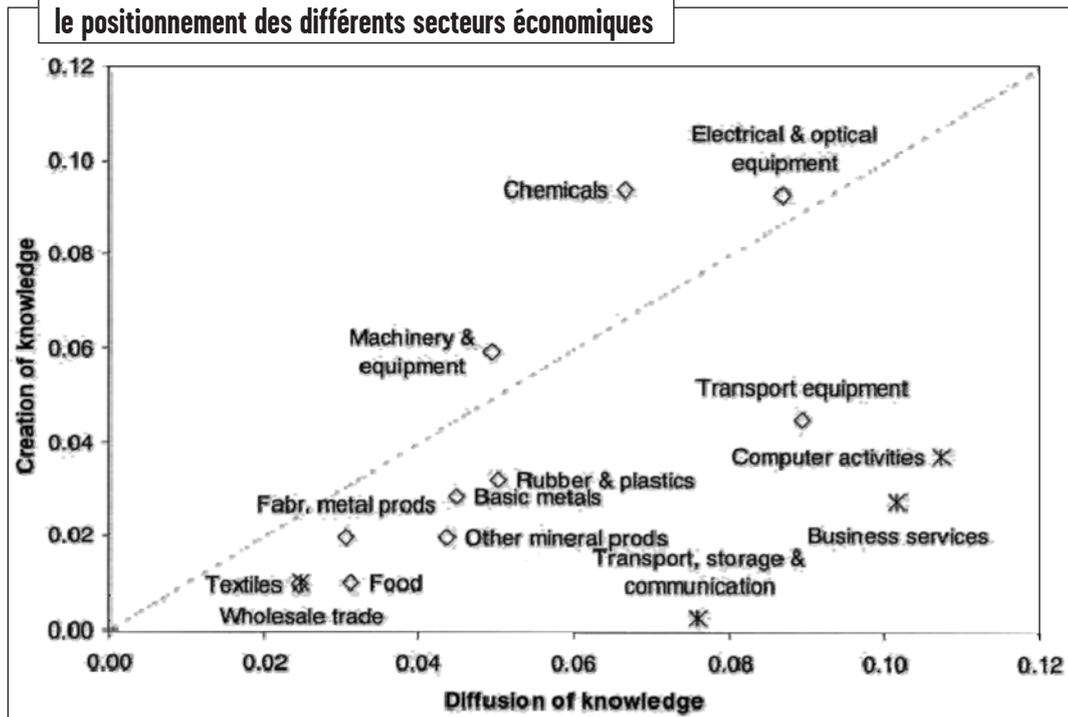
On ne dispose pas pour la recherche publique européenne ou mondiale de données comparatives équivalentes à celles qui existent pour la recherche privée. On se heurte en particulier à la difficulté récurrente d'évaluer les contributions publiques à la recherche aéronautique.

Des estimations *très grossières*, obtenues à partir de l'extrapolation de quelques chiffres nationaux, permettent cependant de donner quelques

ordres de grandeur. **Hors recherche aéronautique, on peut estimer à une fourchette comprise entre 3 et 4 % la part des budgets publics consacrés en moyenne par les différents pays européens au thème des transports.** Dans les pays qui ont une industrie aéronautique importante, ce chiffre peut être plus que doublé¹³¹. Globalement, à l'échelle de l'Europe, l'offre de recherche publique est dans un rapport de 1 à 10 ou de 1 à 15 par rapport à la recherche privée – avec un budget global qui – aéronautique

des firmes « innovantes » (42,5 % au lieu de 38 %).

**Schéma n° 9 : Création versus diffusion des savoirs :
le positionnement des différents secteurs économiques**



Source : DG Recherche, Commission européenne.

compris – devrait se situer entre 2 et 2,5 milliards d'euros¹³².

Cet ordre de grandeur est comparable avec les chiffres dont on dispose pour les États-Unis : environ deux milliards de dollars consacrés au transport et à « l'aérospatial » – la moitié si l'on exclut les contributions de la Défense et de la NASA¹³³.

On retrouve pour la Commission et le 6^{ème} PCRD, la proportion de 4 % du budget consacré aux transports terrestres (610 millions d'euros sur cinq ans pour le programme « *Transports de surface durables* » auxquels s'ajoute une partie du programme sur les technologies de l'information). Mais si l'on inclut l'aéronautique et les financements de la DG TREN, c'est environ 1,7 milliard d'euros qui seront consacrés sur cinq ans à la recherche sur les transports dans les budgets européens¹³⁴.

Du point de vue des *Technologies-clés*, ces chiffres globaux n'ont en réalité qu'un intérêt relatif. Il est nécessaire de descendre à un niveau beaucoup plus fin pour évaluer s'il y a – ou pas – une bonne correspondance entre les thématiques actuelles de recherche et les technologies prometteuses pour le futur.

Malheureusement, dans l'état actuel des données disponibles, un tel croisement n'est pas possible.

Compte tenu de cette impossibilité, on se limitera ici à deux approches partielles :

- une analyse très qualitative des priorités nationales de recherche, telle qu'elle résulte d'une enquête récente faite par l'« *Eranet transport* »¹³⁵ ;
- un essai de « cartographie » des programmes actuels du PCRD, réalisé également récemment au ministère français des Transports¹³⁶.

A. Les priorités nationales de recherche sur les transports en 2004 (à travers une enquête de l'« Eranet transport »)

Une enquête faite à la fin 2004 par l'« *Eranet transport* » permet d'avoir une photographie très qualitative de la répartition des programmes nationaux de recherche sur les transports en Europe (225) par grande finalité et par grand thème¹³⁷.

On retrouve comme objectif majeur de ces programmes ceux des grandes plates-formes technolo-

131 C'est le cas notamment en France, en Grande-Bretagne et en Allemagne.

132 Cette comparaison n'a qu'un sens limité car une grande partie de la recherche est consacrée au développement.

133 Dont une partie finance l'aéronautique civile.

134 Source : Livre blanc de la Commission sur les transports, 2001, *op. cit.*

135 Source : Eranet transport, synthèse des programmes nationaux – 2005.

136 Source : Claude Miquel, DRAST, ministère de l'Équipement et des Transports, « *Une cartographie du 6^{ème} PCRD dans le domaine des transports de surface* », mai 2005.

137 Source : Eranet transport, « *Transnational transport research roadmap* », septembre

**Tableau n° 31 : Les priorités des programmes nationaux de recherche sur les transports en Europe
(en nombre de programmes)**

Classement	Objectifs prioritaires	Nombre de programmes	Thèmes prioritaires	Nombre de programmes
1	Compétitivité	123	Gestion du trafic	102
2	Efficacité des déplacements	120	Outils de modélisation et d'aide à la décision	97
3	Environnement	106	Systèmes d'information	84
4	Sécurité	84	Systèmes de transport intelligent	81
5	Satisfaction des usagers	62	- Intermodalité - Interopérabilité - Interfaces	73
6	Equité et accessibilité	38	- Politique publique - Dérégulation	64
7			Technologie des véhicules	62
8			Construction d'infrastructures	57
9			Outils de financement	46
10			Tarifcation	46
11			- Aménagement du territoire - Planification urbaine	45

Source : Eranet transport (2005).

* Le même programme peut avoir plusieurs objectifs et plusieurs thèmes.

giques : d'abord la compétitivité puis l'optimisation du trafic (efficacité), l'environnement et la sécurité. Au niveau des thématiques, *la priorité* (en nombre de programmes) *semble être fortement donnée à l'utilisation des nouvelles technologies de l'information et de la communication* pour la gestion des trafics, la logistique, la navigation (« véhicules intelligents »), la sécurité (**voir le tableau n° 31**). Il faut néanmoins tenir compte des montants attribués à chaque programme, ce qui conduit sans doute à sous-estimer fortement les budgets attribués aux technologies des véhicules¹³⁸.

□ La comparaison avec les États-Unis et surtout le Japon est intéressante. Aux États-Unis, l'accent est mis aujourd'hui essentiellement sur trois thèmes : l'énergie (avec un programme de 1,7 milliard de dollars sur cinq ans, lancé en 2003 sur la pile à combustible), l'application des technologies de l'information et du GPS à la route et au ferroviaire (*Federal Highway Agency*) et la sécurité aérienne (sécurité des avions et lutte anti-terrorisme).

□ Le Japon a un programme très ciblé sur 11 thèmes qui sont assez proches de ceux évoqués pour les Technologies-clés (voir partie IV). Il s'agit des thèmes suivants :

- la pile à combustible ;
- le train « Maglev » ;
- les systèmes de transports intelligents ;
- la mobilité des personnes âgées et handicapées ;
- les systèmes de péages électroniques ;
- la gestion de la demande de mobilité ;
- les infrastructures pour le transport de marchandises ;
- l'intégration des modes ;
- le télétravail ;
- les impacts sociaux de la mobilité ;
- et enfin, la co-construction interactive des politiques de transport.

Par rapport à l'Europe, il y a aux États-Unis et au Japon une volonté beaucoup plus claire de soutien aux « technologies émergentes », avec des programmes plus finalisés.

2004. L'enquête porte sur 225 programmes d'une quinzaine de pays.

138 Un autre biais de l'enquête tient à la sous-représentation des programmes aéronautiques, dans lesquels interviennent d'autres administrations que celles

B. Points forts et points faibles de la recherche communautaire : un essai de « cartographie »

Les transports sont restés depuis le milieu des années 90 un des thèmes importants de la recherche communautaire – avec dans l'actuel PCRD environ 1,7 milliard d'euros qui y sont consacrés. Mais les thématiques abordées ont sensiblement évolué depuis 15 ans :

■ Dans le 5^{ème} PCRD (1997-2001), le thème des transports était présent dans quatre actions-clefs différentes :

– le programme « *Technologies pour les transports terrestres et maritimes* », orienté vers les « technologies critiques » ;

– le programme « *Mobilité durable et intermodalité* », centré sur l'interopérabilité, la gestion du trafic et la socio-économie ;

– le programme « *Ville de demain* » qui portait sur la mobilité urbaine ;

– et enfin, le programme de soutien à *l'innovation dans l'aéronautique*.

■ Dans le 6^{ème} PCRD (2002-2006), les transports (hors aéronautique) ont été repositionnés sous le même chapeau « *Développement durable* » avec quatre grandes priorités :

– les procédés et processus de fabrication (conception, recyclage...) ;

– le rééquilibrage modal (corridors de fret, interopérabilité...) ;

– la sécurité et la congestion (politiques de sécurité routière, tarification des transports, techniques de sécurité) ;

– et enfin, les nouveaux concepts et technologies de transport (nouvelles motorisations, réduction du bruit, transports urbains innovants).

Il faut noter que dans ces deux programmes, une place relativement importante a été donnée aux transports maritimes – très fortement exposés à la concurrence internationale¹³⁹.

■ Ainsi libellés, les intitulés des programmes ne permettent pas d'avoir une idée précise des priorités européennes. Un exercice de « cartographie » récemment fait en France sur le 6^{ème} PCRD¹⁴⁰ – qui s'est attaché à reclasser les projets européens en une quinzaine de grands thèmes – permet cependant de combler en partie cette lacune. Sur un ensemble de 130 projets déjà soutenus pour un montant global de 560 millions d'euros, on constate (voir le schéma n° 10) que deux thèmes émergent comme priorité forte : *les systèmes d'aide à la conduite et les nouveaux carburants ou systèmes de propulsion*.

En fait, ce qui frappe, c'est la modestie de ces programmes, et en particulier des actions sur les nouveaux carburants et les systèmes de propulsion. Même en tenant compte de l'appel d'offre récemment lancé sur la pile à combustible¹⁴¹, **on arrive à un engagement annuel du PCRD sur les nouvelles formes de motorisation équivalent à un tiers des aides récemment décidées par le gouvernement américain pour les seules technologies de l'hydrogène et de la pile à combustible**¹⁴².

La relative modestie des projets (10 % seulement dépassent le seuil de 10 millions d'euros) pose également un problème majeur de taille critique – ou de coordination entre équipes de recherche travaillant sur le même thème¹⁴³.

Ce sont ces contraintes qu'il faut analyser plus en détail sur quelques exemples précis comme la pile à combustible ou les technologies de l'information.

des transports (économie et finances, défense...).

139 Environ 25 % pour les projets aidés par le 6^{ème} PCRD.

140 Source : Claude Miquel, ministère de l'Équipement, Direction de la Recherche : « *Un essai de cartographie du 6^{ème} PCRD dans le domaine des transports* », mai 2005.

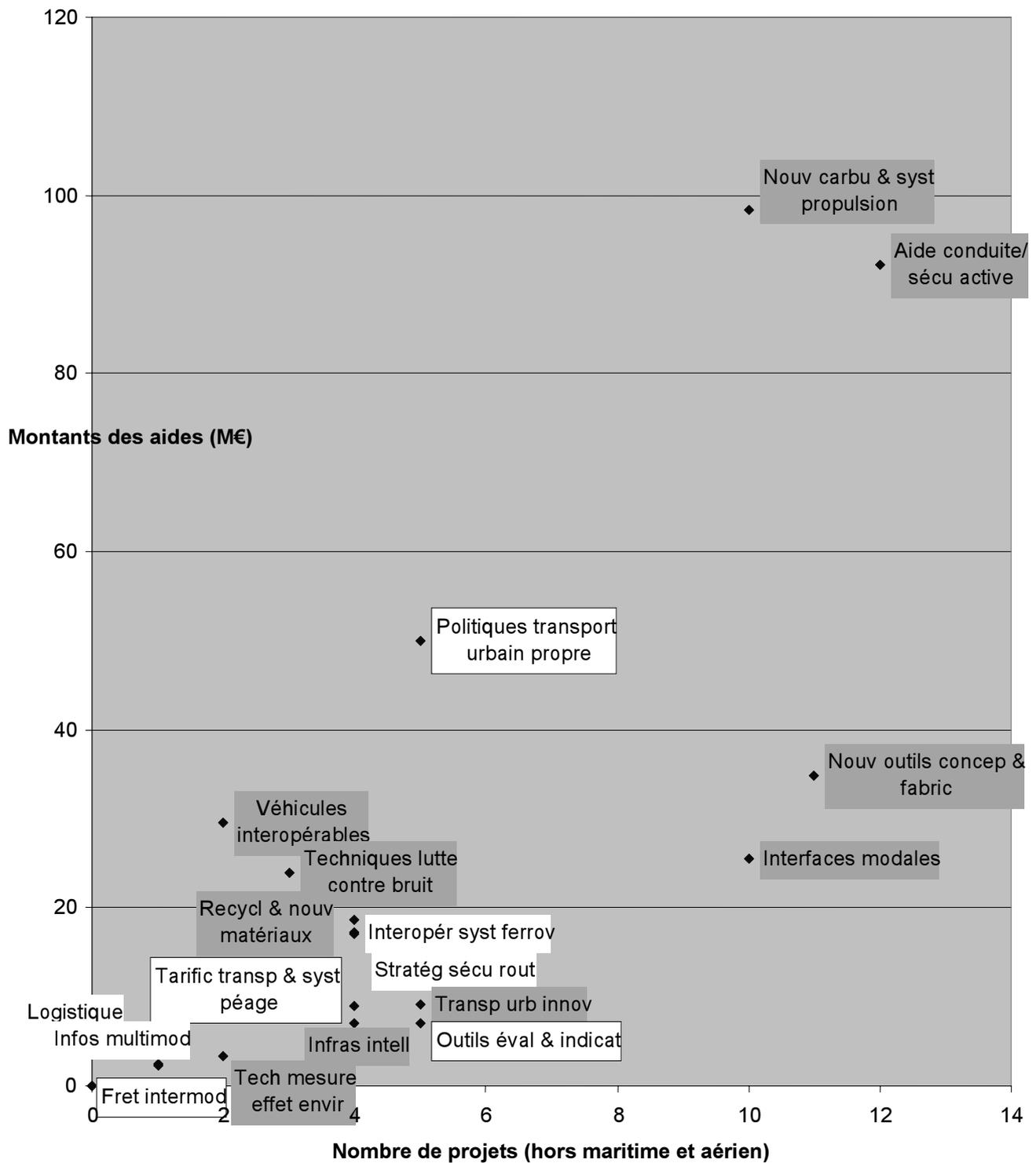
141 En fin 2004.

