

Les documents de travail du SES



# Un modèle de politiques de stationnement

octobre 2003

CDAT  
14691



Cette étude a été commandée par le service économique et statistique à l'association « Recherches urbaines économiques et sociales » de Lille, qui l'a réalisée sous l'autorité de Hubert Jayet (université de Lille 1).

Alain Sauvant, chef du département des études économiques, Maurice Girault et Christine Raynard, membres de ce département, en ont assuré le pilotage.



## TABLE DES MATIÈRES

|                                           |                                                                                          |           |
|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>                                  | <b>INTRODUCTION</b>                                                                      | <b>7</b>  |
| <b>2</b>                                  | <b>RAPPEL DE LA STRUCTURE GÉNÉRALE</b>                                                   | <b>9</b>  |
| 2.1                                       | LA STRUCTURE GÉOGRAPHIQUE DE LA VILLE                                                    | 9         |
| 2.2                                       | LA STRUCTURE ÉCONOMIQUE DE LA VILLE                                                      | 10        |
| 2.2.1                                     | <i>Les ménages</i>                                                                       | 10        |
| 2.2.2                                     | <i>Les propriétaires fonciers</i>                                                        | 11        |
| 2.2.3                                     | <i>Le planificateur</i>                                                                  | 11        |
| 2.2.4                                     | <i>La formation de la rente et le surplus économique</i>                                 | 11        |
| <b>3</b>                                  | <b>LE FONCTIONNEMENT DU MODÈLE ET LA DÉTERMINATION DE L'ÉQUILIBRE</b>                    | <b>13</b> |
| 3.1                                       | LA BOUCLE DES DÉPLACEMENTS.                                                              | 13        |
| 3.2                                       | LA BOUCLE DES LOCALISATIONS                                                              | 14        |
| 3.3                                       | LA BOUCLE DE LA POLLUTION                                                                | 15        |
| <b>4</b>                                  | <b>LES QUESTIONS TRAITÉES ET LES ÉVOLUTIONS POSSIBLES</b>                                | <b>17</b> |
| 4.1                                       | DE QUELQUES CARACTÉRISTIQUES FONDAMENTALES DU MODÈLE ACTUEL                              | 17        |
| 4.2                                       | CE QU'ON PEUT FAIRE AVEC LE MODÈLE ACTUEL                                                | 18        |
| 4.3                                       | LES ÉVOLUTIONS POSSIBLES                                                                 | 18        |
| <b>5</b>                                  | <b>LA SIMULATION D'UN SCÉNARIO DE BASE</b>                                               | <b>20</b> |
| 5.1                                       | INTRODUCTION                                                                             | 20        |
| 5.2                                       | LES PARAMÈTRES                                                                           | 20        |
| 5.3                                       | LA SIMULATION DU SCÉNARIO DE BASE                                                        | 24        |
| 5.3.1                                     | <i>La boucle des déplacements</i>                                                        | 24        |
| 5.3.2                                     | <i>Les boucles des localisations et de la pollution</i>                                  | 27        |
| 5.3.3                                     | <i>Quelques commentaires sur les résultats du scénario d'équilibre.</i>                  | 31        |
| <b>6</b>                                  | <b>LE CALCUL DES EFFETS MARGINAUX</b>                                                    | <b>34</b> |
| <b>7</b>                                  | <b>LES CHOIX OPTIMAUX DE TARIFICATION</b>                                                | <b>38</b> |
| 7.1                                       | LES TARIFICATIONS SÉPARÉES                                                               | 38        |
| 7.1.1                                     | <i>Taxation du stationnement</i>                                                         | 38        |
| 7.1.2                                     | <i>Taxation des déplacements en voiture en périphérie</i>                                | 44        |
| 7.1.3                                     | <i>Taxation des déplacements par les transports en commun transitant par la banlieue</i> | 50        |
| 7.1.4                                     | <i>Taxation des déplacements TC en deuxième couronne</i>                                 | 58        |
| 7.1.5                                     | <i>Synthèse et confrontation des scénarios</i>                                           | 65        |
| 7.2                                       | L'OPTIMISATION GLOBALE                                                                   | 69        |
| <b>8</b>                                  | <b>CONCLUSION GÉNÉRALE</b>                                                               | <b>76</b> |
| <b>ANNEXE 1 : LES ÉQUATIONS DU MODÈLE</b> |                                                                                          | <b>79</b> |
| A1.1                                      | STRUCTURE PHYSIQUE                                                                       | 79        |
| A1.2                                      | STRUCTURE RÉSIDENTIELLE                                                                  | 79        |
| A1.3                                      | LES CHOIX ET LES COÛTS DE TRANSPORT                                                      | 80        |
| A1.3.1                                    | <i>Le choix entre voiture et transports en commun</i>                                    | 80        |
| A1.3.2                                    | <i>Les coûts privés de déplacement par les transports en commun</i>                      | 81        |
| A1.3.3                                    | <i>Les coûts privés de déplacement en voiture</i>                                        | 81        |
| A1.4                                      | LA PRODUCTION DE TRANSPORT                                                               | 83        |
| A1.4.1                                    | <i>Les transports en commun</i>                                                          | 83        |
| A1.4.2                                    | <i>Le réseau routier</i>                                                                 | 83        |
| <b>ANNEXE 2 : L'ÉQUILIBRE</b>             |                                                                                          | <b>85</b> |

|                                                          |            |
|----------------------------------------------------------|------------|
| <b>ANNEXE 3 : LE CALCUL DES EFFETS MARGINAUX</b>         | <b>87</b>  |
| A3.1    PRÉSENTATION GÉNÉRALE                            | 87         |
| A3.2    LE MODULE DE CALCUL                              | 88         |
| <b>ANNEXE 4 : LES PROCÉDURES ITÉRÉES DE SIMULATION</b>   | <b>95</b>  |
| A4.1    STRUCTURE GÉNÉRALE                               | 95         |
| A4.2    LES PROCÉDURES DE SIMULATION                     | 96         |
| A4.3    UN EXEMPLE DE SIMULATION                         | 102        |
| <b>ANNEXE 5 : LES ÉQUATIONS DE CALCUL DE L'ÉQUILIBRE</b> | <b>107</b> |

## 1 INTRODUCTION

Pour analyser les politiques de stationnement, nous avons élaboré un modèle microéconomique simple intégrant l'ensemble des mécanismes nécessaires à l'étude des interactions entre stationnement, déplacements, structures urbaines et effet de serre. Il s'agit d'un modèle standard, conforme à la tradition de l'économie ouverte. Un centre d'activités productives et commerciales est entouré par deux zones résidentielles (une banlieue et une périphérie) dont les habitants se rendent au centre pour y travailler et/ou y faire leurs achats.

La première originalité de ce modèle est de spécifier la demande de transport et ses liens avec l'offre de stationnement. Les habitants, qui sont à l'origine de la demande de transport, ont deux possibilités. La première est l'utilisation d'un système de transports en commun public. La seconde est l'usage d'un véhicule privé. La décision de se déplacer et l'arbitrage entre modes de transport sont issus de la maximisation d'une fonction d'utilité aléatoire dont la partie connue est un coût de transport généralisé. Du côté du transport public, ce coût intègre le coût monétaire acquitté auprès du transporteur et la valeur du temps de déplacement, lui même influencé par la congestion. Du côté du véhicule privé, ce coût intègre les coûts monétaires de l'usage du véhicule, y compris le stationnement, ainsi que la valeur du temps de déplacement intégrant, comme plus haut, les pertes de temps dues à la congestion et à la recherche d'un stationnement.

La deuxième originalité du modèle est d'intégrer la liaison entre la circulation et sa contribution à l'effet de serre, ainsi que les coûts de celui-ci. Dans ce domaine, nous restons simples. Le volume de gaz à effets de serre émis est fonction du temps total de déplacement de l'ensemble des habitants de la ville en véhicule privé. Pour ce qui est du transport public, on suppose ici qu'il n'est pas polluant. On suppose de plus que chaque habitant de la ville est affecté par le niveau global de pollution. En conséquence, on intègre un coût global pour chaque habitant, fonction du volume total des émissions.

Avec cette structure, on peut examiner les conséquences globales des choix de tarification et d'aménagement. Le planificateur peut en effet influencer le fonctionnement de la ville de deux manières. D'une part, il peut, par la tarification, modifier les prix sur la base desquels les consommateurs prennent leurs décisions. Ainsi, par exemple, en l'absence de péage ou de stationnement payant, un automobiliste considère que le coût de son déplacement est la somme du coût du carburant et du coût d'usage du véhicule. Il ajoutera le montant du péage ou celui de la place de stationnement si ceux-ci deviennent payants. D'autre part, il peut, par l'aménagement de surfaces de voirie ou de stationnement, modifier les conditions du déplacement, la congestion étant plus ou moins forte. Les politiques de stationnement mobilisent les deux instruments. On peut donc étudier les réactions des habitants aux choix faits dans ces deux domaines, réactions qui se traduisent par des modifications de répartition des déplacements entre modes de transport, mais aussi par une nouvelle répartition des habitants dans la ville, en réaction à la nouvelle structure des coûts de transports qui en résulte.

Pour qu'un modèle soit utile, il faut pouvoir le résoudre, c'est à dire déterminer ses valeurs à l'équilibre pour différentes configurations des paramètres. Cependant, même simplifié, le modèle d'une ville prenant en compte à la fois les choix de déplacement et les choix de localisation n'est pas soluble analytiquement. Il a donc été nécessaire de réaliser un module de simulation permettant :

- De déterminer les équilibres du modèle, la répartition de la population et ses choix de déplacement à l'équilibre.

- D'analyser l'impact sur l'équilibre des instruments à la disposition du planificateur (aménagement, tarification) en faisant varier les paramètres.
- De déterminer les solutions économiquement efficaces et de comparer ces dernières aux solutions d'équilibre.
- De guider le choix des instruments permettant de rapprocher l'équilibre de la solution efficace et, dans ce contexte, d'étudier plus particulièrement l'impact des politiques de stationnement.

C'est à la présentation de la structure et des premières utilisations de ce module de simulation que le présent rapport est consacré. La version actuelle du module utilise le logiciel MAPLE. Elle permet, à partir d'un ensemble de paramètres décrivant la structure de la ville, les coûts monétaires directs de déplacement, et les déterminants des durées de déplacement (en particulier les fonctions de congestion), de calculer les valeurs d'équilibre du système urbain.

La structure du rapport est la suivante. Dans un premier temps, nous présenterons la structure générale du modèle, qui repose sur trois boucles enchaînées : une boucle des déplacements, une boucle des localisations et une boucle de la pollution. Ensuite, nous présenterons le fonctionnement du module de simulation, en commençant par la structure la plus interne, la boucle des déplacements, pour passer ensuite à la structure qui l'englobe, la boucle des localisations. Nous laisserons de côté la boucle de la pollution, qui joue un rôle moins important que les deux autres. Puis nous présenterons les paramètres utilisés pour le scénario de base sur lequel reposent nos simulations. Ces dernières sont regroupées en scénarios consistant chacun à faire varier un ou plusieurs instruments à la disposition du planificateur. Nous commençons par examiner les conséquences de l'usage séparé de chaque instrument tarifaire disponible, les autres n'étant pas utilisés. Puis nous présenterons les résultats d'un scénario d'optimisation tarifaire globale et montrerons ce qu'y ajoute l'usage d'instruments quantitatifs d'offre de stationnement.

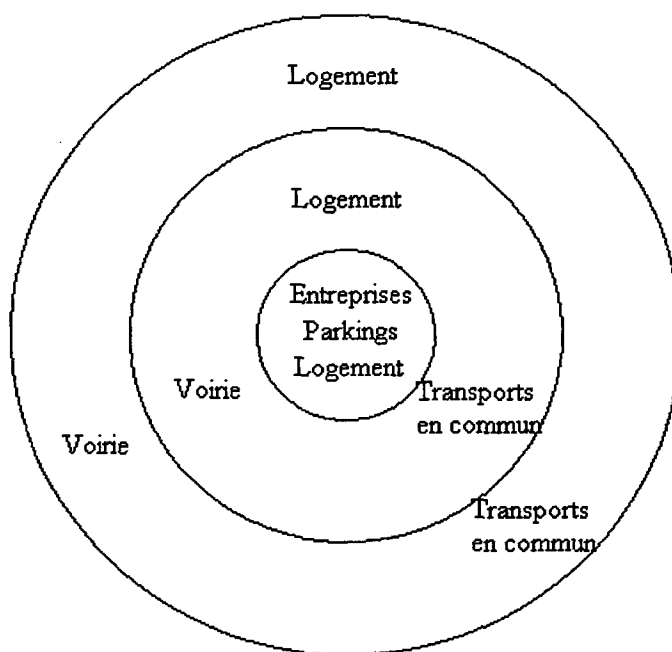
Le présent rapport fait suite à un groupe de travail constitué de :

- Alain SAUVANT, chef du département des études économiques
- Maurice GIRAULT, adjoint au chef du département des études économiques
- Christine RAYNARD, chef de projet au pôle "marchés et stratégies d'entreprises"

## 2 RAPPEL DE LA STRUCTURE GÉNÉRALE

### 2.1 La structure géographique de la ville

Rappelons que notre modèle représente une ville dont la structure géographique de base est décrite par la figure ci-dessous. Au centre, la superficie disponible est partagée entre les activités économiques, le logement et le stationnement de surface ; le stationnement peut également s'y faire hors voirie, dans des parkings (souterrains par exemple) spécialement aménagés. Ces parkings ne font pas concurrence à l'habitat pour l'usage du sol, mais leur coût d'aménagement est plus élevé. Autour de ce centre s'organise une couronne résidentielle dont les trois principaux usages correspondent au logement, à la voirie et aux transports collectifs. Cette couronne résidentielle est elle-même divisée en deux zones : une première couronne, proche du centre, qu'on désignera également par le terme de banlieue ; et une deuxième couronne, plus éloignée, qu'on désignera par le terme de périphérie.



Les ménages qui habitent dans les deux zones de la couronne résidentielle, la banlieue et la périphérie, doivent se rendre au centre (pour y travailler ou pour d'autres usages, le modèle n'ayant pas besoin à ce stade de le préciser puisque nous ne modélisons pas la décision de se déplacer ou non). Les habitants de la zone centrale, qui y sont déjà, n'ont pas besoin de se déplacer. Ces déplacements centripètes sont actuellement les seuls pris en compte par le modèle. Il n'y a ni déplacements centrifuges (du centre vers l'une ou l'autre des couronnes résidentielles), ni déplacements transversaux, ni entre les trois zones de la ville et l'extérieur.

Pour se rendre au centre, les habitants de la couronne résidentielle, ont le choix entre deux modes de transport. Le premier est un mode individuel, assimilable à la voiture. Le second est un mode collectif, avec un système de transports en commun. L'existence de ces deux modes de transport se traduit dans l'usage du sol : les disponibilités en sol périurbain sont réparties en trois usages, l'habitat, la voirie publique empruntée par les véhicules individuels et la voirie réservée empruntée par les transports en commun. Ce faisant, nous

faisons l'hypothèse implicite que les transports en commun se font en site propre, hypothèse destinée à ce stade à faciliter la modélisation parce qu'évitant d'introduire les interactions entre modes de transport utilisant simultanément la même voirie.

Dans la version actuelle, les entreprises sont des acteurs passifs qui restent localisés au centre, ce qui permet de les ignorer. On s'intéresse donc uniquement à l'affectation des sols aux trois usages que sont le logement, la circulation automobile (stationnement au centre, circulation en périphérie) et les transports collectifs.

## **2.2 La structure économique de la ville**

Si l'on met à part les entreprises<sup>1</sup>, la ville comprend trois types d'agents : les ménages, les promoteurs et le planificateur<sup>2</sup>.

### **2.2.1 Les ménages**

Les habitants disposent d'un revenu exogène qu'ils répartissent en trois usages: le transport, le logement, et les autres consommations. Nous allons examiner les décisions relatives aux deux premiers usages (transport et logement). Le troisième est en effet un usage "résiduel", qui sera formalisé simplement comme la consommation d'un bien homogène de prix unitaire (on parle de bien banal).

Les habitants localisés en banlieue et en périphérie répartissent leurs déplacements entre les deux modes de transport. Cette répartition est fonction de la différence de coût généralisé entre véhicule individuel et transports en commun. Ce coût généralisé est la somme des coûts monétaires et des coûts temporels. Ces derniers sont le produit de la durée de déplacement par la valeur du temps (c'est à dire la somme que les agents sont prêts à payer pour économiser une unité de temps dans les transports), posée comme paramètre du modèle. La durée de déplacement est déterminée pour chaque mode de transport par la structure du réseau et son encombrement, via une relation vitesse-débit : la vitesse de passage à une distance donnée est une fonction croissante de la superficie consacrée à cette distance au mode de transport utilisé et une fonction décroissante du nombre de passagers de ce mode de transport passant à cette distance.

Si les habitants localisés en zone résidentielle ont à choisir entre les deux modes de transport, ils ont au préalable choisi leur localisation dans la ville, au centre ou dans une des deux couronnes. Ce choix de localisation est aussi un choix d'usage du sol, modélisé de manière classique dans un contexte de ville ouverte, c'est à dire de ville dont les occupants sont libres de circuler entre l'intérieur et l'extérieur. Le niveau d'utilité qu'obtiennent les agents s'ils quittent la ville (où qu'ils obtenaient avant de la rejoindre) est un paramètre exogène au modèle. Il s'impose à tous, la conséquence de la libre circulation des individus étant que, à l'équilibre, tous atteignent le même niveau d'utilité. Tout habitant, où qu'il soit localisé, connaît le coût de transport qu'il devra subir pour se rendre au centre, sachant qu'il répartit ses déplacements de manière optimale entre véhicule individuel et transports en commun. Il répartit de manière optimale ses ressources disponibles, nettes du coût de transport correspondant, entre ses dépenses en habitat et sa consommation d'un bien banal. Connaissant cette répartition optimale et le prix du logement en un lieu donné, on en déduit le niveau d'utilité atteint.

---

<sup>1</sup> Rappelons qu'on a fait l'hypothèse que les entreprises n'ont pas dans ce modèle de décisions à prendre qui interfèrent avec la structure et le fonctionnement de la ville. En particulier, elles ne choisissent pas leur localisation qui est toujours le centre et elles ne génèrent pas de flux de transports autres que ceux que font les ménages pour se rendre au centre.

<sup>2</sup> Les équations du modèle figurent en annexe.

En partant du niveau d'utilité exogène qu'atteignent tous les habitants de la ville ouverte, on peut inverser la relation précédente et déterminer, pour chacune des trois zones, la consommation de sol et le prix du logement qu'accepte de payer un individu qui atteint ce niveau d'utilité en faisant des choix optimaux. Ce prix est appelé enchère.

### **2.2.2 Les propriétaires fonciers**

Ils sont propriétaires du sol et utilisent la fraction de ce dernier qui n'est pas affectée au transport pour produire des logements loués aux ménages. La quantité de logement produite et son coût sont proportionnels à la quantité de sol utilisée. Le coût de production comprend le coût d'opportunité des usages alternatifs du sol et le coût de fabrication des logements.

Les propriétaires fixent les prix du logement. Dans chacune des zones, les propriétaires savent que s'ils fixent un prix supérieur à l'enchère des habitants, ils feront face à une demande nulle. En effet, en acceptant ce prix, un ménage se condamnerait à n'obtenir qu'un niveau d'utilité inférieur à celui qu'il atteint à l'extérieur. Il a donc intérêt à refuser le logement pour quitter la ville. A l'opposé, s'ils proposent un prix inférieur, ils font face à une demande infinie de la part des agents extérieurs à la ville qui, en prenant ce logement, obtiennent un niveau d'utilité supérieur au niveau de référence qui, à l'extérieur, est le leur. En conséquence, les propriétaires, qui ont intérêt à louer au prix le plus élevé pour lequel ils trouvent preneur, fixent ce dernier à un niveau égal à la rente d'enchère.

