

## **LES DROITS A CIRCULER ECHANGEABLES : UNE ALTERNATIVE PERTINENTE ET REALISTE AU PEAGE URBAIN ?**

**Charles RAUX\***  
**Laboratoire d'Economie des Transports**  
**(CNRS, Université de Lyon, ENTPE)**

### **Résumé**

Le péage de congestion est difficile à mettre en œuvre en milieu urbain car la plupart des automobilistes s'attendent à une dégradation de leur bien-être. Les « droits à circuler échangeables », c'est-à-dire l'allocation gratuite aux habitants des villes de quotas de déplacements ou de kilomètres à effectuer en automobile, pourrait être une alternative plus acceptable. Ce mécanisme fournirait également une incitation supplémentaire à économiser les déplacements automobiles du fait de la possibilité de revendre les droits inutilisés. Nous décrivons en détail un tel système de droits à circuler échangeables, visant à réduire la congestion ou la pollution atmosphérique. Une évaluation est menée dans le cas de l'agglomération de Lyon. Cette évaluation met en évidence les questions d'effets distributifs entre les automobilistes, les habitants et plus généralement la collectivité, quand on compare les droits à circuler au péage de congestion classique.

### **Mots-clés :**

Management de la demande de transports / permis négociables / droits à circuler / circulation automobile / congestion / pollution atmosphérique / évaluation économique / Lyon (France)

---

\* LET, ISH, 14 avenue Berthelot, 69363 Lyon Cedex 07, France. Email: charles.raux@let.ish-lyon.cnrs.fr

## 1 Introduction

La congestion et la pollution atmosphérique découlant de la circulation automobile sont des soucis majeurs et récurrents dans les agglomérations urbaines du monde entier. Pour l'économiste ces phénomènes reflètent une surconsommation de biens rares (l'espace dédié à la circulation ou l'air pur), cette surconsommation découlant d'une sous-tarifcation de la consommation de ces biens.

C'est pourquoi, face à la congestion et la pollution, l'instrument privilégié par les économistes est la tarifcation de l'usage de la route, ou encore le péage de congestion (Walters, 1961 ; Vickrey, 1963) dont la mise en œuvre concrète en milieu urbain se fait sous forme de péages urbains. Malgré le succès du « *Congestion Charging Scheme* » de Londres (depuis 2003), ou la mise en route du péage urbain de Stockholm (après une expérience réussie en 2006), les résistances sociales et politiques au péage urbain restent fortes, comme en témoigne le rejet du projet d'Edimbourg par référendum en 2005.

En effet, on sait que si face à une situation de congestion, l'introduction d'un péage permet d'améliorer le bien-être de la société dans son ensemble, des redistributions de bien-être s'opèrent entre différentes catégories d'agents, par comparaison entre avant et après cette mise en place (Baumol et Oates, 1988 ; Hau, 1992). Les automobilistes qui abandonnent la route voient leur situation se dégrader, car ils basculent sur des alternatives qui leur étaient, avant la mise en place du péage, moins bénéfiques. Une grande part de ceux qui restent sur la route voient leur situation se dégrader, malgré l'amélioration des vitesses, car ils subissent un surcoût monétaire qui excède leur gain en temps. Une minorité voit sa situation s'améliorer du fait de la forte valeur qu'ils accordent à leur temps de déplacement. Enfin, les pouvoirs publics qui collectent les recettes de péage s'enrichissent.

Dans le cas général, il y a donc peu de chances que le péage de congestion soit accepté, à moins que les automobilistes soient convaincus de la bienveillance de la puissance publique et que cette dernière redistribuera de manière efficace et équitable les ressources collectées : il s'agirait par exemple d'une réduction ciblée d'impôts ou du financement de nouveaux services de transport venant compenser les automobilistes.

Face à ces difficultés, un autre instrument combinant incitations économiques et régulation par les quantités, i.e. les permis négociables, pourrait présenter quelque intérêt.

D'après la définition générale de O. Godard (in OECD, 2001), les permis transférables désignent un éventail d'instruments allant de l'introduction d'une flexibilité dans la réglementation classique, à l'organisation de marchés concurrentiels de permis. Ces instruments ont en commun : (1) de comporter la fixation de contraintes quantifiées (les quotas) ; (2) d'allouer initialement ces quotas (ou droits) aux agents indépendamment des obligations environnementales qui leur sont imposées ; (3) d'autoriser les agents à transférer ces quotas entre activités ou entre lieux, entre périodes de temps ou vers d'autres acteurs (cas des permis « négociables ») ; (4) de faire respecter par des mécanismes de sanction *ad hoc* la conformité entre les comportements émetteurs des agents et les droits ou quotas qu'ils détiennent.

Ces permis (ou quotas<sup>1</sup>) d'émission négociables sont plus communément appelés « droits à polluer », impliquant par là la possibilité pour ceux qui en auraient les moyens financiers, d'acheter le droit de détruire l'environnement. Comme le notent O. Godard et C. Henry

---

<sup>1</sup> dans tout ce qui suit nous utilisons de manière équivalente les termes quotas, permis ou droits.

(1998), l'instauration de tels quotas consiste non pas à créer des droits à polluer, mais à restreindre ces droits, là où ils étaient illimités. Rendre ces quotas « négociables » revient ensuite à introduire de la flexibilité, et à rendre minimal le coût total de réduction des émissions pour la collectivité.

C'est ainsi que de tels mécanismes ont été évoqués pour l'allocation aux automobilistes de quotas de véhicules-kilomètres ou de déplacements à l'intérieur d'une zone urbaine donnée, quotas qui pourraient être transférables (Verhoef et al., 1997 ; Marlot, 1998). Une allocation initiale gratuite permettrait de garantir une part de mobilité minimale non contrainte – facteur d'acceptabilité par comparaison avec le péage classique –, tandis que le surcroît de mobilité en voiture serait soumis à l'équivalent d'une tarification routière, du fait de la nécessité d'acquiescer des permis supplémentaires.

Un mécanisme original de tarification de la congestion à base de crédits a été proposé par Kockelman et Kalmanje (2005) : les automobilistes recevraient chaque mois une allocation sous forme de crédits (en principe monétaires), utilisables pour circuler sur un réseau de routes, ou sur une zone, soumis à la tarification de la congestion. Les automobilistes n'auraient donc rien à payer tant qu'ils n'épuiseraient pas leur allocation : au-delà, ils seraient soumis au régime du péage de congestion. Ceux qui n'épuiseraient pas totalement leur allocation pourraient utiliser leurs crédits plus tard ou les échanger contre de l'argent liquide.

Cependant, à notre connaissance, aucune de ces propositions n'est allée jusqu'à un niveau de détail suffisant pour juger de l'applicabilité éventuelle de ce type de mesure en milieu urbain. Comme l'on dit familièrement, « le diable est dans les détails », et nous le verrons, l'examen de ces détails et la résolution des problèmes qu'ils posent délimitent in fine les configurations possibles de ces systèmes de permis négociables.

Dans la suite de cet article, nous allons rappeler l'intérêt que présentent les permis négociables pour les transports : la théorie montre que ce type d'instrument garantit l'atteinte de l'objectif quantitatif de limitation des nuisances, et ce à moindre coût. En outre, cet instrument se révèle particulièrement pertinent en situation d'incertitude quant à la réponse de la demande, comme c'est le cas dans les transports. Cet instrument permet également de séparer les questions d'efficacité allocative des efforts de réduction des nuisances, des questions d'équité à travers l'allocation initiale des quotas. Nous montrerons ensuite pour quelles nuisances particulières en milieu urbain cet instrument peut être pertinent et quelles cibles peuvent être visées. Nous démontrerons enfin, à travers un exemple détaillé, l'applicabilité de ce type d'instrument et l'évaluation qui peut en être faite.

## **2 Quel intérêt présentent les marchés de permis pour les transports urbains ?**

Après avoir rappelé les principales caractéristiques théoriques des marchés de permis et leurs critères de choix par rapport à la taxe, nous identifierons les principales nuisances dues au transport en zone urbaine, candidates pour une application appropriée de marchés de permis. De là, nous analyserons les cibles potentielles pour les droits échangeables, pour ensuite évaluer leur adéquation aux nuisances à réduire.

## 2.1 Théorie

La théorie économique des marchés de permis de polluer remonte aux travaux de Coase (1960) sur les coûts externes, suivis de ceux de Dales (1968) sur la régulation des usages de l'eau, et de ceux de Montgomery (1972) sur la formalisation des marchés de permis.

Un système de permis transférables égalise les coûts marginaux de réduction entre toutes les sources d'émission : sous certaines hypothèses c'est une condition suffisante pour minimiser le coût total de réduction des émissions à un niveau quantitatif donné (Baumol et Oates, 1988). Ce résultat s'obtient indépendamment de l'allocation initiale des droits.

Cependant, Stavins (1995) a montré qu'en présence de coûts de transaction – recherche de partenaires pour l'échange, négociation, prise de décision, suivi et mise en conformité avec la réglementation –, l'allocation initiale des droits peut affecter l'équilibre final et le coût total de réduction des émissions. Il est donc du devoir des autorités de réduire ces coûts de transaction, par exemple en évitant une réglementation tatillonne ou en facilitant l'activité d'intermédiaires entre vendeurs et acheteurs de droits (Hahn et Hester, 1989 ; Foster et Hahn, 1995).

Ces marchés ont prouvé leur efficacité dans la maîtrise des émissions de dioxyde de soufre par les centrales électriques américaines (Godard, 2000), ou pour l'élimination rapide du plomb dans l'essence dans les années 80 aux Etats-Unis (Raux, 2002a). En ce qui concerne les gaz à effet de serre, le système européen d'échanges de quotas d'émission de CO<sub>2</sub> entre les installations fixes est opérationnel depuis 2005.