142 C'est ce rapport de 1 à 6 qui est également cité dans le rapport sur « l'hydrogène et la pile à combustible » publié en 2003 par la Commission (« *Hydrogen energy and fuel cells, a vision of our future* », DG Recherche et Transport, 2003).

143 Il faut remarquer cependant que la taille des projets nationaux est encore notoire-

Schéma n° 10 : 6^{ème} PCRD : la répartition des projets dans le domaine des transports

6^{ème} PCRD - Répartition des projets par axes de recherche agrégés
(en blanc : axes "socio-économiques" ; en gris foncé : axes "technologiques")



Source : DRAST, CPVST, 2005.

III. LE POSITIONNEMENT DE L'EUROPE SUR QUELQUES « TECHNOLOGIES-CLÉS » : UN RETARD PRÉOCCUPANT SUR LES TECHNOLOGIES ÉMERGENTES MAJEURES

La contrepartie paradoxale du positionnement remarquable des industries européennes dans le domaine des transports – et des efforts faits en matière de développement – est une faiblesse relative par rapport aux États-Unis, au Canada ou au Japon dans quelques secteurs-clés comme les moteurs hybrides, la pile à combustible ou l'application des nouvelles technologies de l'information et de la communication. Dans ces domaines, l'investissement des entreprises est conditionné par la capacité des pouvoirs publics à stabiliser les anticipations de marché et à réduire les incertitudes technologiques. C'est ce que les États-Unis et le Japon ont pour l'instant mieux réussi à faire, même si l'Europe est depuis une date très récente en train de combler ce retard. Il n'est naturellement pas possible de faire une analyse du positionnement européen sur toutes les Technologies-clés. On se limitera à deux exemples : la pile à combustible et l'application des nouvelles technologies de la communication (ITS) à la gestion du trafic routier.

C. Le retard européen sur la pile à combustible

□ L'Europe ne s'est réengagée dans les recherches sur la pile à combustible qu'à partir de 1986 – toutes les activités dans ce domaine ayant été arrêtées après l'abandon de la navette « Hermès ». Après ce démarrage relativement lent durant la période du second programme cadre (8 millions d'euros entre 1988 et 1992 !), les financements européens se sont accélérés ; d'abord au cours du 5^{ème} programme d'action (150 millions d'euros entre 1999 et 2002) puis surtout tout au long du 6^{ème} programme (2003-2006) où ils devraient atteindre 250 à 300 millions d'euros. En apparence très important, ce budget global, étalé sur cinq ans, doit être comparé aux 1,8 milliard de dollars que le Président des États-Unis a décidé en

2003 de consacrer à l'hydrogène et à la pile à combustible pour la période 2004-2008 (à travers « l'hydrogen fuel initiative »)¹⁴⁴. On est bien dans une proportion de 1 à 5, voire 1 à 6 par rapport aux États-Unis.

□ Si l'on s'intéresse aux seules *applications de la pile à combustible aux transports*, la situation relative de l'Europe par rapport aux États-Unis et au Japon est encore plus défavorable, non pas tant au niveau des budgets publics, mais – ce qui est plus grave – à celui des stratégies industrielles. On estime qu'en 2003-2004, les financements publics consacrés par les États-Unis à l'ensemble des applications de l'hydrogène et de la pile à combustible au secteur des transports se sont élevés à 165 millions de dollars¹⁴⁵, contre 195 millions au Japon mais seulement 35 à 45 millions pour les programmes communautaires (avec, en 2004, le lancement d'un appel d'offre de 35 millions d'euros spécifiquement consacré à ce thème)¹⁴⁶. Même si l'on tient compte des programmes nationaux – anglais, français, allemands, suédois... –, d'un ordre de grandeur souvent inférieur : 10 millions d'euros, il est clair que les écarts sont importants avec les autres grandes régions économiques concurrentes de l'Europe.

□ Les différences sont encore plus grandes au niveau des stratégies industrielles. Si l'on analyse les *dépôts de brevets « européens »* depuis 1995, et si l'on met à part le cas de Siemens et de Jülich, qui font surtout des recherches sur les applications stationnaires¹⁴⁷, on constate que *seuls Daimler-Benz et Johnson Matthey* (firme anglaise spécialisée dans l'utilisation de platine) *apparaissent parmi les 15 premiers déposants mondiaux (voir le tableau n° 32)*¹⁴⁸, alors que Toyota, General Motors, Honda et Nissan se situent en bonne place. En outre, dans le domaine « stratégique » des PEMFC (« piles à membranes échangeurs de protons »)

ment plus faible et pose encore plus un problème de masse critique.

144 Source : Office de la science (auprès de la Maison Blanche).

145 Source : IPTS, *op. cit.*

146 *Joint call on component development and system integration of hydrogen and fuel cells for transport and other applications*, mars 2004.

147 Même si Siemens fait aussi quelques recherches sur les sous-marins et l'utilisation de l'hydrogène dans les bus.

Tableau n° 32 : Les dépôts de brevets sur la pile à combustible depuis 1995

	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	1995-2002
Total n° of European fuel cell patents	109	111	177	172	306	415	565	247	2 102
Siemens Aktiengesellschaft (Germany)	8	14	30	7	19	46	51	3	178
Ballard Power Systems (Canada)	9	7	8	15	24	27	36	9	135
Matsushita Electric Industrial (Japan)	0	4	6	4	16	23	21	15	89
Forschungszentrum Julich (Germany)	4	6	13	8	8	13	28	6	86
International Fuel Cells (U.S.)	4	5	2	15	18	17	3	0	64
Toyota (Japan)	7	2	5	7	19	7	15	2	64
General Motors Corporation (U.S.)	1	1	5	4	6	19	4	2	42
Honda (Japan)	0	5	3	0	3	6	13	7	37
DaimlerChrysler (Germany)	0	0	0	1	5	11	10	7	34
Nissan Motor Co (Japan)	0	0	0	0	0	1	20	9	30
Sulzer Hexis (Switzerland)	3	5	2	1	3	2	6	2	24
Johnson Matthey (U.K.)	1	2	4	3	4	2	7	1	24
Proton Energy Systems (U.S.)	0	0	2	5	6	8	1	0	22
OMG (Germany)	0	0	1	1	4	0	10	2	18
Nippon (Japan)	2	1	0	1	1	7	5	0	17
Du Pont de Nemours	8	2	3	0	0	3	1	0	17
Motorola Inc. (U.S.)	0	0	0	1	1	3	7	3	15
Plug Power Inc. (U.S.)	0	0	0	3	3	7	1	0	14
Nuvera Fuel Cells (Italy)	0	2	1	1	3	1	3	1	12
3M Innovative Properties Company (U.S.)	0	0	0	0	3	5	3	1	12
Hydrogenics Corporation (Canada)	0	0	1	0	0	0	6	3	10
Manhattan Scientifics (U.S.)	0	0	0	0	1	2	6	0	9

Source : European patent register.

– qui sont les mieux adaptées aux transports, les dépôts de brevets des entreprises européennes ont diminué entre 1998 et 2002 – alors que leurs homologues japonais et américains augmentaient les leurs.

Si l'on excepte, là encore, Daimler-Benz-Chrysler, on observe que les entreprises européennes sont absentes des deux grandes alliances technologiques qui structurent la recherche industrielle dans le domaine des piles à combustible pour les transports, la première associant Ballard, Ford, Daimler-Benz, Johnson Matthey, Shell et Exxon-mobil, la seconde General Motors, Toyota, Denson, Panasonic, Dow

chemical, Amoco et Arco. Comme le montre le **tableau n° 33**, seule, en fait, une société dans le monde – *Ballard power systems* (Canada) a l'avantage d'être présente sur les quatre « segments » technologiques qui interviennent dans la fabrication des piles : les membranes et catalyseurs, le cœur de pile, l'intégration des systèmes et la production ou le stockage de l'hydrogène.

Cela ne veut naturellement pas dire que les grandes entreprises européennes (autres que Daimler-Benz) se désintéressent actuellement de ce thème ou qu'elles ont accumulé, un retard irrattrapable : mais cela donne la mesure des efforts qui

Tableau n° 33 : Les sociétés mondiales présentes sur les différents « segments » de la pile à combustible utilisable pour la traction automobile

System Integration	PEM Fuel Cell Stack
AlliedSignal Ansaldo Ricerche Ballard Power Systems DaimlerChrysler Ford General Motors Honda International Fuel Cells Mitsubishi Motor Nissan Plug Power Toyota	AlliedSignal Ballard Power Systems DeNora, E-Tek DaimlerChrysler Energy Partners General Motors Honda H-Power International Fuel Cells Mitsubishi Motor Nissan Plug Power Siemens Toyota
Membrane and Catalyst	Fuel Processor
3M Asahi Chemical Asahi Glass Ballard Power Systems Dow Chemical DuPont Gore Hoechst Johnson Matthey W.L. Gore	A.D. Little (Epyx) Amoco Atlantic Richfield Ballard Power Systems DaimlerChrysler General Motors Honda International Fuel Cells Johnson Matthey Mitsubishi Oil Mobil Oil/Exxon Shell Oil Toyota Wellman CJB

Source : Steineman, 1999.

devront être faits en Europe notamment pour mobiliser les acteurs industriels – aujourd’hui peu impliqués – situés en « amont » des transports : fabricants de membranes, électrodes, céramiques, nouveaux matériaux, etc.

□ L’Europe n’a pas non plus complètement rattrapé le retard qu’elle avait pris en matière de structuration de la recherche et de l’innovation par rapport aux autres grandes régions économiques mondiales. Malgré la multiplication des initiatives prises par la Commission en 2003-2004 (rapport du *High Level Group* de 2003¹⁴⁹, création de la plate-forme technologique européenne sur l’hydrogène et les piles à combustible en 2004, appel d’offre de la DG Recherche, également en 2004, lancement des projets sur l’hydrogène dans le cadre de l’initiative européenne de crois-

sance et du programme *Quick Start*, signature de l’*International Partnership for the hydrogen economy* – avec une dizaine de pays dont les États-Unis, la Chine et la Russie...), malgré aussi des succès concrets sur des « niches » comme les transports urbains¹⁵⁰, l’Europe est loin d’avoir achevé la mise en place de structures efficaces de pilotage et de partenariats nécessaires à une transition vers l’économie de l’hydrogène. L’intégration entre les politiques nationales de recherche et la politique européenne reste insuffisante. Il manque encore une stratégie à long terme capable de stabiliser les anticipations des acteurs économiques (mesures, incitations, objectifs choisis).

Dans la compétition financière et organisationnelle qui s’est engagée depuis le début du siècle avec les États-Unis et le Japon, mais aussi

148 Les données pour 2002 ne reflètent qu’une partie de l’année.

149 Source : European Commission, « Hydrogen energy and fuel cells – a vision of our future ».

150 Projet CUTE/ECTOS de démonstration de 33 bus à hydrogène dans dix villes euro-

Tableau n° 34 : « "L'explosion" des initiatives internationales sur l'hydrogène et la pile à combustible depuis les années 2000 : le positionnement de l'Europe »

Fonction	Etats-Unis	Japon	France	EU	Canada
Coordination des activités de recherches scientifiques	DOE (Hydrogen. Fuel Cells & Infrastructure) Technologies Program) FreedomCar	FCCJ Programme METI	GDR CNRS (PEM et SOFC) Pan-HI (pôle recherche ; <i>proposition</i>)	Repose principalement sur les Etats Membres	Programme CNRC (dont Institute for Fuel Cell Innovation)
Coordination recherche-industrie	FreedomCar	FCCJ	Réseau PACo (par projets) Pan-H (pôle Technologies et	Projets 6 ^{ème} PCRD / HFP	Programme CNRC
Standardisation et certification	SECA (Programme module pile)	FCCJ	PACo (projet SEREPAC par exemple) Pan-H (tâches transversales ; <i>proposition</i>)	FEBUSS (Projet module pile) European Integrated Hydrogen Project (EHP. 5 m euros) / HFP	
Soutien aux marchés précoces	Diverses incitations à l'achat et/ou à l'investissement au niveau des États. Achats publics civils et militaires	Achat de véhicule à PàC et piles co-génération par METI	Achats publics militaires	Nombreuses mesures d'incitation à l'achat et/ou à l'investissement par États	Early Adopters Program
Démonstration des premières générations de piles	California FC Partnership DOE, DoD Residential PEM Démonstration	FCCJ / JHFC Demonstration Project	Pan-H (pôle démonstration: <i>proposition</i>) PACo (projets type « Pile à	Projets 6 ^{ème} PCRD/ HFP, Lighthouse projects Quick Start Initiative	Hydrogen Airport (Montreal), Highway (Vancouver). Village
Orientation stratégique	DOE (Vision, Roadmap. Action plan)	FCCJ (roadmap)	Plan d'Action Pan-H (proposition)	HFP (<i>Deployment Strategy</i>) HyNet (roadmap)	Fuel Cell Canada (<i>Roadmap</i>)
Instauration de performances-cibles et infra technologies	FreedomCar (PEM) SECA (SOFC) DOE	FCCJ (au sein de la roadmap)	Pan-H (par appel à proposition)	HFP (SRA)	

Source : Technopolis et DRAST, ministère français des Transports, mai 2005.

avec la Chine¹⁵¹ et le Canada sur ce thème de l'hydrogène et de la pile à combustible (voir tableau n° 34), l'Europe n'apparaît pas aujourd'hui comme particulièrement performante, au regard de son potentiel industriel et de ses capacités scientifiques¹⁵². C'est une situation que l'on observe également pour les nouvelles technologies de l'information et de la communication, mais pour une raison très différente.

