

# Une formalisation des coûts sociaux produits sur la voirie urbaine

Francis PAPON

Département Économie et Sociologie des Transports  
INRETS - DEST

## 1. LA VOIRIE A DE MULTIPLES FONCTIONS

### 1.1. QUELQUES DEFINITIONS

#### 1.1.1. La voirie

Nous définissons d'abord la voirie d'une ville comme l'espace public ouvert, accessible aux piétons et aux véhicules: c'est un espace public, ce qui exclut donc les propriétés privées, quoiqu'il soit possible d'envisager des voiries privées (desserte de lotissements, ouvrages concédés etc); c'est un espace ouvert, c'est-à-dire qu'il n'est pas fermé par des clôtures et des barrières, quoiqu'il soit possible d'envisager diverses formes de restriction d'accès.

Ainsi, la voirie est l'espace qui reste lorsqu'on enlève les propriétés privées, les immeubles, les emprises ferroviaires, les équipements publics, les parcs et jardins. Nous voyons néanmoins que donner une définition rigoureuse de la voirie n'est pas évident.

#### 1.1.2. Les fonctions de la voirie

La voirie a de multiples fonctions.

Certaines de ces fonctions sont liées à la circulation des personnes et des biens:

- circulation générale des véhicules (y compris deux roues);

- accès des véhicules aux propriétés riveraines;
- stationnement des véhicules;
- arrêt des véhicules;
- livraisons (chargement ou déchargement) des marchandises;
- circulation et arrêt des véhicules de transport collectif sur voies réservées;
- circulation des piétons.

Mais la voirie a aussi d'autres fonctions importantes:

- commerce: kiosques à journaux, terrasses de café, étalages des épiciers, vendeurs ambulants, marchés périodiques;
- environnement: plantations, mobilier urbain, donner le jour aux immeubles riverains, etc...
- divers: manifestations, publicité, etc...

La voirie se découpe dans l'espace et dans le temps entre ces différentes fonctions.

### 1.1.3. L'affectation optimale de la voirie

L'optimum économique (meilleure efficacité de l'usage de la voirie) est obtenu si chaque usager paie l'usage qu'il fait de la voirie à son coût marginal social.

Ainsi, pour chaque  $m^2$  de voirie, et à chaque instant, un certain nombre d'usagers souhaitent utiliser ce  $m^2$  pour une fonction particulière. Si tous ces usagers paient leurs coûts externes, l'optimum économique sera obtenu en affectant ce  $m^2$  à l'usager qui est prêt à payer le plus pour l'utiliser. On peut appeler cette propension à payer de l'usager le plus offrant, le *loyer d'opportunité* de la voirie, qui bien sûr varie dans le temps et dans l'espace.

### 1.1.4. La force des différentes fonctions

Dans la pratique, l'affectation de la voirie se fait suivant les rapports de force qui existent entre les différents usagers de la voirie, compte tenu de la réglementation existante et surtout de la manière dont elle est mise en oeuvre: cette réglementation modifie en effet les rapports de force. On peut alors définir la notion de *force d'une fonction* de la voirie. En pratique, l'usage le plus long, ou le plus lent est le plus fort, car c'est le premier occupant qui a souvent raison. On peut ainsi classer les fonctions de la voirie de la plus forte à la moins forte:

- environnement: un arbre par exemple empêche tout autre usage de la voirie sur l'emplacement qu'il occupe;
- commerce;
- stationnement: par exemple, si un emplacement réservé aux livraisons est utilisé pour le stationnement, il ne peut plus être utilisé pour les livraisons;

- livraisons, arrêt: un camion de livraison peut bloquer l'accès des riverains;
- accès: l'accès d'une voiture à un garage peut gêner le passage des piétons;
- circulation des piétons: les piétons étant plus lents que les véhicules, ils gênent plus ces derniers que ces derniers ne les gênent;
- circulation générale des véhicules;
- voies réservées aux transports collectifs.

#### 1.1.5. Distinction des fonctions de type 1 et de type 2

Parmi toutes les fonctions de la voirie, certaines peuvent être physiquement séparées des autres pour éviter que les fonctions plus fortes ne leur occupent l'espace nécessaire. Nous appellerons ces fonctions: fonctions de type 2. C'est le cas des voies réservées aux transports collectifs, de la circulation des piétons (trottoirs protégés), du commerce et de l'environnement (fonctions plus fortes). En revanche les quatre fonctions suivantes: circulation générale, accès, arrêt, stationnement ne peuvent pas être séparés physiquement, car ce sont les mêmes véhicules qui sont utilisés pour ces fonctions. Ces fonctions, que nous appellerons fonctions de type 1, sont les seules que nous nous proposons d'étudier par la suite.

En pratique, les fonctions de type 1 occupent l'espace de voirie compris entre les bordures de trottoirs. C'est sur cet espace que se produisent les conflits entre ces différentes fonctions.

### 1.2. UNE ANALYSE QUALITATIVE DES DIFFERENTES FONCTIONS

#### 1.2.1. La fonction circulation générale

Le fonctionnement de la circulation est bien étudié par l'ingénierie du trafic. Nous pouvons retenir les résultats suivants:

Une voie de circulation possède une capacité (trafic horaire maximal qu'elle peut écouler) d'environ 1800 véhicules par heure de vert. Ainsi, à une intersection, la capacité d'une voie est environ deux fois moindre que sur un tronçon sans intersection.

La circulation peut fonctionner selon deux modes.

En mode fluide, pour des débits variant de 0 à la capacité, la vitesse est une fonction décroissante du débit, jusqu'à une vitesse optimale permettant d'écouler le maximum de véhicules d'environ 50 km/h, tandis que la concentration est une fonction croissante du débit.

En mode congestionné, le débit demeure inférieur à la capacité, et la vitesse inférieure à la vitesse optimale; la vitesse croît avec le débit de manière plus aléatoire, tandis que la concentration diminue avec le débit.

En ville, compte tenu de l'importance des carrefours, la circulation peut être considérée comme une succession de files d'attente, où le temps de service est d'environ 2 secondes par véhicule et par voie.

La circulation n'est pas une fonction ponctuelle, puisqu'elle peut être déviée sur des rues parallèles. On peut considérer que le rayon d'influence est de l'ordre de la moitié de la longueur du trajet, ce qui représente quelques kilomètres en ville.

### 1.2.2. La fonction accès

L'accès aux immeubles riverains à partir de la chaussée implique l'absence de stationnement au droit de l'entrée, et le franchissement du trottoir. Il peut également se faire à l'aide de trémies implantées sur la chaussée.

La possibilité d'accès implique que la circulation dans la rue où se passe l'accès ne soit pas interrompue.

La manoeuvre d'accès occupe la voirie au droit de l'entrée pendant un court intervalle de temps, et contribue à la circulation générale dans la rue.

Contrairement à la circulation générale, l'accès est une fonction ponctuelle.

Nous tenons compte sous la dénomination de fonction accès aussi bien des entrées que des sorties.

### 1.2.3. La fonction arrêt

L'arrêt d'un véhicule est constitué de trois phases:

- la manoeuvre d'arrêt, qui peut être de plusieurs types (créneau, bataille, etc);
- l'arrêt proprement dit du véhicule;
- la manoeuvre "quitter l'arrêt", qui peut être également de plusieurs types.

Comme les manoeuvres d'accès, les manoeuvres d'arrêt occupent la chaussée pendant un court intervalle de temps. Le véhicule arrêté peut occuper un emplacement plus ou moins gênant, et pendant une durée plus ou moins longue. Par définition de l'arrêt, le conducteur du véhicule doit rester à proximité de ce dernier pendant toute la durée de l'arrêt.

L'arrêt peut avoir différents motifs:

- déposer/attendre/prendre un passager: c'est le cas notamment des taxis;
- livraisons, aussi bien déchargement que chargement de marchandises;
- course rapide;
- lecture d'une carte;
- panne du véhicule.

Comme la fonction accès, l'arrêt est une fonction ponctuelle.

#### 1.2.4. La fonction stationnement

Le stationnement d'un véhicule est constitué de six phases:

- la recherche d'une place de stationnement;
- la manoeuvre de stationnement, qui peut être de plusieurs types (créneau, bataille, etc);
- pour les occupants du véhicule, le trajet à pied entre le véhicule et leur destination;
- pour le véhicule, son abandon sur son emplacement;
- pour les occupants du véhicule, le trajet à pied entre leur destination et le véhicule;
- la manoeuvre "quitter un stationnement", qui peut être de plusieurs types.

La recherche d'une place de stationnement constitue une circulation parasite au voisinage de la destination de l'utilisateur.