### **2.2.3 Le planificateur**

La ville est gérée par un planificateur urbain. Celui-ci a trois fonctions. En premier lieu, il intervient en tant qu'aménageur. Il répartit les sols disponibles entre leurs différents usages : le sol non occupé au centre ville entre les parkings sur voirie et l'habitant ; le sol disponible en périphérie entre l'habitat, la voirie automobile et l'emprise au sol des transports en commun. En second lieu, il engage les coûts d'aménagement nécessaires pour l'usage des transports : coûts d'aménagement des garages sur voirie et hors sol, coûts d'aménagement de la voirie et du système de transport en commun. On fait l'hypothèse que le sol et les autres équipements (y compris les véhicules de transport en commun) sont des biens complémentaires et donc que le coût d'aménagement de chaque mode de transport est proportionnel à la quantité de voirie qu'il utilise. En troisième et dernier lieu, il fixe la partie monétaire des coûts d'usage de chacun des modes de transport. Nous raisonnerons comme si ce coût monétaire était directement fixé par le planificateur, même si dans la réalité (en particulier pour les usagers d'un véhicule individuel), une partie de ces coûts est supportée directement par l'utilisateur, sans intervention du planificateur. En effet, la fixation d'un droit d'accès (pour les transports en commun) ou d'un niveau de taxe adéquat (pour les transports individuels) qui s'ajoute aux coûts directement subis par l'utilisateur se traduit par la fixation d'un coût monétaire global. On peut donc raisonner directement au niveau de ce dernier.

### **2.2.4 La formation de la rente et le surplus économique**

L'existence et le fonctionnement de la ville se traduisent par une modification de la situation des agents, qui est à l'origine d'un surplus économique approprié par une partie d'entre eux.

Plus précisément, que la ville existe ou pas, le niveau d'utilité de référence (celui qu'atteignent les ménages à l'extérieur de la ville) est le même. C'est la conséquence première d'une hypothèse similaire à celle qu'on fait souvent en économie internationale sous le nom d'hypothèse de "petit pays": la ville est suffisamment petite pour que sa formation, son développement et son éventuelle disparition ultérieure ne modifie pas le fonctionnement de

son environnement économique à l'extérieur. En conséquence, en l'absence de modification de leur niveau d'utilité, les habitants ne reçoivent aucun surplus.

Le surplus se partage donc entre les propriétaires et le planificateur. Du côté des propriétaires, résulte de leur activité de location de logements au ménage. Celle-ci leur permet de percevoir une rente, égale à l'ensemble des sommes perçues suite à la location. Cette rente est facile à calculer. En effet, pour chacune des zones, nous connaissons l'enchère et nous savons que cette dernière est égale au prix. En multipliant ce prix par la superficie disponible, nous obtenons la rente acquittée dans chacune des zones. En faisant la somme sur les trois zones, nous obtenons la rente totale.

Cependant, comme nous l'avons noté plus haut, les propriétaires subiront des coûts de location. D'une part, ils aménagent la terre pour produire des logements. D'autre part, ils soustraient cette terre à d'autres usages (en particulier les usages habituels hors zones urbaines), d'où un coût d'opportunité. En faisant la somme de ces deux coûts et en la retirant de la rente globale, on obtient le surplus des propriétaires, qu'on appelle également rente différentielle en économie urbaine.

Du côté du planificateur, ces recettes sont égales au produit des taxes qu'il prélève sur les consommateurs à l'occasion de leurs déplacements. En contrepartie, il subit les coûts d'aménagement des garages, de la voirie utilisée pour les transports privés et du système de transports publics. Son surplus est égal à la différence entre les deux. On notera que, si on ajoute au produit des taxes le coût de production de services de transport urbains, on obtient le coût de transport subi par le consommateur. Et si de l'autre côté on l'ajoute au coût d'aménagement, on obtient le coût total de production du transport. En conséquence, le surplus du planificateur est aussi égal à la différence entre le coût total de transport subi par les habitants et le coût total de production de ces mêmes transports.

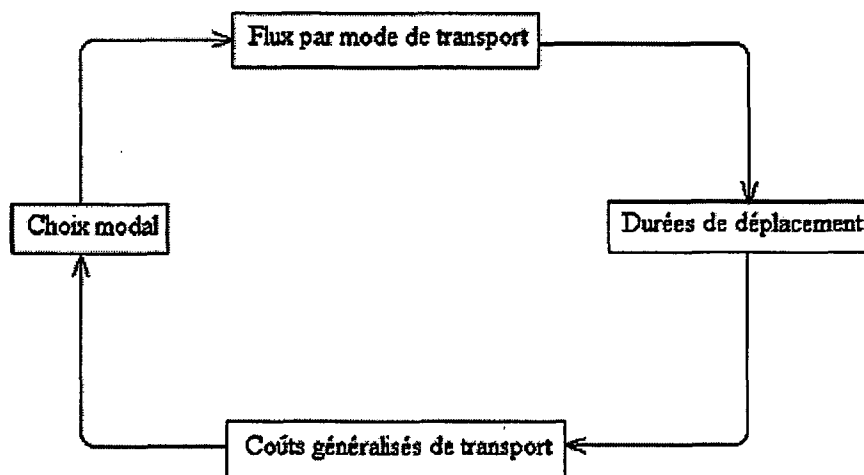
Sachant que les habitants ne bénéficient d'aucun surplus, nous prendrons comme mesure du surplus global dégagé par la ville la somme du surplus des propriétaires (la rente différentielle) et du surplus du planificateur. C'est le bénéfice que dégagerait un opérateur intégré, de type aménageur, cumulant les rôles de planificateur et de propriétaire.

### 3 LE FONCTIONNEMENT DU MODÈLE ET LA DÉTERMINATION DE L'ÉQUILIBRE

La détermination de l'équilibre, dont les équations sont fournies en annexe 2, est le résultat du jeu de trois boucles. Deux de ces boucles correspondent à chacun des deux types de décisions que prennent les ménages : la boucle des déplacements et la boucle des localisations. La troisième est la conséquence des interactions entre fonctionnement urbain et environnement. Nous allons décrire ces trois boucles chacune à son tour.

#### 3.1 La boucle des déplacements.

A localisation donnée, les ménages localisés en banlieue et dans la périphérie, qui se déplacent obligatoirement vers le centre ville, choisissent leur mode de transport, voiture ou transports en commun. Les déterminants de ces choix et les interactions entre usagers qui en résultent sont décrits par la boucle des déplacements, représentée par le graphe ci-dessous.



En partant du bas de la boucle, l'utilisateur part des coûts généralisés de transport auxquels il fait face. Rappelons que ces derniers sont la somme des coûts monétaires directs et de l'évaluation monétaire de la durée de déplacement. À l'étape du choix modal, il répartit ses déplacements entre véhicule individuel et transports collectifs en fonction de la différence de coûts généralisés de transport entre les deux modes ; un mode est d'autant plus privilégié que son coût est faible relativement à l'autre.

L'agrégation des décisions individuelles dans chaque zone (banlieue et périphérie) permet de déterminer les flux entrant et sortant de chaque zone pour chacun des modes de transport. Cette agrégation tient évidemment compte du fait que les usagers de la périphérie transitent par la banlieue et que tous rentrent dans le centre ville où ils doivent trouver un stationnement.

Le passage des flux par mode de transport aux durées de déplacement fait intervenir des phénomènes de congestion, formalisés à partir de relations de type débit-vitesse : à volume d'infrastructure donné, plus le flux partant de et transitant par une zone pour un mode de transport donné est important, plus la vitesse de ce mode de transport est réduite, plus la durée de déplacement est importante ; de même, plus les usagers sont nombreux à se rendre au

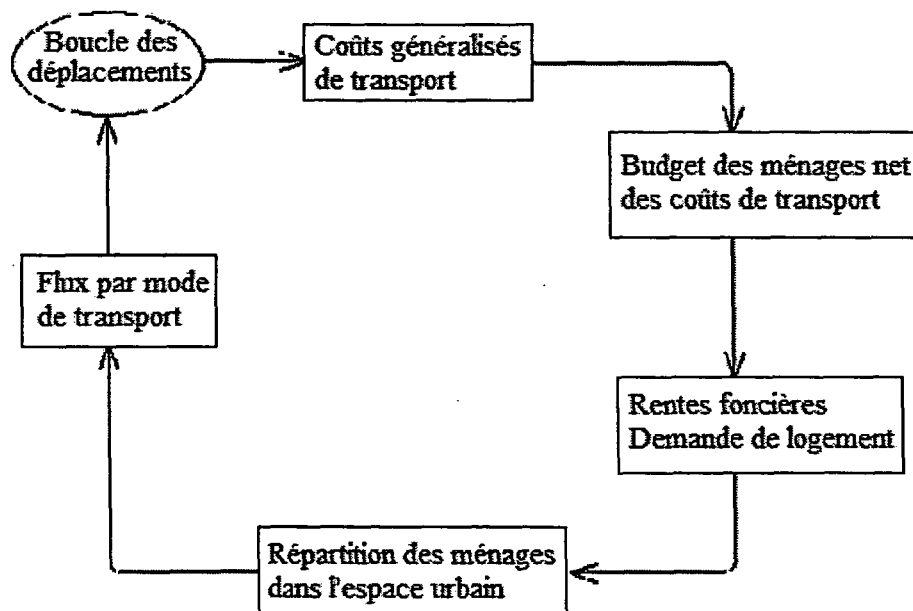
centre ville en voiture, plus le temps nécessaire pour accéder à un stationnement est important.

La connaissance des durées de déplacement permet de boucler la boucle. En multipliant des durées par la valeur du temps et en les ajoutant aux coûts monétaires, on calcule pour chaque zone et chaque mode de transport les coûts généralisés de transport qui sont les ingrédients de base du choix modal.

D'un point de vue dynamique, cette boucle a un effet stabilisant sur le fonctionnement du modèle. Supposons en effet qu'une perturbation exogène fasse passer des usagers d'un mode de transport à l'autre. Le mode de transport qui a reçu des voyageurs voit sa congestion augmenter, d'où une augmentation des durées de déplacement et, par ce biais, des coûts généralisés de transport. A l'opposé, le mode de transport qui a perdu des voyageurs voit sa congestion diminuer, d'où une baisse des durées de déplacement et, par ce biais, des coûts généralisés de transport. La différence entre les coûts généralisés de transport du mode qui a reçu des voyageurs et celui qui en a perdu augmente, rendant ce dernier plus attractif. Les usagers modifient en conséquence leurs choix de déplacement, une partie d'entre eux se reportant vers le mode qui avait initialement perdu des voyageurs, atténuant l'écart entre les deux modes jusqu'à stabilisation.

### 3.2 La boucle des localisations

En amont de la boucle des déplacements, les usagers choisissent leur localisation dans la ville, se répartissant entre les espaces résidentiels disponibles au centre, en banlieue et en périphérie. Les mécanismes de ce choix et leurs conséquences globales conduisent à la boucle des localisations, représentée par la figure ci-dessous.



On part des coûts généralisés de transport, déterminés à localisations données par le fonctionnement de la boucle des déplacements. Soustraits des ressources des ménages, ces coûts généralisés déterminent dans chacune des trois zones (centre, première et deuxième couronne) leur budget disponible pour la consommation et le logement.

Interviennent alors les mécanismes classiques de l'économie urbaine. Nous avons considéré que la ville était ouverte, ce qui signifie que les habitants peuvent circuler librement

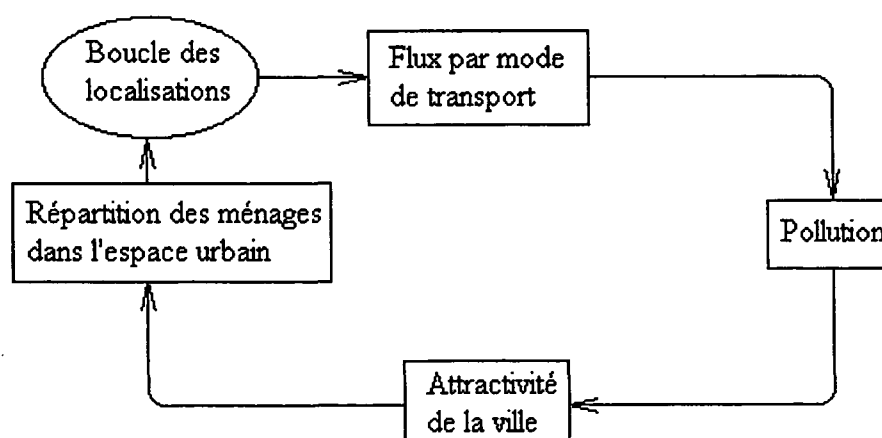
entre la ville et l'extérieur et que ce dernier est suffisamment grand pour ne pas être affecté par ce qui se passe dans la ville. En conséquence, tous les habitants de la ville y atteignent le même niveau d'utilité exogène, fixé de l'extérieur. S'il était inférieur, des habitants partiraient. S'il était supérieur, des habitants viendraient dans la ville. La connaissance du niveau d'utilité commun et du budget disponible dans chacune des trois zones permet de calculer les rentes d'enchère, c'est à dire ce que chacun est prêt à payer pour se loger dans chacune des zones. La population étant homogène, ces rentes sont elles-mêmes égales aux prix fonciers.

Le mécanisme d'enchères permet également de déterminer la demande de logement des habitants de chacune des zones. La confrontation de cette demande avec les superficies disponibles (rappelons qu'elles sont exogènes) aboutit à la répartition des ménages entre les trois zones de la ville. On revient alors sur la boucle des déplacements qui, pour une répartition donnée des ménages, calcule les coûts généralisés de transport dans chacune des deux couronnes.

Comme la précédente, cette boucle a normalement un effet stabilisant. Pour le montrer, on peut analyser les conséquences d'une diminution exogène du ou des deux coûts généralisés de transport, suite par exemple à une amélioration technique ou à une baisse des taxes. Toutes choses égales par ailleurs, des coûts de transports plus faibles entraînent une augmentation du budget des ménages disponible pour le logement et la consommation courante. A niveau d'utilité inchangé, il en résulte une augmentation de la disposition à payer des ménages pour se loger et donc des rentes foncières. Mais des prix fonciers plus élevés induisent une substitution de la demande de bien de consommation à la demande de logement. Cette dernière baisse, quelle que soit la zone. Comme l'offre est inchangée, des surfaces sont libérées qui permettent d'accueillir de nouveaux habitants. La population de la ville augmente, d'où une croissance des flux de transports, une congestion plus forte et donc des durées de déplacement plus longues ; il en résulte une croissance des coûts généralisés de transport qui compense pour partie la baisse initiale.

### 3.3 La boucle de la pollution

On aboutit in fine à la boucle de la pollution, dont on trouvera la représentation dans la figure ci-dessous. La boucle des localisations ayant permis de déterminer la répartition des ménages dans les trois zones de la ville et les choix modaux qui en résultent, on connaît les flux par modes de transport. On a fait l'hypothèse que seule la circulation automobile était génératrice de pollution et que cette dernière était proportionnelle au temps global passé par les automobilistes dans la circulation.



Connaissant les flux automobiles et les durées de déplacement entre chacune des deux couronnes et le centre, on peut donc calculer le volume total de polluants générés. Il en résulte un coût de la pollution qui diminue l'utilité d'habiter dans la ville. En conséquence, le nombre d'habitants de la ville dépend de l'utilité qu'ils tirent de la consommation de logement et de la consommation de bien banal, augmentée de la compensation qu'ils doivent recevoir du fait de la pollution. C'est la somme de ces deux termes qui doit être comparée à l'utilité d'une résidence extérieure à la ville et qui, de ce fait, détermine la répartition des ménages dans l'espace urbain. On rentre alors dans la boucle des localisations.

## **4 LES QUESTIONS TRAITÉES ET LES ÉVOLUTIONS POSSIBLES**

La structure actuelle du modèle résulte d'un certain nombre de choix visant à traiter de manière prioritaire un ensemble restreint de questions jugées comme centrales, dans un cadre aussi simple que possible, qui malgré cela pose d'ores et déjà des problèmes techniques importants. Nous avons pris ce parti car nous considérons que travailler d'emblée sur un modèle trop général conduirait à affronter d'emblée des problèmes insurmontables ; il était donc préférable de commencer à maîtriser un cadre plus simple, pour ensuite introduire de nouvelles caractéristiques permettant d'étendre le champ des questions auxquelles on peut, par ce biais, répondre.

De ce fait, il est utile de faire la liste des problèmes que le modèle permet d'analyser et de ceux qui restent ouverts, le modèle pouvant évoluer pour les inclure. Au préalable, nous rappellerons quelques unes des caractéristiques fondamentales du modèle actuel.

### **4.1 De quelques caractéristiques fondamentales du modèle actuel**

Le modèle actuel a quelques caractéristiques fondamentales qu'il est utile d'avoir en tête :

1. Le comportement des entreprises, dont la localisation est fixée, est entièrement exogène. Les entreprises occupent au centre une superficie fixe (que, de ce fait, on peut ignorer) Elles n'ont pas d'enchères foncières et elles ne bougent pas. On ne peut donc pas examiner les conséquences des contraintes de circulation sur les choix de localisation des entreprises
2. La représentation de l'espace se réduit à trois zones, le centre, la première couronne ou banlieue, la deuxième couronne ou périphérie. C'est la structure minimale pour tenir compte des interactions engendrées, notamment par la congestion. Ceci ne permet évidemment pas encore d'examiner les liens entre tarification et distance
3. La consommation de logement des ménages se réduit à l'usage du sol. On laisse donc pour l'instant de côté tout ce qui tourne autour des conséquences sur le bâti.
4. Le volume des déplacements est fixé et ces déplacements ne se font qu'entre les deux zones périphériques et le centre ville. Il n'y a ni déplacements internes aux couronnes ni déplacements entre couronnes.
5. La circulation automobile et les transports en commun sont les seuls modes de transport disponibles. A ce stade, on ignore les modes doux, marche à pieds et deux roues.
6. Les transports en commun et les transports individuels fonctionnent sur des infrastructures complètement séparées, sans interactions entre l'un et l'autre (par exemple effets de congestion croisés), ce qui revient à considérer que l'infrastructure de transport en commun est en site propre. Chaque mode de transport a une fonction de congestion qui lui est propre.
7. La capacité de transport des transports en commun est fonction de la seule superficie de l'infrastructure correspondante, ce qui conduit à négliger les aspects liés en particulier aux véhicules. Implicitement, on fait l'hypothèse d'une complémentarité entre l'infrastructure et les équipements de transport qui l'empruntent.
8. Les ménages sont parfaitement homogènes, tant pour ce qui est de leurs préférences que de leurs revenus. On laisse donc de côté tout ce qui tourne autour de l'impact des politiques de transport sur la structure sociale des villes, en particulier sur la ségrégation.
9. Tous les ménages peuvent utiliser un véhicule automobile. Il n'y a pas de prisonniers des transports en commun. De ce fait, les politiques de stationnement et de circulation n'auront pas de conséquence sur la décision de détenir un véhicule. Seuls entrent en ligne de compte les choix faits pour utiliser ce véhicule

10. Le comportement de détention d'un véhicule automobile n'est pas explicité.
11. La seule réaction possible à des restrictions de stationnement est le report modal vers les transports en commun ou une relocalisation au centre ville.
12. Le modèle fonctionne en statique comparative. Il permet de déterminer l'effet d'une modification des paramètres ou des instruments du planificateur sur l'équilibre.

#### **4.2 Ce qu'on peut faire avec le modèle actuel**

Dans le modèle actuel, le planificateur dispose des instruments d'intervention suivants :

- Il aménage la ville, c'est à dire qu'il répartit le sol disponible dans chacune de ses zones entre les différents usages (habitat, voirie utilisée par les transports individuels, voirie réservée aux transports collectifs, stationnement de surface au centre ville) et qu'il engage les coûts d'infrastructure liés à la mise en place du système de transports, y compris la production de places de stationnement hors sol.
- Il détermine les coûts monétaires d'utilisation du système de transport via un système de tarification.

En conséquence, la version actuelle du modèle est bien adaptée pour répondre à deux grands types de questions :

- Des questions relatives aux choix d'aménagement du planificateur. Il s'agit ici de déterminer quelles sont les caractéristiques des choix optimaux d'aménagement et de quels instruments le planificateur peut disposer pour déterminer quand ses choix sont optimaux. Il s'agit également de voir, dans une optique de 'second rang', quelles conséquences ont sur ces choix l'incapacité du planificateur d'utiliser un système de tarification adapté à l'obtention d'un équilibre coïncidant avec un optimum de premier rang.
- Des questions relatives à la tarification. Il s'agit en premier lieu de déterminer les caractéristiques de la structure optimale des coûts monétaires auxquels un agent doit faire face pour se comporter de manière optimale dans un contexte de décisions décentralisées, et de voir ce qu'exige cette structure de coûts monétaires du système tarifaire pour être réalisable. Il s'agit ensuite, dans une optique de second rang, de voir les conséquences de restrictions du système tarifaire (par exemple l'impossibilité d'une tarification non linéaire, ou l'impossibilité de péages routiers) sur la réalisation de l'optimum et l'usage des outils tarifaires existants.