Du point de vue de l'objectif quantitatif de réduction, la différence essentielle entre taxe et permis réside dans le fait qu'en pratique, la puissance publique ne dispose pas de l'information complète sur les coûts de réduction des différents agents. Avec une approche par les permis, l'objectif de réduction des émissions est garanti mais sans garantie sur le niveau des coûts marginaux effectifs de réduction. Par contre, avec la taxe, le montant du coût marginal de réduction pour chaque agent est fixé par le niveau de la taxe, mais sans garantie sur le niveau de réduction des émissions.

Cette incertitude rend le choix difficile, car les erreurs sur l'anticipation des dommages ou des coûts de réduction des agents, et plus particulièrement sur la répartition de l'effort dans le temps et entre les agents, peuvent être très coûteuses pour la collectivité. Plusieurs critères permettent néanmoins d'aider au choix (Baumol et Oates, 1988).

Un premier critère de pertinence des permis est la situation dans laquelle les dommages causés à l'environnement sont susceptibles d'augmenter très rapidement voire de devenir irréversibles quand on approche certains seuils d'émissions, ou quand on les dépasse. Dans ce cas, les permis négociables minimisent le coût des erreurs d'appréciation par comparaison avec la taxe. Le problème des émissions de gaz à effet de serre est particulièrement illustratif de ce cas. Un autre exemple, en matière de transports, est celui où, à court terme, la congestion peut déboucher sur une hypercongestion, source de gaspillages importants pour la collectivité.

Un deuxième critère de choix en faveur des marchés de permis est une situation où les agents sont plus sensibles aux signaux quantitatifs qu'aux signaux-prix, particulièrement lorsque l'élasticité-prix de la demande est faible à court ou moyen terme. C'est le cas pour la demande de transport en termes de déplacements ou de véhicules-kilomètres parcourus.

Malgré tout, le choix entre taxe et permis ne peut être tranché *ex ante* et nécessite une analyse au cas par cas. Une solution générale à ce problème d'incertitude sur les coûts de réduction

des émissions a été proposée par Baumol et Oates (1988, pages 74-76), à partir d'une idée de Roberts et Spence.

Si la quantité de permis mise sur le marché par le régulateur est trop faible (pour une année donnée ou pour un secteur donné), le libre jeu du marché des permis aboutirait à un prix trop élevé. Le régulateur peut alors mettre en place une taxe libératoire  $t$ , selon le principe que tout émetteur est autorisé à émettre plus que la quantité permise par les droits qu'il détient, en acquittant la taxe  $t$  pour ces émissions supplémentaires. Dans ce cas, dès que le prix des permis dépasse le niveau  $t$ , les émetteurs ont intérêt à payer la taxe libératoire. Donc le prix des permis sera borné par le haut par  $t$ .

En résumé, cette solution hybride combinant une allocation de permis et une taxe libératoire, s'applique lorsque le régulateur a à prendre des décisions, soit relatives à la répartition au cours du temps de l'effort de réduction (par exemple, des objectifs annuels), soit relatives à la répartition de cet effort entre les différents acteurs ou secteurs de l'économie.

Un troisième et dernier critère de choix des permis suppose une certaine hétérogénéité des agents participant au marché. Cela signifie que les coûts marginaux de réduction des activités à l'origine des émissions, soient suffisamment différents entre les agents, de manière à rendre l'échange des droits profitable et ainsi rendre effectif le fonctionnement du marché.

Tout indique que les courbes de coût marginal de réduction des activités visées sont très diverses, et notamment plus élevées à mesure que l'on passe de l'urbain, au péri-urbain puis au rural. En effet, sur deux points essentiels que sont les changements de lieux d'activité et les changements de mode de transport, ces possibilités d'action sont de natures et de degrés très divers si l'on considère les localisations résidentielles des personnes concernées. Les changements de lieux d'activité, de manière à rapprocher les différents lieux entre eux, sont nettement plus faciles en milieu urbain qu'en péri-urbain et en rural, de par la densité d'activités offertes : les changements de court terme sont possibles en ce qui concerne les activités faiblement contraintes en matière de localisation, comme les achats ou les loisirs ; les rapprochements entre emploi et domicile sont rendus plus faciles dans une agglomération offrant une grande densité d'opportunités. De même, la massification des flux découlant de la densification des lieux d'activités, rend plus fréquente en milieu urbain dense la disponibilité de transports collectifs venant en alternative au véhicule individuel.

Enfin, et non des moindres, la possibilité d'allocations gratuites de droits, pouvant être vue comme un moyen d'éviter une nouvelle taxe, est un facteur évident d'acceptabilité d'une politique de régulation de la mobilité qui utiliserait des systèmes de droits échangeables. Avec cette allocation gratuite, les agents ont une incitation supplémentaire à économiser le carburant, les déplacements ou les distances parcourues, au-delà de leur allocation initiale car ils peuvent vendre les droits inutilisés et alors obtenir une gratification en récompense de leur comportement « vertueux ».

La question des coûts d'administration de tels systèmes qui, par définition, visent une multiplicité de sources mobiles semble à première vue rédhitoire. Cependant, dans une application au cas de la mobilité urbaine, cette question est similaire à celle des coûts d'exploitation du péage urbain : les mises en œuvre des péages urbains ces dernières années, grâce aux progrès et à la réduction des coûts de l'électronique embarquée, prouvent que des solutions existent.

## 2.2 Nuisances appropriées en zone urbaine

Deux critères principaux permettent de juger de la pertinence de marchés de droits transférables : il s'agit de la capacité à imposer une contrainte, ou un droit, définis en termes quantitatifs à l'intérieur d'un espace et d'une période donnés, et de la capacité des agents à transférer tout ou partie de ces obligations quantitatives (Godard, in OECD, 2001). Ces critères peuvent être appliqués en analysant successivement les principales nuisances associées à l'activité de transport, i.e. les émissions de gaz à effet de serre, la pollution régionale, le bruit et la congestion.

La contrainte sur les émissions de gaz à effet de serre est définie à l'échelle de la planète, c'est-à-dire qu'une tonne de CO<sub>2</sub> émise a le même effet sur le changement climatique quel que soit l'endroit et le moment de son émission. Il s'agit d'un problème global qui dépasse de loin l'échelle urbaine et cette question ne sera pas traitée plus avant dans cet article. Plusieurs propositions de marchés de permis ou crédits entre constructeurs automobiles, fondés sur les émissions unitaires des flottes de véhicules qu'ils produisent, ont été faites dans la littérature (Wang, 1994 ; Albrecht, 2000). Des droits à consommer du carburant, échangeables entre automobilistes, ont été proposés par Raux et Marlot (2005).

Pour ce qui concerne les polluants atmosphériques, dont la diffusion est locale voire à l'échelle de la région urbaine<sup>2</sup>, il est également possible d'établir des objectifs précis et mesurables pour les émissions agrégées. C'est la somme des outputs individuels des agents qui définit l'output global, et les droits peuvent alors être échangés à l'intérieur de la zone géographique soumise à la réglementation de la qualité de l'air. Comme de nombreuses réglementations sanitaires locales ou nationales prescrivent des seuils de concentration des polluants atmosphériques à ne pas dépasser, une approche fondée sur les quantités peut être requise.

A l'opposé, cela ne s'applique pas au cas du bruit, dont le niveau ne croît pas linéairement avec le nombre d'émetteurs individuels.

La congestion de la circulation automobile est un autre cas où des seuils peuvent être explicités. Si la politique locale est de ne pas accroître la capacité routière d'écoulement du trafic, alors une contrainte de quantité pourrait être imposée sur ce dernier. Strictement parlant, il est difficile de définir des équivalents de congestion sur des aires géographiques ou des plages temporelles étendues : une heure perdue en un lieu et à un moment donnés n'est pas strictement équivalente à une heure perdue en un autre lieu ou à un autre moment. Un programme efficace restreindrait donc l'échange de droits entre, par exemple, les utilisateurs d'un corridor particulier durant une plage de temps limitée, comme la pointe du matin. Cependant, la congestion induit tout d'abord des effets dans le réseau routier de l'agglomération : la congestion d'une section de route incite les automobilistes à choisir un autre itinéraire pour économiser du temps. La congestion induit ensuite des réorganisations d'emploi du temps des individus : la congestion à un moment donné incite des automobilistes à se déplacer plus tôt ou plus tard dans la journée, voire dans la semaine. Du fait de ces deux types d'interaction, l'échange de droits à circuler peut être étendu à différentes zones dans une même aire urbaine et à différentes heures et même différents jours. L'équivalence entre les droits à circuler peut, comme nous le verrons, être ajustée en fonction du niveau de congestion au moment du déplacement.

---

<sup>2</sup> Les polluants primaires tels que le monoxyde de carbone (CO), le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) et les composés organiques volatiles (COV). Les réactions chimiques secondaires qui contribuent à la formation de l'ozone ne sont pas considérées ici.

Une autre rareté, indirectement reliée à l'activité de transport routier, est celle de l'espace disponible pour le stationnement dans le domaine public. Ici encore, si la politique locale est de ne pas accroître la part de l'espace public dévolu au stationnement des véhicules, alors une contrainte par les quantités pourrait être imposée sur cet usage. Il est clair cependant qu'il n'y a pas d'interaction aussi large que pour la congestion, puisqu'en général une place de stationnement n'est équivalente à une autre que dans un certain rayon de marche à pied : le marché de droits serait dans ce cas restreint à de trop petites échelles géographiques.

### *2.3 Les cibles potentielles pour les droits échangeables en zone urbaine*

Vu sous l'angle de la demande, la congestion et les impacts environnementaux du transport proviennent

- des caractéristiques techniques des carburants et des véhicules (source d'énergie, consommation unitaire et émissions de polluants),
- de la possession et de l'intensité d'usage des véhicules (le transport comme résultant de tendances économiques et sociales),
- de l'usage des sols (localisations des diverses activités et leur impact sur les distances parcourues).