D. Des opportunités mal exploitées dans le domaine des « systèmes de transports intelligents » (ITS)

Dans le domaine des transports intelligents et de l'usage des nouvelles technologies de l'information et de la communication, le retard de

l'Europe par rapport aux États-Unis et au Japon, qui est également important¹⁵³, s'explique moins par des raisons liées à l'offre de recherche que par une articulation insuffisante entre les stratégies et politiques de prix des entreprises et les politiques publiques. Les capacités scientifiques et industrielles existent ; les budgets de recherche sont d'un ordre de grandeur comparable à ce qu'ils sont aux États-Unis et au Japon (100 millions d'euros consacrés par le 6^{ème} PCRD aux aides à la conduite, une dizaine au « infrastructures intelligentes », etc.) ; mais les pays européens et la Commission ont des politiques d'accompagnement et d'aide au développement qui apparaissent comme beaucoup moins efficaces que celles menées depuis de très nombreuses années avec une grande continuité par les États-Unis et surtout le Japon¹⁵⁴.

peennes différentes pour un coût de 100 millions d'euros.

151 La Chine a un programme très ambitieux de développement de la pile à combustible dans les transports.

152 Source : Technopolis et DRAST (ministère français des Transports), « *Éléments d'une stratégie de recherche pour la pile à combustible* », 2005.

153 Il s'agit dans ce paragraphe uniquement des applications des nouvelles technologies de l'information et de la communication à l'automobile et aux transports routiers.

154 Voir l'analyse faite par J.-L. Ygnace : « *Les formes sociales de l'innovation*

□ Aux États-Unis, le développement des transports intelligents (hors aides à la conduite) a été fortement favorisé par la mise à disposition gratuite des infrastructures GPS, sur lesquelles s'appuient la plupart des applications ITS ; et par une politique très active d'aide fédérale aux « expérimentations » locales (*ITS deployment incentive program*). Sur les 232 millions de dollars consacrés en 2003 aux transports intelligents par le budget fédéral américain, plus de la moitié allait ainsi à ces projets de *démonstration locale*, contre seulement 52 millions à la recherche développement et un peu moins de 50 pour les actions support (normalisation, évaluation, intégration de systèmes...). L'orientation actuelle est de mieux prendre en compte dans ces interventions publiques les préoccupations relatives à la sécurité.

□ Au Japon, le déploiement des ITS, amorcé depuis plusieurs décennies¹⁵⁵, s'est inscrit à la fois dans la politique industrielle de l'État et dans une politique de régulation des trafics novatrice et très active.

Dès 1973 le programme de recherche CACS (*comprehensive automobile traffic control system*) a validé la faisabilité technique de systèmes communicants embarqués de navigation et développé des expérimentations sur des flottes de véhicules dans une partie de Tokyo... Après avoir multiplié les centres de contrôle du trafic, le gouvernement a mis l'accent à partir de 2001 sur le télépéage et les systèmes de communication véhicules-infrastructure (« *Dedicated short range communication* »). Aujourd'hui (2003), 14 millions de véhicules sont équipés de systèmes de navigation embarqués, 9 de systèmes d'information trafic (vics) et 2 de systèmes de télépéage. Dans tous ces domaines les taux d'équipement sont très supérieurs à ceux de l'Europe, ce qui permet à la fois des baisses de prix et le développement de nouvelles innovations.

Même s'il ne faut pas négliger les spécificités propres à l'Europe (multiplicité des pays, problèmes de standardisation et de traduction...), on voit bien que dans ce domaine des technologies de l'information et de la commu-

nication, les politiques de recherche sont indissociables des objectifs et de l'implication des politiques publiques (normes, infrastructures, systèmes de contrôle...).

E. Une mise en réseau de l'offre européenne de recherche publique encore insuffisante

Les faiblesses de la recherche européenne sur les transports ne tiennent pas seulement à la prudence des entreprises par rapport à un certain nombre de technologies émergentes ou aux problèmes de coordination entre innovation industrielle et politiques publiques. Elles sont aussi liées à la difficulté de mettre en réseau les structures de recherche publique à l'échelle européenne. Dans un domaine comme les transports ou les efforts respectifs de la recherche publique et de la recherche privée sont dans un rapport de 1 à 20, ces questions de mise en réseau – et donc de taille critique – sont pourtant essentielles en termes de capacité réelle d'innovation à long terme.

En 2003, à l'initiative de l'INRETS¹⁵⁶, 16 des plus grands instituts publics de recherche européens travaillant dans le domaine des transports terrestres (voir la liste en encadré) se sont associés pour créer l'« *European conference of surface transport research institute* » (ECTRI).

L'objectif majeur de l'ECTRI est de rassembler autour d'une vision commune les instituts de recherche en transport les plus reconnus dans une Europe élargie comprenant les Balkans. Cette collaboration vise également à rationaliser l'utilisation des fonds européens, à promouvoir les échanges d'information entre pays participants, à faciliter la mobilité entre chercheurs, à créer un réseau d'infrastructures scientifiques européennes, et finalement, à ouvrir la recherche européenne sur les autres « régions » mondiales, les États-Unis, le Japon, la Chine, l'Australie, l'Inde... Le réseau s'est fixé un programme d'activité pour trois ans qui porte notamment sur la mobilité des chercheurs, les infrastructures de recherche, les

technique dans le domaine des transports intelligents », Inrets et Predit, mars 2004.

¹⁵⁵ Le gouvernement japonais a investi systématiquement et massivement dans le domaine du contrôle du trafic depuis 30 ans au travers de programmes quinquennaux successifs. On estime l'investissement dans ce secteur à 1,5 milliard d'euros pour la seule période 1985-1992 (source, J.-L. Ygnace, *op. cit.*).

Encart : les organismes de recherche d'ECTRI

- AVV – Transport Research Center (Rotherdam – Pays-Bas)
- CDV – Centrum Dopravæho Ṽzkumu (Brno, Tchequie)
- DLR – Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt (Berlin, Allemagne)
- DTF – Danmarks TransportForskning (Lyngby – Danemark)
- FHG-IVI – Fraunhofer-Gesellschaft, Institut fuer Verkehrs und Infrastruktursysteme (Dresden – Allemagne)
- HIT – Hellenic Institute of Transport (Thessalonique – Grèce)
- INRETS – Institut Natinal de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (Bron – France)
- KTI – Közlekedéstudományi Intézet Rt. (Budapest – Hongrie)
- POLITO – Politecnico di Torino, Department of Hydraulics Transports & Civil infrastrucutres (Italie)
- TNO – Netherlands Organisation for applied Scientific Research (Delft – Pays-Bas)
- TOI – TransportØkonomisk Institutt (Oslo – Norvège)
- TRL – Transport Research Laboratory Limited (Crowthorne, UK)
- UPM - Universidad Politecnica de Madrid (Espagne)
- VTI – Statens Væg-och Transportforskningsinstitut (Linköping, Suède)
- VTT – Technical Research Centre of Finland (Helsinki, Finlande)
- TTEF – Technical University of Belgrade
- TMI-VGTU – Vilnius Gediminas University – Transport Research Institute
- LNEC – Transport Network Department (Lisbonne, Portugal)

Source : ECTRI.

réseaux d'excellence et la définition de thèmes de recherche innovants.

□ Tout en constituant un pas en avant important dans la structure de la recherche européenne sur les transports, **ECTRI n'en reste pas moins une initiative très limitée par rapport à son « homologue » américain, le « Transport research board » (TRB)**. Créé en 1920, le TRB est aujourd'hui le plus gros conseil des trois académies nationales des sciences, de l'ingénierie et de la médecine avec un budget de près de 50 millions de dollars, un staff de plus d'une centaine de personnes, des conférences annuelles qui réunissent près de 9 000 personnes

et la capacité à réunir les pouvoirs publics, les chercheurs, les professionnels et les consultants appartenant à *tous* les domaines des transports dans une même structure. TRB est à la fois un « conseil d'orientation à long terme » pour la recherche américaine sur les transports, un service d'information et de valorisation, un forum mondial, un centre d'analyse et de synthèse des résultats et une organisation professionnelle. Comme on le constate, la distance entre le « Transport research board » et ECTRI reste donc aujourd'hui tout à fait considérable – ce qui est un autre point de faiblesse majeur de la recherche européenne.

IV. CONCLUSION DE LA PARTIE V ET ANALYSE SWOT DE LA RECHERCHE SUR LES TRANSPORTS

Même si les éléments d'information dont on dispose sur la recherche européenne dans le domaine des transports sont – comme on l'a indiqué à plusieurs reprises – à la fois incomplets et disparates, leur rassemblement permet néanmoins de porter un diagnostic relativement clair sur la situation globale de cette recherche – et plus généralement de l'innovation dans les transports – en 2005. **C'est ce diagnostic synthétique qui est présenté dans la**

matrice « SWOT » (forces, faiblesses, opportunités, menaces) jointe à la page suivante.

Comme on le constate, le bilan est contrasté, avec à la fois une forte dynamique d'ensemble et des retards importants sur les « technologies de rupture ». Cela suggère qu'il faudrait compléter cet état des lieux global par des analyses détaillées technologie par technologie – ce qui malheureusement n'a pas pu être fait dans ce premier document.

Les forces et faiblesses de la recherche européenne sur les transports : la matrice « SWOT »

FORCES

- De fortes capacités scientifiques dans la plupart des disciplines concernées : sciences de l'ingénierie, génie mécanique, génie civil, mécanique des fluides, électronique, acoustique, énergétique, mathématiques appliquées, traitement du signal...
- De grands leaders mondiaux dans la plupart des secteurs : automobile et véhicules utilitaires, aéronautique, transports ferrés à grande vitesse, navires « complexes ».
- Le premier secteur d'exportation européen (40 % des exportations commerciales) et une forte compétitivité à l'échelle mondiale.
- Près du quart de la recherche privée européenne et un dynamisme à l'innovation important (3^{ème} rang européen pour les performances en matière d'innovation).
- Une contribution aux dépôts de brevets européens supérieur à 60 % pour tous les modes.
- Un niveau technologique élevé dans les domaines de la motorisation, de l'électronique, des pneumatiques, des filtres à particules...
- Des normes européennes élevées incitatives à l'innovation et une politique européenne claire (Livre Blanc).
- Des plates-formes technologiques qui ont défini des stratégies à moyen terme partagées et des « roadmaps » (ACARE, ETRAC, ERRAC, ERAMAR).
- Un début de mobilisation européenne sur l'hydrogène et les carburants du futur.

OPPORTUNITES

- L'ouverture et le développement des marchés dans les pays de l'élargissement et les pays émergents : perspective de multiplication par 3 du parc automobile mondial à l'horizon 2050 ; et marché de 2000 milliards de dollars sur 20 ans pour l'aéronautique (dont plus du tiers en Asie).
- De fortes incitations à l'innovation liées à la mise en œuvre de la normalisation européenne et aux engagements volontaires des industriels (accord ACEA sur les émissions de gaz à effet de serre...).
- La prise de conscience d'une possible crise majeure liée à la pénurie de pétrole et au changement climatique et l'éventuelle « prime à l'innovation » résultant de la capacité des industries européennes à anticiper ce risque.
- La mise en œuvre du programme Galiléo et la multiplicité de ses applications possibles à la gestion de la mobilité.
- L'intégration progressive dans les transports des changements majeurs liés aux technologies de la communication et d'identification des personnes et des marchandises (RFID, réseau et véhicules intelligents, gestion intermodale de la mobilité, etc.).
- La modernisation et l'extension aux petites et moyennes entreprises de la logistique.
- La constitution progressive d'un espace européen des transports s'accompagnant d'effets d'échelle positifs (interopérabilité des réseaux, décloisonnement de stratégies nationales...).
- La mise en réseau et les effets de démonstration à l'échelle européenne des expérimentations locales (programmes CIVITAS, CUTE/ECTOS...).
- La multiplication des initiatives nationales ou internationales récentes en matière de recherche sur la pile à combustible et les biocarburants.

FAIBLESSES

- Une fragmentation de l'espace européen des transports, du système industriel et des réseaux réduisant les économies d'échelle et la diffusion des innovations (effets « frontières », non interopérabilité des réseaux...).
- Une inertie du « système technique » défavorable à l'émergence de technologies de rupture.
- Un retard de l'Europe dans les technologies émergentes : pile à combustible (PEMFC), moteurs hybrides, biofuels...
- Un retard dans l'intégration des nouvelles technologies de l'information et de la communication par rapport au Japon et aux Etats-Unis, dû, notamment, à une articulation insuffisante entre politique publique et innovation privée.
- Un secteur plus « diffuseur » que « créateur » de nouvelles technologies ; et – en conséquence – un déficit d'image par rapport aux domaines de « haute technologie » (télécom, biotechnologies...). Des relations mal explicitées avec les « technologies convergentes » (nanotechnologies...).
- Une faiblesse chronique des budgets et des structures de recherche publique nationaux consacrés spécifiquement aux transports, avec une forte hétérogénéité entre pays.
- Un fonctionnement en réseau de la recherche européenne moins performant qu'aux Etats-Unis (TRB) et un effort communautaire de recherche sensiblement plus faible.
- L'absence de stratégie européenne à long terme claire sur les alternatives aux moteurs à combustion interne – face aux risques liés à l'effet de serre et à la pénurie de pétrole.
- Un manque d'incitation à la recherche dans plusieurs domaines majeurs : « camions du futur », véhicules spécifiquement urbains, compatibilité électromagnétique, nouvelles énergies et motorisation pour les avions et les navires, application des nanotechnologies, nouveaux concepts de mobilité...

