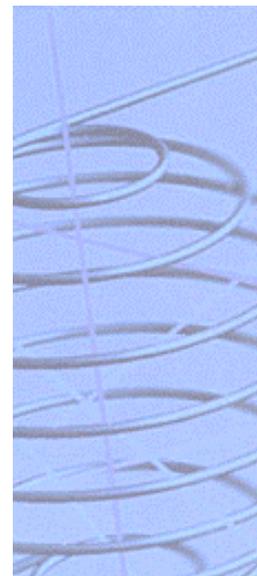


Véhicules électriques et hybrides : une mesure pour réduire l'ozone troposphérique

Rapport final
CEESE - ULB



Changement global et développement durable
Sous-programme 2 : appui scientifique à la politique belge

Global change en duurzame ontwikkeling
Deelprogramma 2: wetenschappelijke ondersteuning van het beleid in België

N° CG/11/26

Développement durable | Duurzame ontwikkeling



FEDERALE DIENSTEN VOOR
WETENSCHAPPELIJKE, TECHNISCHE
EN CULTURELE AANGELEGHEDEN
Wetenschapsstraat 8 ■ B-1000 BRUSSEL
Tel. 02 238 34 11 ■ Fax 02 230 59 12
URL : www.belspo.be

SERVICES FEDERAUX DES
AFFAIRES SCIENTIFIQUES,
TECHNIQUES ET CULTURELLES
rue de la Science 8 ■ B-1000 BRUXELLES
Tél. 02 238 34 11 ■ Fax 02 230 59 12
URL : www.belspo.be



D/2001/1191/39
Uitgeven in 2001 voor de
Federale diensten voor wetenschappelijke, technische en culturele aangelegenheden
Publié en 2001 par les
Services fédéraux des affaires scientifiques, techniques et culturelles

Voor meer informatie / Pour d'autres renseignements :

Madame A. Fierens
DWTC/SSTC
Wetenschapstraat 8 rue de la science
Brussel 1000 Bruxelles
Tel. : +32-2-238.36.60
Fax. : +32-2-230.59.12
E-mail : fier @belspo.be
Internet : <http://www.belspo.be>

Noch de Federale diensten voor wetenschappelijke, technische en culturele aangelegenheden (DWTC), noch eenieder die handelt in de naam van de DWTC is verantwoordelijk voor het gebruik dat van de volgende informatie zou worden gemaakt.

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een gegevensbestand of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën of enige andere manier zonder de aanduiding van de referentie.

Les services fédéraux des Affaires scientifiques, techniques et culturelles (SSTC) ainsi que toute personne agissant en leur nom ne peuvent être tenus pour responsables de l'éventuelle utilisation qui serait faite des informations qui suivent.

Cette publication ne peut ni être reproduite, même partiellement, ni stockée dans un système de récupération ni transmise sous aucune forme ou par aucun moyens électronique, mécanique, photocopies, enregistrement ou autres sans y avoir indiqué la référence.

SERVICES DU PREMIER MINISTRE

SERVICES FEDERAUX DES AFFAIRES SCIENTIFIQUES, TECHNIQUES ET CULTURELLES

**Plan d'appui scientifique à une politique de
Développement Durable**

**Véhicules électriques et hybrides : une
mesure pour réduire l'ozone troposphérique ?**

Rapport Final

Contrat de Recherche n°GC/11/26

Etude réalisée par :

Vincent FAVREL , Véronique LANDRAIN et Nancy DA SILVA

sous la direction de Dr Walter HECQ (CEESE, ULB)

Septembre 2001

CENTRE D'ETUDES ECONOMIQUES ET SOCIALES DE L'ENVIRONNEMENT

UNIVERSITÉ LIBRE DE BRUXELLES

Avenue Jeanne, 44 – C.P 124

B-1050 Bruxelles

Tél. : +32-(0)2.650.33.78 – Fax : +32-(0)2.650.46.91

Résumé exécutif

1. Contexte général

Ce projet mené au Centre d'Etudes Economiques et Sociales de l'Environnement (CEESE) de l'Université Libre de Bruxelles s'inscrit dans le cadre général de l'aide à la prise de décision en matière de lutte contre la pollution photochimique dans les zones urbaines et péri-urbaines.

Compte tenu de la nature particulière de l'ozone troposphérique – polluant secondaire formé à partir de précurseurs tels que les oxydes d'azote et les composés organiques volatils –, de la complexité des réactions chimiques participant à sa formation et à sa destruction et du nombre de sources polluantes impliquées, la définition de stratégies de lutte contre la pollution photochimique n'est pas aisée et requiert le développement d'outils adéquats souvent lourds à mettre en oeuvre.

Les mesures mises en oeuvre pour le contrôle de la pollution photochimique sont souvent correctives et portent sur le court terme. Elles consistent en une diminution des pics de pollution par une limitation drastique du trafic dans les zones urbaines. Les mesures de long terme sont actuellement encore faiblement développées.

Parmi les mesures susceptibles d'améliorer la situation à long terme, la promotion des véhicules électriques et hybrides qui n'émettent que très peu ou pas de polluants précurseurs d'ozone constitue une solution préventive potentielle.

2. Principaux objectifs

L'objectif principal de ce projet est d'éclairer la définition de stratégies de lutte contre la pollution photochimique, en analysant spécifiquement une mesure de type technologique consistant en l'introduction de véhicules électriques ou hybrides dans la Région de Bruxelles-Capitale.

Un objectif plus général de l'étude menée concerne le développement d'un outil d'aide à la prise de décision susceptible d'aider les décideurs en terme de lutte contre la pollution photochimique. Un accent particulier a donc été porté aux développements méthodologiques nécessaires pour aborder sérieusement cette problématique.

Dans cette perspective, l'étude menée s'est développée suivant un volet économique, d'une part, et un volet environnemental, d'autre part, de façon à pouvoir mettre en balance ces deux aspects importants de l'évaluation de nouvelles technologies de transport.

Concernant le volet économique, compte tenu des données disponibles au moment de cette étude, seuls les véhicules purement électriques ont pu faire l'objet d'une analyse économique détaillée. Dans le cadre de cette analyse, les coûts d'utilisation propres aux véhicules électriques ont tout d'abord été évalués et comparés avec ceux de leurs homologues thermiques. Les coûts de mise en oeuvre de divers scénarios d'intégration de ces véhicules en Région de Bruxelles-Capitale ont ensuite été évalués.

Dans le cadre du volet environnemental, nous situons dans un premier temps l'apport potentiel des véhicules électriques et hybrides dans le contexte général de l'évolution des émissions du trafic routier en Région de Bruxelles-Capitale depuis 10 ans. Dans ce but, les émissions des véhicules électriques et hybrides sont tout d'abord comparées à celles de leurs homologues thermiques. Les effets de différents scénarios d'introduction de ces véhicules dans la Région sont ensuite évalués en termes de réduction des émissions de polluants atmosphériques. Dans un second temps, la méthodologie développée pour l'évaluation de la pollution photochimique et son application pour l'évaluation de différentes stratégies générales de réduction sont

présentées. Les effets potentiels de l'introduction de véhicules électriques dans la Région sont également évalués.

3. Analyse des aspects économiques

Cette partie de l'étude avait pour objectif d'effectuer un bilan économique relatif à l'utilisation des véhicules électriques au sein de la Région de Bruxelles Capitale.

Un premier volet s'intéresse donc aux coûts d'utilisation propres aux véhicules électriques. Ces coûts d'utilisation, exprimés en termes de coûts fixes et de coûts variables, font l'objet d'une comparaison avec ceux relatifs aux véhicules traditionnels essence et diesel. Il est également tenu compte dans cette partie de l'influence du parcours annuel moyen effectué par les véhicules ainsi que de l'influence de la durée d'amortissement. De plus, un scénario à l'horizon 2010 est envisagé. Ce scénario tient compte de l'évolution du prix de l'électricité (compte tenu de la libéralisation des marchés de l'énergie) ainsi que de l'évolution du prix des carburants. Pour finir, différentes mesures politiques incitatives en faveur du véhicule électrique sont également analysées dans cette partie.

Un deuxième volet traite des coûts de mise en œuvre de divers scénarios d'introduction de véhicules électriques en Région de Bruxelles-Capitale. Ces scénarios ont été définis par l'équipe du Professeur Maggetto de la VUB.

Pour finir, un bref aperçu des obstacles empêchant la production en série des véhicules électriques a été dressé.

Au terme de cette analyse, il a été pu être conclu qu'à l'heure actuelle, étant donné l'étroitesse du marché des véhicules électriques, il est difficile d'imaginer une introduction massive de ce type de propulsion dans la Région de Bruxelles Capitale. L'absence de production en série de ces véhicules, entraînant des prix d'achat beaucoup trop élevés, reste en effet un obstacle majeur pour toute personne désireuse d'acquérir un tel véhicule.

Ainsi, si l'on compare les coûts d'utilisation au kilomètre des véhicules électriques et ceux de leurs homologues thermiques, un surcoût de plus de 40% est enregistré en défaveur du véhicule électrique. Cet état de fait est évidemment imputable au prix d'achat de ce type de véhicule, 70% plus cher que le même véhicule essence et 52% de plus que le diesel. Par contre, si l'on ne considère que les autres postes tels que l'assurance, l'entretien, les taxes et les frais de consommation, l'utilisation du véhicule électrique devient alors beaucoup plus intéressante que celle des deux autres modes de propulsion. Cette conclusion est encore plus vraie lorsque l'on analyse la situation à l'horizon 2010. En effet, la libéralisation des marchés de l'électricité ainsi que la hausse attendue des prix du pétrole auront pour conséquence de favoriser davantage les véhicules électriques en ce qui concerne le poste consommation.

Par conséquent, si les pouvoirs publics désirent réellement promouvoir l'utilisation du véhicule électrique en ville, des mesures de politique incitative doivent absolument être mises en place. On pense notamment à des subventions accordées par les pouvoirs publics pour l'achat de véhicules électriques ou encore à des réductions de taxes et de prime d'assurance en faveur de ce type de propulsion ; différentes mesures qui ont déjà été expérimentées à l'étranger.

Par ailleurs, l'utilisation de modes de transport électrique est, comme nous l'avons déjà vu, étroitement corrélée aux infrastructures électriques et aux projets d'urbanisme. Ce type de transport nécessite donc, lors de la phase initiale, le soutien de mesures politiques accélérant la mise en place de nouvelles infrastructures de bornes de recharge. L'introduction de véhicules électriques dépend également en grande partie des politiques stimulant l'adaptation de nouveaux concepts de transport. Ainsi, différents scénarios ont été envisagés dans cette partie.

Ces scénarios concernaient :

- la mise en œuvre d'un réseau de stations de location automatique de véhicules électriques à l'intérieur de la Région de Bruxelles Capitale en complément au transport public ;
- l'introduction de x% des véhicules électriques dans les flottes d'entreprises publiques ou privées ;
- la restriction d'accès dans certaines zones de la ville accordant une priorité pour le transport public et les véhicules électriques ;
- la mise en œuvre de centres de distribution de marchandises utilisant des véhicules électriques afin d'alléger le trafic des véhicules lourds dans le centre ville en faveur des camionnettes électriques.

L'analyse économique de ces scénarios montre, qu'à nouveau, l'achat des véhicules électriques représente la charge financière la plus importante, du moins en ce qui concerne des scénarios tels que le réseau de stations de location de véhicules électriques ou le réseau de distribution de marchandises.

Un tel constat nous permet donc de conclure que pour favoriser l'introduction de véhicules électriques au sein de la Région de Bruxelles Capitale, les pouvoirs publics devront d'abord s'orienter vers des scénarios de moindre envergure. Ainsi, des scénarios tels que la restriction d'accès dans certaines zones en faveur des véhicules électriques à zéro émission ou encore le remplacement des véhicules thermiques par des véhicules électriques au sein de flottes captives tant privées que publiques, semblent à l'heure actuelle les plus viables financièrement. Il ne faut pas pour autant exclure d'emblée les autres scénarios. Ces derniers pourront être envisagés par la suite dans la mesure où un retour d'expérience existera pour le cas précis de Bruxelles-Capitale. La mise en place des deux autres scénarios permettront en effet d'analyser les comportements d'utilisation des véhicules électriques et des bornes de recharge. Une telle analyse permettra donc par la suite, de mettre en place de la manière la plus efficace possible tant un réseau de distribution de marchandises qu'un réseau de location de véhicules électriques.

Par ailleurs, nos conclusions restent fort mitigées en ce qui concerne un éventuel développement du véhicule électrique vers une production en série. Cette dernière est néanmoins indispensable au développement de ce type de propulsion. Cependant, il existe, comme nous l'avons vu, encore beaucoup d'obstacles à lever et peu d'incitants économiques dans le chef des constructeurs automobiles pour passer à une production en série des véhicules électriques.

Pour être totalement complet, nous devons encore signaler que nous n'avons pas pris en compte dans cette étude les différents coûts afférents à la promotion des véhicules électriques. Nous entendons par là les frais relatifs aux différentes campagnes publicitaires et autres, visant à faire connaître et promouvoir les véhicules électriques. De tels coûts doivent évidemment être pris en compte et ajoutés à ceux qui ont été calculés dans cette partie.

4. Analyse des aspects environnementaux

L'analyse menée dans le cadre de ce projet a été double.

Il s'agissait dans un premier temps d'aborder la problématique de la pollution atmosphérique d'une façon globale en développant un outil permettant la modélisation d'épisodes de pollution photochimique et l'évaluation des dommages qui y sont associés. Diverses stratégies générales de réduction des émissions de gaz précurseurs ont ainsi pu être évaluées pour permettre une meilleure compréhension de la situation autour de Bruxelles.

Dans un second temps, l'analyse s'est intéressée à une mesure spécifique d'introduction de véhicules électriques dans la Région de Bruxelles-Capitale de façon à en déterminer les bénéfices potentiels du point de vue de la réduction de la pollution aux différentes échelles locale, régionale et globale.

4.1 Méthodologie générale

Afin d'évaluer les impacts associés à la pollution photochimique en termes d'effets néfastes sur la santé publique, de détérioration des matériaux, d'atteintes à la végétation et aux cultures agricoles par exemple, la méthodologie développée dans le cadre de cette recherche repose sur l'évaluation du coût des dommages. Egalement connue sous le nom d'approche du chemin d'impact, cette méthodologie trace le passage d'un polluant depuis l'endroit où il est émis jusqu'à l'impact final en suivant une série logique d'étapes.

L'évaluation des effets externes générés par les transports est alors le résultat d'une analyse qui comporte quatre étapes principales:

- évaluation des émissions polluantes dont est responsable le trafic routier;
- détermination des concentrations en polluant résultantes dans l'air ambiant (immissions) ;
- calcul des dommages physiques ;
- traduction en termes monétaires.

La modélisation de la relation « émissions-immissions » a nécessité une approche spécifique dans le cas de la pollution photochimique qui demande de recourir à des modèles déterministes de dispersion des polluants ainsi qu'à des modèles chimiques pour pouvoir rendre compte des phénomènes physiques et chimiques intervenant dans la formation d'ozone.

Le modèle METPHOMOD développé par le groupe de modélisation numérique du Laboratoire de Pollution Atmosphérique et des Sols à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne a été utilisé.

L'utilisation de ce modèle a nécessité l'établissement d'un cadastre d'émissions horaires spécifique à la Belgique pour une série de 36 polluants : méthane, monoxyde de carbone, monoxyde d'azote, dioxyde d'azote, dioxyde de soufre ainsi que 31 espèces de composés organiques volatils non-méthaniques.

En terme de dommages, l'approche développée s'est limitée aux effets à court terme (épisode) pour lesquels des fonctions exposition-réponse étaient disponibles. L'analyse considère spécifiquement les effets sur la santé en termes de mortalité aiguë et d'admissions à l'hôpital pour cause respiratoire au cours d'un épisode de pollution photochimique.

Dans un premier temps, la méthodologie développée a permis de modéliser un épisode de pollution photochimique survenu les 10 et 11 août 1998 considéré comme situation de référence et de calculer les dommages associés à cet épisode sur un domaine de 120 km x 120 km centré sur Bruxelles. L'évaluation a conduit à des coûts externes de 2,2 M€ dont 80% sont associés à la mortalité aiguë.

Sur base de cette méthodologie différentes stratégies et scénarios ont pu être évalués dans un second temps.

4.2 Stratégies générales de lutte contre la pollution photochimique

Dans le cadre de l'évaluation de stratégies générales de réduction des émissions de gaz précurseurs, trois scénarios de réduction des émissions d'oxydes d'azote et de composés organiques volatils ont été analysés. Les stratégies considérées consistaient à réduire les émissions totales au niveau de la Région de Bruxelles-Capitale de trois façons : uniquement les émissions de NOx de 50% ; uniquement les émissions de COV de 50% ; ou simultanément les émissions de NOx et COV de 50%.

Sur base de cette analyse, il n'est pas aisé de conclure de façon univoque sur la stratégie la plus efficace pour améliorer la situation. En effet, en fonction de la zone géographique ou du critère d'évaluation considérés, des conclusions différentes peuvent être établies quant à la stratégie la plus efficace en terme de réduction de la pollution photochimique.

Si la réduction des émissions de COV seuls en région bruxelloise apparaît comme la stratégie la plus efficace pour la diminution des valeurs de pic observées sur le domaine, c'est la réduction des émissions de NOx seuls qui est la plus efficace en terme de diminution des valeurs moyennes sur 8 heures auxquelles sont associés les effets sur la santé.

Les différents scénarios considérés conduisent tous à des augmentations des concentrations d'ozone dans les principales agglomérations urbaines (Anvers, Bruxelles, Gand, Charleroi et Mons-Borinage) ce qui indique la saturation de ces zones à la fois en NOx et en COV.

Concernant spécifiquement la Région de Bruxelles-Capitale, la stratégie la moins défavorable – c'est-à-dire celle qui conduit à l'augmentation la plus faible des concentrations – est celle de réduction des émissions de COV uniquement.

En terme de dommages à la santé, seul le scénario de réduction des émissions de NOx conduit à une réduction des coûts externes associés à l'épisode par rapport à la situation de référence. Les deux autres scénarios conduisent à de légères augmentations (moins de 1%) de ces dommages, ceci malgré l'effet global des réductions des concentrations d'ozone.

Ceci s'explique par le fait que, d'une part, seuls les dommages sur la santé sont intégrés dans l'évaluation et que, d'autre part, c'est au niveau des grandes agglomérations que se produisent les plus grands accroissements de pollution photochimique. Les effets positifs d'une réduction des précurseurs en région bruxelloise se faisant surtout ressentir dans les zones rurales, l'intégration des effets sur la végétation et les cultures agricoles à long termes pourraient conduire à des conclusions différentes.

4.3 Effets environnementaux associés à l'introduction véhicules électriques et hybrides en Région de Bruxelles-Capitale

L'analyse générale des aspects environnementaux qui a été menée dans un premier temps a permis de mettre en évidence les principaux avantages que présentent les technologies électriques et hybrides.

Deux scénarios généraux d'introduction de véhicules légers utilisant ces technologies ont permis d'estimer les réductions d'émissions polluantes qui peuvent être attendues d'une introduction de 10% de véhicules électriques et hybrides à essence respectivement dans le trafic routier en Région de Bruxelles-Capitale. Cette analyse générale a également permis de mettre en évidence les bénéfices environnementaux – réduction des coûts externes – potentiels qui peuvent être attendus de la pénétration de ces technologies. Chaque % de part de marché de ces technologies représenterait un bénéfice environnemental de 5,5 M€ en terme de réduction des coûts externes annuels associés aux dommages locaux. Ces scénarios mettent également en évidence des réductions importantes des émissions de gaz à effet de serre (-5,9% pour les véhicules électriques et -3,6% pour les véhicules hybrides) ainsi que de gaz précurseurs de l'ozone troposphérique.

Les effets de la mise en place d'une politique plus volontariste qui conduirait à une pénétration plus importante des véhicules purement électriques dans la Région de Bruxelles-Capitale grâce à différentes mesures d'accompagnement appropriées (réseau de location de véhicules, restriction d'accès de certaines zones aux véhicules thermiques, etc.) ont fait l'objet d'une analyse spécifique. Le scénario analysé considère que la « part de marché » des véhicules électriques est de 50% dans le centre ville (pentagone), 20% dans une zone intermédiaire entre la petite ceinture et la grande ceinture et 5 % à l'extérieur de cette dernière.

Au niveau des impacts locaux – c'est-à-dire au niveau de la Région même – ce scénario conduit à des réductions de 76 M€ des coûts externes associés aux dommages locaux principalement dominés par les effets sur la mortalité associés aux particules.

En terme de réduction des émissions de gaz à effet de serre, ce scénario conduit à une réduction de 8% ce qui correspond à des bénéfices environnementaux de 0,144 M€ par rapport à la situation pour l'année 1998.

Ce scénario permet également de réaliser des réductions assez importantes des émissions de gaz précurseurs d'ozone troposphérique : -7,3% pour les NOx et -13,4% pour les COV. Il s'agit d'une évaluation globale intégrant les émissions directes et indirectes associées à ce scénario. Compte tenu de la complexité des phénomènes mis en oeuvre et de leur non-linéarité, cette analyse a été complétée par une simulation des effets de ces réductions d'émissions sur la pollution photochimique dans et autour de Bruxelles.

Les résultats de cette simulation montrent une réduction générale des valeurs de pics (-1,6% en moyenne), des concentrations moyennes sur 8 heures maximales (-3,9% en moyenne) caractéristiques des effets sur la santé ainsi que des concentrations moyennes sur 24h (-4,7% en moyenne) représentatives des dommages sur les cultures et la végétation. En terme de dommages sur la santé, ce scénario d'introduction massive de véhicules électriques conduit à une réduction de 1,8% des coûts externes associés à l'épisode considéré pour l'ensemble du domaine analysé, soit un bénéfice de 40.000 € (1,6 MBEF). Cette réduction importante des externalités sur la santé humaine est principalement à mettre en relation avec l'effet positif de ce scénario sur les concentrations en ozone dans les deux principales zones urbaines que sont Anvers et Bruxelles contrairement à ce qui était observé pour les scénarios de stratégie générale.

En effet, en ce qui concerne les effets de ce scénario spécifiquement sur la situation en Région de Bruxelles-Capitale, les simulations ont permis de montrer des diminutions significatives de la concentration maximale d'ozone au cours de l'épisode et de la concentration moyenne sur 8 heures maximale. Ces évolutions conduisent à des dommages associés à la pollution photochimique estimés à 0,33 M€, ce qui représente une diminution de près de 4% des coûts externes par rapport au cas de référence.

5. Bilan des aspects économiques et environnementaux

Si l'on se réfère au scénario d'introduction de véhicules purement électriques dont les effets environnementaux sont résumés ci-dessus, on s'aperçoit que ce scénario permet d'améliorer la situation générale en ce qui concerne la pollution photochimique et conduit à des bénéfices environnementaux non-négligeables par rapport aux dommages provoqués lors d'un épisode. Ces bénéfices s'élèvent à 40.000 € (1,6 MBEF) sur l'ensemble du domaine considéré et 12.355 € (0,5 MBEF) spécifiquement pour la Région de Bruxelles-Capitale.

Rappelons que, dans le cadre de cette étude, nous nous sommes focalisés sur un seul épisode, pour une zone déterminée et que nous n'avons considéré que les effets à court terme sur la santé humaine. Si l'on multiplie ces montants par le nombre d'épisodes ou de situations où des concentrations d'ozone produisent déjà des effets sur la population, les bénéfices environnementaux d'une telle mesure pourraient être bien plus importants. L'intégration des effets à court terme et à long terme sur la végétation et les productions agricoles devrait également conduire à des montants plus élevés.

En comparaison avec les bénéfices environnementaux associés aux dommages locaux, les bénéfices associés à une réduction des coûts associés à la pollution photochimique est plutôt limitée. Pour le même scénario, ces bénéfices ont pu être chiffrés à environ 76 M€ par an. Les bénéfices liés à une réduction des dommages associés au réchauffement climatique avaient quant à eux été estimés à 0,144 M€.

En ce qui concerne les coûts annuels de mise en place des différents scénarios considérés dans l'analyse économique, l'analyse économique a montré qu'ils allaient de 0,1 M€ pour la restriction d'accès à certaines zones de la Région à près de 130 M€ pour la mise en oeuvre d'un réseau de centres de distribution de marchandises provenant par la route exploité au maximum. Les coûts annuels de mise en place d'un scénario général intégrant les différentes mesures proposées mais à un niveau d'exploitation plus faible ont quant à eux été évalués à un peu plus de 70 M€

On peut donc conclure que, si la réduction des dommages liés à la pollution photochimique que permet l'introduction de véhicules électriques en Région de Bruxelles-Capitale ne compense pas à elle seule les coûts de mise en oeuvre d'une politique volontariste en la matière, la prise en compte des autres effets positifs qui sont associés à cette introduction justifie un tel investissement principalement si on tient compte des effets sanitaires au niveau local.

Executive summary

1. General context

This project was carried out at the Centre for Economic & Social Studies of the Environment (CESSE) of the *Université Libre de Bruxelles* and comes under the general heading of the support to decision making for the control of photochemical pollution in urban and suburban areas.

Taking into account the particular nature of tropospheric ozone - secondary pollutant formed from precursors such as nitrogen oxides and volatile organic compounds -, the complexity of the chemical reactions taking part in its formation and its destruction and the number of implied polluting sources, the definition of strategies of control of photochemical pollution is not easy and requires the development of adequate tools which are often difficult to implement.

The measures taken for the control of photochemical pollution are often corrective and relate to the short term. They consist of a reduction in the peaks of pollution by a drastic limitation of the traffic in the urban areas. Measures of long term are currently still slightly developed.

Among the measures likely to improve the long-term situation, the promotion of the electric and hybrid vehicles which only emit very little or no ozone precursors constitute a potential preventive solution.

2. Objectives

The main objective of this project is to clarify the definition of strategies of control of photochemical pollution, by specifically analysing a technological-type measure consisting of the introduction of electric or hybrid vehicles into the Brussels-Capital Region.

A more general objective of the undertaken study relates to the development of a tool of support to decision-making likely to help the decision makers in term of control of photochemical pollution. A particular attention was thus carried to the methodological developments necessary to approach these problems seriously.

From this point of view, the undertaken study developed according to an economic section, on the one hand, and an environmental section, on the other hand, in order to be able to compare these two significant aspects of the evaluation of new technologies of transport.

Concerning the economic aspects, taking into account the data available at the moment of this study, only the electric vehicles could be the subject of a detailed economic analysis. Within the framework of this analysis, the costs of implementation specific to the electric vehicles first of all were evaluated and compared with those of their internal combustion counterparts. The costs of implementation of various scenarios of integration of these vehicles in the Brussels-Capital Region were then evaluated.

Within the framework of the environmental analysis, the potential contribution of the electric and hybrid vehicles in the general context of the evolution of road traffic emissions in the Brussels-Capital Region since 1990 is first determined. To this end, the emissions of the electric and hybrid vehicles are first of all compared with those of their internal combustion counterparts. The effects of various scenarios of introduction of these vehicles into the Region are then evaluated in terms of reduction of the atmospheric pollutants emissions. Next, the methodology developed for the evaluation of photochemical pollution and its application for the evaluation of various general strategies of reduction are presented. The potential effects of the introduction of electric vehicles into the Brussels-Capital are also evaluated.

3. Analysis of the economic aspects

This part of the study aimed to carry out an economic assessment relating to the use of the electric vehicles within the Brussels-Capital Region.

A first part of this analysis concerns thus the cost-in-use specific to the electric vehicles. These costs, expressed in terms of fixed costs and variable costs, are compared with those relating to the traditional gasoline and diesel vehicles. It is also held account in this part of the influence of the average annual course carried out by the vehicles as well as the influence of the amortisation period. Moreover, one scenario by 2010 is considered. This scenario takes account of the trend of the price of electricity (taking into account the liberalisation of the markets of energy) as well as the trend of the price of the fuels. Finally, various incentive political measures in favour of the electric vehicle are also analysed in this part.

A second part of the economic analysis considers the costs of implementation of various scenarios of introduction of electric vehicles in the Brussels-Capital Region. These scenarios were defined by the team of Professor Maggetto of the VUB.

To finish, a short outline of the obstacles preventing the mass production of electric vehicles was drawn up.

At the end of this analysis, it could be concluded that at the present time, being given the narrowness of the market of the electric vehicles, it is difficult to imagine a massive introduction of this type of propulsion into the Brussels-Capital Region. The absence of mass production of these vehicles, involving purchase prices much too high, remains indeed a major obstacle for any potential buyer of this type of vehicle.

If we compare the cost-in-use per kilometre of an electric vehicle to that of its internal combustion counterparts, the additional cost for the electric vehicle is evaluated at 40%. This of course results from the high purchase price, which lies 70% higher than a similar petrol vehicle and 52% higher than a diesel. On the contrary, if you only consider other items such as insurance, maintenance, taxes and consumption, then the electric vehicle is getting much cheaper than the other propulsion modes. In conclusion, this is even more so, if we analyse the situation with a view on 2010. Indeed, both liberalisation of electricity markets and the expected increase of petrol prices will have favourable effects on electric vehicles use, as far as consumption is concerned.

As a consequence, if the authorities really wish to promote the use of electric vehicles in town, they absolutely have to introduce political incentives. We notably think of possible subsidies by the authorities for electric vehicles buyers, or a reduction of taxes or insurance premiums on this type of vehicle. Those different measures have already been experimented in other countries.

Furthermore, as seen before, the use of electric-driven transport is closely correlated to electrical infrastructure and town planning. Thus this type of propulsion needs to be supported, in its initial phase, by political measures to accelerate the installation of new infrastructures for the recharging terminals. The introduction of electric vehicles also largely depends on the implementation of policies aiming to stimulate new transport concepts. At this stage, different possible scenarios have been taken into consideration.

These scenarios concerned:

- the implementation of a network of stations of automatic hiring of electric vehicles inside the Brussels-Capital Region in complement with the public transport;
- the introduction of x% of the electric vehicles into the fleets of public or private companies;
- the access restriction in certain areas of the city giving a priority for the public transport and the electric vehicles;

- the implementation of goods distribution centres using of the electric vehicles in order to reduce the traffic of the heavy vehicles in the centre town in favour of the electric vans.

The economic analysis of these scenarios shows again that the purchase of electric vehicles is the highest financial burden, at least as far as scenarios such as a hiring network of electric vehicles or a goods distribution network are concerned.

This leads to the conclusion that, if they wish to favour the use of electric vehicles in the Brussels-Capital Region, the authorities first have to focus on smaller-scale scenarios. In fact, scenarios like access restrictions in certain areas in favour of zero emission electric vehicles, or replacement of internal combustion vehicles by electric vehicles in private as well as public captive fleets, seem to be the most financially viable at present. However, the other scenarios should not be excluded right away. They can be taken into consideration later on, insofar the experience generates a favourable return in the very case of the Brussels-Capital Region. The implementation of the two other scenarios will indeed allow us to analyse the behaviour of electric vehicles and recharging terminals users. The consequential analysis of this behaviour will help implementing more efficiently both a network of goods distribution and a network of electric vehicles hiring.

However, our conclusions remain very mitigated as for the eventuality of an expansion of the electric vehicles resulting in mass production. And yet, this mass production is indispensable for the development of this type of propulsion. However, we have seen that there remain many obstacles and that car producers do not benefit of economic incentives to encourage them to go over to mass production of electric vehicles.

To be complete, let us also point out the fact that we have not taken into account here the eventual promotion cost related to electric vehicles. We think of the cost of promotion campaigns aiming to initiate the public and promote these vehicles. Such expenses have of course to be taken into account and are to be added to the other costs evaluated in this part of the study.

4. Analysis of the environmental aspects

The analysis carried out within the framework of this project was twofold.

First, it was a question of approaching the problems of the air pollution in a global way by developing a tool allowing the modelling of episodes of photochemical pollution and the evaluation of the related damage. Various general strategies of reduction of precursors emissions thus could be evaluated to allow a better understanding of the situation around Brussels.

Second, the analysis considered a specific measure of introduction of electric vehicles into the Brussels-Capital Region in order to determine its potential benefits from the point of view of the reduction of pollution on the various scales (local, regional and global).

4.1 Methodology

With respect to the assessment of the effects of photochemical pollution in terms of its harmful effects on public health, damage to buildings and vegetation and the reduction of agricultural yield, for example, the overall methodology employed has as its basis an assessment of the damage costs. Also known as the 'impact pathway' approach, this methodology traces the progress of pollutants from their point of emission to their point of impact by following a series of logical steps.

The assessment of the external effects caused by the transport sector is thus the result of an analysis with four principal stages:

- the assessment of pollutant emissions caused by road traffic;
- the determination of the resulting concentrations of pollutants in the atmosphere (immissions);
- the calculation of the physical damage;
- its expression in financial terms.

The modelling of the "emission-immissions" relationship required a specific approach in the case of the photochemical pollution which requires to resort to deterministic models of pollutant dispersion as well as chemical models able to account for the physical and chemical phenomena leading to the ozone formation.

Use was made of the METHPHOMOD model developed by the numerical modelling group in the Atmospheric & Land Pollution Laboratory of the Lausanne Ecole Polytechnique Fédérale.

The use of this model required the establishment of a register for Belgium covering hourly emissions for a series of 36 pollutants such as methane, carbon monoxide, nitrogen monoxide, nitrogen dioxide and sulphur dioxide as well as 31 types of non-methane volatile organic compounds.

In terms of damage, the approach was limited to short-term effects (episodes) for which exposure-response functions were available. The analysis pays specific attention to repercussions on health in terms of acute mortality and hospital admissions as the result of respiratory problems during periods of photochemical pollution.

To begin with, the methodology enabled a photochemical pollution episode to be modelled. This episode, which occurred on 10th and 11th August 1998, was taken as reference case, and the methodology enabled the damage associated with it to be calculated over a 120 sq. km. zone centred on Brussels. The assessment produced external costs of 2.2 M€, 80% of which were associated with acute mortality.

On the basis of this methodology, various strategies and scenarios could be evaluated in the second part of the analysis.

4.2 General strategies of control of photochemical pollution

Within the framework of the evaluation of general strategies of reduction of precursory gas emissions, three scenarios involving the reduction of precursory gas emissions (nitrogen oxides and volatile organic compounds) were analysed. The strategies considered consisted of reducing the total emissions in the Brussels-Capital region in three ways, namely NO_x emissions alone by 50%, COV emissions alone by 50%, and NO_x and COV emissions together by 50%.

On the basis of this analysis it was not easy to decide univocally on the most efficient strategy to adopt with a view to improving the situation. In fact, as far as the most efficient strategy to reduce photochemical pollution is concerned, different conclusions can be arrived at depending on the criterion selected for assessment purposes and the geographical zone involved.

Whereas the reduction of COV emissions in the Brussels region seems to be the most efficient strategy to reduce the peak values observed in the area, the reduction of NO_x is the most efficient approach in terms of decreasing the average values over the 8 hours associated with health effects.

The various scenarios considered all point to increases in ozone concentrations in the major urban areas (Antwerp, Brussels, Gent, Charleroi and Mons-Borinage), a factor which indicates that these areas are saturated in NO_x and COV.

In the case of the Brussels-Capital region, the least deleterious strategy, i.e. the one which leads to the lowest increase in the concentrations, is that of reducing COV emissions alone.

In terms of damage to health, only the scenario involving a reduction in NO_x emission results in a reduction in the external costs associated with the episode in comparison with the reference case. The two other scenarios result in slight increases (less than 1%) in this damage despite the overall effect of reductions in ozone concentrations.

This is explained by the fact that only damage to health is included in the assessment, and that the greatest increases in photochemical pollution occurs in major urban areas. Since the positive effects of a reduction in the precursors in the Brussels region are felt mainly in rural areas, the incorporation of the long term effects on vegetation and crops might well lead to different conclusions.

4.3 Environmental effects associated with the introduction of electric and hybrid vehicles in the Brussels-Capital Region

The general analysis of the environmental aspects which was carried out initially made it possible to highlight the principal advantages which have electric and hybrid technologies.

Two general scenarios of introduction of light vehicles using these technologies made it possible to estimate the reductions of pollutant emissions which can be expected from an introduction of 10% of electric vehicles and hybrid vehicles respectively into the road traffic in the Brussels-Capital Region. This general analysis also made it possible to highlight the potential environmental benefit - reduction of the external costs - which can be expected from a penetration of these technologies. Each % of market share of these technologies would represent an environmental benefit of 5.5 M€ in term of reduction of the annual external costs associated with the local damage. These scenarios also highlight significant reductions in the emissions of greenhouse gases (-5.9% for the electric vehicles and -3,6% for the hybrid vehicles) as well as precursors of tropospheric ozone.

The effects of the implementation of a more voluntarist policy which would lead to a more significant penetration of the electric vehicles in the Brussels-Capital Region thanks to various suitable measures (network of vehicles hiring, access restriction to certain areas for internal combustion vehicles, etc.) were specifically analysed. This scenario considers that the "share of market" of the electric vehicles is 50% in the centre town, 20% in an intermediate zone and 5% in the surrounding area.

While considering the local impacts - i.e. on the level of the Region itself - this scenario led to a 76 M€ decrease in the external costs related to the local damage which are mainly dominated by the effects on mortality associated with the particles.

In term of reduction of the greenhouse gas emissions, this scenario led to a decrease of 8% what corresponds to an environmental benefit of 0.144 M€ in comparison with the reference situation for the year 1998.

This scenario also highlights a rather significant decrease in the emissions of precursors of tropospheric ozone: -7.3% for NO_x and -13.4% for the COV. This consists in a global evaluation integrating the direct and indirect emissions associated with this scenario. Taking into account the complexity of the phenomena involved and their non-linearity, this analysis was supplemented by a simulation of the effects of these emission reductions on the photochemical pollution around Brussels.

The results of this simulation show a general decrease in the peak-values (-1.6% on average), in the maximum 8 hours average concentrations (-3.9% on average) characteristic of the effects on health as well as in the 24 hours average concentrations (-4.7% on average) representative of the damage on the crops and the vegetation. In term of health damage, this scenario of massive introduction of electric vehicles leads to a decrease of 1.8% in the external costs associated with the episode for the geographical area under study, that is to say a benefit of 40,000 € (1.6 MBEF). This significant reduction of the externalities on human health is mainly to relate to the positive effect of this scenario on the ozone concentrations in the two main urban

areas which are Antwerp and Brussels contrary with what was observed for the scenarios of general strategy.

Indeed, with regard to the effects of this scenario specifically on the situation in the Brussels-Capital Region, simulations made it possible to show significant reductions in the maximum ozone concentration during the episode and in the maximum 8 hours average concentration. These evolutions lead to damage associated with photochemical pollution estimated at 0.33 M€, which represents a decrease of almost 4% in the external costs in comparison with the reference case.