Les nuisances émanant du transport peuvent donc être potentiellement régulées dans chacune de ces dimensions. Cependant, parmi celles-ci, certaines sont à l'évidence au-delà du domaine d'intervention des gouvernements locaux. C'est le cas de la réglementation sur les émissions unitaires des véhicules et sur les normes de composition des carburants (pour une revue des applications dans ces domaines cf. Raux, 2004).

#### *La possession de véhicules*

Un programme de rationnement de la possession de véhicules est en œuvre à Singapour depuis 1990. Ce programme comprend la mise aux enchères annuelle de certificats d'importation de véhicules (Singapour n'en produisant pas). Le nombre de certificats est déterminé chaque année sur la base des conditions de circulation et des capacités routières (Koh et Lee, 1994). Chin et Smith (1997) ont montré que la régulation de la possession des voitures par les quantités est pertinente car la demande pour ce bien est inélastique et la fonction de coût sociale pentue. Comparé au contrôle par les prix, le contrôle par les quantités réduit la perte de bien-être qui résulterait d'une mauvaise perception de l'équilibre optimal par les autorités.

#### *L'usage des véhicules*

Cet usage peut être une solution intermédiaire pour contrôler la congestion. Daganzo (1995) a proposé un programme de réduction de la congestion, avec des quotas non transférables. Ce programme a été évalué par Nakamura et Kockelman (2002) dans une application au corridor du San Francisco Bay Bridge. D'autres propositions concernent les quotas échangeables de véhicules-kilomètres parcourus ou de déplacements, ainsi que mentionné en introduction de cet article.

### *Le stationnement*

Si l'on considère la régulation des externalités du transport routier, les droits de stationnement peuvent aussi apparaître prometteurs. Cependant, les externalités du transport routier sont causées par des véhicules qui se déplacent tandis que les politiques de stationnement visent à la base des véhicules immobiles. Par exemple, une politique de stationnement trop restrictive dans les zones résidentielles peut inciter les automobilistes à bouger leur véhicule afin d'y échapper et induire ainsi une circulation supplémentaire. Dans les centres d'affaires où sont concentrés des emplois plutôt que des logements, la mise en œuvre de droits de stationnement interférerait ou même dupliquerait un programme de droits à circuler. Ces inconvénients font que les droits de stationnement ne méritent pas d'analyse plus poussée (pour une analyse détaillée voir Verhoef et al, 1997).

### *La composition chimique des carburants*

Parmi les polluants atmosphériques, certains découlent de la composition des carburants et peuvent donc relever d'une application des droits échangeables aux normes de carburant. Le plomb comme additif dans l'essence est en voie de disparition dans les pays développés et a d'ailleurs fait l'objet d'une application réussie des marchés de permis aux USA (pour une revue de ce sujet cf. Raux, 2002a). Les émissions de dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) relèvent également de la réglementation à travers la teneur des carburants en soufre.

### *Les réglementations sur les émissions des véhicules*

Les autres polluants sont par contre le fruit de la combustion plus ou moins efficiente du carburant dans les moteurs et de la capacité de filtrage à l'échappement. Il s'agit des oxydes d'azote NO<sub>x</sub>, des hydrocarbures (HC) et des particules. Par exemple, en Europe, les émissions unitaires des véhicules sont réglementées par les normes Euro qui s'appliquent aux nouveaux véhicules mis sur le marché. Le Tableau 1 donne les valeurs Euro pour les véhicules particuliers (classe M1). On y voit que pour les HC et NO<sub>x</sub> il existe un rapport de 1 à 10 entre la norme Euro IV et la norme Euro I pour les véhicules essence, et un rapport de 1 à 3 pour les véhicules diesel. La réglementation sur les émissions de particules n'a concerné jusqu'ici que les véhicules diesel (rapport de 1 à 6 entre la norme Euro IV et la norme Euro I) et s'appliquera aux véhicules essence à partir de la norme Euro V encore en discussion fin 2007.



	Entrée en vigueur pour les nouveaux véhicules	HC (en équivalent CH4)	NOx (en équivalent NO2)	Particules
VP essence M1		g/km	g/km	g/km
Euro I	1993	0.97 (HC+NOx)	0.97 (HC+NOx)	
Euro II	1997	0.5 (HC+NOx)	0.5 (HC+NOx)	
Euro III	2001	0.20	0.15	
Euro IV	2006	0.10	0.08	
VP Diesel M1				
Euro I	1993	0.97 (HC+NOx)	0.97 (HC+NOx)	0.14
Euro II	1997	0.7 à 0.9 (HC+NOx)	0.7 à 0.9 (HC+NOx)	0.08 à 0.1
Euro III	2001	0.56 (HC+NOx)	0.56 (HC+NOx)	0.05
Euro IV	2006	0.30 (HC+NOx)	0.30 (HC+NOx)	0.025

Source : Hugrel and Joumard, 2006

**Tableau 1 : Normes européennes d'émission des véhicules routiers**

Ce type de normes qui permettent de catégoriser les véhicules selon leur niveau d'émission de polluants, peut alors constituer la base d'une modulation de l'intensité d'usage des véhicules selon leur catégorie émissive. Concrètement, le nombre de droits requis pour circuler pourrait, toutes choses égales par ailleurs, varier selon la catégorie d'émission du véhicule. C'est ce type de modulation qui a été utilisé dans le système Ecopoints en vigueur pour les poids lourds traversant l'Autriche jusque fin 2006 (pour une revue de cette expérience voir Raux, 2002a).

### *L'usage des sols*

Dans les zones peu denses, le transport public n'est pas pertinent et les distances, plus longues, sont le plus souvent parcourues en voiture particulière. L'usage des sols est généralement géré par la réglementation. Cependant, des propositions existent pour appliquer les marchés de permis aux promoteurs immobiliers, sur la base des volumes de circulation générés par leurs projets (Ottensmann, 1998).

Toutefois, cela nécessite d'identifier les générateurs (exemple, centres commerciaux, zones artisanales ou industrielles) et pose de nombreux problèmes d'organisation du marché, notamment pour minimiser les coûts de transaction et rendre possible les échanges, à l'intérieur d'une agglomération, mais peut être aussi entre les agglomérations.

### *2.4 Adéquation des cibles aux nuisances à réduire*

En ce qui concerne la congestion (cf. Tableau 2), l'incitation la plus efficace et la plus décentralisée consiste à cibler les véhicules-kilomètres parcourus par l'automobiliste (ou même les déplacements dans des corridors particuliers ou à travers une zone). Les automobilistes en tant que décideurs finaux peuvent modifier leurs choix de déplacements, leurs localisations de certaines activités ou leur choix de véhicule.

Le ciblage des véhicules-kilomètres parcourus avec un ajustement selon la catégorie d'émission du véhicule est particulièrement approprié pour les émissions de polluants locaux

ou régionaux. Cela encourage le passage à des véhicules ou des technologies moins polluants et donc à réduire les émissions par kilomètre parcouru. Par contre, en ciblant uniquement les véhicules-kilomètres parcourus ou les déplacements, l'inconvénient serait de rationner la mobilité, tout en s'éloignant d'un lien optimal avec les émissions polluantes, puisque serait absente l'incitation à passer à des véhicules plus propres.

Cibles	possession de véhicule	usage des sols	v-km ou déplacements	v-km ajustés selon la catégorie d'émission
Nuisances				
Congestion	x	xx	xxx	xxx
Pollution locale / régionale	x	xx	xx	xxx

Niveau d'adéquation de x = faible à xxx = élevé

**Tableau 2 : Adéquation des cibles de droits échangeables aux nuisances à réduire**

Pour les deux catégories de nuisances, la congestion et la pollution régionale, la régulation de l'usage des sols est en principe une manière attractive de réduire les distances parcourues mais son impact potentiel est controversé : il n'a pas encore été prouvé qu'il était possible de renverser la tendance à l'allongement des distances parcourues en compactant de nouveau les lieux d'activités. Cependant, il faut reconnaître que la concentration spatiale des activités favorise des alternatives à la voiture efficaces et moins énergivores, telles que les transports collectifs.

Enfin, la possession de voitures est un autre moyen indirect de réguler les kilomètres parcourus en voiture, mais le lien avec l'usage réel et donc la congestion ou les émissions de polluants, est trop grossier.

Dans ce qui suit, nous développons le cahier des charges pour la mise en œuvre de droits à circuler pour manager la demande de transport en milieu urbain.

### 3 Le cahier des charges

L'objectif de ce cahier des charges est double : il est de maîtriser la croissance, d'une part des véhicules-kilomètres parcourus, particulièrement aux heures de pointe, d'autre part des émissions de polluants atmosphériques par les véhicules. L'idéal de l'efficacité serait donc de cibler les véhicules-kilomètres parcourus, avec une capacité de différenciation dans le temps et l'espace (congestion) et selon le type de véhicule (émissions de polluants atmosphériques).

Cependant, les possibilités limitées de la technologie à des coûts abordables nécessitent d'établir un compromis par rapport à cet objectif. Un premier point est donc à faire au sujet de ce que permet la technologie aujourd'hui et ce qu'elle permettra dans un proche avenir. Dans un deuxième temps, nous abordons les conditions qu'un système de permis d'émission négociables doit respecter pour sa mise en œuvre avec succès.

#### 3.1 Les technologies existantes ou envisageables et leurs coûts

La technologie de péage électronique la plus mature aujourd'hui, repose sur un équipement embarqué à bord des véhicules, qui dialogue par radio (*Dedicated Short Range*

*Communications*, DSRC) avec un équipement placé en bord de route. Ce dialogue permet, dans sa version la plus simple, d'identifier le véhicule et de transmettre les données concernant la transaction à un ordinateur central, aux fins de facturation au propriétaire du véhicule. Ce procédé suppose l'enregistrement préalable des véhicules et de leurs propriétaires. L'équipement en bord de route doit en outre comprendre une possibilité de reconnaissance vidéo de la plaque d'immatriculation du véhicule pour détecter les véhicules pour lesquels les transactions n'aboutissent pas (fraude ou autre).