MENACES

- Un risque de perte de compétitivité de l'industrie européenne et de déplacement des unités de production et des marchés hors de l'Europe (Asie, Amérique latine...).
- Une possible crise des transports liée à l'incapacité d'anticiper les effets liés à la pénurie d'énergie, à la hausse des coûts, à l'effet de serre, et à la vulnérabilité des réseaux.
- La réduction des financements et la baisse des investissements consacrés aux transports publics et infrastructures (et notamment au réseau européen).
- La faible acceptabilité des consommateurs à payer pour les nouveaux services de mobilité ou les nouvelles technologies de communication et d'assistance à la conduite.
- La fragilité des modèles économiques dans des domaines d'innovation comme les transports à la demande ou les techniques de positionnement.
- Les désincitations à l'innovation liées à l'extension des modes de transport « low cost » : voiture à prix réduit...
- Le désinvestissement scientifique des chercheurs dans les domaines liés aux transports : génie mécanique, génie civil, science de l'ingénieur.
- La difficulté à construire des stratégies européennes de recherche à long terme cohérentes et le risque de repli sur des programmes nationaux ayant une masse critique insuffisante.
- Un manque de vision à long terme et de prise de risque des acteurs publics et privés européens.

**CONCLUSIONS
FINALES
ET RECOMMANDATIONS**

CONCLUSIONS FINALES ET RECOMMANDATIONS

L'analyse « SWOT » précédente, comme l'ensemble du rapport, débouche finalement sur deux visions très contrastées de la situation de l'innovation dans les transports en Europe :

– d'un côté, l'image d'un secteur occupant une place tout à fait centrale dans la recherche technologique européenne, avec un fort potentiel de développement futur à l'échelle mondiale ;

– de l'autre, la crainte qu'une recherche européenne trop éclatée et centrée sur le court terme soit incapable de répondre aux défis majeurs qui vont être ceux des transports d'ici 2030-2050.

À l'ambiguïté de ce diagnostic s'ajoute une difficulté supplémentaire qui est le manque de transparence dans les programmes publics ou privés de recherche ; un manque de visibilité qui fait obstacle à la valorisation des éventuelles complémentarités entre projets de recherche à l'échelle européenne.

L'hypothèse d'une possible crise majeure des transports à l'horizon 2050, jointe à ce constat de fragmentation de la recherche européenne, conduit à faire les cinq recommandations suivantes :

Recommandation 1 :

En complément de l'analyse qualitative lancée en 2005 par l'« Eranet transport », réaliser d'urgence une évaluation quantitative, à un niveau fin, des programmes nationaux, publics et privés de recherche et d'innovation menés aujourd'hui (ou envisagés) dans les transports dans les vingt-cinq pays européens et au niveau de la Commission – avec les indicateurs correspondants (nombre de chercheurs, brevets, publications...). Effectuer, dans le champ des Technologies-clés considérées

comme prioritaire, une comparaison avec les programmes américains, japonais, coréens ou chinois.

Recommandation 2 :

Pour éviter les biais liés aux analyses par grande technologie ou par mode (comme c'est le cas dans les « plateformes technologiques »), **développer des analyses stratégiques à long terme par grande catégorie d'objectifs de la politique des transports** : compétitivité, sécurité, environnement et énergie, accès à la mobilité, confort des usagers, transitions vers une économie de l'hydrogène. Ce n'est qu'une fois ces évaluations stratégiques achevées qu'il pourrait être envisagé de classer les options les plus efficaces (**dont** les Technologies-clés) – par rapport à une grille multicritères synthétique.

Recommandation 3 :

Compte tenu à la fois du retard pris par l'Europe par rapport aux États-Unis ou au Japon et à l'absence de taille critique des programmes nationaux, **recentrer la recherche européenne (7^{ème} PCRD) sur les technologies de « rupture »** (pile à combustible, nouveaux concepts en matière de déplacement hybrides rechargeables, biocarburants de seconde génération, etc.) **et sur les innovations permettant d'accompagner la mise en œuvre des futures politiques européennes** de transport (interopérativité des réseaux, application de Galiléo...). Ce double « recentrage » devrait conduire à rééquilibrer fortement la « recherche transport » au profit des programmes européens, et donc à augmenter sensiblement le budget qui leur est affecté (doublement ou triplement du 6^{ème} PCRD).

Recommandation 4 :

De manière à éviter « l'enclavement » de recherches sur les transports par

rapport aux dynamiques globales d'innovation, faire une **analyse prospective approfondie des « potentialités » liées aux futures technologies génériques** – nanotechnologies, biotechnologies, sciences cognitives, technologies de la communication – en prenant naturellement en compte les risques éventuels liés à leur utilisation. Dans cet effort de « recouplage » entre techniques génériques et techniques de transport, une attention spécifique mériterait d'être portée aux **sciences de la complexité** et à leur application au problème de la **vulnérabilité** des systèmes de transport futurs.

Recommandation 5 :

À partir du réseau ECTRI déjà existant et de l'Eranet transport, **mettre en place les incitations et les structures nécessaires pour évoluer progressivement vers une organisation européenne de la « recherche transport » comparable au TRB américain** avec les moyens d'échange, de réflexion, de coopération ou d'expertise correspon-

dants. Par rapport aux réseaux existants, ce « **Transport Research Board européen** » devrait avoir la particularité d'être transversal aux différents modes – l'un de ses objectifs étant de favoriser les transferts technologiques entre modes (transports terrestres, maritimes, aéronautique, spatial...).

À plus long terme, on peut imaginer que cette plate-forme commune pourra permettre de créer en Europe deux ou trois instituts européens multidisciplinaires ayant une visibilité comparable à celle du MIT aux États-Unis.

□ Ces cinq orientations devraient permettre d'asseoir la dynamique d'innovation dans les transports sur une base durable et de permettre ainsi à l'Europe de garder à long terme le leadership mondial qu'elle a désormais acquis dans ce domaine – tout en répondant aux défis majeurs de la préservation de l'environnement et de la construction d'un espace élargi.

ANNEXES :

Annexe 1 : Quelques caractéristiques de la recherche automobile en France (FUTURIS)

Annexe 2 : Controverses et incertitudes technologiques sur l'utilisation de l'hydrogène et de la pile à combustibles dans les transports terrestres (TECHNOPOLIS)

Annexe 3 : Les biocarburants de seconde génération : des perspectives controversées

QUELQUES CARACTÉRISTIQUES DE LA RECHERCHE AUTOMOBILE EN FRANCE

ANRT, FUTURIS, NOV. 2005*

A. Points clés du secteur

□ Le secteur automobile représente environ 10 % du PIB industriel français. Les deux constructeurs, bien implantés sur les marchés domestique et européen d'une part et en passe de combler leur déficit de présence sur les marchés extra-européens d'autre part bénéficient d'un positionnement concurrentiel plutôt favorable.

□ Les équipementiers, pour leur part, représentent aujourd'hui 75 % du coût de production d'un véhicule. Ils assument une part significative de la pression à la baisse des coûts de production, à laquelle l'installation de centres de production dans des pays à coûts salariaux inférieurs n'est sans doute pas étrangère.

□ Le tissu industriel français est enfin caractérisé par la quasi-absence de sociétés de prestation d'ingénierie, très actives par exemple en Allemagne et en Autriche. Il semble pourtant à la fois possible et souhaitable de voir de tels prestataires se développer qu'ils soient privés ou semi-publics, d'autant plus que les principaux défis technologiques des constructeurs (fiabilité d'un système électronique complexe) ne sont encore confiés à aucun prestataire extérieur.

□ La R&D, qui représente près de 4 % du CA des constructeurs et près du double pour les équipementiers, est essentiellement incrémentale. Orientée vers la maîtrise des coûts de production d'une part et l'amélioration du produit d'autre part, elle n'a qu'une influence partielle sur deux défis majeurs des constructeurs que sont leur positionnement concurrentiel et leur capacité à répondre à la réglementation.

□ Une exception importante au constat précédent tient à la maîtrise de la consommation énergétique et des émissions en CO₂, pour laquelle des ruptures technologiques radicales sont encore nécessaires, dépassant sans nul doute les efforts que les constructeurs sont capables de mobiliser par eux-mêmes.

□ Les entretiens menés dans le cadre de cette étude laissent entendre que l'affirmation du rôle des équipementiers, y compris en matière d'innovation, occasionne des remises en question de l'organisation « hiérarchique » de la branche et que certains autres pays comme les États-Unis bénéficient sans doute d'une certaine avance sur ce point.

B. Définition du périmètre

On peut identifier deux principaux types d'acteurs dans la branche de la construction automobile : les constructeurs et les équipementiers, ces derniers représentant aujourd'hui 75 % du coût de production d'une voiture. Les constructeurs français seraient plutôt qualifiés de « généralistes », par opposition aux « spécialistes » (e.g. Porsche).

Les prestataires de service d'ingénierie forment un troisième type d'acteurs, quasiment absent en France mais jouant un rôle important (cf. *infra*).

C. Le poids économique du secteur

Représentant environ 10 % du PIB industriel national, la branche automobile fait partie des industries les mieux installées en France.

Les deux constructeurs nationaux (PSA et Renault) sont bien implantés sur le

* Source : FUTURIS, Définir les priorités de recherche et d'innovation : vers un outil adapté aux spécificités sectorielles. Nov. 2005. ANRT.

marché domestique, où leur taux de pénétration (30 à 40 %) est comparable à ce qui s'observe à l'étranger, et au niveau européen où ils sont respectivement 2^{ème} et 4^{ème} en termes d'unités produites. Ils ne semblent pas fortement menacés sur ces marchés, en dépit des scénarios pessimistes régulièrement annoncés. Leur pénétration des marchés extra-européen, comparativement faible (seulement 20 % de leur chiffre d'affaires), constitue à l'inverse une faiblesse historique qu'ils sont actuellement en train de combler (alliance Renault-Nissan et implantation de PSA en Chine et en Amérique du Sud). Ce mouvement est d'autant plus nécessaire que c'est bien hors Europe que se trouvent les marchés à conquérir. En effet, tandis que la croissance annuelle des ventes est inférieure à 1 % en France et que les marchés de la triade sont saturés, la demande des pays en voie de développement croît rapidement. Reste toutefois une discussion en suspens sur le type de produits à proposer à ces marchés : d'entrée de gamme (type Renault Logan) ou conformes aux standards occidentaux.

Fait rare, deux constructeurs étrangers ont par ailleurs implanté une usine en France : Toyota à Valenciennes et Smart à Hambach (Alsace).

Enfin, on compte actuellement en France à peu près cinq équipementiers de rang 1 (voire de « rang 0,5 »), le paysage industriel s'étant largement concentré en quelques années¹. Les équipementiers de rang 2 récupèrent de leur côté des compétences qui caractérisaient auparavant ceux de rang 1 et regroupent des acteurs de taille parfois très importante (Plastic Omnium, Simoldes...).

En ce qui concerne les évolutions ultérieures, les experts sont assez partagés quant à la possibilité de voir les fusions ou acquisitions entre constructeurs se poursuivre : alors que certaines minimisent la plausibilité de cette hypothèse, d'autres font valoir des situations financières très contrastées entre acteurs et une situation de relative faiblesse de certains constructeurs qui n'auront pas les moyens d'opérer les investissements impor-

tants nécessaires à leur compétitivité ; les groupes Chinois ou Indiens pourraient d'ailleurs en bénéficier.

Une autre tendance d'évolution possible, jugée plus probable dans l'ensemble mais qui ne fait pas non plus l'unanimité, repose sur un schéma d'échanges renforcés entre acteurs (plates-formes...), conduisant à l'émergence de « super équipementiers » qui se spécialiseraient sur tel ou tel morceau du véhicule et n'en vendraient plus.

Par ailleurs, si les constructeurs semblent donc durablement installés, il reste en revanche de la place pour des prestataires de services d'ingénierie (automobile, moteurs, équipements, design) dont la France manque fortement. Ces prestataires sont en effet très actifs dans certains pays étrangers, y compris ceux qui, comme l'Autriche, n'ont pas de constructeurs. Même si ces derniers ont internalisé une part des compétences correspondantes, ils importent encore en grande partie ces services de l'étranger. Ce « maillon » de la chaîne existe pourtant avec succès dans d'autres branches dynamiques en France (BTP, ingénierie pétrolière...).

D. Le positionnement concurrentiel des acteurs

Le paramètre principal de la concurrence est le produit en lui-même, ce que le client en perçoit : l'automobile reste en effet un produit « passionnel ». Le rôle de l'image se mesure par exemple à l'importance donnée par les constructeurs français à la production de modèles haut de gamme, immanquablement à perte et en petites quantités (au contraire de leurs concurrents allemands qui les amortissent sur tous les marchés du monde et parviennent à en tirer des marges importantes), répondant au besoin d'investir dans un produit qui sera le vaisseau-amiral de leur gamme à une période donnée.

Le marché européen étant considéré comme un des plus concurrentiels au monde, notamment en raison des nécessaires adaptations culturelles d'un pays à l'autre, les barrières à l'entrée sont probablement trop

¹ En 1998, Valeo avait 25 concurrents, maintenant il n'en reste que cinq.

importantes pour l'émergence d'un nouvel entrant.

Le niveau de compétitivité mondiale des constructeurs européens et français reste d'ailleurs élevé et la concurrence venant des autres pays développés demeure beaucoup plus importante que celle venant des pays en voie de développement. La menace des pays émergents est ainsi perçue comme modérée par les constructeurs. Certes, les Coréens sont de retour sur le marché et la Chine se lancera peut-être elle aussi dans cette voie mais concevoir, fabriquer, distribuer et vendre une automobile requiert une qualité technologique qui présuppose des coûts salariaux élevés ou en augmentation rapide. Les acteurs traditionnels jugent donc avoir les moyens de résister au degré de concurrence auquel ils sont exposés.

