

**L'énergie  
dans la Belgique de demain.  
Prise en considération  
de l'effet de serre**

Illustration de la couverture :  
Les Écuries royales de la Place du Trône.  
© 1997.

Avec l'aimable autorisation de Chr. Bastin & J. Evrard.

## **CAPAS Science & industrie**

Le Comité de l'Académie pour les Applications de la Science « CAPAS » a été créé en 1987 en tant que société savante par l'Académie Royale de Belgique (Classe des Sciences), ainsi que par les milieux industriels scientifiques intéressés par les applications de la recherche et leurs effets économiques, sociaux et culturels.

Le CAPAS a pour mission de servir le pays et ses régions

- en offrant des avis indépendants et son expertise pour tout problème d'importance nationale ou régionale se rapportant à la recherche et à l'ingénierie ;
- en encourageant les accords au plan national et régional portant sur les choix à adopter en matière de recherche et de politique industrielle pour répondre aux besoins croissants actuels et aux besoins futurs du pays ;
- en supervisant le soutien effectif à la recherche et à l'innovation alloué par les pouvoirs publics aux universités, à l'industrie et aux économies nationale et régionale ;
- en développant la prise de conscience par le grand public des sciences et de l'ingénierie, et de leur influence sur la vie quotidienne ;
- en contribuant à une formation à la fois meilleure et continue des sciences et en ingénierie.

Le CAPAS est composé de 40 membres au plus, représentant à parts égales les milieux académiques et industriels. Il est complété par un réseau d'associés choisis pour leur compétence et leur notoriété.

Ses travaux sont entrepris, soit de sa propre initiative, soit à la demande de l'Académie, ou des pouvoirs publics, ou encore des organismes ayant vocation d'aide à la recherche.

Il collabore avec son homologue flamand, le CAWET (Comité van de Academie voor Wetenschappen en Techniek) pour constituer le BACAS (Royal Belgian Academy Council for Applied Sciences).

Le BACAS représente les Académies belges au sein d'organismes internationaux dont les activités concernent l'ingénierie et les sciences appliquées.

### **Composition du bureau du BACAS**

MM. A. Van Cauwenberghe, président  
V. Van den Balck, P. Klees, past présidents  
L. Gelders, J.J. Van de Berg, R. Wissaert, membres.

### **Composition du bureau du CAPAS**

MM. P. Klees, président  
L. Bolle, vice-président  
N.M. Dehousse, président d'honneur  
J.J. Van de Berg, délégué général  
A. Delmer, membre.

Les publications du CAPAS sont envoyées gratuitement aux organismes publics, aux universités, ainsi qu'aux participants à ses travaux et aux entreprises qui lui apportent leur soutien.

Des exemplaires peuvent être adressés sur demande, au coût unitaire de 500 BEF, à verser au compte n° 210-0079126-26 de « Académie Royale de Belgique – CAPAS » – 1, rue Ducale, 1000 Bruxelles.

## Table des matières

Executive summary .....	6
Introduction au rapport .....	10
<b>1. Industrie</b>	
Émission de gaz à effet de serre : l'énergie et les combustibles.....	16
<b>2. Le secteur domestique</b> .....	23
<b>3. Transport</b>	
Limites et nécessités d'évolution du transport dans le premier quart du 21 <sup>e</sup> siècle .....	27
<b>4. La production d'énergie électrique</b>	
Les émissions de CO <sub>2</sub> actuelles et futures .....	43
<b>5. Recommandations</b> .....	54

# **ENERGY IN BELGIUM TOMORROW TAKING IN ACCOUNT THE GREENHOUSE EFFECT**

## **Executive summary**

This document is the BACAS contribution to the decision making process of the Belgian Energy Policy for the coming 20-30 years in the frame of European energy studies by Euro-CASE.

A brief introduction outlines the scope and limitations of the project: the analysis is basically restricted to Belgium; the starting point is the principle of Sustainable Development in line with the Precaution Principle. The energy requirements of society are met by the consumption of fossil fuels (coal, oil, gas...) and the "renewable" energies (hydro, wind, sun, biomass etc.); nuclear fission takes a particular position in this context. For a long time, energy policies only considered economical and technical aspects. The "cost" of energy disregarded the environmental effects of various energy sources and the future scarcity of fossil fuels. A recent additional constraint was added by the increasing concern over global warming caused by the greenhouse effect. Even if the cause-effect mechanism and the eventual consequences are still unclear, the increase of the CO<sub>2</sub> content in the atmosphere and the rising temperature of the planet are well established. The Kyoto protocol is just a first step of a long journey.

The document comprises four chapters, industry, households, transportation and electricity generation. Each chapter analyses the present situation and makes recommendations for the future.

The CO<sub>2</sub> emissions arising from industry remained stable throughout the last decade, despite the increasing energy consumption of the sector, as a result of the shift in the energy mix towards fuels with lower specific emission factors. The main energy consuming sectors, iron and steel, chemicals and non-metallic minerals are reviewed.

Owing to energy conservation measures, the energy consumption of the steel industry decreased by 7% during the last decade. However CO<sub>2</sub> emissions remain high as a result of the ongoing use of blast furnaces for steel production in Belgium, and the recycling of scraps in electrical furnaces outside the country.

In the chemical sector there was a marked increase in energy consumption, though as a result of energy conservation measures, and a shift towards natural gas, this was well below the increase in production.

The energy consumption of the non-metallic minerals decreased by 17%, and the CO<sub>2</sub> emissions by even more.

It is therefore recommended to avoid linear measures across the industry and the regions. The potential for improvement in the industrial sector remains significant. The techniques are well known. Capacity expansions or concentrations are often necessary for economic reasons, as well as for maintaining or improving the competitiveness of the industry. The report underlines the difficulty of a correct allocation and understanding of energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions within the industrial sector. This is due to the use of fossil fuels (or even electrical power) as a raw material that cannot be "saved" and to the numerous transfers of intermediates between plants or companies in and outside the country, making comparisons most difficult. Furthermore, the small size of the country makes many comparisons meaningless. The complete life cycle of each product should also be considered. Any attempt to raise a CO<sub>2</sub> tax must consider and preserve the profitability of the industry, generally competing in a global market.

In the domestic sector (households and tertiary), the energy consumption on average increased by 2.2 %/year during the last decade as a result of the growing use of household appliances and information/telecommunication technology as well as the improvement of living standards (e.g. central heating, larger dwellings). A shift occurred from coal (and to a latter extent from petroleum products) to natural gas and electrical power. The marked growth of natural gas consumption results from not only larger market penetration of gas and the increase of the heated surfaces, but also from a shift in customer behaviour : the rather low energy prices since the late eighties decreased the willingness of consumers to invest in energy saving devices and adopt conservation attitudes. The same evolution is observed for the electricity consumption. The growth of the tertiary sector, the increase in living standards and the decreased interest in conserving energy, have wiped out the effects of technological improvements introduced since 1985. The report emphasises the need to manage demand, even in a liberalised market. The authorities should better communicate to its citizens the environmental consequences of their behaviour. A CO<sub>2</sub>/energy tax, feeding a fund for rational use of energy, could compensate for decreasing prices in a liberalised market. Human activities should be concentrated rather than distributed widely, thereby avoiding unnecessary transport. Introducing better control of the construction regulations and insulation standards, and giving more attention to the refurbishing of old dwellings are also essential. The report suggests the use of less degressive tariffs and more transparent bills, allowing comparison with previous bills and/or similar consumers ; real time information on consumption levels of electricity, water and gas could also be a useful tool. Finally, the consumer should be sensitised to the use of high efficiency appliances, to a changing understanding of the notion "comfort" and to the use of renewable energies.

The transportation chapter starts with a short survey of the sector in Belgium, Europe, the OECD and the world : the market share of the different transportation means (in Europe 79 % for the individual car !), their foreseeable increase (one million additional cars in Belgium in 2020), their energy efficiency (15 % for a car in an urban environment) and the resulting emissions (at least 24 % increase of the CO<sub>2</sub> emissions from on-land transportation in Belgium between 1990 and 2020, 40 % in the OECD and 110 to 120 % world-wide !). The total external costs, including noise, traffic jams, accidents etc. amounts to 250 billion euro, as compared to an added value of 290 billion euro.

The report gives a short overview of the different power sources for transportation over land or by sea (internal combustion engines, electrical and hybrid systems) and their foreseeable evolution (in 2010, an increase from 25 to 30-40 % for diesel cars, 5 % “alternative” solutions, a sharp decrease in all emissions except CO<sub>2</sub>). For the hybrid systems different options are open, and their future evolution still looks uncertain ; systems based on fuel cells using compressed hydrogen could be available in 2004 with 42 % efficiency. In the short term (< 2010) better links between the different transportation means, a fast realisation of the Regional Express Network and a more attractive urban public transport system are recommended. Whilst it is unthinkable to forbid the use of motorcars by individuals, this transportation system should be put in competition with other systems, such as “car sharing” of “clean” vehicles. Transportation by “simple” means (e.g. walking, cycling) should be encouraged. Hybrid technologies, the combination of electrical and thermal propulsion, with a high efficiency, and running on alternative fuels, e.g. methanol will be available in a few years. In the long run (> 2010) hydrogen emerges as an attractive fuel, but only when it can be produced without CO<sub>2</sub> emissions ; the final efficiency of hydrogen based systems in transportation remains very low ; further analysis of the generation, storage, distribution and transformation of hydrogen is necessary.

A last chapter focuses on the generation of electricity. The CO<sub>2</sub> emissions of the sector decreased by 29 % since 1980, notwithstanding a 67 % increase of the production. The specific emissions (kg CO<sub>2</sub>/kWh) are among the lowest in Europe. This is essentially due to the use of nuclear power. In 1999, 59.8 % of the production was from nuclear sources ; the seven Belgian units have an excellent operational record ; the government intends to close the units after 40 years in operation, commencing in 2015. A 13.8 % was generated by coal ; some of the coal stations are ageing and will be closed in the coming years. The use of natural gas in « classical » power plants is also decreasing (3.4 %), but the STAGs (STeam and Gas cycles), using high efficiency gas-turbine technology, take an increasing 16.5 % share in the generation. Other newcomers on the scene are the cogeneration units with 3.6 %. The



report discusses the available technologies for the coming 20 years : new nuclear reactors, safer and easier to build and operate, but facing public concern about safety, waste and proliferation ; STAGs, with still higher efficiencies, but facing uncertain future gas prices and gas availability ; modern coal units (pulverised coal, gasification and fluidised bed units), facing high CO<sub>2</sub> emissions ; renewable energy sources (wind, biomass, photovoltaic, hydro), facing their limited potential. The possible contribution by cogeneration and fuel cells is also discussed. For each technology the generation costs, including the “external” costs, are estimated. Nuclear plants emerge as the cheapest option followed by STAGs. Coal units have higher total costs and wind turbines can only compete in the most favourable locations, but decreasing investment costs as a function of time are noted. If we ignore the external costs, nuclear stations are only marginally cheaper than STAGs that lose their competitive edge compared with coal units. Wind turbines (and all other renewables) are no longer competitive. In a last paragraph the possible evolution of the generation system and the impact of the nuclear phase-out in the context of the Kyoto-protocol are discussed. The document recommends the introduction of stimuli for renewable energy, e.g. green certificates, and for “high quality” cogeneration. It warns that the respect of the Kyoto protocol looks impossible to reach in the event of nuclear phase-out. It is recommended to replace the older coal stations by STAGs but also emphasised that a complete phase out of coal would be risky for the security of supplies.

## Introduction du rapport

L'opinion publique est à nouveau intéressée par la problématique de l'énergie. Des ouvrages destinés au grand public sont consacrés au sujet. Des revues d'intérêt général comme des revues de vulgarisation scientifique le traitent. Des recherches scientifiques et techniques l'étudient.

Le cadre est celui du développement durable, c'est-à-dire une réponse aux besoins d'aujourd'hui sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire leurs propres besoins (extrait du document de la Commission Mondiale des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement, intitulé : « Notre avenir commun », 1987).

La notion de développement durable est complétée par le *principe de responsabilité*, énoncé par H. Jonas en 1979, exprimant l'idée qu'il faut anticiper les conséquences potentiellement destructrices ou irréversibles de nos actions. C'est un principe flou ; il doit être appliqué avec l'objectif de minimiser les risques et non pour tenter de réaliser l'utopie du risque zéro.

Les besoins énergétiques des sociétés humaines se traduisent par la consommation de deux catégories de ressources énergétiques : les combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) et les énergies dites renouvelables (hydraulique, éolienne, solaire, biomasse, géothermie). Mettons à part l'énergie nucléaire de fission. L'énergie de fusion nucléaire est hors de notre propos car elle n'est pas susceptible d'une mise en œuvre pratique avant le milieu du XXI<sup>e</sup> siècle. Si le prix actuel des énergies ne laisse pas entrevoir leur rareté, il serait bon que tout citoyen ait à l'esprit que les énergies non renouvelables seront en grande partie progressivement épuisées.

L'énergie a longtemps été étudiée des points de vue purement technique et économique. On établissait son coût, sans tenir suffisamment compte ni des effets sur l'environnement, ni de l'influence sur le climat et en conséquence sur le niveau des mers, mise en évidence depuis une décennie.

L'évaluation du coût indirect (effets sur la santé, l'environnement et le climat) est difficile car elle est liée à une estimation de la sensibilité des milieux naturels.

Nous savons que :

⇒ la teneur de l'atmosphère en gaz à effet de serre est passée en un siècle de 270 ppm (parties par million) à 368 ppm ;

- ⇒ la température moyenne de la terre a augmenté de 0,6 °C en un siècle ;
- ⇒ les années 1990 ont été les plus chaudes du XX<sup>e</sup> siècle.

Les scientifiques admettent aujourd'hui le réchauffement progressif du climat, partiellement anthropique. Tous les modèles le prévoient. La complexité est telle que la prédiction de la hausse de température moyenne au XXI<sup>e</sup> siècle reste dans une fourchette large (1,5 à 5,8 °C) \*. La valeur la plus basse suppose une action drastique sur la croissance des émissions de gaz à effet de serre. La valeur la plus haute porte sur un modèle où les émissions continueraient de croître au rythme actuel et où le climat réagirait fortement.

Ces prévisions se trouvent dans le rapport approuvé en octobre 2001 à Londres par l'Assemblée plénière du groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat, mis en place par l'OMM (Organisation Météorologique Mondiale) et le PNUE (Programme des Nations Unies sur l'Environnement).

D'après ce rapport, « *les politiques doivent réaliser que, quoi qu'ils fassent dans les dix, cinquante ou cent prochaines années, les changements en cours dans le système climatique comme la hausse du niveau de la mer, la fonte des calottes glaciaires, seront très difficilement réversibles* ».

La réalisation du Protocole de Kyoto n'est qu'un premier pas indispensable sur une longue route. Ce protocole, qui impose une réduction des émissions aux seuls pays industrialisés, a été – on le sait – dénoncé par les États-Unis. Un accord final est indispensable et difficile car il s'agit d'un enjeu à échéance lointaine, hors en tout cas des échéances électorales.

Le texte adopté à Londres, y compris par les Représentants des États-Unis, a désormais une valeur onusienne, mais il n'y a aucun automatisme dans sa prise en compte par les décideurs politiques.

La plus grande partie de l'émission des gaz à effet de serre provient de la consommation des combustibles fossiles.

La question posée par le BACAS au Groupe de Travail en suivi d'une réunion de Euro-CASE à Zurich les 17 et 18 mai 2001, est claire et s'inscrit dans l'optique du développement durable : comment diminuer drastiquement la consommation de combustibles fossiles, donc les émissions de CO<sub>2</sub>, en dehors de

\* Une extrapolation, basée sur la réalité observée durant les 25 dernières années du XX<sup>e</sup> siècle, donnerait 1,7 °C par siècle.

l'aspect des réserves énergétiques et de la sécurité d'approvisionnement.