Une version plus élaborée consiste à débiter à la volée une carte à puce préchargée (ou une carte bancaire) insérée dans l'équipement embarqué. La possibilité d'acquérir anonymement les cartes préchargées permet d'éviter des contestations au sujet de la protection de la vie privée.

Ce dernier système est utilisé pour le péage routier électronique de Singapour, qui a pris en 1998 la suite du système manuel de paiement pour le péage couvrant la zone du centre des affaires, dénommé *Restricted Zone* (RZ), qui fonctionnait depuis 1975. Le nouveau système couvre la RZ et une série d'autoroutes principales. Initialement en 1998, 32 portiques ont été installés et 674.000 *In-vehicle Units* (IU) ont été distribués gratuitement pour un coût d'investissement de 114 mio US\$ (Menon and Chin, 2004). Les coûts d'exploitation annuels sont de 9 mio US\$ pour environ 6 millions de transactions quotidiennes en 2003. Le pourcentage de fraude est en moyenne mensuelle inférieur à 0,5% des transactions. Les propriétaires de nouveaux véhicules doivent désormais acheter leur IU au prix de 69 US\$ (Menon, 2000).

Une deuxième technologie de collecte du péage, fondée sur le positionnement des véhicules par satellite (GPS mondial ou Galileo européen), est en train d'émerger. Un exemple connu est celui du programme *TollCollect* qui vise les poids lourds sur le réseau des autoroutes allemandes. Cette technologie repose sur l'usage d'un équipement embarqué (*On Board Unit*, OBU) qui intègre un instrument de positionnement GPS dialoguant avec une constellation de satellites. Ce type de technologie représente ce qui se fait de mieux du point de vue de l'idéal de l'efficacité du péage routier, puisqu'il permet de suivre les véhicules à la trace, et donc de tarifier la distance exacte parcourue, le tarif pouvant être variable selon les lieux et heures de passage du véhicule.

Techniquement ce système ne nécessite pas d'équipement en bord de route, mais il est malgré tout considéré comme très coûteux de mise en œuvre. Par exemple, le coût de l'OBU est estimé entre 200 et 400€ (y compris le coût du montage). En outre, pour en optimiser le coût, ce système doit inclure d'emblée tous les véhicules potentiellement tarifés : le traitement des utilisateurs occasionnels nécessite des procédures manuelles lourdes et coûteuses qui viennent dupliquer le système électronique. Enfin, la possibilité de suivre en permanence les véhicules pose d'évidents soucis de préservation de la vie privée pour les conducteurs de voitures particulières.

On peut toutefois considérer qu'il ne s'agit là que de défauts de jeunesse, qui ont vocation à être surmontés pour aboutir à des technologies acceptables et efficaces.

Compte tenu de ces possibilités techniques et de leurs coûts actuels, il semble pertinent d'envisager deux types d'application possibles :

- la première application serait fondée sur la technologie éprouvée à base d'électronique embarquée et d'équipements en bord de route (que nous désignerons par la suite sous l'acronyme « DSRC »), et viserait les *déplacements* des véhicules automobiles dans la zone soumise au programme de restriction de la circulation ;

- la deuxième application serait fondée sur la technologie à base de positionnement satellitaire des véhicules (que nous désignerons par la suite « GPS ») et viserait les *véhicules-kilomètres* parcourus dans la zone soumise au programme.

### 3.2 *Les conditions de mise en œuvre d'un marché de permis d'émission*

Les expériences de marchés de permis d'émission permettent, conjointement à des synthèses effectuées par ailleurs (cf. OECD, 1997, 1998), de lister les principaux critères de succès de tels systèmes (cf. Encadré 1). Ces critères constituent une référence pour la conception et l'évaluation de la proposition qui sera faite ultérieurement.

#### **Encadré 1**

##### **Les critères de succès de systèmes de PEN**

1. Un accord large sur la nécessité de faire quelque chose et sur l'efficacité du système du point de vue de l'amélioration de l'environnement et de son moindre coût par rapport à d'autres solutions.
2. La simplicité et clarté du système : établissement de règles simples, de frontières du marché, d'une unité d'échange définie, mesurable et vérifiable, de participants clairement identifiés.
3. La possibilité pour les participants de pouvoir effectivement payer le prix prévisible du permis.
4. L'existence d'un nombre suffisant de participants pour faire fonctionner le marché.
5. Des coûts marginaux de dépollution suffisamment différents pour que des gains puissent être réalisés grâce aux échanges.
6. Des coûts de transaction limités.
7. La crédibilité du suivi, des vérifications et des sanctions.
8. La certitude quant aux mécanismes d'allocation des permis et à leur validité dans le futur.
9. La prise en compte de l'équité et plus généralement de l'acceptabilité sociale et politique.

La conception d'un marché de permis d'émission nécessite de répondre à une série de questions, évoquées brièvement ci-après.

La première est relative à la définition de l'unité faisant l'objet d'échanges. Compte tenu des objectifs affichés il s'agirait de droits à circuler (DC). Ces DC devront pouvoir être différenciés dans l'espace et le temps (congestion) et selon le niveau d'émission du véhicule (pollution). Il faudra alors préciser le mécanisme et les paramètres de la différenciation.

La deuxième question est relative à la définition des entités qui vont devoir rendre les quotas de droits à mesure de leurs émissions. Il s'agira bien entendu des utilisateurs de véhicules.

Une troisième question est celle de l'allocation de ces quotas. Faut-il allouer des quotas gratuitement ? Si la réponse est négative, les entités soumises au programme devront acheter sur le marché la totalité des permis dont elles ont besoin, ce qui équivaut, dans un contexte de rareté de la quantité totale disponible sur ce marché, à une mise aux enchères des quotas. C'est la solution économiquement la plus efficace puisqu'elle force les acteurs à révéler leurs préférences. Elle est en conformité avec le principe du pollueur-payeur et permet en outre de créer une ressource financière utilisable. En revanche, comme dans le cas du péage de congestion, elle alourdit d'emblée la charge financière pour les acteurs concernés : cela supprimerait l'avantage essentiel d'acceptabilité que pourraient avoir les droits à circuler sur

le péage de congestion. En conséquence, une partie au moins des quotas devrait être allouée gratuitement pour faciliter l'acceptabilité de cet instrument.

Si les quotas sont alloués gratuitement, à qui faut-il les allouer et selon quelle méthode de distribution ? En effet, bien qu'en théorie ces méthodes ne remettent pas en cause l'efficacité de l'instrument, ces méthodes déterminent *in fine* la charge financière qui pèsera sur les entités participantes. S'agit-il des possesseurs de véhicules ou des habitants ? La deuxième option reviendrait à compenser les habitants pour les conséquences de la congestion et de la pollution qu'ils subissent. Parmi eux se trouvent ceux qui se déplacent autrement qu'en automobile, i.e. les piétons et les usagers des transports collectifs : cela renforcerait l'acceptabilité du programme.

D'autres questions sont relatives à la période de validité des quotas et aux obligations de rendu des quotas. Ces paramètres doivent être définis de manière à maintenir les incitations à réduire la consommation des droits à circuler, particulièrement en période de congestion, et à réduire les émissions de polluants.

Les caractéristiques principales de fonctionnement du marché de permis doivent également être définies, à savoir comment s'opéreraient les transactions, quelle souplesse serait accordée aux échanges de droits entre les détenteurs de ceux-ci, quel rôle pourraient jouer des intermédiaires financiers autres que l'autorité régulatrice.

Enfin, une attention particulière doit être portée à deux questions. La première est la possibilité de préserver l'anonymat dans les transactions, un facteur évident d'acceptabilité d'un nouveau mécanisme de régulation. La deuxième est celle du traitement des « effets de bord », notamment la gestion des usagers occasionnels.

Ces différents points sont abordés dans la proposition suivante.

#### **4 Un système de droits à circuler négociables en zone urbaine**

La réponse au cahier des charges précédent implique donc de définir l'unité d'échange, c'est-à-dire ce qui caractérise le droit à circuler. Ensuite est abordée la question centrale de l'allocation de ces droits, puis la conception du marché et du mécanisme d'échange des droits. Enfin sont traitées les questions de période de validité des droits, de suivi de la consommation et du contrôle des droits à circuler, pour terminer brièvement sur la compatibilité de ce mécanisme de droits à circuler avec les régulations existantes.

##### *4.1 Unité d'échange*

L'unité d'échange serait le droit à circuler (DC). Dans le système DSRC, l'unité de compte des DC serait le déplacement, tandis que dans le système GPS l'unité de compte des DC serait le véhicule-kilomètre. La quantité à réguler serait donc un total de DC, c'est-à-dire soit des déplacements, soit des véhicules-kilomètres.

Une agence en charge des transports de l'agglomération, recevant ses pouvoirs des autorités locales élues, fixerait les divers paramètres du programme. Pour cela, l'agence s'appuierait sur un dispositif d'enquête comprenant par exemple des enquêtes sur les déplacements auprès des ménages et des données de comptage sur les trafics (exemple des enquêtes cordon).

L'agence délimiterait les différentes zones (selon le niveau de densité), les heures de pointe et les heures creuses, ainsi que les catégories d'émission des véhicules (exemple, les normes Euro).

Ces paramètres permettraient de calculer la pondération des DC dont sont redevables les conducteurs de véhicules. Le DC serait pondéré selon le degré de congestion, qui donne une indication de la surémission de polluants, mais aussi selon la taille du véhicule (en équivalent passagers) et sa catégorie émissive de polluants atmosphériques.