Les risques de délocalisation des constructeurs sont également assez faibles : à partir du moment où 75 % du produit sont externalisés, la part du prix d'une voiture directement liée aux coûts salariaux français et qui soit sous l'autorité du constructeur est trop faible pour que cela représente un gisement de gains. La délocalisation « du jour au lendemain » n'est donc pas à craindre, d'autant plus que les investissements annuels liés à la modernisation du parc industriel existant sont très importants. Un glissement plus progressif, mêlant création d'usines à l'étranger et abandon ultérieur d'usines françaises en difficulté, semble lui aussi peu probable. En tout état de cause, les constructeurs doivent rester proches de leurs marchés et posséder une grande technicité (ils conservent l'essentiel de l'ingénierie et de la conception) tandis qu'ils n'assument pas l'essentiel de la pression à la baisse des coûts de production.

Il en va tout autrement des fournisseurs, fortement sensibles à cette pression, d'autant plus que les constructeurs sont en position de force pour le leur imposer. Un expert de Valeo, qui sera bientôt pour moitié dans des pays à bas coûts salariaux, assure pourtant que le choix

de son entreprise de s'installer en Pologne, par exemple, représente bien davantage un choix cohérent avec l'apparition de marchés très importants en Europe de l'Est qu'une conséquence de la pression à la baisse des coûts de production.

Enfin, les constructeurs français conservent des faiblesses, comme celles qui les ont empêchées de pénétrer le marché américain. Les analyses relèvent en effet qu'ils n'ont pas été assez ambitieux sur le marketing, le service après vente ou la qualité en préparant leur entrée sur ce marché. Les constructeurs allemands, eux, ont su y entrer, de même que les Japonais qui y vendent nettement plus de voitures qu'au Japon.

Deuxièmement, leur incapacité à percer dans le haut de gamme de manière rentable leur fait perdre des parts de marché significatives.

E. L'intensité en R&D des acteurs

L'essentiel des efforts de R&D sont orientés, d'une part vers l'amélioration du produit (c'est le paramètre essentiel de la concurrence), d'autre part vers la réduction continue des coûts de production. La part d'innovations de rupture est faible et les innovations incrémentales, à rythme constant, largement majoritaires. Ainsi, même si le phénomène majeur de ces 20 dernières années a sans nul doute été l'irruption de l'électronique, ce mouvement a été très progressif.

Le ratio R&D/CA tourne autour de 4 % pour les constructeurs généralistes, sensiblement inférieur à celui des équipementiers qui oscille entre 6 et 8 %. La recherche (travaux amont pouvant concerner toutes les voitures) représente moins de 10 % de ('activité de R&D, contre plus de 90 % pour le développement (travaux spécifiques à un modèle), pendant lequel il ne s'agit plus de répondre à de nouveaux défis, mais d'aller chercher les innovations « sur étagère ».

Le différentiel entre les niveaux de R&D des constructeurs et équipementiers tient notamment à la « modularisation » de l'automobile, qui donne

2 Autoliv par exemple, équipementier suédois spécialisé dans les systèmes de sécurité automobile, vient de signer un contrat avec Volvo pour mettre en place la « passive safety » qui comprend à la fois la conception de modules, l'architecture fonctionnelle, l'ergonomie, l'ingénierie...

3 Pour PSA et encore plus pour Renault, l'idée que Valeo, par exemple, puisse être un offreur d'innovations n'agissant pas uniquement sur commande et conformément à un cahier des charges semble avoir du mal à faire son chemin. Certains experts estiment même que les constructeurs se réapproprient souvent les innovations des équipementiers de manière non-optimale, en choisissant d'y superposer des ajouts « maison » qui n'apportent rien voire qui gommant l'intérêt du produit initial. Ford, qui avait également ce problème, l'a résolu en créant l'équipementier Visteo, initialement intégré verticalement au groupe.

4 On notera dans ce sens que Ford a inventé le FSS (*Full Service Supplier*) où l'équipementier collabore de façon étroite avec le constructeur dans le développement, le test et la production de systèmes et de modules, ceci dès la genèse du projet. En échange, il est tenu d'assumer les risques des erreurs qu'il pourrait commettre. L'observation des résultats montre que Ford et Valeo y ont largement trouvé leur intérêt.

5 Trois défis majeurs se posent à l'industrie : une réduction de la consommation de carburant et des émissions de CO₂, la recherche par tous les pays d'une certaine autonomie énergétique devant conduire à une diversification des énergies primaires en fonction des ressources locales et enfin l'utilisation d'énergies dites renouvelables. Ceci devrait créer dans les 20 ans qui viennent des changements très importants (carburants et systèmes de propulsion).

6 Notamment dans la perspective des normes EURO V et VI à venir.

7 Les constructeurs allemands, Mercedes comme BMW, ont d'ailleurs connu les pires ennuis en matière d'électronique.

8 Par exemple, l'étude de cas sur l'ATM se conclut sur le fait que les compétences techniques qui caractérisent ce dernier secteur sont de nature à bénéficier à tout acteur industriel confronté à la maîtrise des systèmes logiciels complexes (multi senseurs, interconnectés, avec exigence de fiabilité...). En raisonnant certes rapidement, on a du mal à ne pas voir un lien possible avec ces problèmes que les constructeurs automobile disent ne pas savoir résoudre. Par ailleurs, il est quasiment certain que les constructeurs aéronautiques ont dû se heurter aux mêmes exigences de fiabilité et d'interopérabilité des systèmes électroniques embarqués. Notons à ce sujet que Renault, en participant au consortium Numatec Automotive dans le cadre de sa candidature pour le pôle de compétitivité « Logiciels et systèmes complexes » en Ile-de-France, y voit une opportunité de s'associer à des industries qui ont de l'expérience dans ce domaine : armement, aéronautique, espace, nucléaire...

un rôle accru aux équipementiers auxquels on ne demande plus de fabriquer une pièce mais un module entier (avant de la voiture...). Au-delà de la conception de modules et de systèmes fonctionnels, les équipementiers sont d'ailleurs en train de faire évoluer leur offre vers une logique de « solutions »². Les entretiens conduits dans le cadre de cette étude de cas montrent que cette tendance peut poser des problèmes nouveaux en termes d'organisation « hiérarchique » de la filière et de ses activités innovantes : selon un expert de Valeo, les constructeurs français souffrent ainsi d'une difficulté à accepter que leurs équipementiers puissent leur proposer des innovations « clés en main »³⁻⁴.

F. Les défis rencontrés

Les constructeurs font face à trois défis principaux : la technologie, la concurrence et la réglementation.

Pour ce qui concerne les défis technologiques, les domaines les plus sollicités sont les composants électroniques, les logiciels embarqués, les procédés industriels, et la mécanique. En particulier, les logiciels embarqués sont un des grands problèmes actuels leur fiabilité toute relative les rend à l'origine de 50 à 70 % des pannes. Le problème vient notamment de ce que les logiciels en question doivent dialoguer entre eux ; il reste donc des progrès à opérer, notamment dans les mécanismes de validation logicielle. Autre lacune, l'utilisation des outils de simulation est encore jugée insuffisante. Il s'agit donc plutôt de problématiques endogènes, dont l'utilisateur ne se soucie directement.

De son côté, la réglementation suit une tendance telle qu'elle est en train de supplanter la concurrence en tant que préoccupation majeure des industriels. Elle intervient sur trois volets : la consommation d'énergie et les émissions de CO₂, pour lesquelles des ruptures technologiques radicales sont encore nécessaires⁵, ainsi que la sécurité et la qualité environnementale (hors émissions de CO₂)⁶ pour lesquelles les enjeux techniques sont aujourd'hui davantage maîtrisés et

reposent sur des dispositifs relativement isolés (airbag, filtre...).

Enfin, le défi de la concurrence ne dépend lui aussi que partiellement de paramètres technologiques. Ainsi, selon un expert interrogé, même si un rythme d'innovation soutenu est essentiel pour conserver des parts de marché, la sortie d'un produit raté est bien plus grave que, par exemple, une architecture électronique imparfaite⁷.

G. Le niveau d'adaptation de l'offre actuelle de connaissances ou de soutien à la R&D de la part des acteurs publics et privés

Pour ce qui est de l'électronique et du logiciel, les constructeurs font part de difficultés à traduire les problèmes qu'ils rencontrent en questions qui soient compréhensibles par des intervenants extérieurs. Il s'agit de problèmes transversaux, difficiles à maîtriser, dont ils font une affaire interne ; non pas qu'il soit stratégique pour eux de les résoudre eux-mêmes mais plutôt parce qu'ils ne sont pas encore capables de fédérer correctement tous les métiers concernés pour poser les bonnes questions. Sous réserve de bonne compréhension de notre part, une telle situation semble se prêter à des dispositifs de coopération précompétitifs et sans doute également à des apprentissages pluridisciplinaires ou intersectoriels⁸.

Pour la mécanique et les procédés, il existe en revanche des interlocuteurs identifiés, partout dans le monde (Allemagne, États-Unis), que les constructeurs vont solliciter dès que nécessaire. Un exemple très performant est celui des instituts semi-publics allemands, non pas les Instituts Fraunhofer (parfois très compétents mais souvent plutôt en amont) mais d'autres structures très proches des industriels (FEV, IKV...), en grand nombre notamment autour de l'université d'Aix-la-Chapelle. De tels instituts de recherche industrielle manquent en France.

En croisant les deux constats précédents, on peut se demander si la mise

en place d'instituts de recherche appliquée, à même de délivrer des prestations d'ingénierie et dédiés à la maîtrise des systèmes électroniques complexes, ne constituerait pas une double opportunité, pouvant qui plus est s'appuyer sur des compétences déjà mises en œuvre dans d'autres branches industrielles compétitives en France.

Par ailleurs, il a été signalé plus haut que la maîtrise de la consommation énergétique des véhicules et de leurs émissions en CO₂ demeure un défi extrêmement important pour les constructeurs, pour lequel aucune solution technologique n'est encore suffisamment mûre pour qu'ils puissent l'explorer puis la mettre en œuvre spontanément. Il apparaît donc qu'une intervention publique sera indispensable sur ce point, sur la base d'efforts de R&D mutualisés et sachant tenir compte des impératifs des acteurs industriels⁹.

Enfin, certains des experts pointent le besoin d'un soutien public à la réorganisation verticale de la filière. Selon eux, les équipementiers français de rang 2 et plus souffrent d'une taille trop réduite, de moyens limités et d'une R&D trop faible pour pouvoir être des interlocuteurs de poids¹⁰. La vallée de l'Arve offre ainsi un remarquable réservoir de compétences, mais qui ne parvient pas à voir diffuser son expertise. Dans cette perspective, les risques de concurrence étrangère augmentent, notamment via le modèle japonais appliqué par Nissan et Toyota du « *kereitsu* » dans lequel le constructeur garde un contrôle très poussé de toute la *supply chain* en détenant l'essentiel du capital de tous ses équipementiers. Il en résulte qu'à chaque projet d'ampleur, les constructeurs japonais sont capables de mettre en place une structure *ad hoc* très réactive et bien dotée financièrement. Les soutiens publics pourraient être multiformes : participation au capital de structures fédératrices d'équipementiers¹¹, soutien à des projets d'apprentissage qui permettraient aux

équipementiers d'élargir les champs d'exploration de leur R&D...

H. Les effets attendus sur la compétitivité des autres secteurs

Les innovations réalisées dans cette branche n'ont généralement pas de caractère diffusant directement mesurable, du fait que les constructeurs sont en « en bout de chaîne », juste avant les consommateurs. Si les procédés d'assemblage sont parfois observés par d'autres acteurs, comme ceux de l'électroménager, cela reste marginal. Un expert interrogé nous assure cependant que de nombreux secteurs pourraient profiter de certaines caractéristiques de l'industrie automobile. Ceux pour qui la constante de temps d'un projet-type est longue (10/15 ans) pourraient valider très rapidement certaines de leurs innovations en les adaptant à l'industrie automobile où la constante de temps est beaucoup plus courte (4/5) ans¹². Il y aurait alors bénéfice mutuel, reposant à la fois sur un transfert de technologie d'autres secteurs vers l'industrie automobile et une opportunité pour eux de tester leurs concepts innovants.

I. L'opportunité de développer d'emblée la réflexion stratégique dans un cadre européen et mondial

Il semble que tous les constructeurs européens n'aient pas encore complètement rationalisé leurs efforts de R&D ni ne les aient alignés avec leur stratégie. Il existe à ce sujet une plate-forme européenne basée à Bruxelles, EUCAR, où les constructeurs cherchent ensemble à rationaliser et orienter leurs efforts de R&D et dont le fonctionnement est jugé assez satisfaisant¹³⁻¹⁴. Les constructeurs sont toujours assez prudents et s'en tiennent strictement au stade précompétitif quand il s'agit de coopérer, mais c'est en Europe que ce type de coopérations est le plus développé. Cette voie semble intéressante et prometteuse.

9 Voir notamment les initiatives AGRICE sur les biocarburants, qui paraît notablement sous-dimensionnée au regard des enjeux, et PAN-H sur le moteur à hydrogène, dont les constructeurs automobile ont pu menacer de se désengager si les orientations d'une recherche publique trop exploratoire venaient à prendre le pas sur les besoins en démonstrateurs des industriels.

10 Par exemple, il leur est parfois difficile d'envoyer des experts à l'étranger, tout simplement parce qu'ils n'en ont pas les moyens.

11 Comme le Pôle Européen de la Plasturgie à Oyonnax dans la vallée de l'Ain. Cet organisme cofinancé par des injecteurs a été sollicité par Valeo pour un projet auquel les équipementiers n'étaient pas en mesure de répondre directement.

12 L'expert mentionnait comme exemples les absorbeurs de choc en aluminium sur lesquels travaille le CEA et les échangeurs en plastique utilisés par l'ESA dans ses satellites.

13 Voir aussi les travaux d'une autre plate-forme technologique, EPH (*European Platform for Hydrogen*), ayant publié une stratégie de recherche en vue du 7ème PCRD.

14 À noter également ERTRAC (*European Road Research Advisory Council*) qui regroupe tous les acteurs du transport routier : les constructeurs mais aussi les équipementiers, les pétroliers, les fabricants de routes, les grandes villes européennes, les laboratoires européens qui travaillent dans ce secteur... Cet organisme a publié récemment une vision long terme du transport routier et une stratégie de recherche associée.