C'est dans ce contexte que le modèle peut répondre à un certain nombre de questions sur les politiques de stationnement. Il devrait en particulier être apte à étudier les interactions entre restrictions quantitatives de stationnement (à supposer qu'elles soient respectées par les usagers) et tarification de celui-ci.

#### **4.3 Les évolutions possibles**

Comme indiqué plus haut, nous avons volontairement laissé de côté un certain nombre de questions qui, pour être analysées, supposent des évolutions à partir de la version actuelle.

En premier lieu, cette version n'est pas apte à l'étude de la dichotomie entre stationnement des résidents et stationnement des usagers de passage : travailleurs non résidents ou chalandes des zones commerciales. Un traitement convenable de cette question suppose que les résidents puissent réagir aux choix tarifaires du planificateur, la principale réaction à étudier étant le choix de posséder ou non un véhicule. C'est une question que, pour l'instant, nous avons laissée de côté, car elle conduit à deux types de complications. La première est d'introduire un arbitrage entre posséder ou non un véhicule, qui doit évidemment être fonction de l'usage qui en est attendu et donc des choix de transports ultérieurs. La deuxième est que, si les agents se livrent à cet arbitrage, ils cessent d'être homogènes. Il faut

donc introduire des mécanismes de ségrégation dans la ville. A priori, ces aménagements peuvent et devraient être introduits dans une version ultérieure.

En second lieu, et ce point est lié au précédent, la version actuelle ne permet pas de poser des questions en termes d'équité. Les mesures prises pour limiter la circulation atteignent-elles de la même manière l'ensemble des habitants de la ville et, si non, quelles sont les catégories susceptibles d'être les plus affectées ? La réponse à cette question exige en effet, comme précédemment, qu'on introduise une population de ménages hétérogènes, soit dans leurs besoins en logement, soit dans leurs revenus, soit dans leur valeur du temps, soit dans leurs préférences intrinsèques pour un mode de transport par rapport à l'autre. Comme noté plus haut, il en résultera des mécanismes de ségrégation qu'il faudra expliciter. Et, là encore, ces aménagements peuvent et devraient être introduits dans une phase ultérieure.

En troisième lieu, le modèle actuel considère comme totalement exogène une localisation des activités économiques que, de plus, il postule comme étant purement centrale. S'il est important que, à terme, on puisse aborder dans ce cadre des questions relatives à l'impact de la régulation de la circulation sur les activités économiques, en particulier le fait que cette régulation puisse induire des déplacements vers la périphérie, ceci supposera une évolution très significative du modèle. En particulier :

1. A partir du moment où l'on considère des entreprises mobiles, il faut expliciter leur demande de foncier et la confrontation entre ces dernières et la demande de logement des ménages. Ce qui passe par une représentation de leur demande de facteurs de production, en particulier le travail et la terre.
2. Il faut analyser le lien entre activités économiques et déplacements des ménages. Là encore, pour partie au moins, il faudra disposer d'une formalisation de la demande en facteur travail.
3. De ce point de vue, on ne peut négliger le fait que l'activité économique génère deux types de déplacements intra-urbains des ménages très différents, les navettes domicile-travail et les déplacements pour l'acquisition de biens et/ou de services. Une des raisons essentielles de cette différence tient au fait que, dans le premier cas, les ménages satisfont une demande de facteur de production par les entreprises alors que, dans la seconde, ils vont à la rencontre d'une offre d'une partie de ces entreprises, celles qui relèvent principalement des secteurs du commerce et des services aux particuliers. Il faudra que le modèle rende compte de cette dichotomie, ce qui passera sans doute par l'introduction de deux secteurs.

Une quatrième évolution consisterait à expliciter les réactions des usagers du transport individuel face aux choix tarifaires du planificateur et/ou aux restrictions quantitatives qu'il impose. En effet, l'observation quotidienne montre, que, face à ces décisions, beaucoup de conducteurs cherchent à échapper à leurs conséquences en allongeant leur temps de circulation (pour trouver un emplacement gratuit ou même simplement une place disponible) voire en se réfugiant dans le stationnement illégal, avec des conséquences sur les conditions de circulation et donc sur le niveau de congestion. Il est possible d'introduire ces comportements dans le modèle, à deux conditions. La première est d'en préciser les conséquences pour les autres usagers. La seconde, qui concerne plus particulièrement le stationnement illégal, est d'introduire également une représentation, même sommaire, des politiques de répression de ce dernier et le coût de ces politiques.

## 5 LA SIMULATION D'UN SCÉNARIO DE BASE

### 5.1 Introduction

Pour réaliser les simulations et, surtout, pour être capable de les répéter avec des jeux de paramètres que nous faisons varier pour analyser les conséquences de modifications tarifaires ou d'aménagement, nous avons programmé en utilisant le langage MAPLE V un module de simulation et un ensemble de procédures permettant de le mettre en œuvre et d'en extraire les résultats. Ces modules sont présentés et détaillés en annexe.

Dans cette section, nous nous contenterons d'en illustrer le fonctionnement en nous appuyant sur la situation de base. Nous commencerons par présenter les paramètres de ce scénario de base, en expliquant comment nous les avons choisis. Puis nous montrerons comment on détermine un équilibre, en nous appuyant sur les trois boucles analysées plus haut. Cette présentation permettra de concrétiser le fonctionnement de ces boucles.

### 5.2 Les paramètres

Notre scénario de base commence par le choix d'un certain nombre de paramètres. Ces paramètres ont été choisis en se référant à une ville peuplée de 70 000 à 80 000 ménages, soient environ 150 000 habitants.

Une première série décrit la structure physique de la ville, c'est à dire la répartition des surfaces disponibles entre les différents usages. Rappelons que la ville comprend trois zones, le centre, la première couronne ou banlieue et la deuxième couronne ou périphérie. Dans chacune de ces trois zones, la superficie disponible est répartie entre trois usages : résidentiel, voiture particulière et transports en commun. S'y ajoute au centre la production de stationnement hors voirie qui n'empiète pas sur les surfaces disponibles. Les superficies disponibles dans chacune des trois zones et leur répartition sont données par le tableau suivant :

*Superficies disponibles (hectares)*

|                            | Centre | Banlieue | Périphérie |
|----------------------------|--------|----------|------------|
| Total                      | 320    | 1200     | 1220       |
| Usage résidentiel          | 320    | 880      | 900        |
| Usage voiture              | 0      | 250      | 250        |
| Usage transports en commun | 0      | 70       | 70         |
| Usage garages              | 55     |          |            |

Les 320 hectares du centre correspondent à un disque de deux kilomètres de diamètre, ce qui peut paraître petit (la commune moyenne fait 1500 hectares). Il ne faut cependant pas oublier que, pour en simplifier le fonctionnement, nous n'incorporons pas dans le modèle la circulation au centre ville, c'est à dire que nous faisons l'hypothèse implicite que ce dernier est suffisamment petit pour que les déplacements qui s'y produisent puissent être négligés. La zone centrale correspond à l'hypercentre plutôt qu'à la commune centre, d'où le choix d'une faible superficie. L'autre choix important est d'ignorer dans le centre tout ce qui n'est pas relatif au stationnement. Le choix de la superficie de stationnement reste relativement arbitraire.

La banlieue et la périphérie sont à peu près de même superficie de 1200 hectares, ce qui met la limite de la ville à environ trois kilomètres du centre, plus si l'on tient compte du fait que nous avons négligé les superficies dont l'usage n'est ni résidentiel, ni consacré à la

circulation, comme les surfaces commerciales ou de loisir. Cette superficie globale permet, on le verra plus loin, d'aboutir à des valeurs réalistes quant à l'occupation du sol par les ménages. En nous appuyant sur quelques observations, nous avons considéré qu'un quart environ de cette superficie était utilisée par les moyens de transport, dont un quart environ par les transports en commun.

Certains de ces paramètres sont manipulables par le planificateur. Il s'agit de la quantité de stationnement disponible ; des superficies consacrées en banlieue et en périphérie pour l'usage routier et les transports en commun ; et de la superficie disponible pour le logement en deuxième couronne. Les paramètres non manipulables sont les superficies routières et transports en commun au centre, nuls par définition (pas de circulation au centre) ; la superficie totale de ce même centre, qui ne peut s'étendre au détriment de la banlieue qui l'entoure ; la superficie totale de la banlieue, qui ne peut s'étendre ni au détriment du centre, ni au détriment de la périphérie ; la superficie à usage résidentiel en périphérie. De ce fait, la superficie consacrée à un usage résidentiel en banlieue est égale à la différence entre la superficie totale et les superficies consacrées au transport. A l'opposé, en périphérie, la superficie totale n'est pas limitée ; elle est égale à la somme des superficies consacrées à chacun des trois usages. En fait, on fait implicitement l'hypothèse de l'existence de terre disponible dans cette zone, dont l'extension n'est pas limitée par la présence des autres zones.

Vient ensuite une deuxième série de paramètres, qui décrivent les comportements résidentiels des usagers de l'espace urbain, c'est à dire leur niveau d'utilité de référence, leurs fonctions d'enchères et de demande de logement. Ces dernières ont été obtenues en partant d'une représentation des préférences des agents par une fonction d'utilité de Cobb-Douglas,

$$U(c, h) = A c^{3/4} h^{1/4}$$

avec  $A = (1/4)^{-1/4} (3/4)^{-3/4}$ . Le choix d'une Cobb-Douglas est fait pour des raisons de simplicité. Les exposants de la Cobb-Douglas correspondant à la répartition de la dépense entre les différents biens, on a fait le choix d'un exposant  $1/4$  pour le logement et  $3/4$  pour les autres biens en partant du constat qu'en moyenne les ménages consacrent 25% de leur budget à leur dépense en logements. La constante  $A$  est un terme de normalisation sans effet sur le modèle, mais qui permet de simplifier les expressions de la fonction d'enchère,  $E(w, u)$ , et de la demande de logement,  $H(w, u)$ .

Dérivées de la fonction d'utilité, ces dernières ont la forme suivante :

$$E(w, u) = w^4 u^{-4}$$

$$E(w, u) = \frac{1}{4} w^{-3} u^4$$

où  $w$  est le revenu et  $u$  est le niveau d'utilité de référence de l'agent. Toutes les quantités monétaires sont ramenées à des K€ en flux annuel, sachant que, pour obtenir la valeur d'un stock, il faut diviser le flux annuel par le taux d'intérêt. Pour le salaire moyen annuel, nous avons choisi la valeur

$$w = 30 \text{ K€ / an}$$

Cette valeur a été déterminée en tenant compte qu'en moyenne chaque logement est occupé par un ménage avec une moyenne de 1,67 actifs. Les 30 K€ annuels correspondent donc à 18 K€ par personne et par an, soit une rémunération moyenne mensuelle d'environ 1,5 K€, qui est la valeur que fournissent les enquêtes emploi. Pour le niveau d'utilité de référence, rappelons qu'il est fonction du niveau de pollution, soit

$$u = v - \psi(E)$$

où  $v$  est le niveau d'utilité hors pollution et  $\psi(E)$  est l'effet de la pollution, cette dernière étant mesurée par le temps total passé consacré à la circulation en véhicule individuel. Pour le

niveau d'utilité hors pollution, nous avons fixé  $u = 5$ . Pour l'effet de la pollution, nous avons fixé

$$\psi(E) = 0.16 \times 10^{-5} E$$

Ces valeurs ont été déterminées par calage, de manière à obtenir une solution satisfaisante. Le niveau d'utilité n'ayant pas de signification en soi, elles ne sont pas directement interprétables.

La troisième série de paramètres décrit les conditions de circulation. Il s'agit des fonctions de congestion, fondées sur des relations débit-vitesse. Elles relient les durées de déplacement en banlieue et en périphérie et la durée de stationnement (exprimées en minutes) à la densité de trafic, mesurée par le ratio du flux à la surface. Il y a deux relations débit-vitesse pour les transports en commun, permettant de déterminer la durée d'un trajet banlieue-centre et périphérie-banlieue. En faisant la somme de ces deux durées, on obtient le temps total pour un trajet entre la périphérie et le centre. Pour la voiture particulière, il faut ajouter la durée d'obtention d'un stationnement, calculée à partir d'une troisième fonction de congestion.

Ces fonctions de congestion sont toutes de la même forme :

$$\text{durée} = \text{minimum} + \frac{p_1}{1 + p_2 / \text{densité}}$$

où « minimum » est la durée de déplacement en l'absence de congestion, « densité » est la densité de trafic, mesurée par le nombre de personnes transitant par la zone divisée par la surface ; les paramètres  $p_1$  et  $p_2$  ont été déterminés par calage pour retracer des conditions moyenne de circulation. Il s'agit d'une spécification simple, où la durée est presque une fonction affine de la densité avec un coefficient  $p_1/p_2$ , le premier terme du dénominateur étant là pour éviter les problèmes posés par les divisions par zéro. La densité de trafic est calculée séparément pour chaque mode de transport, en utilisant le trafic de ce mode et les superficies qui lui sont consacrées. On fait donc implicitement l'hypothèse que les transports en commun fonctionnent en site propre. Une hypothèse différente serait (au calage près) relativement aisée à implanter.

Les valeurs des paramètres utilisées pour la simulation sont les suivantes :

### *Fonctions de congestion<sup>3</sup>*

|                             | minimum | $p_1$ | $p_2$ |
|-----------------------------|---------|-------|-------|
| <i>Voiture particulière</i> |         |       |       |
| Stationnement au centre     | 0 min   | 300   | 93750 |
| Transit banlieue-centre     | 5 min   | 4     | 187,5 |
| Transit périphérie-banlieue | 2 min   | 4     | 187,5 |
| <i>Transports en commun</i> |         |       |       |
| Transit banlieue-centre     | 8 min   | 10    | 187,5 |
| Transit périphérie-banlieue | 4 min   | 10    | 187,5 |

Ces paramètres correspondent à des durées de déplacement à partir de la périphérie en l'absence de congestion de sept minutes en voiture et de douze minutes pour les transports en commun, soit une vitesse d'environ 30 km/heure dans le premier cas, 15 km/heure dans le second. Les transports en commun sont également deux à trois fois plus sensibles à la congestion que les voitures particulières.

<sup>3</sup> Les paramètres  $p_1$  et  $p_2$  sont des paramètres sans dimension pour lesquels il n'existe pas d'unités de mesure

La quatrième série de paramètres décrit les facteurs influençant le choix modal des usagers. Il s'agit en premier lieu des coûts monétaires. Rappelons que ceux-ci se répartissent en deux composantes. La première correspond aux coûts marginaux hors taxes : coût marginal d'usage du véhicule privé, coût marginal de production des transports en commun. La deuxième composante est la taxe perçue par l'autorité publique, sous forme de péage ou de taxe sur les carburants pour les usagers de la voiture, incorporée dans le prix du billet pour les usagers des transports en commun. La somme de ces deux composantes est le coût monétaire total. Ces coûts monétaires sont calculés séparément pour les trajets banlieue-centre et périphérie-périphérie. Le coût monétaire total d'un trajet périphérie-centre est évidemment la somme des coûts des deux portions de trajet.

Les valeurs que nous avons choisies sont les suivantes :

**Coûts monétaires par trajet (K€/an)**

|                             | Coût monétaire total | Coût marginal hors taxes |
|-----------------------------|----------------------|--------------------------|
| <i>Voiture particulière</i> |                      |                          |
| Stationnement au centre     | 0                    | 0                        |
| Transit banlieue-centre     | 3                    | 3                        |
| Transit périphérie-banlieue | 1                    | 1                        |
| <i>Transports en commun</i> |                      |                          |
| Transit banlieue-centre     | 2,25                 | 2,25                     |
| Transit périphérie-banlieue | 0,75                 | 0,75                     |

On fera sur ce choix deux remarques. La première est que, dans notre scénario de référence, il n'y a pas de taxes, ce qui explique l'égalité entre les coûts monétaires totaux et les coûts marginaux hors taxes. En effet, pour bien préciser la nature et l'importance de la taxation il était important de partir d'une situation où celle-ci était absente. La seconde est que le stationnement a un coût marginal nul, ce qui s'interprète comme le fait qu'occuper une place de stationnement disponible a un coût d'opportunité nul (ou presque), ce qui nous paraît logique. Cela ne signifie pas que le stationnement est sans coût dans notre modèle. En effet, on verra plus loin que la production de places de stationnement a un coût.

Pour interpréter les coûts ci-dessus, il faut rappeler qu'il s'agit de K€ annuels supportés par un ménage pour l'ensemble de ses trajets pendant la dite année. Les 3K€ que paye un ménage habitant à la périphérie chaque année se répartissent sur 600 à 700 allers-retours faits par les deux personnes actives du ménage, soit 4 à 5€ par aller-retour, ce qui est dans la moyenne des tarifs de transport en commun des villes moyennes pour ce type de déplacement. Les coûts de la voiture sont un tiers plus élevés que ceux des transports en commun.

A ces coûts monétaires s'ajoutent la valeur du temps, qui permet d'ajouter aux coûts monétaires les coûts induits par la durée des déplacements, le paramètre de préférence pour la voiture qui détermine la part modale de cette dernière quand les coûts sont égaux, et le paramètre d'incertitude, qui détermine la sensibilité d'un ménage à la différence de coûts. Ces paramètres ont les valeurs suivantes :

**Paramètres du choix de mode de transport**

|                                                  |      |
|--------------------------------------------------|------|
| Valeur du temps (K€ annuels par minute)          | 0,3  |
| Préférence relative pour la voiture <sup>4</sup> | 0,65 |
| Paramètre d'incertitude <sup>5</sup>             | 0,5  |

<sup>4</sup> Paramètre sans dimension pour lequel il n'existe donc pas d'unité de mesure

<sup>5</sup> Paramètre sans dimension pour lequel il n'existe donc pas d'unité de mesure

Pour interpréter la valeur du temps, il faut là encore se rappeler que les coûts monétaires sont exprimés en K€ annuels alors que les durées sont en minute par déplacement. Or, une minute gagnée sur un trajet correspond à deux minutes sur un aller-retour et, en reprenant l'estimation faite plus haut de 600 à 700 allers-retours annuels pour les deux actifs du ménage, on aboutit à une durée totale de 1200 à 1400 minutes, soient 20 à 23 heures. Les 0,3 K€ sont à rapporter à ce gain total de 20 à 23 heures, soit une valeur du temps de 13 à 15€ l'heure, valeur fréquente dans les études sur la valeur du temps.

Pour interpréter la préférence de la voiture, noté  $\zeta$ , il suffit de noter qu'il résulte des équations du modèle que, en l'absence de différence de coût total (somme des coûts monétaires et de la valeur du temps) entre les deux modes de transport, la part de la voiture est égale à  $(1+\zeta)/2$ . Avec  $\zeta = 0,65$ , on a donc à coût égal une part modale de 82% pour la voiture, de 18% pour les transports en commun. Quand au paramètre d'incertitude, sa valeur, choisie par calage, est difficile à interpréter.

La dernière série de paramètres regroupe les coûts de production de l'espace pour chacun de ses usages :

**Coûts de production de l'espace (K€ par hectare et par an)**

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| Logement                | 100 |
| Voirie automobile       | 50  |
| Voirie et équipement TC | 50  |
| Garage hors voirie      | 70  |

Ces valeurs ne jouent aucun rôle dans la détermination de l'équilibre. Par contre, elles sont utilisées pour calculer les surplus et donc pour comparer les scénarii entre eux. Il ne s'agit pas de coûts de production calculés directement, mais ramenés à un flux monétaire annuel. Pour illustrer la différence, les coûts ci-dessus correspondraient pour le logement à un loyer équilibrant le coût de construction et d'entretien du logement. Pour fixer ces paramètres de manière raisonnable, nous nous sommes référés au coût du logement déterminé par le modèle sur des bases solides car correspondant à un budget logement d'un montant usuel (un quart des ressources du ménage) et à des superficies occupées qui sont également dans la moyenne. Le coût du logement qui figure ici est inférieur d'environ un tiers au prix de ce même logement en périphérie. Le coût de la voirie, pour laquelle il n'y a pas de construction, est pris égal à la moitié du précédent. Pour le stationnement au centre, on a une valeur intermédiaire (rappelons qu'il s'agit de garages et donc de constructions).