Comme les manoeuvres d'accès et d'arrêt, les manoeuvres de stationnement occupent la chaussée pendant un court intervalle de temps.

La marche à pied terminale, si elle est importante peut être pénalisante pour les usagers.

Le véhicule en stationnement peut occuper un emplacement plus ou moins gênant, et pendant une durée plus ou moins longue. Contrairement à l'arrêt, le véhicule en stationnement reste abandonné pendant la durée du stationnement.

Le stationnement a des motifs de durée très variable:

- domicile, de durée souvent longue (plus de 12 heures), notamment la nuit;
- travail, de durée longue (4 à 10 heures), pendant les heures de bureau;
- affaires professionnelles, affaires personnelles, achats, visites, de durée plus courte (moins de 3 heures), pendant les heures ouvrables en général.

Contrairement à la fonction arrêt, la fonction stationnement a un rayon d'influence de l'ordre de 300 mètres.

### 1.2.5. Les interactions entre les différentes fonctions de type 1

Bien entendu, les fonctions de type 1 interfèrent entre elles puisqu'elles se disputent le même espace. Le tableau T1 suivant résume les principales interactions.

Tableau T1: interactions entre les fonctions de type 1

- gêne mineure;  
+ gêne importante;  
++ gêne très importante.

Fonctions gênantes fonctions gênées\	circulation	accès	arrêt	stationnement
circulation	+ congestion	+ gêne des manoeuvres (notamment quart de tour)	+ gêne des manoeuvres ++ véhicules arrêtés supprimant une file de circulation ++ rue bloquée par un arrêt	+ gêne des manoeuvres ++ véhicules en stationnement supprimant une file de circulation - congestion due à la circulation parasite des véhicules recherchant une place
accès	- si voie de circulation en sens contraire à traverser	- congestion des accès	+ arrêt devant un accès + rue bloquée par un arrêt	++ stationnement devant un accès
arrêt	- si manoeuvre nécessitant d'attendre une interruption du flux de trafic	- impossibilité de s'arrêter devant un accès	- absence de place pour s'arrêter + rue bloquée par un autre arrêt	+ stationnement sur les places réservées aux livraisons
stationnement	- si manoeuvre nécessitant d'attendre une interruption du flux de trafic	- impossibilité de stationner devant un accès	+ occupation de places de stationnement par des véhicules arrêtés - rue bloquée par un arrêt	++ saturation du stationnement accroissant le temps de recherche et le temps de marche à pied

### 1.2.6. Les fonctions de type 2

Nous n'évoquerons les fonctions de type 2 que lorsqu'elles interfèrent avec les fonction de type 1, soit lorsqu'elles gênent les fonctions de type 1 (tableau T2), soit lorsqu'elles sont gênées par les fonctions de type 1 (tableau T3).

Tableau T2: gêne des fonctions de type 2 sur les fonctions de type 1

- gêne mineure;  
+ gêne importante;  
++ gêne très importante.

fonctions gênantes: fonctions gênées	voies réservées transports collectifs	piétons	commerce sur voirie	environnement	divers
circulation	- déboisement des autobus gênés par un obstacle	- passages protégés + traversées hors passages protégés + débordement des piétons sur la chaussée	+ empiète sur l'espace de circulation - engendre une affluence importante	- peut masquer la visibilité et la lecture des panneaux	++ manifestations bloquent la circulation + distraction des conducteurs
accès	- nécessité de traverser la voie réservée pour accéder	- nécessité de traverser le trottoir pour accéder	+ peut bloquer l'accès	- pas de gêne	+ rue bloquée par manifestation
arrêt	- si arrêt impossible sur voie réservée, l'arrêt doit se faire en pleine voie	- pas de gêne	+ plus d'espace pour s'arrêter	- pas de gêne	+ rue bloquée par manifestation
stationnement	- nécessité de traverser la voie réservée pour stationner ou stationnement le long de la voie réservée	- gêne les manoeuvres de stationnement sur trottoir	++ plus d'espace pour stationner	- pas de gêne	+ quartier interdit suite à manifestation

Tableau T3: gêne des fonctions de type 1 sur les fonctions de type 2

- gêne mineure;  
+ gêne importante;  
++ gêne très importante.

fonctions gênantes fonctions gênées	circulation	accès	arrêt	stationnement
voies réservées aux transports collectifs	+ non respect des voies réservées	+ traversée de la voie réservée pour accéder	++ arrêt sur voies réservées	++ stationnement sur voie réservée + traversée de la voie réservée pour stationner
piétons	+ non respect des passages protégés	+ traversée du trottoir pour accéder	++ entrave à la circulation des piétons	++ entrave à la circulation des piétons + gêne des manoeuvres de stationnement sur trottoir
commerce sur voirie	- pas de gêne	+ traversée du trottoir pour accéder	- pas de gêne	- stationnement sur aires de marché
environnement	++ bruit, pollution	+ nuisances	+ intrusion visuelle	+ intrusion visuelle
divers	- divers	- divers	- divers	- divers

## 2. UNE MODELISATION DU FONCTIONNEMENT DE LA VOIRIE

### 2.1. L'ANALYSE MICROSCOPIQUE

Nous considérons une section de la voirie d'abscisse  $s_0$  à un instant  $u_0$ .

Trois cas se présentent:

- cas 1: voirie à sens unique;
- cas 2: voirie à double sens avec séparateur infranchissable;
- cas 3: voirie à double sens sans séparateur.

Dans le cas 2, nous nous ramenons au cas 1 en traitant séparément chaque sens de circulation.

Nous traiterons donc les cas 1 et 3. Les notions spécifiques à l'un de ces deux cas seront signalées par la mention cas 1 ou cas 3.

Toutes les variables que nous étudierons ont un caractère de variable aléatoire. Mais pour ne pas alourdir le modèle, nous ne précisons pas les lois de probabilité et nous donnerons des relations entre les espérances mathématiques de ces variables.

#### 2.1.1. Les notations

##### 2.1.1.1. La demande

Tableau T4: Demande de circulation:

Notation	unité	signification
$Y_{11}$	veh/h	trafic sens 1 (cas 3)
$Y_{12}$	veh/h	trafic sens 2 (cas 3)
$Y_1 = Y_{11} + Y_{12} (R_1)$	veh/h	trafic deux sens

Tableau T5: Demande d'accès

Notation	unité	signification
$Y_{21}$	véh/h/m	accès à droite
$Y_{22}$	véh/h/m	accès longitudinal (trémie)
$Y_{23}$	véh/h/m	accès à gauche
$Y_{24}$	véh/h/m	sortie à droite
$Y_{25}$	véh/h/m	sortie longitudinale (trémie)
$Y_{26}$	véh/h/m	sortie à gauche
$Y_2 = \sum_{j=1}^6 Y_{2j} (R_2)$	véh/h/m	nombre total de manoeuvres d'accès



Tableau T6: Demande d'arrêt

Dans le tableau suivant:

$d_3$  désigne une durée d'arrêt et

$j$  désigne un type de manoeuvre d'arrêt (de 1 à 14).

Notation	unité	signification
$y_{31}(d_3)$	véh/h/m/min	créneau à droite
$y_{32}(d_3)$	véh/h/m/min	créneau à gauche
$y_{33}(d_3)$	véh/h/m/min	bataille ou épi à droite (marche arrière)
$y_{34}(d_3)$	véh/h/m/min	bataille ou épi à droite (marche avant)
$y_{35}(d_3)$	véh/h/m/min	bataille ou épi à gauche (marche arrière)
$y_{36}(d_3)$	véh/h/m/min	bataille ou épi à gauche (marche avant)
$y_{37}(d_3)$	véh/h/m/min	arrêt longitudinal en marche avant
$y_{38}(d_3)$	véh/h/m/min	quitter un créneau à droite
$y_{39}(d_3)$	véh/h/m/min	quitter un créneau à gauche
$y_{310}(d_3)$	véh/h/m/min	quitter une bataille ou épi à droite (marche arrière)
$y_{311}(d_3)$	véh/h/m/min	quitter une bataille ou épi à droite (marche avant)
$y_{312}(d_3)$	véh/h/m/min	quitter une bataille ou épi à gauche (marche arrière)
$y_{313}(d_3)$	véh/h/m/min	quitter une bataille ou épi à gauche (marche avant)
$y_{314}(d_3)$	véh/h/m/min	quitter un arrêt longitudinal en marche avant
$y_3(d_3) = \sum_{j=1}^{14} y_{3j}(d_3)$ (R3)	véh/h/m/min	densité totale de manoeuvres d'arrêts par unité de durée d'arrêt
$y_{3jm} = \int_{d_3=0}^{\infty} y_{3j}(d_3) dd_3$ (R4)	véh/h/m	nombre de manoeuvres d'arrêt de type $j$ (toutes durées d'arrêt)
$y_{3m} = \sum_{j=1}^{14} y_{3jm}$ (R5)	véh/h/m	nombre total de manoeuvres d'arrêt (toutes durées d'arrêt)
$y_{3m'} = \sum_{j=1}^7 y_{3jm}$ (R6)	véh/h/m	nombre total de manoeuvres de début d'arrêt (toutes durées d'arrêt)
(R7) $y_{3n} = \int_{-\infty}^{u_0} \int_{u_0-u}^{\infty} \sum_{j=1}^7 y_{3j}(d_3, u) dd_3 du$	véh/m	nombre total de véhicules à l'arrêt

Tableau T7: Demande de stationnement

Dans le tableau suivant:

$d_4$  désigne une durée de stationnement et

$j$  désigne un type de manoeuvre de stationnement (de 1 à 14).