L'analyse est limitée à la Belgique. La base en est un diagramme des flux énergétiques (voir annexe). Ce diagramme provient d'un document intitulé « Effet de serre. Consommation d'énergie. Une même équation », édité par la Fondation Roi Baudouin. Il a été établi par l'Institut Wallon du Développement Economique et Social et d'Aménagement du Territoire. S'il est basé sur l'année 1990, notre analyse porte sur des chiffres actualisés.

Le diagramme représente le passage de l'approvisionnement en énergies primaires (gauche), leur transformation suivant trois processus (cokerie et hauts-fourneaux, centrales électriques, raffinage des produits pétroliers) et ensuite leur consommation finale par trois secteurs (par ordre d'importance) : l'industrie, le secteur domestique, les transports. Le Groupe de Travail a considéré séparément la production d'énergie électrique qui n'émet pas de CO<sub>2</sub> pour la part nucléaire.

Le Rapport que nous présentons comporte donc la synthèse de quatre textes plus détaillés respectivement consacrées à l'industrie, au secteur domestique, aux transports et à la production d'électricité. Chaque secteur a été analysé par un rapporteur, discuté par le Groupe de Travail qui a énoncé, pour chacun d'eux, des recommandations engageant le groupe entier. Ces recommandations ont été groupées à la suite de cette synthèse.

La composition du Groupe de Travail, dans chacune de ses composantes, CAPAS et CAWET, est la suivante :

⇒ *Président*: Baron Jaumotte.

⇒ *Membres représentant le CAPAS*:

L. Bolle,  
J. Fraix  
J.F. Guilmot.  
P. Hatry  
P. Kinet  
P. Klees  
P. Tonon  
J.J. Van de Berg  
*Secrétaire*: L. Bindler

⇒ *Membres représentant le CAWET*:

R. Belmans  
P. Decraemer

W. Dhaeseleer

Ch. Hirsch

G. Maggetto

S. Ulens

F. Vanmassenhove

J. Van Mierlo

*Secrétaire*: J. Kretzschmar

⇒ *Membre invité*: Ph. Bourdeau

L'objectif du Groupe de Travail a été de donner une réponse réfléchie collective à une question: « Comment diminuer l'utilisation de combustibles fossiles, donc les émissions de CO<sub>2</sub>, dans la perspective du développement durable qui doit devenir un mode de pensée? ».

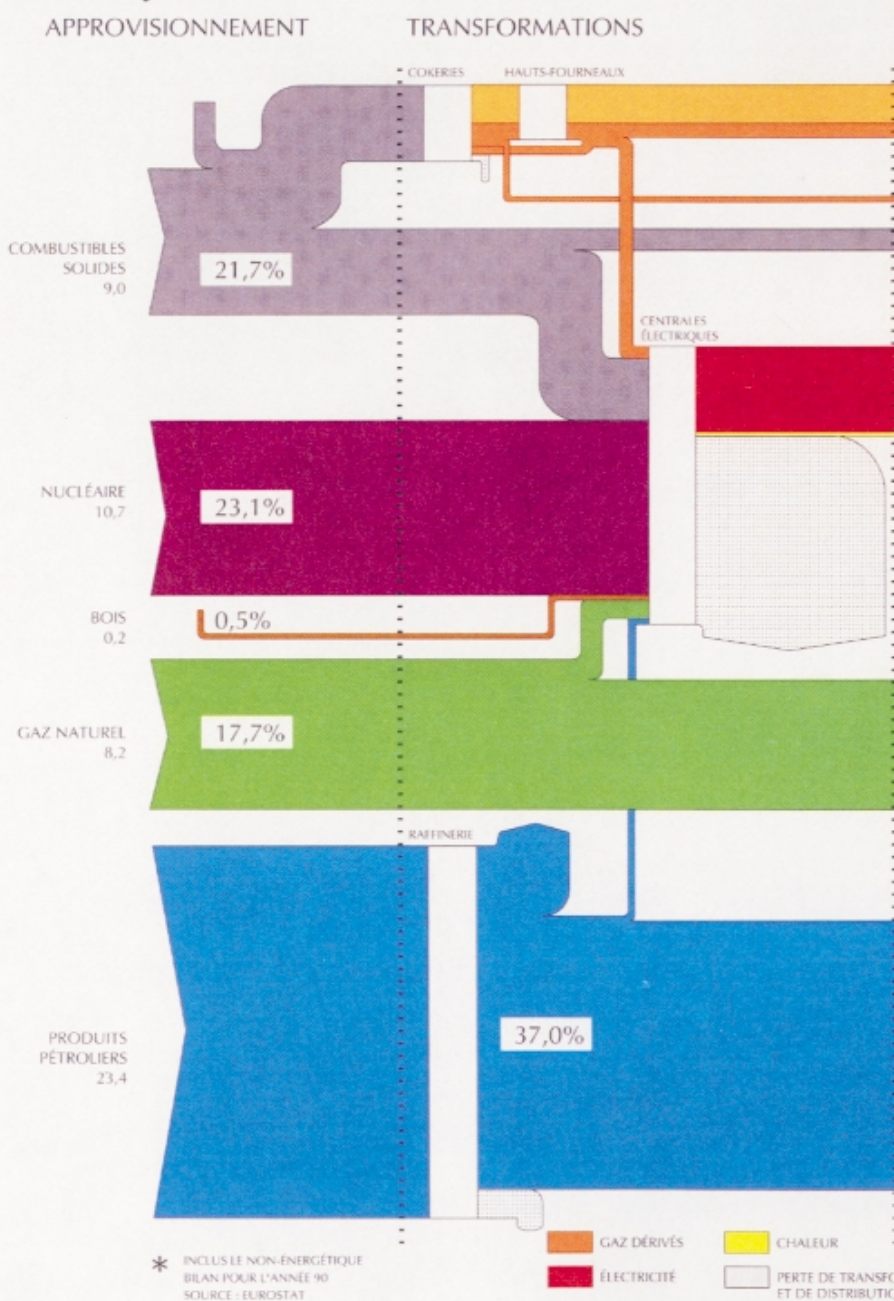
Puisse le monde politique trouver dans ce Rapport des éléments d'action dans le cadre institutionnel.

Cet opuscule constitue un Executive Summary.

Le texte complet des quatre chapitres analysant les cas de l'industrie, du secteur domestique, des transports et de la production d'électricité sera publié par le BACAS sous forme séparée.

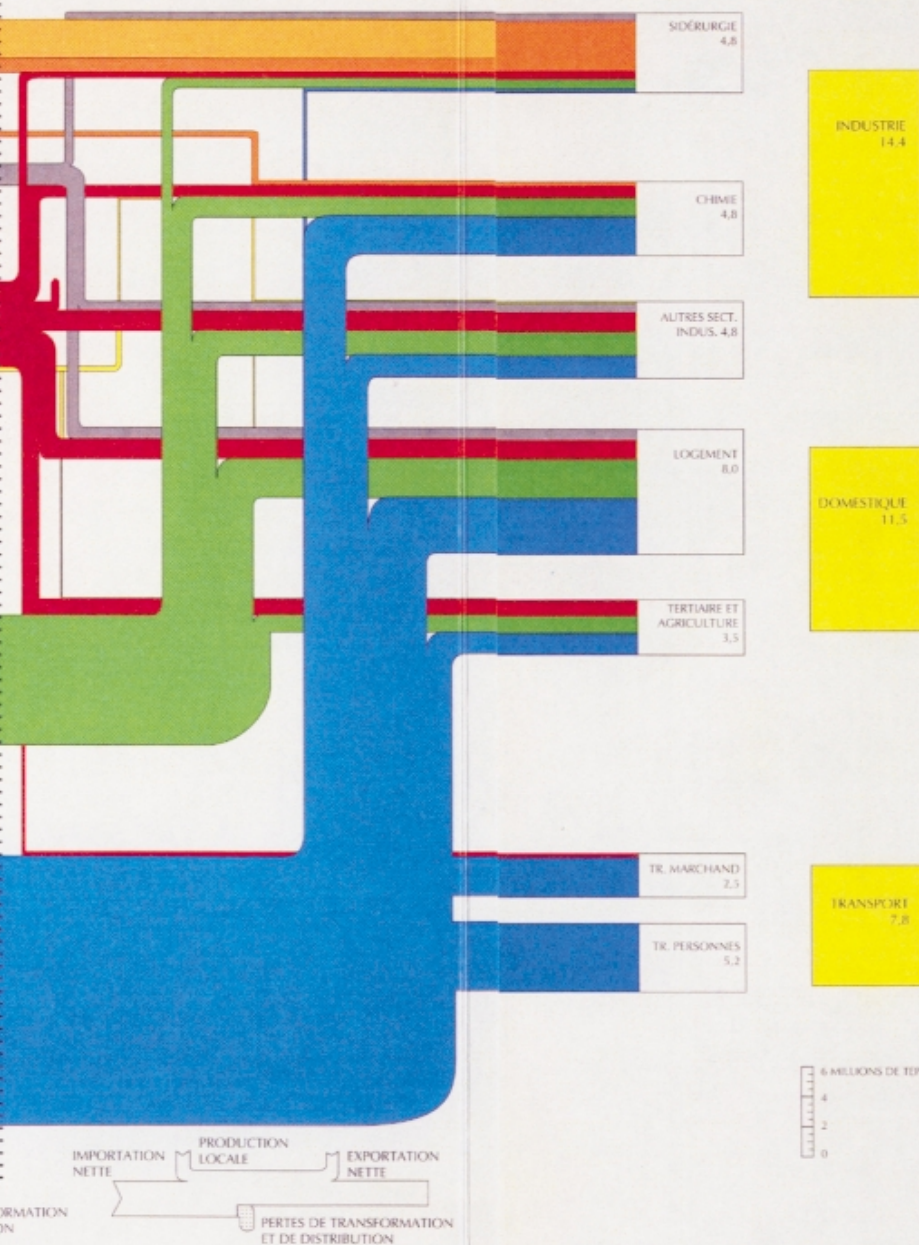
# BELGIQUE

# FLUX ÉNERGÉTIQUE



Les pertes de transformation sont inhérentes

TIQUES \* VALEURS EXPRIMÉES  
EN MILLIONS DE TEP  
CONSUMATION FINALE



à la production d'électricité par voie thermique

## **1. INDUSTRIE**

### **Émission de gaz à effet de serre : l'énergie et les combustibles**

#### **1.1 Consommation finale d'énergie**

Une première source d'émission de CO<sub>2</sub> provient de l'utilisation de combustibles fossiles par l'industrie. Situons la dans la consommation finale du pays (43,3 Mtep, millions de tonnes d'équivalent pétrole, en 1999).

L'industrie consommait 13,2 Mtep/an en 1999, un peu plus de 30 % de la consommation finale d'énergie du pays, entre le secteur résidentiel-et-équivalents (35 %) et le secteur des transports (22 %). Les usages non énergétiques sans production de CO<sub>2</sub> représentent un peu moins de 13 %, essentiellement destinés à l'industrie.

#### **1.2 Évolution dans le secteur industriel sur la décennie 1990-1999**

Le pourcentage de consommation finale d'énergie par l'industrie est en baisse de 35 à 30,5 % par rapport à l'année 1990, référence du protocole de Kyoto.

Mais la consommation absolue est en hausse de 12,2 à 13,2 Mtep/an. Cette hausse de 8 % est inférieure à la moyenne du pays (de 35 à 43,3 Mtep/an, +24 %), poussée par le résidentiel (de 12 à 15,2 Mtep/an, +27 %) et les transports (de 7,7 à 9,6 Mtep/an, +24 %).

Avec l'arrêt des charbonnages nationaux et sous la pression de la limitation des rejets, l'usage des combustibles solides s'est réduit en pourcentage de 31 à 24 %, et en valeur absolue de 3,8 à 3,2 Mtep/an. Les solides ne sont pratiquement plus utilisés par l'industrie qu'en sidérurgie (85 %) et dans les produits minéraux non métalliques (9 %) pour des procédés spécifiques.

L'usage des combustibles liquides a aussi diminué de 1,6 à 1,3 Mtep/an, de 13 à 10 %, par la concurrence du gaz naturel en progrès de 4,2 à 5,5 Mtep/an, de 34 à 42 %.

L'usage d'énergie électrique a crû de 2,6 à 3,2 Mtep/an, de 21 à 25 %.



La quantité de CO<sub>2</sub> rejetée par le secteur électrique est faible pour une énergie de cette qualité, de l'ordre de 0,27 kg CO<sub>2</sub> / kWh, soit 3,14 t CO<sub>2</sub> / tep. Elle reste par ailleurs attribuée à ce secteur dans les statistiques, et non pas aux utilisateurs finaux.

La quantité de CO<sub>2</sub> produite par combustion varie d'un maximum de 4,5 à 5 t CO<sub>2</sub> / tep pour les combustibles solides, à moins de 3 t CO<sub>2</sub> / tep pour des gaz combustibles riches en méthane, en passant par 3,1 à 3,4 t CO<sub>2</sub> / tep pour les combustibles liquides.

Ces productions spécifiques de CO<sub>2</sub> se combinent à l'évolution des consommations vers des produits moins riches en carbone citée au paragraphe précédent pour conduire à une stabilisation sur la décennie des rejets de CO<sub>2</sub> attribués globalement au secteur industriel.

### **1.3 évolution des branches industrielles**

L'évolution pour les 12 branches industrielles donne une image plus contrastée. Les trois plus gros consommateurs 1999 que sont la sidérurgie (4,7 Mtep/an, 35 % du secteur), la chimie (3,2 Mtep/an, 24 % du secteur) et les produits minéraux non métalliques (1,2 Mtep/an, 9 % du secteur) illustrent bien cette diversité.

#### *Sidérurgie*

La consommation énergétique globale de 4,7 Mtep/an en 1999 est en baisse de 7 % sur 1990 et de 26 % sur 1979. C'est l'effet des économies d'énergie et des regroupements et rationalisations des capacités.

Contrairement à l'ensemble des industries, la consommation d'énergie électrique n'a guère augmenté et la consommation de solides est restée stable, les économies portant sur les gaz et les produits pétroliers. C'est la conséquence du maintien en Belgique de la production des Hauts Fourneaux, où les oxydes de fer sont réduits à l'intervention de coke. La production au four électrique avec recyclage de mitrilles (un peu plus de 50 % peuvent être récupérées) est effectuée hors du pays, où sont économisés pour une même production les  $\frac{3}{4}$  de l'énergie nécessaire en Belgique.

Les comparatifs entre pays d'émissions spécifiques par tonne d'acier ou par habitant n'ont donc aucune signification de performance quand les filières de production et les échanges entre pays ou régions ne sont pas pris en compte.

### *Chimie*

La consommation énergétique globale de 3,2 Mtep/an en 1999 est en hausse de 32 % sur 1990 et de 75 % sur 1979. Cette évolution résulte du développement et d'une meilleure utilisation des capacités de production en Chimie / Pharmacie, notamment en vapocraqueurs, ammoniac et plastiques.

FEDICHEM publie un indice de production. L'indice 1999 est en hausse de 43 % sur 1990 et le double du chiffre de 1979. La hausse des productions est plus rapide que l'évolution des consommations énergétiques. On constate ainsi un glissement relatif vers des produits moins énergétiques, et l'amélioration des consommations spécifiques (l'indice FEDICHEM correspondant a progressé de 5 % sur 1990 et de 34 % sur 1979).