5. Assessment of the economic and environmental aspects

While referring to the scenario of introduction of electric vehicles of which the environmental effects are summarised above, it appears that this scenario makes it possible to improve the general situation with regard to photochemical pollution and led to significant environmental benefit in comparison with the damage caused during an episode. These benefit rise to 40,000 € (1.6 MBEF) for the geographical area considered and 12,355 € (0.5 MBEF) specifically for the Brussels-Capital Region.

As a reminder, within the framework of this study, we focused on only one episode, for a given area and that we considered only the short-term effects on human health. If one multiplies these amounts by the number of episodes or situations where ozone concentrations produce already effects on the population, the environmental benefit of such a measure could be much more significant. The integration of the short-term and long-term effects on crops and the vegetation should also lead to higher amounts.

In comparison with the environmental benefit associated with the local damage, the benefit associated with an improvement of the photochemical pollution is rather limited. For the same scenario, these benefit were quantified to approximately 76 M€ per annum. The benefit related to a reduction of the damage associated with the climate change had been estimated at 0.144 M€.

With regard to the annual costs of implementation of the various scenarios considered in the economic analysis, the economic analysis showed that they range from 0.1 M€ for the access restriction to certain areas of the Region to nearly 130 M€ for the implementation of a network of centres of distribution of goods coming by road exploited to the maximum. The annual costs of implementation of a general scenario integrating the various measures suggested but on a weaker level of exploitation as for them were evaluated with a little more than 70 M€.

To conclude, the reduction of the damage related to photochemical pollution that the introduction of electric vehicles in the Brussels-Capital Region allows does not compensate for with it only the costs of implementation of a voluntarist policy. On the other hand, the taking into account of the other positive effects which are associated with this introduction justifies such an investment mainly if one takes account of the health effects at the local level.

Table des matières

Résumé exécutif.....	I
Executive summary.....	VIII
Table des matières.....	i
Chapitre I : Introduction.....	1
I.1 Généralités.....	1
I.2 Stratégies de lutte contre la pollution photochimique.....	1
I.3 Principaux objectifs.....	2
I.4 Organisation du rapport.....	3
Chapitre II : Analyse des aspects économiques.....	4
II.1 Objectifs.....	4
II.2 Méthodologie.....	4
II.2.1 Choix des véhicules.....	4
II.2.2 Détermination des fonctions de coûts.....	4
II.2.2.1 Coûts fixes.....	5
II.2.2.1.a Investissement.....	5
II.2.2.1.b Taxes.....	5
II.2.2.1.c Assurances.....	6
II.2.2.2 Coûts variables.....	6
II.2.2.2.a Entretien.....	6
II.2.2.2.b Consommation énergétique.....	6
II.2.3 Récoltes des données.....	6
II.3 Application.....	7
II.3.1 Coûts d'utilisation des véhicules électriques.....	7
II.3.1.1 Conditions d'utilisation.....	7
II.3.1.2 Scénarios de revente du véhicule électrique.....	7
II.3.1.3 Comparaison des véhicules électriques avec leurs homologues essence et diesel.....	7
II.3.1.3.a Voitures particulières.....	8
II.3.1.3.a Véhicules utilitaires.....	9
II.3.1.4 Influence du parcours annuel moyen.....	10
II.3.1.5 Influence de la durée d'amortissement.....	11

II.3.1.6 Mesures politiques incitatives en faveur du véhicule électrique.....	12
II.3.1.6.a Cas particulier de la Belgique : Proposition de Loi de 1996.....	13
II.3.1.7 Perspective à l'horizon 2010	14
II.3.1.7.a Estimation de l'évolution du prix du pétrole	14
II.3.1.7.b Estimation de l'évolution du prix de l'électricité	18
II.3.1.7.c Résultats.....	21
II.3.2 Coûts de mise en œuvre de scénarios d'introduction des véhicules électriques en Région de Bruxelles Capitale.....	22
II.3.2.1 Choix des bornes de recharge.....	22
II.3.2.2 Présentation des différents scénarios	24
II.3.2.3 Réseau de stations de location automatique de véhicules électriques ...	25
II.3.2.4 Remplacement de x% des véhicules de flottes captives d'entreprises publiques ou privées	26
II.3.2.5 Restriction d'accès aux véhicules traditionnels en faveur des transports publics à zéro émission et des véhicules électriques	28
II.3.2.6 Réseau de centres de distribution de marchandises	29
II.3.2.6.a Cas des marchandises provenant de la route	30
II.3.2.6.b Cas des marchandises provenant de la voie fluviale ou du rail	32
II.3.2.7 Synthèse des coûts relatifs aux différents scénarios envisagés.....	33
II.3.2.8 Scénario général	35
II.4 Obstacles à une éventuelle production en série des véhicules électriques	38
II.4.1 Manque de motivation pour la promotion et la vente de véhicules électriques	38
II.4.2 Emploi.....	39
II.4.3 Spécificité des producteurs automobiles	39
II.4.4 Changements technologiques	39
II.4.5 Conclusion.....	40
Chapitre III: Analyse des aspects environnementaux	41
III.1 Introduction	41
III.2 Evolution des émissions du trafic routier en Région de Bruxelles-Capitale	41
III.3 Comparaison des véhicules électriques et hybrides avec leurs homologues thermiques	43
III.4 Effets environnementaux de l'introduction de véhicules électriques et hybrides dans le contexte bruxellois	44
III.5 Evaluation des dommages associés à la pollution photochimique	46
III.5.1 Méthodologie générale	46
III.5.2 Principales caractéristiques du modèle METPHOMOD.....	48
III.5.3 Etablissement des cadastres d'émissions pour la Belgique	48

III.5.4	Quantification des impacts physiques et monétaires.....	49
III.5.4.1	Fonctions exposition-réponse.....	49
III.5.4.2	Quantification des impacts en termes monétaires	50
III.5.5	Analyse de la situation de référence	51
III.5.5.1	Description de l'épisode choisi.....	51
III.5.5.2	Simulations	51
III.5.6	Analyse de scénarios de réduction des émissions de précurseurs.....	54
III.5.6.1	Vers une définition de stratégies de réduction de la pollution photochimique.....	54
III.5.6.2	Définition des scénarios considérés	55
III.5.6.3	Principales sources d'émission.....	56
III.5.6.3.a	Les émissions de NOx.....	56
III.5.6.3.b	Les émissions de COV	57
III.5.6.3.c	Réduction simultanée des émissions de COV et de NOx.....	57
III.5.6.4	Analyse des scénarios	58
III.5.6.4.a	Concentrations horaires maximales	58
III.5.6.4.b	Concentrations moyennes sur 8 heures.....	58
III.5.6.4.c	Concentrations moyennes sur 24 heures	59
III.5.6.4.d	Répartition géographique des effets des scénarios de réduction.....	59
III.5.6.4.e	Analyse comparative des différents scénarios de réduction.....	61
III.5.6.4.f	Dommmages à la santé	63
III.5.6.4.g	Analyse de la situation en Région de Bruxelles-Capitale.....	63
III.5.6.4.h	Conclusions	63
III.5.7	Analyse d'un scénario d'introduction de véhicules électriques	64
Chapitre IV:	Conclusions	67
IV.1	Analyse des aspects économiques	67
IV.2	Analyse des aspects environnementaux	69
IV.2.1	Stratégies générales de lutte contre la pollution photochimique	69
IV.2.2	Effets environnementaux associés à l'introduction véhicules électriques et hybrides en Région de Bruxelles-Capitale.....	69
IV.3	Bilan des aspects économiques et environnementaux.....	70
Références	72
<u>Annexe I</u>	Analyse des aspects économiques : graphiques complémentaires.....	I-1

Chapitre I : Introduction

I.1 Généralités

L'ozone troposphérique est un **polluant dit secondaire**, ce qui signifie que certains gaz, dits gaz précurseurs - eux-mêmes polluants atmosphériques - sont à l'origine de sa formation. Les principaux précurseurs sont: les oxydes d'azote, les composés organiques volatils, le monoxyde de carbone et le méthane.

Les réactions chimiques à l'origine de la formation de l'ozone troposphérique sont extrêmement nombreuses et complexes. D'une façon simplifiée, on peut dire que la formation de l'ozone résulte de la concurrence entre des réactions de formation et de destruction dirigées par les oxydes d'azote et les composés organiques volatils de telle sorte qu'il est difficile d'évaluer la contribution des différents gaz précurseurs d'ozone à la formation d'ozone.

Les dommages associés à l'ozone apparaissent lors d'**épisodes**, caractérisés par un ou plusieurs jours de hautes concentrations en ozone. L'apparition de ces épisodes dépend de facteurs climatiques (ensoleillement, chaleur et vent faible notamment) et des émissions des précurseurs de l'ozone. La concentration de fond, actuellement de l'ordre de 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, augmente à un rythme de 1% par an, tout en subissant des variations journalières et saisonnières. Cette augmentation entraîne des épisodes plus fréquents et plus intenses.

La présence d'ozone dans la troposphère est à l'origine d'**effets** indésirables pour la santé, les végétaux et les matériaux. Une exposition d'une heure à une concentration d'environ 240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ entraîne des effets visibles, principalement une irritation des yeux et du système respiratoire. Les effets d'une exposition chronique pourraient être plus graves et même mortels. Mais comme les épisodes d'ozone se superposent généralement à des périodes de grandes chaleurs, ces deux facteurs cumulent alors leurs effets sur la mortalité. L'ozone a également des effets négatifs sur la croissance des végétaux et peut être ainsi à l'origine de pertes de rentabilité des cultures agricoles et forestières. En outre, l'ozone fait également fonction de gaz à effet de serre. L'ozone entraîne enfin la dégradation de certains matériaux, comme les plastiques, les textiles, les pigments et les peintures.

Parmi les différentes **sources**, les transports sont de loin les premiers responsables des émissions anthropogènes des précurseurs de l'ozone en Belgique. En zone urbaine, la part des émissions imputables aux transports est particulièrement élevée. En Région de Bruxelles-Capitale, nous avons pu évaluer cette part à près de 75%. Viennent ensuite les activités industrielles avec combustion pour les oxydes d'azote et l'utilisation de solvants pour les composés organiques volatils à l'exclusion du méthane. Enfin, pour le méthane, l'agriculture est le principal secteur émetteur.

I.2 Stratégies de lutte contre la pollution photochimique

La définition de stratégies de lutte contre la pollution photochimique n'est pas simple. En effet, les mesures potentielles à mettre en oeuvre pour réduire la pollution photochimique sont difficiles à évaluer compte tenu de la complexité des réactions chimiques qui interviennent. La non-linéarité des phénomènes conduisant à la formation de l'ozone fait qu'il ne suffit généralement pas de réduire les émissions de précurseurs à un endroit pour y induire une diminution des concentrations d'ozone. En effet, le NO, principal polluant responsable de la destruction de l'ozone, appartient également au groupe des polluants incriminés dans les mécanismes de formation d'ozone. Les mesures de réduction des émissions d'oxydes d'azote influencent donc aussi bien le mécanisme de formation que de destruction d'ozone. Ainsi donc, en imposant des limitations temporaires de la circulation (et donc en agissant à la fois sur les émissions d'oxydes d'azote et de composés organiques

volatils) à partir d'une certaine concentration d'ozone, on peut très bien atteindre un effet inverse de celui attendu.

Les **mesures mises en oeuvre** pour le contrôle de la pollution photochimique sont souvent correctives et portent sur le court terme: elles consistent en une diminution des pics de pollution par une limitation drastique du trafic dans les zones urbaines. Les mesures de long terme sont actuellement encore faiblement développées.

Dans le cadre général de la définition de **mesures en faveur d'une mobilité durable**, différentes mesures sont envisageables :

- ✓ **Mesures « technologiques »** visant à l'amélioration des paramètres d'émission du parc de véhicules circulant en introduisant de nouvelles technologies de véhicules (GPL ou électriques, par exemple), en encourageant le remplacement des véhicules les plus anciens ou en introduisant des carburants plus propres;
- ✓ **Mesures encourageant le transfert modal** vers des modes plus propres (transport en commun, vélo ou marche à pied);
- ✓ **Mesures réduisant la demande de transport** en agissant à long terme sur les options en matière d'aménagement du territoire, en développant le télétravail ou en limitant le trafic de certaines catégories de véhicules (transport de marchandises par exemple).

Parmi ces différentes mesures, en ce qui concerne spécifiquement la lutte contre la pollution photochimique à long terme, la promotion des véhicules électriques et hybrides qui n'émettent que très peu ou pas de polluants précurseurs d'ozone constitue une solution préventive potentielle.

D'un point de vue politique, ce type de mesure s'inscrit dans le cadre du contrôle et de la réduction de la pollution photochimique défini notamment par le Plan Fédéral de développement durable 2000-2004 et plus particulièrement dans son volet « politique de promotion d'une mobilité compatible avec un développement durable ». Ce plan précise notamment que : « 469. ...la réduction des émissions par km parcouru doit être atteinte, notamment par le soutien à des recherches visant des formes de traction plus économiques pour les véhicules comme celles concernant les véhicules hybrides et autres véhicules électriques... ».

I.3 Principaux objectifs

L'objectif principal de ce projet est d'éclairer la définition de stratégies de lutte contre la pollution photochimique, en analysant spécifiquement une mesure de type technologique consistant en l'introduction de véhicules électriques ou hybrides dans la Région de Bruxelles-Capitale.

En termes d'objectifs secondaires, l'analyse menée visait également à développer un outil d'évaluation suffisamment fiable pour pouvoir analyser le phénomène de pollution photochimique et évaluer les effets potentiels de différentes stratégies de réductions des émissions de précurseurs. Un accent particulier a donc été porté aux développements méthodologiques nécessaires pour aborder sérieusement cette problématique. Dans ce but, les outils à mettre en oeuvre sont en effet relativement lourds et les données requises très nombreuses.

Les objectifs détaillés de l'analyse menée dans le cadre de ce projet peuvent donc se résumer comme suit:

- Développer un outil d'aide à la décision susceptible d'aider les décideurs en termes de lutte contre la pollution photochimique;
- Analyser de façon approfondie une mesure spécifique de réduction des émissions des précurseurs d'ozone troposphérique dans le secteur des transports;
- Mettre en balance les coûts et les bénéfices environnementaux (pollution par l'ozone) potentiels liés à l'introduction de véhicules électriques en Région de Bruxelles-Capitale.

- Analyser de façon plus générale les stratégies de réductions des précurseurs d'ozone troposphérique à l'aide d'un modèle de pollution photochimique.

I.4 Organisation du rapport

L'étude menée se développe en deux volets : un volet économique et un volet environnemental.

Concernant le **volet économique**, le Chapitre II présente l'analyse détaillée des aspects économiques relatifs à l'introduction de véhicules électriques. Compte tenu des données disponibles au moment de cette étude, seuls les véhicules purement électriques ont pu faire l'objet d'une analyse économique détaillée. Dans le cadre de cette analyse, les coûts d'utilisation propres aux véhicules électriques sont tout d'abord évalués et comparés avec ceux de leurs homologues thermiques. Les coûts de mise en oeuvre de divers scénarios d'intégration de ces véhicules en Région de Bruxelles-Capitale sont ensuite évalués.

Dans le cadre du **volet environnemental** de l'étude présenté au Chapitre III, nous situons dans un premier temps l'apport potentiel des véhicules électriques et hybrides dans le contexte général de l'évolution des émissions du trafic routier en Région de Bruxelles-Capitale depuis 10 ans. Dans ce but, les émissions des véhicules électriques et hybrides sont tout d'abord comparées à celles de leurs homologues thermiques. Les effets de différents scénarios d'introduction de ces véhicules dans la Région sont ensuite évalués en termes de réduction des émissions de polluants atmosphériques. Dans un second temps, la méthodologie développée pour l'évaluation de la pollution photochimique et son application pour l'évaluation de différentes stratégies générales de réduction sont présentées. Les effets potentiels de l'introduction de véhicules électriques dans la Région sont également évalués.

Les conclusions de la recherche sont finalement présentées au Chapitre IV.

Chapitre II : Analyse des aspects économiques

II.1 Objectifs

Ce chapitre a pour objectif d'effectuer un bilan économique relatif à l'utilisation des véhicules électriques au sein de la Région de Bruxelles Capitale.

Un premier volet s'intéresse donc aux coûts d'utilisation propres aux véhicules électriques. Ces coûts d'utilisation, exprimés en termes de coûts fixes et de coûts variables, font l'objet d'une comparaison avec ceux relatifs aux véhicules traditionnels essence et diesel. Il est également tenu compte dans cette partie de l'influence du parcours annuel moyen effectué par les véhicules ainsi que de l'influence de la durée d'amortissement. De plus, un scénario à l'horizon 2010 est envisagé. Ce scénario tient compte de l'évolution du prix de l'électricité (compte tenu de la libéralisation des marchés de l'énergie) ainsi que de l'évolution du prix des carburants. Pour finir, différentes mesures politiques incitatives en faveur du véhicule électrique sont également analysées dans cette partie.

Un deuxième volet traite des coûts de mise en œuvre de divers scénarios de flottes captives de véhicules électriques en Région de Bruxelles-Capitale et consiste, entre autres, en la mise en place d'un système de location de véhicules électriques au sein de la ville. Ces scénarios ont été définis par l'équipe du Professeur Maggetto de la VUB.

Pour finir, un bref aperçu des obstacles empêchant la production en série des véhicules électriques est présenté.

II.2 Méthodologie

II.2.1 Choix des véhicules

Parmi les véhicules répertoriés lors de l'actualisation portant sur l'état des connaissances et du développement en matière de propulsions électriques et hybrides, seuls les véhicules disponibles sur le marché belge ont été étudiés. Il s'agit essentiellement des véhicules utilitaires électriques commercialisés par *Peugeot et Citroën* (Partner et Berlingo) et des voitures particulières électriques (106 et Saxo) de ces mêmes concessionnaires. Renault et Volkswagen ont également mis au point des versions électriques mais se tournent plus volontiers vers d'autres pistes telles que les piles à combustibles. Ainsi, aucun système de location de batteries n'est envisagé actuellement par ces deux concessionnaires, à l'instar de chez Peugeot et Citroën.

Nous avons néanmoins retenu pour notre étude les véhicules de la marque Peugeot puisque c'est justement la première à avoir proposé ce type de contrat de location.

II.2.2 Détermination des fonctions de coûts

Cette étape tient compte des lignes directrices¹ proposées par une équipe de « AEA Technology » avec la contribution notamment du CITEPA et du NILU et ce, à la demande de l'Agence Européenne de l'Environnement.

Les fonctions de coûts relatives aux deux types de motorisation (électrique et traditionnelle) distinguent deux catégories de coûts : les coûts fixes et les coûts variables. Les premiers, à l'inverse des coûts variables, ne dépendent pas du nombre de kilomètres effectués par le véhicule.

¹ « Guidelines for defining and documenting data on costs of possible environmental protection measures »

Les coûts sont évalués en *prix constants de 1998* et sont exprimés en euro (EUR). Les coûts d'investissement sont annualisés par le biais du facteur d'annuité défini à partir du taux d'intérêt :

$$C = \frac{C_0 * r * (1+r)^n}{(1+r)^n - 1}$$

avec: C= coût d'investissement annualisé ;
 C₀= coût réel de l'investissement ;
 n= durée d'amortissement du véhicule avant revente ;
 r= taux d'intérêt (9%).

II.2.2.1 Coûts fixes

II.2.2.1.a Investissement

Les coûts d'investissement couvrent, tant pour la Peugeot 106 que pour la Peugeot Partner, le prix d'achat et de revente du véhicule.

Un achat du véhicule au comptant a été retenu. En effet, de nombreuses administrations disposant d'un certain budget à affecter à l'achat de véhicules, choisissent la solution d'un achat au comptant.

Il est à préciser que depuis quelques années, Peugeot a mis en place un système d'abonnement appelé « Service Batterie ». Grâce à ce système, le prix élevé de la batterie Nickel-Cadmium (plus de 8 600 EUR) n'est plus supporté lors de l'achat. Cet abonnement mensuel (112 EUR, TVAC) couvre :

- la location, l'entretien, la maintenance et l'assurance de la batterie ;
- l'entretien et la maintenance du moteur et du contrôle électronique ;
- la mise à disposition d'un véhicule de remplacement, même en cas d'entretien.

II.2.2.1.b Taxes

Ce poste comprend la taxe de mise en circulation et la taxe de roulage. La taxe de mise en circulation appliquée aux voitures électriques est équivalente à celle appliquée aux voitures traditionnelles. Son montant est de 60 EUR². Quant à la taxe annuelle de roulage, elle est fixée au montant appliqué pour les véhicules traditionnels de 4 chevaux fiscaux (CV) (55 EUR) qui est le montant minimum. Ce choix est guidé par le fait que le véhicule électrique est beaucoup moins puissant que les véhicules à combustion interne. Une formule a également été établie pour déterminer la puissance imposable aux véhicules mus par l'électricité³.

Quant aux véhicules utilitaires, qu'ils soient thermiques ou électriques, ils bénéficient d'une exonération de la taxe de mise en circulation. Cela ne veut pas dire qu'ils échappent à toute taxation de la part de l'Etat ! La perception de l'impôt s'effectue d'une manière différente en ce sens que le montant de la taxe est déterminé par le poids à vide du véhicule. Plus celui-ci est lourd, plus le montant que le propriétaire devra acquitter sera élevé. A la suite de ce paiement, une marque fiscale dénommée « vignette » est délivrée par le Ministère des Finances, à charge pour le propriétaire de l'apposer sur le pare-brise du véhicule.

² Montant appliqué aux voitures allant jusqu'à 8CV et ou jusqu'à 70kW.

³ $P=0.0012 * n * E * I$ avec P la puissance imposable, n le nombre d'éléments de la batterie, E la force électromotrice moyenne aux bornes d'un élément (Volts), I l'intensité moyenne du courant (Ampères). En appliquant la formule, on obtient un chiffre inférieur à 4CV.

II.2.2.1.c Assurances

Les frais d'assurance comprennent tant pour les voitures de particulier que pour les véhicules utilitaires, la prime responsabilité civile et une prime omnium⁴ durant les deux premières années.

En ce qui concerne la prime d'assurance, nous avons considéré ici un prix fixe correspondant au degré de Bonus-Malus 11, sans diminution ni augmentation de celui-ci au fil des années. La variation de ce degré étant subordonnée principalement au fait d'avoir un accident de la route ou pas et cette considération étant aléatoire, nous nous en tiendrons donc au versement d'une prime annuelle identique. En outre, si l'on fait varier le montant de la prime en fonction d'un quelconque paramètre, elle variera de la même manière pour tous les véhicules concernés ; ce qui n'affectera en rien les conclusions de l'étude comparative.

II.2.2.2 Coûts variables

II.2.2.2.a Entretien

Pour la Peugeot 106 et Partner électriques, les frais d'entretien et de maintenance du véhicule et de la batterie sont, comme nous l'avons déjà mentionné, inclus dans l'abonnement « Service Batterie ».

En ce qui concerne les véhicules thermiques, les coûts d'entretien s'élèvent à 0,03 EUR/ km dans le cas de la Peugeot 106 et à 0,04 EUR/ km dans le cas de la Peugeot Partner.

Le poste entretien comprend également le remplacement des pneus. On considère en effet, un remplacement des pneus de devant en moyenne tous les 30.000 km et un remplacement des pneus arrières en moyenne tous les 60.000 km. Il est évident que cette fréquence de remplacement dépend du style de conduite, des conditions atmosphériques, de l'état et le relief des routes, etc...

II.2.2.2.b Consommation énergétique

Les consommations des Peugeot 106 électriques sont en moyenne de 20 kWh/100 km en conditions urbaines tandis que celles de la Peugeot Partner électriques se situent aux alentours de 26 kWh/100 km. Ces chiffres peuvent sensiblement varier selon les conditions de circulation urbaine (trafic fluide, trafic lent, congestion) et selon le comportement du conducteur.

Le véhicule électrique étant le plus souvent utilisé la journée, la recharge de la batterie se fait essentiellement durant la nuit, période creuse correspondant au tarif minimum de l'électricité (0,006 EUR/ kWh).

Les Peugeot 106 essence et diesel consomment respectivement 8,9 l/100 km et 6,9 l/100 km. En ce qui concerne les véhicules utilitaires, les Peugeot Partner essence et diesel consomment respectivement 9,7 l/100 km et 8,6 l/100 km. Nous avons retenu pour notre étude les chiffres de 0,88 EUR/ l pour l'essence (prix de 1998) et de 0,61 EUR/ l pour le diesel (prix de 1998).

II.2.3 Récoltes des données

Afin de caractériser les différents postes énumérés ci-dessus, les informations nécessaires sont essentiellement à caractère économique (prix d'achat des véhicules, assurances RC et omnium, taxe de mise en circulation, taxe de roulage, tarif de l'électricité, de l'essence et du diesel, main d'œuvre, etc...). Nous avons récoltés ces données via le Moniteur Belge de l'Automobile (juin 1998) et en prenant contact notamment avec les divers organismes suivants : les Concessionnaires Peugeot et Citroën, la Smap, le Ministère des Finances et le Ministère des Affaires Economiques. En ce qui concerne l'estimation des coûts liés à la mise en place des scénarios d'introduction de véhicules électriques au sein de la Région de Bruxelles Capitale, les données relatives aux bornes de recharge furent recueillies auprès de EDF (Electricité de France).

⁴ Dégâts matériels, bris de vitres, vol et incendie.

II.3 Application

II.3.1 Coûts d'utilisation des véhicules électriques

II.3.1.1 Conditions d'utilisation

La propulsion électrique, de part ses performances (vitesse, puissance et autonomie) ne peut actuellement être envisagée que dans un *cadre urbain* pour répondre aux besoins de déplacement de diverses flottes captives. On considère également une durée d'amortissement du véhicule de *7 ans* à raison d'un kilométrage annuel moyen de *10.000 km*.

II.3.1.2 Scénarios de revente du véhicule électrique

Le problème de la revente du véhicule électrique est complexe étant donné le manque d'expérience dans ce domaine (la commercialisation des véhicules étudiés est assez récente) et l'étroitesse du marché de ce type de véhicule. Trois scénarios peuvent être considérés :

- Scénario 1 : le véhicule électrique n'est pas revendu faute d'une ouverture de marché ;
- Scénario 2 : le véhicule électrique est revendu au même prix que son homologue essence du même âge ;
- Scénario 3 : le véhicule électrique est revendu selon le même taux de dévaluation que son homologue essence du même âge.

Le premier scénario de revente est assez pessimiste puisqu'on considère, étant donné la faible demande associée à ce type de propulsion, que le véhicule électrique à l'âge de 7 ans ne pourra plus être revendu. La deuxième hypothèse qui consiste à revendre le véhicule électrique au même prix que le véhicule essence du même âge nous semble actuellement plus probable et constituerait, sachant que les frais d'utilisation d'un véhicule électrique sont moindres que ceux d'un même véhicule essence, une alternative propre à éveiller l'intérêt pour la traction électrique. Quant au troisième scénario, il serait plus approprié dans le cas où il y aurait une demande plus soutenue de la part du public.

II.3.1.3 Comparaison des véhicules électriques avec leurs homologues essence et diesel

Malgré les quelques exemples d'introduction de véhicules électriques en Belgique⁵, force est de constater que le marché de ce type de propulsion n'est encore que marginal. En effet, le prix d'achat élevé des véhicules suffit à lui seul à décourager toute bonne volonté désireuse de contribuer à l'amélioration du cadre de vie dans lequel nous vivons. Ainsi, différentes mesures fiscales ou réglementaires pourraient être envisagées en faveur du développement du véhicule électrique.

Afin d'étudier l'opportunité de telles actions, une analyse comparative du coût au kilomètre généré par le véhicule électrique et ses homologues thermiques a été effectuée. Nous avons mené une telle étude en comparant dans un premier temps les voitures particulières de chez Peugeot et dans un second temps, les véhicules utilitaires de la même marque.

Le coût au kilomètre supporté par chacun des propriétaires des véhicules mentionnés ci-dessus a été déterminé dans le cadre de la politique de vente actuelle de Peugeot, c'est à dire sur base du contrat d'abonnement « Service Batterie ».

Nous avons également basé notre jugement sur les hypothèses générales et conditions d'utilisation développées précédemment.

⁵ Différentes villes telles que Bruges, Anvers, Courtrai, Namur, Mons ainsi que la commune de Woluwé-St-Lambert, font partie du réseau CITELEC

II.3.1.3.a Voitures particulières

La comparaison du coût au kilomètre lié à l'achat et l'utilisation de la Peugeot 106 électrique avec les coûts propres aux Peugeot 106 essence et diesel se traduit comme suit :

EUR/km	106 essence	106 diesel	106 électrique scénario 1	106 électrique scénario 2	106 électrique scénario 3
Investissement	0,152	0,169	0,325	0,285	0,257
location batterie			0,124	0,124	0,124
Assurance	0,059	0,058	0,041	0,041	0,041
Taxes	0,011	0,024	0,006	0,006	0,006
total coûts fixes	0,222	0,251	0,457	0,497	0,429
frais d'entretien	0,026	0,026	0	0	0
Consommation	0,078	0,042	0,012	0,012	0,012
total coûts variables	0,104	0,068	0,012	0,012	0,012
Coûts totaux	0,325	0,319	0,509	0,469	0,441

Sources : Moniteur Belge de l'Automobile (juin 1998), Smap, Ministère des Finances, PSA Peugeot-Citroën France, Peugeot Nivelles, Ministère des Affaires Economiques : département Energie, VUB-CITELEC.

Tableau 1 : Comparaison des coûts d'utilisation des voitures électriques, essence et diesel.

Coûts fixes

Les trois scénarios de revente ont une influence sur les coûts d'investissement puisque ceux-ci, en plus de couvrir le prix d'achat couvrent également la revente du véhicule. Pour rappel, le scénario 1 n'envisage aucune revente du véhicule électrique, le scénario 2 envisage une revente du véhicule électrique au même prix que son homologue essence du même âge et le scénario 3 envisage la revente du véhicule selon le même taux de dévaluation que son homologue essence du même âge. Les autres postes ne sont pas affectés par ces trois scénarios. La différence entre les trois coûts totaux concernant la 106 électrique témoignent donc des alternatives différentes envisagées au sujet de la revente du véhicule. Revendre le véhicule au même taux que son homologue essence du même âge contribue à diminuer le coût de près de 10% par rapport au premier scénario pessimiste.

Si l'on compare la Peugeot 106 dans le cadre du scénario intermédiaire à ses homologues thermiques, nous voyons qu'elle est à l'origine d'un surcoût de plus de 40%. Ce surcoût est principalement dû au prix d'achat élevé du véhicule électrique (70% plus cher que son homologue essence et 52% plus cher que son homologue diesel) mais également au prix des batteries qui se répercute dans le montant de l'abonnement.

Le véhicule électrique est moins puissant que ses homologues. C'est souvent un des arguments avancés pour mettre en évidence les lacunes de ce type de propulsion. Il ne faut cependant pas oublier que nous considérons une utilisation urbaine du véhicule. La puissance, tout comme l'autonomie, n'est donc guère un frein à l'usage du véhicule électrique en ville. D'autant plus que nous pouvons constater que, « grâce » à cette plus faible puissance, les frais d'assurance et la taxe de roulage sont réduits.

Coûts variables

Les frais d'entretien des véhicules thermiques ont été déterminés sur base d'un contrat mis en place par Peugeot visant des véhicules appartenant à différentes administrations et entreprises. Ce contrat dépend du parcours annuel moyen et de la durée d'utilisation du véhicule considéré. Il a également été tenu compte de l'usure et donc du remplacement des pneus⁶ puisque les frais qui en découlent ne sont pas inclus dans le contrat ci-dessus. Nous obtenons pour les deux voitures thermiques, dans les conditions d'utilisation considérées plus haut, des frais d'entretien d'un peu plus 0,025 EUR par kilomètre parcouru. En comparaison avec la voiture électrique, ceux-ci sont près de trois fois plus élevés! En effet, dans les mêmes conditions, pour la Peugeot 106 électrique, leur évaluation a été estimée à 0,008 EUR/km. Ceci est dû, notamment, à une moindre usure des pièces, à l'absence de vidange d'huile, etc...

⁶ Remplacement des pneus de devant en moyenne tous les 30 000 km et d'un remplacement des pneus arrière en moyenne tous les 60 000 km. Il est évident que cette fréquence de remplacement dépend du style de conduite, des conditions atmosphériques, de l'état et le relief des routes, etc...

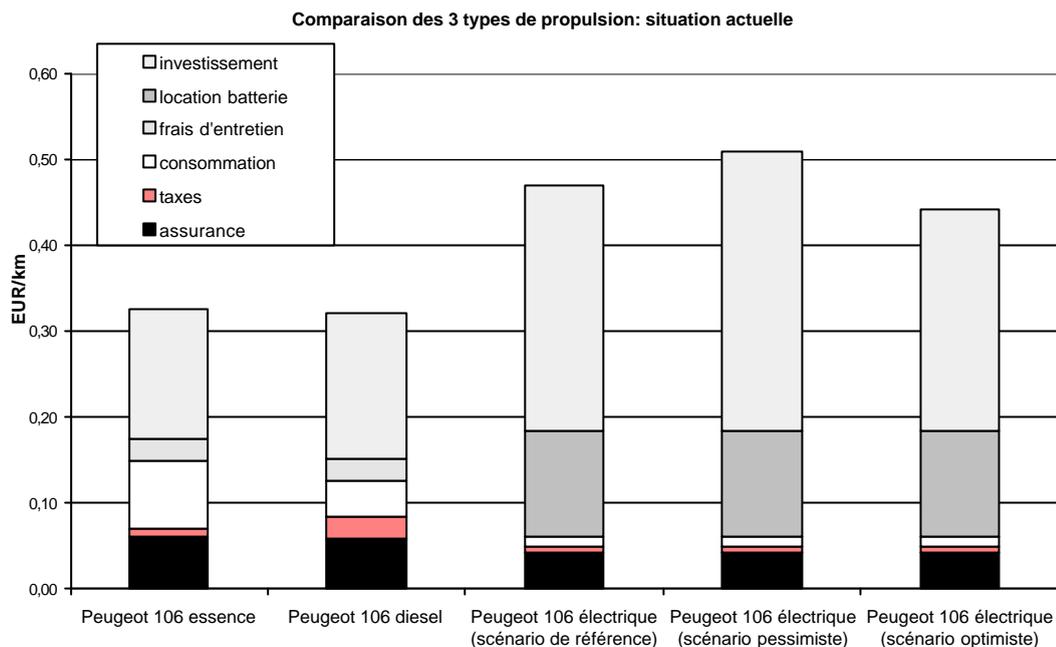


Figure 1 : Coût au kilomètre des voitures particulières Peugeot 106 électrique, essence et diesel (durée d'amortissement : 7 ans et parcours moyen annuel : 10.000 km).

Les frais de consommation, dans l'état actuel, sont tout à l'avantage des véhicules électriques. Cela s'explique par le fait que leur source énergétique est moins taxée que les carburants routiers. Ces frais sont respectivement près de 4 à 7 fois moins importants que ceux des versions diesel et essence.

Nous avons scindé les frais liés à l'abonnement « Service Batterie » afin de pouvoir visualiser la part incombant à l'entretien du véhicule.

Sans compter l'importance des coûts d'investissement et des frais de location de la batterie, le véhicule électrique se révèle économiquement plus intéressant que ses deux homologues. Les deux postes défavorables à la propulsion électrique sont principalement le reflet de l'inexistence d'une production massive du véhicule et de sa batterie.

II.3.1.3.a Véhicules utilitaires

Les coûts d'investissement sont plus importants pour la traction électrique mais dans une moindre mesure que ce que l'on observe dans le cas des voitures particulières. Ceci s'explique par le fait que la version électrique de la Peugeot Partner est moins chère que la 106 électrique, tandis que l'inverse est de mise pour les versions thermiques.

Concernant les autres postes, à l'exception de celui des taxes, les différences observées précédemment entre trois types de voitures sont également du même ordre de grandeur pour les véhicules utilitaires.

Nous avons constaté précédemment que, étant déterminées sur base de la puissance fiscale de la voiture, les taxes de roulage propres à la traction électrique étaient moins importantes que celles des voitures traditionnelles. Par contre, la taxe imposée à tout véhicule utilitaire est fonction cette fois, non plus de la puissance fiscale mais du poids à vide du véhicule ; ce qui n'est pas à l'avantage du véhicule électrique puisque, possédant à son bord une batterie de 350 kg, il est plus lourd que ses homologues thermiques !

Il est à noter que la Belgique pourrait prévoir une réduction de taxe de roulage pour les véhicules alimentés par l'électricité, si ces véhicules n'utilisent pas de produits d'origine étrangère. Une telle prérogative n'a jusqu'à aujourd'hui pas encore été appliquée à l'inverse d'autres pays de la Communauté Européenne. Citons par exemple la Grande-Bretagne où le poids du réservoir d'énergie n'est pas pris en compte.

Les montants des taxes ou « vignettes fiscales » ont été communiqués par le Ministre des finances. Rappelons que tous les utilitaires sont exonérés de la taxe de mise en circulation.

Les coûts au kilomètre propres aux trois Peugeot Partner étudiées sont illustrés ci-dessous :

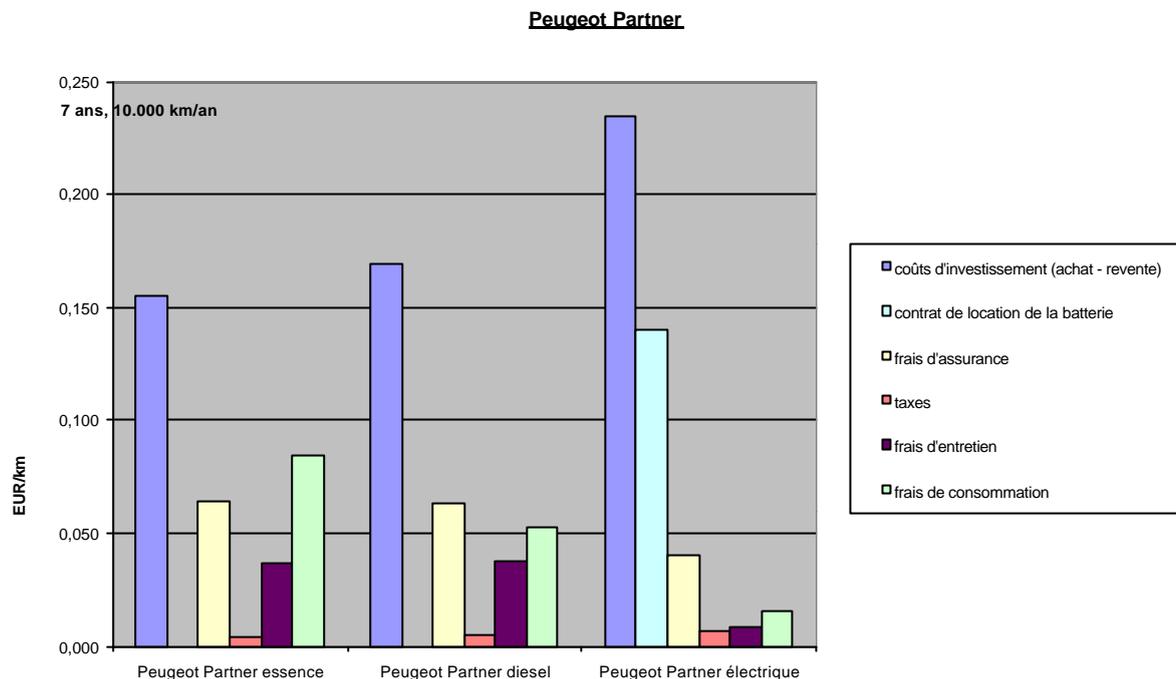


Figure 2 : Coût au kilomètre des véhicules utilitaires Peugeot Partner électrique, essence et diesel (durée d'amortissement : 7 ans et parcours moyen annuel : 10.000 km).