Notation	unité	signification
$y_{41}(d_4)$	véh/h/m/min	créneau à droite
$y_{42}(d_4)$	véh/h/m/min	créneau à gauche
$y_{43}(d_4)$	véh/h/m/min	bataille ou épi à droite (marche arrière)
$y_{44}(d_4)$	véh/h/m/min	bataille ou épi à droite (marche avant)
$y_{45}(d_4)$	véh/h/m/min	bataille ou épi à gauche (marche arrière)
$y_{46}(d_4)$	véh/h/m/min	bataille ou épi à gauche (marche avant)
$y_{47}(d_4)$	véh/h/m/min	stationnement longitudinal en marche avant
$y_{48}(d_4)$	véh/h/m/min	quitter un créneau à droite
$y_{49}(d_4)$	véh/h/m/min	quitter un créneau à gauche
$y_{410}(d_4)$	véh/h/m/min	quitter une bataille ou épi à droite (marche arrière)
$y_{411}(d_4)$	véh/h/m/min	quitter une bataille ou épi à droite (marche avant)
$y_{412}(d_4)$	véh/h/m/min	quitter une bataille ou épi à gauche (marche arrière)
$y_{413}(d_4)$	véh/h/m/min	quitter une bataille ou épi à gauche (marche avant)
$y_{414}(d_4)$	véh/h/m/min	quitter un stationnement longitudinal en marche avant
$y_4(d_4) = \sum_{j=1}^{14} y_{4j}(d_4)$ (R8)	véh/h/m/min	densité totale de manoeuvres de stationnements par unité de durée de stationnement
$y_{4jm} = \int_{d_4=0}^{\infty} y_{4j}(d_4) dd_4$ (R9)	véh/h/m	nombre de manoeuvres de stationnement de type $j$ (toutes durées de stationnement)
$y_{4m} = \sum_{j=1}^{14} y_{4jm}$ (R10)	véh/h/m	nombre total de manoeuvres de stationnement (toutes durées de stationnement)
$y_{4m'} = \sum_{j=1}^7 y_{4jm}$ (R11)	véh/h/m	nombre total de manoeuvres de début de stationnement (toutes durées de stationnement)
(R12) $y_{4n} = \int_{-\infty}^{u_0} \int_{u_0-u}^{\infty} \sum_{j=1}^7 y_{4j}(d_4, u) dd_4 du$	véh/m	nombre total de véhicules en stationnement

### 2.1.1.2. Les valeurs du temps

Nous supposons que pour chaque fonction  $i = 1, 2, 3$  ou  $4$ , les usagers ont une valeur du temps  $h$  répartie suivant une fonction densité  $g_i(h)$  ou une fonction de répartition  $G_i(h)$ .

Ainsi,  $y_{ij} * g_i(h)$  désigne la densité de demande pour la fonction  $i$ , manoeuvre  $j$  à valeur du temps  $h$ .

Nous supposons de plus que la valeur du temps des usagers de la fonction stationnement pendant le trajet à pied entre le véhicule et leur destination vaut  $\eta_4$  fois leur valeur du temps dans le véhicule.

### 2.1.1.3. L'occupation de la voirie

Tableau T8: Occupation de la voirie:

Notations	unité	signification
$l_1$	m	largeur totale de la voie entre trottoirs (hors voies réservées aux transports collectifs)
$l_1 = l_{11} + l_{12}$ (R13)	m	largeur occupée par la circulation
$l_{11}$	m	largeur occupée par la circulation sens 1 (cas 3)
$l_{12}$	m	largeur occupée par la circulation sens 2 (cas 3)
$l_2 = l_{21} + l_{22} + l_{23}$ (R14)	m	largeur occupée par les manoeuvres
$l_{21}$	m	largeur occupée par les manoeuvres à droite (cas 3)
$l_{22}$	m	largeur occupée par les manoeuvres au milieu (cas 3)
$l_{23}$	m	largeur occupée par les manoeuvres à gauche (cas 3)
$l_4 = l_{41} + l_{42} + l_{43}$ (R15)	m	largeur occupée par les véhicules arrêtés ou en stationnement
$l_{41}$	m	largeur occupée par les véhicules arrêtés ou en stationnement à droite
$l_{42}$	m	largeur occupée par les véhicules arrêtés ou en stationnement au milieu (cas 3)
$l_{43}$	m	largeur occupée par les véhicules arrêtés ou en stationnement à gauche
$l_0 = l_{01} + l_{02} + l_{03}$ (R16)	m	largeur autorisée au stationnement
$l_{01}$	m	largeur autorisée au stationnement à droite
$l_{02}$	m	largeur autorisée au stationnement au milieu (cas 3)
$l_{03}$	m	largeur autorisée au stationnement à gauche

Le rapport  $\frac{l_4}{l_0}$  sera appelé taux de saturation du stationnement.

### 2.1.1.4. Le prix du stationnement et de la circulation

Pour un tarif horaire  $f_4$  (en F/h), tenant compte du tarif du stationnement payant et des contraventions perçues pour stationnement illicite nous notons:

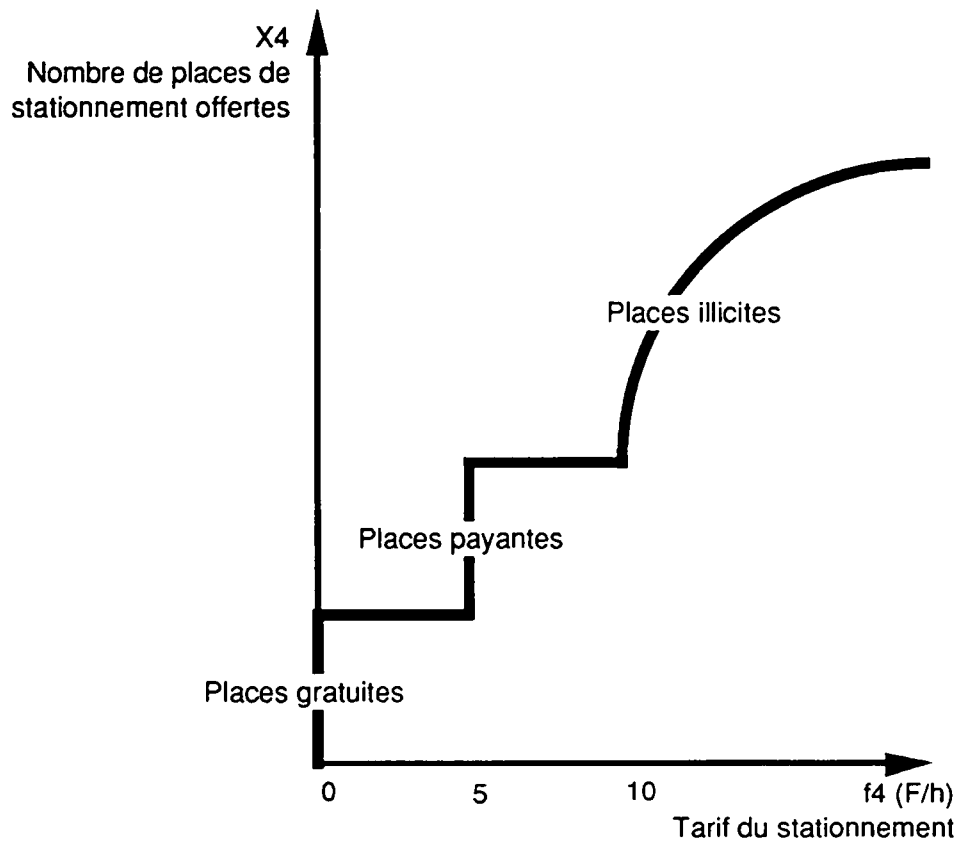
$X_4(f_4)$  (en véh/m): le nombre de places de stationnement à un prix  $f \leq f_4$ .