CONTROVERSES ET INCERTITUDES TECHNOLOGIQUES SUR L'UTILISATION DE L'HYDROGÈNE ET DE LA PILE À COMBUSTIBLES DANS LES TRANSPORTS TERRESTRES

Technopolis France *

I. INTRODUCTION

Ce document fournit un panorama des différentes opinions exprimées par les experts sur la filière hydrogène avant 2006. Les différents paragraphes qui le composent ne retranscrivent que l'opinion de la source qui est citée entre parenthèse dans la bibliographie de référence qui suit, et non pas une vérité moyenne, ou raisonnable, ou

encore un bilan personnel tiré de la lecture de l'ensemble de la bibliographie. Ce document est donc un guide de voyage dans le labyrinthe des opinions d'experts sur la filière hydrogène. Il doit servir de base pour permettre la clarification des controverses technico-économiques sous jacentes à la diversité des opinions exprimées sur le sujet.

II. BIBLIOGRAPHIE DE RÉFÉRENCE

Cette synthèse s'appuie sur les documents suivants (en gras, les acronymes qui permettent de repérer les sources dans le corps du texte) :

HF : Hydrogen Fuel: Hydrogen production, Energy availability potentials, Well-to- Wheel emissions and costs, Emission Scenarios. *Matthias Altmann*

QET : Quelles énergies pour les transports au XXI^e siècle? *Pierre-René Bauquis*

FCB : Fuel Cell or Battery: Electric Cars are the Future. *Frédéric Vergels*

FHE : The Future of the Hydrogen Economy: bright or bleak? *Ulf Bossel*

10Q : 10 questions sur l'hydrogène. *Jean Dhers*

EH : Efficiency of hydrogen Fuel Cell, Diesel-SOFC-Hybrid and battery electric vehicles. *Ulf Bossel*

HCN : Hybrid cars now, fuel cell cars later Nurettin Demirdöven. *John Deutsch*

HW : HyWays Report, A European Roadmap Assumptions, visions and robust conclusions from project Phase I. *Groupe HyWays*

CH : La civilisation hydrogène : mythe ou réalité ? *Benjamin Dessus*

HVEF : L'hydrogène : vecteur énergétique du futur ? *Stéphane His*

PH : Potential for Hydrogen as a Fuel for Transport in the Long Term (2020-2030). Commission Européenne, Étude pour l'*IPTS*

RA2050 : Réflexions sur l'automobile de 2050 face à l'objectif de division du CO₂ par le facteur 4. *André Douaud*, Membre du groupe de travail « facteur 4 », MINEFI

IAF : The introduction of alternative fuels in the European transport sector; Techno-economic barriers and perspectives. *Technical report series - IPTS*

VEHFP : Vue d'ensemble stratégique de la plateforme HFP. *Thierry Alleau*

* Extrait d'une recherche réalisée pour le centre de prospective de la DRAST et le groupe 11 du PREDITT (sept. 2007). Il s'agit d'un document provisoire destiné à être complété et actualisé.

WWA : Well-to-wheel analysis of future automotive fuels and power-trains in the European context EUCAR/CONCAWE/JRC
HE : The Hydrogen Economy.

George W. Carbtree, Mildred S. Dresslhaus, Michelle V. Buchanan
GM : RESULTS OF THE GM WTW-STUDY. Jörg Schindler, Werner Weindorf, Reinhold Wurster

III. L'HYDROGÈNE ENERGIE

□ Certains auteurs entretiennent la confusion entre hydrogène et source d'énergie¹. Les publications GM WTW et WWA (EUCAR/CONCAWE/JRC) sont particulières au sens où elle contiennent beaucoup plus d'informations quantitatives que les autres.

A. Production d'hydrogène

L'industrie produit actuellement assez peu d'hydrogène (mondialement quelques Mt/an (HE : >9 Mt/an, 10Q : 5Mt/an), très majoritairement à partir d'hydrocarbure (QET) et essentiellement destiné à la synthèse chimique (HVEF). Les tonnages sont incomparables avec ceux nécessaires aux transports (HF). En effet, le secteur des transports a consommé mondialement en 2000 1,9 Gtep (3.4 projetés en 2050).

Production d'hydrogène à partir de combustibles fossiles

La production d'hydrogène à partir de fossiles est décrite de manière très contrastée comme étant à la fois la voie de l'avenir « raisonnable » mais aussi une solution inenvisageable car productrice de CO₂. Certains auteurs (10Q, WWA, HCN, HW, et HVEF, IAF pour le gaz) notent que c'est actuellement la seule voie disponible d'un point de vue technologique et économique. Énergétiquement, les évaluations oscillent entre 90% (FHE) et 60% (CH). EH insiste sur la nécessité d'augmenter encore le rendement et de diminuer les coûts. Les autres notent, que :

- d'un point de vue environnemental, cette voie n'a de sens que combiné avec la séquestration du CO₂ (10Q)
- la séquestration du CO₂ n'est pas validée techniquement (10Q, EH)
- cette voie ne répond pas au problème du nécessaire shift hors des énergies fossiles (CH, HE, FHE).

La gazéification du charbon, (avantageux car largement disponible IAF) mais coûteux (WWA) se heurte au même problème de la séquestration du CO₂ (HVEF).

Production d'hydrogène à partir de la biomasse

La biomasse semble une voie intéressante (RGM, 10Q, HW dans certaines niches, RA2050 pour le méthanol des DMFC), mais très chère (HVEF) et en concurrence avec d'autres usages (WWA). Certains y voient un potentiel considérable (HF calcule le nombre de véhicules par hectares en fonction des cultures).

Production d'hydrogène par électrolyse

On ne peut pas comparer directement électrolyse et reformage (de même qu'une source et un vecteur).

L'aspect énergétique est assez consensuel (rendement de 70% (EH, FHE) à 80% (HE) pour l'électrolyse seule), mais certains auteurs soulignent, sans donner de valeurs, de pertes cachées assez importantes (FHE, 10Q). Celles-ci conduisent à des rendements globaux faibles (10Q, WWA) par multiplication des conversions énergétiques. D'autres argumentent que la technologie industrielle (production massive, haute densité de courant, conversion de l'électricité) n'est pas encore mure (10Q, FHE). Les conclusions sont donc contrastées et reflètent en miroir celles concernant le reformage : l'électrolyse est la voie parce que le reformage est impossible (EH, HE) ou parce qu'elle représente un intermédiaire pratique, stockable, entre les énergies renouvelables (ENR) et les transports (FHE), ou bien, elle est énergétiquement (RGM, HVEF,) et économiquement (10Q) inintéressante, et en compétition avec l'usage direct de l'électricité (FHE).

¹ Par exemple: « L'hydrogène étant universellement répandu et inépuisable, l'exploitation judicieuse de cette ressource permet à terme d'envisager l'émancipation de chaque être humain, inaugurant ainsi le premier régime énergétique véritablement démocratique de l'histoire humaine. La technologie hydrogène offre des perspectives de sortie de crise énergétique et environnementale. L'hydronet, le réseau énergétique mondial alimenté à l'hydrogène, est la prochaine révolution technologique, commerciale et sociale de l'histoire. » (CH).

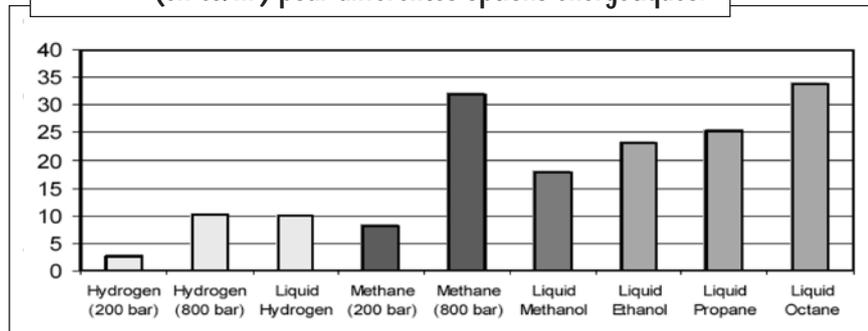
Du point de vue des sources étudiées, les ENR sont vues comme :

- offrant un potentiel difficile à évaluer (HF)
- offrant un potentiel faible (HVEF)
- peu commodes (CH), Photovoltaïque couplé électrolyse : 8-12 % global (HE).

Le mix électrique est souvent évoqué, (10Q : électricité produite par des centrales hydrauliques, thermiques à

séquestration du CO₂, et nucléaires) ou nucléaire (RA2050, QET) avec ses risques (CH), ses problèmes d'acceptabilité sociale (IAF) et la quantité de centrales nécessaire (CH). Les voies qui passent à la fois par la production de carbone et l'électrolyse ne présentent pas d'intérêt. D'autres voies sont possibles : hydrocarbures synthétiques (FHE), décomposition thermique de l'eau (mais non mure HE, CH, 10Q, QET), et la biochimie (à long terme, HE, QET)

Figure 1 : Pouvoir calorifique supérieur volumique (en CJ/m³) pour différentes options énergétiques.



Source : FHE.

B. Transport d'hydrogène

Il semble facile de trouver beaucoup de raisons de critiquer l'Hydrogène comme vecteur : ses propriétés physiques (HVEF, 10Q, FHE, WWA), son coût (HVEF), sa faible énergie volumique (QET, HE, FHE). La filière recèle beaucoup de pertes ou de coûts cachés (EH, FHE)². Elle nécessite des infrastructures spécifiques lourdes (FHE, WWA, VEHP) et est en concurrence avec l'utilisation directe de l'électricité (FHE).

Certains auteurs soulignent cependant sa versatilité (VEHP, RGM à la fois beaucoup de sources et beaucoup d'usages possibles) ou son efficacité lorsque l'H₂ est couplé à une PAC (IAF, QET), et enfin sa complémentarité par rapport à l'électricité (VEHP)

Stockage

Les experts reconnaissent tous que le stockage est un aspect critique en terme de poids, de volume (HE, WWA QET CH PH 10Q), de pertes énergétiques liées au conditionnement (WWA) et de coût (HVEF). H₂

liquide est plus dense énergétiquement (10Q) mais cette filière dégrade le rendement WTT (HE, EH, CH HVEF QET) l'énergie utilisée allant jusqu'à dépasser le contenu énergétique de H₂ pour de petites unités (FHE)³. De plus cette option nécessite des réservoirs plus lourds et est soumise aux pertes par *boil off* (WWA 10Q, QET, FHE). Par contre le coût peut être moindre (HVEF).

Les constructeurs se sont par conséquent focalisés sur le stockage comprimé (HVEF) avec des problèmes de poids (CH, 10Q)⁴, de pression (10Q HE), de tenue en temps (10Q) et de densité énergétique (QET : H₂ correspond à 2 ou 3% de la masse du réservoir métallique, 10% dans le cas de réservoirs composites à 350 ou 700 bars). Une fraction énergétique du pouvoir calorifique inférieur (PCI) est aussi prélevée pour la compression (EH 10%, FHE 8%). Les solutions basées sur l'adsorption sont à l'état de projet (HE, CH, PH) et peu prometteuses (FHE). De nouveaux principes de stockage sont nécessaires (HE).

² Compresser ou liquéfier, ainsi que transporter, transférer et stocker.

³ Pour de petites unités de liquéfaction (5 kgLH₂/h). Des unités de 10000 kgLH₂/h environ 25% du contenu HHV d'H₂ liquéfié (40% serait acceptable), mais à ce jour aucune unité de cette taille n'a encore été construite.

⁴ Réservoirs de 100 kgs nécessaires pour stocker 5 kg d'H₂ à 700 bars.

Distribution de H2

Aucun expert ne semble avoir une vision très claire de ce à quoi pourrait ressembler le réseau de distribution de H2. Pipeline (IAF: +, HWV) et camions (10Q) peuvent être envisagés (10Q, FHE). Le transport consomme aussi une fraction du PCI (EH 10%, FHE inacceptable) et possède un coût important (QET). De même pour le transfert (EH, FHE). De ce point de vue, les petites unités locales semblent intéressantes (HVEF) ou pas (IAF, sur des considérations économiques). Des problèmes de sécurité spécifiques à H2 existent (HE, QET, HVEF) et selon certains, sont rédhibitoires pour le transport sur route (HVEF).

C. Coûts de l'hydrogène

Consensus pour remarquer que le H2 le moins cher est en fait du méthane réformé (HE). Cependant le facteur de multiplication du coût entre fossiles et H2 passe de moins de 1 (HF: H2 à partir de renouvelables dans l'hypothèse d'un pétrole cher) à 4 (HE) 2 à 5 (QET par reformage) ou 10 (RA2050, même en grande quantité) suivant les auteurs. Par contre l'hydrogène issu d'ENR est évalué de manière diverse puisque IAF et HVEF le donnent pour très cher. De même certains insistent sur le coût élevé du transport (10Q, WWA, QET: 10 fois celui des HC liquides) alors qu'il est négligeable pour d'autres (IAF). Le prix du réservoir peut être important (HVE: 10 fois celui des HC liquides) alors qu'il est négligeable pour d'autres (IAF). Il s'agit de prêter attention à la prise en

compte ou non des taxes (PH), et de la filière suivie, l'électrolyse étant 2-3 fois plus chère que le reformage (IAF QET, CH, FHE⁵). PH présente un calcul assez complet. Finalement, la liquéfaction se justifie à ce niveau puisqu'elle présente un bilan économique meilleur que son bilan énergétique (IAF, HVEF).

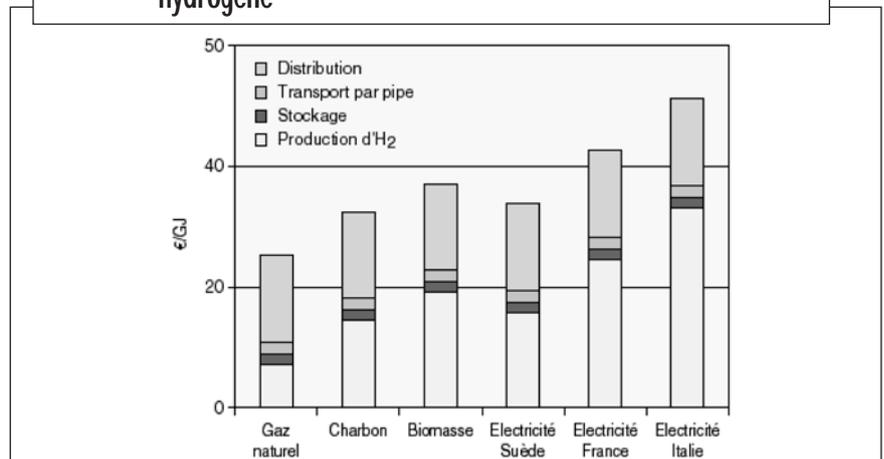
D. Efficacité : du puit ou réservoir (well-to-tank, WTT)

Il y a une ambiguïté suivant que les auteurs parlent de WTT jusqu'à l'hydrogène gaz, ou jusqu'à l'hydrogène dans le tank (i.e. comprimé, liquide, transporté etc.) Il faut parfois distinguer la well-to-hydrogen (WTH) et le WTT (qui inclut la compression ou liquéfaction etc.) Dans ce paragraphe n'apparaissent que les vrais WTTs. Les WTH ou rendements de compression sont dans les paragraphes précédents. De même certains auteurs (comme FHE) prennent l'électricité comme un puit d'énergie alors que d'autres calculent, correctement, un rendement incluant la production de cette d'électricité.