Les économies d'énergie et son utilisation plus rationnelle ont été partiellement absorbées par la progression de deux autres préoccupations écologiques : la filière des déchets a renforcé ses activités de collecte et d'élimination, avec les consommations énergétiques correspondantes, et le protocole de Montréal a conduit à éliminer les CFC (non repris dans les références du protocole de Kyoto) au profit de substituts moins polluants mais moins performants.

### *Produits minéraux non métalliques*

La consommation énergétique globale de 1,2 Mtep/an en 1999 est en baisse de 17 % sur 1990 et de 46 % sur 1979. La réduction porte essentiellement sur les combustibles solides, les plus producteurs de CO<sub>2</sub> à la tonne de pétrole équivalent.

La position de la branche apparaît donc confortable pour la limitation des rejets de CO<sub>2</sub> s'il n'y a pas d'extension sensible des capacités.

Trois autres branches du secteur se trouvent dans la même situation (industries extractives, machines, et dans une moindre mesure les métaux non ferreux).

## **1.4 Potentiel d'améliorations**

Les techniques connues permettent des économies d'énergie de 10 à 30 % des consommations proprement énergétiques (cette notion est discutée au point 1.6) :

- Équipements plus performants (transformateurs, moteurs, pompes, turbines, compresseurs, fours ...)

- Isolation renforcée, frottements réduits
- Entretien adapté
- Contrôle amélioré des procédés, modélisation, robotisation
- Layout optimisé
- Adoption de la BAT (Best Available Technology)
- Récupération de chaleur
- Partage des ressources énergétiques : Analyse de « Pinch » (par procédé et entre procédés), production simultanée d'électricité et vapeur (cogénération), et en plus de froid (trigénération), valorisation énergétique de sous-produits, partage des réserves...

Une étude de l'Académie Suisse des Sciences Techniques évalue à 20 % sur les consommations de 1990 l'économie possible en 30 ans, tout en réalisant une croissance de 60 %. Il s'agit toutefois d'un profil de productions et de consommations bien différentes du cas belge.

### **1.5 Conditions de réalisation**

Les améliorations possibles nécessitent des investissements dont certains peuvent être très importants, par exemple un changement de technologie ou la mise en commun de ressources énergétiques (contrairement à l'électricité, la chaleur et le froid ne se transportent pas facilement ; cette mise en commun peut entraîner des délocalisations d'unités de production).

Il faut que les investissements soient rentables, socialement acceptables, négociables quand plusieurs sociétés sont impliquées, et autorisés.

Les activités industrielles doivent en outre disposer de temps, de ressources suffisantes et d'un horizon de risque acceptable.

La rentabilité d'investissements de substitution augmente avec le degré d'amortissement des équipements anciens mais est généralement faible. Les chocs pétroliers successifs depuis 1973 ont en effet déjà provoqué beaucoup d'améliorations justifiées par des prix d'énergie élevés.

Les extensions permettent plus facilement la modernisation avec ou sans délocalisation. On constate que paradoxalement l'URE (Utilisation Rationnelle de l'Énergie) est favorisée par la croissance et la concentration sur un même site d'activités consommatrices d'énergie.

Il en résulte également qu'il est très difficile pour un territoire limité comme une région ou même le pays de simultanément

maintenir et développer une activité industrielle améliorée grâce à l'utilisation plus rationnelle et aux économies d'énergie, et de respecter un protocole du type Kyoto qui ne tient pas compte des échanges commerciaux.

Quand les prix sont fixés par les marchés internationaux, européens ou même mondiaux, ce qui est le cas général pour les produits manufacturés et surtout l'industrie lourde, à l'exception de services localisés, tout accroissement unilatéral de coût ne peut être répercuté sur les clients et réduit donc les ressources disponibles pour la croissance (et l'URE!) ou même pour le maintien d'une activité compétitive.

### **1.6 Vision correcte des rejets de CO<sub>2</sub>**

Un gros travail de mise au point de l'outil statistique est en cours et doit être poursuivi. La référence de 1990 est malheureusement moins précise.

Le CO<sub>2</sub> est produit par combustion de matières contenant plus ou moins de carbone dans des usages dits énergétiques. Pour l'industrie il s'agit en 1999 de 13,2 Mtep/an (millions de tonnes d'équivalent pétrole), et de 43,3 Mtep/an pour le pays.

Les usages non énergétiques sans combustion et donc sans production de CO<sub>2</sub> représentent 5,3 Mtep/an en 1999, un peu moins de 13 % de la consommations du pays, en progression de 76 % sur 1979. Dans ces usages les combustibles sont essentiellement utilisés comme matières premières pour la chimie et se retrouvent dans les produits finis. Il est inutile de vouloir réduire leur usage pour améliorer les rejets de gaz à effet de serre. Une telle réduction au delà de quelques augmentations de rendement implique d'ailleurs pratiquement de réduire les productions.

Mais d'autres usages énergétiques sont eux aussi incompressibles sans diminuer les productions.

Par exemple la réduction de l'oxyde de fer via le coke et le CO génère 1,2 t CO<sub>2</sub> / t fer en rapport stœchiométrique. Pour une production donnée de fer à partir de minerai, on ne peut donc espérer influencer que les quelque 0,5 t CO<sub>2</sub> / t fer produites en sus, soit moins de 1/3 de la consommation globale.

Il en est de même pour la consommation d'électricité dans les procédés électrolytiques. La loi de Faraday ne laisse place pour les économies qu'à un rapprochement de la tension réversible.

C'est aussi le cas de tous les procédés de séparation et de purification. Cette réduction d'entropie du système nécessite, suivant

le second principe de thermodynamique, un apport d'énergie minimum qu'il est impossible d'annuler.

Tous ces effets peuvent se calculer moyennant une connaissance approfondie des procédés par société. C'est évidemment très complexe.

Des statistiques comparatives (benchmarking) se développent et permettent d'estimer globalement sans calculs compliqués le potentiel d'économie. Leur utilisation requiert toutefois une bonne connaissance de la branche et des procédés utilisés par ses membres.

La vision correcte des consommations compressibles est en effet perturbée par les achats, ventes ou échanges de produits énergétiques. Les consommations d'énergie et la production correspondante de CO<sub>2</sub> restent généralement attribuées au producteur et ne sont pas transférées à l'acheteur ou utilisateur. Il s'agit de fluides chauds ou froids, de produits actifs (oxydants, réducteurs, acides, etc.). L'achat d'électricité et vapeur produites en cogénération par exemple est sans rejet d'oxyde de carbone pour l'acheteur, alors que la même production autonome le ferait apparaître. La cession de gaz résiduaire de sidérurgie à un électricien plutôt qu'une utilisation propre a le même effet sur les rejets liés à l'acier, bien que leur teneur en CO<sub>2</sub> soit important. L'achat de dichloréthane pour la production de VC-PVC élimine les consommations apparentes de la production de chlore, etc.

Un autre facteur à considérer est la durée de vie du produit, et en finale les possibilités de recyclage et les procédés d'élimination. Des produits plus résistants ou plus légers peuvent en effet se révéler plus favorables à l'effet de serre que ne l'indique le procédé de production quand on considère aussi l'utilisation au fil du temps et l'élimination ultime.

Le transport ne peut pas non plus être négligé. D'une part le transport sous-traité est repris dans le secteur transport, contrairement aux consommations d'une flotte propre, ce qui peut fausser les comparaisons. Par ailleurs il serait illusoire de faire apparaître des économies d'énergie purement formelles affichées en important, au prix de transports supplémentaires, des produits à haut contenu énergétique fabriqués ailleurs et donc non repris dans les statistiques.

Enfin on peut se demander pourquoi la production de CO<sub>2</sub> reste attachée à des processus intermédiaires comme la production industrielle ou la production d'électricité, au lieu de se retrouver, comme la TVA, à charge de l'utilisateur final. L'émis-

sion de gaz à effets de serre résultant de la production d'engrais par exemple ne peut être analysée par la branche chimie qu'en comparant des procédés de production, alors qu'il faut aussi, et peut-être surtout, considérer l'usage par l'agriculture et les modes de production agricole.

### **1.7 Conclusions**

Pour envisager une amélioration réelle des rejets de gaz à effet de serre il faut développer une vision non linéaire intégrée des usages d'énergie par les acteurs respectifs depuis l'extraction des matières premières jusqu'à l'élimination ultime des produits en tenant compte de leur durée de vie, des transports et des échanges commerciaux. Cette vision intégrée nécessite une participation active des différents acteurs, dont sûrement les branches industrielles et certains de leurs membres.

Pour obtenir des résultats il faut établir des programmes précis dans une vision à long terme qui tienne compte des ressources à dégager. Le maintien de la compétitivité de l'industrie est essentiel.

La faible dimension du pays, et plus encore des régions rend difficile la fixation d'objectifs significatifs par activité ou par zone géographique, de même que l'insertion dans des accords internationaux qui ne tiennent pas compte des échanges commerciaux.

## **2. LE SECTEUR DOMESTIQUE**

### **2.1 Évolution des consommations du secteur « domestique »**

En 1998, la consommation énergétique du secteur domestique regroupant le résidentiel, le tertiaire et l'agriculture, représentait environ 38 % de la demande finale d'énergie, contre 42 % en 1985 en présence de conditions climatiques beaucoup moins favorables. À conditions climatiques comparables, la consommation énergétique du secteur augmente en moyenne de 0.9 % par an depuis 1985, avec toutefois une accélération notable durant la décennie 90 puisque, entre 1990 et 1999 cette consommation s'est accrue en moyenne de 2.2 % par an.

Cette augmentation est à mettre en relation avec l'accroissement continu des usages spécifiques (électroménagers, informatique et télécommunication, cuisson) et l'amélioration du niveau de vie (développement du chauffage central et accroissement de la taille moyenne des logements). Durant ces vingt dernières années, les technologies permettant une utilisation plus efficace de l'énergie se sont développées lentement dans le domaine de la construction et le potentiel d'économie encore disponible reste énorme. Les nouvelles techniques de construction, les matériaux et les équipements ont évolué rapidement permettant un très large éventail de mise en œuvre d'utilisation rationnelle de l'énergie dans les bâtiments. Toutefois comme la part des nouveaux logements construits chaque année reste faible par rapport au stock de logements, il est essentiel que ces technologies soient aussi implantées dans des logements existants. En fait la rénovation des logements offre une des meilleures opportunités pour une diffusion rapide des technologies d'utilisation efficace de l'énergie. Une telle politique doit nécessairement être mise en place pour limiter la croissance de la consommation finale d'énergie du secteur « domestique » qui a crû de 21 % depuis 1990. Les statistiques montrent que la consommation a augmenté de 14 % depuis 1990 dans le secteur résidentiel alors que le secteur tertiaire augmentait de 43 % !

### **2.2 Évolution de la consommation par type de combustible**

Pour la répartition de la consommation par type de combustible il faut souligner la quasi-disparition des combustibles solides.

Ceux-ci ont vu leur consommation réduite de 83 % depuis 1985 et ne représentent plus actuellement que 1.4 % de la consommation finale du secteur. La demande de produits pétroliers s'est également légèrement contractée entre 1985 et 1990. Les fluctuations importantes observées depuis 1990 (minimum de 5.2 Mtep en 1990 et maximum de 7.1 Mtep en 1996) sont principalement le reflet des variations climatiques. Les produits pétroliers représentent encore 42 % de la demande totale du secteur, le même niveau qu'en 1985. Le gaz naturel et l'électricité ont augmenté lentement leurs parts de marché pour atteindre 34 % et 21 % de la demande totale contre respectivement 32 % et 15 % en 1985. Depuis 1990, la consommation de gaz naturel a augmenté de 3.4 % par an en moyenne en gagnant de substantielles parts de marché du chauffage au détriment du gasoil de chauffage et des combustibles solides. La croissance de la demande de gaz sur le marché résidentiel a atteint 3.1 % par an depuis 1990 et 4.2 % par an sur le marché du tertiaire. Cette croissance résulte d'une augmentation de part de marché et d'un accroissement des surfaces à chauffer mais les modifications comportementales des usagers doivent également être prises en compte ! Des prix de l'énergie relativement bas depuis la seconde moitié des années 80 ont modifié les décisions d'investissement des propriétaires vis-à-vis des investissements d'utilisation rationnelle d'énergie, d'isolation, de contrôle et de régulation. Tout comme la vigilance des usagers s'est trouvée réduite pour le contrôle des températures.

La demande d'électricité durant la seconde moitié des années 80 a crû au rythme de 4 % par an en moyenne soit un tiers plus rapidement que le Produit Intérieur Brut. Mais en augmentant de 3.4 % par an depuis 1990 elle a augmenté deux fois plus rapidement. Les contributions des réseaux de chaleur et des énergies renouvelables sont restées négligeables sur tout l'horizon considéré.

### **2.3 Évolution de l'intensité énergétique**

L'évolution de l'intensité énergétique dans le secteur « domestique » est particulièrement difficile à mesurer. Les indicateurs classiques d'intensité qui se rapportent au PIB agrègent en effet des activités commerciales faisant partie intégrante du PIB, le tertiaire, avec des activités non commerciales, le secteur domestique au sens strict. De plus l'impact des conditions climatiques rend l'analyse d'autant plus difficile que les consommations cor-



rigées des effets climatiques ne sont pas disponibles au niveau européen. L'indicateur classique de la consommation totale du secteur montre une amélioration globale de 17 % depuis 1985 ; mais sur la même période l'amélioration des conditions climatiques (1999 à comparer à 1985) se traduit par une réduction estimée des besoins de chauffage d'environ 16 %. En corrigeant la demande totale d'énergie par la prise en compte des conditions climatiques moyennes, il apparaît que l'intensité énergétique ne s'est réduite que de façon marginale depuis 1985. L'accroissement du niveau de confort, la moindre importance accordée à l'utilisation rationnelle de l'énergie (compte tenu de son bas prix), et la croissance du secteur tertiaire ont partiellement absorbé les gains de consommation générés par les améliorations technologiques introduites depuis 1985. L'accroissement de la consommation par habitant de 0.6 % par an en moyenne depuis 1990 confirme cette impression.

## **2.4 Conclusions**

Contexte	Conditions de la maîtrise des consommations
<ul style="list-style-type: none"><li>- baisse des prix</li><li>- augmentation de la consommation</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- faible coût des mesures proposées</li><li>- implication des pouvoirs publics</li><li>- prise en compte des coûts externes</li></ul>

Une des principales conclusions de l'analyse des statistiques « consommations d'énergie du secteur domestique » est que la baisse des prix de l'énergie après 1985 s'est accompagnée d'une hausse sensible des consommations de combustibles fossiles et d'électricité, phénomène d'autant plus marqué que les consommations annuelles sont ramenées à climat constant.

Cette croissance des consommations n'a pas été perceptible pour le consommateur, car la baisse des prix de l'énergie et la succession d'hivers peu rigoureux se sont traduites par une diminution de sa facture énergétique.

C'est sans doute une des principales raisons de la hausse des consommations. Mais d'autres facteurs entrent en jeu :

- l'augmentation du nombre de logements et la diminution du nombre d'habitants par logement, tendance existant dans l'ensemble des pays européens (isolés, ménages monoparentaux, réduction du nombre d'enfants par famille) ;

- la plus grande intensité énergétique des logements et des bâtiments du tertiaire (nouveaux appareils électriques, conditionnement d'air, informatisation, ...);
- l'augmentation du revenu avec comme corollaires l'augmentation du confort demandé et un desserrement de la contrainte budgétaire sur les dépenses énergétiques;
- l'augmentation des superficies moyennes tant dans les logements que dans le tertiaire.