$\hat{f}_4 = X_4^{-1}$  (R17) la fonction réciproque.

Nous supposons que le prix payé pour le stationnement par l'utilisateur marginal est  $\hat{f}_4(y_{4n})$ .

Exemple: Si dans une rue avec deux files de circulation, un côté est autorisé au stationnement et gratuit, l'autre côté payant (5 F/h), et que l'espérance mathématique des contraventions pour stationnement en double file est supérieure à 10 F/h, la fonction  $X_4$  peut avoir l'allure suivante de la figure F1.

Figure F1: Exemple de fonction  $X_4$



D'autre part, nous désignons par  $c_{1m}$  le coût de circulation kilométrique des véhicules, et par  $p_1$  le péage kilométrique perçu (éventuellement nul).

## 2.1.2. Les lois de fonctionnement

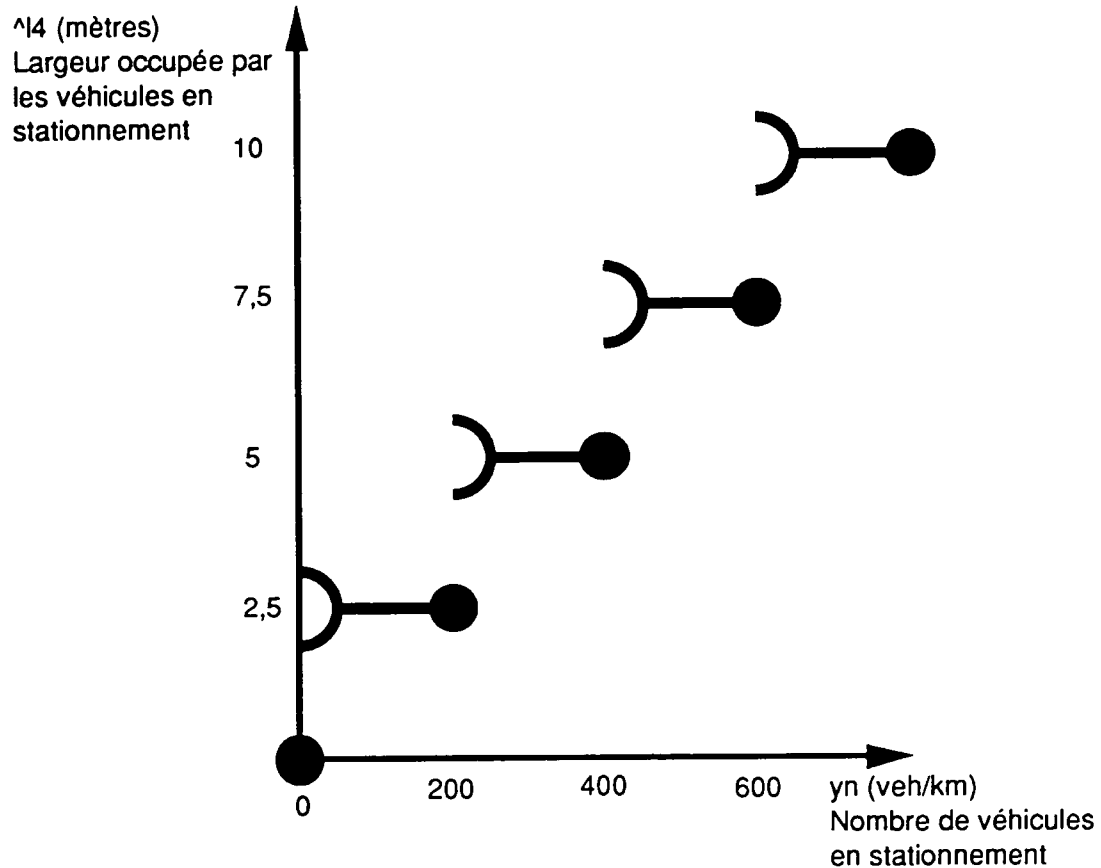
### 2.1.2.1. Les lois d'occupation

Nous supposons que la largeur occupée par un nombre  $y_n$  de véhicules (en véh/m) est donnée par la relation:

$$l = \hat{l}_4(y_n) \quad (R18),$$

où la fonction  $\hat{l}_4$  est représentée sur la figure F2.

Figure F2: Fonction  $\hat{l}_4$



Ainsi, si  $y_{mn}$  est le nombre de véhicules en train d'effectuer une manoeuvre, nous supposons:

$$l_2 = \hat{l}_4(y_{mn}) \quad (R19).$$

De même, pour les véhicules arrêtés ou en stationnement nous supposons:

$$l_4 = \hat{l}_4(y_{3n} + y_{4n}) \quad (R20).$$

Si  $f_p$  est le tarif du stationnement payant, nous avons:

$$l_0 = \hat{l}_4(X_4(f_p)) \quad (R21).$$

Enfin, nous avons bien sûr:

$$l_t = l_1 + l_2 + l_4 \quad (R22),$$

car l'espace non utilisé pour les autres fonctions est disponible pour la circulation.

Les relations précédentes suffisent pour déterminer l'occupation de la voirie dans le cas 1. En revanche, dans le cas 3, l'espace disponible pour la circulation doit être réparti entre les deux sens. On peut adopter une règle simple:

$$l_{11} = l_1 * \frac{Y_{11}}{Y_1} \text{ (R23)}, \text{ et } l_{12} = l_1 * \frac{Y_{12}}{Y_1} \text{ (R24)}.$$

Les discontinuités dues au caractère entier du nombre de files de circulation seront évoquées au § 2.1.2.5. Il serait possible d'affiner ici cette modélisation en tenant compte du côté où se produisent les manoeuvres, les arrêts et les stationnements.

#### 2.1.2.2. Les lois du stationnement

Pour chaque type de manoeuvre de stationnement  $j = 1 \dots 14$ , nous supposons qu'il existe un temps caractéristique  $t_{3j}$  de manoeuvre.

Nous supposons de plus que le temps de recherche d'une place de stationnement, et que le temps de marche à pied terminale sont des fonctions croissantes convexes du taux de saturation du stationnement, à savoir respectivement:

$$t_{4r} = \hat{t}_{4r} \left( \frac{l_4}{l_0} \right) \text{ (R25)};$$

$$t_{4m} = \hat{t}_{4m} \left( \frac{l_4}{l_0} \right) \text{ (R26)}.$$

Nous considérons ensuite que la recherche d'une place de stationnement engendre une circulation parasite locale:

$$Y_{1r} = Y_{4m'} * t_{4r} \text{ (R27)}.$$

Dans le cas 3, nous pouvons répartir cette circulation parasite entre les deux sens suivant les relations:

$$Y_{1r1} = Y_{1r} * \frac{Y_{11}}{Y_1} \text{ (R28)}, \text{ et } Y_{1r2} = Y_{1r} * \frac{Y_{12}}{Y_1} \text{ (R29)}.$$

Enfin, le rapport  $\frac{Y_{4n}}{Y_{4m'}}$  représente la durée moyenne du stationnement en régime stationnaire.

### 2.1.2.3. Les lois des arrêts

Pour chaque type de manoeuvre d'arrêt  $j = 1 \dots 14$ , nous supposons qu'il existe un temps caractéristique  $t_{3j}$  de manoeuvre, qui est le même que pour le stationnement.

Le rapport  $\frac{Y_{3n}}{Y_{3m}}$  représente la durée moyenne d'arrêt en régime stationnaire.

### 2.1.2.4. Les lois des accès

Pour chaque type de manoeuvre d'accès  $j = 1 \dots 6$ , nous supposons qu'il existe un temps caractéristique  $t_{2j}$  de manoeuvre.