L'allure de cet histogramme est presque similaire (hormis les taxes) à celle obtenue précédemment pour les voitures particulières :

- Les frais d'assurance, de consommation et d'entretien⁷ sont bien plus avantageux pour le véhicule électrique que pour les véhicules utilitaires traditionnels ;
- Bien qu'ils n'incluent pas le prix d'achat élevé de la batterie, les coûts d'investissement sont en défaveur du véhicule électrique.

II.3.1.4 Influence du parcours annuel moyen

Jusqu'à présent, nous nous sommes basés sur un parcours annuel moyen de 10 000 kilomètres. Cependant, certaines flottes de véhicules peuvent être utilisées de façon plus intensive ou au contraire, faire l'objet d'une sollicitation moins importante. Tout dépend bien évidemment du type d'activités professionnelles développées au sein de l'entreprise publique ou de l'administration considérée. Par ailleurs, la fréquence de renouvellement du parc de véhicules peut varier selon l'acquéreur.

Ainsi, si l'on considère le scénario de revente le plus réaliste, c'est à dire celui pour lequel le véhicule électrique est revendu au même prix que son homologue essence, nous pouvons analyser l'influence du parcours urbain.

Le résultat pour les voitures particulières peut être visualisé grâce à la figure 3. Vous trouverez également en annexe le graphique A1 reprenant le même type de résultat mais pour les véhicules utilitaires.

⁷ Les frais inclus dans l'abonnement « Service Batterie » et déterminés sur base du schéma d'entretien de la Peugeot Partner électrique.

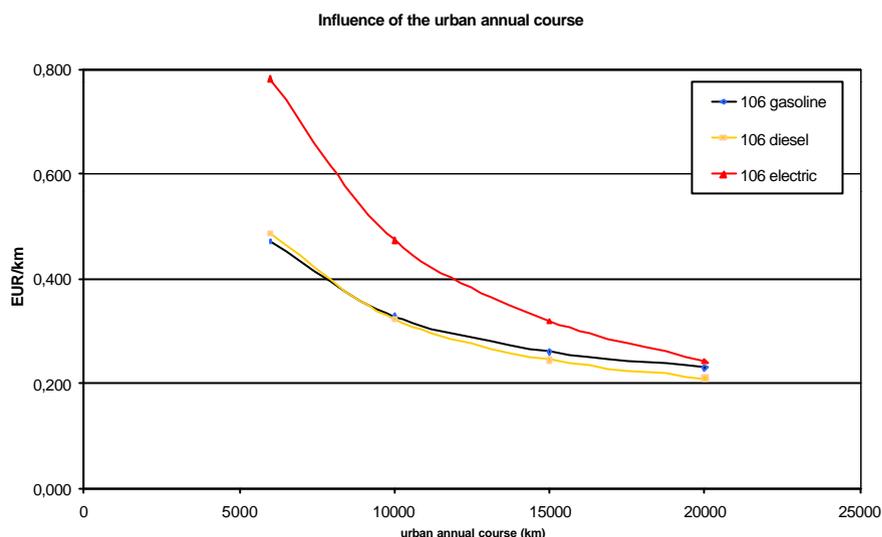


Figure 3: Influence du parcours annuel moyen sur le coût au kilomètre de la Peugeot 106 (durée d'amortissement fixée à 7 ans).

Nous observons au regard de ces deux graphiques que, au fur et à mesure que le nombre de kilomètres effectués durant une année augmente, la solution électrique se rapproche des deux autres. Ainsi, à partir de 17 000 km par an, elle n'a pas tout à fait rejoint son homologue essence, son surcoût par rapport à cette dernière n'est plus que de 16% (contre 41% pour un parcours annuel de 10 000 km).

L'explication de cette tendance est simple. En effet, l'entretien du véhicule électrique est compris dans l'abonnement « Service Batterie » et on sait que le montant de ce dernier ne dépend aucunement du nombre de kilomètres effectués. Par conséquent, le coût au kilomètre sera de plus en plus faible à mesure que le parcours effectué sera long. Par contre, dans le cas des solutions thermiques, plus le véhicule est utilisé, plus les frais d'entretien sont importants.

II.3.1.5 Influence de la durée d'amortissement

Nous considérons ici des durées d'amortissement allant de 4 à 11 ans et un parcours annuel fixé à 10.000 km.

Rappelons qu'il est tenu compte de la revente de chacun des véhicules, qu'ils soient électriques, essence ou diesel. Ici encore, nous avons fait l'hypothèse que le véhicule électrique est revendu au prix de son homologue essence du même âge. Nous avons extrapolés les valeurs résiduelles (allant d'automobiles âgées de 1 à 7 ans) dont nous disposons⁸ afin de déterminer celles applicables aux véhicules âgés de 7 à 11 ans. Les valeurs résiduelles des véhicules sur lesquelles nous nous sommes basés sont repris dans le tableau ci-dessous .

âge (an)	Valeur résiduelle (%) ⁹
4	36
5	30
6	25
7	21
8	17
9	14
10	12
11	10

Tableau 2 : Valeurs résiduelles des véhicules thermiques.

⁸ S.A. Eurotax Belgium, juin 1998.

⁹ Exprimé par rapport à la valeur initiale du véhicule.

Les résultats pour les voitures particulières peuvent être visualisés grâce à la figure 4. Vous trouverez également en annexe le graphique A2 reprenant le même type de résultats mais pour les véhicules utilitaires.

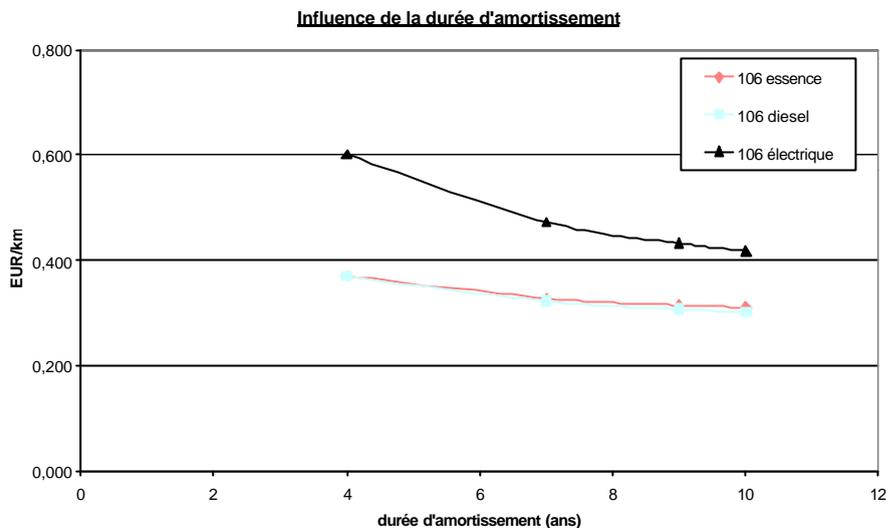


Figure 4 : Influence de la durée d'amortissement sur le coût au kilomètre : cas de la Peugeot 106 (parcours annuel moyen : 10.000 km).

Nous constatons donc que plus la durée d'amortissement est importante, plus le véhicule électrique se rapproche de ses homologues thermiques en termes de coût au kilomètre. Ainsi pour une durée d'amortissement de 10 ans, la différence au niveau du coût annuel au kilomètre n'est plus que de 0,1 EUR entre les véhicules électriques et thermiques.

II.3.1.6 Mesures politiques incitatives en faveur du véhicule électrique

Outre une réduction importante du prix d'achat, d'autres mesures incitatives devraient être mises en place en vue d'encourager l'introduction du véhicule électrique au sein de la Région de Bruxelles Capitale. Il est dès lors du ressort des pouvoirs publics d'essayer de favoriser le changement. Le développement de ce type de propulsion dépend en effet des mesures réglementaires et fiscales (mesures d'encouragement) que pourront prendre les gouvernements et pouvoirs locaux.

Le but de ces différentes mesures serait avant tout d'encourager l'utilisation du véhicule électrique et de décourager l'usage des véhicules traditionnels en plein centre ville. Ces mesures devraient également avoir comme objectif d'encourager l'usage des transports publics à partir du moment où l'on cherche à développer une complémentarité entre véhicule électrique et ces derniers.

Deux types d'instrument peuvent alors être développés. Le premier est du type « commande et contrôle » et le second est du type économique. Le premier type d'instrument a recouru à la réglementation et à la surveillance de son respect, tandis que le second est fondé sur l'incitation économique. La logique consiste en effet à induire des modifications de comportement au moyen d'une modification des prix relatifs et absolus et/ou de transferts financiers.

En ce qui concerne le premier type d'instrument, seule la création de zones du centre-ville interdites aux véhicules thermiques, peut être reprise dans cette rubrique. Par contre, plusieurs instruments économiques existent. Le Tableau 3 reprend de manière synthétique, les différents incitants ayant déjà été utilisés dans d'autres pays.

Ainsi, si l'on fait l'inventaire des différentes mesures qui ont déjà été mises en place à l'étranger, on constate que la mesure la plus souvent appliquée est celle de la subvention à l'achat, arrive ensuite des mesures de type fiscal. Malgré la similitude des mesures prises dans différents pays, des divergences peuvent toutefois exister. Ainsi, des différences au

niveau des taux de taxation ou même de la détermination de la base taxable peuvent survenir entre pays.

France	Mesure de promotion à l'achat de VE introduite par les collectivités locales. Les subventions accordées par l'Etat français pour l'achat de VE par les municipalités est fonction de la charge utile du véhicule. Ainsi, pour une charge utile inférieure à 300kg le montant versé est de 5 000 FF, pour une charge utile comprise entre 300kg et 600kg ce montant est de 15 000 FF, tandis que pour une charge utile supérieure à 600kg il est de 25 000 FF.
Allemagne	Subvention à l'achat de VE au niveau des länders et des municipalités.
Italie	Certaines municipalités appliquent ou étudient des règlements portant sur la création de zones du centre-ville interdites aux véhicules thermiques.
Japon	Subvention à la démonstration et à l'achat de VE. De plus, pour encourager l'acquisition ainsi que l'usage de VE, la TVA, la taxe à l'achat et la redevance annuelle applicable aux VE sont fixées plus bas que pour les véhicules thermiques.
Suède	<ul style="list-style-type: none"> • Subventions accordées par le gouvernement et les compagnies d'électricité aux acquéreurs de VE ; • Redevance réduite de stationnement dans les parkings publics ; • Création de zones interdites aux véhicules non électriques ; • Réduction de la taxe à l'achat et des redevances de route ; • Prime d'assurance favorable pour les VE.
Royaume-Uni	Exemption de la redevance annuelle (£100 en moyenne pour une voiture privée).

Tableau 3 : Mesures incitatives en faveur des véhicules électriques.

Une autre mesure qui n'a pas encore été envisagée pourrait être la réduction de la TVA octroyée à l'achat d'un véhicule électrique. L'avantage de ce type de mesure, de même que la subvention à l'achat, est qu'il peut influencer directement la décision d'achat. Etant donné que cette taxe doit être payée directement au moment de l'achat, l'acheteur en tiendra compte, ce qui n'est pas nécessairement le cas pour la taxe de mise en circulation. En effet, la plupart des gens réfléchissent surtout à court terme et s'inquiètent moins des dépenses qui pourraient survenir dans l'avenir. Une proposition concrète serait d'appliquer aux véhicules électriques le taux de TVA le plus bas (6%), voire même de leur attribuer un taux nul.

Outre ces différentes mesures, nous pourrions également envisager que dans le cas du scénario des centres de location de véhicules électriques, des tickets de transport public soient octroyés gratuitement ou à prix réduit après avoir fait usage du système de location.

II.3.1.6.a Cas particulier de la Belgique : Proposition de Loi de 1996¹⁰

En juillet 1996, une Proposition de Loi « visant à favoriser l'utilisation de véhicules propulsés grâce à l'énergie électrique » a été introduite. Cette même proposition fut réintroduite en novembre 1999. Les mesures incitatives proposées semblent intéressantes, c'est pourquoi nous en analysons ici les effets.

Ces actions proviendraient de deux sources de décision, l'une régionale l'autre fédérale. Les villes et communes connaissent en effet bien les problèmes de pollution atmosphérique propres à leurs circonscriptions et c'est dans ce sens qu'elles pourraient agir en favorisant l'intégration. L'Etat fédéral quant à lui, est seul compétent en matière de taxe de roulage, c'est donc à lui qu'incombe la responsabilité d'introduire dans sa politique fiscale nationale la nouvelle donne qui constituerait la pénétration du véhicule électrique dans le parc automobile belge.

Cette Proposition de Loi vise d'une part à supprimer la taxe de mise en circulation (Art 3 de la proposition) et d'autre part, à accorder une prime substantielle de 3 720 EUR pour les véhicules électriques (voitures, camionnettes, minibus, camions), prime qui serait versée par l'Etat Fédéral (Art. 2). Ces mesures ont été proposées dans le but de « donner une impulsion

¹⁰ 635/1-95/96 et S.Kalisz.

favorisant l'achat de véhicules électriques, en compensant le prix plus élevé par rapport à leurs homologues utilisant des carburants traditionnels ».

Nous avons voulu appliquer cette proposition dans le cadre de cette étude pour voir l'efficacité de telles mesures incitatives. Parmi les trois scénarios de revente envisagés plus haut, nous avons choisi le deuxième qui nous paraît être actuellement le plus réaliste. Nous obtenons les résultats suivants :

EUR/km	106 essence	106 diesel	106 électrique scénario 2	106 électrique scénario 2 Proposition de loi
investissement	0,156	0,169	0,285	0,212
location batterie			0,124	0,124
assurance	0,059	0,058	0,041	0,041
taxes	0,011	0,024	0,006	0,006
total coûts fixes	0,226	0,251	0,497	0,383
frais d'entretien	0,026	0,026	0	0
consommation	0,078	0,042	0,012	0,012
total coûts variables	0,104	0,068	0,012	0,012
coûts totaux	0,329	0,319	0,469	0,395

Tableau 4 : Influence de l'application de la Proposition de Loi « visant à favoriser l'utilisation de véhicules propulsés grâce à l'énergie électrique », cas des véhicules particuliers.

L'intérêt de cette mesure considérée semble manifeste au vu de ce tableau. En effet, si cette proposition était appliquée, elle contribuerait à diminuer le coût supporté par le propriétaire de la voiture électrique de près de 15%. De cette façon, le surcoût de la voiture électrique passerait de 41% à 23% par rapport à la voiture essence et de 46% à 27% par rapport à l'homologue diesel.

En ce qui concerne les véhicules électriques utilitaires, vous trouverez en annexe le tableau A3 reprenant les mêmes résultats que pour les véhicules particuliers.

Le véhicule utilitaire étant déjà exonéré de la taxe de mise en circulation, la Proposition de Loi se résume à accorder une prime à l'achat de 3 720 EUR. Si elle était d'application, cette mesure contribuerait à elle seule à réduire fortement, au bénéfice de l'acquéreur, le désavantage économique actuel du véhicule électrique.

II.3.1.7 Perspective à l'horizon 2010

II.3.1.7.a Estimation de l'évolution du prix du pétrole

La présente section a pour but d'analyser l'évolution possible du prix du pétrole afin d'en déduire la potentielle évolution des prix du carburants.

Prévoir l'évolution du prix du pétrole constitue un exercice difficile. La principale raison en est que le prix du pétrole, à un moment donné, ne découle pas uniquement de ce qu'on appelle les « fondamentaux »; à savoir le volume de l'offre et de la demande, les stocks, les capacités utilisées et non utilisées de la production,...D'autres facteurs, qu'aucun expert ne pourrait prévoir à long terme, doivent être pris en considération. Il ne faut, en effet, pas négliger le rôle joué par les politiques et les principaux pays exportateurs et importateurs. Le marché pétrolier n'a en réalité, presque jamais été un marché complètement concurrentiel. Depuis la crise pétrolière de 1973/74, il est essentiellement régi par le rapport de force entre exportateurs et importateurs. Il est également difficile dans ces cas là de prévoir les différentes crises inattendues ainsi que les bouleversements politiques pouvant survenir.

Nous ferons donc ici abstraction de l'aspect politique et ne baserons notre analyse que sur l'évolution possible des fondamentaux.

Nous analyserons donc l'adéquation entre l'offre et la demande future de pétrole au niveau mondial, puisque en effet, de possibles tensions sur l'offre ainsi qu'une hausse de la demande sont à prévoir. D'après les spécialistes, nous allons entrer dans les quelques années qui suivent, dans la phase correspondant au plafond de production de pétrole. Le profil de production mondiale de pétrole serait en effet amené à culminer aux environs de 2012. Les estimations des réserves ultimes récupérables (comprenant le volume de pétrole

recupérable, qu'il soit déjà découvert, produit ou non produit ou encore à découvrir) sont obtenues en pondérant différemment les réserves prouvées, les réserves probables et les réserves possibles. Ainsi, on retrouve souvent la pondération suivante : réserves identifiées = 1 prouvées¹¹ + 2/3 probables¹² + 1/3 possibles¹³.

A côté de cela, la forte croissance économique dans la région Asie-Pacifique est entre autres, un des facteurs qui favorisera l'accroissement de la demande puisque l'on sait que l'augmentation de la consommation d'énergie est significativement corrélée avec le niveau de croissance économique. Il est toutefois important de nuancer cette dernière affirmation. L'utilisation d'énergie par unité de PNB augmente avec le revenu dans des économies à faibles revenus et diminuent pour des économies à hauts revenus. Des analyses montrent en effet, qu'un changement de tendance en ce qui concerne l'intensité d'énergie se déroule ou s'est déjà déroulé en Europe et dans certains pays d'Asie. Il n'en reste pas moins que, même si certains pays d'Asie verront leur consommation diminuer au cours des prochaines années, la demande d'énergie de la région Asie-Pacifique s'accroîtra.

Mais la croissance la plus forte de consommation d'énergie est attendue à l'extérieur du monde des pays industrialisés. Ces derniers consomment à l'heure actuelle plus de 40% d'énergie en plus que les pays en voie de développement. D'ici 2010, cette différence ne devrait être que de 15 % et pour l'horizon 2020, les spécialistes prévoient même que l'utilisation d'énergie dans les pays en voie de développement sera supérieure de quelques pour cent à celle des pays industrialisés.

Offre de pétrole

A titre indicatif, nous présentons ici différents profils de production attendue de pétrole en faisant à chaque fois la distinction entre 3 scénarios relatifs au progrès technique. Ce dernier devrait en effet, grâce à une connaissance plus approfondie des gisements, permettre d'optimiser l'exploitation et surtout d'accroître le taux de récupération¹⁴ du pétrole et donc de modifier les estimations de réserves récupérables qui pourraient être initialement retenues. Trois scénarios sont donc envisagés.

- Scénario A : Scénario où le taux de récupération passerait à 40% en 2010 et à 50% aux alentours de 2050¹⁵.
- Scénario B : Cas où le progrès technique (investissement) serait réalisé avec un retard de 5 ans par rapport au scénario A.
- Scénario C : Cas où le progrès technique (investissement) serait réalisé avec un retard de 10 ans par rapport au scénario A.

Le Modèle

Nous pouvons maintenant confronter l'offre à la demande de pétrole afin d'en évaluer le prix futur. Le modèle est le suivant :

$$O_t = D_t$$

où :

$O_t = \varphi(t)$ = l'offre mondiale de pétrole brut et de GNL¹⁶ en (t), telle que décrite précédemment.

$D_t = f(P_t, Y_t, \dots)$ = la demande mondiale de pétrole en (t)

Y_t = le produit national brut mondial en (t)

P_t = le prix d'équilibre du pétrole en (t)

¹¹ Les réserves prouvées sont les réserves dont on peut affirmer qu'elles ont une grande probabilité (à plus de 95%) d'être produites.

¹² Les réserves probables sont les réserves dont la probabilité d'être produites est d'au moins 50% mais pas plus de 95%.

¹³ Les réserves possibles sont celles qui ont une probabilité d'être produite inférieure à 50%.

¹⁴ Le taux de récupération correspond au rapport entre les réserves récupérables

¹⁵ A titre indicatif, le taux de récupération se situe actuellement aux alentours des 35% au niveau mondial.

¹⁶ Gaz naturel liquéfié.

Sur le marché du pétrole, la demande s'aligne à l'équilibre sur l'offre et détermine ainsi le prix (P_t). De cette manière, lorsque l'offre se réduira dans l'avenir, le relèvement du prix (P_t) fera en sorte que la demande ne dépasse pas l'offre.

Les hypothèses supplémentaires suivantes doivent également être précisées :

- H1 : La demande de pétrole a été estimée à l'aide d'une fonction à élasticité constante.

$$D_t = C_t P_t^\alpha Y_t^\beta$$

où :

C_t = coefficient reflétant les modifications structurelles dans l'usage du pétrole ainsi que le progrès technique, C_t est donc décroissant en fonction du temps.

α = l'élasticité prix

β = l'élasticité revenu

L'estimation retenue pour l'élasticité prix à long terme (α) est de $-0,40$ et pour l'élasticité revenu (β) est de $0,96$.

- H2 : Le modèle implique l'inélasticité de l'offre de pétrole par rapport au prix.

Cette faible élasticité prix est d'ailleurs confirmée dans la réalité. En effet, lorsque la demande de pétrole est fortement réduite suite à des raisons conjoncturelles ou encore lors d'une sortie rapide de l'hiver, elle se retrouve confrontée à une rigidité à court terme de l'offre entraînant parfois une importante baisse du prix. Même si cette baisse perdure, l'offre ne s'adapte que très lentement et l'augmentation du prix n'est pas conséquente.

- H3 : Le marché du pétrole est entièrement libre ce qui suppose une production sans contraintes où producteurs et demandeurs s'expriment librement. On ne prend dès lors pas en compte le cas où un ensemble de producteurs fixeraient des quotas afin de maintenir le prix du pétrole à un niveau désiré.

Pour finir, le modèle utilisé retient également 2 scénarios différents en ce qui concerne la croissance économique.

- Le premier scénario, est un scénario de croissance économique dite forte, avec un taux de croissance du PNB de 3,4% par an jusqu'en 2010 et de 3% au-delà. Ce taux de 3,4% est celui retenu par la Banque Mondiale dans ces prévisions de croissance jusqu'en 2010. Les taux de croissance les plus élevés devraient être observés en Chine et dans le reste de l'Asie. Au delà de 2010 le taux de 3% qui a été retenu se situe davantage sur la ligne du taux de croissance observé sur très longue période (taux de croissance annuel moyen 1870-1989 de 2,8% en moyenne pour un ensemble de 16 pays industrialisés).
- Le deuxième scénario correspond à un taux de croissance économique dite modérée avec un taux de croissance du PNB de 3% (croissance observée depuis 1974) par an jusqu'en 2010 et de 2,5% au-delà.

Résultats

Sur base du modèle qui précède, la sensibilité du prix tendanciel en fonction de différents scénarios relatifs à l'offre et à la demande de pétrole (mise en place du progrès technique dans un délais rapide, tardif ou très tardif et l'hypothèse de croissance économique forte ou modérée) a pu être dégagée (voir graphiques A4 et A5 de l'annexe). Il est toutefois important de préciser que ce prix sera amené à fluctuer autour d'un sentier tendanciel sous l'influence de facteurs saisonniers, accidentels ou encore psychologiques.

L'analyse des graphiques A3 et A4 repris en Annexes indique qu'à l'horizon 2010 le prix du pétrole pourrait se situer entre 26,79\$ (1998) et 35,25\$ (1998) le baril selon les différents scénarios relatifs à l'offre, et ce dans le cas d'une croissance économique dite forte. Dans le cas d'une croissance économique plus modérée, nous pouvons constater à l'aide du graphique A4, que le niveau du prix du pétrole, quelque soit le niveau des investissements réalisés dans la production et le transport, devrait être nettement inférieur à celui du cas précédent. En effet, ce dernier se situerait entre 22,56\$ (1998) et 29,61\$ (1998) le baril selon le niveau des investissements réalisés.

Une remarque importante doit néanmoins encore être faite. Le marché du pétrole et celui du gaz naturel constituent tous deux des sous-sections d'un marché plus global, qui est celui de l'énergie. On parle en effet, du marché de l'énergie substituable dans la mesure où les transactions effectuées sur le marché de l'énergie primaire ont trait à l'offre et à la demande d'un produit homogène en terme calorifique, à savoir l'énergie, dont les origines (pétrole, gaz naturel, charbon,...) peuvent être substituables. Il est toutefois important de noter que bien qu'il existe un seul marché de l'énergie, il peut néanmoins y avoir des différenciations en fonction de la qualité spécifique (que ce soit au niveau du rendement ou des rejets atmosphériques) selon l'origine énergétique. Toujours est-il que si l'on considère ce marché unique de l'énergie substituable, lorsque le prix du pétrole (P_t) atteint des grandeurs comprises entre 28\$ (1998)/baril et 34\$ (1998)/baril, les gaz de toutes origines seront compétitifs. Cette substitution, soit par le gaz naturel, soit par d'autres combustibles de substitution a pour conséquence que les estimations de prix du pétrole se situant au delà de 34\$ (1998)/baril, voir 28 (1998)/baril n'ont qu'une existence virtuelle. Les réserves de gaz plus ou moins équivalentes en quantité aux réserves de pétrole, cela permettra d'éviter une augmentation en flèche du prix du pétrole suite à une réduction de l'offre et à une hausse de la demande. L'évolution du prix du pétrole (P_t) au delà de 2010-2015 sera donc proche de la tendance historique.

Un autre point mérite encore d'être soulevé. Comme nous l'avons déjà précisé dans les hypothèses, le modèle utilisé suppose que le marché est entièrement libre et que certains producteurs ne sont pas à même de moduler leur production afin de maintenir le prix du pétrole à un niveau convenu (cas des « swing producers »). Or, dans la réalité, nous savons que les producteurs membres de l'OPEP¹⁷ sont capables d'influencer le prix du pétrole et de le fixer ainsi à un niveau leur assurant une rente acceptable. En effet, l'OPEP est à même de faire varier sa production, on dit souvent qu'elle « suit ». C'est à dire qu'elle ne fait que fournir la différence entre la demande de pétrole et la production des NONOPEP, ces derniers acceptant ce prix de référence et produisant au maximum de leur capacité.

Le tableau 5 reprend de manière synthétique les résultats en fonction de différents scénarios et des hypothèses faites en ce qui concerne le taux de croissance économique.

Année	Croissance économique « forte » t=3,4% par an jusqu'en 2010			Croissance économique « modérée » t=3% par an jusqu'en 2010		
	Scénarios			Scénarios		
	A	B	C	A	B	C
2005	22,56	25,78	29	19,35	22,56	24,17
2010	27,4	32,23	37	23,35	26,58	30,61

Tableau 5 : Synthèse de l'évolution des prix du pétrole à l'horizon 2010 selon le modèle

$$O_t = D_t = C_t P_t^a Y_t^b, \text{ exprimés en USD(1998)/baril.}$$

Il reste maintenant à déterminer le prix que paiera le consommateur final. Il est évidemment impossible de définir avec exactitude quel sera ce prix puisque différents éléments, telles que les taxes sur les produits pétroliers par exemple, entrent également en ligne de compte. Ainsi, alors que les prix du pétrole brut OPEP passaient de 28,20\$/baril en 1984 à 18,68\$/baril en 1997, les pays importateurs de pétrole ont augmenté les taxes sur les produits pétroliers dans des proportions supérieures à celles de la baisse des prix du pétrole. La part de ce dernier (fret compris) dans le prix payé par le consommateur final a chuté de 48% à 19% en Europe occidentale et de 45% à 21,41% au Japon, tandis que la part incombant aux taxes pétrolières a augmenté aussi bien en Europe occidentale, au Japon et aux Etats-Unis. On comprend donc bien que de tels éléments rendent l'estimation du prix payé par le consommateur final impossible.

Nous supposons donc que le prix final au consommateur variera dans les mêmes proportions que celui du baril de pétrole. En 1998 le prix du baril de pétrole brut était de

¹⁷ Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole.

12,76\$¹⁸. Le tableau 6 reprend, selon les différents scénarios et les hypothèses faites en ce qui concerne le niveau de croissance, les variations (exprimées en %) attendues des carburants à la pompe. On suppose ici que le diesel et l'essence varient dans les mêmes proportions.

Année	Croissance économique « forte » t=3,4% jusqu'en 2010			Croissance économique « modérée » t=3,4% jusqu'en 2010		
	Scénarios			Scénarios		
	A	B	C	A	B	C
2005	76	102	127	52	77	89
2010	115	153	190	83	108	140

Tableau 6 : Synthèse des variations (par rapport au prix du baril de 1998) du prix des carburants à la pompe à l'horizon 2005-2010. Variations exprimées en %.

Il est toutefois important de souligner que le prix du baril en 1998 était exceptionnellement bas par rapport aux années précédentes. Ainsi, le même exercice a été effectué mais en prenant cette fois-ci la moyenne sur les 5 années précédentes 1998 (17,9\$/baril) du prix du baril comme référence.

Année	Croissance économique « forte » t=3,4% jusqu'en 2010			Croissance économique « modérée » t=3,4% jusqu'en 2010		
	Scénarios			Scénarios		
	A	B	C	A	B	C
2005	26	44	62	8	26	38
2010	53	80	106	30	49	71

Tableau 7 : Synthèse des variations (par rapport au prix moyen du baril entre 1993 et 1998) du carburant à la pompe à l'horizon 2005-2010. Variations exprimées en %.

II.3.1.7.b Estimation de l'évolution du prix de l'électricité

Dans le cadre de la poursuite de la construction de l'Europe, le marché de l'électricité repose depuis le 19 février 1997, sur une directive européenne¹⁹ qui prévoit une libéralisation progressive des marchés, avec pour les années à venir, un taux d'ouverture minimal d'approximativement 28% de 2000 à 2002 et de 30% de 2003 à 2005. La directive prévoit la libéralisation du marché de l'électricité à chacun de ses trois stades du processus économique : la production, le transport et la distribution. Cette libéralisation du marché s'inscrit dans la mouvance mondiale qui a pour but d'améliorer l'efficacité économique des producteurs d'électricité en introduisant des éléments de concurrence. La finalité de la directive est de permettre à un consommateur d'un état membre de contracter avec un producteur d'un autre état membre et d'établir de cette manière un marché concurrentiel de l'électricité.

Une des conséquences premières de cette libéralisation est bien sûr la réduction des prix payés par le consommateur final d'électricité. La libéralisation du marché affecte en effet la structure sous-jacente des coûts et donc indirectement les prix. Elle permet en effet de fournir des incitants pour une structure de coûts plus efficiente. Ainsi, par exemple, la privatisation en Angleterre a permis de réduire le coût de production, le coût de la main-d'œuvre (les réductions d'effectifs se sont en effet traduits par d'impressionnantes améliorations de la productivité par employé) et les coûts d'équipement. La libéralisation a également permis la réalisation d'économies de transport et de distribution et a stimulé l'attention du secteur sur les coûts des contraintes et autres services auxiliaires.

¹⁸ Crude oil price in US\$/baril, dans Energy prices and taxes, quarterly statistics, third quarter 1999.

¹⁹ Commission Européenne DG XVII (1996), « Directive 96/92/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 décembre 1996, concernant les règles communes pour le marché intérieur de l'électricité », Décembre 19, 1996.

Si l'on prend le cas de Etats-Unis, qui a déjà entrepris sa libéralisation depuis la fin des années 70, ils présentent des prix de leur électricité parmi ceux les plus bas au monde. Il sont en effet de loin inférieurs à ceux d'autres pays industrialisés incluant par exemple le Japon et l'Allemagne. Depuis 1982, les prix de l'électricité américaine ont chuté de quelques 25% et ce tenant compte de l'ajustement relatif à l'inflation.

Il n'existe malheureusement à l'heure actuelle que très peu de résultats relatifs aux « effets-coûts » de la libéralisation du marché de l'électricité puisque ce mouvement de libéralisation n'est encore qu'un phénomène relativement récent.

Par ailleurs, le terme « libéralisation du marché » couvre différentes réformes qui ne sont pas nécessairement mises en place de manière simultanée. Ces réformes sont les suivantes :

- *Dérégularisation* : réduction du contrôle direct de l'Etat.
- *Introduction de concurrence* : permettant l'existence de plus d'un fournisseur sur un marché donné.
- *Privatisation* : transfert des actifs de l'industrie de l'électricité de l'Etat à une organisation privée.

Les différents types de réformes poursuivies afin de libéraliser le marché de l'électricité auront des effets différents sur les producteurs et leur fourniront des incitants différents pour modifier leur comportement économique. Il est cependant clair que leur préoccupation première sera d'essayer de réduire les coûts afin d'améliorer leur compétitivité. Le potentiel relatif à la réduction des coûts varie évidemment selon les pays et selon les producteurs.

Il est toutefois important de garder à l'esprit que les actions de court terme pouvant être prises en réponse à la libéralisation des marchés diffèrent fortement des actions pouvant être réalisées dans le plus long terme. A court terme le stock de capital n'est en effet pas remplaçable. Dans un tel contexte, les producteurs tentent de réduire les dépenses opérationnelles et de maintenance ainsi que d'améliorer la gestion des capitaux. Des gains de productivité peuvent également être obtenus à court terme en améliorant les performances des usines, des équipements de transmission et de distribution existants. Tandis que dans le long terme, de nouveaux investissements et de nouvelles technologies seront mis en place afin de fournir des équipements et des usines de génération ayant des coûts totaux plus faibles.

Dans l'état actuel des choses, l'approche la plus souvent utilisée afin d'évaluer les conséquences probables de la libéralisation du marché, est celle de l'observation. En effet, un bilan sur base d'éléments objectifs, tels que l'expérience acquise et l'évolution à l'étranger devrait se révéler intéressante. Des éléments de réponse peuvent dès lors être recueillis auprès de pays dont le degré d'ouverture du marché est plus avancé que celui de la Belgique actuellement : les Etats-Unis, le Royaume-Uni, l'Australie ainsi que les pays scandinaves.

Ainsi, on peut considérer le marché scandinave comme un « laboratoire grandeur nature pour le reste de l'Europe »²⁰. En effet, avec l'Australie, le marché scandinave est le plus déréglementé du monde. Cette libéralisation a commencé en Norvège en 1991 avec l'Energy Act, la Suède a suivi le mouvement quatre ans plus tard et c'est maintenant au tour de la Finlande. Après huit ans de concurrence en Norvège, les prix ont chuté de quelques 25% pour les industriels et d'un peu plus de 10% pour les particuliers²¹.

Les figures 5 et 6 présentent quant à elles, à titre d'exemple, l'évolution des prix de l'électricité pour les consommateurs industriels, suite à la libéralisation des marchés aux USA et au Royaume Uni.

La figure 5 rend compte de la baisse importante, à laquelle nous faisons allusion plus haut, des prix américains. Ceux-ci ont en effet chuté de manière très importante à partir du début des années 80, passant de 0,0496\$ (prix moyen par kilowatt heure) en 1983 à 0,039\$ en 1999, soit une baisse de près de 22%.

²⁰ SCHARFF, CHRISTINE : Scandinavie : L'électricité à la pompe, *Trends Tendances*-21 octobre 1999, pp39-43

²¹ « Cette différence reflète, en fait, la particularité du marché norvégien d'avant l'Energy Act : il y avait substitution des clients particuliers par des consommateurs industriels ; une situation qui a porté les autorités politiques à faire jouer les mécanismes de marché pour améliorer la compétitivité des entreprises norvégiennes.

Dans le même ordre d'idées, la figure 5 fait état de l'évolution qu'a connu le Royaume Uni suite à l'introduction de l'Electricity Act en 1989 et qui a initialisé le mouvement de la libéralisation. Cette dernière n'a réellement été effective qu'au début de l'année 1990 avec la mise en place le 31 mars du Pool, place boursière où se négocient les échanges d'électricité. Tout producteur désirant vendre sa production doit donc le faire sur cette place, de même que tout fournisseur désirant acheter de l'électricité pour la revendre ensuite aux consommateurs finaux.

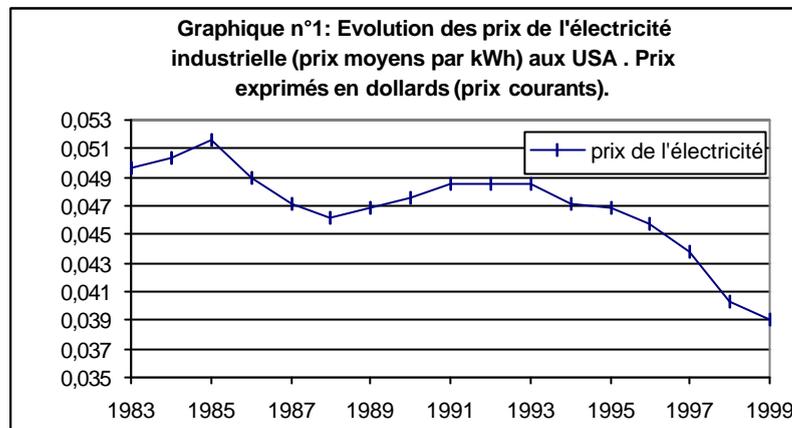


Figure 5 :Evolution des prix de l'électricité industrielle aux USA.