### 5.3 La simulation du scénario de base

#### 5.3.1 La boucle des déplacements

Nous allons maintenant parcourir la boucle des déplacements pour en préciser le fonctionnement. Rappelons que celle-ci s'intéresse uniquement aux choix de déplacements des habitants de la ville, dont la répartition entre les différentes zones est provisoirement exogène (elle sera déterminée par la boucle des localisations, qui incorpore la boucle des déplacements). Dans notre exemple, nous allons partir des valeurs d'équilibre, qui sont

**Population de chaque zone de la ville (nombre d'habitants)**

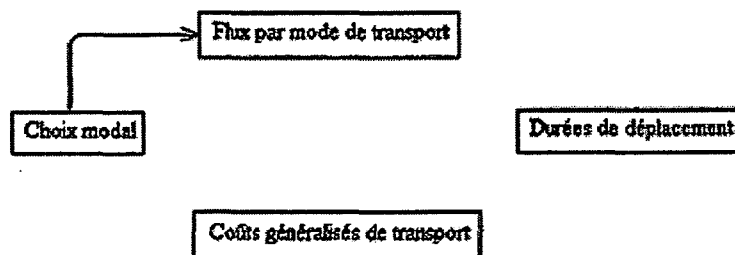
|                          |       |
|--------------------------|-------|
| Population au centre     | 27142 |
| Population en banlieue   | 35538 |
| Population en périphérie | 26368 |

Parce que nous avons fait l'hypothèse que tous les habitants de la ville se déplacent vers le centre, et que les habitants de ce dernier ne se déplaçaient pas, les choix de déplacement se

réduisent au choix entre périphérie et transports en commun. Ces derniers sont caractérisés dans le modèle par deux paramètres, les proportions respectives d'utilisateurs des transports en commun dans chacune des deux couronnes que sont la banlieue et la périphérie. La simulation de la boucle des déplacements est fondée sur le fait que, une fois connue la répartition des habitants dans la ville, ces deux paramètres suffisent à faire fonctionner la boucle. Les valeurs d'équilibre dans le scénario de base, dont nous allons partir pour en illustrer le fonctionnement, sont les suivantes :

**Proportions d'utilisateurs des transports en commun (pourcentages)**

|                                            |       |
|--------------------------------------------|-------|
| Proportion d'utilisateurs TC en banlieue   | 20,5% |
| Proportion d'utilisateurs TC en périphérie | 9,7%  |



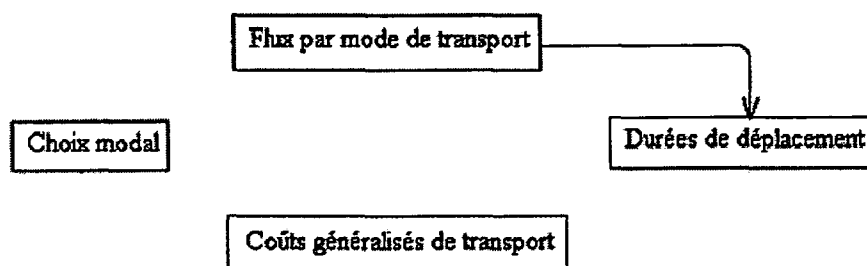
Nous allons maintenant parcourir les étapes successives de la boucle. Nous allons d'abord passer du choix modal au flux de transport, en parcourant la flèche de la figure ci-dessous.

Cette étape est simple. On applique les proportions d'utilisateurs des transports en commun aux populations respectives de la banlieue et de la périphérie pour répartir ces dernières entre les deux modes de transport et on cumule les utilisateurs de la banlieue et de la périphérie pour un même mode de transport, afin de connaître le nombre d'utilisateurs de ce mode qui passent par la banlieue (qui en partent ou y transitent) et qui arrivent au centre. On aboutit au résultat suivant :

**Nombre d'utilisateurs selon le mode de transport et la zone de la ville**

|                                        |       |
|----------------------------------------|-------|
| Nombre d'utilisateurs TC en banlieue   | 7271  |
| Nombre d'utilisateurs VP en banlieue   | 28267 |
| Nombre d'utilisateurs TC en périphérie | 2562  |
| Nombre d'utilisateurs VP en périphérie | 23806 |
| Flux total TC                          | 9833  |
| Flux total VP                          | 52073 |

On passe alors à la deuxième étape de la boucle, le passage des flux par mode de transport aux durées de déplacement, illustrée par la deuxième flèche :

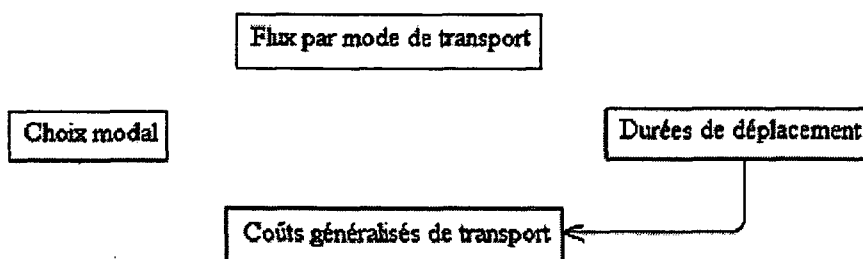


Les flux calculés à l'étape précédente sont utilisés conjointement avec les superficies et les fonctions de congestion pour calculer les durées de déplacement par chacun des deux modes de transport et à partir de chacune des deux origines que sont la banlieue et la périphérie. On trouve les résultats suivants<sup>6</sup> :

**Durées de déplacement par mode et par zone (minutes)**

|                                                   |           |
|---------------------------------------------------|-----------|
| Durée de déplacement TC à partir de la banlieue   | 12,28 min |
| Durée de déplacement VP à partir de la banlieue   | 10,10 min |
| Durée de déplacement TC à partir de la périphérie | 17,91 min |
| Durée de déplacement VP à partir de la périphérie | 13,45 min |

On peut alors passer à la troisième étape de la boucle, le passage des durées de déplacement aux coûts totaux de déplacement,



Pour ce faire, on cumule pour chaque mode de transport les coûts monétaires et le coût de la durée de déplacement, ce dernier étant calculé en multipliant la durée par le paramètre de valeur du temps<sup>7</sup>. Puis on applique la formule spécifique au modèle logit (modèle utilisé ensuite pour modéliser le choix de transport) pour agréger les coûts TC et VP et calculer un coût global pour chacune des deux zones<sup>8</sup>. Le résultat obtenu est le suivant :

**Coûts totaux de déplacement (minutes)**

|                                                    |          |
|----------------------------------------------------|----------|
| Coût de transport TC à partir de la banlieue       | 5,935 K€ |
| Coût de transport VP à partir de la banlieue       | 6,031 K€ |
| Coût de transport TC à partir de la périphérie     | 8,375 K€ |
| Coût de transport VP à partir de la périphérie     | 8,035 K€ |
| Coût de transport global à partir de la banlieue   | 6,574 K€ |
| Coût de transport global à partir de la périphérie | 8,951 K€ |

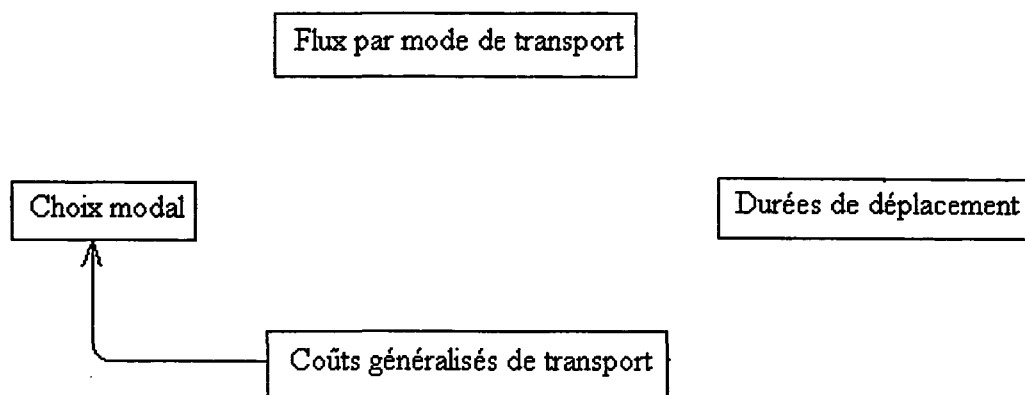
Il nous reste à parcourir la dernière étape de la boucle, celle qui part des coûts de transport pour revenir au point de départ, c'est à dire les parts modales des transports en commun dans chacune des deux couronnes, la banlieue et la périphérie.

<sup>6</sup> Les décimales correspondent à des fractions de minutes et non à des secondes

<sup>7</sup> Plus précisément, les formules utilisées pour ce calcul sont les suivantes :

|                                                                                                                                                                                                          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\text{Coût total du déplacement} = \text{Coût monétaire du déplacement} + \text{Coût de la durée de déplacement}$ $\text{Coût de la durée de déplacement} = \text{durée} \times \text{valeur du temps}$ |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

<sup>8</sup> Ce coût global peut être supérieur aux coûts de chacun des deux modes de transport calculés séparément, ce qui est le cas ici. En effet, le calcul des coûts séparés n'intègre pas la forte préférence pour la voiture incorporée dans le paramètre  $\zeta$  (voir page 24). Le calcul du coût de transport global intègre cette préférence en tenant compte du fait que faire une partie de ses déplacements par les transports en commun conduit à utiliser un mode de transport pour lequel la préférence est plus faible.



Dans chacune des deux zones, les coûts généralisés de transport pour chacun des deux modes de transport sont l'ingrédient de base du choix modal. Ce dernier est une fonction logistique de l'écart de coût, la part modale des transports en commun étant d'autant plus élevée que le différentiel de coût leur est favorable. Parce que nous sommes partis des parts modales d'équilibre, nous les retrouvons à la fin du calcul.

|                                       |       |
|---------------------------------------|-------|
| Proportion d'usagers TC en banlieue   | 20,5% |
| Proportion d'usagers TC en périphérie | 9,7%  |

### 5.3.2 Les boucles des localisations et de la pollution

Nous allons maintenant passer au niveau supérieur, en analysant le fonctionnement des boucles des localisations et de la pollution. En travaillant sur la boucle des déplacements, nous avons considéré comme donnée la répartition des ménages dans l'espace urbain, Celle-ci devient maintenant endogène. Plus précisément, pour effectuer les simulations, nous avons besoin de quatre variables de bouclage, les populations en banlieue et en périphérie, dont les valeurs d'équilibre sont

#### *Populations d'équilibre en banlieue et en périphérie*

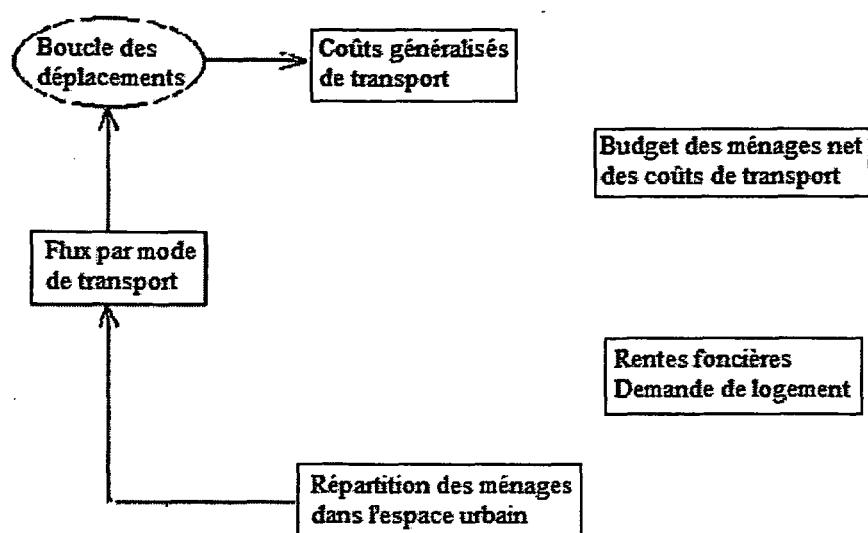
|                          |       |
|--------------------------|-------|
| Population en banlieue   | 35538 |
| Population en périphérie | 26368 |

et les parts modales des transports en commun pour chacune de ces deux populations, dont les valeurs d'équilibre sont

#### *Proportions d'usagers des transports en commun à l'équilibre*

|                                       |       |
|---------------------------------------|-------|
| Proportion d'usagers TC en banlieue   | 20,5% |
| Proportion d'usagers TC en périphérie | 9,7%  |

Notre point de départ est donc la partie la plus basse de la boucle des localisations, telle que nous l'avons présentée plus haut. La première étape consiste à parcourir la partie gauche de la boucle des déplacements, représentée sur la figure ci-dessous, pour déterminer les valeurs d'équilibre du choix modal et en déduire les trois ingrédients qui sont essentiels pour la suite, les flux pour chacun des deux modes de transport, les durées et les coûts généralisés de transport.



On a vu plus haut que, à l'équilibre de la boucle des déplacements, les flux par mode de transport étaient

***Flux de déplacement par mode de transport et par zone***

|                                        |       |
|----------------------------------------|-------|
| Nombre d'utilisateurs TC en banlieue   | 7271  |
| Nombre d'utilisateurs VP en banlieue   | 28267 |
| Nombre d'utilisateurs TC en périphérie | 2562  |
| Nombre d'utilisateurs VP en périphérie | 23806 |
| Flux total TC                          | 9833  |
| Flux total VP                          | 52073 |

Tandis que les durées sont égales à

***Durées de déplacement par mode et par zone (minutes)***

|                                                   |           |
|---------------------------------------------------|-----------|
| Durée de déplacement TC à partir de la banlieue   | 12,28 min |
| Durée de déplacement VP à partir de la banlieue   | 10,10 min |
| Durée de déplacement TC à partir de la périphérie | 17,91 min |
| Durée de déplacement VP à partir de la périphérie | 13,45 min |

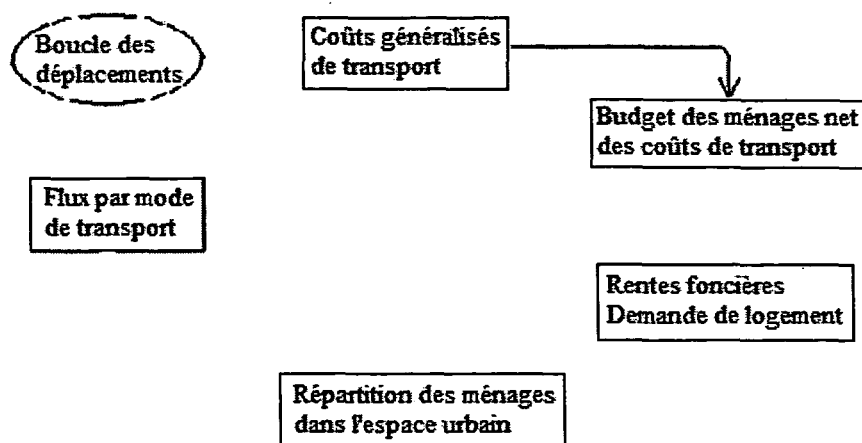
Et que les coûts généralisés de transports sont égaux à

***Coûts généralisés de transport***

|                                                   |          |
|---------------------------------------------------|----------|
| Coût de transport moyen à partir de la banlieue   | 6,574 K€ |
| Coût de transport moyen à partir de la périphérie | 8,951 K€ |

Il nous reste à utiliser ces ingrédients pour déterminer la demande de logement des ménages et, à partir de là, leur répartition dans l'espace urbain. Rappelons que cette demande de logement est fonction des ressources nettes des coûts de transport et du niveau d'utilité de référence dans la ville.

La détermination des ressources nettes des coûts de transport nous fait parcourir l'étape suivante dans la boucle des localisations.



Cette étape est simple. Nous connaissons le budget global des ménages, égal à 30 K€ par an. En soustrayant de ce budget les coûts généralisés de transport, on obtient le budget net de ces coûts, soit

***Budget net des coûts de transport, par zone***

|                                                 |           |
|-------------------------------------------------|-----------|
| Budget net des coûts de transport en banlieue   | 23,426 K€ |
| Budget net des coûts de transport en périphérie | 21,049 K€ |

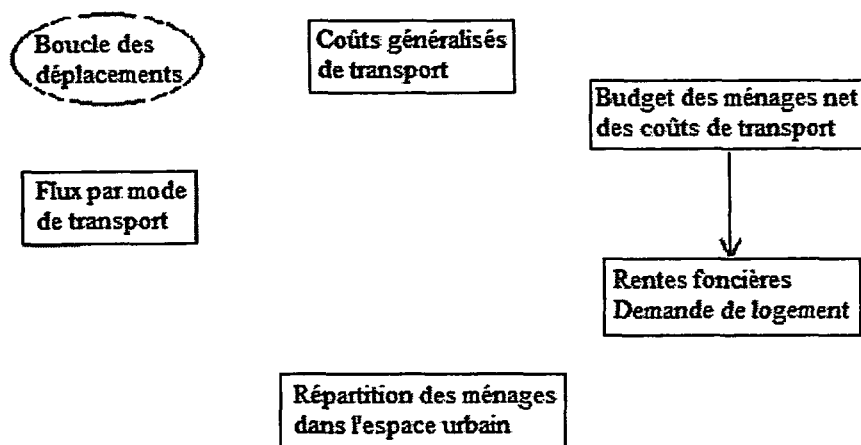
Quant à la détermination du niveau d'utilité de référence dans la ville, elle tient compte du fait que ses habitants doivent recevoir une compensation pour la pollution qu'ils y subissent. Dans le modèle, nous avons convenu que seuls les véhicules particuliers étaient générateurs de pollution et que celle-ci était proportionnelle à la durée totale passée dans ce mode de transport par l'ensemble des habitants. En partant des durées individuelles de transport, cette durée totale est égale à

$$E = 605861$$

Pour compenser cette pollution, il faut augmenter le niveau d'utilité de référence dans la ville par rapport à l'extérieur. Nous avons fixé le niveau d'utilité à l'extérieur à  $u = 5,0$ . En y ajoutant la compensation, calculée avec la fonction de coût de la pollution, on obtient

$$v = 5,97$$

Nous disposons maintenant des éléments nécessaires pour passer à l'étape suivante, le calcul des enchères des ménages et de leur demande de logement, qui correspond à la partie ci-dessous de la boucle :



Pour le calcul des enchères des ménages, qui déterminent les prix qu'ils paieront pour se loger, nous utilisons les fonctions d'enchères issues de la fonction d'utilité de Cobb-Douglas, et nous obtenons :

**Prix du logement, par zone**

|                                |                 |
|--------------------------------|-----------------|
| Enchère (= prix) au centre     | 636,151 K€ / ha |
| Enchère (= prix) en banlieue   | 236,508 K€ / ha |
| Enchère (= prix) en périphérie | 154,174 K€ / ha |

En utilisant de même les fonctions de demande de logement, les superficies occupées par chaque ménage sont

**Superficie des logements, par zone**

|                                      |           |
|--------------------------------------|-----------|
| Superficie de logement au centre     | 0,0118 ha |
| Superficie de logement en banlieue   | 0,0247 ha |
| Superficie de logement en périphérie | 0,0341 ha |

En divisant les superficies disponibles pour le logement dans chaque zone par la demande individuelle des ménages, on retrouve les populations dont nous étions partis :

**Population de chaque zone**

|                          |       |
|--------------------------|-------|
| Population au centre     | 27142 |
| Population en banlieue   | 35538 |
| Population en périphérie | 26368 |

Le modèle proprement dit est bouclé. Il reste à calculer les derniers résultats, c'est à dire les mesures de bien être que sont la rente foncière totale, la rente foncière différentielle et le surplus global. La première est la recette des propriétaires, issue de la fourniture de logements aux ménages. La seconde s'obtient à partir de la première en la diminuant des coûts d'aménagement propres au logement. Enfin, la troisième s'obtient à partir de la seconde en lui ajoutant les recettes fiscales<sup>9</sup> diminuées des coûts d'aménagement des infrastructures. On aboutit à

**Rentes foncières et surplus monétaire**

|                      |           |
|----------------------|-----------|
| Rente totale         | 550452 K€ |
| Rente différentielle | 340452 K€ |
| Surplus              | 304602 K€ |

On trouvera en deuxième partie de l'annexe 2 le texte du module permettant de résoudre les équations d'équilibre du modèle. Comme signalé plus haut, on a construit ce module autour du nombre le plus réduit possible de variables de bouclage, à savoir quatre : les populations de la première et de la deuxième couronne et la part des transports collectifs pour chacune des deux populations.