Par ailleurs notons que le nombre total de véhicules en manoeuvre est:

$$Y_{mn} = \sum_{j=1}^6 Y_{2j} * t_{2j} + \sum_{j=1}^{14} Y_{3j} * t_{3j} + \sum_{j=1}^{14} Y_{4j} * t_{3j} \quad (R30).$$

### 2.1.2.5. Les lois de la circulation

Nous écrivons la relation débit-vitesse sous la forme:

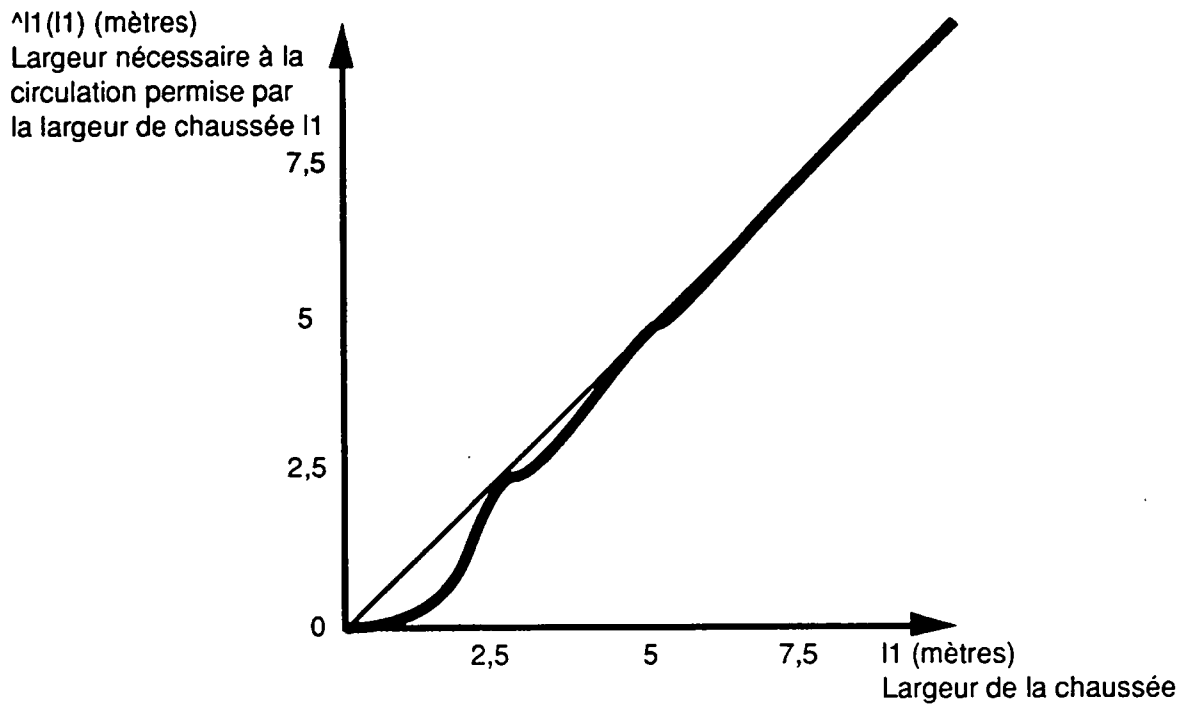
$$t_1 = \hat{t}_1 \left( \frac{Y_1 + Y_{1r}}{\hat{l}_1(l_1)} \right) \quad (R31) \quad (\text{cas 1}), \text{ où}$$

$t_1$  est le temps de parcours kilométrique;

$\hat{t}_1$  est une fonction croissante convexe;

$\hat{l}_1$  est une fonction dont l'allure approximative est représentée sur la figure F3 et qui permet de tenir compte du caractère entier du nombre de files de circulation.

Pour alléger les calculs, nous remplacerons dans la suite  $\hat{l}_1$  par l'identité, mais il faut garder en mémoire que la dérivée  $\hat{l}_1'$  introduit des distorsions dans les coûts marginaux que nous calculerons plus loin.

Figure F3: Fonction  $\hat{l}_1$ .

Dans le cas 3, des relations analogues pour chaque sens de circulation sont :

$$t_{11} = \hat{t}_1 \left( \frac{y_{11} + y_{1r1}}{\hat{l}_1(l_{11})} \right) \quad (R32), \text{ et}$$

$$t_{12} = \hat{t}_1 \left( \frac{y_{12} + y_{1r2}}{\hat{l}_1(l_{12})} \right) \quad (R33);$$

étant donné les règles simples de répartition du trafic entre les deux sens, et la non prise en compte de la fonction  $\hat{l}_1$ , nous avons :

$$t_{11} = t_{12} = t_1 \quad (R34).$$

La vitesse de circulation est bien sûr :

$$v_1 = \frac{1}{t_1} \quad (R35) \quad (\text{cas 1}).$$

#### 2.1.2.6. Les coûts supportés par les usagers

A partir des lois ci-dessus, nous pouvons écrire le coût généralisé unitaire supporté par un usager à la valeur du temps  $h$  de chacune des 4 fonctions étudiées.



Fonction circulation:

$$c_1 = c_{1m} + p_1 + h \cdot t_1 \quad (R36) \quad (\text{en F/véh/km}).$$

Fonction accès:

$$c_2 = h \cdot t_{2j'} \quad (R37) \quad (\text{en F/véh}), \text{ pour une manoeuvre } j' \text{ d'accès.}$$

Fonction arrêt:

$$c_3 = h \cdot (t_{3j'} + t_{3j''}) \quad (R38); \quad (\text{en F/véh}), \text{ pour une manoeuvre } j' \text{ de début d'arrêt et une manoeuvre } j'' \text{ pour quitter l'arrêt.}$$

Fonction stationnement:

$$c_4 = h \cdot (t_{4r} + t_{3j'} + t_{3j''} + 2 \cdot \eta_4 \cdot t_{4m}) + f_4(y_{4n}) \cdot d_4 \quad (R39); \quad (\text{en F/véh}), \text{ pour une manoeuvre } j' \text{ de stationnement et une manoeuvre } j'' \text{ pour quitter le stationnement, et une durée } d_4 \text{ de stationnement.}$$

**2.1.3. Les coûts marginaux**

**2.1.3.1. Tableau de présentation**

En calculant la dérivée partielle du coût unitaire supportée par chaque agent par rapport à la demande de chaque fonction, on obtient le coût marginal externe supporté par cet agent de la part de la fonction considérée. Le tableau T9 résume les notations employées. L'explicitation de ces coûts marginaux sera faite dans les § suivants.

Tableau T9: Coûts marginaux

l'agent -> demande\	circulation h	accès h,j'	arrêt h,d <sub>3</sub> ,j',j''	stationnement h,d <sub>4</sub> ,j',j''	autres agents
y <sub>1</sub>	z <sub>11</sub>	0	0	0	z <sub>91</sub>
y <sub>2j</sub>	z <sub>02</sub>	0	0	0	z <sub>82</sub>
y <sub>3mj</sub>	z <sub>03</sub>	0	0	0	z <sub>83</sub>
y <sub>3n</sub>	z <sub>13</sub> + z <sub>33</sub>	0	0	z <sub>43</sub>	z <sub>93</sub>
y <sub>4mj</sub>	z <sub>04</sub> + z <sub>24</sub>	0	0	0	z <sub>84</sub>
y <sub>4n</sub>	z <sub>14</sub> + z <sub>34</sub>	0	0	z <sub>44</sub> + z <sub>54</sub>	z <sub>94</sub>
autres	z <sub>19</sub>	z <sub>29</sub>	z <sub>39</sub>	z <sub>49</sub>	z <sub>99</sub>

Nous avons noté dans le tableau T9 y<sub>9</sub> la demande pour une autre fonction et c<sub>9</sub> le coût d'un usager d'une autre fonction.

$$\frac{\partial c_1}{\partial y_1} = z_{11}; \quad \frac{\partial c_1}{\partial y_{2j}} = z_{02}; \quad \frac{\partial c_1}{\partial y_{3mj}} = z_{03}; \quad \frac{\partial c_1}{\partial y_{3n}} = z_{13} + z_{33};$$

$$\frac{\partial c_1}{\partial y_{4mj}} = z_{04} + z_{24}; \quad \frac{\partial c_1}{\partial y_{4n}} = z_{14} + z_{34}; \quad \frac{\partial c_1}{\partial y_9} = z_{19}.$$

$$\frac{\partial c_2}{\partial y_1} = 0; \quad \frac{\partial c_2}{\partial y_{2j}} = 0; \quad \frac{\partial c_2}{\partial y_{3mj}} = 0; \quad \frac{\partial c_2}{\partial y_{3n}} = 0; \quad \frac{\partial c_2}{\partial y_{4mj}} = 0; \quad \frac{\partial c_2}{\partial y_{4n}} = 0; \quad \frac{\partial c_2}{\partial y_9} = z_{29}.$$

$$\frac{\partial c_3}{\partial y_1} = 0; \quad \frac{\partial c_3}{\partial y_{2j}} = 0; \quad \frac{\partial c_3}{\partial y_{3mj}} = 0; \quad \frac{\partial c_3}{\partial y_{3n}} = 0; \quad \frac{\partial c_3}{\partial y_{4mj}} = 0; \quad \frac{\partial c_3}{\partial y_{4n}} = 0; \quad \frac{\partial c_3}{\partial y_9} = z_{39}.$$

$$\frac{\partial c_4}{\partial y_1} = 0; \quad \frac{\partial c_4}{\partial y_{2j}} = 0; \quad \frac{\partial c_4}{\partial y_{3mj}} = 0; \quad \frac{\partial c_4}{\partial y_{3nj}} = z_{43}; \quad \frac{\partial c_4}{\partial y_{4mj}} = 0; \quad \frac{\partial c_4}{\partial y_{4n}} = z_{44} + z_{54};$$

$$\frac{\partial c_4}{\partial y_9} = z_{49}; \quad \frac{\partial c_9}{\partial y_1} = z_{91}; \quad \frac{\partial c_9}{\partial y_{2j}} = z_{82}; \quad \frac{\partial c_9}{\partial y_{3mj}} = z_{83}; \quad \frac{\partial c_9}{\partial y_{3n}} = z_{93}; \quad \frac{\partial c_9}{\partial y_{4mj}} = z_{84};$$

$$\frac{\partial c_9}{\partial y_{4n}} = z_{94}; \quad \frac{\partial c_9}{\partial y_9} = z_{99}. \quad (R40).$$