Globalement, par rapport à la demande en énergie primaire, les filières basées sur les ENR et le reformage de gaz naturel (GN) et la gazéification du charbon sont les plus avantageuses. Les filières basées sur l'électrolyse ont de fortes consommations énergétiques. (IAF, WWA, HF).

5 20,1 \$/GJ par électrolyse de l'eau à comparer avec 10,3 \$/GJ à partir du charbon et 5,6 \$/GJ par reformage du GN (FHE).

Figure 2 : Coûts par poste pour les différentes options dans la filière hydrogène



Source : HVEF

À ce niveau, logiquement, H2 entre en compétition défavorable avec l'application directe de ses propres sources,

électricité ou HC, comme le remarquent plusieurs auteurs (HW, FHE).

Tableau 1 : Rendements énergétiques WTT des différentes filières hydrogènes, selon les sources

	WTT des principales filières, en MJ/MJ	Référence
Eolien ->GH2	1.5 1.9 1.74	IAF WWA HF
EUmix -> GH2	4.6	WWA
Nucléaire -> GH2	4.4	IAF
NG -> GH2	1.6 (centralisé) 1.8 (onsite) 1.83	WWA WWA HF
Biomasse -> GH2	1.9 (bois) 1.75-1.8 (bois)	WWA HF

IV. MOTORISATION À L'HYDROGÈNE

Les résultats tank-to-wheel (TTW) sont exprimés de deux manières différentes : parfois en efficacité énergétique (i.e. énergie totale utilisée rapportée à celle qui est effectivement transformée en mouvement du véhicule, en pourcentage) ou alors en énergie nécessaire pour parcourir un cycle standard donné (MJ/100km). C'est dans la section TTW (énergétique et GES) que H2 trouve ses meilleurs arguments.

hybride), mais selon certains, il nécessite des recherches plus poussées (HE).

B. Pile à combustible (PAC)

Les PAC ont un bon rendement (HVEF), un large domaine d'application (HE, PH, VEHP, 10Q) et permettent de faire converger différents puits d'énergie vers les transports (PH). Cependant, elles nécessitent des recherches (HE, VEHP). Le type de PAC est peu discuté (HE).

A. Moteur à combustion interne H2 (MCI)

D'un point de vue TTW (180MJ/100km WWA), le MCI H2 est intéressant (HE, CH, 10Q) ou pas (HVEF, HF car équivalent d'un

Performance

Le rendement des PAC est estimé entre 37% (HW) 50% (HCN) et 60% (HE), ce qui est en partie dû à l'existence de différents types de PAC et par une vision à plus ou moins long terme. Certains auteurs insistent sur la distinc-

Tableau 2 : Rendements moteurs et véhicules pour différentes motorisations à hydrogène, selon les sources

	Rendement moteur	Rendement véhicule	référence
MCI H2	35-40% 27.2	-25% /MCI essence 24.2 (34.9 si Hyb) -17% /référence (-39 si hyb) 180MJ/100km	HE CH HF HF WWA
PAC H2	60%maximum 50% 56.6% (55.6 si Hyb) 50% (cycle urbain) 35-40%	40 % maximum 37% (>40 en 2015) 44.3 (48.9 si hyb) 94 MJ/100km (84 si hyb) 3.6 lit/100 km (3.3 si hyb)	HE EH HW HF WWA HCN CH GM
PAC reformeur	PAC :50% ref : 80%	-37% / référence 162MJ/100 km 28.3% 5.5lit/100 km (4.8 si hyb)	HF WWA HCN GM (~hyb)

tion entre le (bon) rendement d'une PAC et celui, plus faible, du FCV (EH, RA2050). La présence d'un reformeur dégrade fortement le TTW du véhicule. Donc seul le TTW d'un véhicule direct H2 reste intéressant comparé à l'hybride (consensus plus ou moins avoué). Le TTW d'un véhicule à PAC à H2 compressé est de 94MJ/100km (WWA). C'est ce chiffre inégalable qui est à l'origine de l'intérêt pour la filière H2 (RGM, HVEF). Le WTT est beaucoup moins bon pour une PAC à reformeur (HCN, WWA, HF, CH).

Coûts

Celui-ci est évalué de manières diverses (table 3).

Du point de vue de la motorisation **strict**, c'est le coût élevé qui vient balancer les avantages des moteurs à H2 direct (sans reformeurs). De nombreux auteurs insistent sur les progrès technologiques encore nécessaires pour les diminuer (IAF, PH, HCN, HE, VEHP). Le problème du platine et de ses disponibilités et ses réserves est controversé (HVEF : oui, PH : non).

Dans le cas d'un système à reformeurs, des problèmes additionnels apparaissent : température de fonctionnement, contrôle, complexité de l'ensemble (WWA, HVEF)

C. Du puit à la roue (well-to-wheel, WTW)

Comme les TTW, les résultats WTW sont exprimés de deux manières non comparables : parfois en efficacité

énergétique (i.e. énergie totale utilisée rapportée à celle qui est effectivement transformée en mouvement du véhicule, en pourcentage) ou alors en énergie nécessaire pour parcourir un cycle standard donné (MJ/100km).

De manière générale, on remarque que l'intérêt des filières hydrogène baisse en WTW par rapport à TTW (HF, GM), amenant au mieux à une compensation (PH). Les consommations globales correspondant à la fabrication des infrastructures et des véhicules ne changent pas les tendances globales dans le contexte WTW (HF). Par croisement, le nombre de filières possibles devient très élevé. Les meilleurs rendements WTW sont désormais obtenus pour les PAC à reformeur embarqué. (HFEV, CH: 36% avec un reformeur méthane embarqué, GM donne PAC reformeur diesel: 205MJ/100km). WWA présente en revanche des valeurs un peu meilleures pour le reformage centralisé (voir table 4). L'hybridation avec des batteries est intéressante (WWA : permet de gagner environ 20 MJ/100km, HCN, EH)⁶. Les PACS méthanol n'apportent pas d'avantage significatif (RGM).

Les PACS sans reformeur souffrent du mauvais WTT des solutions d'électrolyse et du transport (EH, CH, HFEV) sauf dans le cas des puits renouvelables (GM⁷, WWA, HF).

Au final, d'un point de vue WTW la concurrence avec les véhicules hybrides diesel est défavorable (EH, CH, HCN) ou équilibrée (WWA)⁸.

6 Efficacité WTW d'un véhicule hybride électrique fonctionnant avec une SOFC "range extender" et un carburant diesel: 33%.

7 Par rapport à la référence diesel hybride, seules les filières PAC avec H2 issu de biomasse bois, électrolyse du vent ou réformage on site du méthane et PAC reformeur diesel ont un meilleur WTW (GM).

Tableau 3 : Quelques évaluations des coûts (ou surcoûts) de la motorisation à hydrogène

Surcoût entre 1000 et 2000 \$,	HCN
Surcoût réductible même a grande échelle	HVEF
325 \$/kW pour les systèmes de PEMFC pour véhicules pour des volumes de production de 500 000 unités par an	PH
3000 US/kW à comparer avec MCI 30US/kW	HE
coût additionnel des véhicules à PAC se situe entre 0 et 1500 Euros	HW
10 x un moteur classique	RA2050
Réduction du prix pour pouvoir envisager une pénétration : <ul style="list-style-type: none"> • de 2 à 10 fois • de 10 à 100 fois • 40 fois 	CH VEHP HW

Tableau 4 : Efficacité énergétique WTW en 2010

¹ Efficacité énergétique (MJ/100 km) en 2010 (WWA)	essence	gazole	Méthanol	Naphta
PAC avec réformeur	185	188	273	180

Source : WWA.

D. Environnement

Le secteur des transports est responsable de 28% des émissions de CO₂ en 1998, pouvant atteindre 50 % dans le futur (FCB, IAF)

Du point de vue des émissions de GES, on a un meilleur bilan avec les solutions PAC (WWA, GM, IAF, HF, PH -15 à 40 %, RGM -25 % – voir table 5) qu’avec les hybrides. Le bilan du MCI H2 est plus contrasté car il n’émet pas de carbone (HE), mais des NOx (HVEF, WWA). La présence d’un reformeur diminue fortement les performances du point de vue GES: émissions de NOx (HVEF, HW) et plus de CO₂ (WWA).

Le bilan GES devient excellent si le puit utilisé est renouvelable (HF, IAF, GM) ou nucléaire (CH, RA2050), à condition d’éviter la liquéfaction (HVEF). Dans ce cas, les émissions restantes sont dues à la fabrication des véhicules et des infrastructures de distribution du carburant (PH).

Les solutions basées sur le charbon, ou sur l’électrolyse de l’électricité du réseau sont très mauvaises (IAF). La séquestration pourrait par ailleurs coûter très cher (QET). Les contributions concernant la fabrication des véhicules restent incertaines, mais ne changent pas les tendances pour HF, bien qu’elles soient qualifiées d’importantes par IAF.

Finalement, les PACs diminuent la pollution des centres urbains (HVEF, PH, HW), et la pollution sonore (CH, PH). Au niveau global, la filière H2/PAC a un effet environnemental bénéfique (WWA, 10Q, HW, RGM) si elle est basée sur « les ENR, l’énergie nucléaire et le charbon avec séquestration du CO₂ » (IAF).

Cependant, certains auteurs ne sont pas d’accord avec ce bilan, car les

émissions risquent au contraire d’augmenter à cause d’une baisse de l’efficacité énergétique (FHE). D’autres soulignent immédiatement que la filière n’est pas viable d’un point de vue économique (HW, WWA)⁹ ou que le faible bénéfice GES par rapport aux hybrides est effacé par les autres défauts de la filière (CH, EH) et qu’il existe des usages plus GES-judicieux des ressources utilisées pour produire H₂ (WWA)¹⁰ (voir figures 3 et 4).

E. Bilan

Tous les auteurs limitent la validité de leurs conclusions à l’utilisation d’un certain nombre d’hypothèses techniques et économiques. Actuellement, si les véhicules hybrides représentent une faible part du marché (HCN : 1%), ceux à hydrogène sont encore beaucoup plus loin derrière (PH).

Les tenants de la filière H2 maintiennent qu’elle offre une flexibilité maximum (ressources, technologie de propulsion) (HF) et représente une transition douce entre les énergies fossiles et les sources d’énergies 100 % renouvelables (HF) (GM). De plus son introduction pourrait avoir un effet bénéfique sur l’emploi (HW) et sur l’économie (HW, VEHPF : énorme, PH : nouveaux services, CH : survie du secteur automobile), mais faible sur le PIB (HW). Enfin, elle participe à la stratégie de l’Europe en terme de développement durable (VEHPF, PH).

Elle se heurte cependant aux :

- coûts élevé de H2 (QET, 10Q, HVEF, IAF : ENR ou hydrocarbures avec séquestration)
- coûts d’infrastructures énormes (HVEF, 10Q, VEHPF, HW, IAF)
- verrous sociaux liés a une mauvaise information du public (VE HFP, 10Q, PH) et à l’inertie du secteur (QET) et l’absence de norme de

⁸ Voir le paragraphe « prospectives ».

⁹ Le coût par tonne de CO₂ évitée est particulièrement fort pour les filières hydrogène, comparé aux filières biomasse et hybrides (WWA).

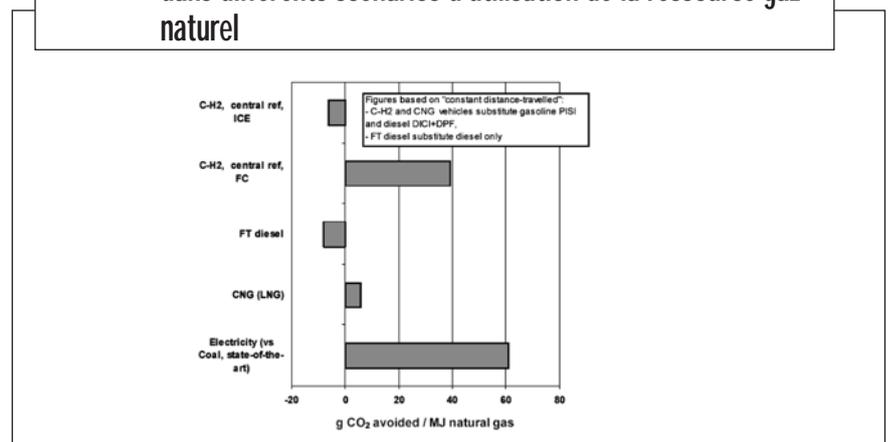
¹⁰ L’analyse du système énergétique montre qu’il n’y a pas d’effet sur la sécurité des approvisionnements par rapport aux projections de base car ces dernières supposent qu’une diversification encore plus importante des sources énergétiques se fera à cause des objectifs très sévères des émissions de CO₂. Cependant la production d’H2 facilite une forte dépendance vis-à-vis de la biomasse dans le secteur des trans-

Tableau 5 : Émissions WTW de GES (CO₂) (en g/MJ) en 2010

	essence	gazole	Hydrogène compressé	hydrogène liquide
MCI allumage commandé	164 (PISI) 162 (DISI)		176 (PISI)	240 (PISI)
MCI allumage Diesel		152 (DICI sans FAP) 159 (DICI FAP)		
MCI hybride essence	140 (PISI) 141 (DISI)		156 (PISI)	203 (PISI)
MCI hybride Diesel		125 (DICI sans FAP) 131 (DICI FAP)		
PAC sans réf			98	135
PAC avec réf	140	144		
PAC hybride			88	120

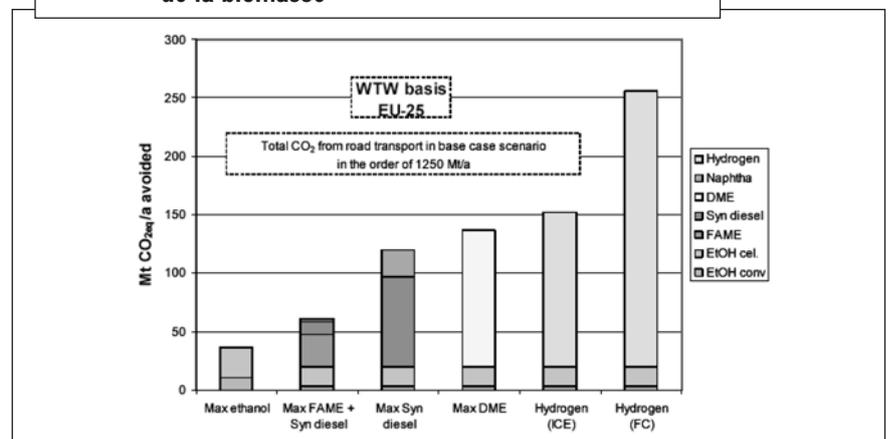
Source : WWA (PISI : port injection spark ignition ; DISI : direct injection spark ignition ; FAP : filtre à particule ; DICI : direct injection compression ignition).