La chaîne des calculs présentée plus haut permet d'écrire l'ensemble des équations du modèle en fonction de ces quatre variables, y compris les choix modaux des habitants et leur demande de logement. Ce sont ces deux équations, pour chacune des deux zones périphériques, qui composent le système de quatre équations à quatre inconnues que la procédure résout. Comme on peut le constater avec les résultats des calculs ci-dessous, il

<sup>9</sup> On notera que, dans le scénario de référence présenté ici, les ménages n'étant pas imposés, ces recettes sont nulles.

s'agit d'équations non linéaires de structure suffisamment complexe pour qu'une simulation soit indispensable...

### **5.3.3 Quelques commentaires sur les résultats du scénario d'équilibre.**

Nous allons maintenant revenir sur les principaux résultats du scénario d'équilibre. Quand ce dernier est réalisé, la population de la ville dans chacune de ses trois zones est la suivante :

#### ***Population d'équilibre de chaque zone***

|                          |       |
|--------------------------|-------|
| Population au centre     | 27142 |
| Population en banlieue   | 35538 |
| Population en périphérie | 26368 |

Ce qui fait un total de 89 048. Rappelons que tous nos choix de paramètres ont été faits en référence à des ménages plutôt qu'à des individus, dans la mesure où ce sont ces ménages qui occupent l'unité d'habitat de base que sont les logements. On aurait donc 89 048 ménages, qui correspondrait approximativement à une ville d'un peu moins de 180 000 habitants.

Ces ménages occupent des superficies qui, calculées en m<sup>2</sup> plutôt qu'en hectares pour plus de lisibilité, sont de

#### ***Superficie des logements à l'équilibre, par zone***

|                                      |                    |
|--------------------------------------|--------------------|
| Superficie de logement au centre     | 118 m <sup>2</sup> |
| Superficie de logement en banlieue   | 247 m <sup>2</sup> |
| Superficie de logement en périphérie | 341 m <sup>2</sup> |

La superficie d'un peu moins de 120 m<sup>2</sup> au centre est un peu supérieure à ce qu'occupe une famille dans une grande ville (hors Paris). A l'opposé, même si on fait une compensation pour tenir compte du fait que la superficie de jardin, pour utile qu'elle soit, n'est pas équivalente à la même superficie intra-muros, les 341 m<sup>2</sup> en périphérie sont sans doute un peu en dessous de la réalité. On ne peut cependant faire mieux en conservant la fonction d'utilité de Cobb-Douglas qui a l'avantage de la simplicité. Celle-ci se caractérise par une élasticité de substitution fixe, égale à l'unité. Pour avoir une variabilité plus forte des superficies occupées quand on passe du centre à la périphérie (des superficies un peu plus faible au centre, un peu plus grandes en périphérie), il faudrait que les ménages réagissent plus aux différences de prix, ce qui exige une élasticité de substitution supérieure à l'unité, et donc une autre fonction d'utilité. Nous avons préféré conserver la Cobb-Douglas, l'approximation nous paraissant de qualité suffisante pour privilégier la simplicité des calculs et de l'interprétation des résultats inhérents à cette fonction d'utilité.

Pour occuper ces logements, les ménages payent un prix qui, calculé en euros au m<sup>2</sup>, est égal dans chacune des trois zones à

#### ***Prix au m<sup>2</sup> des logements à l'équilibre, par zone***

|                    |        |
|--------------------|--------|
| Prix au centre     | 63,6 € |
| Prix en banlieue   | 23,6 € |
| Prix en périphérie | 15,4 € |

Rappelons qu'il s'agit d'un budget annuel. En conséquence, les 63,6 € s'interprètent comme le base de calcul au m<sup>2</sup> du loyer annuel d'un logement au centre, qui pour 100 m<sup>2</sup> coûterait donc 6360 euros par an, soient 530 euros par mois, une valeur proche de celles qu'on rencontre habituellement dans les grandes villes hors Paris. Quant au budget qui en résulte, il est sans surprise puisque, par construction, il est égal au quart des revenus disponibles hors

coûts de transport. On trouvera sans doute très importante la différence entre les prix au centre et en périphérie, qui sont dans un rapport de un à quatre. Il faut cependant tenir compte du fait qu'il s'agit ici de la superficie totale occupée par chaque ménage, y compris un éventuel jardin, en particulier en périphérie. On compare donc ici des prix au mètre carré sans jardin (ou très peu) au centre avec des prix au mètre carré, jardin compris, à la périphérie, ce qui peut expliquer pour une bonne part la différence.

Les habitants se déplacent massivement en voiture :

***Proportions d'usagers des transports en commun à l'équilibre, par zone***

|                                       |       |
|---------------------------------------|-------|
| Proportion d'usagers TC en banlieue   | 20,5% |
| Proportion d'usagers TC en périphérie | 9,7%  |

Ces parts modales des transports en commun correspondent à peu de choses près à celles qu'on peut calculer sur des sources statistiques comme l'enquête transport, dont nous nous sommes ici inspirés.

Les durées de déplacement vers le centre sont les suivantes :

***Durées de déplacement à l'équilibre, par mode de transport et par zone***

|                                                   |           |
|---------------------------------------------------|-----------|
| Durée de déplacement TC à partir de la banlieue   | 12,28 min |
| Durée de déplacement VP à partir de la banlieue   | 10,10 min |
| Durée de déplacement TC à partir de la périphérie | 17,91 min |
| Durée de déplacement VP à partir de la périphérie | 13,45 min |

Elles sont, comme il était prévisible, nettement supérieures aux durées minimales en l'absence de congestion qui, rappelons le, allaient de 5 minutes en voiture en partant de la banlieue à 12 minutes par les transports en commun à partir de la périphérie. Les vitesses correspondantes sont d'une quinzaine de kilomètres heure pour la voiture, d'une dizaine de kilomètres heure pour les transports en commun.

Les coûts totaux de déplacement, calculés pour chaque mode en faisant la somme des coûts monétaires et de la valeur du temps de déplacement, sont

***Coûts totaux de déplacement à l'équilibre, par mode de transport et par zone***

|                                                |          |
|------------------------------------------------|----------|
| Coût de transport TC à partir de la banlieue   | 5,935 K€ |
| Coût de transport VP à partir de la banlieue   | 6,031 K€ |
| Coût de transport TC à partir de la périphérie | 8,375 K€ |
| Coût de transport VP à partir de la périphérie | 8,035 K€ |

L'avantage monétaire des transports en commun est contrebalancé par le désavantage qui est la conséquence des durées de déplacement plus élevées. Pour la banlieue, les transports en commun conservent un très léger avantage global. Par contre, en périphérie, le coût total de la voiture particulière est un peu plus faible que celui de la voiture particulière.

Les coûts globaux de déplacement qui résultent de la combinaison de ces coûts totaux et de l'arbitrage des consommateurs sont les suivants :

***Coûts de transport globaux à l'équilibre, par zone***

|                                                    |          |
|----------------------------------------------------|----------|
| Coût de transport global à partir de la banlieue   | 6,574 K€ |
| Coût de transport global à partir de la périphérie | 8,951 K€ |

Rappelons que le budget total des ménages est de 30 K€ par an. Les coûts de transport absorbent donc 22% de ce budget pour un habitant de la banlieue, près de 30% pour un habitant de la périphérie. Ces chiffres sont beaucoup moins élevés qu'il y paraît au premier

abord quand on les compare aux données des enquêtes. En effet, les coûts ci-dessus incorporent à la fois les coûts monétaires, mesurés dans les enquêtes, et les coûts du temps, qui ne le sont pas. Les seuls coûts monétaires sont nettement plus faibles.

Enfin, les derniers résultats de notre scénario de référence sont les mesures de bien-être, que nous rappelons ci-dessous :

***Rentes et surplus à l'équilibre***

|                      |           |
|----------------------|-----------|
| Rente totale         | 550452 K€ |
| Rente différentielle | 340452 K€ |
| Surplus              | 304602 K€ |

Aucune agglomération n'ayant fait jusqu'à présent l'objet d'une véritable comptabilité qui nous permettrait de disposer de points de repères, nous ne pouvons pas nous prononcer sur le caractère vraisemblable ou non de ces chiffres.

## 6 LE CALCUL DES EFFETS MARGINAUX

A la détermination de l'équilibre s'ajoute le calcul des effets marginaux. L'utilité de ce calcul tient au fait que ces effets intègrent les conséquences du bouclage. Ainsi, l'effet d'une augmentation des coûts de transport passe également par la réaction des usagers aux modifications de trafics induites par cette variation et par les modifications de localisation auxquelles conduisent les variations de coût de transport généralisé.

On trouvera en annexe 3 le module qui effectue ces calculs. A titre d'exemple, les tableaux suivants reprennent les résultats du calcul des effets marginaux des coûts monétaires et des superficies aménagées. Nous avons choisi ces deux variables parce qu'il s'agit des instruments à la disposition du planificateur. Ceci est trivial pour ce qui est des superficies aménagées. C'est tout aussi vrai pour les coûts monétaires. En effet, en choisissant le niveau des taxes ou des péages qu'il prélève sur les usagers des modes de transport, le planificateur détermine les coûts monétaires auxquels sont confrontés ces usagers. Toute augmentation du niveau des taxes ou péages se traduit par une augmentation de même montant des coûts monétaires. En conséquence, l'effet marginal d'une augmentation des coûts monétaires peut être vu comme l'effet marginal d'une augmentation des taxes.

### *Effets marginaux des coûts monétaires sur le volume des déplacements*

| Volume des déplacements | Coût TC banlieue | Coût TC périphérie | Coût voiture banlieue | Coût voiture périphérie |
|-------------------------|------------------|--------------------|-----------------------|-------------------------|
| TC banlieue             | -4860            | 1224               | 4860                  | -1224                   |
| TC périphérie           | -1084            | -2308              | 1084                  | 2308                    |
| Voiture banlieue        | 4860             | -1224              | -4860                 | 1224                    |
| Voiture périphérie      | 1084             | 2308               | -1084                 | -2308                   |

Une augmentation marginale des coûts de transport en banlieue a un net effet de report modal dans les deux zones de la couronne. En effet, cette augmentation affecte à la fois les habitants de la banlieue, qui en partent, et les habitants de la périphérie, qui y passent pour se rendre au centre. Les uns comme les autres utilisent moins le mode de transport dont les coûts monétaires augmentent pour se reporter vers le mode dont les coûts monétaires restent stables. Ce report modal est cependant plus faible pour les habitants de la périphérie que pour ceux de la banlieue. Ceci tient sans doute au fait que la diminution du trafic du mode dont les coûts monétaires augmentent entraîne une baisse de la congestion et que cette baisse est plus sensible pour les habitants de la périphérie (dont le trajet est plus long) que pour ceux de la banlieue.

Par contre, une augmentation des coûts de transport en périphérie a des effets opposés dans les deux zones de la couronne. En périphérie, on observe bien un effet de report modal. L'augmentation du coût d'un des moyens de transport pousse les habitants de la périphérie à se reporter vers l'autre mode de transport, la variation de la congestion ne suffisant pas à contrebalancer l'effet initial. Mais les reports se font en sens opposé en banlieue. En effet, les habitants de cette zone ne sont pas affectés par l'augmentation des coûts monétaires. Par contre, ils sont sensibles à la variation de la congestion. Or, du fait des reports des habitants de la périphérie, celle-ci diminue sur le mode de transport où les coûts monétaires sont devenus plus élevés pour augmenter sur l'autre. De ce fait, les habitants de la banlieue se comportent en sens inverse des habitants de la périphérie. On notera cependant que le report des premiers étant plus important que celui des seconds, l'effet net est bien un transfert du mode affecté par une augmentation des coûts de transport vers celui qui ne l'est pas.

### ***Effets marginaux des superficies aménagées sur le volume des déplacements***

| Volume des déplacements | Surface TC banlieue | Surface TC périphérie | Surface voiture banlieue | Surface voiture périphérie | Disponibilité garages centre |
|-------------------------|---------------------|-----------------------|--------------------------|----------------------------|------------------------------|
| TC banlieue             | 51,00               | -7,17                 | -5,82                    | 1,31                       | -78,71                       |
| TC périphérie           | 11,38               | 13,52                 | -1,30                    | -2,47                      | -17,56                       |
| Voiture banlieue        | -51,00              | 7,17                  | 5,82                     | -1,31                      | 78,71                        |
| Voiture périphérie      | -11,38              | -13,52                | 1,30                     | 2,47                       | 17,56                        |

On se trouve dans une situation similaire à la précédente. Une modification des superficies aménagées pour les transports a des effets différents suivant qu'elle affecte le centre, la banlieue ou la périphérie. Dans le premier cas, une augmentation de la disponibilité de places de stationnement se traduit, de manière prévisible, par un fort effet de report modal des transports en commun vers la voiture, pour laquelle la congestion liée au stationnement a diminué, et ce pour les habitants de la banlieue comme pour ceux de la périphérie. Le report de ces derniers est cependant plus faibles parce qu'ils sont plus affectés par les variations en sens opposé de la congestion pendant les déplacements.

Comme pour les coûts monétaires, une modification des superficies aménagées pour les transports en banlieue affecte tous les habitants de la périphérie, qu'ils partent de la banlieue ou qu'ils transitent par cette dernière pour aller au centre. Alors qu'une modification de ces mêmes superficies en périphérie n'a pas d'effets directs sur les habitants de la banlieue, qui ne les utilisent pas. Seuls subsistent les effets indirects induits par une variation de la congestion, effets qui vont en sens opposé de l'impact initial de la variation de superficie. On constatera donc sans étonnement que, les habitants des deux couronnes réagissent dans le même sens à une modification des superficies aménagées en banlieue, en se reportant du mode qui n'a pas bénéficié d'aménagements vers celui qui en a bénéficié ; alors qu'ils réagissent en sens opposé quand l'aménagement se produit en périphérie, les habitants de cette dernière continuant à se reporter vers le mode de transport ayant bénéficié d'aménagements alors que les habitants de la banlieue font l'inverse.

### ***Effets marginaux des coûts monétaires sur les durées de déplacement***

| Durées de déplacement | Coût TC banlieue | Coût TC périphérie | Coût voiture banlieue | Coût voiture périphérie |
|-----------------------|------------------|--------------------|-----------------------|-------------------------|
| TC banlieue           | 0,56             | -0,08              | 0,44                  | 0,08                    |
| TC périphérie         | 0,38             | 0,55               | 0,62                  | 0,45                    |
| Voiture banlieue      | 0,14             | 0,02               | 0,86                  | -0,02                   |
| Voiture périphérie    | 0,15             | 0,05               | 0,85                  | 0,95                    |

Ces effets sont loin d'être intuitifs. Rappelons tout d'abord que, les usagers de la banlieue comme de la périphérie se déplaçant systématiquement vers le centre, le volume global des déplacements, qui détermine la congestion, et donc les durées de déplacement, n'est pas directement influencé par les tarifs. Par contre, deux phénomènes ont des effets indirects. Il s'agit du report modal et des changements de localisation. Le report modal d'un mode de transport à l'autre, examiné plus haut avec les variations de trafic, se traduit par des variations en sens opposé de la congestion. Le changement de localisation, que nous verrons plus loin, se traduit par une augmentation de la congestion globale quand il se fait vers la périphérie, de la seule congestion en banlieue quand il se fait vers la banlieue. Ces deux effets indirects ne vont pas nécessairement dans le même sens, d'où la difficulté d'avoir des a-priori sur les signes des effets ci-dessus.

### ***Effets marginaux des superficies aménagées sur les durées de déplacement***

| Durées de déplacement | Surface TC banlieue | Surface TC périphérie | Surface voiture banlieue | Surface voiture périphérie | Disponibilité garages centre |
|-----------------------|---------------------|-----------------------|--------------------------|----------------------------|------------------------------|
| TC banlieue           | -0,00583            | 0,00047               | -0,00053                 | -0,00009                   | -0,00719                     |
| TC périphérie         | -0,00401            | -0,00322              | -0,00074                 | -0,00048                   | -0,01000                     |
| Voiture banlieue      | -0,00143            | -0,00015              | -0,00103                 | 0,00003                    | -0,01400                     |
| Voiture périphérie    | -0,00155            | -0,00030              | -0,00102                 | -0,00102                   | -0,01380                     |

Une augmentation des superficies aménagées a presque systématiquement pour effet de diminuer les durées de déplacement, quel que soit le mode de transport, voiture ou transports en commun et quelle que soit la zone de départ, banlieue ou périphérie. C'est logique quand l'aménagement est fait au centre (les garages) ou en banlieue. Le mode de transport dont la capacité augmente voit sa congestion diminuer, les reports modaux atténuant l'effet direct sans le faire changer de signe. Ces mêmes reports modaux entraînent une baisse de la congestion pour le mode de transport non aménagé et donc une diminution des durées de déplacement.

C'est plus ambigu quand l'aménagement est fait en périphérie et cette ambiguïté explique précisément les deux seuls effets positifs observés dans ce tableau, à savoir l'effet d'une augmentation de la superficie consacrée en périphérie à un mode de transport sur les durées de déplacements des habitants de la banlieue utilisant ce même mode de transport. En effet, en augmentant l'infrastructure consacrée à un mode de transport en périphérie, on y attire des usagers de la périphérie. Si l'augmentation de la congestion qui en résulte ne fait que contrebalancer en périphérie l'amélioration de l'infrastructure, elle affecte les habitants de la banlieue qui ne bénéficient pas de cette augmentation et allonge leur durée de déplacement.

### ***Effets marginaux des coûts monétaires sur les populations de la couronne***

| Population | Coût TC banlieue | Coût TC périphérie | Coût voiture banlieue | Coût voiture périphérie |
|------------|------------------|--------------------|-----------------------|-------------------------|
| Banlieue   | -2903            | 309                | 689                   | 884                     |
| Périphérie | -1789            | -1751              | -104                  | -966                    |

Toute augmentation des coûts monétaires de transport, quelle qu'en soit la nature, se traduit par une baisse du nombre d'habitants de la périphérie. C'est logique. Où qu'elle se produise, une augmentation des coûts de transport affecte toujours les habitants de la périphérie, car ils en partent et transitent par la banlieue. Sachant que le niveau d'utilité qu'ils atteignent dans la ville est fixé de l'extérieur, ils réagissent à l'augmentation des coûts de transport en faisant diminuer leur enchère pour l'occupation de logement. Mais cette diminution de l'enchère induit un effet de substitution le long de la courbe d'indifférence, la consommation de logement augmentant suite à la diminution de son prix. D'où la diminution de la population.

En banlieue la situation est différente. Seule une augmentation des coûts monétaires des transports en commun en banlieue fait diminuer la population de la banlieue. Les trois autres coûts monétaires ont des effets légèrement positifs. C'est, comme on l'a déjà souligné plusieurs fois plus haut, qu'une augmentation des coûts monétaires de transport en banlieue a aussi des effets en périphérie, de report modal et de baisse du nombre d'habitants, effets qui sont bénéfiques à la banlieue. Dans trois cas sur quatre, cet effet est suffisant pour effacer la dégradation initiale et renforcer l'attractivité de la banlieue.

On notera que nous n'avons pas fait figurer ici les effets sur la population au centre. C'est que, ne se déplaçant pas, les habitants du centre ne sont pas affectés par la modification

des coûts de transport. En conséquence, l'attractivité du centre n'est pas modifiée et les effets marginaux sont nuls. Cette absence d'effets marginaux est également vraie pour l'augmentation des superficies aménagées que nous allons examiner maintenant.