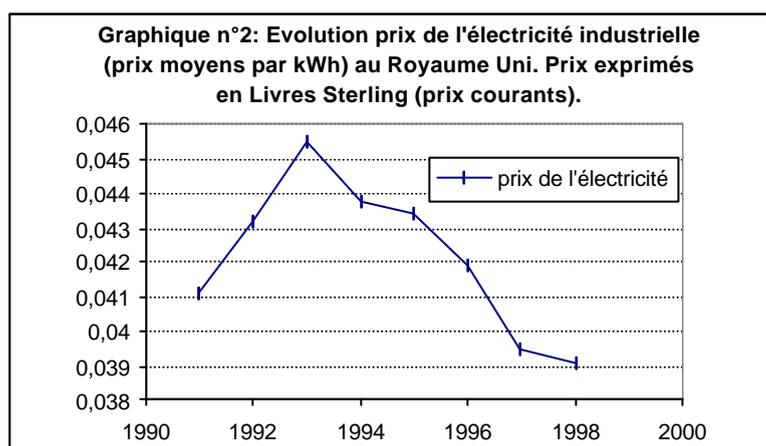


Figure 6 : Evolution des prix de l'électricité industrielle au Royaume Uni.

Lorsque l'on observe la figure 6, nous constatons qu'il y a d'abord eut au cours des trois premières années, une hausse des prix de l'électricité pour les consommateurs industriels et que par la suite une baisse régulière s'est entamée jusqu'à aujourd'hui, correspondant à une réduction de l'ordre de 5% par rapport aux tarifs en vigueur lors du début de la libéralisation. Cette baisse moins spectaculaire que dans le cas des USA s'explique dans un premier temps par le fait que l'observation s'effectue sur une période beaucoup plus courte et dans un deuxième temps par la hausse inattendue observée entre 1991 et 1993. Les tarifs appliqués aux grandes entreprises avaient en effet fortement diminué en 1990/91 en raison de l'introduction du Large Industrial Customer Scheme, lequel était destiné à garantir aux entreprises qu'elles ne devraient pas subir de véritables hausses des prix en 1990/91. Toutefois, suite à une sous-estimation de l'inflation de la part des autorités britanniques, les prix ont chuté en termes réels. Certains consommateurs ont donc dû subir, les années suivantes (1991/92), d'importantes augmentations lorsque cette disposition fut abolie. En même temps, les droits d'utilisation des réseaux de transport et de distribution ont, eux aussi, fortement augmenté (augmentation de 20% en 1992/93 pour les mêmes raisons de sous-estimation de l'inflation).

Il est évident que les effets sur les prix tant aux USA qu'au Royaume Uni n'ont pas été immédiats et que cela met du temps avant que l'on puisse constater un effet significatif de la libéralisation des marchés, le processus de mise en route pouvant prendre plusieurs années du fait qu'à court terme le stock de capital n'est que difficilement remplaçable, fait que nous avons déjà relevé lorsque nous avons fait la distinction entre les effets à court terme et à long terme de la libéralisation.

Toujours est-il que des réductions de tarifs sont attendues pour les années à venir. Par contre, pour ce qui nous intéresse, les tarifs de nuit à l'horizon 2005/2010 ne seront vraisemblablement pas amenés à fléchir de manière importante car ils sont déjà à un point minimum. La plupart des recharges se faisant la nuit, il serait dès lors illusoire d'envisager une réduction considérable en ce qui concerne les coûts liés à l'approvisionnement en électricité. Là où des réductions pourront être attendues, c'est au niveau des recharges s'effectuant en journée. On pense dès lors évidemment aux recharges rapides, mais dans les différents scénarios envisagés, une petite partie des recharges dites normales devront également se faire en journée.

A partir des observations qui ont pu être faites à l'étranger (réduction des tarifs de l'électricité en Angleterre, aux USA ou encore dans les pays scandinaves) suite aux diverses libéralisations des marchés, il serait donc envisageable pour le cas de la Belgique d'imaginer des scénarios de réduction de prix se situant dans une fourchette comprise entre 5% et 10% d'ici l'horizon 2010. Nous avons donc retenu ces chiffres pour notre étude.

II.3.1.7.c Résultats

La comparaison des coûts au kilomètre des véhicules électriques avec leurs homologues essence et diesel a été refaite en tenant compte cette fois-ci des deux aspects développés précédemment, à savoir la variation attendue des prix du pétrole et de l'électricité. Les autres hypothèses, ainsi que les conditions d'utilisation restent quant à elles identiques à celles utilisées pour l'analyse de la situation actuelle. Par contre, en ce qui concerne l'évolution du prix du pétrole et de l'électricité, nous avons retenu les scénarios suivants :

Prix du pétrole

1. Cas n°1 : Croissance économique forte et progrès technique (amélioration des taux de récupération) réalisé avec un retard moyen (cfr scénario B)
2. Cas n°2 : Croissance économique modérée et progrès technique réalisé avec un retard moyen.
3. Cas n°3 : Croissance économique forte et progrès technique réalisé avec un retard important (cfr scénario C)
4. Cas n°4 : Croissance économique modérée et progrès technique réalisé avec un retard important.

Prix de l'électricité

Nous avons retenu une réduction de 5% par rapport au tarif qui avait servi de base pour les calculs relatifs à la situation actuelle.

Résultats

Surcoût du VE par rapport à un véhicule	Cas n°1	Cas n°2	Cas n°3	Cas n°4
essence	30,4%	35,7%	25,6%	32,2%
diesel	39%	41,9%	35,8%	39,8%

Tableau 8 : Surcoût (au niveau de l'utilisation) du véhicule électrique par rapport au véhicule essence et diesel à l'horizon 2010.

Le Tableau 8 reprend les surcoûts qui résulteraient des différents cas de figure envisagés. Ainsi, l'on constate que de manière générale, malgré les variations attendues tant du prix du

pétrole que de celui de l'électricité, le surcoût par kilomètre parcouru par un véhicule électrique en comparaison avec leurs homologues thermiques reste positif.

Il faut toutefois relativiser cette conclusion en remarquant que ces surcoûts ont fortement diminué par rapport à la situation actuelle. En effet, si l'on compare le surcoût du véhicule électrique par rapport à son homologue essence, il passerait de plus de 44% à 35% dans le pire des cas envisagés et à 25% dans le meilleur. Si l'on envisage une comparaison avec les véhicules diesels, ces surcoûts passeraient dans le pire et dans le meilleur des cas de plus de 46% à respectivement 42% et 35%. Dès lors, si l'on considère cette amélioration au niveau des surcoûts, couplée à une mesure incitative en vue de favoriser l'introduction du véhicule électrique, il est évident qu'à partir de ce moment là l'utilisation du véhicule électrique devient plus intéressante que celle de leurs homologues thermiques.

Nous avons par ailleurs calculé le prix du baril de pétrole qui permettrait au véhicule électrique de ne présenter aucun surcoût par rapport à ces homologues thermiques, ce prix s'élève à 50\$(1998) le baril.

II.3.2 Coûts de mise en œuvre de scénarios d'introduction des véhicules électriques en Région de Bruxelles Capitale

L'objectif de cette partie vise à déterminer les coûts de mise en œuvre de différents scénarios d'intégration des véhicules électriques dans la Région de Bruxelles Capitale. La mise en place et le succès de ces derniers nécessitent avant tout la mise sur pied d'infrastructures adéquates. Nous analysons donc ci-après les coûts liés à l'installation des infrastructures ainsi que d'autres frais généraux tels que les frais d'assurance, d'entretien, de personnel, etc.

Une analyse des coûts liés à la mise en place des infrastructures de chaque scénario pris de manière individuelle est effectuée. Ensuite, tous les scénarios sont comparés sur base de l'ensemble des coûts (infrastructures, achat des véhicules électriques, consommation énergétique et frais de personnels). Pour finir, nous envisageons un scénario global reprenant les différents sous-scénarios analysés précédemment.

II.3.2.1 Choix des bornes de recharge

On distingue jusqu'à présent deux types de recharge. La recharge dite « rapide » qui se fait en une durée limitée, c'est à dire à peu près en dix minutes et la recharge dite « lente ». Cette dernière consiste à profiter de la présence du véhicule électrique à un endroit propice à un rechargement complet (parking, station de recharge). La recharge rapide se heurte à un problème technologique qui est celui d'arriver à réduire le temps de recharge sans abrégier la vie de la batterie. La possibilité d'accélérer le processus de recharge est en effet lié au type de batterie et pour chacune d'entre elles il existe malheureusement des limites techniques à cet égard. De plus amples recherches doivent donc encore être faites à ce niveau.

En ce qui concerne la recharge rapide, on peut encore faire la distinction entre la recharge normale par câble et celle par induction. La recharge par induction consiste en une simple séparation entre les éléments primaires et secondaires par lesquels l'interface au véhicule est couplée de manière magnétique. Cela signifie aucun contact galvanisant de métal à métal, donc aucun contact métallique avec le véhicule. Le coupleur est en plastique.

Avant toute chose, il est donc important de préciser quels types de bornes furent retenues dans le cadre de notre analyse. Afin de déterminer quels sont les types de bornes à favoriser selon tel ou tel scénario, nous nous sommes basés sur différents projets en cours en Europe. Ainsi, nous nous sommes par exemple basés sur une expérience parisienne qui avait pour but d'analyser le comportement des utilisateurs par rapport aux infrastructures de recharge. Cette expérience comptait 14 mois d'observation de 21 bornes situées sur la voie publique et 18 mois d'observation de 11 bornes situées dans des parkings sous-terrain. Nous nous sommes également intéressés au concept suisse qui a pour but d'utiliser au maximum le réseau d'infrastructures déjà existant, impliquant donc un coût additionnel minimum. Par ailleurs, l'expérience de location de véhicules à la Rochelle fut également analysée.

Malheureusement, les bilans d'expérience sont encore peu nombreux pour le moment et nous avons été contraints de baser notre travail sur des observations partielles.

Nous pouvons néanmoins déjà conclure, dans un premier temps, qu'il est préférable, du moins à l'heure actuelle, de favoriser la mise en place de systèmes de recharge classiques par câble et non par induction. La technologie par induction présente, il est vrai, des avantages incontestables au niveau des performances ; elle permet en effet d'automatiser complètement les opérations et offre donc une gestion plus aisée et plus fine de l'état de charge de la voiture. Néanmoins, ce type de technologie est rarement choisi pour des raisons de coûts (ce sont les infrastructures les plus onéreuses) et de fiabilité. Il semble en effet, que l'exploitation de bornes de recharge par induction soit encore trop complexe (le client doit se positionner de manière trop précise sur l'inducteur) et que le fonctionnement de cette technique en espace public pose encore trop de problèmes.

A côté de cela, il est également mis en exergue que les bornes de recharge rapide ne doivent être utilisées que ponctuellement car, comme nous l'avons déjà mentionné plus haut, elles diminuent les performances des batteries. Les bornes de recharge rapide ne répondent qu'à un besoin de «dépannage» (si manque de temps et/ou besoin de recharge). Une combinaison des différentes vitesses de recharge en fonction des besoins est donc préconisée.

De plus, il existe encore à l'heure actuelle une importante incompréhension du comportement des consommateurs. Bien qu'il ressorte des premières observations qui ont pu être réalisées, que la majorité des rechargements se fait au lieu de «stationnement» du véhicule (selon les cas 80 à 90% des recharges), une incertitude demeure quant à savoir quand et où les autres recharges sont effectuées et pendant combien de temps. Les réponses à ces différentes questions permettent en effet d'adopter une stratégie efficace et de mettre en place une infrastructure adéquate. Quelques conclusions ont néanmoins déjà pu être dégagées.

Comme nous l'avons déjà mentionné plus haut, on peut déjà affirmer que peu de recharges se font en dehors du lieu de stationnement des véhicules électriques. Si l'on adapte cette constatation à nos différents cas de figure, nous verrons que cela signifie que la majorité des recharges se feront dans des garages privés ou sur des dépôts publics de véhicules électriques.

Il est également ressorti des dernières observations que l'utilisation des terminaux de recharge est beaucoup moins importante que prévue et que les utilisateurs de véhicules électriques fréquentent un nombre relativement restreint de terminaux qui sont mis à leur disposition. Ainsi, une expérience réalisée en France montre que deux tiers des utilisateurs rechargent leur voiture toujours au même terminal et que plus de 90% en utilisent moins de trois. Cela confirme évidemment le fait que l'autonomie des véhicules électriques est adaptée à la conduite urbaine (les utilisateurs n'ont pas constamment besoin de se recharger pendant leur voyage) mais nous permet surtout de conclure qu'un réseau de recharge très étoffé est tout à fait injustifié.

En ce qui concerne le type de recharge (lente ou rapide), il semble qu'au début des expérimentations, les consommateurs soient relativement peu enclins à utiliser une grande partie de la capacité de leur batterie. Ils ont donc tendance à recharger leur véhicule de manière assez fréquente. Par la suite, lorsque l'utilisation des véhicules électriques leur devient plus familière, les distances parcourues entre les chargements ont tendance à s'accroître sensiblement. Une enquête américaine montre par exemple que les utilisateurs croient avoir besoin d'effectuer fréquemment des recharges rapides alors qu'en réalité la demande pour ce type de recharge est surestimée. Cette enquête montre en effet que lorsque l'on interroge les consommateurs afin de savoir où ils souhaiteraient pouvoir trouver des bornes de recharge, peu de personnes interrogées identifient des sites propices à la recharge rapide. Il est toutefois intéressant de garder à l'esprit que ce type de recharge est un élément important de stratégie adaptative afin d'acquérir davantage d'utilisateurs de véhicules électriques. L'implantation de quelques bornes de recharge rapide sur la voie publique paraît donc être nécessaire afin de faciliter la croissance du marché des véhicules électriques.

A la lumière des précédentes considérations, nous avons retenu pour notre étude des bornes de recharge normales par câble, lentes et rapides (chargeurs 36 kW), avec une ou deux prises. Ces différentes bornes peuvent également être munies d'un système de paiement (borne avec monétique incorporée) dans le cas où les recharges sont destinées à se faire sur des lieux publics.

Les coûts de ces différentes bornes sont repris ci-dessous²²:

- Coffret de une prise sans monétique destiné à des lieux privés ou protégés : 1525 EUR
- Borne de recharge par câble (2 prises) avec monétique : 12 195 EUR
- Borne de recharge par câble en cours de développement (1 prise)²³ : 3 810 EUR
- Borne de recharge rapide (36kW) avec monétique : 30 485 EUR
- Borne de recharge rapide (36kW) sans monétique destinée à des flottes d'entreprise par exemple : 9 145 EUR.
- Coût de raccordement, ce dernier est variable et dépend de la puissance de même que de l'éloignement par rapport au réseau, il faut compter en moyenne : 1 525 EUR pour les bornes avec monétique et 760 EUR pour les coffrets.

II.3.2.2 Présentation des différents scénarios

Il est important à ce niveau-ci, de noter que ces différents scénarios représentent initialement des mesures individuelles et peu réalistes si elles sont considérées de manière isolée. Par la suite ces scénarios sont combinés de telle manière à n'en former qu'un général. Voici la liste de ces différents scénarios.

1. Mise en œuvre d'un *réseau de stations de location automatique* de véhicules électriques à l'intérieur de la Région de Bruxelles Capitale en complément au transport public. Ces différentes stations seraient placées de manière stratégique à proximité des points de jonction les plus importants et ce, entre la petite ceinture et le ring (externe) de Bruxelles. L'idée ici est donc d'établir une réelle complémentarité entre l'utilisation de transport en commun et les véhicules électriques de location. Dans chaque station de location automatique, l'utilisateur pourra avoir accès à un véhicule, qui devra par la suite être restitué à une autre station, le paiement s'effectuant à l'aide notamment de cartes de crédit. Ce système de transport « semi-public » a donc comme avantage de combiner la flexibilité d'un véhicule privé tout en complétant les transports publics.
2. Scénario où l'on envisage que *x% des véhicules des flottes d'entreprises publiques ou privées* soient composées de véhicules électriques. Pour les entités publiques, on pense notamment à la poste, à la police ou encore aux services communaux. Ces derniers regroupent par exemple les services liés au bâtiment (peinture, plomberie, électricité), les services de plantation, de propreté publique ou encore toutes les activités des CPAS. En ce qui concerne les entreprises privées, des véhicules électriques pourraient être introduits au sein d'entreprises de services, tels que des électriciens, des plombiers ou encore des entreprises de livraison à domicile.
3. *Restriction d'accès dans certaines zones de la ville* accordant une priorité pour le transport public et les véhicules électriques. Cette mesure est relativement simple et peut être implantée sans coûts excessifs.
4. Mise en œuvre de *centres de distribution de marchandises* utilisant des véhicules électriques afin d'alléger le trafic des véhicules lourds dans le centre ville en faveur des camionnettes électriques. L'idée est donc d'installer des centres de distribution en périphérie de Bruxelles et d'ainsi permettre un transbordement des marchandises dans des véhicules électriques pour tout ce qui est livraison à l'intérieur même de la ville. De cette manière, des réductions de nuisances sonores et atmosphériques pourront être attendues, ainsi qu'une amélioration du trafic et de la qualité de vie dans le centre ville.

²² Source : Electricité de France (EDF)

²³ Une borne de recharge par câble avec une prise est actuellement en cours de développement. Cette nouvelle borne sera plus attractive visuellement, plus facile à utiliser par le grand public et moins onéreuse.

II.3.2.3 Réseau de stations de location automatique de véhicules électriques

Ce scénario prévoit la mise en œuvre d'un réseau de stations de location automatique de véhicules électriques à l'intérieur de la Région de Bruxelles Capitale en complément au réseau de transport public.

La localisation de ces stations de location automatique est bien sûr d'une importance capitale, la liaison avec les transports publics doit pouvoir s'effectuer de manière aisée et rapide. La nécessité de grands espaces destinés aux parkings est également un point à ne pas négliger. Les différentes localisations possibles sont reprises dans la figure 7 et reprennent :

- Les principales gares situées à proximité de la petite ceinture : la gare du Nord et la gare du Midi ;
- Les gares situées au bord du ring extérieur de la ville : Delta, Reyers, Uccle-Stalle, Berchem-St-Agathe et Dobbelenberg ;
- L'aéroport de Bruxelles National.

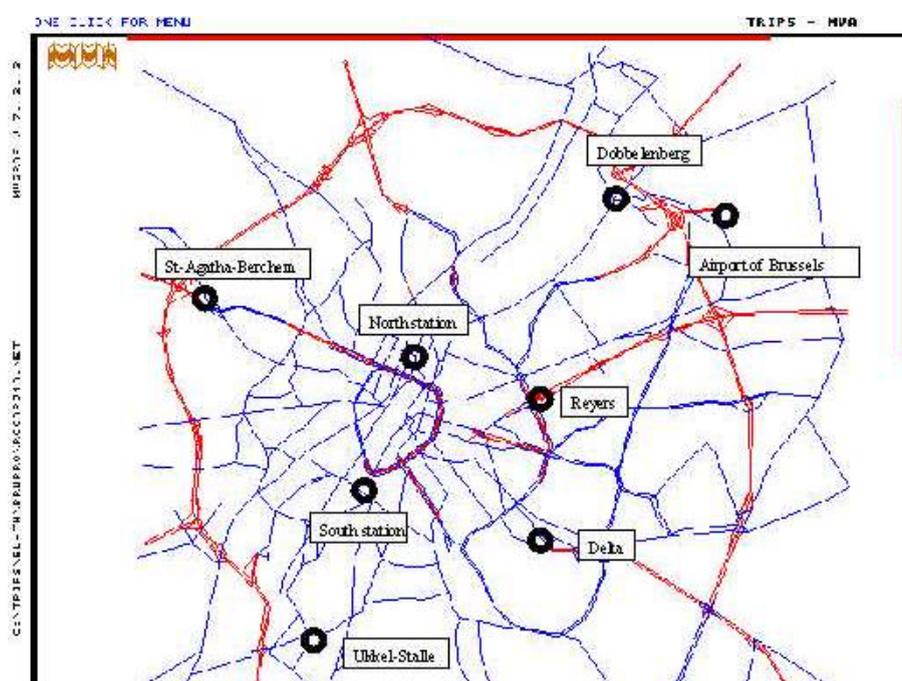


Figure 7: Localisations possibles des stations de location automatique à l'intérieur de Bruxelles.

Chacune des localisations est caractérisée par un nombre potentiel d'emplacements possibles.

La synthèse est reprise au Tableau 9.

Dobbelenberg	1000
Berchem-St-Agathe	1000
Uccle-Stalle	500
Delta	1350
Aéroport Bruxelles National	500
Reyers	270
Gare du Nord	250
Gare du Midi	250

Source : Plan IRIS, Plan régional de déplacement

Tableau 9: Maximum de places possibles pour chaque localisation sélectionnée.

Dans chaque station de location automatique, l'utilisateur pourra avoir accès à un véhicule, qui devra par la suite être restitué à une autre station, le paiement s'effectuant à l'aide de carte de crédit ou autre. Ce système de transport « semi-public » a donc comme avantage de combiner la flexibilité d'un véhicule privé tout en complétant les transports publics. Le système ne suppose toutefois pas que les véhicules électriques quittent la région bruxelloise.

Différents cas de figure peuvent dès lors être envisagés. En effet, il est possible d'imaginer différents cas selon que l'on considère ;

1. *Une exploitation complète ou partielle des différentes localisations* mentionnées plus haut. Dans le cas d'une exploitation partielle, les stations de location de Berchem-St-Agathe, de Reyers ainsi que celle de l'Aéroport de Bruxelles Nationale sont éliminées.
2. *Différents niveaux d'utilisation des emplacements*. Comme nous l'avons déjà précisé, chaque localisation est caractérisée par un nombre potentiel maximum d'emplacements. Ainsi, nous examinerons le cas d'une utilisation maximum et le cas sans doute plus réaliste d'une utilisation de 20% des emplacements potentiels.
3. *Différentes localisations et une quantité différente de bornes de recharge rapide*. Ces bornes peuvent en effet être installées soit sur les lieux de location proprement dit, soit sur la voie publique.
4. *Des bornes de recharge à 1 ou 2 prises*. En effet, les bornes de recharge à 2 prises qui existent actuellement sur le marché sont encore relativement chères en vue d'un développement substantiel. De plus, elles sont jugées trop complexes par les utilisateurs, pas particulièrement attractives visuellement et pas toujours faciles à identifier. Dans le but de surmonter ces difficultés, une nouvelle borne (à 1 prise) est en cours de développement. Une attention toute particulière a été accordée au design, à la simplification du système de paiement automatique ainsi qu'à la réduction des coûts.

Méthodes de calcul

Le calcul des coûts liés à l'installation des infrastructures se fait de la manière suivante ;

- Le nombre de bornes de recharge (cas des bornes à une prise) à installer correspond au nombre d'emplacements envisagés selon tel ou tel scénarios d'exploitation.
- Le calcul des frais relatifs aux bornes de recharge à 2 prises correspond au nombre maximum d'emplacements potentiels divisé par deux (car ce type de borne est capable de recharger deux véhicules en même temps), multiplié par le prix unitaire d'une borne à 2 prises.
- Le calcul des coûts de raccordement correspond à la multiplication entre le nombre de bornes de recharge à installer (que ce soit à une ou deux prises) et le prix unitaire de raccordement.

Résultats

Vous trouverez en annexe (tableaux A6 et A7) la synthèse des coûts pour les différents sous-scénarios qui furent envisagés. Dans un premier temps, des cas de figure où l'on considère les bornes de recharge à 2 prises sont analysés, viennent ensuite les cas où l'on considère les bornes de recharge à une prise.

Un simple tour d'horizon de ces différents résultats permettent déjà de se rendre compte de l'ampleur des coûts relatifs à la mise en place de ce genre de scénario, les coûts allant de plus ou moins 3 500 000 EUR pour un scénario n'envisageant qu'une exploitation partielle de 5 sites sur 8, à environ 30 000 000 EUR pour une exploitation maximale des 8 sites.

II.3.2.4 Remplacement de x% des véhicules de flottes captives d'entreprises publiques ou privées

Nous envisageons dans ce deuxième scénario le remplacement d'un certain pourcentage de véhicules appartenant à des flottes publiques ou privées.

Nous analysons en premier lieu le remplacement des véhicules appartenant à des **flottes de type publique** telles que les flottes communales, de la poste ou de la gendarmerie, et ce

pour la Région de Bruxelles-Capitale. Tous les véhicules considérés (flottes captives) sont ceux susceptibles d'être remplacés par des véhicules à propulsion électrique.

Le tableau 10 ci-dessous dresse le bilan de la situation actuelle et fait la distinction entre les voitures de transport de personnes et les petits véhicules de charge utile inférieure à 500 kg de type utilitaire.

Type d'entité publique	Voitures pour transport de personnes	Véhicules de type utilitaire
19 communes de Bruxelles Capitale	185	176
Poste	-	25
Gendarmerie	300	-
Total	485	201

Tableau 10 : Nombre de véhicules pouvant être remplacés par des véhicules électriques au sein des différentes entités publiques :

Le même type d'analyse peut être effectué pour le **domaine privé**. Pour ce dernier, nous avons tenu compte des entreprises de service les plus représentées en nombre et pouvant être utilisatrices de véhicules utilitaires. Nous avons considéré que chacune de ces entreprises pouvait acquérir lors du remplacement de son parc automobile au moins un véhicule de type utilitaire.

Type d'entreprise	Véhicules de type utilitaire
Plomberie ²⁴	760
Revêtements de sols et des murs ²⁵	484
Nettoyage industriel ²⁶	1278
Service de courrier ²⁷	501
Travaux de peinture	339
Travaux d'installation électrique ²⁸	648
Autres ²⁹	1050
Total	5060

Source : INS

Tableau 11 : Nombre de véhicules pouvant être remplacés par des véhicules électriques au sein de diverses entreprises privées.

En comparaison avec les autres scénarios pouvant être envisagés, celui-ci ne nécessite pas de dispositif ou d'infrastructure élaboré. Il ne faut déjà pas prévoir énormément de bornes dites « normales » étant donné que la majeure partie des recharges s'effectueront au sein des entreprises ou des organismes publics et non pas sur la voie publique. En effet, comme nous l'avons déjà mentionné, le bilan d'expérience d'un projet d'introduction de véhicules électriques réalisé dans la ville de Paris, montre, que l'ensemble des terminaux (de recharge normale) installés ne sont finalement que très peu utilisés. De plus, l'expérience nous montre que les durées de recharge sont peu élevées, ce qui illustre bien que les bornes de recharge publiques sont essentiellement utilisées dans des cas d'urgence. Ces différents exemples confirment bien le fait que l'autonomie des véhicules électriques est adéquate pour la conduite en ville, les utilisateurs ne devant quasi pas se recharger durant leur voyage.

²⁴ Les travaux de plomberie reprennent les installations de système de chauffage, de climatisation et de ventilation et divers travaux de plomberie.

²⁵ Le revêtement de sols et des murs reprend : la pose de carrelages et la pose de revêtements de sol en bois ou autres matériaux.

²⁶ Le nettoyage industriel reprend : le nettoyage de bâtiments et vitres, le ramonage et la désinfection et destruction de parasites.

²⁷ Le service de courrier est la levée, l'acheminement et la distribution de lettres, de colis et de paquets assimilés à du courrier par des entreprises autres que l'administration postale nationale.

²⁸ Les travaux d'installation électriques reprennent : les installations de câbles et appareils électriques, de systèmes d'alimentation de secours, de chauffage électrique, d'ascenseurs, de système de surveillance et d'alarme contre les infractions.

²⁹ Cette catégorie reprend les travaux d'isolation, les autres travaux d'installation, les travaux de plâtrerie, la vitrerie ainsi que les préparations de repas avec livraison à domicile.

A la lumière de ce qui précède, il s'avère donc préférable de favoriser la mise en place d'un réseau de bornes de recharge rapide localisées dans des endroits stratégiques (voie publique, station essence, parking, centres commerciaux) et équitablement distribuées sur l'ensemble du territoire de Bruxelles Capitale. Ce type de recharge ne devant s'effectuer que ponctuellement et ne répondant qu'à une demande en cas d'imprévoyance, il nous semble judicieux d'installer une borne « rapide » pour un rayon de 5 km². Ainsi, sur les 161 km² que compte Bruxelles, 32 bornes de recharge rapide avec monétique pourraient être installées. On constate donc que contrairement aux autres scénarios la quantité de bornes à mettre en place n'est pas directement mise en relation avec le nombre de véhicules susceptibles de circuler dans la ville, mais relève plutôt d'une dimension spatiale.

Ainsi, le coût lié à la mise sur pied d'un réseau de 32 bornes de recharge rapide disposant d'un système de paiement s'élèverait au total à 1 024 320 EUR ³⁰.

II.3.2.5 Restriction d'accès aux véhicules traditionnels en faveur des transports publics à zéro émission et des véhicules électriques

Le scénario analysé dans cette section envisage de mettre en place des restrictions d'accès dans certaines zones de la ville accordant une priorité pour les transports publics ainsi que les véhicules électriques. L'idée est d'interdire complètement l'accès au trafic à l'intérieur du pentagone (centre de la Région de Bruxelles Capitale) ou de simplement interdire le trafic à l'intérieur des zones touristiques et commerciales, avec une exception pour les transports publics (transport à zéro émission) et les véhicules électriques. Ces mêmes mesures peuvent également être mises en place, mais seulement à des heures bien déterminées (par exemple de 6h à 19h). A côté de cela, des mesures visant à dissuader l'usage des véhicules traditionnels peuvent être considérées. Ainsi par exemple, la mise en place d'espaces exclusivement réservés aux véhicules électriques (ZEV³¹), une participation supplémentaire aux frais de parking pour les véhicules polluants ou encore le péage d'un certain montant pour les non-ZEV entrant dans le Pentagone pourrait être envisagés.

Figure 8: Le pentagone avec les lignes de transport publique.

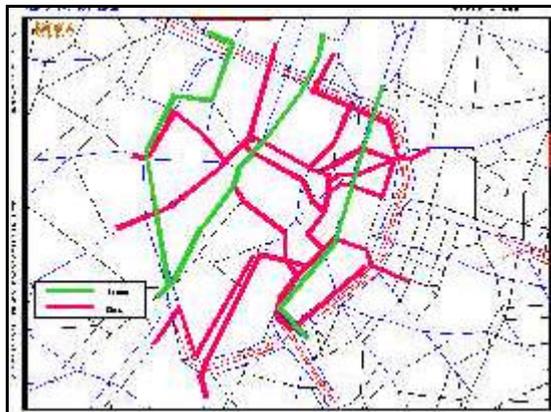
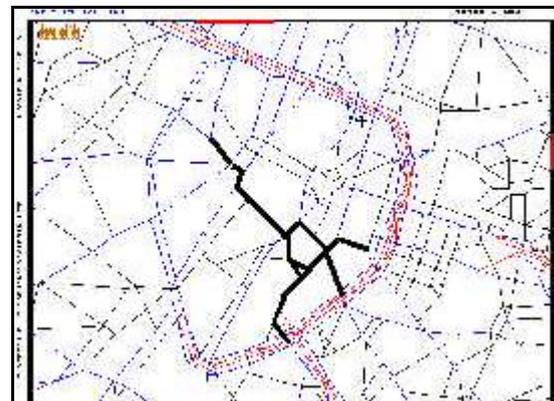


Figure 9: Zone touristique; zone pouvant être exclusivement réservées aux piétons.



Comme pour le scénario précédent, une infrastructure développée sur le plan technique n'est pas nécessaire, seules quelques bornes de recharge rapide installées sur la voie publique devront être prévues. Le principe est donc similaire à celui du cas précédent sauf que l'ampleur du réseau sera de moindre importance étant donné que le degré d'intégration prévu des véhicules électriques est moins élevé. La trajectoire des véhicules à propulsion électrique prise en compte dans ce cas ne sera évidemment pas limitée aux zones décrites plus haut. Comme dans le cas précédent, il sera important de tenir compte de la dimension spatiale et pas seulement du nombre de véhicules électriques pouvant entrer en jeu. Ainsi, toujours en se référant aux expériences observées à l'étranger, notamment en France (faible

³⁰ Ce montant est obtenu de la manière suivante : 32 bornes de recharge rapide avec monétique, multipliées par la somme du prix unitaire et du coût de raccordement → 32 (30 485 + 1525) = 1 024 320 EUR.

³¹ Zero emission vehicles.

fréquentation de terminaux de recharge à Paris, pourcentage peu élevé de recharge effectuée à l'extérieur du domicile ou de l'entreprise,...) nous n'envisagerons ici que des bornes de recharge rapide. Ces dernières sont introduites au nombre de 20 pour tenir compte à la fois de l'étendue du territoire à couvrir ainsi que du fait que moins de véhicules électriques seront mis en circulation.

Le coût lié à la mise sur pied d'un réseau de 20 bornes de recharge rapide disposant d'un système de paiement s'élèverait au total à 640 200 EUR.

II.3.2.6 Réseau de centres de distribution de marchandises

La mise en place de centres de distribution de marchandises vise avant tout à compléter les modes de livraison par route, par voie fluviale ou par rail. En effet, l'idée est d'installer ces centres à la périphérie de Bruxelles et d'ainsi permettre un transbordement des marchandises dans des véhicules utilitaires³² électriques pour tout ce qui concerne les livraisons vers le centre de la ville. Un tel réseau permettrait dès lors d'alléger le trafic lourd à l'intérieur du centre urbain.

La localisation de ces centres est, comme dans le premier scénario, également très importante. Cette localisation peut se faire à deux niveaux :

- Cas n°1 : A la limite de la Région de Bruxelles Capitale, aux croisements du ring et des différentes autoroutes entrant dans Bruxelles (la E19 vers la France, la E40 vers Ostende, la A12 vers Anvers, la E19 vers Anvers et les Pays-Bas, la E40 vers Liège et la E411 vers le Luxembourg). Une telle localisation permet d'éliminer une importante partie du trafic lourd à l'intérieur du centre ville, mais également sur une grande partie entre la petite ceinture et le ring extérieur, ce qui représente en fin de compte plus ou moins l'entièreté de la Région de Bruxelles Capitale.
- Cas n°2 : Etant donné la présence d'une importante zone industrielle à l'intérieur de la Région de Bruxelles Capitale, il est intéressant d'installer des centres de distribution à l'intérieur de cette zone industrielle. Ainsi, un système de transport intermodal peut être une possibilité (via les gares existantes à l'intérieur de cette zone et le canal). Six localisations supplémentaires furent donc envisagées, principalement le long du canal et une à proximité de l'aéroport.

Ces différentes localisations sont synthétisées dans la figure 10 .

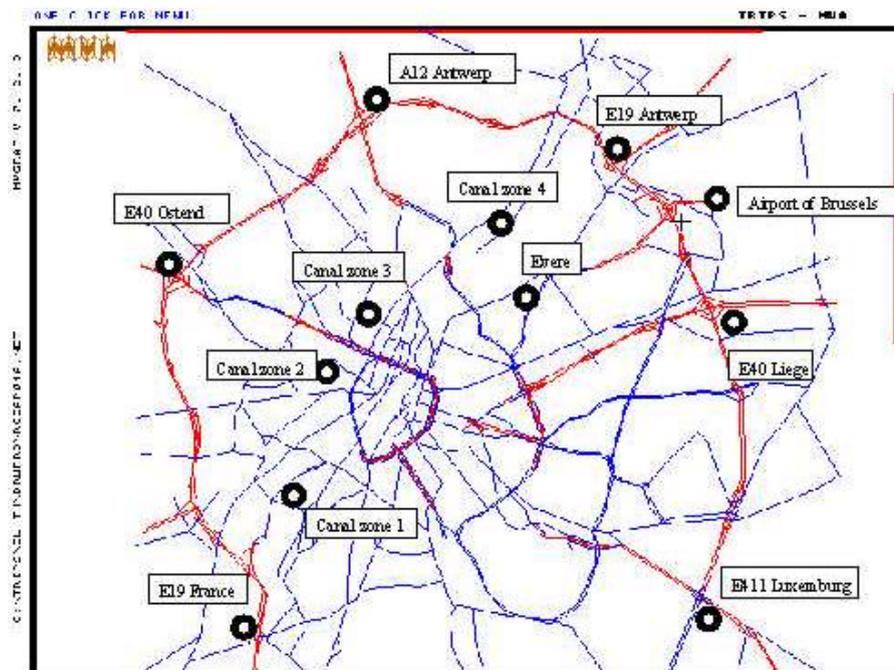


Figure 10: Localisations possibles des centres de distribution de biens à l'intérieur de la Région de Bruxelles Capitale.

³² Les véhicules utilitaires prévus dans le cadre de ce scénario sont des Peugeot Partner et des Citroën Berlingo.

II.3.2.6.a Cas des marchandises provenant de la route

Méthodes de calcul et hypothèses

En ce qui concerne le nombre de véhicules électriques et donc indirectement le nombre de bornes de recharge à prévoir pour le cas envisagé, nous avons basé nos estimations sur le poids des marchandises entrant dans Bruxelles chaque année. A cet égard, nous n'avons pris en compte que les marchandises du type denrées alimentaires et autres marchandises pouvant facilement être transférées d'un véhicule à un autre. Nous n'avons par exemple pas tenu compte des produits agricoles, des produits pétroliers, des produits métallurgiques, des machines, des véhicules, des objets manufacturés ou encore des produits chimiques. Tous ces produits précités, ne sont en effet pas compatibles avec un tel scénario puisqu'ils ne peuvent pas être déchargés d'un camion pour ensuite être rechargés dans des véhicules utilitaires électriques et ce, soit pour des raisons de sécurité (cas des produits chimiques par exemple), soit parce que ce ne sont pas des marchandises faciles à transborder étant donné qu'elles ne sont pas emballées ou encore simplement par manque d'espace à l'intérieur des véhicules utilitaires électriques.

Nous avons divisé le poids total annuel des marchandises (compatibles avec le scénario) en provenance des routes, par la charge utile moyenne d'un camion (2000 kg). Nous avons ainsi obtenu le nombre moyen de camions qui entrent dans Bruxelles annuellement et dont le chargement correspond aux différentes marchandises sélectionnées pour le scénario. Afin d'obtenir une moyenne journalière nous avons encore divisé ce nombre par 300 et non pas par 365 parce que nous avons voulu prendre en compte le fait que le trafic de poids lourd est moins important le week-end et surtout le dimanche. Nous obtenons de cette manière le nombre de camions entrant dans Bruxelles chaque jour et dont le chargement peut faire l'objet d'un transbordement dans des véhicules électriques utilitaires.