En outre, dans la perspective de la libération annoncée des marchés du gaz et de l'électricité, il est légitime de se poser la question de la pertinence d'une approche « gestion de la demande » dans les marchés libéralisés qui devraient, du moins à court moyen terme, présenter des réductions sensibles des prix de l'énergie. En effet d'ici la fin de la décennie, les petits consommateurs, que se soient les ménages ou les clients du secteur tertiaire, pourront choisir leur fournisseur d'énergie avec probablement des offres de fourniture d'énergie (électricité, gaz ...) à des prix concurrentiels.

Face à cette situation, le risque est grand que le consommateur n'investisse pas dans les appareils plus efficaces au niveau énergétique. Devant la diminution relative des dépenses énergétiques tant dans le budget des ménages que dans celui des entreprises les incitants pour investir dans l'utilisation rationnelle de l'énergie se trouvent en effet fortement amoindris.

La gestion de la demande doit cependant être tentée. Elle peut réussir si les différents acteurs sont conscients des enjeux et prennent les mesures nécessaires à leur niveau respectif.

Les trois principaux acteurs potentiels de cette action sont les pouvoirs publics, les fournisseurs d'énergie et le consommateur final, qu'il s'agisse des ménages ou des gestionnaires des bâtiments du tertiaire.

### **3. TRANSPORT**

#### **Limites et nécessités d'évolution du transport dans le premier quart du 21<sup>e</sup> siècle**

##### **3.1 Quelques faits relatifs à la mobilité des personnes et des marchandises**

En guise de point de départ de ce voyage dans le futur du transport, il est nécessaire d'éclairer un certain nombre de faits relatifs à la mobilité des personnes et des marchandises.

###### *3.1.1 Emploi - Économie*

L'industrie européenne du transport constitue un secteur économique important. Elle se situe en effet parmi les trois employeurs les plus importants avec 14 millions de personnes occupées dans le secteur, soit 10 % de la population active, qui se répartissent en 6 millions dans le secteur des services transport, 2 millions dans le secteur de l'équipement transport et plus de 6 millions dans des activités liées au transport. La dépense transport des ménages absorbe 14 % des revenus. La répartition modale du transport de personnes exprimée en p.km est la suivante : 79 % en voiture, 8 % par autobus et autocars, 7 % par air, 6 % par rail et moins de 1 % par le tram et le métro.

La répartition modale du transport des marchandises exprimée en t.km présente une structure sensiblement différente : 43 % par la route, 41 % par mer, 9 % par le rail, 4 % par les voies d'eau intérieures et 3 % par pipelines.

###### *3.1.2 Croissance*

La prévision de croissance européenne du transport de passagers est de 19 % d'ici à 2010 ; elle résulterait d'une croissance de 16 % du transport routier et de 90 % du transport aérien. Pour le transport de marchandises une croissance globale de 38 % est prévue par une croissance de 50 % du transport routier et de 34 % du transport maritime.

Pour la Belgique, cette croissance correspond à un passage de 4,56 millions de voitures en 2000 à 5,22 millions en 2010 et à 5,53 millions en 2020.

Plus inquiétante est l'augmentation mondiale du nombre de véhicules. A l'horizon 2030, il y aura autant de véhicules (800 millions) dans les états regroupés au sein de l'OCDE que dans le reste du monde, ce qui signifie une croissance globale de 100 % (un doublement) par rapport à la situation actuelle, pour 65 % en zone OCDE. En zone OCDE, on garderait donc pendant longtemps encore le taux de croissance de 2 % annuels qui prévaut actuellement.

### 3.1.3 *Énergie*

L'efficacité énergétique des différents moyens de transport varie fortement. Ceci résulte des lois de la thermodynamique mais aussi de la technologie de traction utilisée et du niveau de puissance où on se situe.

Constater que le rendement énergétique d'une voiture tombe en dessous de 15 % lorsqu'elle roule en ville (80 % des voitures circulent essentiellement en ville) n'émeut que peu de monde (même aujourd'hui) et pourtant cela veut bien dire que, du réservoir de 50 litres de carburant, seuls 7,5 litres seront utiles et 42,5 litres iront réchauffer et polluer l'atmosphère. Dans la liste des carburants actuels, le diesel est le meilleur suivi par l'essence et les carburants gazeux (gaz naturel, GPL).

Une grande prudence s'impose lorsque l'on fait des évaluations de consommation d'énergie : un moyen de transport vide est totalement inutile ; il y a donc lieu d'évaluer l'efficacité par rapport à la fonction à remplir de déplacer des personnes ou des marchandises.

Avec des taux d'occupation de 35 % pour la voiture (1,4 personnes), de 40 à 70 % pour le train, de 60 % pour le bus interurbain et également de 60 % pour l'avion sur lignes intérieures, on arrive aux résultats suivants :

- le train aura une consommation d'énergie primaire par personne de 15 à 50 % de celle de la voiture ;
- le bus interurbain relativement plus léger que le train, se situe à 70 % de la consommation énergétique de ce dernier et à 42 % de la voiture ;
- l'avion se situera à 60 % de la voiture mais à 300 % du train rapide (pas à grande vitesse) ; mais ici le facteur temps joue un rôle considérable ;
- en ville, le métro se situera aisément en dessous de 50 % par rapport à la voiture.

Pour le transport de marchandises, masse et volume jouent un rôle :

- le bateau, pour le transport intérieur, peut se situer au double du rail à cause de sa motorisation diesel ;
- le rail pourra se situer à 40-55 % du transport par route.

Quel que soit l'exemple considéré, il faut prendre en compte la dépense énergétique de l'ensemble des moyens de transport utilisés entre l'origine du déplacement et sa destination finale.

Dans l'appréciation économique du trajet, sa durée aura bien entendu une importance non négligeable.

Les chiffres cités sont indicatifs car ils sont liés à un ensemble de trajets typiques ; ils montrent surtout la nécessité d'analyser les déplacements par catégorie et illustrent l'avantage énergétique relatif potentiel des différents modes de transport.

L'avantage du rail (tram, métro) n'est pas l'effet du hasard . Il résulte de la combinaison de deux facteurs importants : la capacité de transport et l'utilisation de l'énergie électrique.

Les transports à très longues distances (supérieures à 2.000 km) doivent être analysés différemment car les moyens mis en œuvre dépendent de l'objet transporté. Le transport maritime assume 90 % en volume du commerce extérieur de marchandises de l'UE. Il assure en outre 41 % du transport de marchandises intra-communautaire.

En conclusion, il est plus qu'aisé d'affirmer que l'utilisation de l'énergie dans les transports actuels n'a rien de commun avec l'URE.

#### 3.1.4 *Émissions*

C'est l'ensembles des émissions locales qui détermine in fine l'état environnemental de la planète. Certaines sont maîtrisables (transport, production d'électricité, industrie,...), d'autres pas du tout (volcans, rayonnement solaire, ...).

La limitation de la contribution du transport à la pollution atmosphérique ne pourra se faire que par des actions locales et régionales dont le succès dépendra du degré de sensibilisation des populations concernées.

Le passage progressif aux normes d'émissions successives EURO I, EURO II, EURO III, EURO IV (2004) et EURO V (véhicules lourds, 2005) conduit à la maîtrise des émissions de CO, NOx, hydrocarbures et particules. Malgré l'accroissement

prévu du parc automobile, l'ensemble de ses émissions subira des diminutions importantes. Cette situation vaut pour la Belgique, l'UE et l'ensemble de pays de l'OCDE. Pour le reste du monde, un accroissement important est prévu conduisant à une augmentation globale de l'ordre de 45 à 55 % pour les divers composants.

Une maîtrise semblable des émissions est prévisible et réalisée pour la production d'énergie électrique dont le rôle dans les transports publics (trains, trams, métro, trolleybus) est important.

Pour le CO<sub>2</sub>, la situation est totalement différente car ce gaz est nécessairement émis par la combustion et sa quantité dépend directement de la totalité des p.km pour le transport de personnes et des t.km pour le transport de marchandises. Le rendement des moteurs thermiques subira encore des améliorations dans les dix prochaines années mais les limites sont fixées par les lois de la physique et nous approchons des valeurs asymptotiques. De même, si certains gains peuvent être obtenus par l'allègement et le profilage du véhicule, là aussi les limites sont proches.

Quoi qu'il en soit, il est étonnant d'observer que chaque année une voiture rejette en moyenne de 4 à 5 tonnes de CO<sub>2</sub> ce qui représente donc quatre à cinq fois la masse d'un véhicule de 1000 kg.

En Belgique, l'étude IFEU rapporte qu'une croissance minimale de 6 à 10 % de l'émission de CO<sub>2</sub> du transport routier peut être attendue entre 2000 et 2020, c.-à-d. une croissance annuelle de 0.3 % à 0.55 %, résultant de la combinaison de performances meilleures et d'une augmentation du kilométrage total.

Si l'on se réfère à l'année de référence 1990 la croissance annuelle est de 1.7 % entre 1990 et 2000 et de 0.86 % entre 2000 et 2020. Mais 40 % de croissance totale sont également possible si l'on considère l'analyse pour l'OCDE.

Pour l'UE, 28 % des émissions sont dues au transport et il est prévu que 90 % de leur accroissement futur aura la même origine.

Pour l'OCDE et les autres pays réunis, la croissance prévisible est bien plus dramatique : pas moins de 110 à 120 %.

D'autres émissions de gaz à effet de serre, notamment du méthane, sont dues au transport.

Pour le transport aérien, l'émission de gaz à l'altitude de 10 à 11 kilomètres engendre par formation d'ozone à partir de NO<sub>x</sub> une

contribution à l'effet de serre deux à trois fois plus grande que celle résultant de CO<sub>2</sub> produit par la combustion du combustible.

Le transport aérien produit 10 % des p.km totaux et contribue à moins de 1 % du transport de fret. Les émissions en altitude pourraient ainsi contribuer pour un quart de la part du transport à l'effet de serre. L'aviation présente la croissance la plus rapide en transport de personnes et de marchandises ; en 2030 sa contribution à l'effet de serre pourrait dépasser de 50 % celle des véhicules légers et celle des véhicules lourds, ces deux dernières étant quasiment égales.

### *3.1.5 Évolution de l'approvisionnement en énergie*

À l'horizon 2010 le transport de passagers pourrait croître de 19 %, se répartissant en 16 % de croissance de la mobilité routière et 90 % des déplacements aériens.

Le transport de marchandises pourrait quant à lui croître de 38 %, se répartissant en une augmentation de 50 % pour la route et de 34 % pour le transport maritime.

Globalement la prochaine décennie pourrait ainsi voir une croissance annuelle de 2 %.

L'élargissement de l'UE ne fera qu'aggraver considérablement cette situation.

L'industrie automobile (groupement ACEA) s'est engagée vis-à-vis de l'UE à réduire les émissions de CO<sub>2</sub> de 190 g/km en 1995 à 120 g/km en 2012 afin de contrecarrer l'effet de la croissance des p.km.

L'UE a vu sa dépendance énergétique passer de 60 % en 1973 à 50 % en 1999 mais d'ici à 20 à 30 ans cette dépendance pourrait atteindre 70 % globalement avec en particulier 90 % pour le pétrole, 70 % pour le gaz naturel, et 100 % pour le charbon. Une fois encore, l'élargissement ne fera qu'augmenter ces chiffres.

Selon le rapport « L'énergie dans la Belgique de demain » : « Il n'y a pas de pénurie d'énergie à redouter avant l'an 2020. Des scénarios volontaristes permettent d'étendre cette conclusion jusqu'à 2050. »

Ce scénario, plutôt optimiste ne dit pas à quel prix cet accès à l'énergie sera possible et ne tient pas compte de la différence croissante qui pourrait s'installer dès 2010-2015 entre la demande en pétrole et la capacité de production.

La continuité, ou plutôt la pérennité de l'accès au pétrole conventionnel, dit aussi pétrole bon marché, semble être claire-

ment remise en question. Selon l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE - IEA) un maximum de la production de pétrole pourrait se produire d'ici 15 ans, suivi d'un déclin inévitable. D'autres prévisions ont été publiées prédisant un délai plus court. Sans mesures particulières, la demande de pétrole conventionnel continuera à croître et conduira à un accroissement des prix ainsi qu'à la production croissante de pétrole non conventionnel provenant de réserves moins accessibles ou de qualité moindre.

Cette situation s'explique par le fait que les découvertes de nouvelles réserves pétrolières ont culminé au début des années 1960 et que depuis leur volume n'a cessé de décroître.

Même en considérant l'apport du décalage dans le temps de l'exploitation des réserves non conventionnelles, la situation ne sera guère améliorée et les délais restent courts.

Pour le gaz naturel une situation semblable prévaut avec un décalage de 10 à 20 ans.

Les tensions, prévisibles, qui résulteront à bref délai de l'épuisement des réserves pétrolières posent le problème dramatique d'une révision fondamentale de l'organisation de la mobilité et des transports.

### *3.1.6 Bruit*

Le transport, et plus spécialement le transport routier, est la source principale de nuisance acoustique en région urbaine. Les effets varient entre la perte de confort, 55-60dB (A) et l'agression physique, au-delà de 65-70 dB (A), pouvant ainsi conduire à la perte de sommeil ou à des troubles cardio-vasculaires. De la population de l'UE, 30 % est exposée à un bruit de trafic supérieur à 55dB (A) et 13 % subit plus de 65 dB (A).

Le bruit du transport aérien perturbe 10 % de la population en UE.

### *3.1.7 Coûts externes*

Les émissions, le bruit, la congestion du trafic, la sécurité, l'occupation du sol créent un ensemble de coûts supplémentaires imputables à la mobilité de l'ordre de 250 milliards d'euro, soit 4 % du PIB selon la DG TREN, à comparer à la valeur ajoutée liée à la mobilité qui atteint, elle, 290 milliards d'euro. Autrement dit, pour un euro de valeur ajoutée, la mobilité crée un euro de coût externes, bien entendu non comptabilisés jusqu'à présent.



## **3.2 Évolution technologique des moyens de transport**

Deux facteurs imposeront des évolutions majeures permettant la mise en œuvre de technologies nouvelles pour les moyens de transport et les systèmes de transport :

1. l'accès à l'énergie
2. l'état de l'environnement

Associés à l'économie, ces deux facteurs sont liés à la notion de développement durable.

L'évolution prévisible du transport aérien sera principalement influencée par la mise en œuvre de nouveaux carburants parmi lesquels l'hydrogène pourrait jouer un rôle important.

Pour les transports terrestres et maritimes, deux familles de motorisation se partageront la tâche du déplacement des personnes et des marchandises :

- les moteurs thermiques
- les moteurs électriques

Cette répartition des tâches conduit aux technologies hybrides.

### *3.2.1 Brève analyse des technologies de propulsion*

Deux types de motorisation se partagent actuellement le transport terrestre de manière dominante en Belgique, en UE et dans les pays OCDE :

- la motorisation thermique, diesel, essence ou gaz, pour la traction routière légère ou lourde
- la motorisation électrique, en transport ferroviaire ou urbain

Pour la traction routière, l'apport très probablement croissant de l'électricité conduira à un ensemble de systèmes de traction apparemment disparates mais dont une analyse plus précise montre la continuité.

#### *Structures à moteur à combustion interne*

Les structures à moteur à combustion interne mettent en œuvre la chaîne énergétique suivante : réservoir de combustible (essence, diesel ou gaz), moteur à explosion, transmission, différentiel, roues.

L'arrêt du véhicule nécessite l'emploi d'une structure d'accouplement adéquat (embrayage ou coupleur) pour éviter l'arrêt

du moteur et permettre de développer un effort de traction suffisant au démarrage.

### *Structures électriques*

Le véhicule électrique présente en fait une structure très semblable : réservoir d'énergie (batterie), convertisseur électronique, moteur électrique, transmission, différentiel, roues.