Tous les véhicules qui entrent et circulent dans la zone soumise au programme de régulation seraient redevables de quotas de DC, à rendre à l'agence en quantité calculée selon une méthode décrite ci-après.

Le Tableau 3 donne un exemple des pondérations qui pourraient être appliquées. En ce qui concerne les polluants, en partant du véhicule le moins polluant, soit la voiture particulière M1 essence de catégorie Euro IV, et en prenant pour référence les émissions de HC+NOx, le facteur multiplicatif peut être déduit des données du Tableau 1, soit de 1 à 10.

De même, on peut établir un facteur de pondération supplémentaire, en distinguant la zone de circulation (peu dense / dense), du fait du surcroît de population exposée aux nuisances dans les zones denses. Enfin, une pondération peut être appliquée pour la congestion, en distinguant les heures de circulation (heures creuses / heures de pointe).

VP essence M1	Euro I	10	Zone peu dense	1
	Euro II	5	Zone dense	2
	Euro III	2		
	Euro IV	1	Heures creuses	1
VP Diesel M1	Euro I	10	Heures de pointe	2
	Euro II	9		
	Euro III	5		
	Euro IV	3		

**Tableau 3 : Facteurs de pondération des droits à circuler**

Par exemple, un véhicule essence Euro IV devrait rendre des DC à hauteur de 1 DC par déplacement (ou véhicule-kilomètre) en heure creuse et en zone peu dense. Pour un véhicule diesel Euro IV ce nombre de DC serait multiplié par 3. Ce même véhicule diesel Euro IV en heure de pointe et en zone dense, devrait rendre en tout 12 fois plus de DC. Toujours par rapport à notre référence de véhicule essence Euro IV circulant en heure creuse et en zone peu dense, le coefficient multiplicateur monterait à 40 pour un véhicule Euro I circulant aux heures de pointe et en zone dense. Cela peut sembler excessif : il ne s'agit là que de coefficients de pondérations donnés à titre d'exemple. La pondération devrait être ajustée précisément en fonction des coûts estimés de la congestion et de la pollution.

Ces pondérations supposent bien entendu de pouvoir différencier les véhicules selon leur catégorie Euro (cf. infra le contrôle).

## 4.2 Allocation

Le total des déplacements réalisés ou des véhicules-kilomètres parcourus par les habitants de la zone urbaine serait estimé initialement au moyen du dispositif d'enquête évoqué plus haut. Ce total serait réparti gratuitement à parts égales de droits à circuler (déplacements ou véhicules-kilomètres) entre tous les habitants. Cette estimation n'aurait pas besoin d'être certifiée exacte (ce qui est impossible sur le plan statistique) : elle servirait de base à ce que les représentants élus pensent juste d'allouer gratuitement aux habitants. Ces derniers disposeraient chacun d'un compte de DC auprès de l'agence, compte crédité initialement de cette allocation gratuite.

La part non allouée des DC serait mise en vente par l'agence. Cela permettrait aux automobilistes résidant à l'extérieur de l'agglomération, aux usagers professionnels (exemple, les livraisons par les entreprises, les artisans, les médecins, etc.), au trafic de transit, ainsi qu'aux habitants de la zone urbaine qui auraient épuisé leur solde de DC, d'acheter des droits à circuler. La vente de ces droits s'apparenterait au péage de congestion classique.

L'agence piloterait l'évolution au cours du temps, du total des DC alloués et vendus : ce total pourrait être maintenu constant si la priorité est donnée à la limitation de la circulation, comme il pourrait être augmenté si le développement économique de l'agglomération l'exige. A ce sujet, le niveau de demande des droits mis en vente constituera un bon indicateur des préférences des usagers et du besoin éventuel de développer l'offre de transport.

Comme l'allocation est individuelle mais que les DC sont perçus par véhicule, il y aurait une incitation évidente au covoiturage.

## 4.3 Marché, échange de droits

Deux options sont possibles pour les échanges de droits :

- L'option haute serait celle du marché « pur » : les droits non alloués gratuitement seraient vendus aux enchères. Des intermédiaires financiers (banques) pourraient intervenir pour opérer les échanges et pour proposer ensuite des droits à leurs clients. Ces enchères formeraient un prix d'équilibre, auquel les particuliers détenant des droits inutilisés pourraient les vendre. Par sécurité, afin d'éviter une trop forte hausse en cas d'erreur d'appréciation dans le total de droits mis en vente, l'agence fixerait un prix maximum des droits, prix auquel elle les vendrait.
- L'option basse viserait à ne pas abandonner complètement au marché la gestion de droits de circulation étant donné le caractère fondamental du « droit à la mobilité » : les droits non alloués gratuitement seraient vendus à un prix fixé par l'agence, prix auquel les droits inutilisés seraient également rachetés par l'agence.

Cependant, rien n'interdirait à un détenteur de droits inutilisés de les transférer (voire donner) à une de ses relations. Concrètement, cela passerait par une simple déclaration de transfert de droits d'un compte à un autre, déclaration enregistrée auprès de l'agence (par exemple comme un virement électronique par Internet). Comme la vente et l'achat seraient libres il n'y aurait pas d'incitation au marché noir.

De même, un artisan ou un médecin pourrait indifféremment utiliser les droits qui lui sont alloués en tant que résident de l'agglomération pour ses déplacements privés ou professionnels. Enfin, on peut envisager que les familles puissent regrouper les comptes de droits de leurs membres sur un compte commun.

#### 4.4 Période de validité

Au démarrage du programme, chaque résident de la zone urbaine se verrait allouer gratuitement l'équivalent de quelques semaines de quotas de droits, afin que chacun puisse, dès le départ, utiliser ses droits alloués de manière variable d'une semaine à l'autre. Ensuite, en chaque début de semaine, le résident se verrait allouer les quotas de droits pour une période de 7 jours (ce qui offrirait d'emblée au détenteur des droits la souplesse de les répartir comme bon lui semble sur la semaine). Ces droits seraient valides pendant une durée d'un an à compter de leur allocation. Les droits inutilisés pourraient être revendus à l'agence à tout moment y compris après expiration de leur période de validité. Le solde du compte de DC d'un résident ne devrait pas être négatif.

Le risque de surconsommation de droits à certaines périodes de la journée, de la semaine ou du mois serait assez limité et ce, pour plusieurs raisons. Tout d'abord le débit de DC augmente avec le niveau de congestion et de pollution : chaque droit aura un coût d'opportunité, les droits utilisés en période de congestion ne pourront par définition être utilisés ailleurs ou à un autre moment. Ensuite, la consommation de ces droits serait liée à une autre dépense, en coût et temps de transport, pour une activité dont l'utilité, nette du coût du déplacement, doit être positive pour qu'elle ait lieu. Enfin, comme les droits inutilisés peuvent être rachetés par l'agence, il n'y aurait pas d'incitation à effectuer des déplacements supplémentaires pour consommer ces droits.

#### 4.5 Suivi, contrôle

Le système de perception des DC serait tel que décrit plus haut, sous la forme DSRC ou GPS. Les équipements embarqués seraient livrés gratuitement aux automobilistes, afin de favoriser au maximum les transactions électroniques et donc la fluidité aux points de contrôle. Cet équipement identifierait le type de véhicule et notamment sa catégorie Euro. Il permettrait le débit automatique du nombre de DC requis lors de la circulation des véhicules, sur une carte à puce.

Les cartes à puces seraient préchargées avec les DC alloués ou achetés par l'automobiliste. La séparation entre préchargement de droits et débit sur la carte permet de préserver l'anonymat lors des déplacements.

Dans le système DSRC, afin de minimiser le nombre de portiques de détection des véhicules, la délimitation des différentes zones faisant l'objet du programme de régulation du trafic devrait s'appuyer sur les barrières naturelles (exemple, rivières, voies ferrées) et la topographie du réseau routier.

A l'exemple de la fixation d'une tarification maximale par jour dans le cas du péage urbain de Stockholm, et afin d'améliorer l'acceptabilité du programme, le nombre de DC débités chaque jour pour un véhicule donné devrait être limité à un maximum fixé (par exemple de l'ordre de 4 ou 5 déplacements par jour).

#### *Gestion des utilisateurs occasionnels*

C'est le talon d'Achille des systèmes de collecte électronique de péage. Avec le système DSRC les dysfonctionnements ou violations potentiels doivent être détectés à l'aide de caméras vidéos. Ces caméras peuvent détecter des véhicules non équipés, soit qu'ils ne circulent qu'occasionnellement dans la zone (exemple, les touristes), soit qu'ils refusent tout équipement. Pour ces utilisateurs occasionnels, le mécanisme de règlement et de



recouvrement de cette facture pourrait avoir les mêmes caractéristiques que dans le cas de Stockholm ou du Congestion Charging Scheme de Londres (règlement spontané par Internet, téléphone ou en commerces, avant pénalité éventuelle et recouvrement par une société spécialisée).

Afin de minimiser les occurrences de ce genre de situation, assez coûteuses à gérer, une incitation financière à s'enregistrer et à bénéficier de l'équipement embarqué pourrait être mise en place. Cette incitation pourrait être que le tarif standard de circulation pour la journée dans la zone régulée, tout en n'étant pas un utilisateur enregistré, serait l'équivalent du nombre maximum de droits pouvant être débités chaque jour aux utilisateurs enregistrés (cf. supra).

Dans un futur proche, il est raisonnable de tabler sur une généralisation d'équipements embarqués inter-opérables, à l'exemple du système Autopass d'origine norvégienne et en voie d'extension aux autres pays scandinaves. C'est-à-dire qu'un automobiliste ayant contracté avec un opérateur d'une zone urbaine serait reconnu dans une autre aire urbaine soumise à péage. L'information concernant la classe Euro du véhicule pourrait être extraite des fichiers d'immatriculation. On peut envisager que dans un proche avenir tous les véhicules soient équipés d'étiquettes RFID inviolables contenant l'ensemble de ces informations, comme cela est déjà proposé pour lutter contre le vol des véhicules.