Différentes hypothèses furent également utilisées afin de déterminer le nombre de bornes de recharge à installer ainsi que le nombre de véhicules utilitaires électriques à prévoir pour ce genre de scénario :

- H1 : Les différents poids lourds entrent dans Bruxelles de manière plus ou moins régulière entre 7h et 16h. Cette tranche horaire correspond aux heures pendant lesquelles les déchargements et les chargements des marchandises ont lieu, la distribution pouvant encore s'effectuer jusqu'à 18h.
- H2 : Le temps de distribution des marchandises en ce compris le temps de chargement aux centres de distribution et le temps de déchargement chez le destinataire est de 2 heures.
- H3 : La distance maximum aller-retour pour effectuer la distribution des marchandises est de 40 km (départ du centre de distribution et retour au centre de distribution).
- H4 : 4 véhicules électriques utilitaires sont prévus en moyenne pour le transbordement des marchandises à partir d'un poids lourd. De plus, des frais de personnel pour le transbordement et la livraison des marchandises doivent être envisagés.
- H5 : 5 hommes sont nécessaires pour effectuer le déchargement d'un camion et ensuite recharger les 4 véhicules électriques.

En ce qui concerne les installations des infrastructures, le calcul des coûts se fait de la manière suivante :

- Le calcul des frais relatifs aux bornes de recharge (rapide et normale) à installer à l'intérieur des centres de distribution correspond au nombre de bornes de recharge (sans monétique) multiplié par son prix unitaire .
- Le calcul des coûts de raccordement correspond à la multiplication entre le nombre de bornes à installer et le prix unitaire de raccordement. Ce dernier étant différent qu'il s'agisse de bornes avec ou sans monétique comme nous l'avons déjà signalé précédemment.

Résultats

Comme dans le scénario précédent, nous ferons la distinction entre une exploitation complète ou partielle des différents centres de distribution potentiels. Dans le cas d'une exploitation partielle, seulement trois centres de distribution de marchandises sur les six seront en activité.

Sur base des hypothèses mentionnées précédemment, nous avons calculé que 6280 véhicules électriques, 6280 bornes de recharge normale et 535 bornes de recharge rapide doivent être financés dans le cas d'une exploitation des 6 centres³³.

	Frais relatifs aux coffret de recharge	Frais relatifs aux bornes de recharge rapide	Coûts de raccordement	Total
Cas où les 6 centres sont exploités.	9 577 000	4 987 030	5 183 975	22 748 005
Cas où seulement 3 centres sont exploités	4 788 500	2 539 243	1 827 320	9 155 063

Source : EDF

Tableau 12 : Synthèse des coûts (exprimés en EUR) d'infrastructure dans le cas d'un réseau de centres de distribution de marchandises situé aux abords des routes utilisant des véhicules électriques.

Par ailleurs, aux coûts classiques d'infrastructure que nous avons pris en compte jusqu'à présent, il convient pour ce type de scénario de prévoir des coûts supplémentaires pour le traitement des ouvriers présents dans les centres de distribution et dont le rôle sera de participer au transbordement des marchandises. Ce même type de coûts doit également être envisagé pour les ouvriers se chargeant d'effectuer les livraisons entre le centre de distribution de marchandises et la destination finale où le chargement doit être amené.

Ainsi, pour la première catégorie, si l'on estime que 5 hommes sont nécessaires pour effectuer le déchargement d'un camion et ensuite recharger les 4 véhicules électriques (cfr :H4), nous avons calculé qu'il faudrait en permanence 1337 hommes présents dans les centres de distribution de marchandises³⁴.

A cela, il faut encore bien entendu rajouter les frais de personnel nécessaire pour la conduite des véhicules électriques. Pour cette tâche 2140 chauffeurs (nombre de véhicules électriques qui seront en permanence sur la route) seront donc employés.

Dans le cadre de ce scénario et dans le cas où les six centres de distribution seraient exploités, un nombre total de 4815 personnes pourront être employés sous statut d'ouvrier. Si l'on se réfère aux salaires horaires bruts moyens des ouvriers (homme) dans l'industrie, qui était de 8,2 EUR en avril 1997 (le dernier bulletin de statistiques sociales datant de 1998), et si l'on sait que les centres de distribution fonctionnent 9 heures par jour à raison de 22 jours par mois en moyenne, nous arrivons à un montant de 21 106 EUR annuellement pour un ouvrier (en ce compris le 13ème mois). Soit 101 625 390 EUR dans le cas où l'exploitation des centres de distribution est maximale et de 50 812 695 EUR si elle n'est que partielle. Il est toutefois important de garder à l'esprit que les salaires horaires mentionnés plus haut, sont des salaires horaires bruts et qu'à cela il conviendra donc de retirer 35% qui ne seront pas réellement à charge des autorités publiques si l'on tient compte des recettes fiscales que ces emplois généreront.

³³ Le raisonnement sous-jacent permettant d'obtenir ces chiffres sont repris en annexe. L'ensemble des chiffres nécessaires aux différents calculs de ce scénario ont été fournis par l'INS.

³⁴ ibid

II.3.2.6.b Cas des marchandises provenant de la voie fluviale ou du rail

De la même manière que dans la section précédente, nous envisageons ici le cas d'un réseau de 4 centres de distribution de marchandises situés à proximité du canal de Bruxelles. Afin de déterminer le nombre de véhicules électriques utilitaires qui seraient nécessaires, nous avons procédé de manière similaire au cas précédent.

Méthode de calcul

Nous nous sommes à nouveau basés sur le poids des marchandises entrant dans Bruxelles chaque année, mais cette fois nous avons pris en compte celles qui entrent par voie fluviale ou par rail. La part des marchandises provenant du rail étant relativement peu importante, nous avons décidé de l'associer à celle provenant des voies fluviales. Ceci pourrait en effet être tout à fait envisageable dans la mesure où la distribution de marchandises en provenance du rail pourrait bénéficier des infrastructures situées le long du canal. Toujours pour calquer le cas précédent, nous n'avons considéré que les marchandises susceptibles d'être compatibles avec ce type de scénario, à savoir les produits de type denrées alimentaires et autres marchandises pouvant être facilement transférées d'un véhicule à un autre.

Nous avons donc divisé le poids total annuel des marchandises (compatibles avec le scénario) en provenance des voies fluviales et du rail par 300 afin d'obtenir une moyenne journalière. Nous obtenons de cette manière le nombre de tonnes de marchandises, compatibles avec le scénario, entrant dans Bruxelles par les voies fluviales ou par le rail chaque jour. Il est à nouveau important de souligner que, comme dans le cas précédent, ce chiffre n'est qu'un chiffre moyen et n'est valable que pour la semaine puisque nous avons divisé le poids total annuel par 300 jours et non pas par 365.

Pour déterminer le nombre de véhicules électriques ainsi que le nombre de bornes de recharge à prévoir pour ce sous-scénario nous avons utilisé les mêmes hypothèses que celles utilisées dans le cas où les marchandises proviennent de la route.

Résultats

Comme dans les cas précédents, nous faisons la distinction entre le cas où l'exploitation des centres de distribution potentiels est complète et celui où elle n'est que partielle. Dans le cas d'une exploitation partielle, seulement deux centres de distribution de marchandises sur les quatre seront en activité.

Sur base des hypothèses retenues, nous avons calculé que 966 véhicules électriques, 966 bornes de recharge normale et 83 bornes de recharge rapide doivent être financés dans le cas d'une exploitation des quatre centres³⁵.

	Frais relatifs aux coffrets de recharge	Frais relatifs aux bornes de recharge rapide	Coûts de raccordement	Total
Cas où les 4 centres sont exploités.	1 473 150	850 490	801 815	3 125 455
Cas où seulement 2 centres sont exploités	736 575	466 400	402 815	1 605 790

Source : EDF

Tableau 13 : Synthèse des coûts (exprimés en EUR) d'infrastructure dans le cas d'un réseau de centres de distribution de marchandises situés aux abords du canal de Bruxelles utilisant des véhicules électriques.

De la même manière que pour le sous-scénario précédent, nous devons encore tenir compte des frais de personnel.

³⁵ ibid

Pour ce qui est du nombre d'ouvriers qui auraient pour tâche d'effectuer le transbordement des marchandises, nous devons en compter environ 416. En ce qui concerne la conduite des véhicules électriques, 333 chauffeurs seront nécessaires³⁶. Si l'on ajoute ce chiffre aux 416 personnes nécessaires pour le chargement, nous obtenons un total de 749 ouvriers. De la même manière que précédemment, si l'on tient compte des salaires horaires bruts moyens des ouvriers dans l'industrie, nous arrivons à un montant de 15 808 394 EUR annuellement pour l'ensemble des 749 ouvriers. Ce chiffre peut être ramené à 7 904 197 EUR si l'on exploite que 2 centres de distribution au lieu de 4.

II.3.2.7 Synthèse des coûts relatifs aux différents scénarios envisagés

Les tableaux qui suivent présentent de manière synthétique les coûts relatifs à la mise en place des scénarios d'intégration des véhicules électriques.

Le tableau 14 reprend les investissements de base (achat des véhicules électriques et installation des bornes de recharge). Ces derniers ont ensuite été exprimés en coûts annuels et repris dans le tableau 15 qui lui, reprend l'ensemble des coûts annuels liés aux différents scénarios analysés précédemment.

Scénarios	Coût d'achat des VE		Coûts liés aux infrastructures		Total	
	Invest ^{ent}	Invest ^{ents} annualisés	Invest ^{ent}	Invest ^{ents} annualisés	Invest ^{ent}	Invest ^{ents} annualisés
Restriction d'accès dans certaines zones.			640 200	99 756	640 200	99 756
Remplacement des véhicules thermiques par des véhicules électriques au sein des flottes publiques et privés			1 024 320	159 610	1 024 320	159 610
Réseau de station de location						
1. 8 locations exploitées						
a) maximum	67 092 480	16 873 880	27 475 250	4 281 196	94 567 730	17 611 835
b) à 20%	13 418 496	3 374 776	5 623 090	876 190	19 041 586	3 542 318
2. 5 locations exploitées						
a) maximum	43 898 400	11 040 527	18 032 300	2 809 795	61 930 700	11 531 990
b) à 20%	8 779 680	2 208 105	3 734 500	581 910	12 514 180	2 326 349
Réseau de distribution de marchandises						
1. provenant par la route						
a) 6 centres	74 556 160	18 751 584	22 748 005	3 544 596	97 304 165	18 358 198
b) 3 centres	37 278 080	9 375 792	9 155 063	1 426 543	46 433 143	8 833 344
2. provenant par voie fluviale ou par rail						
a) 4 centres	11 468 352	2 884 400	3 125 455	487 009	14 593 807	2 765 661
b) 2 centres	5 734 176	1 442 200	1 605 790	250 214	7 339 966	1 398 541

Tableau 14 : Synthèse des coûts fixes incombant aux pouvoirs publics pour la mise en place des différents scénarios, coûts exprimés en EUR de 1998.

A la lecture de ce premier tableau ainsi que de la figure 10, nous pouvons constater que l'achat des véhicules électriques représente la charge la plus importante des investissements de base, du moins en ce qui concerne la mise en place de réseaux de stations de location ou de distribution de marchandises.

³⁶ ibid

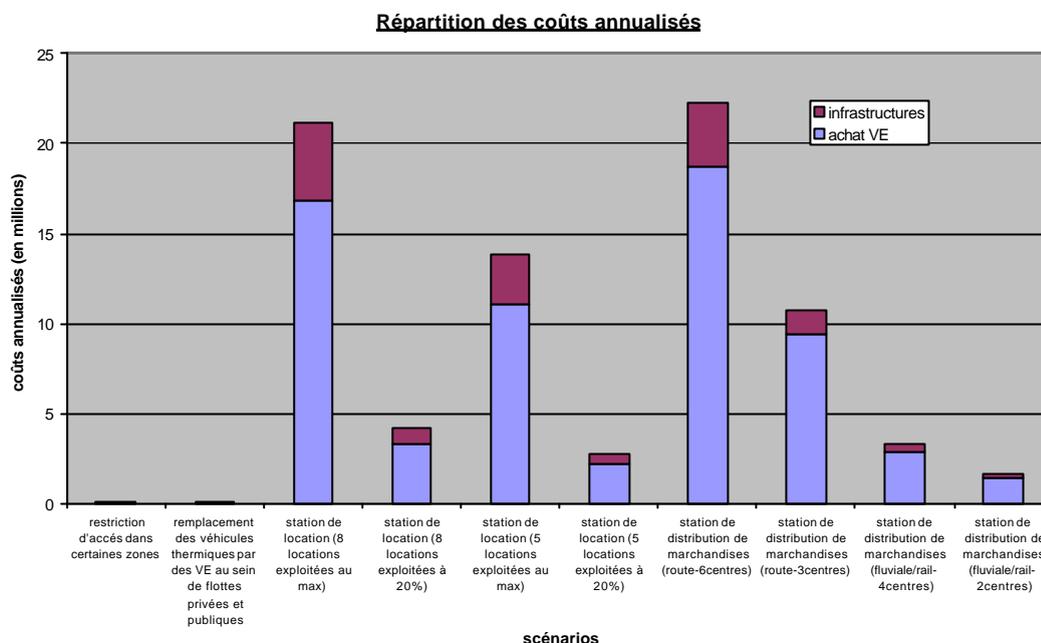


Figure 10 : Répartitions des coûts fixes annualisés pour les différents scénarios envisagés

Une analyse plus détaillée peut être faite à l'aide du Tableau 15 et de la Figure 11 reprenant l'ensemble des coûts annualisés pour les différents scénarios envisagés. Le calcul des frais d'entretien, d'assurance et de consommation d'électricité suit la même méthodologie que celle qui fut utilisée pour le calcul de ces mêmes frais lors de l'estimation des coûts d'utilisation du véhicule électrique.

Scénarios	Investissements annualisés	Frais d'assurance	Frais d'entretien des véhicules	Frais liés à la location des batteries	Frais de personnel	Coûts de cons. d'électricité	Coûts totaux
Restriction d'accès dans certaines zones.	99 756						99 756
Remplacement des véhicules thermiques par des véhicules électriques au sein des flottes publiques et privés	159 610						159 610
Réseau de station de location							
1. 8 locations exploitées :							
a) maximum	17 611 835	1 783 223	412 211	5 652 480			29 002 990
b) à 20%	3 542 318	356 645	82 442	1 130 496			5 820 549
2. 5 locations exploitées :							
a) maximum	11 531 990	1 166 757	269 709	3 698 400			18 985 187
b) à 20%	2 326 349	233 351	53 942	739 680			3 818 989
Réseau de distribution de Marchandises							
1. provenant par la route :							
a) 6 centres	18 358 198	2 216 840	825 820	8 515 680	101 625 390	2 396 448	133 938 376
b) 3 centres	8 833 344	1 108 420	412 910	4 257 840	50 812 695	1 198 224	66 623 433
2. provenant par voie fluviale ou par rail :							
a) 4 centres	2 765 661	340 998	127 029	1 309 896	15 808 394	368 626	20 720 604
b) 2 centres	1 389 541	170 499	63 515	654 948	7 904 197	184 313	10 367 012

Tableau 15: Synthèses des coûts annualisés incombant à l'Etat pour la mise en place des différents scénarios, coûts exprimés en EUR de 1998.

Il en ressort que des scénarios tels que la mise en place de réseau de location de véhicules électriques ou encore de distribution de marchandises semblent à l'heure actuelle encore trop onéreux si l'on envisage une exploitation maximale. De tels scénarios ne semblent envisageables que dans le cas d'une exploitation partielle. A titre d'exemple, les coûts de la mise en place d'un réseau de distribution de marchandises provenant par la route, passeraient de plus de 134 000 000 EUR/an dans le cas où les 6 centres seraient exploités à environ 66 000 000 EUR/an dans le cas d'une exploitation partielle de seulement 3 centres,

la même observation pouvant être faite pour le réseau de station de location de véhicules électriques.

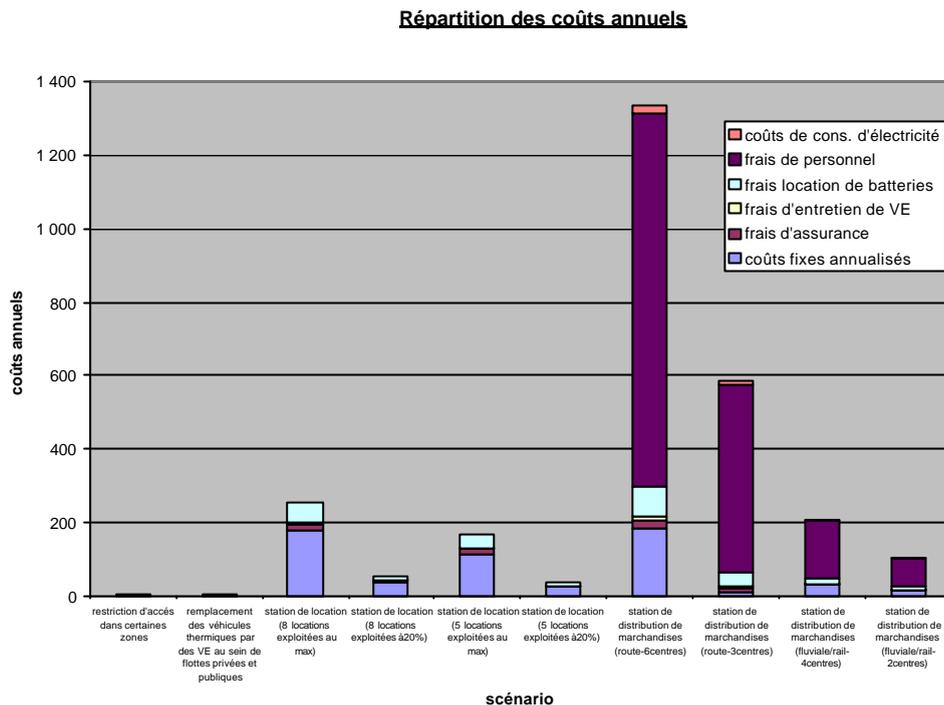


Figure 11 : Répartition des coûts annuels pour les différents scénarios envisagés

Parmi les coûts annualisés les plus importants, nous retrouvons les frais liés à la location des batteries et dans le cas précis des centres de distribution de marchandises, les frais de personnel s'élevant à plus de 100 000 000 EUR/an dans le cas où les marchandises proviennent de la route et où les 6 centres envisagés sont exploités.

D'autres scénarios tels que la restriction d'accès dans certaines zones ou le remplacement des véhicules thermiques par des véhicules électriques au sein de flottes publiques ou privées, paraissent quant à eux plus viables financièrement, les coûts annualisés ne s'élevant qu'à 99 756 EUR dans le premier cas et à 159 610 EUR dans le second.

Par ailleurs, la majeure partie des coûts reste toujours liée à la mise en place des infrastructures proprement dites et à l'achat de véhicules électriques. Nous pouvons dès lors espérer que ces frais se réduiront à l'avenir, dans le cas d'une introduction massive des véhicules électriques sur le marché.

II.3.2.8 Scénario général

Après avoir analysé les différents sous-scénarios, nous proposons maintenant d'en établir un général reprenant les différents éléments évoqués précédemment. Le scénario général incorporerait donc des stations de location automatique de véhicules électriques, des centres de distribution de marchandises ainsi que des zones de restrictions accordant la priorité aux transports publics et aux véhicules électriques. Ce scénario considèrerait également l'introduction de véhicules électriques au sein de flottes d'entreprises publiques et privées.

La mise en place d'un scénario global permettrait aux différentes bornes de recharge de servir pour de multiple usages et d'ainsi pouvoir réaliser des économies en ce qui concerne la mise en place des infrastructures. Une borne de recharge destinée à la base pour des véhicules électriques de location pourrait par exemple être utilisée par un véhicule appartenant à une flotte communale.

Malheureusement, toutes les installations ne pourront pas être destinées à de multiples usages. En effet, les bornes installées dans le cadre de la mise en place des centres de distribution de marchandises par exemple, sont censées être utilisées de manière

permanente et ne peuvent donc pas être disponibles pour d'autres véhicules électriques. L'investissement lié à l'achat de ces bornes doit dès lors être réalisé indépendamment des autres aspects repris dans le scénario global. De même, en ce qui concerne les stations de location de véhicules électriques, il y aurait pendant la journée la possibilité pour d'autres véhicules électriques de bénéficier des installations spécialement conçues à cet effet. Cet avantage doit toutefois être nuancé dans la mesure où la grande majorité des bornes dans ce cas là sont des bornes de recharge normale. Ce type de borne ne présente qu'un intérêt limité pour d'autres utilisateurs (ceux des flottes d'entreprises privées ou publiques ou encore de simples particuliers), puisque ces derniers feront majoritairement l'usage de bornes de recharge dite rapide.

Afin de définir un scénario général, nous avons dû retenir des cas de figure bien précis en ce qui concerne la mise sur pied des stations de location de véhicules électriques ainsi que des centres de distribution de marchandises. Ainsi en ce qui concerne les stations de location, nous avons retenu le cas où les 8 localisations sont exploitées à un niveau de 20%. Pour ce qui est des centres de distribution de marchandises, nous avons retenu le cas le plus limité étant donné que ce projet semble le plus difficile à mettre en œuvre d'un point de vue financier. Nous avons donc pour le cas où les marchandises proviennent de la route 3 centres sur les 6 qui seraient en activité, de même pour le cas où les marchandises proviendraient des voies fluviales et ferrées, la moitié des centres, soit 2 sur 4 seraient exploités.

A partir de là il est possible, comme dans les cas où les différents scénarios étaient distincts, de faire un bilan des coûts qui incomberaient aux autorités publiques pour la mise en place du scénario global. En ce qui concerne les frais annuels tels que les frais d'assurance, les frais d'entretien des véhicules électriques, les frais relatifs à la consommation d'électricité, etc. ceux-ci restent identiques puisqu'ils sont attachés aux véhicules mêmes et peuvent être repris du tableau 15. Par contre, au niveau des coûts fixes relatifs aux infrastructures, c'est là que peut intervenir l'avantage du multiple usage d'une borne que nous évoquions plus haut. En effet, les scénarios prévoyant le remplacement d'une partie des véhicules thermiques par des véhicules électriques ainsi qu'une restriction d'accès dans certaines zones de la ville accordant une priorité pour le transport public et les véhicules électriques, peuvent être considérés ensemble et utiliser les mêmes infrastructures. Ainsi, les 32 bornes de recharge rapide initialement prévues pour couvrir équitablement l'ensemble du territoire de Bruxelles Capitale serviraient également pour le cas où l'on favoriserait l'accès de véhicules électriques dans certaines zones de la ville. De même les bornes de recharge rapide prévues pour la mise en œuvre d'un réseau de stations de location automatique de véhicules électriques, ne devront également plus être prises en compte une seconde fois. Pour finir, les infrastructures mises en place dans le cadre des centres de distribution de marchandises, ne pourront quant à elles pas être utilisées par d'autres véhicules électriques, les différentes bornes de recharge devant pouvoir être disponibles de manière permanente.

Les deux tableaux suivants présentent, comme dans le cas où les scénarios étaient présentés de manière distincte, la synthèse des coûts nécessaires à la mise en place du scénario global.

Le Tableau 16 reprend donc les investissements de base (achat des véhicules électriques et l'installation des bornes de recharge). Ces derniers ont, comme précédemment, été exprimés en coûts annuels et sont repris au Tableau 17. L'analyse du tableau 16 met clairement en évidence la problématique déjà maintes fois soulevée, du coût lié à l'achat des véhicules électriques. Ce coût reste en effet la part la plus importante des coûts fixes, étant jusqu'à cinq fois supérieur à celui lié aux infrastructures.

Une analyse plus détaillée peut être réalisée à l'aide du Tableau 17 où l'on retrouve les différents postes des coûts annualisés entrant en ligne de compte pour la réalisation du scénario général. A la lecture de ce tableau, on peut constater que si l'on considère un scénario global incluant un réseau de centres de marchandises provenant par route ainsi que par voie fluviale ou ferrée, la majeure partie des coûts sera imputable aux frais de personnel nécessaire pour le fonctionnement de ces centres. La grande partie des coûts liés à la mise en place d'un scénario général n'est donc pas directement liée à l'installation des infrastructures à proprement parler. Le fait que les frais de personnel occupent une telle part

des coûts et soient si élevés ne devrait toutefois pas être considéré comme un obstacle à la réalisation du scénario, dans la mesure où cette initiative permettrait de mettre au travail plus de mille personnes, voir plus de deux mille dans le cas où l'on opérerait pour une utilisation maximale des centres de distribution, ce qui peut évidemment être intéressant si l'on se place du point de vue des autorités publiques.

Tableau 16 : Synthèse des coûts fixes incombant aux autorités publiques pour la mise en place d'un scénario général, coûts exprimés en EUR de 1998.

Scénario global reprenant:	Coûts d'achat des VE hors TVA		Coûts liés aux infrastructures	
	Investissement de base	Investissements de base ramenés en coûts annuels	Investissement de base	Investissements de base ramenés en coûts annuels
Une restriction d'accès certaines zones et un remplacement des véhicules thermiques par des véhicules électriques au sein des flottes publiques et privées			1 024 320	159 610
Un réseau de stations de locations avec 8 localisations exploitées à 20%	13 418 496	2 666 128	5 463 040	851 251
Un réseau de centres de distribution de marchandises provenant:				
1. Par la route (3 centres exploités)	37 278 080	7 406 801	9 155 063	1 426 543
2. Par voie fluviale et ferrée (2 centres exploités)	5 734 176	1 139 326	1 605 790	250 214
Total du scénario global:	56 430 752	11 212 255	17 248 213	1 836 367

Tableau 17 : Synthèse des coûts annuels incombant aux autorités publiques pour la mise en place d'un scénario général, coûts exprimés en EUR 1998.

Scénario global reprenant:	Investissements de base annualisés	Frais d'assurance	Frais d'entretien des véhicules	Frais liés à la location de batteries	Frais de personnel	Coûts relatifs à la consommation d'électricité
Une restriction d'accès certaines zones et un remplacement des véhicules thermiques par des véhicules électriques au sein des flottes publiques et privées	159 610					
Un réseau de stations de locations avec 8 localisations exploitées à 20%	851 251	356 645	82 442	1 130 496		
Un réseau de centres de distribution de marchandises provenant:						
1. Par la route (3 centres exploités)	1 426 543	1 108 420	412 910	4 257 840	50 812 695	1 198 224
2. Par voie fluviale et ferrée (2 centres exploités)	250 214	170 499	63 515	654 948	7 904 197	184 313
Total	2 687 618	1 635 564	558 867	6 043 284	58 716 892	1 382 537
					Total: général	71 024 761

Il est par ailleurs intéressant de noter que le scénario global présenté ici, n'est qu'un exemple parmi d'autres et qu'il peut être modulé de différentes manières. Ainsi, si l'on retire du scénario général, les centres de distribution de marchandises cela permettrait par exemple de réduire considérablement les coûts de mise en œuvre, les réduisant ainsi de plus de 90%.

La Figure A8, reprise en Annexe, permet quant à elle d'apprécier la part relative des différents postes des coûts annuels et ce sans tenir compte de l'importante part incombant aux frais de personnel. Les coûts d'investissements de base annualisés (achat des véhicules électriques et mise en place des infrastructures) représentent alors près de 60% des coûts annuels, arrivent ensuite les frais liés à la location des batteries s'élevant à 26%. Les frais d'assurance ainsi que les frais d'entretien occupent sans surprise, une part relativement restreinte dans les coûts annuels totaux. Pour finir, les 6% correspondant aux coûts relatifs à la consommation d'électricité pourraient diminuer à l'horizon +/- 2010 dans le cadre de la libéralisation du marché de l'électricité

II.4 Obstacles à une éventuelle production en série des véhicules électriques

Comme nous l'avons déjà mentionné plusieurs fois jusqu'à présent, le principal handicap du véhicule électrique empêchant sa diffusion à grande échelle est incontestablement son prix d'achat encore beaucoup trop élevé. L'absence d'une production en série des véhicules électriques reste bien entendu l'explication majeure. En effet, ce sont actuellement le prix des batteries et celui du moteur électrique qui gonflent considérablement le prix des véhicules électriques. Pour ces deux composants, des économies d'échelle ne peuvent être réalisées, les fournisseurs dépendant des commandes établies par les producteurs de voitures.

Mais pourquoi une production en série réduirait-elle les prix ? Le fait est que l'homme devient de plus en plus efficace avec l'expérience. C'est ce que l'on appelle en économie le principe de " learning by doing ". En effet, au début de la production d'un bien, les coûts sont élevés, le travail est inefficace et la qualité est marginale. Une fois l'expérience acquise, les coûts se réduisent et l'efficacité de même que la qualité s'améliore. Le même phénomène est également régulièrement observé dans toute une série d'industries.

Dans beaucoup de cas, la tendance que suit le phénomène d'amélioration peut être prévisible : pour chaque doublement de la production, le coût de cette dernière se réduit d'un pourcentage bien défini, ce pourcentage variera évidemment d'une industrie à l'autre ou d'un produit à l'autre. Les différences sont essentiellement dues aux différents niveaux des dépenses en recherche et développement de même que celles en capital. Il a également été observé que la concentration du marché a une forte influence sur la flexibilité des prix et donc également sur l'évolution des prix liée à l'apprentissage.

L'aspect " stabilité " est par ailleurs également un élément important à prendre en compte si l'on veut améliorer l'efficacité. Une certaine stabilité permet en effet de minimiser les pertes à court terme et de maximiser les gains à plus long terme liés à l'apprentissage.

Il serait toutefois intéressant à ce stade-ci de voir si une production en série du véhicule électrique est quelque chose de réellement envisageable puisqu'il apparaît que différents obstacles pourraient survenir. Il existe en effet à long terme un manque d'intérêts économiques et d'incitants commerciaux dans le chef des producteurs de véhicules, pour passer à une production en série des véhicules électriques. Nous pourrions même carrément dire qu'il existe des incitants économiques à ne pas passer à une production en série. Les paragraphes qui suivent dressent le bilan de ces différents obstacles.

II.4.1 Manque de motivation pour la promotion et la vente de véhicules électriques

Bien souvent, les « dealers automobiles » s'occupent de la vente du véhicule ainsi que des réparations et de l'entretien. Or actuellement, il semble que la vente d'un véhicule électrique prenne jusqu'à deux fois plus de temps que celle de leurs homologues thermiques (essence ou diesel). Cette nouvelle technologie est en effet très peu connue du grand public, chère et encore considérée comme étant peu fiable. Les revendeurs d'automobiles rencontrent donc d'importantes difficultés à convaincre leurs potentiels acheteurs. Dans ces conditions, il est dès lors plus intéressant pour les revendeurs, de se contenter de ne vendre que des véhicules habituels.

Par ailleurs, la vente et la distribution de voitures ne représentent qu'une faible part du chiffre d'affaire des revendeurs automobiles, la majorité du chiffre étant réalisé grâce aux services d'entretien et de réparation. Or, les véhicules électriques nécessitent entre 30 et 50% en moins de maintenance que les véhicules traditionnels, ceci s'expliquant en majeure partie par la durée de vie du moteur électrique beaucoup plus élevée ainsi que par le fait que très peu d'éléments doivent être remplacés contrairement aux véhicules électriques. On comprend donc bien que les « dealers automobiles » ont finalement très peu d'incitants à promouvoir le véhicule électrique.

II.4.2 Emploi

De plus, si l'on ne considère que les spécialistes de l'entretien et de la réparation, le problème de la diffusion du véhicule électrique ne se posera pas seulement en terme de manque de motivation pour la promotion ou la vente du véhicule électrique, mais il pourrait se poser en termes d'emplois. En effet, l'industrie d'après-vente est un secteur employant des milliers d'individus. On peut alors imaginer que si le véhicule électrique prend de l'ampleur au dépend des véhicules thermiques traditionnels, beaucoup d'emplois dans le secteur de l'après-vente pourraient être amenés à disparaître. L'industrie automobile doit donc être considérée comme un vaste réseau où l'on retrouve des interrelations avec beaucoup d'autres industries tant à l'amont qu'à l'aval et ayant une influence sur l'ensemble de l'économie d'un pays.

II.4.3 Spécificité des producteurs automobiles

D'autres obstacles peuvent apparaître si l'on tient compte cette fois-ci de la spécificité des producteurs automobiles. C'est ce que nous tenterons de démontrer dans les lignes qui suivent.

A l'heure actuelle, on estime que 60 à 65% des éléments intervenant dans la construction d'une voiture sont fournis par des sous-traitants. Le reste représentant des compétences techniques sur lesquelles est basée la puissance de producteurs automobiles. Parmi ces compétences, on retrouve la recherche et le développement, le design, la production de composants majeurs, l'assemblage final, la vente et le service après-vente. Ainsi, le pouvoir technique des producteurs automobile se situe actuellement essentiellement au niveau de la fabrication du moteur ainsi que de la « carrosserie ». Ces deux compétences majeures permettent aux producteurs automobile de disposer d'un certain poids économique par rapport à leurs fournisseurs et de ne pas être de simples « assembleurs » de différents composants produits par des sous-traitants.

Or la production de véhicules électriques en série aura pour conséquence d'accroître jusqu'à 80% la part d'éléments fournis par des fournisseurs externes. En effet, les éléments principaux des véhicules électriques sont actuellement achetés par des assembleurs auprès de quelques fournisseurs externes. Ces principaux éléments sont le moteur électrique, les batteries ainsi que le système de contrôle électrique, indispensable pour optimiser les niveaux de performance du moteur et des batteries. Les producteurs automobiles devront donc de plus en plus compter sur le savoir-faire d'autres industries.

De plus, un autre argument, peut-être plus valable dans un avenir lointain, mais qui mérite toutefois d'être soulevé, est le suivant. Jusqu'à présent, le design des véhicules électriques et les matériaux utilisés ont toujours été identiques à ceux des voitures existantes (Peugeot 106, Citroën Saxo,...). Par conséquent, les véhicules électriques actuels souffrent d'un surpoids qui réduit leurs performances. Il est dès lors raisonnable de penser que les véhicules électriques changeront de design et utiliseront de nouveaux matériaux tels que le thermoplastique, la fibre carbone ou encore l'aluminium. L'utilisation de ces nouveaux matériaux signifierait donc que les producteurs automobiles se verraient perdre, outre le monopole de la production du moteur, la production de la « carrosserie » qui comme nous l'avons dit plus haut représente la seconde compétence technique clé des producteurs de voitures. Il serait par ailleurs difficile de produire ces éléments de manière interne car un transfert des technologies et connaissances impliquées dans ces éléments s'avèrerait extrêmement coûteux. L'introduction de véhicules électriques à grande échelle modifierait ainsi l'équilibre précaire qui existe actuellement dans l'industrie automobile et réduirait fortement le pouvoir économique des constructeurs qui seraient réduits à de simples assembleurs.

II.4.4 Changements technologiques

Par ailleurs d'autres considérations méritent également d'être mises en évidence. Ainsi, la technologie actuelle est encore considérée comme peu fiable et encore beaucoup trop sujet à d'importants changements technologiques. Cet état de fait explique en effet la réticence des producteurs automobiles à investir dans une technologie qui pourrait rapidement

s'avérer obsolète (parce que concurrencée par d'autres). On comprend donc bien que, selon toute logique industrielle et commerciale, il n'est pas intéressant pour les producteurs automobiles d'investir des millions dans une nouvelle production sans être certain de pouvoir revendre leurs voitures, surtout si l'on considère également le comportement extrêmement conservateur des consommateurs.

II.4.5 Conclusion

Bref, si l'on ne considère le problème que du point de vue des producteurs automobiles et de leurs détaillants, la diffusion du véhicule électrique pourrait carrément aller jusqu'à constituer une menace pour la «survie » de l'industrie automobile, si l'on envisageait, dans le cas extrême, une substitution de la production du véhicule traditionnel par celle du véhicule électrique.

Toujours est-il que si l'industrie automobile parvient à surmonter ces difficultés et à trouver « son compte » dans la production du véhicule électrique, le prix de ce dernier serait amené à diminuer fortement.

Il est toutefois extrêmement périlleux de vouloir estimer le prix d'un véhicule électrique dans le cas d'une production en série. En effet, cela demanderait de connaître la répartition des coûts des différents composants d'un véhicule et de prendre en compte des considérations relatives au marketing. Nous sommes néanmoins parvenus à obtenir des informations relatives aux prix des batteries et du moteur électrique (deux éléments pesant fortement sur le prix d'un véhicule électrique). Il apparaît donc qu'en ce qui concerne les batteries au Nickel-cadmium leur prix pourrait passer de 90 EUR/kWh (prix actuel) à 45 EUR/kWh dans le cas où la production se situerait entre 50 000 et 100 000 unités par an. La même tendance est également valable pour le moteur électrique dont le prix pourrait passer de 300 EUR à 75 EUR si des niveaux suffisants de production sont atteints.

Il est néanmoins vraisemblable que le prix d'un véhicule électrique dans le cas d'une production en série se situerait à des niveaux extrêmement proches de ceux d'un véhicule thermique habituel.

Chapitre III: Analyse des aspects environnementaux

III.1 Introduction

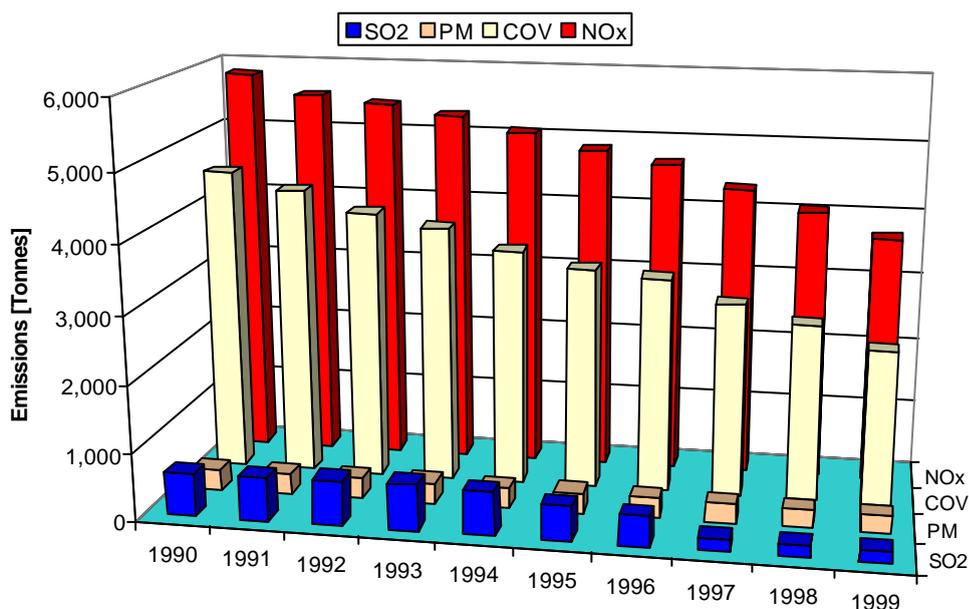
Dans ce chapitre, avant d'aborder la problématique de la pollution photochimique et de l'évaluation des dommages qui lui sont associés, nous situons dans un premier temps l'apport potentiel des véhicules électriques et hybrides dans le contexte général de l'évolution des émissions du trafic routier en Région de Bruxelles-Capitale depuis 10 ans. Dans ce but, les émissions des véhicules électriques et hybrides sont tout d'abord comparées à celles de leurs homologues thermiques. Les effets de différents scénarios d'introduction de ces véhicules dans la Région sont ensuite évalués en termes de réduction des émissions de polluants atmosphériques.