***Effets marginaux des superficies aménagées sur les populations de la couronne***

| Durées de déplacement | Surface TC banlieue | Surface TC périphérie | Surface voiture banlieue | Surface voiture périphérie | Disponibilité garages centre |
|-----------------------|---------------------|-----------------------|--------------------------|----------------------------|------------------------------|
| Banlieue              | 0,2                 | 7,5                   | -35,1                    | 6,7                        | -66,3                        |
| Périphérie            | 26,1                | -10,9                 | 4,6                      | -21,3                      | -36,5                        |

On a vu plus haut qu'une augmentation des superficies aménagées ne se traduisait pas partout par une diminution des coûts de transport. S'y ajoute la concurrence entre usages du sol : en aménageant un hectare supplémentaire pour les infrastructures de transport, on diminue d'autant les superficies disponibles pour le logement et donc le nombre d'habitants qu'on peut accueillir. C'est cet effet qui est dominant pour les infrastructures de transport voiture et pour les transports en commun en périphérie.

Nous reviendrons dans la section suivante sur l'analyse de ces effets, qui seront analysés plus en détail avec des simulations pour une série de valeurs de chacun des paramètres.

## 7 LES CHOIX OPTIMAUX DE TARIFICATION

Nous allons maintenant nous intéresser à ce qui est notre question centrale : qu'est-ce qui caractérise une politique optimale ? Comment déterminer une tarification de premier rang ? une tarification de second rang portant sur le seul stationnement ? Quelles sont les conséquences d'un changement de tarification, non seulement sur les volumes de trafics et leur répartition modale, mais également sur la structure de la ville ? Quelles liaisons entre politiques tarifaires et politiques d'infrastructures ?

Tant pour pouvoir déterminer les choix optimaux que pour pouvoir analyser les conséquences d'une variation des instruments tarifaires ou d'aménagement utilisés par le planificateur, il est important de pouvoir réaliser des simulations une à une, en les itérant pour une suite de valeurs d'un paramètre, ce qui permet ensuite de tracer les fonctions mettant en évidence la liaison entre les valeurs de ce paramètre et les valeurs prises par les variables endogènes représentant la ville.

En conséquence, nous avons mis au point une procédure itérée de simulation et quelques instruments auxiliaires permettant de l'utiliser de manière relativement confortable. On trouvera en annexe 3 l'ensemble de ces procédures ainsi qu'un exemple d'utilisation.

### 7.1 Les tarifications séparées

Dans la simulation de base utilisée jusqu'à présent, et qui a servi à la présentation du modèle, les coûts subis par les usagers sont égaux aux coûts marginaux directs de la production de transport. Ce qui revient à dire que les déplacements ne sont pas taxés. Nous allons maintenant examiner les effets de la taxation, les usagers payant une taxe qui s'ajoute (ou recevant une subvention qui vient en déduction) aux coûts directs de production proprement dits. Nous allons commencer par examiner l'effet séparé de chacune des taxes possibles : sur le stationnement, sur les déplacements en voiture transitant par la périphérie<sup>10</sup> ; sur les déplacements par les transports en commun transitant par la banlieue, sur ceux qui transitent par la périphérie. Effet séparé signifie qu'une seule taxe est levée, les autres coûts de transport restant inchangés.

#### 7.1.1 Taxation du stationnement

Partant de l'absence de taxe, nous allons commencer par taxer le stationnement.

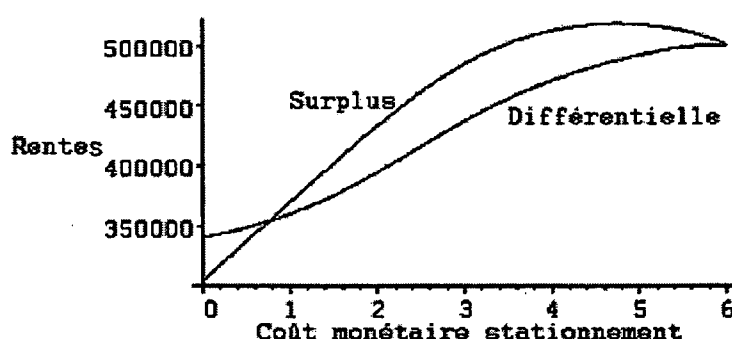
On trouvera figure 71101 les valeurs du surplus et de la rente différentielle en fonction du niveau du coût du stationnement imputé à l'usager. Rappelons que la rente différentielle est égale à la rente totale (c'est à dire la recette totale issue de la location ou de la vente des logements) nette des coûts d'opportunité de la terre. Elle est donc assimilable au bénéfice des propriétaires fonciers. Nous n'avons pas représenté la rente totale car, la quantité de terre affectée au logement étant fixe dans ce scénario, le coût d'opportunité de la terre est fixe. En conséquence, les deux courbes de rente totale et de rente différentielle sont parallèles et une seule courbe suffit donc pour représenter les évolutions. Rappelons d'autre part que le coût marginal du stationnement est nul. En conséquence, le coût imputé à l'usager est entièrement imputable aux taxes perçues par le planificateur.

---

<sup>10</sup> Nous laisserons de côté la tarification des véhicules transitant par la banlieue. En effet, dans ce modèle très simplifié où seules deux zones existent et où les habitants du centre ne se déplacent pas, tous les usagers de la voiture passent par la banlieue et tous stationnent au centre. En conséquence, on peut de manière indifférente les taxer quand ils stationnent ou quand ils transitent par la banlieue. Les deux taxes sont équivalentes.

On peut également constater sur ce graphique que, quoique de manière plus modérée, les coûts globaux de déplacement par les transports en commun augmentent, alors qu'ils ne sont pas affectés par le changement de tarification. Le surplus commence par augmenter pour atteindre son maximum pour un coût, et donc une taxe, dont le montant est égal à 4,75. La rente différentielle continue à croître. Or, la différence entre surplus et rente différentielle provient des recettes de la taxation. En conséquence, on peut penser que le surplus atteint son maximum parce que la baisse des recettes de la taxation du stationnement, conséquence de la raréfaction des automobilistes (la hausse des coûts voitures induisant des reports vers les transports en commun), contrebalance la hausse de la rente différentielle. Celle-ci est pour l'essentiel la conséquence de la diminution de la pollution, qui renforce l'attractivité de la ville vis-à-vis de l'extérieur, permettant ainsi aux propriétaires fonciers d'augmenter fortement leurs prix au centre ville.

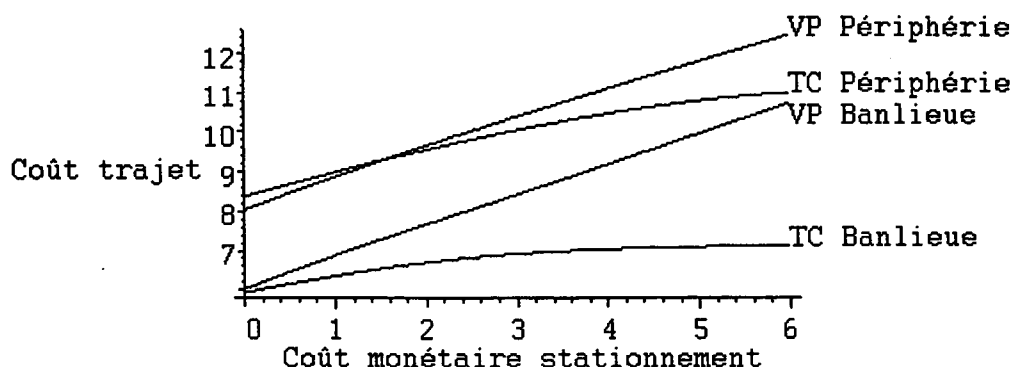
**Figure 71101 : Effet de la taxation du stationnement sur les rentes et le surplus**



Coût monétaire de stationnement en K€/an  
Rente différentielle et surplus en K€/an

Nous allons maintenant voir de manière plus précise d'où vient la contribution de la taxation à la formation du surplus. En taxant le stationnement, le planificateur local renchérit le coût de la voiture pour tous les usagers de celle-ci. Le résultat final n'est cependant pas une hausse des coûts de transport voiture de même niveau, comme on peut le voir sur le graphique 71102 qui présente l'évolution des coûts globaux de transport pour les deux modes et pour les habitants de la banlieue et de la périphérie..

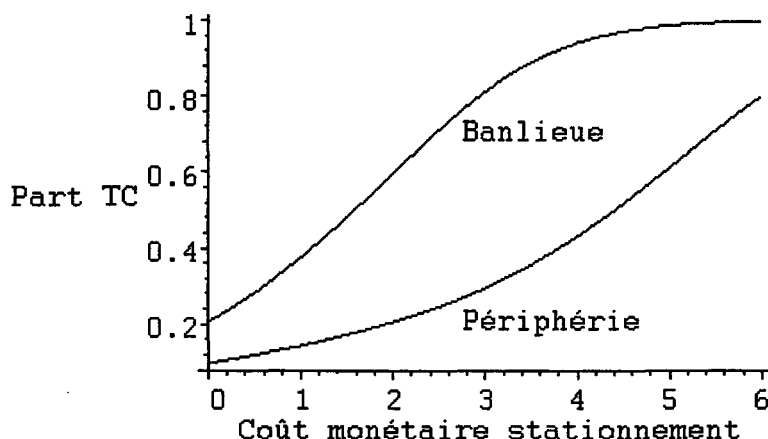
**Figure 71102 : Effet de la taxation du stationnement sur les coûts de transport par mode**



Coût monétaire de stationnement en K€/an  
Coût du trajet en K€/an

Ces différences entre évolutions des tarifs et évolutions des coûts globaux de transport sont la conséquence des reports d'une partie des usagers vers les transports en commun et des modifications de la congestion qui en résultent. Le graphique de la figure 71103 montre en effet que la hausse plus importante de coûts globaux de transport en voiture induit un report massif des usagers vers les transports en commun. Au voisinage de l'optimum, ces derniers sont quasiment hégémoniques en banlieue, nettement dominants en périphérie.

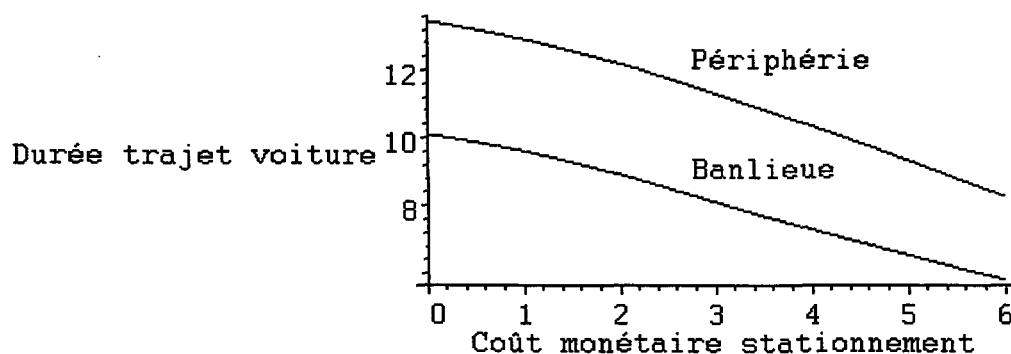
**Figure 71103 : Effet de la taxation du stationnement sur le pourcentage d'usagers des transports en commun**



Coût monétaire de stationnement en K€/an  
Part des TC : de 0 à 1 (0,2 = 20%, 0,8 = 80%,...)

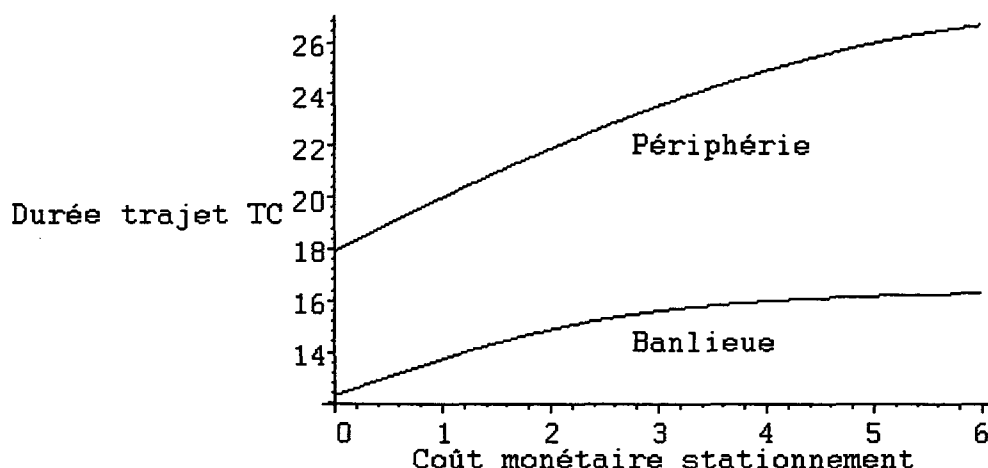
L'effet immédiat de ce report modal est évidemment de modifier les niveaux de congestion. La faiblesse du nombre d'usagers de la voiture fait quasiment disparaître la congestion routière et les durées de déplacement par ce mode de transport sont proches du minimum. A l'opposé, en se reportant massivement vers les transport en commun, les usagers des deux zones y augmentent fortement la congestion et les durées de déplacement. C'est ce qu'on retrouve sur les figures 71104 et 71105.

**Figure 71104 : Effet de la taxation du stationnement sur les durées de déplacement en voiture.**



Coût monétaire de stationnement en K€/an  
Durée de trajet en minutes

**Figure 71105 : Effet de la taxation du stationnement sur les durées de déplacement par les transports en commun.**

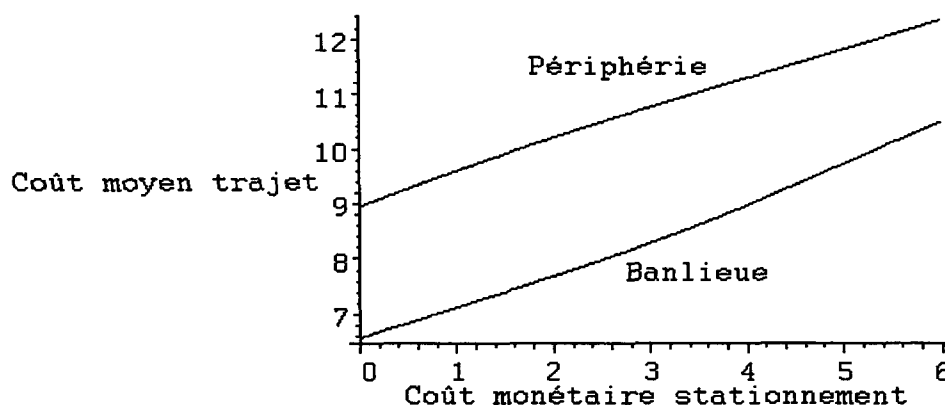


Coût monétaire de stationnement en K€/an

Durée de trajet en minutes

Ce sont ces évolutions des durées de déplacement qui, intégrées aux coûts globaux de transports en utilisant la valeur du temps, expliquent les observations faites plus haut sur la figure 71102. Bien que non affectés par la taxation, les transports en commun voient leur coût augmenter en raison de l'augmentation des durées de déplacement induite par une congestion plus élevée, conséquence du report des usagers suite au renchérissement des coûts de la voiture. Bien qu'affectés directement par la taxation, les usagers de la voiture particulière ne voient pas leur coût global de transport augmenter autant que cette dernière car ils bénéficient du raccourcissement des durées de déplacement, grâce à la faiblesse de la congestion dans un réseau routier que beaucoup d'usagers ont quitté. Comme les coûts de déplacement ont augmenté pour la voiture comme pour les transports en commun, on ne sera pas surpris qu'il en soit de même des coûts moyens (figure 71106)

**Figure 71106 : Effet de la taxation du stationnement sur les coûts moyens de déplacement.**

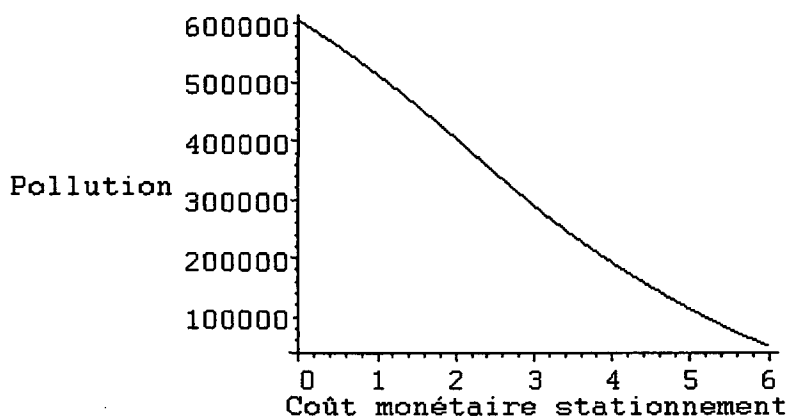


Coût monétaire de stationnement en K€/an

Coût moyen du trajet en K€/an

Le renchérissement des coûts de transport conduit à une baisse du revenu disponible en banlieue comme en périphérie, puisque ce dernier est égal au revenu total, fixe, diminué des coûts moyens de transport. Le très net affaiblissement de la circulation automobile a de son côté pour effet de diminuer fortement le niveau de la pollution, qu'on peut constater sur la figure 71107.

**Figure 71107 : Effet de la taxation du stationnement sur la pollution.**

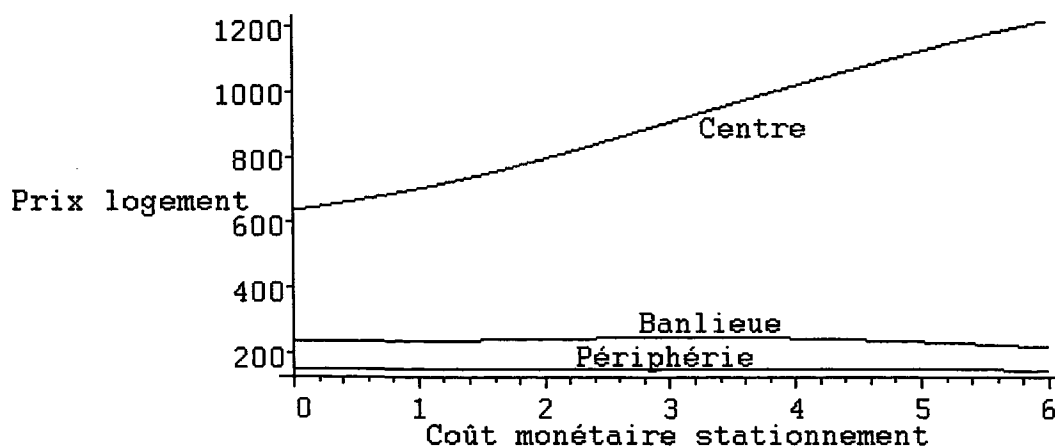


Coût monétaire de stationnement en K€/an

La pollution est mesurée par la durée totale journalière (en mn) des déplacements automobiles qui la génèrent.

Ces deux évolutions ont a priori des conséquences contradictoires sur le marché du logement en banlieue comme en périphérie. En effet, un revenu disponible des ménages plus faible les oblige à revoir à la baisse le montant qu'ils sont prêts à payer pour se loger, faisant baisser les prix fonciers. Au contraire, la baisse de la pollution renforce l'attractivité de la ville par rapport à l'extérieur. De ce fait, la disposition des ménages à payer pour un logement dans la ville augmente, ce qui pousse les prix fonciers à la hausse. Dans le centre ville, les habitants ne se déplaçant pas, seul ce dernier effet joue, y faisant croître les prix fonciers. La figure 71108 confirme cette poussée des prix au centre, particulièrement forte. Elle montre également qu'en périphérie ces deux effets tendent à se contrebalancer, les prix variant peu.