Par contre, dans le système de positionnement du véhicule GPS, la gestion des utilisateurs occasionnels serait plus difficile car elle supposerait de dupliquer le système de suivi satellitaire avec un système de portiques en bord de route, ou d'introduire un contrôle manuel. Le risque de fraude ou au moins d'échappatoire qui s'ensuit, pourrait être interprété comme un traitement discriminatoire de la part des utilisateurs de véhicules équipés. Le système GPS n'a alors de pertinence que dans le cadre d'une généralisation à venir de l'équipement des véhicules avec des systèmes de positionnement, auxquels seraient adjoints les fonctions de dialogue GSM avec un système de tarification de la circulation. Ce qui supposerait donc une harmonisation technique des systèmes de péage électronique entre les aires urbaines et au niveau du parc automobile.

Enfin, le souci de protection de la vie privée est traité de manière adéquate dans le système DSRC, à l'exemple du cas de Singapour (cf. supra). Ce n'est par contre pas le cas actuellement avec le système GPS.

#### *4.6 Compatibilité avec les régulations existantes*

Ce système serait complémentaire et ne ferait pas double emploi avec un système de droits de consommation de carburant, lequel ne serait pas restreint aux zones urbaines. En effet, pour ce dernier, l'objectif est différent puisqu'il s'agit de maîtriser les émissions de CO<sub>2</sub> qui sont directement proportionnelles à la consommation de carburant fossile.

Bien entendu, les DC viendraient se substituer au péage de congestion classique. Enfin, ils seraient complémentaires de la régulation des places de stationnement, cette dernière pouvant être maintenue.

## 5 Un exemple de mise en œuvre

Nous exposons dans ce qui suit ce que pourrait être une application des DC dans le cas de l'agglomération lyonnaise. Cette application est ensuite évaluée en calculant différents surplus économiques.

### 5.1 Mise en œuvre pratique

L'agglomération de Lyon (1.200.000 habitants) a une forme urbaine européenne typique avec une zone centrale qui comprend environ la moitié des habitants et des emplois, cette zone ayant une densité moyenne de population de 9.000 hab/km<sup>2</sup>. Cependant, comme les agglomérations similaires, Lyon est sujette à l'étalement urbain, avec une tendance à la migration de la population et des emplois vers la banlieue et la périphérie urbaine.

La mise en œuvre des DC se fonderait dans un premier temps sur le système DSRC décrit ci-dessus, avec une régulation des déplacements. Pour simplifier, durant les premières années du programme aucune pondération particulière des DC en fonction de la catégorie Euro du véhicule ne serait appliquée. En outre, la détection et le débit des DC ne seraient effectifs que dans les périodes de plus forte circulation, par exemple du lundi au vendredi entre 7h et 19h : ce serait une première approximation de la pondération des DC selon le niveau de congestion.

La principale difficulté est alors de détecter les « déplacements »<sup>3</sup> des véhicules car la circulation ne serait contrôlée que par le passage des véhicules à travers les portiques de détection. La solution consisterait à définir le déplacement comme une période de une heure d'utilisation de la voiture après une première détection par un portique. C'est-à-dire que si le véhicule est de nouveau détecté dans cette période d'une heure, cela serait considéré comme le même « déplacement » et aucun DC supplémentaire ne serait débité. Les déplacements durant plus d'une heure seraient considérés comme des déplacements de plus longue distance ou durée, et il semble équitable de débiter des DC supplémentaires.

Le Tableau 4 donne le nombre moyen de déplacements quotidiens en voiture des habitants de l'agglomération en 1995, pour tous les individus d'une part et les actifs d'autre part, en distinguant selon le niveau de revenu<sup>4</sup>.

---

<sup>3</sup> L'option des droits à circuler journaliers (i.e. un forfait journalier) est écartée car insuffisamment liée à l'intensité des déplacements : il n'y aurait aucune incitation à réduire le nombre de déplacements dans la même journée de 4 à 2 par exemple.

<sup>4</sup> Il s'agit du revenu par unité équivalente d'adulte, afin de tenir compte des différences de taille et de structure entre ménages. La catégorie des bas revenus regroupe les ménages avec moins de 886 € par mois et par unité équivalente d'adulte, les revenus moyens entre 886 et 1344 € par mois, les hauts revenus au-delà de 1344 € par mois (cf. Nicolas et al. 2003).

	Tous individus (5 ans et plus)				Actifs			
	%	en tant que conducteur	en tant que passager	total	%	en tant que conducteur	en tant que passager	total
Bas revenu	35.2	1.13	0.44	1.57	24.2	2.35	0.27	2.62
Revenu moyen	31.8	1.68	0.48	2.16	34.7	2.65	0.29	2.93
Haut revenu	33.1	2.13	0.53	2.66	41.1	3.03	0.30	3.33
Total	100	1.63	0.48	2.12	100	2.73	0.29	3.02

Source: *Enquête ménages déplacements, Lyon (1995)*

**Tableau 4 : Nombre moyen de déplacements quotidiens en voiture**

Afin d'éviter un impact immédiat trop brutal sur la mobilité en voiture pour aller au travail, l'allocation gratuite des droits s'établirait par exemple initialement à 3 DC (i.e. déplacements) par jour ouvrable. Selon cette allocation, comme le montre le Tableau 4, les actifs à bas revenus auraient en moyenne des droits à vendre, les actifs à revenus moyens auraient une position neutre et les hauts revenus auraient à acheter des droits s'ils veulent maintenir leur mobilité en voiture pour le travail. De telles données montrent que ce programme serait fiscalement progressif selon le niveau de revenu.

Ce type d'allocation initiale initierait dès le début du programme un quasi-marché entre ceux qui auraient à acheter des droits additionnels et ceux qui vendraient des droits inutilisés, même si l'allocation globale serait initialement suffisante pour couvrir le total des déplacements actuels en voiture. Cette allocation initiale améliorerait l'acceptabilité du programme dès ses premières années de mise en œuvre. Cependant, après cette première période, l'agence en charge de l'allocation des droits à circuler annoncerait une diminution de l'allocation annuelle individuelle étape par étape.

Enfin, au moment où le système GPS deviendrait opérationnel et abordable, le programme de droits concernant les déplacements serait remplacé par un programme de droits concernant les véhicules-kilomètres parcourus.

## 5.2 Evaluation

### *Méthode d'évaluation*

Notre méthode est fondée sur l'utilisation d'un modèle stratégique de demande de transport, développé pour l'agglomération de Lyon en 1997. Ce modèle est fondé sur une architecture classique à cinq étapes (Raux, 2002b). Ces étapes sont 1) la génération des quantités de déplacements émis par zone, sur la base de tendances démographiques et socio-économiques ; 2) la distribution spatiale des origines et destinations des déplacements, fondée sur un modèle gravitaire dont le facteur de résistance repose sur le coût généralisé (prix et temps) du déplacement entre zones ; 3) la répartition des déplacements interzones entre modes de transport ; 4) la transformation des matrices origine-destination à la journée en matrices d'heure de pointe sur la base des observations passées. Ces quatre sous-modèles ont été calibrés et opèrent en parallèle pour quatre motifs de déplacement – travail, achats et services, éducation, autres motifs. La cinquième et dernière étape utilise une procédure itérative pour affecter les déplacements tous motifs confondus sur différents itinéraires possibles, en les plaçant en concurrence avec le trafic d'échange et de transit de l'agglomération.

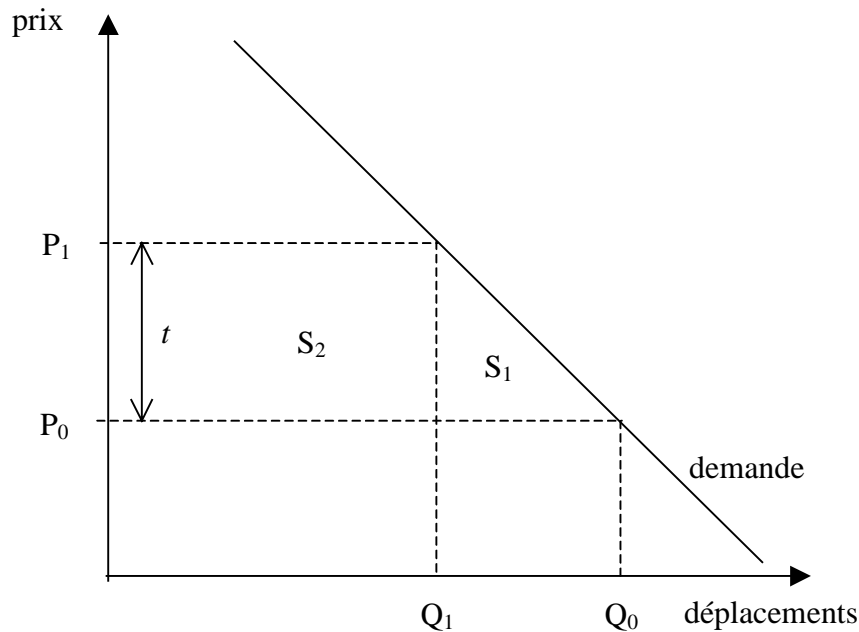
Ce modèle a été calé à partir de trois enquêtes ménages-déplacements (1976, 1986, 1995), donc sur un passé caractéristique d'une baisse continue des coûts de déplacement, notamment en voiture particulière, qu'il s'agisse de l'amélioration de l'offre routière ou de l'évolution des prix du carburant en comparaison du pouvoir d'achat. Cela s'est traduit par l'allongement des distances parcourues, dont rend compte le modèle à travers le sous-modèle de distribution spatiale des origines et destinations.