Figure 3 : Émission de CO₂ évitées (en gramme de CO₂ par MJ de gaz) dans différents scénarios d'utilisation de la ressource gaz naturel



Source : WWA.

Figure 4 : Émission de CO₂ évitées pour différents usages de la biomasse



Source : WWA.

sécurité (WWA). 8 études sur l'acceptabilité et les implications sociales de l'hydrogène ont été réalisées jusqu'ici, la plupart en Allemagne. (PH)
– Un bilan énergétique global mitigé

(HFEV, HCN : privilège hybrides) voire mauvais (QET)

– La nécessité de restructurer en profondeur la filière des transports (HFEV).

V. PROSPECTIVE

La manière de franchir ces obstacles est débattue : un soutien réglementaire fort permettrait de les franchir (PH). Des efforts de R&D sont nécessaires (HCN, 10Q, PH, CH), ou non, car il vont se heurter aux limites physiques de H₂ (FHE, QET).

Le bilan politique est controversé, puisque selon certains, l'hydrogène peut réduire la dépendance vis-à-vis des carburants fossiles (IAF, VEHP, HF, PH, 10Q, HVEF), alors que d'autres disent le contraire (HW)¹¹. Il n'apporte pas de réponse durable au problème de la raréfaction des HC et de l'accroissement corrélatif de leur coût (QET).

Prospective générale : dans un futur énergétique difficilement prédictible mais marqué par la disparition des sources fossiles (QET), les systèmes à l'H₂ vont bénéficier d'opportunités de remplacement (HW). Ils pourraient pénétrer fortement le marché d'ici 20-30 ans (CH, HW) puis devenir prédominants. D'autres chiffres optimistes sont avancés :

– 5 % de substitution des carburants conventionnels en 2020 (IAF)

– 50 % du parc automobile mondial en 2050 (RA2050)

– 1 à 7 % des carburants conventionnels en 2020, avec une croissance exponentielle par la suite. (PH)

Les pessimistes repoussent l'introduction de l'H₂ (CH 60 à 80 ans, 10Q après 2030, conditionné par les emplois stationnaires, HW maximum de pénétration de 3 % pour 2020), ou le réservent à quelques niches (FHE, QET).

Les propositions alternatives concernent : les hydrocarbures de synthèse basés sur des ENR (FHE), les véhicules électriques, associés à un nouveau concept de mobilité (EH), des PAC SOFC à reformeurs de BC comme range extender (EH), les hybrides (HCN) combinés à la biomasse (RA2050), les hybrides plugables (FCB) (avec électricité et hydrocarbures de synthèse (QET).

11 Pas d'effet sur la sécurité énergétique car la diversification des sources est de toute façon nécessaire pour réduire les émissions de CO₂.

LES BIOCARBURANTS DE SECONDE GÉNÉRATION : DES PERSPECTIVES CONTROVERSÉES

Les biocarburants de « seconde génération » apparaissent – avec les moteurs hybrides rechargeables et les véhicules à faible consommation (2 – 3 litres) – comme une des solutions alternatives au pétrole la plus prometteuse pour réduire les émissions de gaz à effet de serre liées aux transports routiers. Certaines estimations font état d'un potentiel énergétique valorisable de près de 13,5 Giga Tep à l'échelle mondiale¹ – plus que la consommation mondiale annuelle d'énergie primaire. Mais ce potentiel fait l'objet de vives controverses notamment en France.

LES DEUX GÉNÉRATIONS DE BIOCARBURANTS

Contrairement aux carburants de première génération (biodiesel, biothanols ...) tirés des produits agricoles à vocation alimentaire (blé, betterave, canne à sucre, tournesol, ...) les biocarburants de seconde génération sont essentiellement issus de sous produits de l'agriculture, de l'exploitation forestière, de la consommation des ménages... ou de cultures dédiées non agricoles. Les sources valorisables – nécessitant des traitements spécifiques – sont notamment :

- **Les déchets agricoles** : pailles de céréale, tiges, bagasse de cannes à sucre... (Globalement, une tonne de résidus est produite pour une tonne pour l'alimentation) ;
- **Les déchets d'exploitation forestière**. Il s'agit des branches, rameaux, feuilles et troncs abimés qui sont souvent laissés en forêt. Pour une tonne de bois exporté hors forêt, une tonne de déchets est laissée sur place ;
- **Les déchets de l'industrie du bois** (sciures, rebuts) et **du papier** (papiers usagés, liqueurs noires). Ces industries ont déjà l'habitude de valoriser énergétiquement leurs déchets ;
- **Des cultures dédiées pérennes, à fort rendement** : plantes annuelles (triticale, ...), ou cultures ligno-cellulosiques pérennes à rotation rapide (miscanthus, peuplier, eucalyptus, saule). Ces cultures demandent un engagement sur le long terme dans la mesure où le retour vers des terres arables est très coûteux. De plus, les rendements en ligno-cellulose varient fortement en fonction de la qualité des terres et la disponibilité de l'eau.
- **Des déchets organiques ménagers**, huiles de frites, graisses animales, boues d'épuration, déjections animales (méthane) ;
- Et éventuellement de « cultures » dédiées comme les **algues**, potentiellement un très gros gisement...

¹ Source : D. BALLERINI et Nathalie ALAZARD TOUX: Les biocarburants, état des lieux, perspectives et enjeux, Institut Français du Pétrole, 2005.

Tableau 1 : Un potentiel de production de biocarburants de deuxième génération en France controversé selon les études (de 4,4 Mtep en 2050 à 22 Mtep dès 2030).

Potentiel réel (Mtep)	Taux de substitution au pétrole dans les transports	Échéance	Scénario	Source	Auteur
9,4	< 30%	2015 - 2025	1,05 Mha de jachères (soit 11 Mt ou encore 1,5 Mtep) 2,3 Mha de surplus (soit 46 Mt ou encore 4,3 Mtep) 47 Mt ligno-cellulosiques soit 3,6 Mtep	IFP - Panorama 2007	Daphné Lorne
3		2015	Biocarburants 1ere génération : 3 Mtep Néo-chimie végétale : 0,9 Mtep Cultures lignocellulosiques agricoles : 1 Mtep Cultures lignocellulosiques forestières : 1 Mtep	Coordination de la valorisation de la biomasse	Claude Roy
9,5		2030	Biocarburants 1ere génération : 3 Mtep Néo-chimie végétale : 1,5 Mtep Cultures lignocellulosiques agricoles : 3 Mtep Cultures lignocellulosiques forestières : 5 Mtep	Coordination de la valorisation de la biomasse	Claude Roy
4	6,3%	2030	Scénario de facteur 4	Etude pour une prospective énergétique pour la France 2005	ENERDATA - DGEMP
22	48%	2040	Facteur 3 avec biocarburant de seconde génération et forte utilisation des véhicules hybrides rechargeables	Politique Nationale de l'énergie et lutte contre l'effet de serre	Henri Prévost
10 – 20	?	2050	Bois-énergie : (20 Mtep) Cultures ligno-cellulosiques et résidus agricoles	CIVEPE – Recommandations pour un développement durable des biocarburants	André Douaud
		2050	12 Mtep de bois-énergie 3 Mtep de biodéchets	ADEME	Daniel Clément
8,6	30%	2050	Fort développement des véhicules hybrides et des biocarburants de seconde génération	Scénario de facteur 4 pour la MIES	Pierre Radanne
4,4	9,5%	2050	Scénario de facteur 4	Etude pour une prospective énergétique pour la France – 2005	ENERDATA - DGEMP
4,4	17%	2050	Forte réduction des consommations énergétiques des véhicules	Scénario Négawatt	Association Négawatt
		2050	Production sur 6 Mha de cultures agricoles, biocarburants de 1ère génération uniquement	Rapport de l'OPECST sur les biocarburants	OPECST
20 à 30	33 à 50%	2050	Véhicule hybride rechargeable et carburant de 2nde génération	Démarche prospective « transports 2050 »	CGPC (ministère de l'équipement)

DES POTENTIALITÉS CONTROVERSÉES

Plusieurs scénarios européens envisagent la possibilité à l'horizon 2030 de substituer au pétrole près de 20 % de biocarburant de seconde génération – ce qui est considérable. Mais – comme l'indique le tableau qui suit – le potentiel de ces biocarburants est fortement controversé, au moins en France puisque les taux de substitution au pétrole varient, selon les experts, de 4 millions de Tep en 2050 à 22 dès 2030. (soit un pourcentage de substitution au pétrole de 5 à 50 % en 2050, même si les chiffres ne sont pas réellement comparables)

A côté d'avantages nombreux, les biocarburants de seconde génération devront en effet, pour se développer, surmonter des verrous importants :

- la concurrence avec d'autres usages possibles pour les déchets forestier (l'utilisation par l'industrie du papier, la compétition avec la production de chaleur ou d'électricité pour le bois de chauffage ...)
- la dispersion de la ressource, et donc la difficultés d'y accéder (coûts de transport) et de concentrer le traitement dans des usines de taille suffisante ;
- le manque de maturité technologique des procédés de transformation ;
- les incertitudes sur la rentabilité économique de la filière (optimisation des conduites de cultures, coûts de collecte, performance des process de conversion ...)
- la difficulté à organiser et coordonner des systèmes d'acteurs nombreux et dispersés.

NOTES CPVS DÉJÀ PARUES

Série Équipement

N°1 – La recherche dans le champ

Équipement – logement – transports – tourisme, état des lieux et enjeux

Jacques Theys

N°2 – Question sur l'État producteur

Gilles Jeannot

N°3 – La politique de recherche et de développement européenne dans le domaine des transports, son évolution et ses effets à venir sur la recherche publique en France

Jean-Marc Salmon

N°4 – Éléments pour une prospective de la sécurité

Jean-Pierre Galland

N°5 – Les territoires de la prospective

Serge Wachter

N°6 – Véhicules électriques et véhicules hybrides, quelles perspectives pour le futur ?

Yves Tugayé

N°7 – La prospective et la ville : un état des lieux

Thérèse Spector

N°8 – Les politiques territoriales en question

Serge Wachter

N°9 – Transports et pollution de l'air : une question controversée

Jean-Pierre Giblin

N°10 – Les risques du ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement

Jean-Pierre Galland

N°11 – Les recherches stratégiques sur les transports terrestres : enjeux et dynamique d'évolution (1996-2000)

André Pény

N°12 – L'évolution du marché des études dans le domaine de l'aménagement

Pierre Dubus en collaboration avec Pierre Pelliard et Serge Wachter

N°13 – Développement durable villes et territoires : innover et décroisonner pour anticiper les ruptures

Jacques Theys

N°14 – Normalisation, construction de l'Europe et mondialisation, éléments de réflexion

Jean-Pierre Galland

N°15 – Les mutations de l'accessibilité : risques et chances pour les politiques d'aménagement

Serge Wachter

N°16 – Mobilité urbaine : cinq scénarios pour un débat

Yves Crozet, Jean-Pierre Orfeuill, Marie-Hélène Massot et le "Groupe de Batz"

N°17 – Décentralisation et évolution du ministère de l'Équipement

Jacques Theys, François Perdrizet, Jean-Pierre Galland, Claude Spohr, Serge Wachter, Yves Janvier, Jean-Claude Nemery, Daniel Béhar et Gilles Jeannot

N°18 – La forme et le flux – Figures urbaines et architecturales de la mobilité

Serge Wachter

N°19 – Prospective et planification territoriales : état des lieux et propositions

Guy Loinger et Claude Spohr

N°20 – Pour une approche de l'aménagement des territoires par l'État

Claude Spohr et l'Association des Architectes et Urbanistes de l'État (AAUE)

N°21 – Perspectives et enjeux du transport de fret à l'horizon 2030 : réflexions préliminaires

Serge Wachter

N°22 – Le réseau scientifique du ministère de l'Équipement : une géographie

Jacques Theys, Pascal Bain & Anne-Marie Majou

Série Environnement

N° 1

**Société immatérielle
et mutation des valeurs vers
de nouvelles
représentations
de l'environnement
et du territoire**

Jacques Theys

N° 2

**L'expert contre le citoyen ?
Le cas de l'environnement**

Jacques Theys

N° 3

**L'environnement
au XXI^e siècle :
continuité ou rupture ?**

**Réflexion
sur la "gouvernance"**

Jacques Theys

Directeur de la publication :
Jacques Theys : Responsable du Centre de Prospective et de Veille Scientifique et Technique

Rédaction :
Jacques Theys

Réalisation technique et diffusion :
Aurélia Chaudebois

Diffusion :
Secrétariat du CPVST

Publications du CPVST en ligne sur le site Internet :
http://www.equipement.gouv.fr/recherche/publications/accueil_publications.htm

Informations :
adresse e-mail du CPVST :
jacques.theys@developpement-durable.gouv.fr

Impression :
Belle Page, ISSN 1263-2325
Achevé d'imprimer - mars 2008
Dépôt légal n° 71055

Centre de Prospective
et de Veille scientifiques
et technologiques

Tour Pascal B

92055

La Défense cedex

téléphone :

33 (0)1 40 81 63 23

télécopie :

33 (0)1 40 81 14 44

mél : www.

equipement.gouv.fr



Liberté • Égalité • Fraternité

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

**ministère de l'Écologie,
du Développement et de
l'Aménagement durables**