**Figure 71108 : Effet de la taxation du stationnement sur les prix fonciers.**

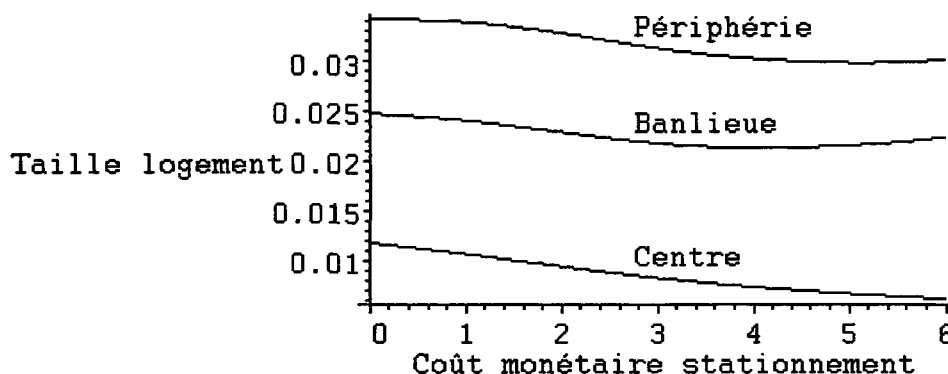


Coût monétaire de stationnement en K€/an

Prix du logement en K€/hectare et par an

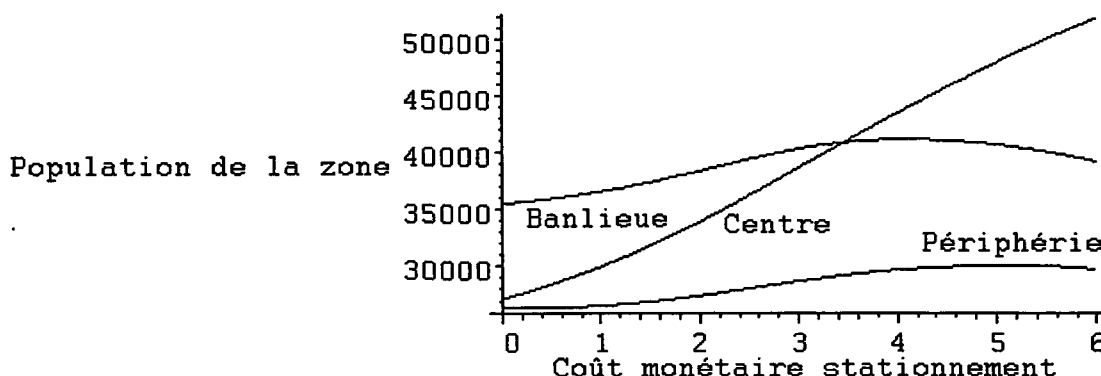
La variation des prix fonciers a pour corollaire une variation de la superficie occupée par les ménages et du nombre d'habitants, qu'on observe figures 71109 et 71110.

**Figure 71109 : Effet de la taxation du stationnement sur la superficie occupée par les habitants.**



Coût monétaire de stationnement en K€/an  
Taille du logement en hectares

**Figure 71110 : Effet de la taxation du stationnement sur le nombre de ménages.**



Coût monétaire de stationnement en K€/an  
Population en nombre de ménages

La superficie occupée par chaque ménage diminue nettement au centre, y faisant doubler le nombre d'habitants. La forte croissance des prix a conduit les ménages qui y logent à diminuer leur consommation de logement, permettant à de nouveaux habitants de venir de l'extérieur. Du côté de la banlieue et de la périphérie, les superficies occupées et le nombre d'habitants varient beaucoup moins, ce qui était prévisible étant donné la plus faible amplitude de la variation des prix. La légère croissance de ces derniers induit d'abord, comme au centre, une légère baisse des superficies occupées et une légère croissance de la population. L'évolution s'inverse autour de l'optimum car l'effet de la baisse de la pollution dominant à ce stade celui de la hausse des coûts de transport, le mouvement des prix s'est inversé.

En résumé, la taxation du seul stationnement a pour conséquence de renchérir l'ensemble des coûts de transport dans une ville où les usagers ont basculé vers les transports

en commun, devenus quasi hégémoniques en banlieue, fortement dominants en périphérie. De ce fait, la pollution a fortement diminué, le centre ville est beaucoup plus attractif, le bilan étant balancé en périphérie du fait des conséquences contradictoires de la hausse des coûts de transport et de la baisse de la pollution. En conséquence, la ville est nettement plus peuplée, en particulier au centre, et de ce fait plus compacte. Le surplus plus important qu'elle dégage est pour l'essentiel la conséquence de cette baisse de la pollution dont les propriétaires fonciers captent la valeur grâce à la hausse des prix du logement, d'où une forte augmentation de la rente différentielle. Au voisinage de l'optimum, cette hausse est contrebalancée par l'affaiblissement de la circulation automobile, sur laquelle dans ce scénario repose exclusivement la taxation.

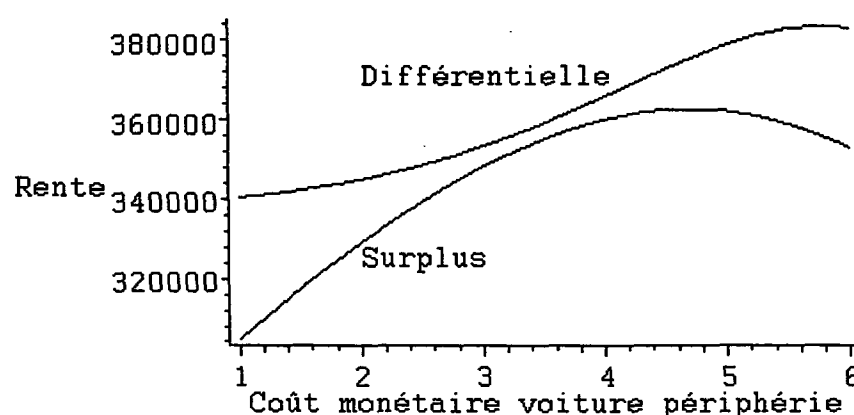
### 7.1.2 Taxation des déplacements en voiture en périphérie

Nous allons maintenant analyser les effets de la taxation des seuls déplacements en voiture à partir de la banlieue. Ni le stationnement, ni le passage par la banlieue ne sont taxés. Cette différenciation des usagers peut être obtenue par exemple en mettant en place un péage urbain entre la banlieue et la périphérie, comme cela se fait actuellement dans quelques grandes villes du Nord de l'Europe.

Dans toute la présentation qui suit, nous ne présenterons pas les résultats qui suivent en fonction du niveau de taxation mais en fonction du coût monétaire total du déplacement à l'intérieur de la périphérie. C'est en effet ce coût monétaire qui est pertinent pour l'utilisateur, indépendamment de sa répartition entre les deux postes que sont le coût marginal d'un déplacement supplémentaire et le montant des taxes qu'il acquitte. Rappelons que le coût marginal du déplacement est de 1K€ en périphérie et de 3K€ en banlieue. En conséquence, avec un montant  $t$  de taxes, le coût monétaire pour l'utilisateur du déplacement en banlieue est  $1+t$  et c'est la quantité qui figure en abscisse des graphiques. Pour avoir le coût monétaire total de déplacement, en l'absence de taxation du stationnement, il faut ajouter le coût marginal du transit en banlieue (celui du stationnement étant nul), soit un total de  $4+t$ .

On trouvera figure 71201 les valeurs du surplus et de la rente différentielle en fonction du niveau du coût du total du déplacement en périphérie.

**Figure 71201 : Effet de la taxation des déplacements voiture en périphérie sur les rentes et le surplus**



Coût monétaire voiture en périphérie en K€/an  
Rente différentielle et surplus en K€/an

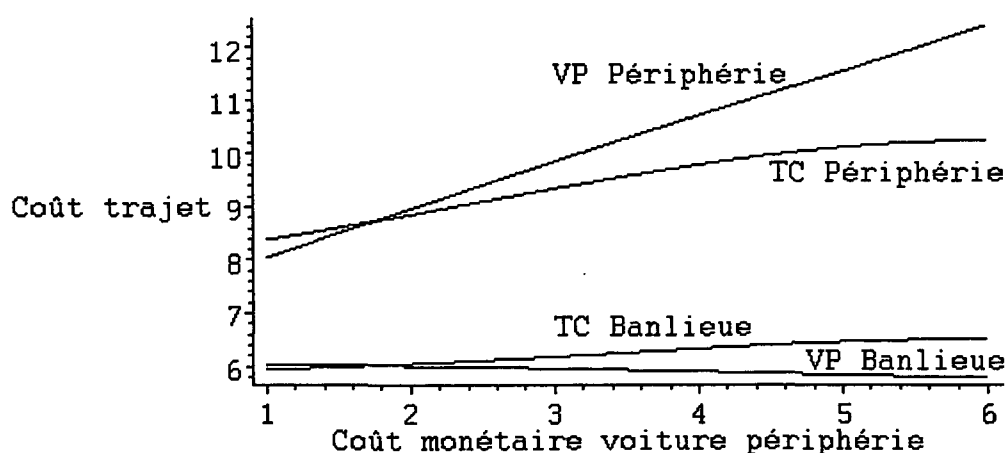
Le surplus commence par augmenter pour atteindre son maximum pour un coût monétaire de déplacement à l'intérieur de la périphérie égal à 4,75 K€. Sachant que le coût monétaire marginal subi par l'utilisateur est égal à 1, cela signifie qu'un habitant de la périphérie

acquitte une taxe dont le montant sur l'année est de 3,75K€, soit près de 80% du coût de son déplacement en périphérie. Si l'on se réfère au coût de l'ensemble du déplacement, passage en périphérie puis en banlieue, ce dernier coûte maintenant 7,75K€, dont 4K€ pour les coûts monétaires d'usage de la voiture et 3,75K€ de prélèvement fiscal, par exemple sous forme de péage. Ces derniers représentent donc près de la moitié du coût monétaire total.

Comme dans le cas précédent, la rente différentielle continue à croître au voisinage de l'optimum. La raison est la même : le surplus atteint son maximum parce que la baisse des recettes de la taxation des déplacements en périphérie, conséquence de la raréfaction des automobilistes parmi les habitants de celle-ci (la hausse des coûts voitures induisant des reports vers les transports en commun), contrebalance la hausse de la rente différentielle. Ici encore, cette hausse est pour l'essentiel la conséquence de la diminution de la pollution, qui renforce l'attractivité de la ville vis-à-vis de l'extérieur, permettant ainsi aux propriétaires fonciers d'augmenter fortement leurs prix au centre ville.

Nous allons maintenant voir de manière plus précise d'où vient la contribution de la taxation à la formation du surplus. Le graphique 71202 présente l'évolution des coûts globaux de transport pour chacun des deux modes de transport, en distinguant les habitants de la banlieue de ceux de la périphérie. On constate que si la taxation des usagers de la voiture pour la partie de leur déplacement qui est en périphérie se traduit par une augmentation du coût total de déplacement des habitants de la périphérie, il n'en est pas de même du coût global du déplacement voiture en banlieue, qui baisse légèrement. Quant aux usagers des transports en commun, le coût global de leur déplacement augmente, que ce soit pour la partie de leur déplacement qui se situe en périphérie ou pour leur passage en banlieue.

**Figure 71202 : Effet de la taxation des déplacements voiture en périphérie sur les coûts de transport par mode**



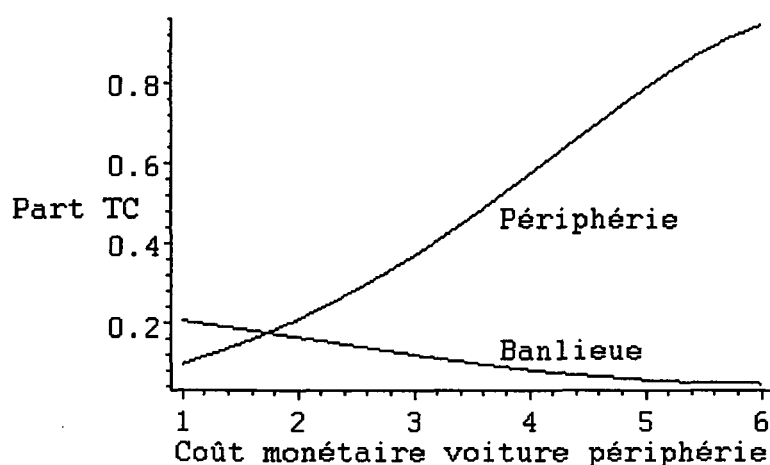
Coût monétaire voiture en périphérie en K€/an  
Coût du trajet en K€/an

Comme précédemment, ces évolutions des coûts globaux de transport sont la conséquence des reports modaux des usagers et des modifications de la congestion qui en résultent.

Le graphique de la figure 71203 montre en effet que la forte hausse des coûts de déplacement en périphérie induite par la taxation a pour conséquence un fort report modal des habitants de celle-ci vers les transports en commun. Pour cette catégorie d'habitants, les transports en commun deviennent aussi hégémoniques que l'est la voiture en l'absence de taxation. Mais les habitants de la banlieue, qui ne paient pas de taxe dans ce scénario, ont un

comportement opposé. Ils se reportent vers la voiture et la part des transports en commun, déjà faible, diminue encore de moitié. Nous arrivons donc à une situation fortement dichotomique, les transports en commun étant quasi hégémoniques chez les habitants de la périphérie alors que c'est la voiture pour les habitants de la banlieue

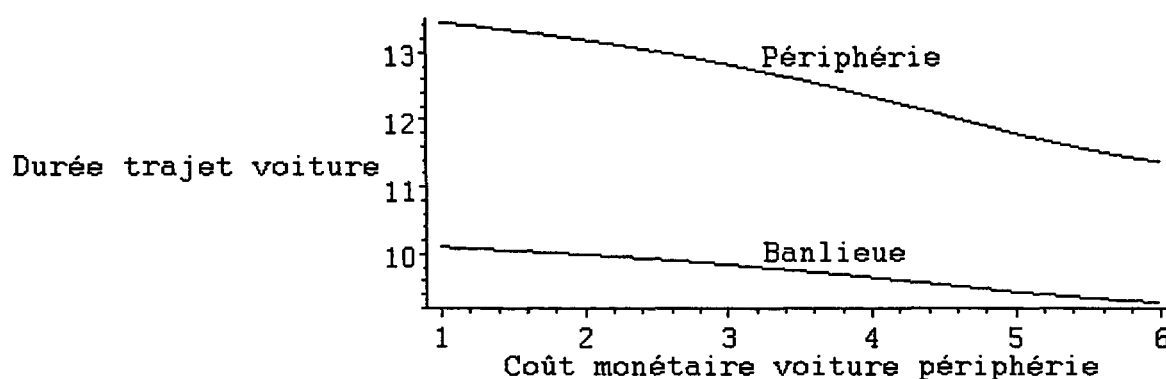
**Figure 71203 : Effet de la taxation des déplacements voiture en périphérie sur le pourcentage d'utilisateurs des transports en commun**



Coût monétaire voiture en périphérie en K€/an  
Part des TC : de 0 à 1 (0,2 = 20%, 0,8 = 80%,...)

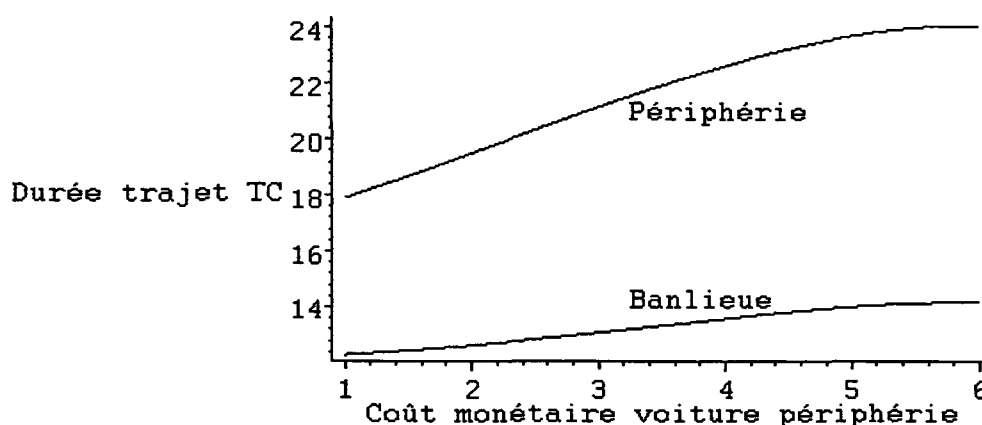
L'effet immédiat de ce report modal est, comme plus haut, de modifier les niveaux de congestion. En se reportant vers les transports en commun, les habitants de la périphérie diminuent la congestion du réseau routier et augmentent celle du réseau de transports en commun en périphérie, mais également en banlieue, par où ils transitent. Comme on peut le constater sur les graphiques des figures 71204 et 71205, les temps de déplacement évoluent dans le même sens, que ce soit pour les passages en périphérie ou en banlieue : croissance pour les transports en commun, baisse pour la voiture.

**Figure 71204 : Effet de la taxation des déplacements voiture en périphérie sur les durées de déplacement en voiture.**



Coût monétaire voiture en périphérie en K€/an  
Durée de trajet en minutes

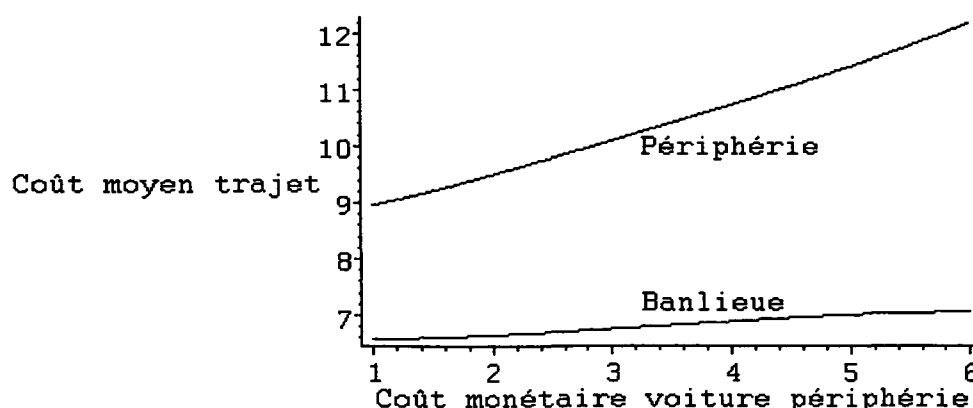
**Figure 71205 : Effet de la taxation des déplacements voiture en périphérie sur les durées de déplacement par les transports en commun.**



Coût monétaire voiture en périphérie en K€/an  
Durée de trajet en minutes

Ce sont ces évolutions des durées de déplacement qui, intégrées aux coûts globaux de transports en utilisant la valeur du temps, expliquent les observations faites plus haut sur la figure 71202. La hausse des durées de déplacement par les transports en commun et la baisse de ces mêmes durées en voiture ont un impact opposé à celui des coûts monétaires, inchangés pour les transports en commun et augmentés pour la voiture, mais seulement pour la partie périphérique des déplacements. La diminution des durées de déplacement en voiture atténue l'impact de la taxation en périphérie, sans toutefois l'inverser et les coûts augmentent ; en banlieue, en l'absence de taxation, les coûts n'étant plus affectés que par la baisse des durées de déplacement, diminuent. Pour les transports en commun, les deux zones étant exemptes de taxation, seul l'effet de croissance de la congestion opère et les coûts augmentent. Au total les coûts globaux moyens augmentent, que ce soit pour les passages en périphérie ou en banlieue (figure 71206), beaucoup plus dans le premier cas que dans le second.

**Figure 71206 : Effet de la taxation des déplacements voiture en périphérie sur les coûts moyens de déplacement.**



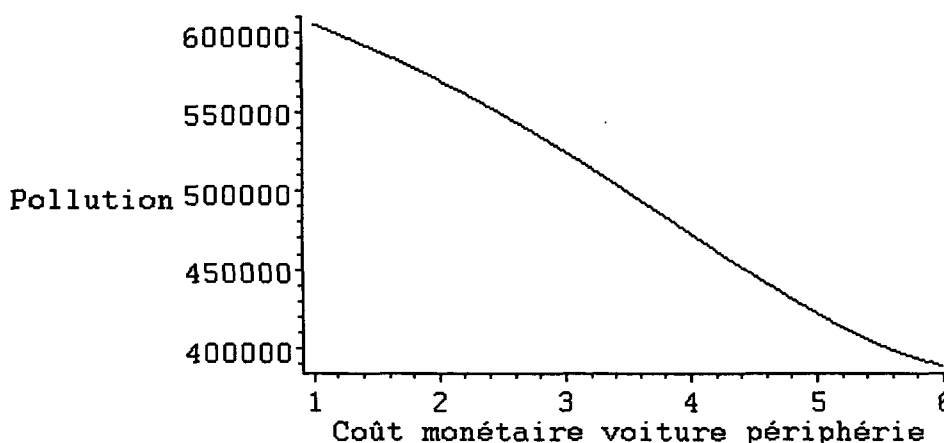
Coût monétaire voiture en périphérie en K€/an  
Coût moyen du trajet en K€/an

C'est logique. C'est la périphérie qui subit directement les conséquences de la taxation et les coûts de transports y augmentent à la fois pour la voiture et pour les transports en commun. Par contre, la banlieue ne subit que des effets indirects ; et la hausse des coûts de déplacement par les transports en commun y est partiellement compensée par la baisse des coûts voiture.