Le tableau T9 exprime ainsi sous forme de coûts marginaux externes les interactions évoquées dans les tableaux T1, T2 et T3. Notons que toutes les interactions n'ont pas été prises en compte dans le modèle, et que celles qui ont été prises en comptes l'ont été de manière simplifiée. Mais nous pensons avoir exprimé les effets les plus importants. Ainsi, nous avons négligé la gêne subie par les différentes manoeuvres. Les principaux effets sont analysés dans les paragraphes suivants.

### 2.1.3.2. Les coûts de congestion directe

Nous appelons coûts de congestion directe le coût externe directement subie par la circulation de la part des différentes fonctions. Il s'agit de:

*La congestion interne de la circulation, c'est-à-dire la gêne qu'un usager de la circulation impose aux autres usagers de la circulation en ralentissant l'écoulement; ce coût est bien connu par les théoriciens du "road pricing" et vaut:*

$$z_{11} = h^* \hat{t}_1' \left( \frac{y_1 + y_{1r}}{l_1} \right) * \frac{1}{l_1} \quad (R41).$$

Ce coût est d'autant plus fort que la congestion est plus sévère (à cause de la convexité de la fonction  $\hat{t}_1$ ).

*La congestion due aux véhicules arrêtés, c'est-à-dire le ralentissement de la circulation imposé par les véhicules à l'arrêt, qui vaut*

$$z_{13} = h \cdot \hat{t}_1 \cdot \left( \frac{y_1 + y_{1r}}{l_1} \right) \cdot \frac{y_1 + y_{1r}}{l_1^2} \cdot \hat{l}_4' (y_{3n} + y_{4n}) \quad (R42).$$

Ce coût est d'autant plus fort que la congestion est plus sévère (convexité de la fonction  $\hat{t}_1$ ), et varie fortement suivant la localisation du véhicule arrêté (facteur  $\hat{l}_4'$ ): s'il s'agit du premier véhicule d'une file (e.g. double file), ce coût est considérable (se reporter à la figure F2) car la fonction  $\hat{l}_4$  présente une discontinuité; en revanche, ce coût est quasiment nul si le véhicule à l'arrêt ne fait que "boucher un trou" dans une file déjà existante de véhicules à l'arrêt.

*La congestion due aux véhicules en stationnement, c'est-à-dire le ralentissement de la circulation imposé par les véhicules en stationnement, qui vaut*

$$z_{14} = h \cdot \hat{t}_1 \cdot \left( \frac{y_1 + y_{1r}}{l_1} \right) \cdot \frac{y_1 + y_{1r}}{l_1^2} \cdot \hat{l}_4' (y_{3n} + y_{4n}) = z_{13} \quad (R43).$$

Ce coût est le même que le précédent, car l'occupation d'un emplacement par un véhicule à l'arrêt ou en stationnement produit le même effet sur la circulation.

### 2.1.3.3. Les coûts de congestion indirecte

Nous appelons coûts de congestion indirecte le coût externe subie par la circulation de la part des différentes fonctions à cause de différents effets non immédiats. Dans notre modèle nous avons trois termes de ce genre, qui proviennent de la circulation parasite induite par la recherche du stationnement. Il s'agit de:

*La congestion de la circulation due aux véhicules à la recherche d'une place de stationnement, qui s'écrit:*

$$z_{24} = h \cdot \hat{t}_1 \cdot \left( \frac{y_1 + y_{1r}}{l_1} \right) \cdot \frac{1}{l_1} \cdot t_{4r} \cdot 1_{j \leq 7} \quad (R44).$$

Ce coût est d'autant plus fort que la congestion est plus sévère et que la difficulté à trouver une place est plus grande. Il n'est dû qu'aux seuls véhicules qui veulent faire une manoeuvre de début de stationnement ( $j \leq 7$ ), et pas à ceux qui quittent un stationnement.

*La congestion de la circulation par les véhicules à la recherche d'une place de stationnement induits par la saturation du stationnement due aux véhicules à l'arrêt, (c'est un peu compliqué!) qui s'écrit:*

$$z_{33} = h \cdot \hat{t}_1 \cdot \left( \frac{y_1 + y_{1r}}{l_1} \right) \cdot \frac{1}{l_1} \cdot y_{4m} \cdot \hat{t}_{4r} \cdot \left( \frac{l_4}{l_0} \right) \cdot \frac{1}{l_0} \cdot \hat{l}_4' (y_{3n} + y_{4n}) \quad (R45).$$

Ce terme est un coût externe que les véhicules à l'arrêt font subir à la circulation.

*La congestion de la circulation par les véhicules à la recherche d'une place de stationnement induits par la saturation du stationnement due aux véhicules en stationnement, qui s'écrit:*

$$z_{34} = h \cdot t_1 \cdot \left( \frac{y_1 + y_{1r}}{l_1} \right) \cdot \frac{1}{l_1} \cdot y_{4m} \cdot t_{4r} \cdot \left( \frac{l_4}{l_0} \right) \cdot \frac{1}{l_0} \cdot l_4 \cdot (y_{3n} + y_{4n}) = z_{33} \quad (R46).$$

Ce terme est un coût externe que les véhicules en stationnement font subir à la circulation, et est identique au précédent.

#### 2.1.3.4. Les coûts de gêne des manoeuvres

Les différentes manoeuvres sont à l'origine de coûts externes subis par la circulation, à savoir:

pour les manoeuvres d'accès:

$$z_{02} = h \cdot t_1 \cdot \left( \frac{y_1 + y_{1r}}{l_1} \right) \cdot \frac{y_1 + y_{1r}}{l_1^2} \cdot l_4 \cdot (y_{mn}) \cdot t_{2j} \quad (R47).$$

pour les manoeuvres d'arrêt:

$$z_{03} = h \cdot t_1 \cdot \left( \frac{y_1 + y_{1r}}{l_1} \right) \cdot \frac{y_1 + y_{1r}}{l_1^2} \cdot l_4 \cdot (y_{mn}) \cdot t_{3j} \quad (R48).$$

pour les manoeuvres de stationnement:

$$z_{04} = h \cdot t_1 \cdot \left( \frac{y_1 + y_{1r}}{l_1} \right) \cdot \frac{y_1 + y_{1r}}{l_1^2} \cdot l_4 \cdot (y_{mn}) \cdot t_{3j} = z_{03} \quad (R49).$$

Ces coûts sont d'autant plus forts que la congestion est plus sévère. Ils sont proportionnels à la durée des manoeuvres. En revanche, ils ne croissent pas linéairement avec le nombre de manoeuvres, la première manoeuvre étant beaucoup plus gênante que les suivantes qui s'effectuent sur la même file.

#### 2.1.3.5. Les coûts de saturation du stationnement

L'accroissement du nombre de véhicules à l'arrêt ou en stationnement impose aux usagers du stationnement un temps de recherche plus long, des trajets terminaux à pied plus long, et l'acceptation d'un tarif de stationnement plus élevé (payant au lieu de gratuit, illicite au lieu de payant, illicite plus facilement verbalisé). Nous appellerons ces coûts: coûts de saturation du stationnement, qui valent:

$$z_{43} = h^{*t_{4r}} \left( \frac{1_4}{1_0} \right) * \frac{1}{1_0} * ^{1_4} (y_{3n} + y_{4n}) + 2 * \eta_4 * h^{*t_{4m}} \left( \frac{1_4}{1_0} \right) * \frac{1}{1_0} * ^{1_4} (y_{3n} + y_{4n})$$

(R50).

$$z_{44} = h^{*t_{4r}} \left( \frac{1_4}{1_0} \right) * \frac{1}{1_0} * ^{1_4} (y_{3n} + y_{4n}) + 2 * \eta_4 * h^{*t_{4m}} \left( \frac{1_4}{1_0} \right) * \frac{1}{1_0} * ^{1_4} (y_{3n} + y_{4n}) = z_{43}$$

(R51).

$$z_{54} = ^{f_4} (y_{4n}) * d_4 \quad (R52).$$

### 2.1.3.6. Les autres coûts sociaux

Les usagers des quatre fonctions étudiées (circulation, accès, arrêt, stationnement) subissent de la part des usagers des autres fonctions des coûts externes, en général faibles, dont la raison est évoquée dans le tableau T2, mais nous ne donnerons pas d'expression mathématique pour ces coûts:

De même, les usagers des quatre fonctions étudiées font subir aux usagers des autres fonctions des coûts externes, qui peuvent être importants, dont la raison est évoquée dans le tableau T3, mais nous ne donnerons pas non plus d'expression mathématique pour ces coûts.