Cette structure ne nécessite pas d'embrayage entre le moteur et les roues. Il est possible d'intégrer directement le moteur dans la roue (en deux ou quatre roues motrices).

À l'arrêt, le moteur électrique développe sa force de traction maximale.

### *Structures hybrides*

L'association de machines thermiques et électriques conduit aux structures hybrides dont nous limiterons la présentation à quatre groupes.

La structure hybride série met en œuvre une traction totalement électrique, composée d'un convertisseur, d'un moteur électrique, d'une transmission, d'un différentiel, des roues, alimentée en énergie électrique par une, deux, ou trois sources connectées en parallèle.

Dans l'hybride série thermique, une des sources se compose d'un réservoir (diesel, essence, gaz), d'un moteur thermique (ou turbine à gaz), d'un alternateur et d'un convertisseur électronique (redresseur-chargeur). À la sortie du groupe, une batterie et/ou une unité capable de fournir brièvement (quelques secondes) des pointes de puissance peuvent venir se connecter en parallèle. Ces composants peuvent être présents séparément, simultanément ou peuvent être tous deux absents. Dans ce dernier cas on retrouve la chaîne de traction communément appelée « diesel-électrique ».

Dans le cas de la structure série à pile à combustible, la source d'énergie comprend une pile à combustible alimentée en hydrogène directement à partir d'un réservoir ou par un ensemble réservoir de combustible / reformeur, ce dernier transformant le combustible en hydrogène.

La structure hybride parallèle associe la traction par moteur électrique à la traction par moteur thermique. On y retrouve donc un couple réservoir-moteur thermique additionnant son énergie mécanique au niveau de la transmission à celle prove-

nant de l'ensemble batterie – convertisseur électronique – moteur électrique pour alimenter les roues à travers le différentiel.

La combinaison de la structure hybride série et de la structure hybride parallèle conduit à la structure hybride « complexe » ou « série-parallèle ».

La voie parallèle principale se compose des éléments suivants : réservoir, moteur thermique, transmission, moteur électrique.

La voie série se retrouve dans la chaîne : réservoir, moteur thermique, transmission, génératrice électrique, chargeur, batterie, convertisseur électronique.

Le différentiel est bien entendu commun aux deux voies.

La famille des hybrides à pile à combustible appartient au groupe hybride série, la répartition de puissance se faisant cette fois entre la pile à combustible et la batterie. La disparition de la batterie conduit cette fois à une motorisation 100 % électrique associée intégralement à une pile à combustible.

On voit donc que le nombre de solutions possibles est très grand mais il est évident qu'elles n'ont pas toutes la même valeur tant du point de vue de l'efficacité énergétique que du point de vue économique. L'évaluation des divers critères à envisager a été systématisée dans un logiciel développé à la « Vrije Universiteit Brussel » dans le cadre d'une thèse de doctorat qui peut être consultée à l'adresse : <http://etcnts1.vub.ac.be/VSP/>.

### *3.2.2 Évolutions et caractéristiques technologiques principales*

#### *Moteurs thermiques*

Le groupe des moteurs thermiques subit une évolution continue tant en ce qui concerne l'amélioration de leur fonctionnement qu'en ce qui concerne les carburants.

Sur base d'une étude effectuée au VKA/RWTH de Aachen, EUCAR publie des prévisions sur la composition du parc automobile routier pour la période 2000-2010.

Selon cette étude, le pourcentage de véhicules à essence passerait de  $\pm 75\%$  à  $50-65\%$  tandis que la motorisation diesel croîtrait de  $25\%$  à  $30-40\%$ . Ceci est confirmé par une étude de l'« ifeu – Institut für Energie und Umweltforschung – Heidelberg GmbH » effectuée pour le compte de la FEBIAC.

Notons en passant que cette même étude ne prévoit, à l'horizon 2010, qu'une part de  $\pm 5\%$  pour les solutions alternatives rassemblant les hybrides électriques, les véhicules à pile à combustible, les véhicules thermiques au gaz naturel et à l'hydrogène

La généralisation de catalyseurs par oxydation (« oxicat »), de catalyseurs à trois voies, de filtres à particules, de systèmes CRT (Continuous Regenerating Trap), le contrôle des émissions au démarrage à froid conduisent à des prévisions de réduction, à l'horizon 2020, des émissions totales de l'ordre de :

- 90 % pour le CO, monoxyde de carbone,
  - 90 % pour les CxHy, hydrocarbures,
  - 78 % pour les NOx, oxydes d'azote,
  - 80 % pour les particules,
  - 93 % pour le benzène,
  - 96 % pour le SO<sub>2</sub>, dioxyde de soufre,
- par rapport à 1990.

Dans cette même comparaison, le kilométrage total aura crû de 50 % et les émissions de CO<sub>2</sub> de 26 %.

La conclusion pour la famille des moteurs thermiques est claire : les gains réalisables sont importants et doivent faire l'objet d'efforts de recherche et de développement adéquats. Une certaine prudence s'impose cependant car les prévisions de progrès se basent sur l'ajustement des motorisations aux normes EURO (I à V) ce qui n'est pas aisé à réaliser par les constructeurs mais faisable ; par contre le comportement des motorisations en usage réel peut s'écarter considérablement de l'idéal normalisé.

Il serait souhaitable de compléter cette amélioration selon les normes par des contrôles par essais dynamiques sur banc en cours de vie des véhicules.

#### *Les motorisations électriques, hybrides électriques et à pile à combustible*

La technologie du démarreur-générateur intégré permettant la récupération de l'énergie cinétique au freinage, aussi appelée hybridation douce (soft hybrid), semble devoir jouer un rôle central dans les motorisations futures. Ceci met en évidence le rôle important que l'on peut prévoir pour la mise en œuvre de l'énergie électrique comme partenaire dans les motorisations à venir.

L'association du moteur électrique et du moteur thermique dans des structures parallèles (la structure démarreur-générateur en est une) permet d'utiliser le moteur thermique dans ses meilleures zones de rendement et d'éviter les pertes associées aux régimes transitoires. Une diversification de sources d'énergie devient possible sans trop de difficultés et sans multiplication à l'infini des types d'infrastructure.

Dans le monde des transports routiers une controverse importante se fait jour concernant les technologies hybrides : faut-il que le véhicule soit totalement autonome en ne faisant appel qu'à une seule source d'énergie ou faut-il permettre la connexion à un réseau électrique pour la charge de batteries et l'obtention d'une autonomie purement électrique à émission zéro dans le cadre d'utilisation ?

La réponse est évidemment complexe :

- le véhicules électrique pur conduit aux gains d'énergie les plus élevés, 40 à 50 %, par rapport au véhicule conventionnel ;
- les hybrides électriques peuvent conduire à des gains d'énergie importants, 30 à 40 %, par rapport au véhicule conventionnel ;
- la motorisation diesel-électrique utilisée pour des bus urbains offre l'avantage de la grande souplesse du moteur électrique mais conduit à une consommation supplémentaire de 10 à 20 % par rapport au véhicule conventionnel.

Un constat final : La connexion au réseau électrique pour réaliser des trajets en mode purement électrique ou des compléments de charge des batteries conduisent à des gains d'énergie et d'émissions de CO<sub>2</sub> substantiels et vont dans le sens recherché sans alourdir exagérément la structure du véhicule.

La famille des hybrides série permet une mise en œuvre d'un grand nombre de carburants car le moteur thermique travaille à régime de vitesse et de puissance quasiment constant ce qui conduit à un vaste choix de types de moteurs et de carburants.

Les véhicules à pile à combustible forment une famille à considérer séparément à cause de la mise en œuvre de l'hydrogène.

L'hydrogène en tant que tel est un combustible propre, mais il faut le produire !

Son utilisation dans un moteur à combustion interne pour transport terrestre est considérée par le monde automobile bien que cette voie ne conduise clairement pas à la meilleure utilisation énergétique.

C'est la mise en œuvre de la pile à combustible associée à la traction totalement électrique qui représente l'approche la plus rationnelle

La pile alcaline (AFC, Alkaline Fuel Cell), associée à une batterie, semble pouvoir s'utiliser pour la propulsion hydraulique intérieure.

La pile PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) est plus clairement orientée vers les transports terrestres, voitures, camionnettes et autobus.

La pile SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) pourrait trouver un domaine d'application en traction lourde.

À l'horizon 2004, les rendements énergétiques comparés annoncés sont de 42 % pour la voie hydrogène comprimé, 32 % pour la voie hydrogène produite à partir du méthanol, 25 % pour le même véhicule à motorisation diesel et 20 % pour le même véhicule à motorisation essence. Les gains semblent importants. Encore faut-il produire l'hydrogène et le méthanol.

La comparaison correcte des rendements ne peut se faire que sur la base de cycles de trajets réalistes et comparables.

### **3.3 Évolution nécessaire des moyens et systèmes de transport de demain (2000-2010, 2010-2020)**

Deux objectifs majeurs peuvent être atteints par l'adoption de technologies nouvelles dans les moyens de transport de demain :

- la mise en œuvre de sources d'énergie diverses permettant une nouvelle répartition de la demande, assurant une indépendance énergétique relative plus aisée et permettant d'éviter la crise énergétique inévitable qui résultera de l'épuisement des réserves fossiles classiques ;
- la réduction impérative de la part des émissions de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>), le plus préoccupant des gaz à effet de serre produit par la combustion des composés hydrocarbonés pour les transports.

Le pétrole est aujourd'hui indispensable dans les transports, dont il couvre 95 % des besoins et représente le quart de la consommation d'énergie totale. Les technologies actuelles associées aux améliorations décrites plus haut ne devraient pas perdurer trop longtemps car leur contribution à l'effet de serre ne peut pas être réduite suffisamment par rapport à l'augmentation des kilomètres parcourus.

Le droit à la mobilité est une liberté qui pourrait menacer lourdement l'humanité s'il ne peut être assuré par des moyens différents.

Des solutions immédiates sont possibles.

#### *3.3.1 Une meilleure intermodalité*

Les transports publics sont normalement moins gourmands en énergie par personne transportée et le sont d'autant moins qu'ils font appel à l'énergie électrique.

Le développement du RER, mais aussi une plus grande qualité de liaison ferroviaire en général devrait permettre un transfert sensible des déplacements de la voiture vers le train. Il est évident qu'un programme étalant les réorganisations et investissements nécessaires sur 10 à 15 ans est beaucoup trop lent.

En ville, le choix d'un moyen de transport public doit devenir attractif par l'offre de confort, de fréquence et d'information.

La vitesse de déplacement en transport public ne peut pas être limitée par des obstacles créés par les moyens de transport individuels.

L'organisation d'une intermodalité effective entre tous les moyens de transport, du plus simple au plus sophistiqué, devient un devoir de société impératif.

### *3.3.2 La mobilité individuelle*

Il est peu raisonnable d'imaginer une interdiction des moyens de transport individuels, essentiellement la voiture. Mais l'usage qui en est fait doit être mis en compétition avec les moyens collectifs à travers une organisation intermodale efficace des trajets, une mise en œuvre de réglementation rationnelle mais effectivement appliquée (vitesse limites, parkings, etc.), et une information efficace.

L'accès à la voiture ne doit plus apparaître comme une nécessité vitale et des offres d'accès alternatives devraient se multiplier telles que le véhicule à temps partagé (car sharing), les parcs de véhicules électriques en libre service destinés à couvrir des trajets courts de station (parc) à station. Chaque véhicule peut remplacer quatre à cinq véhicules en propriété individuelle et sera utilisé de manière plus efficace

### *3.3.3 Une évolution technologique rapide à court et à moyen terme*

Remplacer un parc de véhicule ne se fait pas par un coup de baguette magique et nécessite une approche s'étalant sur au moins dix ans. Le mariage de la motorisation électrique et de la motorisation thermique offre un potentiel de gain d'énergie et de réduction considérable des émissions (principalement de CO<sub>2</sub>) qui peut être mis en œuvre sans grand délai.

Probablement 30 % du parc automobile circulant en ville pourrait être électrifié. N'oublions pas que 80 % des trajets se situent en ville.

Une centrale électrique à rendement de 55 % permet une utilisation finale de l'énergie primaire correspondant aux déplacements urbains avec un rendement de 25 à 30 %. Ce n'est encore pas extraordinaire mais largement supérieur à ce que le thermique pur ( $\pm 15\%$ ) peut offrir de mieux dans les mêmes conditions d'utilisation.

L'utilisation de carburants alternatifs (méthanol, éthanol, gaz de biomasse) est plus aisée dans les hybrides et jouit de l'avantage d'une consommation réduite grâce aux rendements plus élevés de la traction hybride comparée à la traction conventionnelle.

Pour les transports terrestres, il ne fait aucun doute que l'association de l'énergie électrique à l'énergie thermique permet des économies substantielles.

Les moyens de produire cette énergie électrique sont connus : thermique, nucléaire, cogénération, éolien, biomasse.

Le court et le moyen termes pourraient donc être marqués par les technologies hybrides.

### *3.3.4 L'évolution technologique à long terme, au-delà de 2010*

L'analyse proposée ci-dessus des véhicules électriques et surtout hybrides pose la question de la pertinence de la voie hydrogène quant à la manière dont l'hydrogène sera produit et à la disponibilité de carburants « classiques » ou de substitution. Si le gaz hydrogène (sous sa forme moléculaire) n'existe quasiment pas dans la nature, l'atome hydrogène est extrêmement abondant sur la terre ne serait-ce que dans l'eau des lacs, des rivières et des océans et évidemment dans les combustibles fossiles et provenant de processus biologiques (méthanol, éthanol, biomasse, ...)

Aujourd'hui 96 % de l'hydrogène produit et consommé dans le monde (essentiellement par les industries chimiques) proviennent de reformage du gaz naturel, c'est à dire d'une énergie fossile.

Une image de danger est associée à l'hydrogène : les accidents du dirigeable *Hindenburg*, et de la navette spatiale *Challenger*, la ventilation obligatoire de tout local où l'on charge des batteries au plomb, par exemple. Mais il est intéressant comme combustible. Comparé à l'essence il présente une énergie spécifique plus élevée, 120 MJ/kg contre 45 MJ/kg, avec toutefois une densité d'énergie volumique plus faible (4,6 litres d'hydrogène à une pression de 700 bars équivalent à 1 litre d'essence).



La pile à combustible a un rendement propre intéressant ( $\pm 50\%$ ) mais il faut analyser sérieusement l'effet multiplicatif du rendement de la chaîne de production de l'hydrogène.

Faire appel à des combustibles d'origine fossile pour produire de l'hydrogène n'a pas beaucoup d'intérêt. En effet, une pile à combustible utilisant le reformage de gaz naturel émet un peu plus de gaz carbonique que les nouveaux moteurs diesels en préparation et par conséquent sensiblement plus que les systèmes hybrides qui mettraient ces derniers en œuvre.

L'hydrogène sera donc probablement particulièrement intéressant lorsqu'il sera produit à partir de sources d'énergie renouvelables.

Trois grandes filières de production sont envisageables et combinables entre elles : l'oxydation de gaz ou de produits organiques d'origine fossile ou végétale, l'électrolyse de l'eau et la production directe à partir de la biomasse ou par l'utilisation de bactéries.

La voie la moins polluante en termes d'émissions de  $\text{CO}_2$  est celle de l'électrolyse de l'eau à partir d'énergie électrique obtenue sans émissions de gaz à effet de serre. Mais on peut se poser des questions quant aux économies d'énergie. En effet, il faut 2,4 kWh d'électricité nucléaire (8 kWh d'énergie nucléaire primaire) pour produire 1 kWh d'hydrogène. Si l'on y associe un rendement de pile à combustible de 50 % et un rendement moyen de propulsion électrique de 70 % on obtient une quantité de 6,9 kWh d'électricité nucléaire pour 1 kWh à la roue du véhicule soit un rendement électrique global de 14,5 % et de 4,3 % de l'énergie nucléaire primaire.