Dans un second temps, la méthodologie développée pour l'évaluation de la pollution photochimique et son application pour l'évaluation de différentes stratégies générales de réduction sont présentées. Les effets potentiels de l'introduction de véhicules électriques dans la Région sont également évalués.

III.2 Evolution des émissions du trafic routier en Région de Bruxelles-Capitale

Nous retraçons tout d'abord brièvement l'évolution des émissions du trafic routier en Région de Bruxelles-Capitale.

A la Figure 12, sont présentées les évolutions des émissions de quatre polluants issus du trafic routier – NO_x, COV, PM et SO₂ – en Région de Bruxelles-Capitale au cours de la période 1990-1999. Ces émissions ont été calculées à l'aide du modèle AMORTEC (Aggregate Model for Road Traffic Emissions Calculation) développé au CEESE qui, en se basant sur la méthodologie COPERT [Ahlvik *et al.* (1997) ; Ntziachristos *et al.* (1999)], permet le calcul des émissions du trafic routier à une échelle agrégée nationale ou régionale sur base annuelle ou mensuelle.

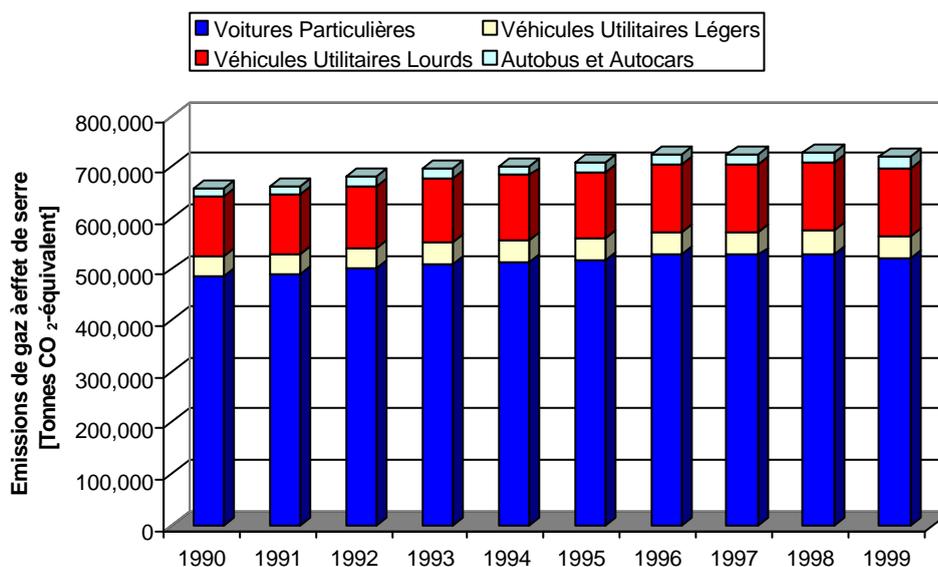


Source : CEESE-ULB.

Figure 12 : Evolution des émissions du trafic routier en Région de Bruxelles-Capitale entre 1990 et 1998.

Nous pouvons tout d'abord constater sur cette figure des réductions relativement importantes pour des polluants tels que les oxydes d'azote, les composés organiques volatils ou le monoxyde de carbone, principaux gaz précurseurs incriminés dans la formation de l'ozone troposphérique. Pour ces polluants, l'accroissement du trafic a été compensé par l'évolution technologique des véhicules imposée par des normes de plus en plus strictes. Pour le SO₂, l'introduction de nouvelles normes pour la qualité des carburants a également eu des effets bénéfiques à partir de 1996. Pour d'autres polluants, tels que les particules, l'accroissement constant de la flotte de véhicules diesel n'a pas permis d'observer de telles réductions au niveau des émissions. Or il s'agit du polluant qui a le plus d'impacts aussi bien sur la santé que sur les bâtiments. On observe une relative stagnation jusqu'en 1996. A partir de 1997 et l'entrée en vigueur de la norme Euro II, une tendance à la baisse des émissions de particules est observée.

En ce qui concerne les émissions de CO₂, nous pouvons observer à la Figure 13, qu'elles se sont accrues continuellement avec une augmentation globale de 9% entre 1990 et 1999, soit un accroissement moyen de 1,3% par an. Cette évolution est particulièrement préoccupante, faut-il le souligner, compte tenu des engagements de l'Etat belge dans le cadre du protocole de Kyoto selon lequel nous devrions réduire nos émissions de 7,5% par rapport à 1990 entre 2008 et 2012. On peut également remarquer que, si les émissions globales de CO₂ associées au trafic ont progressé à Bruxelles depuis 1990, cette progression s'est surtout réalisée au niveau des véhicules utilitaires légers et des véhicules lourds. L'augmentation des émissions des voitures particulières a en effet été limitée à 5% entre 1990 et 1999. Le graphique permet également de mettre en évidence une diminution des émissions entre 1998 et 1999, surtout marquée pour les voitures particulières. Ceci peut signifier le début d'une tendance ou un simple palier avant une nouvelle augmentation des émissions. En l'absence de valeurs calculées pour les années 2000 et 2001, il convient de rester prudent.



Source : CESE-ULB.

Figure 13 : Evolution des émissions de gaz à effet de serre exprimées en tonnes de CO₂-équivalent associées au trafic en Région de Bruxelles-Capitale entre 1990 et 1999.

III.3 Comparaison des véhicules électriques et hybrides avec leurs homologues thermiques

Par rapport à l'évolution des émissions en Région de Bruxelles-Capitale présentée au paragraphe précédent, on peut à présent situer l'intérêt des véhicules électriques et hybrides du point de vue environnemental en les comparant à leurs homologues thermiques.

A l'utilisation des **véhicules électriques** sont associées des émissions indirectes liées à la production d'électricité. Sur base du parc de centrales électriques belges, il est possible d'estimer les émissions au kilomètre parcouru dont sont responsables les véhicules électriques. Nous proposons au Tableau 17 une comparaison de ces facteurs d'émissions à 50 km/h pour les voitures particulières et les véhicules utilitaires légers c'est-à-dire de masse inférieure à 3,5 tonnes (VULé). Les facteurs d'émissions sont exprimés en gramme de polluant émis par kilomètre parcouru pour un véhicule thermique moyen représentatif du parc belge de 1998 – estimé suivant les statistiques FEBIAC (1999) – et pour un véhicule électrique de même catégorie. Pour ce dernier, les facteurs d'émissions ont été calculés sur base de la méthodologie préconisée dans le cadre du projet européen MEET (Methodology for Calculating transport emissions and energy consumption) [Commission Européenne (1999)] en se basant sur les données préconisées dans le cadre de ce projet tout en les complétant par des données fournies par Electrabel (2001) pour les émissions moyennes du parc de centrales électriques belges.

Tableau 17: Comparaison des facteurs d'émissions des véhicules électriques et des véhicules thermiques pour les voitures particulières et des camionnettes circulant à 50 km/h.

Polluants	Facteurs d'émission en g/km			
	Voitures particulières		Véhicules utilitaires légers	
	Thermique ¹	Electrique ²	Thermique ¹	Electrique ²
CO ₂	150,14	52,62	231,03	124,50
CH ₄	0,02	0,0002	0,02	0,0005
COVNM	0,38	0,007	0,37	0,016
NO _x	0,738	0,161	0,774	0,382
CO	2,79	0,01	2,33	0,02
SO ₂	0,03	0,30	0,07	0,70
PM	0,03	0,006	0,14	0,005

Sources : ¹ CEESE-ULB ; ² Commission Européenne (1999) et Electrabel (2001)

Nous pouvons constater que, hormis pour les émissions de méthane et de dioxyde de soufre pour lesquels la génération d'électricité entraîne des émissions au kilomètre parcouru beaucoup plus élevées, les véhicules électriques sont responsables de niveaux d'émissions beaucoup plus faibles que pour les véhicules thermiques. En particulier pour le dioxyde de carbone, principal polluant concerné par les changements climatiques, les véhicules électriques présentent des émissions au kilomètre 65% plus faibles que pour les véhicules thermiques pour les voitures particulières et 46% plus faibles pour véhicules utilitaires légers.

En ce qui concerne les **véhicules hybrides**, le Tableau 18 reprend des facteurs d'émissions indépendants de la vitesse issus de MEET. Ces facteurs d'émission sont relatifs à des véhicules hybrides à essence. On peut constater qu'ils présentent des niveaux d'émission intermédiaires pour le CO₂ et le CO et qu'ils s'avèrent plus intéressants en termes d'émissions de composés organiques volatils, de NO_x et de particules.

Tableau 18: Facteurs d'émissions indépendants de la vitesse pour des voitures particulières et des camionnettes hybrides à essence d'après MEET [Commission Européenne (1999)].

Polluants	Voitures particulières hybrides	VULé Hybrides
CO ₂	112	202
COV	0,01	0,019
NOx	0,017	0,031
CO	0,166	0,02
PM	0	0

III.4 Effets environnementaux de l'introduction de véhicules électriques et hybrides dans le contexte bruxellois

Afin d'évaluer l'intérêt d'un point de vue environnemental de l'introduction de véhicules électriques ou hybrides dans les flottes circulant en Région de Bruxelles-Capitale, nous avons calculés les émissions polluantes associées à différents scénarios d'introduction de ces technologies de véhicules dans les parcs de voitures particulières et de véhicules utilitaires légers. Trois scénarios ont été considérés:

- Introduction de 10% de véhicules purement électriques dans les flottes de véhicules légers de façon uniforme dans la Région de Bruxelles-Capitale;
- Scénario « 50-20-5 »: Introduction de véhicules purement électriques de façon différenciée suivant l'éloignement du centre de la Région grâce à des mesures d'accompagnement appropriées (réseau de location des véhicules, restriction d'accès de certaines zones aux véhicules thermiques, etc.). Le scénario retenu considère que la « part de marché » des véhicules électriques est de 50% dans le centre ville (pentagone), 20% dans une zone intermédiaire entre la petite ceinture et la grande ceinture et 5 % à l'extérieur de cette dernière.
- Introduction de 10% de véhicules hybrides à essence dans la flotte de véhicules légers en Région de Bruxelles-Capitale.

L'ensemble de ces scénarios et de leurs effets sont résumés au Tableau 19. Dans ce tableau, les émissions des principaux polluants pour la situation en 1998 sont repris comme situation de référence. Il s'agit des émissions calculées sur base de la méthodologie COPERT III [Ntziachristos *et al.* (1999)] telle qu'intégrée dans le modèle AMORTEC développé au CEESE. Les émissions associées aux véhicules électriques et hybrides sont évaluées sur base des facteurs d'émissions proposés dans le cadre du projet MEET et complétés par des données spécifiques au parc électrique en Belgique.

Les émissions sont regroupées par type d'effets. Sont distingués : les effets locaux (particules, SO₂ et CO) ; la pollution photochimique (NOx et COV) ; l'acidification (SO₂ et NOx) et le réchauffement global (CO₂, CH₄ et N₂O). Pour les effets locaux et le réchauffement global, les émissions sont complétées par des estimations des coûts externes associés calculés au CEESE dans le cadre du projet « Mobilité durable en région bruxelloise » financé par les SSTC dans le cadre du Programme « Mobilité durable ». Par rapport à cette situation de référence, les effets des différents scénarios considérés sont exprimés en % de différence.

Au niveau des **effets locaux**, principalement dominés par les dommages sur la santé et les bâtiments associés aux particules, nous pouvons remarquer que l'introduction de 10% de véhicules électriques ou hybrides ont un effet équivalent de l'ordre de 6% de réduction des coûts externes. Ceci représente une réduction de plus de 55 M€ par rapport à la situation de référence pour l'année 1998. On pourrait simplifier ce résultat en disant que chaque % de part de marché de ces technologies représenterait un bénéfice environnemental de 5,5 M€ en terme de réduction des coûts externes associés aux dommages locaux. Le scénario '50-20-5' plus ambitieux d'introduction de véhicules électriques conduit à des réductions

d'émissions plus importantes pour l'ensemble des polluants concernés et permettrait un bénéfice environnemental de l'ordre de 76 M€ par rapport à la situation existante.

En terme de réduction des émissions de gaz précurseurs de la **pollution photochimique**, c'est l'introduction de véhicules hybrides qui permet les réductions les plus importantes avec 6,2% pour les NOx et 16,3 % pour les COV. Le scénario '50-20-5' est plus intéressant pour la réduction des NOx (-7,3%) mais permet des réductions de COV moins importantes (-13,4%). Finalement, l'introduction de véhicules purement électriques permettraient des réductions comparativement plus faibles mais néanmoins assez importantes : -5,7% pour les NOx et -8,5% pour les COV.

Tableau 19: Evaluation des effets l'introduction de véhicules électriques et hybrides en Région de Bruxelles-Capitale en terme de réduction de la pollution atmosphérique.

	Cas de référence 1998	Trafic léger (voitures particulières et camionnettes)		
		Electriques		Hybrides 10%
		10%	50-20-5	
Effets locaux				
Emissions [tonnes]				
Particules	288	-6,3%	-8,6%	-6,3%
SO ₂	183	-7,4%	-10,0%	-7,4%
CO	18.286	-9,6%	-14,0%	-9,6%
Coûts externes [M€]	882	-6,3%	-8,6%	-6,3%
Pollution photochimique				
Emissions [tonnes]				
NOx	4.167	-5,7%	-7,3%	-6,2%
COV	2.200	-8,5%	-13,4%	-16,3%
Total précurseurs	6.367	-6,7%	-9,4%	-9,7%
Acidification				
SO ₂	183	+5,6%	+7,9%	-7,4%
NOx	4.167	-5,7%	-7,3%	-6,2%
Réchauffement global				
Emissions [tonnes]				
Total [CO ₂ -ég.]	744.208	-5,9%	-8,0%	-3,6%
Coûts externes	1,8	-5,9%	-8,0%	-3,6%

Source : CEESE-ULB

En ce qui concerne l'**acidification**, les résultats obtenus pour les trois scénarios sont plus partagés. L'introduction de véhicules électriques aurait un effet défavorable sur les émissions de SO₂ - +5,6% pour une introduction de 10% de véhicules électriques et +7,9% pour le scénario '50-20-5' d'introduction plus massive – et favorable sur les émissions de NOx qui seraient réduites de 5,7% et 7,3% respectivement pour ces deux scénarios. L'introduction de véhicules hybrides est quant à elle favorable au niveau de deux catégories de polluant avec des réductions de 7,4% pour le SO₂ et 7,2% pour les NOx.

En terme de **réchauffement climatique**, la technologie purement électrique a les effets les plus favorables avec une réduction des émissions de gaz à effet de serre exprimées en tCO₂ équivalent de 6% pour une part de marché de 10% du véhicule électrique en Région de Bruxelles-Capitale et de 8% pour une introduction plus massive dans le cadre du scénario plus volontariste '50-20-5'. Une introduction de 10% de véhicules hybrides essence conduit quant à elle à une réduction des émissions de 3,6%. Ces différents scénarios permettent des réductions de coûts externes associés au réchauffement global dans les mêmes proportions; ce qui correspond à des bénéfices environnementaux de 0,106 M €, 0,144 M€ et 0,065 M€ respectivement pour les trois scénarios par rapport à la situation de référence.

En conclusion, cette première analyse générale a permis de mettre en évidence les réductions d'émissions relativement importantes qui peuvent être attendues d'une introduction, même limitée, de véhicules électriques et hybrides dans les flottes circulant en Région de Bruxelles-Capitale. En termes monétaires, les bénéfices les plus importants sont associés aux réductions de dommages au niveau local qui sont estimés à 5,5 M€ par % de part de marché pour les véhicules électriques ou hybrides. Ces montants importants sont principalement à mettre en relation avec la réduction de la mortalité associée aux particules à laquelle une valeur monétaire importante est attribuée. Pour une analyse détaillée de l'évaluation des coûts externes associés au trafic routier en Région de Bruxelles-Capitale, nous renvoyons à l'étude « Mobilité durable en région bruxelloise » [Favrel *et al.* (2001)]. Les dommages relatifs à la pollution photochimique partiellement générées par le trafic automobile sont analysés au paragraphe suivant.

III.5 Evaluation des dommages associés à la pollution photochimique

L'évaluation des dommages associés à la pollution photochimique a fait l'objet d'une analyse spécifique dans le cadre du projet « Véhicules électriques et hybrides: une mesure pour réduire l'ozone troposphérique? ». Les développements méthodologiques nécessaires pour cette partie du projet ont été menés en synergie avec le projet « Mobilité durable en région bruxelloise » financé par les SSTC et également mené au CEESE. Une collaboration avec le groupe de modélisation numérique du Laboratoire de Pollution Atmosphérique et des Sols à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne a été mise en place pour pouvoir mener à bien cette partie du projet.

Dans le cadre de ce rapport, nous présentons tout d'abord les développements méthodologiques qui ont été nécessaires avant de résumer les applications qui en ont été faites.

III.5.1 Méthodologie générale

Afin d'évaluer les impacts associés à la pollution photochimique en termes d'effets néfastes sur la santé publique, de détérioration des matériaux, d'atteintes à la végétation et aux cultures agricoles par exemple, la méthodologie développée dans le cadre de cette recherche repose sur l'évaluation du **coût des dommages**. Également connue sous le nom d'approche du chemin d'impact, cette méthodologie trace le passage d'un polluant depuis l'endroit où il est émis jusqu'à l'impact final en suivant une série logique d'étapes. L'évaluation des effets externes générés par les transports est alors le résultat d'une analyse qui comporte quatre étapes principales représentées à la Figure 14:

- **Emissions:** estimation des quantités de polluants rejetées par les sources sur base de paramètres spécifiques au trafic (intensité, composition du parc de véhicules, fonctions de consommation et d'émission de polluants, etc);
- **Immissions:** calcul de l'accroissement résultant des concentrations en polluants dans les régions affectées à l'aide notamment de modèles de dispersion atmosphérique;
- **Dommages physiques:** caractérisation de la population ou des récepteurs exposés à une augmentation incrémentale de la pollution. Cette étape nécessite l'identification de fonctions «exposition-réponse» adéquates. Il s'agit de fonctions qui mettent en relation les concentrations en un endroit (exposition) avec le dommage physique qui en résulte (par exemple, le nombre de cas d'admission à l'hôpital dus à une augmentation de la concentration en ozone). La forme de cette fonction varie suivant des mécanismes spécifiques aux dommages.
- **Impacts monétaires:** Il s'agit de l'évaluation économique des impacts déterminés précédemment (par exemple, la multiplication par le coût d'une admission à l'hôpital donne le coût du dommage). La méthode d'évaluation des dommages en terme monétaire diffère selon les impacts considérés.

Cette approche classique a notamment été préconisée dans le cadre du projet ExternE («Externalities of Energy») lancé en 1991 par la Commission Européenne pour évaluer les

externalités environnementales dans le secteur de l'énergie [Commission Européenne (1995)] et étendu par la suite aux activités de transport [Commission Européenne (1998)].

L'approche méthodologique suivie pour l'évaluation des impacts de la pollution photochimique s'inspire de celle développée dans le cadre du projet ExternE. S'agissant de suivre la séquence « émissions – immissions - dommages physiques - impacts monétaires », des méthodologies spécifiques ont dû être développées pour chacune des étapes compte tenu des échelles spatio-temporelles concernées et des processus physiques et chimiques à intégrer dans l'analyse.

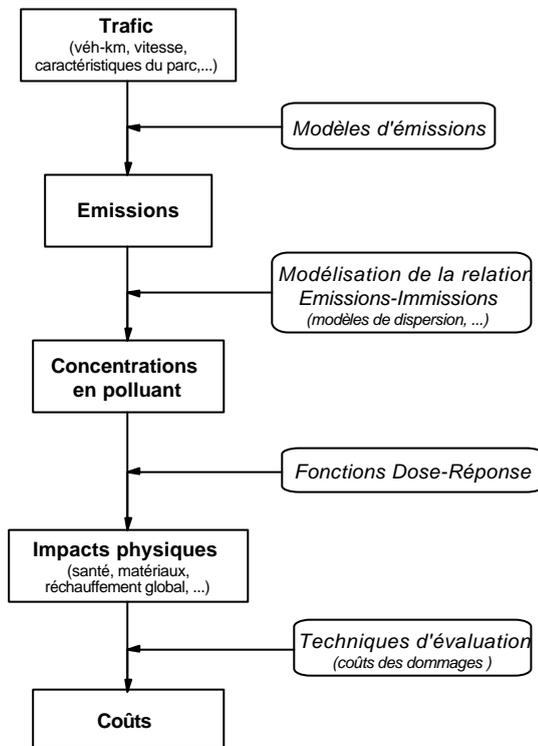


Figure 14 : Méthode du coût des dommages pour l'évaluation des impacts associés à la pollution atmosphérique.

En particulier, la modélisation de la relation « émissions-immissions » nécessite une approche spécifique dans le cas de la pollution photochimique qui demande de recourir à des modèles déterministes de dispersion des polluants ainsi qu'à des modèles chimiques pour pouvoir rendre compte des phénomènes physiques et chimiques intervenant aux échelles spatiales et temporelles caractéristiques de la pollution photochimique.

Au terme d'un recensement des modèles existants, notre choix s'est porté sur **le modèle METPHOMOD** (METeorology and PHOtochemistry MODel) [Perego (1996)] développé par le groupe de modélisation numérique du Laboratoire de Pollution Atmosphérique et des Sols (LPAS) à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). Ce choix a été fait en raison du compromis complexité-précision acceptable de ce modèle ainsi que de sa relative convivialité par rapport aux autres modèles sur le marché. Une collaboration a pu être mise en place avec les responsables du LPAS et un programme de travail a été établi pour la réalisation de simulations d'épisodes photochimiques autour de Bruxelles.

Dans les paragraphes qui suivent nous décrivons brièvement les approches retenues pour chaque étape de la séquence d'évaluation décrite plus haut en commençant par une description des principales caractéristiques du modèle METPHOMOD qui est l'élément central de l'approche développée.

III.5.2 Principales caractéristiques du modèle METPHOMOD

Le modèle METPHOMOD est un modèle eulérien tridimensionnel de type prognostique qui modélise les phénomènes aux échelles locale et régionale. Il permet la simulation d'épisodes de smog estivaux et réalise un couplage complet entre les processus météorologiques et la chimie en phase gazeuse. Le modèle comprend des modules spécifiques pour la dynamique de l'atmosphère, la turbulence atmosphérique, le transport des polluants, la chimie en phase gazeuse, les transferts de chaleur radiatifs ainsi que les interactions de surface dont les émissions et la déposition des gaz.

Le module de **calcul de la chimie en phase gazeuse** inclus dans METPHOMOD est basé sur le mécanisme chimique RACM [Stockwell *et al.* (1997)] qui a succédé au mécanisme RADM 2 [Stockwell *et al.* (1990)] largement reconnu. Pour reproduire au mieux la grande complexité des réactions chimiques intervenant dans la formation des composés photochimiques, le mécanisme RACM inclut 73 espèces chimiques et 232 réactions.

La modélisation de la pollution atmosphérique telle que réalisée par METPHOMOD repose sur une discrétisation de l'espace suivant des volumes élémentaires constituant les « mailles » du domaine (ou grille) de calcul considéré. Pour chacune de ces mailles, la résolution des équations de la dynamique des fluides et de conservation des différentes espèces chimiques en présence permet de déterminer les différentes variables météorologiques (température, vent, humidité, pression, etc.) ainsi que les concentrations des différents composés chimiques (plus de 70) considérés.

METPHOMOD utilise la technique du '**multi-nesting**' consistant à définir une grande grille d'étude autour d'un plus petit domaine de calcul centré sur la ville d'intérêt, et ce, afin de s'affranchir des conditions de bords du petit domaine. Dans le cadre de notre étude, nous avons défini deux domaines de calcul centrés sur Bruxelles: un grand domaine de 300 km de côté décomposé en mailles de 6km sur 6km et un petit domaine de 120 km de côté décomposé en mailles de 3km sur 3km.

Seuls les épisodes photochimiques sont analysés. Nous avons, sur base de l'analyse de l'état de la pollution par l'ozone en 1998, mis en évidence deux épisodes: un premier durant le mois de mai (11, 12 et 13 mai) et un second durant le mois d'août (10, 11 et 12 août). Nous avons choisi d'analyser en priorité ce dernier épisode qui est le plus manifeste.

Une des caractéristiques importantes de ce type de modèles de pollution photochimique est la quantité importante de **données requises** pour leur mise en oeuvre. En effet, pour chacune des mailles définies sur les deux domaines, il s'agit de fournir les différentes données suivantes : des données d'émissions et des données météorologiques horaires ainsi que des données de topographie et d'occupation des sols. Les données météorologiques utilisées pour l'initialisation du modèle et la définition des conditions de bord sont issues des radiosondages effectués deux fois par jour à Zaventem. Pour les données de topographie et d'occupation des sols nécessaires pour le calcul des champs météorologiques sur les deux domaines définis, nous utilisons les données fournies par l'USGS (U.S. Geological Survey) avec une résolution d'un km². En ce qui concerne les données d'émissions, nous décrivons dans le paragraphe suivant la méthodologie mise en oeuvre pour fournir au modèle les données requises au format requis.

III.5.3 Etablissement des cadastres d'émissions pour la Belgique

Il s'agissait dans un premier temps de construire un cadastre d'émissions représentatif de la situation actuelle considérée comme 'cas de référence'. Par rapport à ce cas de référence, différents scénarios alternatifs ont ensuite été construits et analysés de façon à comparer différentes stratégies de réduction des émissions de gaz précurseurs.

Les cadastres d'émissions construits intègrent 36 composés chimiques: le méthane, le monoxyde de carbone, le monoxyde d'azote, le dioxyde d'azote, le dioxyde de soufre ainsi que 31 espèces de composés organiques volatils non-méthaniques.

Toutes les sources d'émissions sont prises en compte: trafics routier et aérien, industries (notamment incinérateurs et centrales thermiques), chauffage, agriculture et sources biogéniques (forêts, parcs, etc.) qui ont une contribution très importante en terme

d'émissions de COV. La raison de cette exhaustivité réside dans la nature hautement non-linéaire des phénomènes conduisant à la formation d'ozone qui empêche de considérer isolément une source de pollution.

Pour les calculs par METPHOMOD, les données d'émissions doivent être fournies pour chaque heure de l'épisode considéré (3 jours) et pour chaque maille de la grille de calcul (1600 mailles de 3 km de côté pour la petite grille, par exemple).

Afin d'obtenir les émissions horaires souhaitées pour les 36 espèces chimiques considérées par le modèle METPHOMOD sur la grille de calcul requise, un triple traitement a été effectué sur les données d'émissions disponibles :

- un traitement spatial pour convertir les émissions, généralement fournies par entités administratives (communes ou arrondissement par exemple), au niveau de chaque maille d'une grille superposée au domaine étudié;
- un traitement temporel ayant pour but de convertir les émissions annuelles en émissions horaires ;
- une différenciation suivant les espèces chimiques de certaines émissions (NOx et COV) fournies sous forme agrégée via l'utilisation de 'profils d'espèces' spécifiques à chaque type de source (transport, industrie, biogénique, agriculture, etc.).

A titre d'exemple nous présentons à la Figure 15, la grille d'émissions horaires correspondant aux émissions de NO du transport pour la zone d'étude à 10h un jour ouvrable d'août 1998. Cette figure permet également de visualiser l'étendue de la zone géographique considérée pour l'analyse.

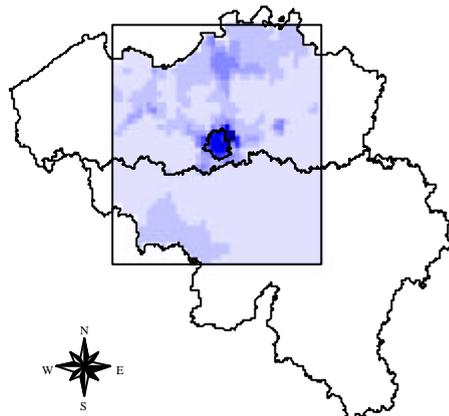


Figure 15 : Emissions de NO associées au transport. Grille d'émissions horaires pour un jour ouvrable d'août 1998 à 10h pour le petit domaine d'étude.

III.5.4 Quantification des impacts physiques et monétaires

Comme exposé précédemment, la quantification des impacts associés à la pollution photochimique nécessite le recours à des fonctions exposition-réponse appropriées ainsi qu'à des évaluations monétaires des effets considérés.

III.5.4.1 Fonctions exposition-réponse

L'évaluation monétaire des effets de la pollution photochimique menée dans le cadre de ce projet s'est limitée aux effets pour lesquels des fonctions exposition-réponse significatives sont disponibles. De plus, s'agissant de l'analyse d'un épisode de pollution photochimique, seuls les effets aigus de l'ozone – c'est-à-dire ceux survenant durant l'épisode ou dans les quelques jours qui suivent - ont été intégrés. L'analyse des effets à long terme, qui sont liés à

des concentrations moyennes élevées sur des périodes de temps plus longues, ne peut pas être dérivée des données relatives à l'épisode et des simulations réalisées. Elle nécessite une approche spécifique beaucoup plus complexe encore du point de vue de la modélisation.

En conséquence, l'analyse des dommages s'est limitée au deux **effets sanitaires** suivants:

- **La mortalité à court terme toutes causes confondues** - c'est-à-dire les décès survenant au cours de l'épisode considéré ou immédiatement après celui-ci – pour laquelle une association statistiquement significative a pu être mise en évidence et un risque relatif moyen de 1,027 pour une augmentation de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de la concentration moyenne sur 8 heures a été dérivé de différentes études.
- **Les admissions à l'hôpital pour cause respiratoire**, largement étudiées notamment dans le cadre du projet APHEA qui a permis d'établir des fonctions exposition-réponse exprimées en fonction de la concentration moyenne sur 8 heures [Spix et al. (1998)].

En ce qui concerne les **effets sur la végétation**, seuls les effets à long terme – diminution des rendements agricoles et détérioration des forêts – ont été abondamment étudiés. Leur évaluation sort néanmoins du cadre de l'analyse d'un épisode photochimique telle que proposée ici.

La même remarque vaut également pour les **effets à long terme sur les matériaux** en termes de dégradation des polymères (peintures, plastiques, caoutchouc). Ils ne sont pas comptabilisés dans le cadre de cette analyse.

III.5.4.2 Quantification des impacts en termes monétaires

L'évaluation monétaire des dommages survenant au cours d'un épisode photochimique est, dans un premier temps, réalisée pour chaque maille (1600 au total) individuellement et pour chaque jour de l'épisode considéré. Les effets sont ensuite additionnés sur l'ensemble des mailles couvrant la zone étudiée et pour l'ensemble des jours de l'épisode.

Pour une maille, outre la connaissance de fonctions exposition-réponse adéquates, la quantification des impacts se base sur deux facteurs : la concentration moyenne en ozone calculée sur 8 heures d'une part, et la densité de population, d'autre part. Les concentrations moyennes sur 8 heures sont calculées pour chaque jour de l'épisode sur base des résultats fournis par METPHOMOD. Les densités de population par maille sont calculées à partir des statistiques de population de l'INS réparties par maille via Arcview. Les fonctions exposition-réponse retenues utilisant la population totale comme population de référence, aucune classe d'âges n'a été distinguée pour l'évaluation des dommages sur la santé.

Sur base de l'évaluation du nombre de cas pour les différentes manifestations sanitaires retenues, les **dommages en terme monétaire** sont obtenus en multipliant ceux-ci par le coût qui peut être attribué à chaque effet. En ce qui concerne la **mortalité à court terme**, l'approche du nombre d'années de vie perdue a été adoptée. Une valeur de 98000 € est retenue pour une année de vie perdue. On estime par ailleurs que les décès qui surviennent à la suite d'une exposition à de fortes concentrations en ozone serait survenu naturellement, en moyenne 9 mois plus tard. Le coût lié aux **admissions à l'hôpital** pour cause respiratoire est estimé sur base du coût réel facturé pour ces interventions. ExternE donne la valeur de 7870 € par admission hospitalière.

L'évaluation des dommages en termes monétaires diffère sensiblement selon que l'on fait ou non l'hypothèse de l'existence d'un **seuil** en-dessous duquel on peut considérer les concentrations en ozone dans l'air ambiant comme n'ayant aucun effet sur la santé. Les informations que l'on trouve dans la littérature penchent en faveur de la non-existence d'un seuil. En d'autres mots, cela signifie que l'on pourrait considérer que les effets de l'ozone sur la mortalité et sur les admissions à l'hôpital pour cause respiratoire se font sentir dès les premiers μg d'ozone, c-à-d y compris pour des concentrations « habituelles » d'ozone dans l'air. A titre indicatif cependant, dans nos évaluations, nous avons considéré les deux approches. La première considère l'existence d'un seuil sans effet de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La deuxième présente l'évaluation des dommages dans l'hypothèse plus vraisemblable de l'absence de seuil.

III.5.5 Analyse de la situation de référence

III.5.5.1 Description de l'épisode choisi

Avant d'analyser différentes stratégies de réduction des émissions de précurseurs, le modèle a été calibré pour une situation de référence correspondant à un épisode représentatif des maxima de pollution pouvant apparaître sur la région étudiée.

Dans le cadre de cette étude, la situation de référence analysée correspond à l'épisode de pollution photochimique survenu les 10, 11 et, dans une moindre mesure, 12 août 1998. Nous présentons à la Figure 16 l'évolution de la concentration d'ozone, de la température et du vent observés à Uccle entre les 5 et 17 août 1998. L'épisode y apparaît clairement avec deux jours successifs – les 10 et 11 août – des dépassements du seuil de protection de la végétation fixé à 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Sur base des observations, nous voyons que cet épisode peut être mis en relation avec des températures (et donc un ensoleillement) très élevées – dépassant les 35°C – et des vitesses de vent faibles. La fin de l'épisode, le 12 août, se caractérise par l'apparition d'un vent plus fort et de températures plus faibles qui ramènent les concentrations d'ozone aux alentours des 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

III.5.5.2 Simulations

Les simulations ont été réalisées au Laboratoire de Pollution Atmosphérique et du Sol (LPAS) de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) où le modèle METPHOMOD a été développé. La mise en oeuvre de celles-ci a nécessité le séjour de deux mois d'un chercheur du CEESE à l'EPFL pour préparer et calibrer le modèle, calculer les champs météorologiques et la chimie pour le scénario de référence. Pour les calculs chimiques relatifs aux scénarios alternatifs, les données sont préparées au CEESE et les calculs réalisés à l'EPFL.

En ce qui concerne la **modélisation des champs météorologiques**, les simulations ont permis de montrer une bonne correspondance entre les valeurs calculées et celles mesurées aux différentes stations météorologiques couvrant le territoire considéré autour de la Région de Bruxelles-Capitale. La concordance est bonne pour la température et l'humidité. Pour le vent, par contre, la concordance est moins marquée à partir de l'après-midi du deuxième jour (le 11 août) où le vent calculé est plus fort que celui observé.

Le **calcul de la chimie** conduit à un maxima d'ozone de 184 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ le 10 août et de 182 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ le 11 août. Comme on peut l'observer à la Figure 17, ces zones où le seuil d'information de la population de 180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ est dépassé se situent au nord-est du domaine à la limite supérieure de celui-ci. Ceci indique que le nuage de pollution généré au-dessus des grandes agglomérations telles que Bruxelles et Anvers a été poussé par les vents dominants de sud-ouest.

Les réactions chimiques conduisant à la formation d'ozone nécessitant un certains temps pour se produire, on observe alors la pollution secondaire à quelques dizaines de kilomètres sous le vent par rapport à ces sources importantes d'émissions. Au niveau de ces sources, on observe des concentrations maximales d'ozone plus faibles de l'ordre de 145 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en Région de Bruxelles-Capitale et 133 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à Anvers où l'effet destructeur dominant des polluants primaires apparaît clairement.

Les résultats indiquent que le modèle semble sous-estimer les niveaux d'ozone maximum au niveau de Bruxelles. Ceci peut s'expliquer par les vitesses de vent trop importantes à partir de l'après-midi du deuxième jour mises en évidence au niveau de l'analyse des paramètres météorologiques.

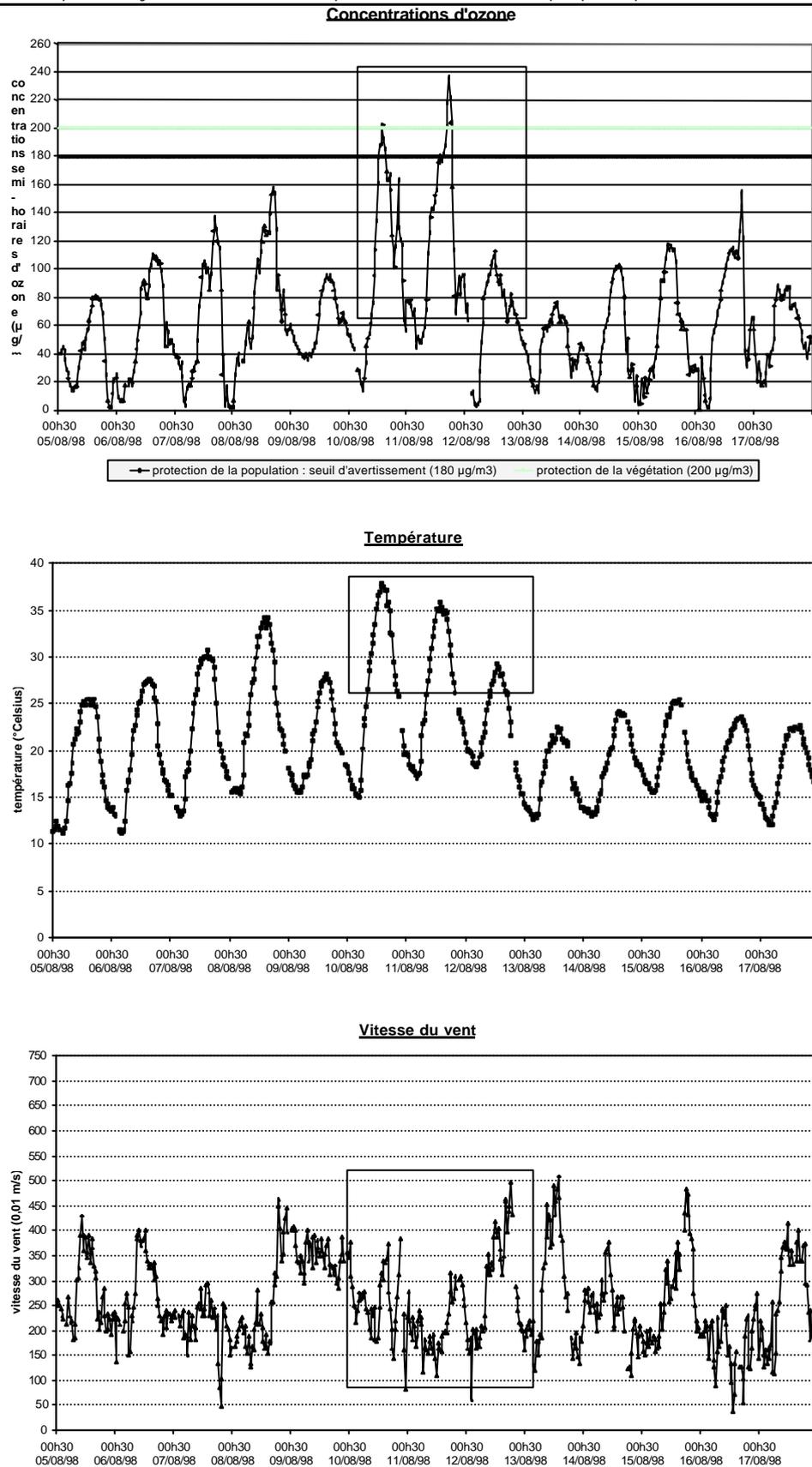


Figure 16 : Episode de pollution photochimique du mois d'août 1998. Concentration d'ozone, température et vitesse du vent observés à Uccle.