Or, l'instauration d'un péage urbain ou de droits à circuler échangeables dans l'agglomération représenterait une rupture, se traduisant par de multiples effets : des changements d'itinéraire en cas de tarifications différenciées selon les itinéraires, des changements d'heure de déplacement face à une tarification de pointe, des changements de mode de déplacement, des changements de destination pour les motifs peu contraints, ainsi que des effets à moyen et long terme sur la localisation des activités (emplois, commerces, services, habitat). Ces derniers induiraient in fine d'autres changements dans les destinations des déplacements. Le sens et l'amplitude nets de ces derniers effets sont difficiles à estimer, et cette incertitude est le reflet de l'état limité de nos connaissances actuelles sur les interactions entre conditions de transport et urbanisation. C'est pourquoi nous avons choisi de limiter la simulation à un horizon de court terme.

Afin d'isoler ces effets de court terme, la situation socio-économique (population, emplois et leurs localisations, revenus, etc.) ainsi que les origines et destinations des déplacements sont « gelés » à la situation de 1995, l'année de base du modèle. En conséquence, deux des cinq sous-modèles sont « actifs », le choix modal et l'affectation des déplacements sur les itinéraires. Une détérioration des conditions de circulation automobile peut conduire à un transfert vers d'autres modes ou à un changement d'itinéraire. En résumé, les volumes de déplacements par couple origine-destination restent constants, seuls peuvent changer le mode de déplacement ou l'itinéraire entre les zones.

#### *Hypothèses et méthode de calcul des surplus*

La Figure 1 montre une approximation commode de la courbe de demande, c'est-à-dire la modification des quantités demandées (déplacements de véhicules sur l'axe des abscisses) en fonction du prix (axe des ordonnées). Le prix actuel ( $P_0$ ) correspond au coût moyen déjà supporté par l'automobiliste (coût monétaire de l'utilisation du véhicule plus la valorisation du temps passé à se déplacer). A cela s'ajoute la redevance de congestion ou le prix du droit à circuler (selon le programme mis en œuvre), représenté par  $t$ , ce qui donne le prix  $P_1$ .



**Figure 1: Les effets d'un péage de congestion ou de droits à circuler sur la demande de déplacements**

Le passage de  $P_0$  à  $P_1$  induit une modification des comportements, d'où une réduction de la demande de déplacements en voiture, soit de  $Q_0$  à  $Q_1$ . Les surplus résultant sont alors les suivants :

- $S_1$  est une perte de surplus pour les automobilistes, résultant de la réduction des déplacements en voiture : cette perte est nette du coût supporté pour les déplacements effectués auparavant, soit  $(Q_0 - Q_1) \cdot P_0$ .
- $S_2$  représente dans le cas du péage de congestion le gain pour les autorités locales résultant de la redevance de congestion nouvellement payée par les automobilistes qui continuent à se déplacer en voiture, soit  $(Q_1 \cdot t)$ .  $S_2$  est une perte pour les automobilistes. Dans le cas des droits à circuler, les autorités locales ne sont plus directement partie prenante et  $S_2$  représente, pour les détenteurs des droits, les gains résultant de la vente des droits ou les pertes résultant de l'achat de ces droits.

Le surplus pour les automobilistes est  $-(S_1 + S_2)$ . Le surplus pour les autorités locales est  $S_2$  quand est appliqué le péage de congestion. De plus, comme nous comparons le péage aux droits à circuler, nous ne tenons pas compte des gains en congestion, accidents, pollution locale et bruit qui résulteraient de la réduction de la circulation, car ces gains sont identiques dans les deux cas. En outre, dans notre exercice, la variation de surplus total est identique quand on compare le péage aux droits à circuler. Les différences entre les deux instruments reposent sur les redistributions de surplus entre automobilistes d'une part, et entre automobilistes et autorités locales d'autre part.

### Résultats

Nous reprenons pour ce faire les résultats d'une évaluation de scénarios de péage menée dans une précédente étude sur l'agglomération lyonnaise à partir de données d'observation de 1995 (Raux et Andan, 2002). Ces scénarios de péage supposaient que, au moyen d'une technologie

de péage électronique adhoc (cf. DSRC plus haut), on puisse distinguer les véhicules des résidents de l'agglomération de ceux des non résidents. Aux premiers était appliqué un péage de zone sous forme d'un paiement forfaitaire à la journée couvrant l'ensemble des déplacements, aux seconds un premier péage de cordon d'entrée dans la zone agglomérée et un deuxième péage de cordon d'entrée dans la zone centrale. Le scénario qui réduit le plus le trafic total dans l'agglomération (-5% sur 2,6 millions de déplacements quotidiens de véhicules en 1995, dont 8% de trafic venant de l'extérieur), est celui pour lequel le péage de zone s'appliquant au trafic des véhicules des résidents s'élève à 3€ par jour et le péage d'entrée dans chacun des deux cordons également à 3€ par jour.

Avec un péage moyen de 0.75 € par déplacement (la moyenne pour les automobilistes est de 4 déplacements en voiture particulière), on en déduit la perte de surplus  $S_1$  soit environ 10 mio€ par an. Le surplus  $S_2$ , soit la recette de péage sur les 95% de trafic continuant à circuler, s'établit alors à 370 mio€ par an.

Dans le cas de la mise en place des DC, en supposant que l'objectif quantitatif fixé serait de réduire la circulation de 5% par rapport à la situation actuelle, la perte de surplus  $S_1$  serait inchangée par rapport à la situation du péage.

Par contre le surplus  $S_2$ , au lieu d'aller en recettes pour l'autorité en charge des transports, serait redistribué dans sa plus grande partie entre les automobilistes. Une faible part, correspondant aux 8% de trafic externe ne bénéficiant pas de l'allocation gratuite de DC, serait une recette pour l'autorité en charge des transports, soit 28 mio€. Si l'intégralité des DC sont alloués gratuitement ce sont 342 mio€ qui seraient consommés en DC ou échangés entre les automobilistes désirant circuler dans l'agglomération.

## **6 Les obstacles à la mise en œuvre**

Les obstacles à la mise en œuvre des droits à circuler en milieu urbain sont assez semblables à ceux qui se dressent devant le péage urbain, car le but de ces deux types de politiques est de réguler les externalités du transport et par là même l'intensité des déplacements automobiles. Ces obstacles sont identifiés dans la littérature (Jones, 1998 ; Schlag et Teubel, 1997). Tout d'abord l'opinion publique doit être convaincue de la nécessité d'une action forte, et cela dépend du niveau de sensibilisation à la congestion et aux atteintes à l'environnement du fait de l'activité du transport. L'opinion doit aussi être convaincue que les solutions alternatives telles que les améliorations des transports collectifs, les programmes de parcs-relais ou les encouragements à la marche à pied ou au vélo ne sont pas suffisant quand la congestion ou la pollution automobile atteignent des niveaux trop élevés. Cela indique par ailleurs que les droits à circuler, comme le péage urbain, ne sont pas une panacée à mettre en œuvre dans toutes les zones urbaines. La construction d'un consensus large sur une action « radicale » nécessite de la communication et des débats.

La faisabilité technique et pratique de la régulation de la circulation par les droits à circuler a été abordée précédemment, en analysant le péage électronique actuellement en opération à Singapour. Il existe cependant un risque que la faisabilité économique soit remise en cause par des coûts excessifs de mise en œuvre et d'exploitation (cf. la controverse au sujet du bilan socio-économique du péage de congestion de Londres, du fait du coût élevé de contrôle et de collecte du péage : Prud'homme et Bocarejo, 2005; Raux, 2005). Là encore les chiffres cités précédemment au sujet du péage électronique de Singapour indiquent que ces coûts peuvent être maintenus modérés.

La question de la faisabilité juridique de la régulation des déplacements automobiles par les droits à circuler est pour l'essentiel identique à celle du péage urbain. Le cadre juridique national doit être au besoin rendu compatible, et ce n'est pas encore le cas dans de nombreux pays y compris la France.

L'un des principaux obstacles à une régulation par le marché est la question de l'équité de ce type d'approche, objection résumée par « les pauvres ne pourront plus se déplacer ». Sur ce point une différence essentielle entre droits à circuler et péage urbain doit être soulignée, car une partie au moins des droits à circuler peut être allouée gratuitement : cela constitue une garantie pour une capacité minimale de déplacement qui ne serait pas affectée par la tarification des droits, particulièrement pour les automobilistes ne voulant ou ne pouvant pas abandonner leur voiture. Sous l'angle de l'acceptabilité, cette allocation gratuite représente un avantage certain pour les droits à circuler sur le péage urbain.

L'équité spatiale est aussi une question cruciale quand les automobilistes résidant à l'intérieur de la zone tarifée obtiennent des ristournes tarifaires, comme dans le cas du péage londonien, ou se déplacent gratuitement quand ils restent à l'intérieur du cordon de péage, comme dans le cas d'Oslo ou de Stockholm. Dans ces deux derniers cas, ce problème a été résolu par des accords entre les gouvernements locaux des zones à péage et des zones environnantes au sujet de l'affectation des recettes du péage. Un accord similaire doit être atteint dans le cas des droits à circuler, si les droits sont alloués gratuitement aux habitants de la zone régulée tandis que les recettes proviendraient des droits achetés par les automobilistes résidant en dehors de cette zone.