Le même kWh d'hydrogène demandera 3,3 kWh d'énergie hydraulique, 4,5 kWh d'énergie en gaz naturel (centrale TGV), et 20 kWh d'énergie solaire.

Le cas de l'énergie solaire passant par l'hydrogène et la pile à combustible est le plus ahurissant car cela nous conduit à un rapport de 1 kWh à la roue pour 57 kWh d'énergie solaire soit un rendement de 1,8 % ! Par comparaison un moteur thermique avec le même hydrogène nous conduirait à un rendement global de 0,9 % !!! L'énergie solaire est gratuite, sauf à installer une surface de panneau solaire suffisante.

Le stockage de l'hydrogène nécessite également une évaluation sérieuse.

Sous forme liquide il se trouve à très basse température ( $20^\circ\text{K}$ ) et subit des pertes variant de 0,1 % à 1 % par jour selon la taille du réservoir.

Le stockage sous haute pression (700 bars) conduit à la perte de l'énergie de compression. Une capacité massique de 5 % (rapport entre le poids de l'hydrogène stocké et le poids du réservoir) est réalisable. Une alternative à l'utilisation du réservoir sous pression gazeuse consiste à stocker l'hydrogène sous formes d'hydrures métalliques ou par absorption en nanotubes de carbone.

Dans tous les cas une capacité de stockage massique se situant au moins entre 5 et 10 % est indispensable pour une utilisation utile dans un système de transport.

Par rapport à la pile à combustible du type PEMFC, la pile de type SOFC fonctionnant à haute température (700-1000°C) permet l'utilisation directe d'hydrocarbures, en premier lieu du gaz naturel, avec catalyseur à base de métaux nobles. Elle fournit une chaleur élevée facilement exploitable en cogénération : le rendement global augmente ainsi jusqu'à atteindre 80 %.

Son inconvénient principal est sa mise à température longue qui ne permet guère une utilisation à cycles courts et répétitifs. Cette pile se prête particulièrement bien à la production d'électricité décentralisée et à la cogénération (de 1 kWe à quelques dizaines de MWe). Pouvant fonctionner facilement avec des hydrocarbures liquides, elle est considérée pour la propulsion navale et terrestre lourde (trains, camions, ...)

Sous forme stationnaire elle pourrait aisément être associée à l'alimentation en électricité de flottes de véhicules électriques et hybrides.

En conclusion pour la pile à combustible, une analyse approfondie des problèmes de production, de stockage, de distribution et d'utilisation de l'hydrogène s'impose ainsi qu'une comparaison entre cette voie et les solutions offertes par les véhicules électriques et hybrides électriques, sans oublier la famille des véhicules à motorisation thermique « traditionnels ».

## **4. LA PRODUCTION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE**

### **Les émissions de CO<sub>2</sub> actuelles et futures**

#### **4.1 Grandeur et évolution des émissions**

La production d'énergie électrique constitue une quatrième source d'émissions de CO<sub>2</sub>. En 1996 elle rejetait 22 555 ktonnes soit 17,5 % des émissions totales de CO<sub>2</sub> en Belgique. Par rapport à 1980, année dans laquelle 31 600 ktonnes furent émises, ceci signifie une réduction importante, malgré une augmentation de 67 % de la production d'énergie électrique.

Cette réduction est due principalement à la mise en service des quatre dernières centrales nucléaires à Doel et à Tihange. K. Smekens et J. Kretzschmar ont calculé que sans énergie nucléaire en 1998, les émissions de CO<sub>2</sub> dues à la production d'énergie électrique auraient été majorées de 84 %, 132 % ou 180 % selon que l'énergie nucléaire eut été remplacée par du gaz, un mélange de combustibles usuels ou par du charbon.

#### **4.2 Émissions spécifiques de CO<sub>2</sub>**

Cette tendance favorable apparaît aussi si l'on considère les émissions « spécifiques » de CO<sub>2</sub>. Exprimées en kg de CO<sub>2</sub> par kWh produit en Belgique les émissions spécifiques ont décliné entre 1980 et 1998 de 0.67 à 0.27 kg CO<sub>2</sub>/kWh. La Belgique se classe bien pour ce critère : en 1998, seules la France, la Suisse et la Norvège firent mieux en Europe.

#### **4.3 Composition du parc de production belge**

L'analyse du parc des producteurs belges, Electrabel et SPE, conduit fin 1999 à la composition suivante :

- 5 713 MW ou 39.0 % unités nucléaires
- 2 573 MW ou 17.6 % unités au charbon (la plupart polyvalentes)
- 1 403 MW ou 9.6 % unités fioul/gaz
- 2 370 MW ou 16.2 % unités TGV (unités gaz-vapeur en cycle combiné)

- 1 164 MW ou 7.9 % centrales de pompage (surtout COO)
- 648 MW ou 4.4 % unités CHP (Combined Heat and Power, cogénération)
- 236 MW ou 1.6 % « turbojets », turbines à gaz pour situations d'urgence
- 233 MW ou 1.6 % turbines à gaz (groupes de pointe et de tête)
- 161 MW ou 1.1 % groupes diesel (idem)
- 87 MW ou 0.6 % centrales hydrauliques
- 62 MW ou 0.4 % groupes à récupération d'énergie

Total : 14 650 MW

La majorité des 78,1 TWh produits en 1999 par ELECTRA-BEL et SPE provient des centrales nucléaires (59.8 %) ; 20.5 % ont été produits à partir de gaz, 13.8 % à partir de charbon, 2.7 % à partir de gaz résiduaires (hauts-fourneaux, etc.) et 1.1 % à partir de fioul ; l'énergie hydraulique incluant la centrale de pompage de COO représente 1.8 % et la récupération d'énergie par combustion de déchets 0.5 %.

#### **4.4 Évaluation du parc de production actuel**

Les centrales nucléaires de Doel et de Tihange forment donc l'épine dorsale du parc belge de production d'énergie électrique. Ces centrales relativement jeunes (les unités principales ont été mises en service entre 1982 et 1985) ont fonctionné de manière remarquable jusqu'à présent ; leur facteur de charge de plus de 80 % dépasse largement la moyenne réalisée dans le monde occidental. Il faut observer que la technique n'impose pas de durée de vie pour une centrale nucléaire, c'est un problème économique : à un certain moment les coûts d'une exploitation sûre et efficace deviennent si élevés que l'arrêt s'impose. Le gouvernement belge actuel a en fait exprimé son intention de limiter la durée de vie du parc existant à 40 ans.

Les centrales au charbon ont fourni 13.8 % de la production. Elles se répartissent en deux groupes :

- Les unités d'une puissance de 125 MW construites dans les années cinquante et soixante ; un certain nombre de centrales de ce type ont déjà été mises hors service, aussi bien pour des raisons environnementales qu'économiques ; le reste suivra dans les prochaines années.
- Les unités plus récentes d'une puissance de 300 MW, équipées (ou qui le seront) d'installations de désulfuration et de déni-

trification ; elles peuvent encore longtemps jouer un rôle significatif dans la production d'électricité.

Les centrales « traditionnelles » avec chaudière et turbine à vapeur principalement basées sur le gaz et un peu sur le fioul ont fourni 3.4 % de la production ; elles sont de la même génération que les centrales au charbon, et jouent le rôle soit de consommateur de gaz résiduaux (ex. gaz de hauts-fourneaux) soit de centrales de pointe.

Les groupes TGV (les groupes combinés de Turbines à Gaz et à Vapeur) sont basés sur la technologie moderne des turbines à gaz ; ils ont un rendement élevé et ont fourni 16.6 % de la production.

Les unités de production simultanée de chaleur et d'électricité (CHP) sont des groupes décentralisés installés sur le site des utilisateurs de chaleur ; elles ont fourni 3.6 % de la production.

La centrale de pompage de COO doit être considérée plus comme un groupe de stockage qu'un groupe de production (pompage d'eau la nuit et turbinage de cette eau en journée ou en secours) ; elle a fourni 1.4 % de la production.

Les autres unités (turbines à gaz de pointe, diesels, centrales hydrauliques, incinérateurs de détrit, etc.) n'ont joué qu'un rôle secondaire à environ 0.9 % de la production totale.

On peut conclure que la Belgique dispose d'un parc de production d'énergie électrique diversifié et efficace s'appuyant principalement sur les unités nucléaires et TGV. Beaucoup de centrales au charbon sont vieilles et ne répondront plus aux normes environnementales futures. Les centrales traditionnelles au fioul et au gaz ne jouent qu'un rôle de centrales de pointe. Les groupes CHP de production combinées de chaleur et d'électricité sont en plein développement. Les centrales hydrauliques jouent un rôle minime, tandis que les autres sources d'énergie renouvelable n'ont pas (pas encore) un rôle significatif.

#### **4.5 Quels sont les moyens de production pour les prochaines décennies ?**

La réponse à cette question doit tenir compte des facteurs suivants :

- La « sortie du nucléaire » après quarante ans de fonctionnement. Ceci n'empêche pas de devoir étudier des scénarii conservant l'option nucléaire.

- L'engagement de réduire pour 2012 les émissions de CO<sub>2</sub> de 7.5 % par rapport à 1990.
- La volonté exprimée par l'autorité publique, tant européenne, que fédérale et régionale, de développer les sources d'énergies renouvelables.

Une première option concerne les centrales nucléaires. Divers types de réacteurs s'offrent en remplacement des centrales actuelles, comme le European Pressurized Reactor (EPR) de Framatome-Siemens, le AP-600 de Westinghouse, le High Temperature Gas Reactor (en développement en Afrique du Sud) etc. Le problème réside en l'acceptation publique et politique de ces techniques de production : une crainte persiste des risques d'accidents de grande envergure, du stockage définitif des résidus nucléaires et de la non-prolifération. Pourtant un intérêt nouveau peut être observé ces dernières années, notamment en liaison avec le problème du CO<sub>2</sub>.

Une seconde option concerne la technologie des turbines à gaz, et en tout premier lieu des groupes TGV (cycle combiné de turbines à gaz et à vapeur) qui réalisent de bonnes performances sur le plan écologique grâce à l'utilisation du gaz naturel, combustible propre à émissions de CO<sub>2</sub> relativement basses, et à leur rendement élevé.

Une troisième filière concerne les centrales au charbon. Le charbon offre moins d'atouts sur le plan écologique avec des émissions de SO<sub>2</sub>, de NO<sub>x</sub> et de CO<sub>2</sub> importantes. On peut distinguer trois types de technologies :

- Les centrales à charbon pulvérisé. Il s'agit du développement ultime de la technologie la plus utilisée aujourd'hui. Il comporte la mise en œuvre de filtres (coûteux) pour le SO<sub>2</sub> et le NO<sub>x</sub>, et de pressions et de températures plus élevées pour augmenter le rendement et réduire (quelque peu) les émissions de CO<sub>2</sub>.
- Les centrales basées sur la gazification du charbon (IGCC : Integrated Gasification Combined Cycle). Ce type de centrale peut atteindre des rendements élevés grâce à la mise en œuvre de turbines à gaz. Leurs performances environnementales sont aussi meilleures que celles des centrales au charbon pulvérisé, mais cette technologie n'est encore qu'au stade du développement.
- Les centrales à lit fluidisé. Cette technologie où le combustible est maintenu en suspension dans la chaudière par un flux

d'air ascendant est encore en plein développement. Leurs performances environnementales sont également meilleures que celles des centrales au charbon pulvérisé.

Une quatrième famille de techniques de production part des sources d'énergies renouvelables, principalement l'énergie éolienne, la biomasse, l'énergie photovoltaïque et l'énergie hydraulique.

- Le potentiel total de l'énergie éolienne en Belgique, aussi bien off-shore que on-shore, peut être estimé à 1500 à 2000 MW, avec une production annuelle de 4.2 à 5.4 TWh (5 à 6.5 % de la production actuelle). L'impact environnemental réside en nuisances acoustiques et visuelles.
- Le potentiel de la biomasse, en ce compris la récupération d'énergie par la combustion des déchets, est estimé à 0.9 à 3.6 TWh/an (1.2 à 4.6 % de la production actuelle). Les émissions de CO<sub>2</sub> dues à la mise en œuvre de la biomasse sont en principe neutres. Les autres émissions sont plus basses ou comparables à celles des autres techniques de combustion.
- Bien que le potentiel de production d'énergie par la voie photovoltaïque soit très important (10-20 TWh/an), les cellules photovoltaïques ne sont guère utilisées en raison de leur prix, quoique toujours décroissant, pour la production d'énergie électrique à grande échelle en Belgique.
- La capacité d'extension de production de l'énergie hydraulique se situe à 25 MW pour une production annuelle de 0.08 TWh/an, soit 0.1 % de la production actuelle d'énergie électrique.

Parmi les énergies renouvelables seules l'énergie éolienne et la biomasse pourront donc jouer un rôle significatif dans la production d'énergie des dix prochaines années en Belgique. Ensemble elles pourraient couvrir 7 à 8 % de la production en 2020 avec une croissance de la consommation de 2 % par an.

Une autre technologie réduisant la consommation d'énergie primaire est la production combinée de chaleur et d'électricité (CHP ou cogénération). Différentes techniques sont possibles : turbines à vapeur avec soutirage, turbines à contre pression, turbines à gaz avec chaudière de récupération, moteurs diesel ou à gaz etc. Dans chaque cas on tente de réutiliser la chaleur résiduelle qui, selon la deuxième loi de la thermodynamique, est nécessairement libérée à la fin du processus de production

d'énergie électrique par voie thermique. Il en résulte certes une réduction de la production d'électricité, mais on obtient globalement une économie d'énergie par rapport aux productions séparées de chaleur et d'électricité. Des économies d'énergie primaire de 15 à 25 % sont possibles par rapport à ces productions séparées même si elles étaient réalisées à l'aide des technologies les plus avancées. La simultanéité parfaite de la demande d'électricité et de chaleur est nécessaire pour obtenir ce résultat. Selon une analyse de la commission AMPERE, confirmée par des études du VITO et de l'Institut Wallon, une capacité de 1000 MW pour une production d'environ 6 TWh est une estimation réaliste du potentiel encore réalisable efficacement en Belgique, à savoir économiquement et avec gain d'énergie primaire. Il en résulterait une réduction de 2 à 3 % des émissions de CO<sub>2</sub> actuelles.

La famille des piles à combustible constitue une ultime technologie à considérer. L'énergie chimique du combustible est ici transformée directement en électricité avec de multiples avantages : des rendements électriques élevés non limités par la deuxième loi de la thermodynamique (jusqu'à 60 % pour certains types), pas d'émissions nocives quand l'hydrogène est utilisé comme combustible (ces émissions pouvant bien se produire lorsque l'hydrogène est produit à partir de combustibles fossiles), pas de parties en mouvement, des possibilités de production combinée de chaleur et d'électricité etc. Cette technologie prometteuse n'est pas encore commercialisable et reste très chère. Elle ne jouera pas un rôle important pour la production massive d'énergie électrique dans la prochaine décennie et restera ainsi confinée à des applications de niches.

Enfin il y a lieu de citer les développements récents tendant à résoudre le problème de la production de CO<sub>2</sub> due à la combustion de combustibles fossiles par la captation de ce CO<sub>2</sub> et son stockage dans les océans, les couches d'eau salée, les champs gaziers épuisés ou les mines de charbon. On peut imaginer qu'une solution économique pourra être trouvée pour ce problème ; il est clair que toutefois que ces technologies n'ont pas atteint une maturité suffisante pour être prises en considération dans cette étude en Belgique.