Concentration horaire maximale d'ozone [e cours de l'épisode photochimique des 10 e

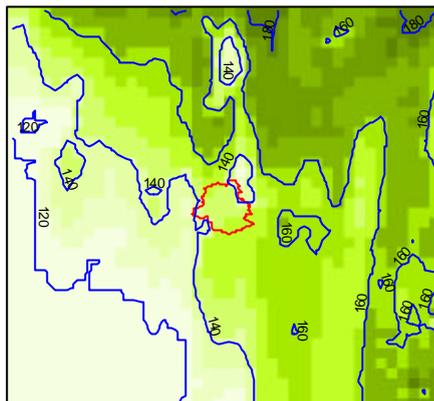


Figure 17 : Champs des concentrations maximales d'ozone (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) au cours de l'épisode des 10 et 11 août 2001.

Comme précisé précédemment, le **calcul des dommages** sur la santé est basé sur les concentrations moyennes sur 8 heures. Celles-ci sont représentées à la Figure 18.a pour la journée du 10 août 1998. Les contours iso-concentrations sont représentés. Nous voyons que les valeurs les plus élevées (au-delà des $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne) se situent à l'est et au nord-est du domaine avec des maxima observés au nord-est d'Anvers et un peu plus au sud pour l'agglomération de Liège. En ce qui concerne les grandes agglomérations, nous voyons qu'elles sont exposées à des niveaux moyens sensiblement plus faibles que ces valeurs maximales. Anvers est exposée à des concentrations moyennes situées entre 100 et $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ alors que la région bruxelloise est soumise à des niveaux un peu plus élevés de 100 à $135 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Toute la partie sud-ouest est exposée à des niveaux moyens inférieurs à $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$, les minima étant observés pour l'agglomération montoise où la moyenne sur 8 heures est inférieure à $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En termes de dommages, dans la situation de référence, les coûts associés à la mortalité aiguë et aux admissions à l'hôpital pour causes respiratoires sont résumés au tableau suivant pour les deux hypothèses relatives à l'existence d'un seuil :

	Sans seuil	Avec seuil de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$
Nombre total de décès sur l'épisode :	27 cas	5 cas
Coût associé :	2,01 M€	0,35 M€
Nombre total d'admissions à l'hôpital :	22 cas	3 cas
Coût associé :	0,17 M€	0,03 M€
Total :	2,18 M€	0,37 M€

Dans l'hypothèse la plus communément admise d'une absence de seuil, nous voyons que les coûts externes s'élèvent à plus de 2,2 M € pour 0,4 M € dans le cas où un seuil d'effet de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ est considéré. Nous remarquons également que les coûts des dommages sont nettement dominés par les coûts de mortalité aiguë à plus de 80%. Rappelons que les chiffres présentés au tableau ci-dessus ne se rapportent pas à la Belgique prise dans son entièreté mais se réfèrent à une zone carrée de $120 \text{ km} \times 120 \text{ km}$ centrée sur Bruxelles.

Géographiquement, nous voyons à la Figure 18.b que les dommages sont surtout répartis dans les zones de densité de population importante. Pour le domaine considéré, il s'agit des agglomérations d'Anvers, de Bruxelles et de Charleroi. Les dommages totaux pour la Région de Bruxelles-Capitale sont évalués à 372.704 € pour l'épisode des 10 et 11 août 1998, soit plus de 15 MBEF pour cet épisode. Ces coûts sont loin d'être négligeables surtout si l'on considère que ce type d'épisode peut se multiplier au cours des périodes estivales.

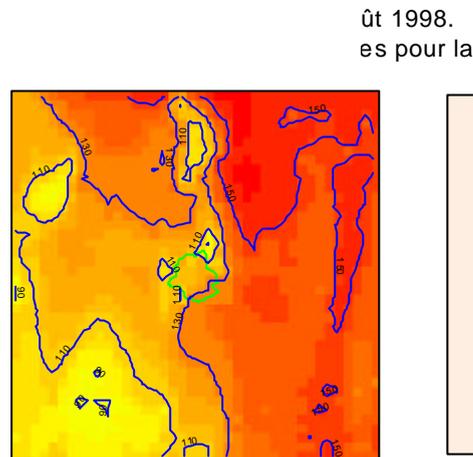


Figure 18 : Concentrations d'ozone moyennes sur 8 heures (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) calculées pour le 10 août 1998 et répartition géographique des dommages sur la santé.

III.5.6 Analyse de scénarios de réduction des émissions de précurseurs

III.5.6.1 Vers une définition de stratégies de réduction de la pollution photochimique

La recherche de stratégies optimisées visant à réduire les niveaux de concentrations d'ozone se fait souvent par le biais de diagrammes isopleth. Ce type de diagramme repose sur l'évaluation des concentrations d'ozone pour une zone déterminée en fonction des réductions appliquées aux émissions de COV et de NOx sur l'ensemble du domaine considéré. Les concentrations d'ozone sont reportées dans un diagramme NOx-COV par niveau d'iso-concentration. La Figure 19 présente un diagramme isopleth type.

Ce diagramme met en évidence l'existence de deux régimes. Ainsi, pour des niveaux riches en NOx et pauvres en COV (domaine situé en haut à gauche du diagramme), une diminution des niveaux de NOx à niveau constant de COV induit une augmentation du taux d'ozone. On parle de régime 'limité par les COV'. A l'inverse, pour des niveaux pauvres en NOx et riches en COV (domaine situé en bas à droite du diagramme), le fait de diminuer les NOx à niveau constant de COV induit une diminution des niveaux d'ozone. Ce second régime correspond au régime 'limité par les NOx' et se caractérise par une faible sensibilité des concentrations d'ozone aux sources de COV.

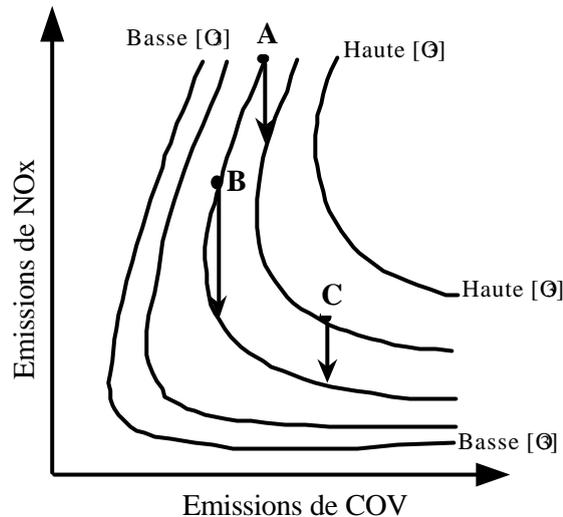


Figure 19 : Diagramme isopleth

La position d'une zone déterminée dans le diagramme indique en théorie la stratégie à adopter afin de réduire la pollution par l'ozone :

1. réduction des émissions de COV pour un point de référence situé dans le régime limité par les COV ;
2. réduction des émissions de NOx pour un point de référence situé dans le régime limité par les NOx ;
3. réduction simultanée des émissions de COV et de NOx pour un point de référence situé dans la zone de transition entre ces deux régimes.

III.5.6.2 Définition des scénarios considérés

Le temps de calcul nécessaire pour traiter un cas de chimie sur la grille de calcul centrée sur Bruxelles à l'aide de METPHOMOD étant relativement important (environ 2 jours), une sélection s'est avérée nécessaire au niveau du choix des scénarios spécifiques qui ont été évalués.

Dans un premier temps, nous avons donné la priorité à une analyse relativement générale permettant d'évaluer l'impact de politiques globales de réduction des précurseurs d'ozone (NOx et COV) de façon à établir l'efficacité réelle de telles politiques par rapport à la situation existante. Le but était de faire une analyse stratégique générale plutôt que de considérer un scénario très (trop) particulier qui risque de ne pas éclairer utilement les décideurs politiques sur les mesures à prendre pour combattre la pollution photochimique dans et autour de Bruxelles.

Dans ce cadre général, il s'agit par exemple d'évaluer des scénarios où les émissions globales en Région de Bruxelles-Capitale (toutes sources confondues) sont réduites de 10, 20 ou 50% pour les NOx et/ou les COV. On peut alors positionner la situation actuelle en région bruxelloise sur une abaque d'iso-concentration en ozone en fonction des émissions de NOx et de COV et évaluer quelle stratégie est la plus appropriée dans le cas spécifique de Bruxelles. Rappelons en effet qu'en raison de la complexité des phénomènes intervenant dans la formation de l'ozone et du nombre important de réactions de formation et de destruction qui interviennent, une politique de réduction des émissions de précurseurs d'ozone - NOx et COV principalement – peut conduire à des variations en sens divers – pas toujours désirables - des niveaux locaux de concentration en ozone.

Il est alors possible, dans un second temps, d'évaluer les effets potentiels de certaines mesures plus spécifiques relatives aux changements des caractéristiques émissives de la flotte de véhicules, à des transferts modaux ou à des réductions de la demande de déplacements sur base d'une estimation des réductions de gaz précurseurs que ces mesures permettent.

Trois scénarios de stratégie générale ont été définis :

- Le scénario 1 considère une réduction de 50% des émissions d'oxydes d'azote dans la Région de Bruxelles-Capitale.
- Le scénario 2 considère une réduction de 50% des émissions globales de composés organiques volatils.
- Le scénario 3 considère alors une réduction simultanée de 50% des émissions d'oxydes d'azote et de composés organiques volatils.

Ces scénarios ont comme principal objectif de permettre d'identifier les zones contrôlées par les NOx, par les COV ou par les 2, c'est-à-dire se positionner sur le graphe des isopleth de concentrations d'ozone présenté précédemment.

Le modèle utilisé pour l'établissement du cadastre d'émissions dans le cas de référence a permis de déduire les concentrations en ozone qui auraient été observées dans chaque maille les 10 et 11 août 1998 si les émissions de précurseurs avaient été réduites de 50 % (soit chacun des précurseurs séparément, soit les deux en même temps). Les autres facteurs ayant une influence directe sur les concentrations ont été gardés constant : ensoleillement, vent, occupation du sol, etc.

Sur base des nouvelles grilles de concentration, les mêmes calculs d'évaluation des dommages que ceux utilisés pour le cas de référence ont été entrepris. Les résultats sont présentés ci-dessous.

III.5.6.3 Principales sources d'émission

Avant de procéder à l'analyse proprement dite des scénarios décrits au paragraphe précédent, il est bon de rappeler quelles sont les principales sources responsables des émissions des précurseurs incriminés ainsi que les poids respectifs de ces différentes sources dans les émissions globales.

III.5.6.3.a Les émissions de NOx

Les émissions de NOx sont dues principalement au transport routier qui est responsable de 57 % des émissions³⁷. Suivent : le secteur énergétique (21 %) et l'industrie (15 %). Les secteurs résidentiel et tertiaire (y compris l'agriculture) contribuent à concurrence de 3 % et 2 % respectivement.

Le secteur des **transports** est donc le plus important, non seulement par son poids dans les émissions globales mais aussi par sa croissance qui est plus forte que celle des autres secteurs. Les mesures ayant pour effet de réduire les émissions liées au transport incluent l'installation de pots catalytiques sur les voitures à essence (rendue obligatoire sur les nouvelles voitures depuis 1993 par la directive 91/441), le renforcement des limites d'émission y compris sur les moteurs diesel (prévu par le programme européen Auto-Oil) ou encore l'amélioration de la stabilité des performances des catalyseurs. Par ailleurs, d'autres types de mesures sont envisageables, allant de la réduction de la vitesse maximale effective sur autoroute à l'introduction de véhicules électriques.

Dans les **autres secteurs**, les principales contributions aux émissions proviennent des centrales électriques et des installations de combustion industrielles à très haute température. La priorité est donnée aux grandes installations et aux mesures primaires c-à-d agissant sur les conditions de combustion. Cela peut consister en l'installation de brûleurs « low NOx » dans les centrales existantes ou dans la mise au point de technologies de turbine à gaz à faibles émissions de Nox dans les nouvelles centrales TGV.

Dans les **secteurs résidentiel et tertiaire**, un abaissement des émissions est possible grâce aux progrès réalisés dans la conception des chaudières.

³⁷ Inventaire des émissions en Belgique en 1994, source : Corinair

III.5.6.3.b Les émissions de COV

L'analyse des émissions de COV est plus complexe que celle des Nox parce que ces émissions proviennent d'un grand nombre d'applications dont la contribution globale est faible et que les sources d'émission sont généralement hétérogènes.

Ainsi, les différentes espèces de COV n'ont pas le même impact sur la formation de l'ozone.

Comme pour les Nox, le **transport routier** est le secteur dominant des émissions de COV avec 52 % des émissions et cela essentiellement à cause des véhicules à essence. La mesure de réduction la plus efficace semble être ici aussi le pot catalytique. La pénétration accrue des voitures diesel semble contribuer à la limitation des émissions de COV. Des mesures en ce qui concerne la mobilité des véhicules pourraient aussi être envisagées. A la différence des Nox, celles-ci concernent plutôt les déplacements urbains à faible vitesse et aux accélérations multiples, ainsi que les déplacements sur courte distance. Une autre poste important d'émissions de COV est l'évaporation d'essence des voitures, qui est estimé à 5% des émissions totales de COV en 1995.

Les **usages de solvants** (peinture, nettoyage, dégraissage et fabrication de produits chimiques) sont responsables de 24 % des émissions. Comme moyens de réduction, on peut envisager la substitution par des peintures en phase aqueuse par exemple, l'amélioration de l'application des peintures et le recours à des techniques d'abattement. En ce qui concerne le dégraissage, le captage des émissions par adsorption sur un filtre à charbon actif et le recours à un système fermé sont des moyens de réduire les émissions dont on attend beaucoup.

L'**industrie** entre en compte pour 15 % des émissions totales. L'essentiel provient des procédés chimiques, des raffineries de pétrole et des cokeries. Les principales mesures de réduction des émissions sont le monitoring et l'inspection des fuites, la combustion en torchère des échappements de gaz, l'incinération de gaz résiduels et l'installation de couvertures flottantes pour les stockages de produits.

Enfin, les émissions liées à la **distribution d'essence** peuvent être réduites via la récupération des vapeurs sur les installations de stockage et celles de **gaz naturel** par le renouvellement des réseaux de distribution. Elles participent à respectivement 3% et 1% des émissions totales. Les secteurs **tertiaire, résidentiel, agricole** représentent ensemble 3% des émissions.

III.5.6.3.c Réduction simultanée des émissions de COV et de NOx

Le scénario considérant une réduction simultanée des émissions de NOx et des COV est particulier. Les secteurs responsables des émissions de ces deux types de précurseurs ont été présentés plus haut. Nous pouvons immédiatement remarquer qu'une réduction des émissions liées aux transports est la seule stratégie à même de réduire simultanément et dans une proportion importante les émissions tant de COV que de Nox. L'industrie constitue également un domaine d'action important, vu que 15 % des émissions de COV et de NOx lui sont attribuables.

III.5.6.4 Analyse des scénarios

Les effets des différents scénarios de réduction des émissions de gaz précurseurs sur la pollution photochimique peuvent être évalués sur base de différents critères. Le Tableau 20 reprend ces différents critères d'évaluation et présente pour chacun d'eux : d'une part, les valeurs minimale, moyenne et maximale pour le cas de référence et ; d'autre part, pour les trois scénarios de réduction considérés, les valeurs minimale, moyenne et maximale, sur l'ensemble du domaine, des pourcentages d'évolution par rapport à la situation de référence.

Tableau 20: Analyse des scénarios de réduction des émissions de gaz précurseurs pour l'ensemble du domaine étudié.

Scénario	[O ₃] _{max} (µg/m ³)			[O ₃] _{moy 8 h} (µg/m ³)			[O ₃] _{moy 24h} (µg/m ³)			C. Ext. [M€]
	Min.	Moy.	Max.	Min.	Moy.	Max.	Min.	Moy.	Max.	Total
Cas de référence	120	149	184	88	131	162	45	105	134	2,18
1. -50% NOx	-12,6%	-3,3%	+15,5%	-14,3%	-5,3%	23,2%	-7,8%	+5,4%	+106%	-1,0%
2. -50% COV	-12,7%	-3,7%	+19,7%	-11,2%	-4,0%	+21,8%	-7,0%	+5,3%	+108%	+0,6%
3. -50% NOx+COV	-13,9%	-3,7%	+24,6%	-11,3%	-3,6%	+30,2%	-6,7%	+5,8%	+108%	+1,0%

III.5.6.4.a Concentrations horaires maximales

Ce critère caractérise la valeur de pic observée au cours de l'épisode. Cette valeur est notamment utilisée pour définir les seuils d'information (180 µg/m³) et d'alerte (360 µg/m³) de la population ainsi que le seuil de protection de la végétation qui est fixé à 200 µg/m³.

En terme de concentrations horaires maximales observées sur le domaine, les trois scénarios conduisent à des valeurs plus faibles du maxima de concentration sur le domaine étudié. Par rapport aux 184 µg/m³ observés pour le cas de référence, c'est le scénario 2 qui conduit à la réduction la plus importante avec 172 µg/m³ (-6,5%), suivi du scénario 3 avec 174 µg/m³ (-5,4%). Le scénario 1 semble le moins efficace sur base de ce critère avec 177 µg/m³ (-4%).

Si on considère ce qui se passe sur l'ensemble du domaine, on remarque au Tableau 20 que, en moyenne sur l'ensemble du domaine, c'est les scénarios 2 et 3 qui permettent les diminutions les plus grandes des concentrations maximales horaires avec -3,7% en moyenne, soit légèrement mieux que le scénario de réduction des émissions de NOx qui permet une diminution de 3,3% de ces concentrations maximales.

La réduction des émissions des COV semble avoir un impact légèrement supérieur sur ce critère que la réduction des NOx. La réduction combinée des émissions de NOx et de COV a globalement le même effet que la réductions des émissions de COV seules.

III.5.6.4.b Concentrations moyennes sur 8 heures

C'est sur la concentration moyenne sur 8 heures maximale pour chaque jour - qui dans notre cas est calculée entre 12h et 20h - qu'est basé la définition du seuil de protection de la santé publique fixé à 110 µg/m³. Comme on le voit au Tableau 20, concernant les concentrations moyennes sur 8 heures, les trois scénarios considérés permettent en moyenne d'améliorer la situation. Les simulations montrent que le scénario qui apparaît globalement comme le plus favorable à la diminution de ces concentrations est celui des réductions d'émissions de NOx qui permet une diminution de 5,3% en moyenne sur le domaine. Les réductions de 50% des émissions de COV permettraient quant à elles une amélioration de l'ordre de 4%. Les réductions combinées des émissions de NOx et de COV sont moins favorables avec 3,6% en moyenne d'amélioration des concentrations moyennes sur 8 heures.

III.5.6.4.c Concentrations moyennes sur 24 heures

En ce qui concerne ce critère caractéristique des atteintes aux cultures et à la végétation, nous constatons au Tableau 20 que le seuil de $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ est en moyenne largement dépassé dans la situation de référence. Par rapport à cette situation, les trois scénarios considérés conduisent à des valeurs plus élevées de ce paramètre. Les augmentations relatives aux trois scénarios sont relativement proches les unes des autres et varient de 5,3% pour la réduction des émissions de COV à 5,8 % pour la réduction simultanée des COV et des NOx. Le scénario de réduction des NOx seuls conduit à un accroissement des concentrations moyennes sur 24h de 5,3% en moyenne sur le domaine.

III.5.6.4.d Répartition géographique des effets des scénarios de réduction

La répartition géographique des effets des scénarios de réduction sur les concentrations moyennes sur 8 heures est présentée pour les trois scénarios aux Figures 20, 21 et 22. Trois zones de couleurs sont mises en évidence :

- Une zone de couleur bleue représentant les zones géographiques pour lesquelles le scénario considéré entraîne des diminutions des concentrations ;
- Une zone de couleur blanche représentant les zones géographiques pour lesquelles le scénario considéré entraîne de faibles (moins de 1%) évolutions positives ou négatives des concentrations ;
- Une zone de couleur rouge représentant les zones géographiques pour lesquelles le scénario considéré entraîne des accroissements de concentrations.

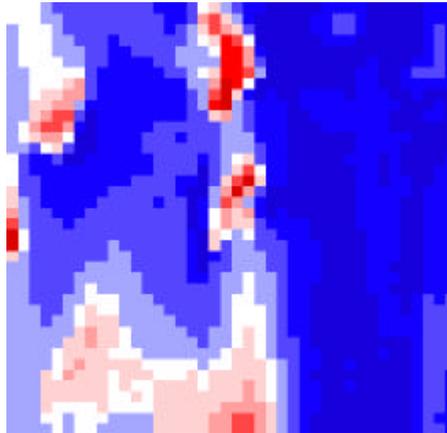
Pour les trois scénarios considérés, on peut observer sur ces figures des zones où les concentrations diminuent et d'autres où elles augmentent. Ces dernières sont principalement centrées sur les zones urbaines et/ou industrielles. On peut notamment mettre en évidence les zones d'Anvers, de Gand et de Bruxelles, l'axe Charleroi-Nivelles ainsi que la zone fortement urbanisée dans les zones de La Louvière et de Mons-Borinage. Dans ces zones, les accroissements des pics d'ozone sous l'effet des réductions des émissions de précurseurs à Bruxelles peuvent dépasser les 25% à certains endroits (principalement à Anvers et Bruxelles).

Dans le cas du scénario 1 de réduction des émissions de NOx à Bruxelles, la Figure 20 met en évidence les zones où les diminutions des concentrations d'ozone peuvent être décrites comme caractéristiques d'un régime limité par les NOx. Dans la littérature, ce régime est dit caractéristique des régions rurales ou éloignées, ce qui est confirmé par nos résultats. A l'inverse, les zones où des accroissements de concentration d'ozone sont observés, sont caractérisées par un régime saturé en NOx, typique des zones urbaines. Enfin, les zones où de faibles variations des concentrations sont observés se trouvent à la limite entre les deux régimes. Cette situation est caractéristique des zones rurales perturbées, que l'on peut également qualifier de péri-urbaines. L'ensemble de ces résultats est en parfait accord avec les informations disponibles relatives aux mécanismes de formation, destruction et dispersion de l'ozone troposphérique.

En ce qui concerne le scénario de réduction des émissions de COV, la Figure 21 met en évidence des zones de diminution et d'accroissement des concentrations d'ozone sensiblement comparables à celles observées pour les réductions de NOx, ce qui indique que ces zones sont également sous un régime saturé en COV.

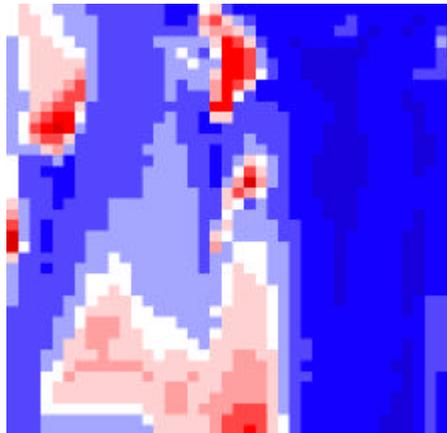
Scénario 1: NO_x -50% en RI

Figure 20 : Comparaison des concentrations moyennes sur 8 heures pour le scénario 1 et la situation de référence. Les variations sont indiquées en %.



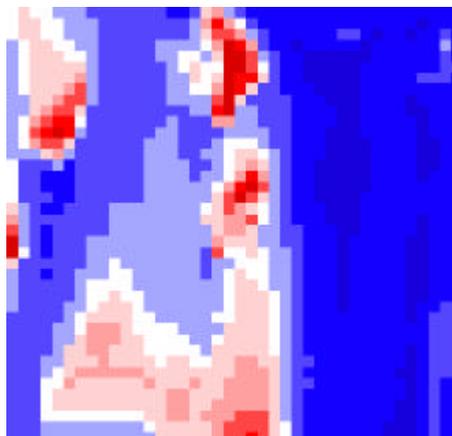
Scénario 2: COV -50% en RI

Figure 21 : Comparaison des concentrations moyennes sur 8 heures pour le scénario 2 et la situation de référence. Les variations sont indiquées en %.



Scénario 3: NO_x+ COV -50% en RI

Figure 22 : Comparaison des concentrations moyennes sur 8 heures pour le scénario 3 et la situation de référence. Les variations sont indiquées en %.



III.5.6.4.e Analyse comparative des différents scénarios de réduction

Comparaison des scénarios 1 et 2 : réduire les NOx ou les COV ?

La Figure 23 présente, pour chaque maille, la différence entre la concentration calculée dans le cas du scénario 2 avec celle calculée dans le cas du scénario 1. Si la différence est positive (dégradé de rouge sur la carte), cela signifie que le scénario 1 a été plus efficace en termes de réduction des concentrations d'ozone. A l'inverse si cette différence est négative (dégradé de vert sur la carte), c'est le scénario 2 qui a permis d'atteindre les diminutions les plus importantes.

On peut observer que, pour la plus grande partie du domaine étudié, la réduction des émissions de NOx en Région de Bruxelles-Capitale est plus efficace que celle des COV. Néanmoins, cette carte permet également de mettre en évidence une zone verte assez marquée le long de l'axe Bruxelles-Anvers ce qui indique que pour cette zone c'est la réduction des COV qui permet les réductions de concentration d'ozone les plus importantes. Cette analyse conduit donc à la conclusion qu'une réduction de la pollution photochimique ou tout au moins une augmentation moins importante des concentrations d'ozone autour de Bruxelles serait plus efficacement obtenue par une réduction des émissions de COV dans la capitale.

Comparaison des scénarios 1 et 3: réduire les NOx seuls ou réduire à la fois les NOx et les COV ?

La même démarche a été suivie. A la Figure 24 sont présentés, pour chaque maille, la différence entre la concentration mesurée dans le cas du scénario 3 avec celle mesurée dans le cas du scénario 1. Si la différence est positive (dégradé de rouge sur la carte), cela signifie que le scénario 1 a été plus efficace en termes de réduction des concentrations d'ozone. A l'inverse si cette différence est négative (zone verte sur la carte), c'est le scénario 3 qui a permis d'atteindre les diminutions les plus importantes.

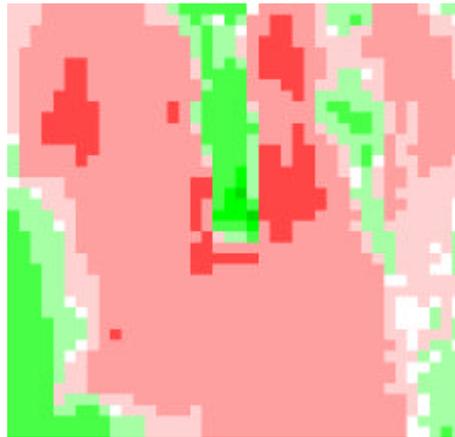
La carte fait apparaître des zones rouge à peu près partout ce qui penche en faveur du scénario de réduction des NOx. On peut voir que cette stratégie de réduction est particulièrement plus efficace que la réduction simultanée des NOx et des COV en zones urbaines et périurbaines, ce qui se marque par un rouge plus foncé pour les zones d'Anvers, Bruxelles et Gand notamment.

Comparaison des scénarios 2 et 3 : réduire les COV seuls ou réduire à la fois les NOx et les COV ?

La Figure 25 présente la comparaison entre les scénarios de réduction des émissions de COV et de réduction simultanée des COV et des NOx. On peut constater sur la carte présentée, que le domaine d'étude est principalement couvert par une zone blanche indiquant de très faibles différences entre les champs de concentrations calculés pour les deux scénarios. Seule apparaît une zone rouge le long de l'axe Bruxelles-Anvers indiquant que pour cette zone des diminutions de concentration plus importantes sont atteintes en réduisant uniquement les émissions de COV en Région de Bruxelles-Capitale. Cette dernière constatation est en accord avec nos conclusions pour la comparaison des scénarios 1 et 2.

Différence entre les scénarios 2 et 1 pour les concentrations moyennes sur 8 h d'ozone.

Figure 23 : Comparaison des concentrations moyennes sur 8 heures pour les scénarios 1 et 2. Les variations sont indiquées en $\mu\text{g}/\text{m}^3$.



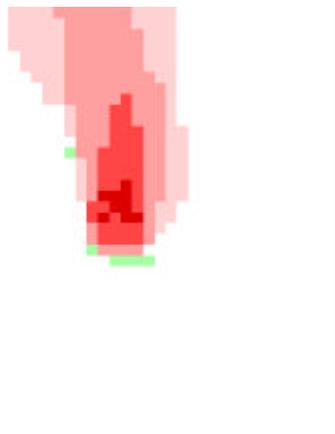
Différence entre les scénarios 3 et 1 pour les concentrations moyennes sur 8 h d'ozone.

Figure 24 : Comparaison des concentrations moyennes sur 8 heures pour les scénarios 1 et 3. Les variations sont indiquées en $\mu\text{g}/\text{m}^3$.



Différence entre les scénarios 3 et 2 pour les concentrations moyennes sur 8 h d'ozone.

Figure 25 : Comparaison des concentrations moyennes sur 8 heures pour les scénarios 2 et 3. Les variations sont indiquées en $\mu\text{g}/\text{m}^3$.



III.5.6.4.f Dommages à la santé

En terme de dommages, nous constatons au Tableau 20 que seul le scénario 1 de réduction des émissions de NOx en Région de Bruxelles-Capitale conduit à une diminution des coûts externes totaux calculés sur l'ensemble du domaine avec un total de 2,16 M€ soit près de 1% en moins que pour la situation de référence. Les scénarios 2 et 3 conduisent à des dommages totaux respectivement de 2,19 M€ (+0,4%) et de 2,20 M€ (+1%).

Il faut néanmoins rester prudent dans l'interprétation des résultats. En effet, seuls les effets à court terme sur la santé ont été comptabilisés dans ces estimations à défaut de fonctions exposition-réponse exploitables pour les effets à court terme sur la végétation. Ces effets sanitaires sont directement liés à la densité de la population. L'évolution des dommages en fonction des mesures considérées reflète donc principalement les effets de ces mesures au niveau des agglomérations urbaines. Or, pour les trois scénarios considérés, on observe des augmentations des concentrations d'ozone au niveau des zones urbaines et de leurs périphéries c'est-à-dire là où sont principalement émis les précurseurs. Il convient donc de se méfier d'une analyse purement monétaire qui dans ce cas-ci conduirait à des conclusions tronquées quant aux mesures à prendre pour améliorer la pollution photochimique autour de Bruxelles.

III.5.6.4.g Analyse de la situation en Région de Bruxelles-Capitale

Si l'on considère spécifiquement les effets des différents scénarios **au niveau de la Région de Bruxelles-Capitale**, nous pouvons constater au Tableau 21 que les trois scénarios de réduction des émissions locales conduisent à des dommages plus importants que dans la situation de référence. Les dommages les plus importants sont observés pour le scénario 3 de réduction des émissions de NOx et de COV, avec un accroissement de 8% des coûts externes associés à la pollution photochimique. Pour le scénario 1 de réduction des émissions de NOx, un accroissement des dommages de 4% est observé. L'accroissement des dommages le moins important est observé pour le scénario 2 de réduction des émissions de COV uniquement, avec 1,3%.

Scénario	10 Août 1998		11 Août 1998		Episode	
	[O ₃] _{moy 8 h}	Dommages [M€]	[O ₃] _{moy 8 h}	Dommages [M€]	[O ₃] _{max}	Dommages Totaux [M€]
Cas de référence	120	0,18	107	0,16	153	0,34
Scénario 1	121	0,19	112	0,17	165	0,36
Scénario 2	119	0,18	111	0,17	160	0,35
Scénario 3	127	0,19	117	0,18	164	0,37

Tableau 21: Analyse des scénarios de réduction des émissions de gaz précurseurs pour la Région de Bruxelles-Capitale

III.5.6.4.h Conclusions

Sur base de cette analyse, il n'est pas aisé de conclure de façon univoque sur la stratégie la plus efficace pour améliorer la situation. Nous pouvons en effet constater que suivant la zone géographique et le critère d'évaluation - concentrations maximales atteintes au cours de l'épisode ou valeurs moyennes sur 8 heures - considérés, des conclusions différentes peuvent être établies quant à la stratégie la plus efficace en terme de réduction de la pollution photochimique.

Nous résumons ici les principaux enseignements de cette analyse :

- La réduction des émissions de COV en région bruxelloise apparaît comme la stratégie la plus efficace pour la diminution des valeurs de pic observées sur le domaine.

- En ce qui concerne la diminution des valeurs moyennes sur 8 heures associées aux effets sur la santé, la réduction des émissions de NOx s'avère plus efficace que celle des COV ou des NOx et des COV combinées.
- Les différents scénarios considérés conduisent tous à des augmentations des concentrations d'ozone dans les principales agglomérations urbaines (Anvers, Bruxelles, Gand, Charleroi et Mons-Borinage) ce qui indique la saturation de ces zones à la fois en NOx et en COV. Des réductions de 50% des émissions de ces polluants s'avèrent donc encore insuffisantes pour permettre une amélioration de la qualité de l'air dans ces zones. Des réductions supérieures à 50% seraient donc nécessaires.
- Dans ces zones, la réduction des émissions de COV conduit comparativement à des concentrations moins élevées qu'une réduction équivalente des NOx.
- La comparaison des stratégies a révélé que la réduction des émissions de NOx seules permet d'atteindre la plus grande réduction des concentrations d'ozone sur l'ensemble du domaine à l'exception des agglomérations bruxelloises et anversoises pour lesquelles la réduction des émissions de COV seules permet d'obtenir des concentrations plus favorables ou moins défavorables puisqu'elle conduit également à une augmentation des concentrations par rapport à la situation de référence.
- Les trois scénarios de réduction des émissions de gaz précurseurs conduisent à des valeurs plus élevées – de l'ordre de 5,5% - des concentrations moyennes d'ozone sur 24 heures, représentatives de l'atteinte aux cultures et à la végétation.
- En terme de dommages à la santé, seul le scénario de réduction des émissions de NOx conduit à une réduction des coûts externes associés à l'épisode par rapport à la situation de référence. Les deux autres scénarios conduisent à de légères augmentations (moins de 1%) de ces dommages, ceci malgré l'effet global des réductions des concentrations d'ozone.
- En ce qui concerne spécifiquement la Région de Bruxelles-Capitale, les trois scénarios considérés conduisent à des augmentations des dommages. Le scénario le moins défavorable est celui de réduction des émissions de COV uniquement pour lequel l'accroissement des dommages est limité à 1,3%, pour 4% dans le cas de la réduction des émissions de NOx et 8% pour la réduction simultanée des émissions de NOx et de COV. C'est également la stratégie de réduction des émissions de COV seuls qui conduit aux pics d'ozone les moins élevés sur la Région.

III.5.7 Analyse d'un scénario d'introduction de véhicules électriques

Afin de compléter l'analyse de stratégies générales de réduction des émissions de précurseurs décrites au paragraphe précédent, nous avons considéré un scénario spécifique d'introduction de véhicules électriques qui est le scénario intitulé '50-20-5' présenté au paragraphe III.4. Pour rappel, ce scénario considère que l'introduction de véhicules purement électriques se fait de façon différenciée suivant l'éloignement du centre de la Région grâce à différentes mesures d'accompagnement appropriées (réseau de location de véhicules, restriction d'accès de certaines zones aux véhicules thermiques, etc.). Le scénario retenu considère que la « part de marché » des véhicules électriques est de 50% dans le centre ville (pentagone), 20% dans une zone intermédiaire entre la petite ceinture et la grande ceinture et 5 % à l'extérieur de cette dernière.

Nous avons vu au paragraphe III.4 que ce scénario permettait de réaliser des réductions assez importantes des émissions de gaz précurseurs d'ozone troposphérique : -7,3% pour les NOx et -13,4% pour les COV. Il s'agissait d'une analyse des émissions globales (directes et indirectes) associées à ce scénario. Compte tenu de la complexité des phénomènes mis en oeuvre et de leur non-linéarité, il est difficile d'évaluer sur base de ce seul bilan d'émissions les effets potentiels d'une telle mesure sur la pollution photochimique dans et autour de Bruxelles. Cette analyse a donc été complétée par une simulation à l'aide du modèle METPHOMOD.

Nous décrivons ici les résultats des simulations de l'épisode de pollution photochimique effectuées pour ce scénario où nous avons fait l'hypothèse que les émissions indirectes se faisaient au niveau de la centrale électrique de Drogenbos même si, a priori, la fourniture d'électricité requise pour la recharge des véhicules peut se faire à partir de n'importe quelle centrale, ce qui justifie l'utilisation d'un facteur d'émission moyen caractéristique du parc de centrales électriques en Belgique.

Le Tableau 22 reprend les résultats de la simulation réalisée pour le scénario '50-20-5' pour les principaux critères explicités précédemment que sont la concentration horaire maximale au cours de l'épisode, la concentration moyenne sur 8 heures maximale et la concentration moyenne sur 24h. Les coûts externes associés aux dommages sur la santé sont également repris. Les pourcentages de variations minimal, moyen et maximal par rapport à la situation de référence observés sur le domaine sont repris pour le scénario considéré.