## **7 Conclusion**

Les droits à circuler échangeables ont trois avantages sur le péage urbain, qui les rendent particulièrement appropriés pour limiter la congestion et la pollution causées par la circulation automobile. Le premier avantage est la garantie qu'un objectif quantitatif prédéfini peut être atteint, ou au moins approché, qu'il s'agisse de limiter la congestion à capacité routière fixée, ou de ne pas dépasser certains seuils de pollution atmosphérique. Le second avantage est que cette approche par les quantités permet de séparer les questions d'efficacité allocative de celles d'équité : la possibilité de maintenir une partie de la mobilité libre de droits à côté d'une partie soumise à tarification, est un facteur évident qui rend les droits à circuler a priori plus acceptables que le péage urbain conventionnel. Le troisième avantage est qu'avec cette allocation gratuite, les individus ont une incitation supplémentaire à économiser des déplacements ou des kilomètres parcourus en automobile, au-delà de leur allocation initiale de droits, parce qu'ils peuvent vendre les droits inutilisés et obtenir une récompense tangible pour leur comportement vertueux.

Plus généralement, l'allocation de droits à circuler crée une sorte de droits sur la rente urbaine, qui sont partagés entre les habitants plutôt que capturés par les autorités locales. Ces caractéristiques rendent les droits à circuler fondamentalement différents du péage urbain, même avec des ristournes particulières pour certains usagers.

L'analyse des applications potentielles pour manager la demande de transport en milieu urbain a fait ressortir deux cibles à privilégier : la première est celle des déplacements ou des véhicules-kilomètres parcourus, afin de réguler la congestion ; la seconde est la même cible mais modulée sur la base de la catégorie d'émission de polluants du véhicule, afin de réguler les émissions de polluants atmosphériques.

L'évaluation des technologies de péage électronique a montré que l'une d'entre elles, combinant équipement embarqué et équipement en bord de route, a fait ses preuves par une mise en œuvre effective à des coûts acceptables dans plusieurs villes. Une autre technologie peut être considérée, mais plutôt à l'avenir, fondée sur la combinaison d'un système de positionnement satellitaire et d'un système de collecte des péages.

Sur la base de ces technologies, et des objectifs de limitation de la congestion et des atteintes à l'environnement du fait de la circulation urbaine, il est possible de concevoir de manière détaillée un système de droits à circuler échangeables, dont l'application peut être raisonnablement envisagée dans une agglomération urbaine.

Le péage urbain conventionnel implique un transfert des automobilistes vers la collectivité, qui est alors à même d'utiliser les recettes selon son propre jugement, tandis que l'allocation gratuite de droits à circuler confine la plus grande part de ces transferts à l'intérieur du groupe des automobilistes et de la population. Cette perte de recettes potentielles pour la collectivité représente le prix à payer pour l'acceptabilité de la régulation de la circulation automobile par les prix, et ce prix à payer peut sembler élevé.

Une stratégie pourrait être d'introduire un mécanisme de limitation de la quantité totale de circulation et de garder ce niveau quantitatif constant au cours des ans. Au fil de l'accroissement de la demande de déplacement du fait de la croissance de l'agglomération, l'achat de droits à circuler additionnels nécessaires procurerait des recettes pour l'autorité de transport. Ainsi les usagers du transport révéleraient leurs préférences, fournissant un signal à la collectivité pour investir de manière efficace dans le développement de l'offre de transport, mais pas nécessairement d'infrastructure routière.

## Remerciements

L'auteur remercie Bruno Faivre d'Arcier pour des commentaires utiles sur une première version de cet article, ainsi que Pascal Pochet pour le calcul de statistiques additionnelles à partir de l'Enquête Ménages Déplacements de Lyon.

## Références

- Albrecht, J. (2000), The diffusion of cleaner vehicles in CO<sub>2</sub> emission trading designs. *Transportation Research Part D*, 5:385-401.
- Baumol, W., Oates, W. (1988), *The theory of environmental policy*. Cambridge University Press, Cambridge, 299p.
- Chin, A. and Smith, P. (1997), Automobile Ownership and Government Policy: The Economics of Singapore's Vehicle Quota Scheme. *Transportation Research Part A* 31: 129-140.
- Coase, R. (1960), The problem of Social Cost. *Journal of Law and Economics*, 3: 1-44.
- Daganzo, C.F. (1995), A Pareto Optimum Congestion Reduction Scheme. *Transportation Research B*, 29:139-154.
- Dales, J.H. (1968), Land, water and ownership. *Canadian Journal of Economics*, 1: 797-804.



- Foster, V. and Hahn, R. (1995), Designing more efficient markets: lessons from Los Angeles Smog Control. *Journal of Law and Economics*, 38:19-48.
- Godard, O. (2000), L'expérience américaine des permis négociables. *Économie Internationale* 82: 13-43.
- Godard, O., Henry, C., (1998). Les instruments des politiques internationales de l'environnement : la prévention du risque climatique et les mécanismes de permis négociables, in Conseil d'Analyse Economique auprès du Premier Ministre. *Fiscalité de l'environnement*. Paris, La Documentation Française, Collection des Rapports du CAE, juillet, (pp. 83-174).
- Hahn, R. and Hester, G. (1989), Marketable permits: lessons for theory and practice. *Ecology Law Quarterly*, 16:361-406.
- Hau, T.D. (1992), *Economic fundamentals of road pricing : a diagrammatic analysis*. The World Bank, Policy Research Working Paper Series, n°1070, 96p., December 1992
- Hugrel, C., Joumard, R. (2006), *Directives et facteurs agrégés d'émission des véhicules routiers en France de 1970 à 2025*. Rapport LTE n°0611, Juin 2006. INRETS, 160 p.
- Jones, P. M. (1998). Urban Road Pricing: Public Acceptability and Barriers to Implementation. In K. J. Button & E. T. Verhoef (eds.), *Road Pricing, Traffic Congestion And The Environment. Issues of Efficiency and Social Feasibility*, 263-284. Cheltenham: Edward Elgar Publishing.
- Kockelman, K.M., Kalmanje, S. (2005), Credit-Based Congestion Pricing: A Proposed Policy and the Public's Response. *Transportation Research 39A*: 671-690 (2005).
- Koh, W.T.H. and Lee, D.C.K. (1994), The vehicle quota system in Singapore: an assessment. *Transportation Research Part A* 28: 31-47.
- Marlot, G. (1998), Réguler la congestion par des permis négociables: une solution au dilemme efficacité / acceptabilité. 8th WCTR, Antwerp.
- Menon, A.P.G. (2000), ERP in Singapore – a perspective one year on. *TEC* February 2000.
- Menon, A.P.G., Chin, K.K. (2004), ERP in Singapore – what's been learnt from five years operation? *TEC* February 2004.
- Montgomery, W.D. (1972), Markets and licenses and efficient pollution control programs. *Journal of Economic Theory*, 5: 395-418.
- Nakamura, K. and Kockelman, K.M. (2002), Congestion pricing and road space rationing: an application to the San Francisco Bay Bridge corridor. *Transportation Research Part A*, 36: 403-417.
- Nicolas, J.-P., Pochet, P., Poimboeuf H. (2003), Towards sustainable mobility indicators: application to the Lyons conurbation. *Transport Policy* 10 (2003) 197-208.
- OECD (1997), *Putting Markets to Work. The Design and Use of Marketable Permits and Obligations*. Organisation for Economic Cooperation and Development, Public Management Occasional Paper 19, Paris.
- OECD (1998), *Lessons from Existing Trading Systems for International Greenhouse Gas Emissions Trading*. Organisation for Economic Cooperation and Development, Environment Directorate. Paris.
- OECD (2001), *Domestic Transferable Permits for Environmental Management. Design and Implementation*. Organisation for Economic Cooperation and Development, Paris.

- Ottensmann, J.R. (1998), Market-based exchanges of rights within a system of performance zoning. *Planning and Markets*, 1.
- Prud'homme, R., Bocarejo, J.-P. (2005) The London Congestion Charge: a tentative economic appraisal, *Transport Policy* 12 (2005) 279-287.
- Raux, C. (2002a), The Use of Transferable Permits in the Transport Sector. In OECD (ed), *Implementing Domestic Tradable Permits. Recent Developments and Future Challenges*. OECD Proceedings, Paris, 2002, pp. 141-185.
- Raux, C. (2002b), Uncertainties in Forecasting: The Role of Strategic Modeling to Control Them. In H.-S. MAHMASSANI (ed), *In Perpetual Motion. Travel Behavior Research Opportunities and Application Challenges*. Pergamon, Elsevier Science, Oxford, 2002, pp. 505-526.
- Raux, C. (2004), The use of transferable permits in transport policy. *Transportation Research Part D*. Vol 9/3, pp 185-197.
- Raux, C. (2005) Comments on "The London congestion charge: a tentative economic appraisal" (Prud'homme and Bocarejo, 2005). *Transport Policy*, 12 (2005) 368-371.
- Raux, C., Andan, O. (2002), Comment les péages urbains peuvent-ils satisfaire une politique d'agglomération ? *Recherche Transports Sécurité* 75 (2002) 115-130.
- Raux, C., Marlot, G. (2005), A System of Tradable CO<sub>2</sub> Permits Applied to Fuel Consumption by Motorists. *Transport Policy*, 12 (2005) 255-265.
- Schlag, B., Teubel, U. (1997) Public Acceptability of Transport Pricing. *IATSS Research*, 21, 134-142.
- Stavins, R. (1995), Transaction costs and tradable permits. *Journal of Environmental Economics and Management*, 29:133-148.
- Verhoef, E., Nijkamp, P. and Rietveld, P. (1997), Tradable permits: their potential in the regulation of road transport externalities. *Environment and Planning B: Planning and Design* 1997, vol 24, pp. 527-548.
- Vickrey, W. (1963), Pricing in urban and suburban transport, *American Economic Review : Papers and Proceedings*, 53 (2), p.452-465, May.
- Walters, A.A. (1961), The theory and measurement of private and social cost of highway congestion, *Econometrica*, vol 29, n° 4.
- Wang, M.Q. (1994), Cost savings of using a marketable permit system for regulating light duty vehicle emissions. *Transport Policy*, 1: 221-232.