#### **4.6 Coût des technologies considérées.**

Le coût du kWh est évidemment un critère important de choix des moyens de production futurs. La méthodologie et les chiffres



utilisés dans ce rapport sont extraits en grande partie du rapport de la commission AMPERE.

Le calcul a été effectué pour l'année 2010 en deux étapes :

Dans une première étape on ne considère que les coûts « internes » ou coûts « réels » c.-à-d. les coûts liés aux investissements (en ce compris les coûts de démantèlement), les coûts de combustible et les coûts d'exploitation. Pour les coûts de combustible les valeurs suivantes ont été retenues telles que fournies par l'Agence Internationale de l'énergie :

Combustible	Coût en 2010 (€ <sub>2000</sub> /G.J)
Uranium	0.87
Charbon	1.81
Gaz naturel	3.54
Fuel à basse teneur en S	3.97
Diesel	5.78

Tableau 1

Le taux d'intérêt à été fixé à 5 %.

Les résultats pour les technologies les plus significatives sont reproduits à la Fig. 1 :

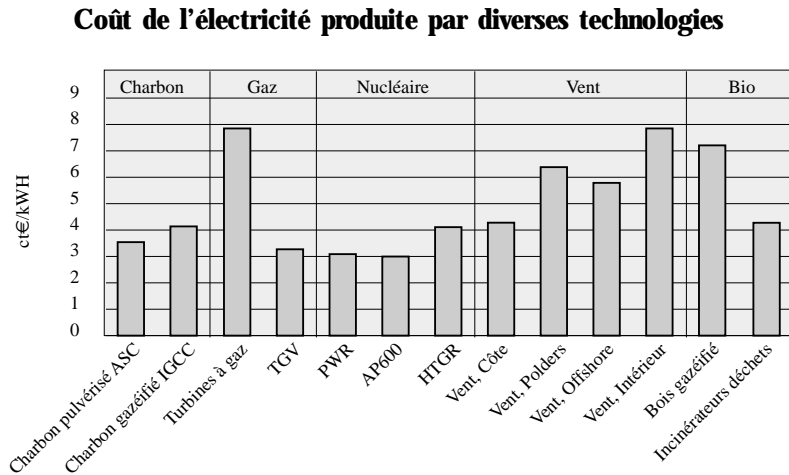


Fig. 1

#### 4.7 Coût global de la production d'énergie électrique

Dans une deuxième étape des coûts externes sont ajoutés aux coûts précédents, à savoir les coûts liés à la pollution de l'air, au bruit, aux gaz à effet de serre, aux radiations ionisantes, etc. Ces coûts ne sont pas repris dans les coûts calculés par les producteurs d'électricité. Les paramètres les plus importants retenus par la commission AMPERE sont les suivants :

Nuisance	Facteur	
	Gaz à effet de serre	Autres
Combustibles fossiles		
SO <sub>x</sub> (€/ton)		6122
NO <sub>x</sub> (€/ton)		5106
PM <sub>10</sub> (€/ton)		12245
Gaz à effet de serre (€/ton CO <sub>2</sub> equival.)	18.37	
Exploitation, bruit (ct€/kWh)		
Charbon/huile		0.027
Gaz		0.0040
Centrale nucléaire (ct€/kWh)	0.027	0.069
Vent, côte & pleine mer (ct€/kWh)	0.050	0.050
Vent, intérieur pays(ct€/kWh)	0.1	0.3

Tableau 2

Les résultats sont reproduits à la Fig. 2

#### Coût de l'électricité produite par diverses technologies

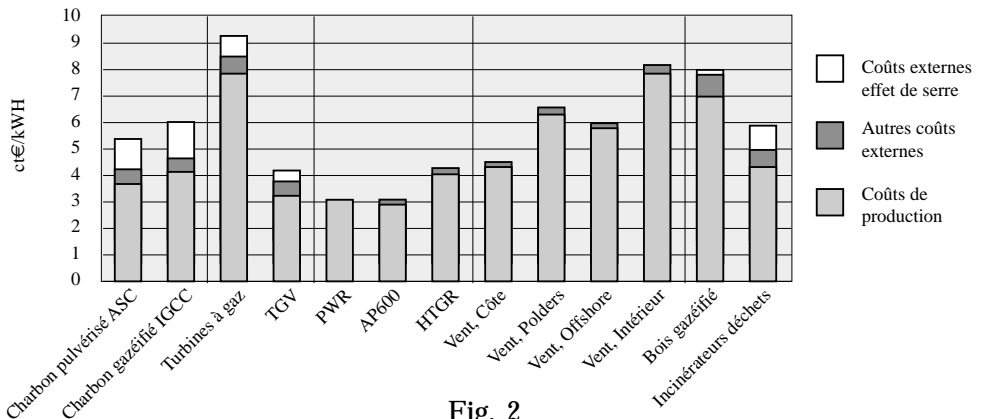


Fig. 2

Cette analyse nous conduit aux conclusions suivantes :

- Les centrales nucléaires du type PWR, que ce soit le type PWR modifié ou le type AP-600, conduisent aux coûts totaux les plus bas. Si pour quelque raison que ce soit la solution nucléaire était rejetée, les centrales TGV constituent alors une alternative (plus coûteuse). Les incertitudes sur le prix du gaz naturel incitent en outre à la prudence. Les centrales au charbon conduisent à des coûts totaux sensiblement plus élevés. Les parcs d'éoliennes ne sont pas compétitifs par rapport aux centrales TGV, à moins qu'elles ne soient implantées de façon optimales (on-shore à la côte). Les parcs off-shore peuvent soutenir la comparaison avec les centrales au charbon.
- Si l'on ne tient pas compte de l'effet de serre, mais bien des autres coûts externes (par exemple des émissions acides), les centrales TGV se rapprochent des centrales nucléaires et perdent une partie de leur avantage par rapport aux centrales au charbon. Les éoliennes sont également moins compétitives que les groupes TGV et les centrales au charbon.
- Si l'on ne tient pas du tout compte des coûts externes, alors les centrales nucléaires ne sont plus que marginalement moins chères que les TGV. Ces dernières ne présentent également plus qu'une marge faible sur les centrales au charbon. Les éoliennes ne sont plus concurrentielles.
- Les centrales à gazéification de bois ne sont pas compétitives quelle que soit l'hypothèse considérée. Les centrales à combustion de déchets supportent la comparaison avec les centrales au charbon, même dans l'hypothèse où les émissions sont entièrement portées en compte de la production d'électricité.

#### **4.8 Évolution dynamique du parc de production**

Ce dernier chapitre consacré à l'évolution du parc de production reproduit les résultats d'une étude effectuée par le Centre d'Études Économiques de l'Université Catholique de Louvain. Cette étude utilise le modèle MARKAL qui tient compte de toutes les activités énergétiques depuis l'importation d'énergie, sa transformation en diverses formes d'énergies secondaires, son transport, sa distribution jusqu'à son utilisation finale en services énergétiques. Les services énergétiques sont représentés par quelques centaines de technologies, aussi bien du côté de la demande (techniques de chauffage, mesures d'économie d'énergie ...) que du côté de l'offre (centrales ...). Le modèle étudie

l'équilibre du marché pour la période 2000-2030 en maximisant la somme du surplus de consommation et du surplus de production, ceci en tenant compte de certaines contraintes comme le respect du protocole de Kyoto, la suppression de l'énergie nucléaire après quarante années de vie, le potentiel en sources d'énergie renouvelable etc.

Dans un premier scénario où il n'est pas tenu compte des accords de Kyoto et où les centrales nucléaires ne sont pas interdites, le modèle permettant même d'ajouter 2500 MW de centrales nucléaires, la consommation atteindrait 113 TWh en 2030. Jusqu'en 2010 la production suit les tendances actuelles : une production nucléaire pratiquement constante, la réduction de l'emploi du charbon, l'augmentation des centrales au gaz. Après 2010, 2500 MW de centrales nucléaires sont mis en service, la consommation de gaz diminue et les centrales au charbon se développent fortement. La cogénération se stabilise et les sources renouvelables ne jouent aucun rôle (pas de subsides).

Dans un deuxième scénario, ne tenant toujours pas compte des limitations de Kyoto mais imposant la disparition du nucléaire, la production atteindrait 106 TWh en 2030. Les centrales nucléaires existantes sont remplacées par des centrales au charbon à partir de 2015. Les sources renouvelables ne démarrent pas non plus.

Un troisième scénario tenant compte des limitations de Kyoto tout en maintenant les centrales nucléaires conduit à une consommation de 100 TWh en 2030 et est caractérisé par une production nucléaire maximale, une production plus élevée à partir de gaz et de cogénération, et une production minimale à partir du charbon. Les sources renouvelables croissent à partir de 2020.

Dans un quatrième scénario où les limitations de Kyoto et la suppression du nucléaire sont introduites, la consommation se limite à 98 TWh en 2030. La production nucléaire est remplacée par des centrales au gaz. La production à partir de charbon est réduite au minimum et les sources renouvelables croissent fortement à partir de 2010.

L'étude montre également que si l'on ne tient pas compte des limitations de Kyoto, le coût de la suppression du nucléaire reste limité tandis qu'il atteint 2.1 % du Produit National Brut (PNB) en 2030 si Kyoto est ratifié. Inversement le coût du respect de la norme de Kyoto reste limité à 1 % du PNB dans le cas où le nucléaire est maintenu, mais il atteint 3 % du PNB en 2030 si le nucléaire est supprimé.

#### **4.9 Conclusions**

Environ 18 % des émissions de CO<sub>2</sub> en Belgique (1996) sont dues à la production de l'électricité. La Belgique est en position favorable par rapport à d'autres pays industrialisés, principalement grâce à la part des centrales nucléaires dans le parc de production.

Les émissions croissent progressivement suite à la croissance de la demande et à l'entrée en vigueur du moratoire sur les centrales nucléaires. Pour l'instant cette croissance est compensée par le remplacement progressif des centrales au charbon par des centrales modernes TGV. Mais cette substitution touche à sa fin. Il est par ailleurs souhaitable de maintenir une partie de la production à partir du charbon pour des raisons de diversification et de régulation du parc. La question se pose donc de déterminer les moyens de production à retenir pour le futur.

Si l'on s'en tient aux coûts stricts de production, sans tenir compte des coûts « externes » ou environnementaux, les centrales nucléaires du type EPR ou AP 600 sont les plus performantes, suivies par les centrales TGV et les centrales au charbon. L'énergie éolienne est la plus économique des sources renouvelables, mais reste, pour les localisations les plus favorables, 40 à 50 % plus chère que les centrales nucléaires.

Si l'on tient compte en outre des coûts externes, les centrales nucléaires augmentent leur avantage compétitif par rapport aux centrales TGV, qui à leur tour sont nettement plus économiques que les centrales au charbon. Pour les localisations les plus favorables les centrales éoliennes sont compétitives au niveau des centrales TGV. Pour les autres localisations leurs coûts sont comparables à ceux des centrales à charbon.

L'extension du parc nucléaire semble donc économique et écologique (cf. coûts externes) et la voie la plus indiquée pour répondre à la demande future. Si cette solution devait être rejetée pour quelque raison que ce soit, les centrales TGV sont alors le « second meilleur » choix si le gaz est disponible à bon prix. Parmi les sources d'énergie renouvelables ce sont les centrales éoliennes qui peuvent revendiquer la meilleure place.

Une étude récente montre que le coût du respect des accords de Kyoto s'accroît considérablement en cas de maintien du moratoire sur les nouvelles centrales nucléaires (jusqu'à 3.1 % du PNB en 2030) ; exprimé autrement, il apparaît que le coût du rejet des nouvelles centrales nucléaires est très élevé si l'on veut respecter le protocole de Kyoto (jusqu'à 2.1 % PNB en 2030).

## **RECOMMANDATIONS**

### **A. Industries**

**A.1** Il est important que l'industrie, sans perdre sa compétitivité ni sa capacité de développement, réduise ses émissions de CO<sub>2</sub> dont le protocole de Kyoto, qu'il soit ou non ratifié, ne serait qu'une étape intermédiaire.

**A.2** Afin d'obtenir de tous les acteurs économiques une contribution optimale, il convient de différencier les produits, les sociétés productrices, les branches d'industrie, et même les secteurs, quant à leur capacité de réduire leur consommation d'énergie et leurs émissions.

**A.3** Une analyse exhaustive des consommations d'énergie d'un produit pendant son cycle de vie est très complexe. On doit en effet tenir compte de la demande de l'utilisateur final, de la production, des transports, des échanges entre différentes sociétés ou même secteurs distincts, et de l'élimination finale des sous-produits.

Il convient donc d'impliquer dans le processus l'ensemble des acteurs de la production à la consommation.

Les accords de branches qui prennent en compte les spécificités d'une industrie donnée sont à encourager.

**A.4** L'ampleur du travail à accomplir justifie la fixation de priorités. Une analyse très simplifiée devrait identifier quels 20 % des produits, procédés, sociétés ou branches provoquent 80 % des rejets réductibles de CO<sub>2</sub> ou présentent une efficacité énergétique insuffisante.

La même analyse par sous-groupe permettrait aussi d'identifier les produits et les sociétés susceptibles des plus importantes améliorations au coût le plus bas.

**A.5** Le potentiel d'améliorations des rejets de CO<sub>2</sub> par des techniques prouvées est encore élevé. Il s'agit d'utiliser des équipements et surtout des procédés plus performants, en particulier les meilleures technologies disponibles (Best Available Technology), et le partage des ressources énergétiques (notamment les co- et tri-génération).

**A.6** Ces améliorations exigent des investissements considérables.

La rentabilité nécessitera le plus souvent une extension de capacité et la concentration d'activités consommatrices d'énergie sur un même site. L'acceptation sociale et réglementaire de ces projets devra être assurée.

**A.7** Il faut en outre rester compétitif sur le marché, le plus souvent l'Europe ou même le Monde, et disposer des ressources voulues.

L'introduction d'une taxe sur l'énergie réduirait ces ressources. Une taxe CO<sub>2</sub> ne peut en tout cas être envisagée que pour l'ensemble des pays industrialisés susceptibles d'être concurrents.

Le maintien de la compétitivité est essentiel.

Toute décision unilatérale fédérale ou régionale en matière de taxation pourrait avoir des répercussions graves sur le développement de notre industrie et de notre économie sans contribuer le moins du monde à la réduction des rejets de CO<sub>2</sub> si les produits concernés sont fabriqués ailleurs.

**A.8** Il faut éviter de pénaliser l'industrie. Il convient au contraire de l'aider à réduire ses consommations énergétiques et ses rejets de CO<sub>2</sub> sur base de programmes précis, avec des objectifs et étapes mesurables.

**A.9** Il ne faudrait pas que la faible dimension du territoire belge et plus encore des régions, compétentes en matière d'Utilisation Rationnelle de l'Énergie, empêche d'assurer des productions à une échelle optimale et d'exporter des produits.

Il importe de trouver des mécanismes et critères adéquats qui n'entravent pas notre capacité de production industrielle, ni au niveau régional ni fédéral.

**A.10** Il faut éviter de se voir opposer par des pays tiers des indices et critères non significatifs pour la Belgique sans tenir compte des exportations et des échanges.

Il est nécessaire de développer les outils qui permettront de ne pas être victimes des négociations internationales.

## **B. Secteur Domestique**

Les trois principaux acteurs potentiels intervenant dans la gestion de la demande sont les pouvoirs publics, les fournisseurs d'énergie et le consommateur final qu'il s'agisse des ménages ou des gestionnaires des bâtiments du tertiaire.

### **B.1 Les pouvoirs publics**

Les actions des pouvoirs publics (nationaux, régionaux ou locaux) se déclinent à plusieurs niveaux, ceux ci sont complémentaires et se renforcent.