## 2.2. L'INTEGRATION DANS LE TEMPS

Le temps intervient de deux manières dans le fonctionnement de la voirie:

- la demande fluctue dans le temps;
- des événements ayant lieu à des instants différents peuvent interagir.

### 2.2.1. Les fluctuations de la demande dans le temps

Bien entendu, la demande des différentes fonctions fluctue fortement dans le temps.

Pour la circulation, les heures de pointe se situent en général avant l'heure d'ouverture des bureaux et après l'heure de fermeture (e.g. 7h-9h et 17h-19h), où une grande part du trafic est dû à des déplacements domicile-travail (surtout le matin); le soir, les motifs sont plus diversifiés. Aux heures normales de la journée (9h-17h), la demande peut demeurer élevée dans les centre-villes si l'activité y est intense à cause des déplacements professionnels et des visites de clients. En soirée et plus encore la nuit la demande de circulation diminue fortement. Il s'ensuit que la congestion va se développer surtout aux heures de pointe, et comme les coûts sociaux subis par la circulation dépendent fortement de la congestion (R41 à R49), ces coûts sociaux seront essentiellement concentrés à ces heures-là.

La demande d'accès a ses pointes aux mêmes heures que la circulation: le matin sortie des garages des résidents et accès aux garages des lieux de travail et le soir l'inverse.

La gêne occasionnée par ces manoeuvres n'en est que plus importante.

La demande de manoeuvres d'arrêt et de stationnement est également pour les mêmes raisons, mais dans une moindre mesure plus forte pendant les heures de pointe: l'usage des parcs hors voirie est en effet plus fréquent pour les stationnements de longue durée.

La demande d'arrêt (en nombre de véhicules arrêtés), si elle est importante aux heures de pointe, est mieux répartie tout au long de la journée si l'activité économique est soutenue: elle peut gêner la circulation en dehors des heures de pointe si cette dernière est intense.

La demande de stationnement (en nombre de véhicules) atteint un maximum en milieu d'après-midi où la conjonction des motifs est la plus forte. Elle reste élevée le matin et l'après-midi pendant les heures ouvrables. Elle est en général légèrement plus faible pendant les heures de pointe. La nuit, elle peut être élevée si le nombre de résidents ne disposant pas d'un garage est grand. La circulation est gênée dès qu'elle devient dense. Ainsi, dans le centre de Paris, c'est entre 15h et 16h que la circulation est la plus lente. Les coûts sociaux dus à la saturation du stationnement (R50, R51, R52, ainsi que R44, R45, R46) seront donc forts en cours de matinée et en cours d'après-midi.

Notons également que les samedis, les dimanches et jours fériés ont des profils de demande différents des jours ouvrables, et qu'il existe des fluctuations saisonnières de la demande.

#### **2.2.2. Les interactions entre les événements ayant lieu à différents instants**

Des événements ayant lieu à des instants différents peuvent interagir. C'est le cas des fonctions qui ont une certaine durée, et tout particulièrement du stationnement: le stationnement d'un véhicule à un instant donné va gêner la circulation et le stationnement pendant toute la durée de son stationnement. Donc, il existe des coûts externes entre des demandes à différents instants.

Dans notre modèle, le temps n'intervient que dans les relations (R7) et (R12) qui définissent le nombre de véhicules en arrêt ou en stationnement, mais n'intervient plus apparemment après. Cela est dû à deux raisons.

En premier lieu, nous avons distingué l'incidence des manoeuvres d'arrêt ou de stationnement de celle de l'occupation de la chaussée par les véhicules à l'arrêt ou en stationnement. Les coûts sociaux engendrés par ces deux facettes de la demande de chacune de ces deux

fonctions sont nettement séparés. En réalité, ces deux facettes sont corrélées par le temps (R7 et R12). Ainsi, il faut imputer à un stationnement particulier, les coûts externes produits au moment des manoeuvres, et l'intégrale des coûts externes engendrés par la présence du véhicule pendant toute la durée du stationnement. Nous précisons ci-après comment calculer cette intégrale.

En second lieu, les lois de fonctionnement, et tout particulièrement les lois d'occupation ont été choisies intemporelles, c'est-à-dire qu'elles ne dépendent que du présent. En fait, la loi d'occupation dépend du passé par l'intermédiaire du nombre de véhicules.

Dans la réalité, c'est même plus compliqué puisque la succession dans le temps des différentes manoeuvres peut engendrer des "trous" sur des files de stationnement alors que sont présents des véhicules en double file. Ces considérations montrent qu'il faut certainement moduler les coûts sociaux décrits par le modèle par l'intermédiaire de la fonction  $\lambda_4$ , en rendant cette fonction plus continue pour tenir compte de la possibilité de "trous" (sans pour autant en faire une fonction linéaire).

En outre, une double file peut perdurer pendant toute la journée alors que le premier véhicule qui en est à l'origine ne reste que quelques instants. Il n'est certainement pas pertinent d'imputer le coût social d'une double file à son premier véhicule, mais il ne faut peut-être pas répartir ce coût social également entre les différents véhicules, car la responsabilité des différents véhicules n'est pas égale. Ainsi, à un instant donné, le coût social dû à la présence des véhicules en stationnement ou en arrêt ne doit pas être divisé également entre ces différents véhicules, mais plutôt au pro-rata de la gêne marginale qu'ils occasionnaient au moment où ils ont effectué leur manoeuvre. Cela permet de préciser le calcul de l'intégrale évoquée ci-dessus.

## 2.3. L'INTEGRATION DANS L'ESPACE

L'espace intervient de manière plus compliquée que le temps dans le fonctionnement de la voirie. De plus, son intervention fait aussi intervenir le temps.

### 2.3.1. Les zones d'influence des différentes fonctions

Nous rappelons d'abord que les différentes fonctions ont des zones d'influence différentes.

L'accès et l'arrêt sont des fonctions purement ponctuelles. Intégrer leurs effets dans l'espace ne pose donc pas de problèmes.

Le stationnement a une zone d'influence qui est le rayon de marche à pied des usagers. Donc une concentration ponctuelle de demande de stationnement se diffuse sur quelques centaines de mètres. Il y a donc aussi un recouvrement dans l'espace des différentes demandes de stationnement sur des sites proches.

La circulation a une zone d'influence plus étendue à cause de la multiplicité des itinéraires qu'elle peut emprunter. On peut distinguer la demande de circulation par couple origine-destination, et ces différentes composantes de la demande de circulation se superposent dans l'espace, mais il est difficile de dire quelle est la demande de circulation en un point particulier. Tout au plus peut-on considérer ce qui se passe au niveau d'un quartier. Par ailleurs, cette demande de circulation peut être fortement anisotrope.

### **2.3.2. Les fluctuations de la demande dans l'espace**

Bien entendu, la demande des différentes fonctions fluctue dans l'espace. Elle est en général plus forte lorsque l'activité économique est plus intense, pour toutes les fonctions.

De plus, ces fluctuations dépendent du temps. Aux heures de pointe par exemple, où les migrations alternantes sont plus importantes, la demande de circulation est plus forte sur les axes radiaux d'accès au centre.

Nous ne décrivons pas plus ces fluctuations.

### **2.3.3. Les interactions entre des événements se produisant à différents endroits**

Comme il existait des interactions entre des événements se produisant à différents instants, il existe aussi des interactions entre des événements se produisant à différents endroits. Nous distinguerons les interactions proches des interactions lointaines.

Parmi les interactions proches, on peut noter:

- l'influence d'un véhicule arrêté en double file sur la circulation, qui se fait sentir sur une vingtaine de mètres;
- la saturation locale du stationnement, qui se répercute dans un certain périmètre;
- le blocage d'une rue, qui a des répercussions sur des voies adjacentes.