Au niveau de la **concentration maximale horaire** au cours de l'épisode, on constate une réduction de 1,6% en moyenne sur le domaine d'étude, ce qui est environ deux fois moins que pour les trois scénarios de stratégie générale considérés précédemment.

En ce qui concerne les **concentrations moyennes sur 8 heures** calculées par le modèle, nous pouvons observer une réduction moyenne de 3,9% sur le domaine. Ceci est comparable à ce qui était observé pour le scénario de réduction de 50% des COV mais plus faible que ce qui avait été mis en évidence pour le scénario de réduction de 50% des émissions de NOx (-5,3%).

En termes de **concentration moyenne sur 24h** caractéristique des effets sur la végétation et les cultures, le scénario '50-20-5' conduit en moyenne à une réduction de 4,7% de ce critère. Rappelons que les trois scénarios de stratégie générale conduisaient à une augmentation de ce paramètre de plus de 5%.

Finalement, l'introduction massive de véhicule électrique en Région de Bruxelles-Capitale conduit à une réduction des **coûts externes** associés à l'épisode de pollution photochimique de 1,81% ce qui est mieux que le 1% de réduction observé pour le scénario de réduction des émissions de NOx seules dans la Région.

Tableau 22: Analyse du scénario d'introduction de véhicules électriques '50-20-5' pour l'ensemble du domaine étudié.

Scénario	[O ₃] _{max} (µg/m ³)			[O ₃] _{moy 8 h} (µg/m ³)			[O ₃] _{moy 24h} (µg/m ³)			C. Ext. [M€]
	Min.	Moy.	Max.	Min.	Moy.	Max.	Min.	Moy.	Max.	Total
Cas de référence	120	149	184	88	131	162	45	105	134	2,18
Scénario '50-20-5'	-17,9%	-1,6%	+14,1%	-19,1%	-3,9%	11,4%	-32,5%	-4,7%	+22,9%	-1,81%

Si nous analysons à présent les effets de ce scénario sur la **situation en Région de Bruxelles-Capitale**, nous constatons au Tableau 23 que, contrairement à ce qui était observé pour les trois scénarios de stratégie générale examinés précédemment, la concentration maximale d'ozone au cours de l'épisode diminue par rapport à la situation de référence en passant de 153 à 148 µg/m³. En terme de concentration moyenne sur 8 heures également, le scénario d'introduction de véhicules électriques considéré met en évidence une diminution de 120 à 108 µg/m³ pour le 10 août et une légère augmentation le 11 août. Ces évolutions conduisent à des dommages associés à la pollution photochimique estimés à 0,33 M€, ce qui représente une diminution de près de 4% des coûts externes par rapport au cas de référence. A ce niveau-ci également, ce scénario semble plus intéressant que les trois scénarios de réduction massive des émissions de précurseurs considérés précédemment qui conduisaient tous à des accroissements de dommages au niveau de la Région de Bruxelles-Capitale.

Tableau 23: Analyse du scénario d'introduction de véhicules électriques '50-20-5' pour la Région de Bruxelles-Capitale.

Scénario	10 Août 1998		11 Août 1998		Episode	
	[O ₃] _{moy 8 h}	Dommages [M€]	[O ₃] _{moy 8 h}	Dommages [M€]	[O ₃] _{max}	Dommages Totaux [M€]
Cas de référence	120	0,18	107	0,16	153	0,34
Scénario '50-20-5'	108	0,165	109	0,167	148	0,332

Comme on peut l'observer à la Figure 26 où sont représentées les différences en % de concentrations moyennes sur 8 heures entre le scénario '50-20-5' et le cas de référence, l'introduction de véhicules électriques en Région de Bruxelles-Capitale entraîne des réductions de ce paramètre pour les deux grandes agglomérations anversoises et bruxelloises. Ceci permet d'expliquer les diminutions de dommages en termes de coûts externes pour ce scénario. Les zones où des accroissements de concentrations sont observés sont plus limitées et les accroissements ne dépassent pas les 10 à 15%. Ces zones sont principalement situées au Nord-Est du domaine et sur un axe Charleroi-Mons au Sud du domaine. La zone de Gand est plutôt neutre avec quelques accroissements de concentrations observés.

Scénario '50-20-5' en RBC

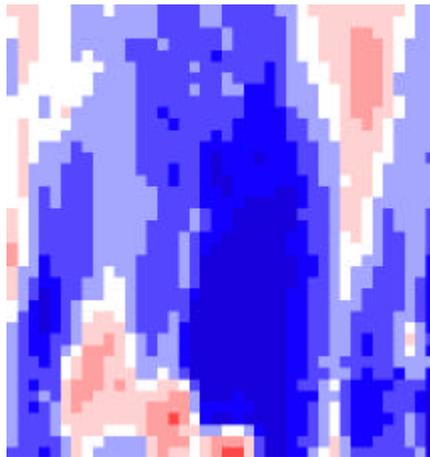


Figure 26 : Comparaison des concentrations moyennes sur 8 heures pour le scénario '50-20-5' et la situation de référence. Les variations sont indiquées en %.

Chapitre IV: Conclusions

Compte tenu de la nature particulière de l'ozone troposphérique – polluant secondaire formé à partir de précurseurs tels que les oxydes d'azote et les composés organiques volatils –, de la complexité des réactions chimiques participant à sa formation et à sa destruction et du nombre de sources polluantes impliquées, la définition de stratégies de lutte contre la pollution photochimique n'est pas aisée et requiert le développement d'outils adéquats souvent lourds à mettre en oeuvre.

Parmi les mesures susceptibles d'améliorer la situation à long terme, la promotion des véhicules électriques et hybrides qui n'émettent que très peu ou pas de polluants précurseurs d'ozone constitue une solution préventive potentielle.

L'objet du présent projet était d'évaluer une telle mesure en considérant spécifiquement ses aspects économiques et environnementaux de façon à déterminer si une politique volontariste en matière de véhicules électriques et hybrides peut se justifier en Région de Bruxelles-Capitale.

Un objectif plus général de l'étude menée concernait le développement d'un outil d'aide à la prise de décision susceptible d'aider les décideurs en terme de lutte contre la pollution photochimique. Un accent particulier a donc été porté aux développements méthodologiques nécessaires pour aborder sérieusement cette problématique.

Au terme de cette recherche, nous pouvons situer ses principaux acquis au niveau :

- du développement de collaborations scientifiques au niveau belge et européen qu'elle a permis ;
- des développements méthodologiques qu'elle a nécessités notamment pour l'analyse de la pollution photochimique et son évaluation en terme d'externalités physiques et monétaires.
- de la compréhension des phénomènes complexes conduisant à la formation d'ozone troposphérique dans et autour de Bruxelles ;
- de l'analyse de la situation existante et des effets de stratégies de lutte contre la pollution photochimique.

Nous résumons dans les paragraphes qui suivent les principaux résultats obtenus dans le cadre de ce projet.

IV.1 Analyse des aspects économiques

A l'heure actuelle, étant donné l'étroitesse du marché des véhicules électriques, il est difficile d'imaginer une introduction massive de ce type de propulsion dans la Région de Bruxelles Capitale. L'absence de production en série de ces véhicules, entraînant des prix d'achat beaucoup trop élevés, reste en effet un obstacle majeur pour toute personne désireuse d'acquérir un tel véhicule.

Ainsi, si l'on compare les coûts d'utilisation au kilomètre des véhicules électriques et ceux de leurs homologues thermiques, un surcoût de plus de 40% est enregistré en défaveur du véhicule électrique. Cet état de fait est évidemment imputable au prix d'achat de ce type de véhicule, 70% plus cher que le même véhicule essence et 52% de plus que le diesel. Par contre, si l'on ne considère que les autres postes tels que l'assurance, l'entretien, les taxes et les frais de consommation, l'utilisation du véhicule électrique devient alors beaucoup plus intéressante que celle des deux autres modes de propulsion. Cette conclusion est encore plus vraie lorsque l'on analyse la situation à l'horizon 2010. En effet, la libéralisation des marchés de l'électricité ainsi que la hausse attendue des prix du pétrole auront pour conséquence de favoriser davantage les véhicules électriques en ce qui concerne le poste consommation.

Par conséquent, si les pouvoirs publics désirent réellement promouvoir l'utilisation du véhicule électrique en ville, des mesures de politique incitative doivent absolument être mises en place. On pense notamment à des subventions accordées par les pouvoirs publics pour l'achat de véhicules électriques ou encore à des réductions de taxes et de prime d'assurance en faveur de ce type de propulsion ; différentes mesures qui ont déjà été expérimentées à l'étranger.

Par ailleurs, l'utilisation de modes de transport électrique est, comme nous l'avons déjà vu, étroitement corrélée aux infrastructures électriques et aux projets d'urbanisme. Ce type de transport nécessite donc, lors de la phase initiale, le soutien de mesures politiques accélérant la mise en place de nouvelles infrastructures de bornes de recharge. L'introduction de véhicules électriques dépend également en grande partie des politiques stimulant l'adaptation de nouveaux concepts de transport. Ainsi, différents scénarios ont été envisagés dans cette partie. Ces scénarios concernaient :

- la mise en œuvre d'un réseau de stations de location automatique de véhicules électriques à l'intérieur de la Région de Bruxelles Capitale en complément au transport public ;
- l'introduction de x% des véhicules électriques dans les flottes d'entreprises publiques ou privées ;
- la restriction d'accès dans certaines zones de la ville accordant une priorité pour le transport public et les véhicules électriques ;
- la mise en œuvre de centres de distribution de marchandises utilisant des véhicules électriques afin d'alléger le trafic des véhicules lourds dans le centre ville en faveur des camionnettes électriques.

L'analyse économique de ces scénarios montre, qu'à nouveau, l'achat des véhicules électriques représente la charge financière la plus importante, du moins en ce qui concerne des scénarios tels que le réseau de stations de location de véhicules électriques ou le réseau de distribution de marchandises.

Un tel constat nous permet donc de conclure que pour favoriser l'introduction de véhicules électriques au sein de la Région de Bruxelles Capitale, les pouvoirs publics devront d'abord s'orienter vers des scénarios de moindre envergure. Ainsi, des scénarios tels que la restriction d'accès dans certaines zones en faveur des véhicules électriques à zéro émission ou encore le remplacement des véhicules thermiques par des véhicules électriques au sein de flottes captives tant privées que publiques, semblent à l'heure actuelle les plus viables financièrement. Il ne faut pas pour autant exclure d'emblée les autres scénarios. Ces derniers pourront être envisagés par la suite dans la mesure où un retour d'expérience existera pour le cas précis de Bruxelles-Capitale. La mise en place des deux autres scénarios permettront en effet d'analyser les comportements d'utilisation des véhicules électriques et des bornes de recharge. Une telle analyse permettra donc par la suite, de mettre en place de la manière la plus efficace possible tant un réseau de distribution de marchandises qu'un réseau de location de véhicules électriques.

Par ailleurs, nos conclusions restent fort mitigées en ce qui concerne un éventuel développement du véhicule électrique vers une production en série. Cette dernière est néanmoins indispensable au développement de ce type de propulsion. Cependant, il existe, comme nous l'avons vu, encore beaucoup d'obstacles à lever et peu d'incitants économiques dans le chef des constructeurs automobiles pour passer à une production en série des véhicules électriques.

Pour être totalement complet, nous devons encore signaler que nous n'avons pas pris en compte dans cette étude les différents coûts afférents à la promotion des véhicules électriques. Nous entendons par là les frais relatifs aux différentes campagnes publicitaires et autres, visant à faire connaître et promouvoir les véhicules électriques. De tels coûts doivent évidemment être pris en compte et ajoutés à ceux qui ont été calculés dans cette partie.

IV.2 Analyse des aspects environnementaux

L'analyse menée dans le cadre de ce projet a été double.

Il s'agissait dans un premier temps d'aborder la problématique de la pollution atmosphérique d'une façon globale en développant un outil permettant la modélisation d'épisodes de pollution photochimique et l'évaluation des dommages qui y sont associés. Diverses stratégies générales de réduction des émissions de gaz précurseurs ont ainsi pu être évaluées pour permettre une meilleure compréhension de la situation autour de Bruxelles.

Dans un second temps, l'analyse s'est intéressée à une mesure spécifique d'introduction de véhicules électriques dans la Région de Bruxelles-Capitale de façon à en déterminer les bénéfices potentiels du point de vue de la réduction de la pollution aux différentes échelles locale, régionale et globale.

IV.2.1 Stratégies générales de lutte contre la pollution photochimique

Dans le cadre de l'évaluation de stratégies générales de réduction des émissions de gaz précurseurs, trois scénarios de réduction des émissions d'oxydes d'azote et de composés organiques volatils ont été analysés. Les stratégies considérées consistaient à réduire les émissions totales au niveau de la Région de Bruxelles-Capitale de trois façons : uniquement les émissions de NOx de 50% ; uniquement les émissions de COV de 50% ; ou simultanément les émissions de NOx et COV de 50%.

Sur base de cette analyse, il n'est pas aisé de conclure de façon univoque sur la stratégie la plus efficace pour améliorer la situation. En effet, en fonction de la zone géographique ou du critère d'évaluation considérés, des conclusions différentes peuvent être établies quant à la stratégie la plus efficace en terme de réduction de la pollution photochimique.

Si la réduction des émissions de COV seuls en région bruxelloise apparaît comme la stratégie la plus efficace pour la diminution des valeurs de pic observées sur le domaine, c'est la réduction des émissions de NOx seuls qui est la plus efficace en terme de diminution des valeurs moyennes sur 8 heures auxquelles sont associés les effets sur la santé.

Les différents scénarios considérés conduisent tous à des augmentations des concentrations d'ozone dans les principales agglomérations urbaines (Anvers, Bruxelles, Gand, Charleroi et Mons-Borinage) ce qui indique la saturation de ces zones à la fois en NOx et en COV.

Concernant spécifiquement la Région de Bruxelles-Capitale, la stratégie la moins défavorable – c'est-à-dire celle qui conduit à l'augmentation la plus faible des concentrations – est celle de réduction des émissions de COV uniquement.

En terme de dommages à la santé, seul le scénario de réduction des émissions de NOx conduit à une réduction des coûts externes associés à l'épisode par rapport à la situation de référence. Les deux autres scénarios conduisent à de légères augmentations (moins de 1%) de ces dommages, ceci malgré l'effet global des réductions des concentrations d'ozone.

Ceci s'explique par le fait que, d'une part, seuls les dommages sur la santé sont intégrés dans l'évaluation et que, d'autre part, c'est au niveau des grandes agglomérations que se produisent les plus grands accroissements de pollution photochimique. Les effets positifs d'une réduction des précurseurs en région bruxelloise se faisant surtout ressentir dans les zones rurales, l'intégration des effets sur la végétation et les cultures agricoles à long termes pourraient conduire à des conclusions différentes.

IV.2.2 Effets environnementaux associés à l'introduction véhicules électriques et hybrides en Région de Bruxelles-Capitale

L'analyse générale des aspects environnementaux qui a été menée dans un premier temps a permis de mettre en évidence les principaux avantages que présentent les technologies électriques et hybrides.

Deux scénarios généraux d'introduction de véhicules légers utilisant ces technologies ont permis d'estimer les réductions d'émissions polluantes qui peuvent être attendues d'une introduction de 10% de véhicules électriques et hybrides à essence respectivement dans le

trafic routier en Région de Bruxelles-Capitale. Cette analyse générale a également permis de mettre en évidence les bénéfices environnementaux – réduction des coûts externes – potentiels qui peuvent être attendus de la pénétration de ces technologies. Chaque % de part de marché de ces technologies représenterait un bénéfice environnemental de 5,5 M€ en terme de réduction des coûts externes annuels associés aux dommages locaux. Ces scénarios mettent également en évidence des réductions importantes des émissions de gaz à effet de serre (-5,9% pour les véhicules électriques et -3,6% pour les véhicules hybrides) ainsi que de gaz précurseurs de l'ozone troposphérique.

Les effets de la mise en place d'une politique plus volontariste qui conduirait à une pénétration plus importante des véhicules purement électriques dans la Région de Bruxelles-Capitale grâce à différentes mesures d'accompagnement appropriées (réseau de location de véhicules, restriction d'accès de certaines zones aux véhicules thermiques, etc.) ont fait l'objet d'une analyse spécifique. Le scénario analysé considère que la « part de marché » des véhicules électriques est de 50% dans le centre ville (pentagone), 20% dans une zone intermédiaire entre la petite ceinture et la grande ceinture et 5 % à l'extérieur de cette dernière.

Au niveau des impacts locaux – c'est-à-dire au niveau de la Région même – ce scénario conduit à des réductions de 76 M€ des coûts externes associés aux dommages locaux principalement dominés par les effets sur la mortalité associés aux particules.

En terme de réduction des émissions de gaz à effet de serre, ce scénario conduit à une réduction de 8% ce qui correspond à des bénéfices environnementaux de 0,144 M€ par rapport à la situation pour l'année 1998.

Ce scénario permet également de réaliser des réductions assez importantes des émissions de gaz précurseurs d'ozone troposphérique : -7,3% pour les NOx et -13,4% pour les COV. Il s'agit d'une évaluation globale intégrant les émissions directes et indirectes associées à ce scénario. Compte tenu de la complexité des phénomènes mis en oeuvre et de leur non-linéarité, cette analyse a été complétée par une simulation des effets de ces réductions d'émissions sur la pollution photochimique dans et autour de Bruxelles.

Les résultats de cette simulation montrent une réduction générale des valeurs de pics (-1,6% en moyenne), des concentrations moyennes sur 8 heures maximales (-3,9% en moyenne) caractéristiques des effets sur la santé ainsi que des concentrations moyennes sur 24h (-4,7% en moyenne) représentatives des dommages sur les cultures et la végétation. En terme de dommages sur la santé, ce scénario d'introduction massive de véhicules électriques conduit à une réduction de 1,8% des coûts externes associés à l'épisode considéré pour l'ensemble du domaine analysé, soit un bénéfice de 40.000 € (1,6 MBEF). Cette réduction importante des externalités sur la santé humaine est principalement à mettre en relation avec l'effet positif de ce scénario sur les concentrations en ozone dans les deux principales zones urbaines que sont Anvers et Bruxelles contrairement à ce qui était observé pour les scénarios de stratégie générale.

En effet, en ce qui concerne les effets de ce scénario spécifiquement sur la situation en Région de Bruxelles-Capitale, les simulations ont permis de montrer des diminutions significatives de la concentration maximale d'ozone au cours de l'épisode et de la concentration moyenne sur 8 heures maximale. Ces évolutions conduisent à des dommages associés à la pollution photochimique estimés à 0,33 M €, ce qui représente une diminution de près de 4% des coûts externes par rapport au cas de référence.

IV.3 Bilan des aspects économiques et environnementaux

Si l'on se réfère au scénario d'introduction de véhicules purement électriques dont les effets environnementaux sont résumés ci-dessus, on s'aperçoit que ce scénario permet d'améliorer la situation générale en ce qui concerne la pollution photochimique et conduit à des bénéfices environnementaux non-négligeables par rapport aux dommages provoqués lors d'un épisode. Ces bénéfices s'élèvent à 40.000 € (1,6 MBEF) sur l'ensemble du domaine considéré et 12.355 € (0,5 MBEF) spécifiquement pour la Région de Bruxelles-Capitale.

Rappelons que, dans le cadre de cette étude, nous nous sommes focalisés sur un seul épisode, pour une zone déterminée et que nous n'avons considéré que les effets à court terme sur la santé humaine. Si l'on multiplie ces montants par le nombre d'épisodes ou de situations où des concentrations d'ozone produisent déjà des effets sur la population, les bénéfices environnementaux d'une telle mesure pourraient être bien plus importants. L'intégration des effets à court terme et à long terme sur la végétation et les productions agricoles devrait également conduire à des montants plus élevés.

En comparaison avec les bénéfices environnementaux associés aux dommages locaux, les bénéfices associés à une réduction des coûts associés à la pollution photochimique est plutôt limitée. Pour le même scénario, ces bénéfices ont pu être chiffrés à environ 76 M € par an. Les bénéfices liés à une réduction des dommages associés au réchauffement climatique avaient quant à eux été estimés à 0,144 M €.

En ce qui concerne les coûts annuels de mise en place des différents scénarios considérés dans l'analyse économique, l'analyse économique a montré qu'ils allaient de 0,1 M € pour la restriction d'accès à certaines zones de la Région à près de 130 M € pour la mise en oeuvre d'un réseau de centres de distribution de marchandises provenant par la route exploité au maximum. Les coûts annuels de mise en place d'un scénario général intégrant les différentes mesures proposées mais à un niveau d'exploitation plus faible ont quant à eux été évalués à un peu plus de 70 M €.

On peut donc conclure que, si la réduction des dommages liés à la pollution photochimique que permet l'introduction de véhicules électriques en Région de Bruxelles-Capitale ne compense pas à elle seule les coûts de mise en oeuvre d'une politique volontariste en la matière, la prise en compte des autres effets positifs qui sont associés à cette introduction justifie un tel investissement principalement si on tient compte des effets sanitaires au niveau local.

Références

- Ahlvik, P., S. Eggleston, N. Gorißen, D. Hassel, A.-J. Hickman, R. Joumard, L. Ntziachristos, R. Rijkeboer, Z. Samaras and K.-H. Zierock (1997), '*COPERT II: Methodology and Emission Factors*', Draft Final Report, European Environment Agency, European Topic Centre on Air Emission, Copenhagen, Denmark, 89 p.
- Bergman A., L. (1995). *Market structure and the price of electricity : An ex ante analysis of the deregulated Swedish electricity market*, The Energy Journal, vol 16, n°2, 1995.
- Bleijns C. and H. Rochereau. *Setting up a low cost public charging infrastructure*, EVS 14.
- Blum W. and P. Zeller. *Low cost infrastructure for recharging electric vehicles during parking – the Swiss experience*, EVS 14.
- Commission Européenne (1995). *ExternE: Externalities of Energy*, EUR16520, Vol. 1-5, Luxembourg.
- Commission Européenne (1998), Directorate-General XII, Science, Research and Development, JOULE (1998), '*Externalities of Fuel Cycles 'ExternE' Project. Report number 7, Methodology, 1998 update*', EUR16521, Luxembourg, 518 p.
- Commission Européenne (1999). *MEET – Methodology for calculating transport emissions and energy consumption*, Transport Research, Fourth Framework Programme, ISBN 92-828-6785-4, Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities, 362 pp.
- Delisle P. (1996). *Circulation routière et nuisances environnementales : quelle place pour l'analyse économique ?*, revue de l'OFCD, 1996, n°59, pp135-166.
- Electrabel (2001). Rapport environnemental 2000, SPE, Mai 2001, 24p.
- Favrel, V., T. Pons, K. Maréchal, P. Claeys, C. Ferdinand & W. Hecq (2001). *Mobilité durable en région bruxelloise: Analyse des impacts sur l'environnement, Evaluation des externalités physiques et monétaires*, Rapport final, Contrat de recherche n°MD/DD/012 financé par les Services Fédéraux belges des affaires Scientifiques, Techniques et Culturelles (SSTC), Bruxelles, Centre d'Etudes Economiques et Sociales de l'Environnement, 85 p. + Annexes.
- FEBIAC (1999). *Exercice 1998, Rapport à l'occasion de l'Assemblée Générale du 23 juin 1999*, Fédération Belge de l'Industrie de l'Automobile et du Cycle, 136p.
- Fiscalité automobile, Rapport du groupe de Travail Fiscalité automobile, réalisé en réponse à la demande de la Conférence interministérielle de l'Environnement du 19/03/96, mars 1997.
- Galli R. (1998). *The relationship between energy intensity and income levels: forecasting long term energy demand in Asian emerging countries*, The energy journal, vol 19, n°4, 1998.
- Geneste B. (1997). *La libéralisation du marché de l'électricité*, R.A.E.- L.E.A., 1997.
- Kurani K., T. Turrentine and J. Wright. Where, when, how fast and how much? Questions about consumer demand for home, away from home, time of day, and speed of recharging for electric vehicles, EVS 14.
- Maggetto, G. & P. Van den Bossche. *Conductive charging: Infrastructure and standardisation, Programme for collaboration between CEC and national programmes on electric vehicles in Europe*.
- Mathoy A. *How to define a cost optimised EV charging system*, EVS 15.

- Meij J. M. (2000). *Réduire la pollution urbaine grâce à l'électrification des transports routiers*, IPTS, n°47 – JRC- Séville, septembre 2000.
- Nowicki J., *Building an electric vehicle infrastructure*, EVS 14.
- Ntziachristos L. (LAT/AUTH), Z. Samaras (LAT/AUTH), S. Eggleston (AEA Technology), N. Gorißen (UBA), D. Hassel (TÜV Rheinland), A.-J. Hickman (TRL), R. Joumard (INRETS), R. Rijkeboer (TNO), Zierock (UBA) (1999). *COPERT III, Computer Program to Calculate Emissions from Road Transport - Methodology and Emission Factors (Final Draft Report)*, European Environment Agency, European Topic Centre on Air Emission.
- OCDE (1994). *Véhicules électriques : technologies, performances et perspectives*, 1994.
- OCDE (1999). *Energy prices and taxes*, Quaterly Statistics, third quarter 1999.
- Paffenbarger J. (1999). *Impacts of electricity market liberalisation on generation cost*, in OCDE, *Energy prices and taxes*, 1st quarter 1999.
- Pauwels J.P. (1997). *Géopolitique de l'approvisionnement énergétique de l'Union Européenne au XXIème siècle*, vol II, 1997.
- Perego, S. (1996). 'Ein numerisches Modell zur Simulation des Sommersmogs', Vol. G47, *Geographica Bernensia*, Bern, Suisse, ISBN 3-906151-05-0.
- Ribaldone P. and Broglio M., *Problems and planning a public electric vehicle charging infrastructure in the city of Turin – Italy*, EVS 15
- Sarkis N. (1998). *Prévoir l'évolution du prix du pétrole, un exercice délicat*, *Problèmes économiques*, 1998, n°2586, pp28-32.
- Scharff C. (1999). *Scandinavie : L'électricité à la pompe*, *Trends tendance*, 21 octobre 1999, pp 39-43
- Simon B. (2000), *Industrial and institutional barriers to the diffusion of electric vehicles*, January 2000.
- Spix C., Anderson R., Schwartz J., Vigotti M. A., Le Tertre A., Vonk J., Touloumi G., Balducci F., Pierkarski T., Bacharova L., Tobias A., Ponka A., Katsouyanni K. (1998). 'Short term effects of air pollution on hospital admissions of respiratory diseases in Europe : a quantitative summary of APHEA study results', *Archives of Environmental Health*, Vol. 53, No 1, February 1998.
- Stockwell, W. R., Middleton, P., Chang, J. S. and Tang, X. (1990). 'The second generation regional acid deposition model chemical mechanism for regional air quality modeling', *J. Geophys. Res.*, 95(D10), 16343-16367.
- Stockwell, W. R., Kirchner, F., Kuhn, M. and Seefeld, S. (1997). 'A new mechanism for regional atmospheric chemistry modeling', *J. Geophys. Res.*, 102(D22), 25847-25879.
- Teyssède, E., H. Rochereau and M. Aguer. *Experience with public charging infrastructure in Paris*, EVS 15.

Annexe I:

Analyse des aspects économiques : graphiques complémentaires

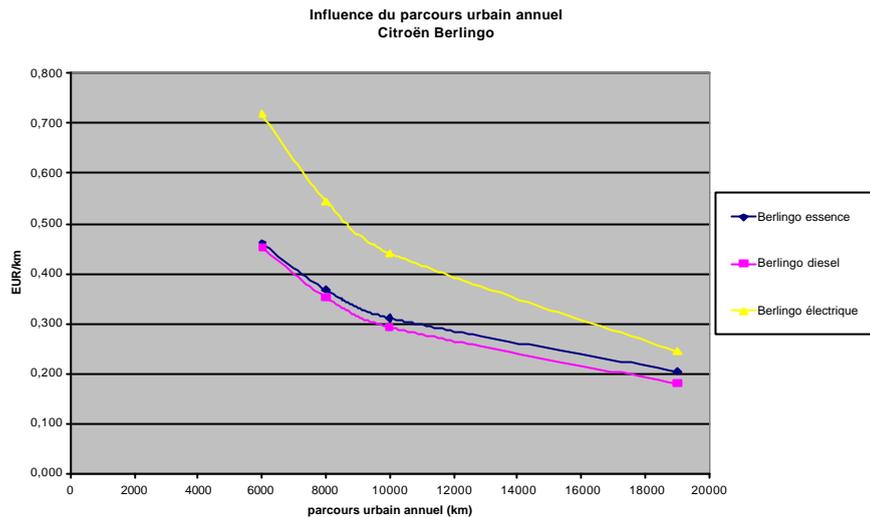


Figure A1 : Influence du parcours annuel moyen sur le coût au kilomètre de la Peugeot Partner (durée d'amortissement fixée à 7 ans).

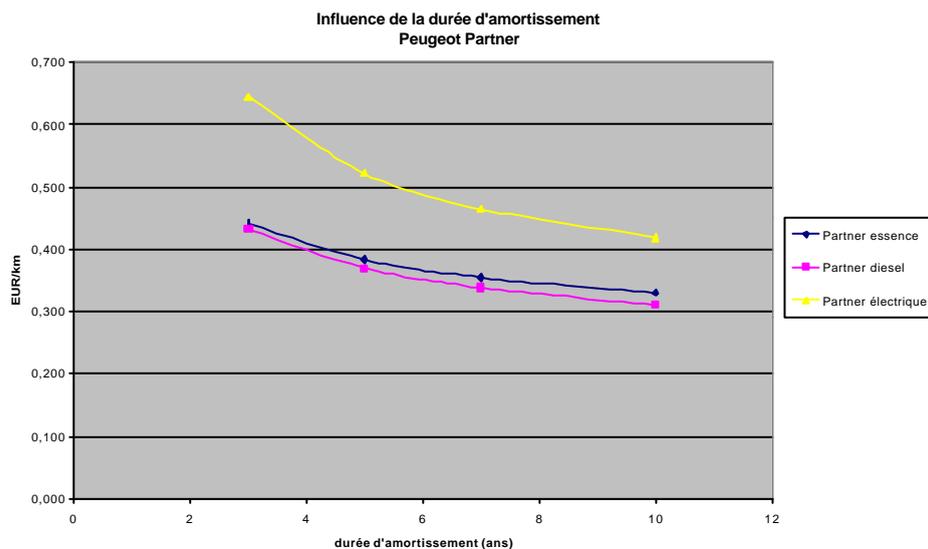


Figure A2 : Influence de la durée d'amortissement sur le coût au kilomètre : cas de la Peugeot Partner (parcours annuel moyen : 10.000 km)

unité : EUR/km

	Partner essence	Partner diesel	Partner électrique
coûts d'investissement	0,155	0,169	0,235
contrat de location de la batterie			0,140
frais d'assurance	0,064	0,063	0,040
taxes	0,004	0,005	0,007
coûts fixes	0,223	0,237	0,423
frais d'entretien	0,037	0,038	0,008
frais de consommation	0,085	0,053	0,015
coûts variables	0,122	0,090	0,024
coûts totaux	0,345	0,327	0,446

Sources : Moniteur Belge de l'Automobile (juin 1998), Smap, Ministères des Finances, PSA Peugeot-Citroën, Peugeot Nivelles, Ministères des Affaires Economiques : département Energie, VUB-CITELEC.

Tableau A3 : Influence de l'application de la Proposition de Loi « visant à favoriser l'utilisation de véhicules propulsés grâce à l'énergie électrique.

Evolution du prix du pétrole, cas d'une croissance économique "forte"

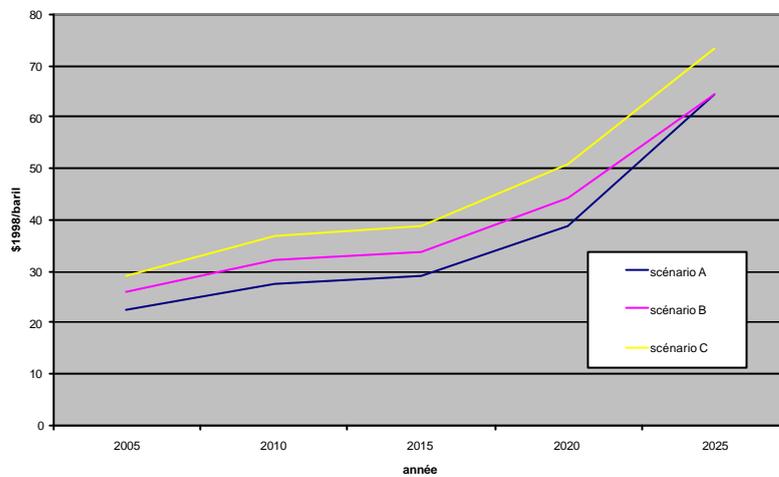


Figure A4 : Evolution du prix du pétrole, cas d'une croissance économique « forte »

Evolution du prix du pétrole, cas d'une croissance économique "modérée"

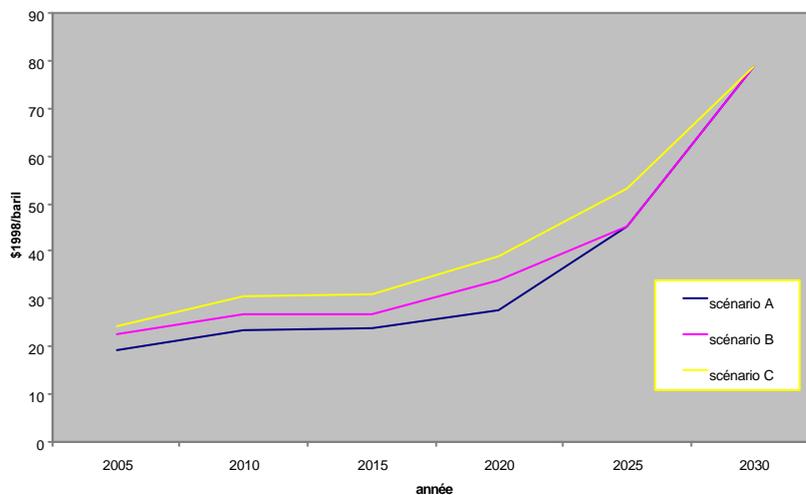


Figure A5 : Evolution du prix du pétrole, cas d'une croissance économique « modérée ».

Tableau A6 : Synthèse des coûts (exprimés en EUR) d'infrastructure dans le cas d'un réseau de stations de location automatique de véhicules électriques, avec des bornes de recharge normale à 2 prises et

a) une borne de recharge rapide par lieu de location et 2 bornes de recharge rapide sur la voie publique.

	Niveau d'utilisation des emplacements potentiels	Frais relatifs aux bornes de recharge à 2 prises	Frais relatifs aux bornes de recharge rapide ;		Coûts de raccordement	Total
			Sur les lieux de location	Sur la voie publique		
Cas où les 8 localisations sont exploitées	maximum	31 219 200	243 880	60 970	3 919 250	35 443 300
	20 %	6 243 840	243 880	60 970	796 050	7 344 740
Cas où seulement 5 localisations sont exploitées	maximum	20 426 625	152 425	60 970	2 565 050	23 205 070
	20 %	4 085 325	152 425	60 970	526 125	4 824 845

Source : EDF

b) aucune borne de recharge rapide sur les lieux de location et 5 bornes de recharge rapide sur la voie publique.

	Niveau d'utilisation des emplacements potentiels	Frais relatifs aux bornes de recharge à 2 prises	Frais relatifs aux bornes de recharge rapide ;		Coûts de raccordement	Total
			Sur les lieux de location	Sur la voie publique		
Cas où les 8 localisations sont exploitées	maximum	31 219 200	-	152 425	3 911 625	35 283 250
	20 %	6 243 840	-	152 425	788 425	7 184 690
Cas où seulement 5 localisations sont exploitées	maximum	20 426 625	-	152 425	2 562 000	23 141 050
	20 %	4 085 325	-	152 425	518 500	4 756 250

Source : EDF

Tableau A7 : Synthèse des coûts (exprimés en euro) d'infrastructure dans le cas d'un réseau de stations de location automatique de véhicules électriques, avec des bornes de recharge normale avec 1 prise et:

a) une borne de recharge rapide par lieu de location et 2 bornes de recharge rapide sur la voie publique.

	Niveau d'utilisation des emplacements potentiels	Frais relatifs aux bornes de recharge à 2 prises	Frais relatifs aux bornes de recharge rapide ;		Coûts de raccordement	Total
			Sur les lieux de location	Sur la voie publique		
Cas où les 8 localisations sont exploitées	maximum	19 507 200	243 880	60 970	7 823 250	27 635 300
	20 %	3 901 440	243 880	60 970	1 576 850	5 783 140
Cas où seulement 5 localisations sont exploitées	maximum	12 763 500	152 425	60 970	5 119 425	18 096 320
	20 %	2 552 700	152 425	60 970	1 032 425	3 798 520

Source : EDF

b) aucune borne de recharge rapide sur les lieux de location et 5 bornes de recharge rapide sur la voie publique.

	Niveau d'utilisation des emplacements potentiels	Frais relatifs aux bornes de recharge à 2 prises	Frais relatifs aux bornes de recharge rapide ;		Coûts de raccordement	Total
			Sur les lieux de location	Sur la voie publique		
Cas où les 8 localisations sont exploitées	maximum	19 507 200	-	152 425	7 815 625	27 475 250
	20 %	3 901 440	-	152 425	1 569 225	5 623 090
Cas où seulement 5 localisations sont exploitées	maximum	12 763 500	-	152 425	5 116 375	18 032 300
	20 %	2 552 700	-	152 425	1 029 375	3 734 500

Source : EDF

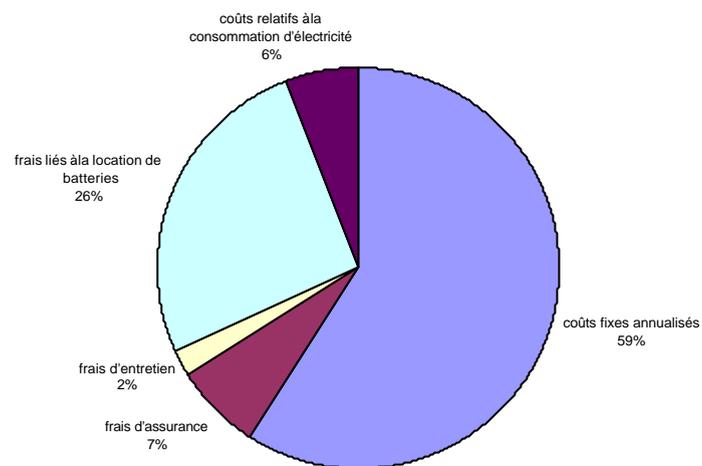


Figure A7 : Répartition des différents coûts annuels supportés par les autorités publiques (cas d'un scénario général)