#### *Au niveau de l'information du citoyen*

Informier le ménage et l'entreprise de l'impact de leurs consommations d'énergie directe (chauffage, applications électriques...) sur l'environnement ;

Éduquer les adolescents au sein des écoles à la notion de développement durable ;

Informier le citoyen sur la raréfaction lente mais inéluctable des combustibles fossiles les plus utilisés aujourd'hui (gaz naturel et produits pétroliers)

#### *Au niveau des prix et tarifs*

Il faut lancer un signal « politique » clair sur les impacts environnementaux et économiques qui découlent d'une consommation croissante d'énergie. Cette démarche doit se faire à l'échelle géographique la plus large possible, de préférence au niveau européen. L'instauration d'une taxe CO<sub>2</sub> énergie qui corrigerait les baisses des prix des marchés pourrait être un instrument efficace.

Les pouvoirs publics devraient inciter (obliger) les fournisseurs d'énergie à proposer des unités tarifaires qui permettent au consommateur la comparaison des prix par type d'usage (chauffage, production d'eau chaude, cuisson...).

Une option complémentaire pourrait être d'instaurer une taxe énergétique destinée à alimenter un fond URE qui servirait à promouvoir les actions d'utilisation rationnelle de l'énergie

#### *Au niveau de l'aménagement du territoire*

Il faut veiller à une densification (concentration) des activités plutôt qu'une dilution des implantations du logement (habitat



diffus en campagne) et des établissements tertiaires (centres villes plutôt que zoning d'activité proches des autoroutes). Les nouvelles implantations importantes doivent être desservies par des transports en commun fréquents et de qualité.

#### *Au niveau des normes des bâtiments*

Si les normes d'isolation des nouveaux bâtiments sont d'ores et déjà plus strictes, l'isolation des bâtiments existants doit être sérieusement étudiée (60 % des logements datent d'avant 1970).

Le contrôle effectif sur le terrain du respect des normes et prescriptions est indispensable pour vérifier les caractéristiques annoncées sur plan des bâtiments concernés.

Les bâtiments publics doivent répondre à des exigences minimales élevées.

## **B.2 Les fournisseurs d'énergie**

#### *Au niveau des tarifs*

Il faut favoriser la minimisation de la dégressivité des tarifs en fonction de la quantité d'énergie consommée. À terme, le kWh ou le GJ supplémentaire ne devrait pas coûter moins cher au consommateur que les premières consommations facturées.

#### *Lisibilité des factures*

Les unités énergétiques des différents vecteurs énergétiques devraient être comparables entre elles (voir supra).

Dans la facture ou dans le relevé de consommation, la comparaison des consommations actuelles avec celle des périodes précédentes doit permettre au consommateur de connaître l'évolution de ses consommations d'énergie. C'est un outil pour mieux appréhender des changements de comportements ou de consommation des appareils.

Un outil de comparaison avec des logements semblables ou des bâtiments du même secteur d'activité tertiaire, notamment sous la forme de consommation spécifique par m<sup>2</sup>, par personne, etc. devrait être fourni par le fournisseur d'énergie.

#### *Lecture de la consommation en temps réel*

Une bonne façon de faire prendre conscience aux utilisateurs d'un bâtiment de la consommation de celui-ci est de leur permettre de voir ses différentes consommations (électricité, gaz,

eau, ...) et ceci sur différentes périodes (instantanée, dernière heure, jour, semaine, ...).

L'affichage devrait être suffisamment explicite de façon à pouvoir permettre à l'utilisateur de constater immédiatement une surconsommation

### **B.3 Le consommateur final**

Veiller, tant pour les ménages que l'entreprise tertiaire, à la localisation de son implantation. Celle-ci n'est pas sans effet sur les consommations indirectes d'énergie, liées aux déplacements. La proximité des transports en commun doit être une condition de sélection de l'emplacement.

Agir au niveau de la régulation du chauffage tant au point de vue de l'équipement (thermostat, vannes thermostatiques, fonctionnement du circulateur et de la chaudière uniquement lors de la demande de chaleur) que de la notion de confort (20 °C au lieu de 21 °C, une baisse de la température ambiante de 1 °C engendre une réduction de la consommation de 7 %).

Favoriser l'installation des appareils à haut rendement, qui ont des performances énergétiques accrues, en veillant au déclassement effectif des équipements obsolètes.

Promouvoir les énergies renouvelables qui offrent un potentiel non négligeable. La substitution d'une partie de l'énergie consommée par des énergies renouvelables fait directement prendre conscience aux utilisateurs de leur niveau de consommation globale.

## **C. Transport**

Deux objectifs majeurs peuvent être atteints par l'adoption de technologies nouvelles dans les moyens de transport de demain :

la réduction impérative de la part des émissions de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>), le plus préoccupant des gaz à effet de serre produit par la combustion des composés hydrocarbonés, dues aux transports.

la mise en œuvre de sources d'énergie diverses permettant une nouvelle répartition de la demande, assurant une indépendance énergétique relative plus aisée et permettant d'éviter la crise énergétique inévitable qui résultera de l'épuisement des réserves fossiles classiques.

La mise en œuvre de l'énergie électrique est indispensable afin d'atteindre des objectifs réalistes et efficaces.

## **C.1 Des solutions immédiates existent pour le transport terrestre**

### *C.1.1 L'organisation rapide d'une meilleure intermodalité autour du transport public*

L'organisation d'une intermodalité effective entre tous les moyens de transport, du plus simple (la marche) au plus sophistiqué (le TGV), devient un devoir de société impératif.

La réduction du trafic pendulaire vers la ville constitue un moyen important d'économie d'énergie et de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>.

Le développement du RER (Réseau Express Régional), mais aussi une plus grande qualité de liaison ferroviaire en général devrait permettre un transfert sensible des déplacements de la voiture vers le train. Il est évident qu'un programme étalant les réorganisations et investissements nécessaires sur 10 à 15 ans est beaucoup trop lent.

En ville, le choix d'un moyen de transport public doit devenir attractif par l'offre de confort, de fréquence et d'information. Le passage d'un mode de transport public à un autre doit pouvoir se faire sans inconvénients et de manière efficace. L'utilisation du transport public nécessite un déplacement à pied dont le confort et la sécurité ne peuvent être perturbés par le transport motorisé individuel.

### *C.1.2 La mobilité individuelle*

Il est peu raisonnable d'imaginer une interdiction des moyens de transport individuels, essentiellement la voiture, mais l'usage qui en est fait doit être mis en compétition avec les moyens collectifs à travers une organisation intermodale efficace des trajets, une mise en œuvre de réglementation rationnelle mais effectivement appliquée (vitesse limites, parkings, etc.), une information efficace.

L'accès à la voiture ne doit plus apparaître comme une nécessité vitale et des offres d'accès alternatives devraient se multiplier telles que le véhicule propre à temps partagé (car sharing), les parcs de véhicules électriques en libre service destinés à couvrir des trajets courts de station (de location) à station.

Il est nécessaire que l'offre de véhicules propres soit suffisamment grande et diversifiée, ceci allant de pair avec une définition et

une classification des véhicules dits « propres » ainsi qu'avec la détermination d'une série de mesures d'encouragement à l'acquisition adaptées à un « degré de propreté » à définir.

La mobilité individuelle mettant en œuvre des moyens de transport « simples » (la marche, les deux roues, ...) doit être fortement encouragée.

### *C.1.3 Une évolution technologique rapide à court et à moyen terme*

Remplacer un parc de véhicule ne se fait pas par un coup de baguette magique et nécessite une approche s'étalant sur au moins dix ans.

Le mariage de la motorisation électrique et de la motorisation thermique, c.-à-d. la motorisation hybride, offre un potentiel de gain d'énergie et de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> (principalement) considérable.

Les technologies de transport électriques et hybrides peuvent être mises en œuvre sans délais importants, et même immédiatement, en complément aux moyens de transport thermiques améliorés ou de substitution.

L'utilisation de carburants alternatifs (méthanol, éthanol, gaz de biomasse) est plus aisée dans les hybrides et jouit de l'avantage d'une consommation réduite grâce aux rendements plus élevés de la traction hybride.

Le court et le moyen termes pourraient donc être marqués par les technologies hybrides.

## **C.2 Des solutions complémentaires sont possibles à long terme, au-delà de 2010**

### *C.2.1 L'utilisation continuée des techniques de traction électriques et hybrides.*

Les perspectives d'économie d'énergie et de réduction des émissions liées aux véhicules électriques et surtout hybrides restent valables. Ceci pose la question de la pertinence de la voie hydrogène surtout par rapport à la manière dont l'hydrogène sera produit et par rapport à la disponibilité de carburants « classiques » ou de substitution. Une analyse comparative approfondie s'impose.

### *C.2.2 La voie hydrogène*

Si le gaz hydrogène (sous sa forme moléculaire) n'existe quasiment pas dans la nature, l'atome hydrogène est extrêmement

abondant sur la terre ne serait-ce que dans l'eau des lacs, des rivières et des océans et évidemment dans les combustibles fossiles et provenant de processus biologiques (méthanol, éthanol, biomasse, ...). Il ne fait aucun doute que l'hydrogène deviendra un important vecteur d'énergie mais cette perspective ne peut pas freiner la mise en œuvre de solutions plus classiques.

On ne peut pas perdre de vue qu'un véhicule à pile à combustible est en toute logique essentiellement un véhicule électrique ; brûler de l'hydrogène dans un moteur thermique est un non-sens énergétique.

La pile à combustible a un rendement propre intéressant ( $\pm 50\%$ ) mais il faut analyser sérieusement l'effet multiplicatif du rendement de la chaîne de production de l'hydrogène. Faire appel à des combustibles d'origine fossile pour produire de l'hydrogène n'a pas beaucoup d'intérêt. En effet, une pile à combustible utilisant le reformage de gaz naturel émet un peu plus de gaz carbonique que les nouveaux moteurs diesels en préparation et par conséquent sensiblement plus que les systèmes hybrides qui mettraient ces derniers en œuvre.

L'hydrogène sera donc probablement particulièrement intéressant lorsqu'il sera produit à partir de sources d'énergie renouvelables. La voie la moins productrice en termes d'émissions de  $\text{CO}_2$  est celle de l'électrolyse de l'eau à partir d'énergie électrique produite sans émissions de gaz à effet de serre. Mais on peut se poser des questions quant aux économies d'énergie.

Le stockage de l'hydrogène nécessite également une évaluation sérieuse.

En conclusion pour la pile à combustible, une analyse approfondie des problèmes de production, de stockage, de distribution et d'utilisation de l'hydrogène s'impose ainsi qu'une comparaison entre cette voie et les solutions offertes par les véhicules électriques et hybrides électriques, sans oublier la famille des véhicules à motorisation thermique « traditionnels ».

### **C.3 Solutions pour le transport maritime et aérien**

Le transport par voies hydrauliques intérieures mérite une meilleure exploitation et doit être envisagé dans le cadre du développement de solutions intermodales.

Le transport maritime devrait contribuer à la réduction des consommations d'énergie et à l'amélioration de l'environnement

par la mise en œuvre de systèmes de propulsion utilisant principalement l'énergie électrique.

Le transport aérien doit être plus rationalisé pour les distances courtes et moyennes (quelques centaines de km) et ceci en faveur des transports terrestres (surtout par rail).

Leurs systèmes de propulsion créent des effets non négligeables sur l'environnement. Des solutions doivent être recherchées comme c'est le cas pour les transports terrestres.

## **D. Production d'énergie électrique**

**D.1** Avant de formuler des recommandations quant à la limitation des émissions de gaz à effet de serre résultant de la production d'énergie électrique, il convient de concentrer toute l'attention sur la maîtrise de la demande d'électricité. Il s'agit d'encourager et de mettre en œuvre toutes les mesures économiquement raisonnables, c.-à-d. dont l'ordre de grandeur des coûts équivaut à celui d'investissements dans de nouvelles unités de production destinées à satisfaire une demande croissante, à remplacer ou à améliorer des unités obsolètes. Dans cette recherche de réduction de la production d'électricité, il faut prendre en compte la substitution croissante de certains processus énergétiques par des processus électriques (par ex. secteur sidérurgique, transport, etc.) qui augmente la consommation électrique mais diminue la consommation totale d'énergie primaire ainsi que les émissions de gaz à effet de serre.

**D.2** Il convient d'évaluer dans quels secteurs (production d'électricité, transport, industrie, secteur domestique,...) les émissions de gaz à effet de serre peuvent être réduites au moindre coût économique.

**D.3** Il existe en Belgique un potentiel certain, quoique limité, d'énergies renouvelables, potentiel qu'il faut exploiter au maximum. L'énergie éolienne, l'énergie hydraulique et la biomasse peuvent ensemble fournir 8 % de la production en 2020, leur handicap économique pouvant être éliminé par un système de certificats verts. Afin d'éviter de fausser la concurrence, ces mécanismes de soutien devraient être harmonisés à travers l'Europe (et à fortiori pour toute la Belgique !). Il serait souhaitable d'instaurer un système simple permettant aux consommateurs d'opérer un choix

volontaire et d'acheter du « courant vert », c.-à-d. de l'électricité dérivée de sources renouvelables, dont le prix serait plus élevé pour financer le coût de production plus important.

**D.4** Le potentiel de marché encore disponible pour des installations de cogénération de qualité (« Chaleur-Électricité ») s'élève à environ 1000 MW. L'utilisation de ce potentiel devrait être stimulée par exemple par des tarifs de rachat favorables. En outre, il faut réaliser qu'une utilisation peu judicieuse de la cogénération peut entraîner une augmentation des émissions de CO<sub>2</sub>.

**D.5** La Belgique ne peut conserver sa position relativement positive en matière d'émissions de CO<sub>2</sub>/kWh que si le pourcentage de l'énergie nucléaire dans le parc de production se maintient. Ceci implique le remplacement du parc nucléaire actuel par de nouvelles unités nucléaires, et ce à partir de 2020-2025 date à laquelle on peut présumer atteindre la durée de vie des unités les plus anciennes. Arriver et se maintenir à la norme de Kyoto semble donc extrêmement difficile, et économiquement difficilement viable, en cas de sortie du nucléaire.

Entre-temps le savoir-faire nucléaire existant en Belgique doit être maintenu et la recherche scientifique doit être stimulée, en particulier pour l'enfouissement définitif des déchets et le développement de nouveaux types de réacteurs.

**D.6** La construction de centrales nouvelles et le remplacement d'anciennes centrales au charbon devront de préférence faire appel à des unités combinées de turbines à gaz et à vapeur (TGV) en raison de leur haut rendement et faibles rejets de CO<sub>2</sub>.

**D.7** Cependant, afin d'assurer la sécurité d'approvisionnement et la stabilité des prix à long terme, on ne peut éliminer complètement l'utilisation du charbon. La génération la plus récente de centrales au charbon équipée d'installations d'épuration des gaz de combustion doit poursuivre son rôle stabilisateur dans le parc de production, et doit être remplacée en fin de vie par des unités de charbon pulvérisé avancées ou, à plus long terme, par des unités à charbon gazéifié.

**D.8** La recherche scientifique pour le captage et le stockage de CO<sub>2</sub> avant ou après la combustion doit être stimulée au niveau national et international afin de permettre l'utilisation optimale des énormes réserves mondiales de charbon, tout en contenant les émissions de CO<sub>2</sub>.

**D.9** La recherche scientifique relative aux cellules photoélectriques (coût !) et aux piles à combustibles (durée de vie, fiabilité) doit être stimulée. Quoique ces technologies ne peuvent offrir une solution à court terme pour la production d'électricité à grande échelle, des applications intéressantes existeront à plus long terme pour ces deux processus de production.