Les interactions lointaines se transmettent par la circulation. Ainsi, une perturbation locale dans une ville peut facilement se déplacer dans toute la ville.

### **2.3.4. L'intégration des coûts sociaux dans l'espace**

A cause des différentes interactions, l'intégration des coûts externes donnés par notre modèle n'est pas tout à fait satisfaisante.



On peut noter le rôle majeur joué par la circulation dans ce problème. On peut raisonner à partir de la notion de criticité. Il existe dans la ville des voies où la circulation approche de la capacité: ce sont les tronçons critiques. Sur ces tronçons, toute perturbation due à d'autres fonctions engendre des coûts sociaux très forts. En revanche, sur des tronçons non critiques, la gêne subie par la circulation sera faible, mais cela n'empêche pas qu'il peut se poser des problèmes de stationnement par exemple.

Le tableau T10 résume ces différentes situations.

Tableau T10: Localisation des coûts sociaux des fonctions de type 1

Catégories de coûts sociaux Catégories de tronçons	Coûts de congestion directe	Coûts de congestion indirecte	Coûts de gêne des manoeuvre	Coûts de saturation du stationnement
Tronçon critique, stationnement saturé	très élevés	très élevés	élevés	très élevés
Tronçon critique, stationnement non saturé	très élevés	faibles	élevés	faibles
Tronçon non critique, stationnement saturé	faibles	faibles	faibles	très élevés
Tronçon non critique, stationnement non saturé	faibles	très faibles	faibles	faibles

Il est possible d'affirmer que le coût social total au niveau d'une zone est composé en grande partie des coûts externes produits sur certains tronçons seulement.

#### 2.4. LES LIMITES DE LA MODELISATION

La modélisation complète du fonctionnement de la voirie est un tâche considérable et même impossible sans certaines simplifications. Notre modèle microscopique simple décrit quelques effets en un point donné et à un instant donné. Nous avons vu les difficultés d'en généraliser les résultats à l'échelle macroscopique. Les améliorations en ce sens pourraient porter sur les points suivants:

- modélisation spatiale de la demande de circulation;
- meilleure prise en compte des phénomènes de criticité dans la loi de fonctionnement de la circulation;

- corrélation entre la demande des différentes fonctions, qui ne sont que des maillons dans la chaîne du déplacement.

Malgré les insuffisances de notre modélisation, nous espérons qu'elle permettra de clarifier certains effets. Ce bref éclairage sur le fonctionnement de la voirie pour les fonctions circulation, accès, arrêt et stationnement à travers une analyse qualitative et une modélisation microscopique nous a permis de cerner certains coûts sociaux importants dans ce fonctionnement.

### 3. VERS UNE MEILLEURE GESTION DE LA VOIRIE?

La décomposition des coûts sociaux produits sur la voirie urbaine que nous avons mis en évidence interpelle naturellement l'économiste qui recherche la plus grande efficacité dans l'allocation des ressources, et pour qui la tarification au coût marginal social permet d'optimiser le bien-être collectif : en tarifant exactement les externalités que chaque usager marginal de la voirie occasionne à l'ensemble de la collectivité, on rend les décisions de tous les usagers d'utiliser la voirie au mieux conformes à l'intérêt de la collectivité. Cela serait séduisant si de nombreux obstacles pratiques ne venaient pas entraver les ardeurs des économistes. A cet égard, nous pouvons distinguer trois types de coûts sociaux : ceux qui sont déjà en partie tarifés, ceux qui pourraient l'être théoriquement et techniquement, et ceux qui ne peuvent pas l'être dans l'état actuel de la technologie ou même sur le plan théorique.

Au premier type correspond la tarification du stationnement sur voirie. Elle intervient de deux manières : par le stationnement payant sur voirie (parcmètres ou horodateurs), et par la répression du stationnement illicite (contraventions). Cette tarification permet de tarifier les coûts sociaux dus à la présence des véhicules sur la voirie, subis par la circulation (coûts de congestion directe  $z_{14}$  ou indirecte  $z_{34}$ ), ou par le stationnement (coûts de saturation du stationnement  $z_{44}$  et  $z_{54}$ ). Les vertus de cette tarification sont ainsi bien claires. D'une part, aux endroits où le stationnement gêne la circulation (ou d'autres usagers), l'interdiction de stationner correctement réprimée permet de limiter le stationnement aux seuls véhicules qui sont prêts à payer le coût collectif de leur stationnement. D'autre part, aux endroits où le stationnement ne gêne pas trop la circulation, le stationnement payant sur voirie permet d'assurer un taux de places libres suffisant pour éviter une recherche trop longue : l'usager paie au lieu d'attendre. De plus, cette situation permet d'éviter les coûts de congestion indirecte liés à la circulation parasite à la recherche d'une place de stationnement. Dans la pratique il faut bien sûr veiller à ce que le tarif soit optimal : l'observation du taux de places libres doit conduire à remédier aux tarifs trop faibles ou trop élevés. Nous insistons également sur l'importance d'un bon niveau de répression du stationnement illicite.

Le deuxième type de coûts sociaux viaires est constitué de la congestion interne de la circulation ( $z_{11}$ ). En effet, la tarification de la circulation est techniquement et théoriquement possible, mais n'est pas mise en oeuvre. Une littérature abondante, notamment anglo-saxonne, a été produite sur le sujet, et il n'est pas possible de la résumer ici. Malgré les nombreuses tentatives qui ont eu lieu, particulièrement aux Etats-Unis, à Hong-Kong, en Angleterre, aux Pays-Bas, seule la ville de Singapour applique actuellement des mesures tarifaires visant à réguler la congestion en exigeant des automobilistes pénétrant dans le centre-ville aux heures de pointe d'acquiescer un permis de circulation spécial. Ailleurs, le concept s'est heurté à des questions d'acceptabilité publique et politique, et à des problèmes d'équité.

Le troisième type de coûts sociaux viaires comprend essentiellement les coûts de gêne des différentes manoeuvres sur la circulation ( $z_{02}$ ,  $z_{03}$ ,  $z_{04}$ ) ainsi que la gêne de la recherche d'une place de stationnement sur la circulation ( $z_{24}$ ). Ces coûts ne sont élevés que si la congestion de la circulation est importante. Mais il sont pratiquement impossibles à tarifier : comment afficher dans telle rue ce que coûte un créneau ! Il n'est même pas sûr que théoriquement la tarification soit optimale ; par exemple, un créneau effectué à proximité de la tête de la file d'attente d'un feu tricolore provoquant une longue retenue, en empêchant l'écoulement au cours d'une phase de vert, peut être à l'origine de coûts sociaux importants subis par tous les véhicules qui viennent derrière pendant toute la période de saturation : dans un tel cas une mesure d'interdiction est préférable. On voit ainsi, que pour ce troisième type de coûts sociaux, la réglementation peut être plus efficace.

Pour aller plus loin dans la définition de mesures tarifaires, il est nécessaire de connaître les réactions de la demande, qui dans certains cas peuvent rendre inutiles ces mesures.

Nous pouvons ainsi classer la demande en deux catégories suivant son élasticité :

- la demande élastique au coût généralisé : c'est le cas particulièrement de la demande de stationnement et de la demande de circulation ; si ces fonctions sont sous-tarifées, les situations de pénurie qui en résultent (saturation du stationnement et congestion) créent un gaspillage de ressources importants ; dans ce cas les mesures tarifaires sont efficaces et constituent un premier axe majeur de définition des stratégies de contrôle de la voirie ;

- la demande peu élastique ou apparemment peu élastique : c'est le cas de la demande d'accès (tout le monde est prêt à rentrer chez lui à n'importe quel prix), de la demande d'arrêt ; pour ces fonctions la tarification est incapable de réduire les coûts sociaux ; en revanche une bonne réglementation permet de réduire l'embarras dû aux manoeuvres les plus gênantes (e.g. interdiction du quart de tour) ;

cette réglementation, et son contrôle, constituent un deuxième axe majeur de définition des stratégies de contrôle de la voirie.

Ainsi, l'identification des coûts sociaux produits sur la voirie urbaine ne peut pas conduire à préconiser la tarification comme seul remède (miracle). Au contraire, elle met en évidence la nécessité d'une bonne réglementation et permet également d'aider à la définir. Il ne faut pas non plus se lasser de répéter que la répression est indissociable de la réglementation pour qu'elle produise l'effet attendu. Ainsi, c'est grâce au trio tarification-réglementation-répression que l'on pourra obtenir une gestion efficace de l'usage de la voirie urbaine.

Enfin, pour conclure, il ne faut jamais négliger les questions d'acceptabilité. La concertation avec tous les partenaires intéressés est indispensable pour faire réussir toute politique urbaine.