Comme plus haut, le renchérissement des coûts de transport conduit à une baisse du revenu disponible en banlieue comme en périphérie, puisque ce dernier est égal au revenu total, fixe, diminué des coûts moyens de transport ; la baisse est cependant beaucoup plus forte en périphérie qu'en banlieue. D'autre part, la circulation automobile diminue fortement, du fait de la chute de la part modale de la voiture à un niveau faible chez les habitants de la périphérie. Les habitants de la banlieue agissent certes en sens inverse, délaissant un peu plus les transports en commun. Mais ce report est beaucoup moins important, ne serait-ce que parce que la part modale des transports en commun n'était pas très élevée ; de plus, les habitants de la banlieue ont des durées de déplacement plus faibles que les habitants de la périphérie. En conséquence, s'ils atténuent l'impact du report des habitants de la périphérie sur la pollution, ils sont loin de l'inverser. De plus, la diminution de la congestion diminue les durées de déplacement, ce qui renforce la baisse de la pollution qu'on peut constater sur la figure 71207.

On retrouve deux évolutions ayant a priori des conséquences contradictoires sur le marché du logement en banlieue comme en périphérie. En effet, un revenu disponible des ménages plus faible les oblige à revoir à la baisse le montant qu'ils sont prêts à payer pour se loger, faisant baisser les prix fonciers. Au contraire, la baisse de la pollution renforce l'attractivité de la ville par rapport à l'extérieur. De ce fait, la disposition des ménages à payer pour un logement dans la ville augmente, ce qui pousse les prix fonciers à la hausse. Dans le centre ville, les habitants ne se déplaçant pas, seul ce dernier effet joue, y faisant croître les prix fonciers.

**Figure 71207 : Effet de la taxation des déplacements voiture en périphérie sur la pollution.**



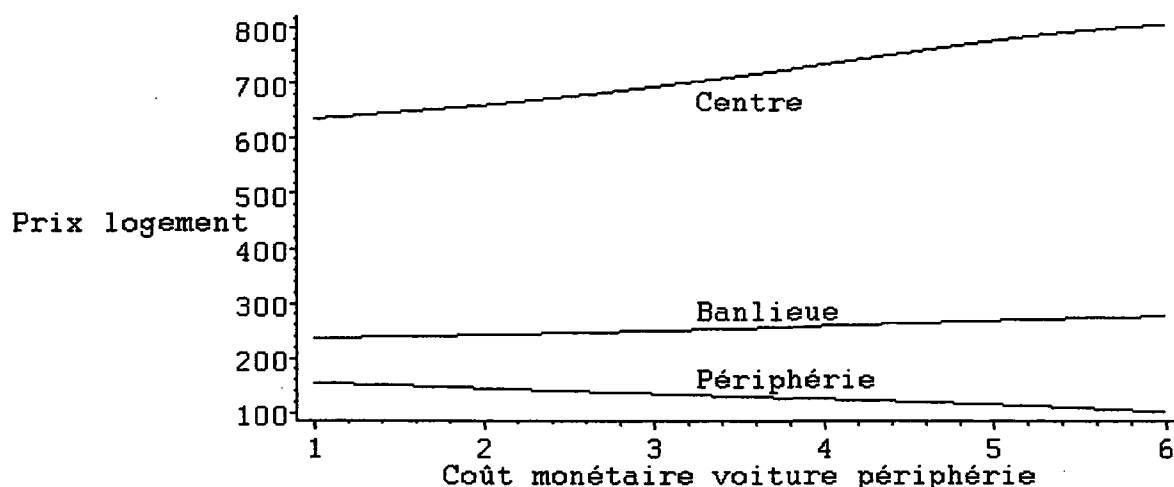
Coût monétaire voiture en périphérie en K€/an

La pollution est mesurée par la durée totale journalière (en mn) des déplacements automobiles qui la génèrent.

La figure 71208 confirme cette poussée des prix au centre, relativement importante. Elle montre également qu'en banlieue et en périphérie la combinaison de ces deux effets aboutit à des résultats opposés. Nous avons vu plus haut que la hausse des coûts de transport était faible

en banlieue. Son impact sur le revenu disponible est donc marginal et, comme au centre, les prix en périphérie sont pour l'essentiel influencés par le renforcement de l'attractivité induit par la baisse de la pollution. Ils augmentent. Au contraire, en banlieue, la hausse des coûts moyens de transport est forte, avec un impact important du revenu disponible. L'effet à la baisse sur les prix fonciers qui en résulte est trop important pour être contrebalancé par les conséquences de la baisse de la pollution.

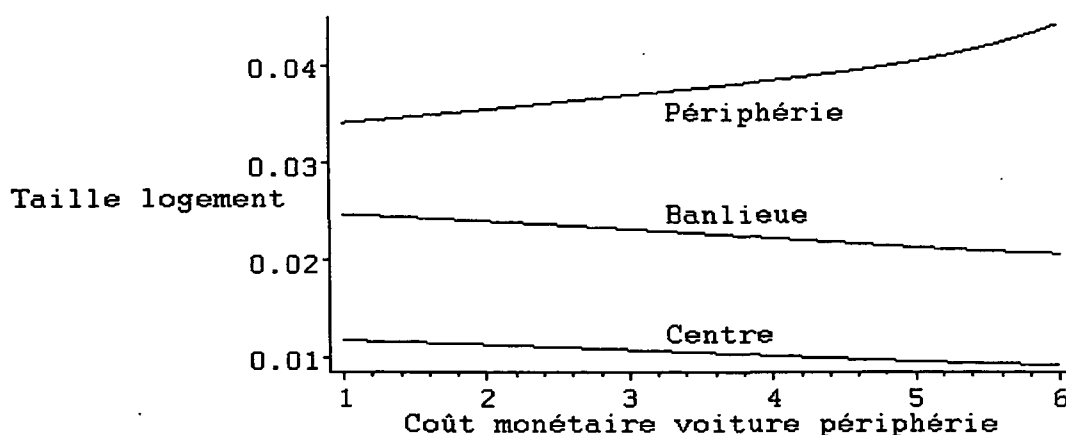
**Figure 71208 : Effet de la taxation des déplacements voiture en périphérie sur les prix fonciers.**



Coût monétaire voiture en périphérie en K€/an  
Prix du logement en K€/hectare et par an

Comme ils est logique, la variation des prix fonciers a pour corollaire une variation de la superficie occupée par les ménages et du nombre d'habitants, qu'on observe figures 71209 et 71210.

**Figure 71209 : Effet de la taxation des déplacements voiture en périphérie sur la superficie occupée par les habitants.**

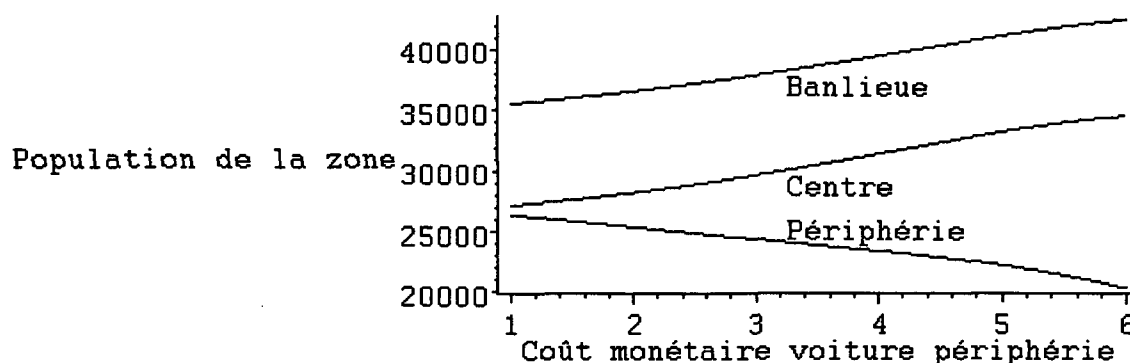


Coût monétaire voiture en périphérie en K€/an  
Taille du logement en hectares

La superficie occupée par chaque ménage diminue au centre, y faisant augmenter le nombre d'habitants. Comme dans le scénario précédent, la croissance des prix a conduit les ménages qui y logent à diminuer leur consommation de logement, permettant à de nouveaux

habitants de venir de l'extérieur. Contrairement au scénario précédent, la banlieue, qui pour l'essentiel a également bénéficié de la baisse de la pollution avec pour corollaire la hausse des prix, a vu aussi ses superficies de logement diminuer et le nombre de ses habitants augmenter. En périphérie, les superficies occupées augmentent et le nombre d'habitants diminuent, et ce fortement. Au total, si la ville gagne quelque cinq mille ménages au centre et autant en banlieue (et donc dix mille au total), elle en perd environ quatre mille en périphérie, d'où une croissance qui, si elle est significative, reste faible.

**Figure 71210 : Effet de la taxation des déplacements voiture en périphérie sur le nombre de ménages.**



Coût monétaire voiture en périphérie en K€/an  
Population en nombre de ménages

En résumé, en taxant les seuls déplacements des habitants de la périphérie, le planificateur aboutit à une ville un peu plus peuplée, mais ayant perdu une bonne partie de sa périphérie. Pour les habitants de la périphérie qui reste, les transports en commun sont devenus le choix modal largement dominant, induisant un très net affaiblissement de la congestion automobile dont profitent les habitants de la banlieue, qui de ce fait renforcent leur préférence pour la voiture ; et l'ensemble de la ville, où la pollution est plus faible. Comme précédemment, le surplus important que cette ville dégage est pour l'essentiel la conséquence de cette pollution plus faible dont les propriétaires fonciers captent la valeur grâce à la hausse des prix du logement au centre et en banlieue, d'où une forte augmentation de la rente différentielle.

### 7.1.3 Taxation des déplacements par les transports en commun transitant par la banlieue

Nous allons maintenant nous intéresser aux transports en commun. Comme précédemment, partant de l'absence de taxe, nous allons commencer par modifier les coûts des seuls déplacements en transports en commun par la banlieue, une augmentation par rapport au coût privé correspondant à une taxation, une diminution par une subvention.

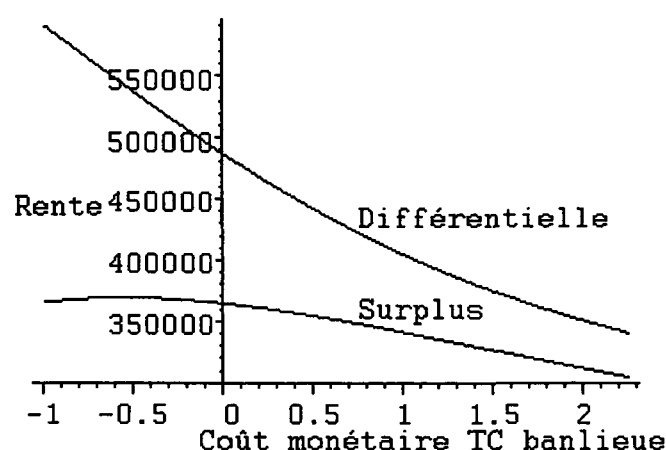
Comme dans la section précédente, dans toute la présentation qui suit, nous ne présenterons pas les résultats qui suivent en fonction du niveau de taxation mais en fonction du coût monétaire total du déplacement par les transports en commun en banlieue, et ce pour la même raison : c'est en effet ce coût monétaire qui est pertinent pour l'usager, indépendamment de sa répartition entre les deux postes que sont le coût marginal d'un déplacement supplémentaire et le montant des taxes qu'il acquitte. Ajoutons que, pour les transports en commun, ce coût monétaire est aussi le coût annuel des titres de transport acquittés par l'usager, le gestionnaire du service de transports couvrant le coût marginal. Un

titre de transport de coût inférieur au coût marginal est un titre de transport subventionné par l'autorité publique, qui doit couvrir le déficit du gestionnaire pour que ce dernier puisse continuer à opérer.

Signalons enfin avant d'aborder les résultats que la taxation des déplacements par les transports en commun passant par la banlieue a un point commun avec la taxation du stationnement : dans les deux cas, tous les usagers du mode de transport considéré en subissent les effets directs. Dans le cas du stationnement, cela tenait au fait que tout automobiliste devait stationner ; dans le cas qui nous intéresse, c'est la conséquence du fait que tous les usagers des transports en commun partent de la banlieue ou y transitent.

On trouvera figure 71301 les valeurs du surplus et de la rente différentielle en fonction du niveau du coût du total du déplacement en périphérie.

**Figure 71301 : Effet de la taxation des déplacements TC en banlieue sur les rentes et le surplus**



Coût monétaire des déplacements TC en banlieue en K€/an

Rente différentielle et surplus en K€/an

Pour augmenter le surplus, en l'absence de taxation des déplacements en voiture, il faut baisser le coût monétaire des transports en commun par rapport au scénario de base où il était fixé à la valeur des coûts marginaux privés, soient 2,25K€ ; ce qui signifie que l'usage des transports en commun doit être subventionné. Si nous avons souligné que ce résultat était obtenu en l'absence de taxation des déplacements automobile, c'est parce que nous verrons plus loin qu'à l'optimum cette subvention disparaît.

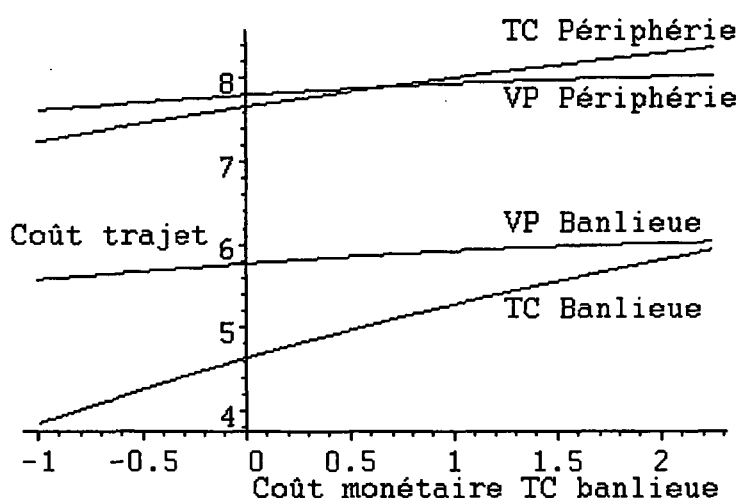
A l'optimum, la subvention est de 2,75K€ par personne et par an, d'où un coût monétaire de déplacement négatif (-0,5K€). On parvient à ce résultat apparemment paradoxal que, pour maximiser le surplus, la puissance publique doit accepter de payer les usagers pour vaincre leurs réticences à prendre les transports en commun. Apparemment seulement parce que, au delà de ces effets redistributifs en faveur des usagers des transports en commun, le fait de payer au lieu de faire payer les déplacements par les transports en commun a, via la réduction de la circulation automobile, le même effet que la taxation (positive) de cette dernière : diminuer la pollution. Et c'est cet effet qui explique l'accroissement du surplus plus que la réduction de la congestion qui est transférée d'un mode à l'autre.

Symétriquement à ce que nous avons observé dans les cas précédents, la rente différentielle continue à croître quand l'augmentation des subventions fait baisser le coût monétaire de transport en deçà de -0,5. La raison est similaire : le surplus atteint son maximum parce que le coût des subventions de plus en plus importantes à des usagers des transports en commun de plus en plus nombreux, contrebalance la hausse de la rente

différentielle. Ici encore, cette hausse est pour l'essentiel la conséquence de la diminution de la pollution, qui renforce l'attractivité de la ville vis-à-vis de l'extérieur, permettant ainsi aux propriétaires fonciers d'augmenter fortement leurs prix au centre ville.

Le graphique 71302 présente l'évolution des coûts globaux de transport pour chacun des deux modes de transport, en distinguant les habitants de la banlieue de ceux de la périphérie. Comme quand le planificateur taxait le stationnement, les coûts évoluent parallèlement en banlieue et en périphérie. Plus on subventionne, plus on se déplace vers la gauche du graphique, plus le coût global (somme des coûts monétaires et du coût du temps de transport) des déplacements des usagers des transports en commun (qui bénéficient tous de la subvention, qu'ils soient localisés en banlieue ou dans la périphérie) est faible ; sans pour autant que la subvention se traduise par une baisse équivalente des coûts de transport en raison, nous le verrons plus bas, de la croissance des durées de déplacement. Du côté des usagers de l'automobile, bien que leurs coûts monétaires soient inchangés, la diminution de leur durée de déplacement quand les subventions augmentent leur permet également de bénéficier d'une baisse du coût global de déplacement.

**Figure 71302 : Effet de la taxation des déplacements TC en banlieue sur les coûts de transport par mode**



Coût monétaire des déplacements TC en banlieue en K€/an  
Coût du trajet en K€/an

Comme précédemment, ces évolutions des coûts globaux de transport sont la conséquence des reports modaux des usagers et des modifications de la congestion qui en résultent.

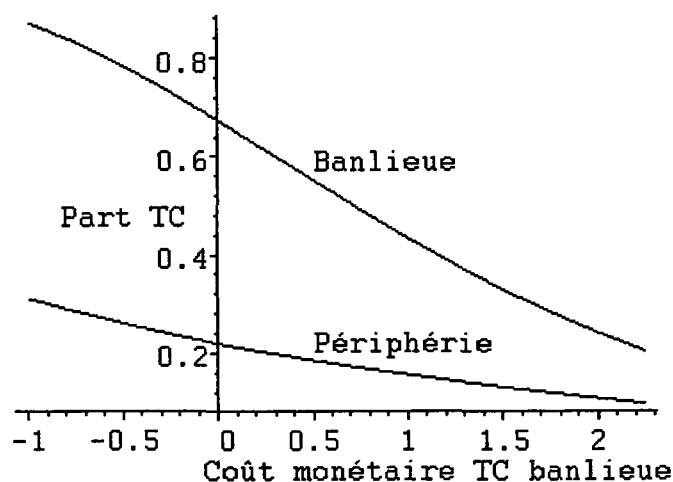
Le graphique de la figure 71303 montre en effet qu'un accroissement de la subvention à l'usage des transports en commun (qui, rappelons-le, se traduit par une baisse du coût monétaire et donc par un déplacement vers la gauche du graphique) conduit à une augmentation de la part de marché des transports en commun, en banlieue comme en périphérie. Il est intéressant d'en comparer les conséquences avec celles d'une augmentation du coût du stationnement (figure 71103). Ces deux mesures ont en effet pour résultat d'augmenter pour l'ensemble des usagers la différence de coût monétaire entre voiture et transports en commun pour l'ensemble des usagers.

A l'optimum partiel, le planificateur fait un transfert moins massif vers les transports en commun quand il subventionne ces derniers que quand il taxait la circulation automobile. En banlieue, si dans le premier cas les transports en commun deviennent hégémoniques (98% de part de marché), dans le second cas ils ne le sont plus, tout en restant largement dominants

(78% de part de marché). En périphérie, à l'optimum partiel de la taxation de la circulation automobile cette dernière était devenue minoritaire (44% de part de marché), alors qu'à l'optimum de subvention des transports en commun, même si la part de l'automobile a diminué, elle reste nettement dominante (74% de part de marché).

Il ne faut cependant pas en déduire que la subvention des transports en commun est un moyen moins efficace que la taxation des déplacements automobiles pour transférer les choix modaux des usagers de la voiture vers les transports en commun. En effet, on compare ici un optimum partiel où le planificateur taxe les automobilistes à hauteur de 4,75K€ par personne et par an à un optimum où il subventionne les voyages en TC à hauteur de 2,75K€ par personne et par an. Le différentiel de coût monétaire entre les deux modes de transports est donc modifié de manière nettement plus importante dans le premier cas que dans le second, ce qui explique l'ampleur plus forte du report modal. Ce qu'il est important de constater, c'est que le planificateur qui subventionne les transports en commun a moins intérêt que l'autre à pousser le report modal que celui qui taxe les déplacements automobiles, a priori parce que les gains qu'il en tire sont plus faibles ; sans doute, mais ceci reste à vérifier, parce qu'à la marge une augmentation de la subvention des transports en commun lui coûte plus que la perte de recettes induite par une augmentation de la taxe sur les véhicules.

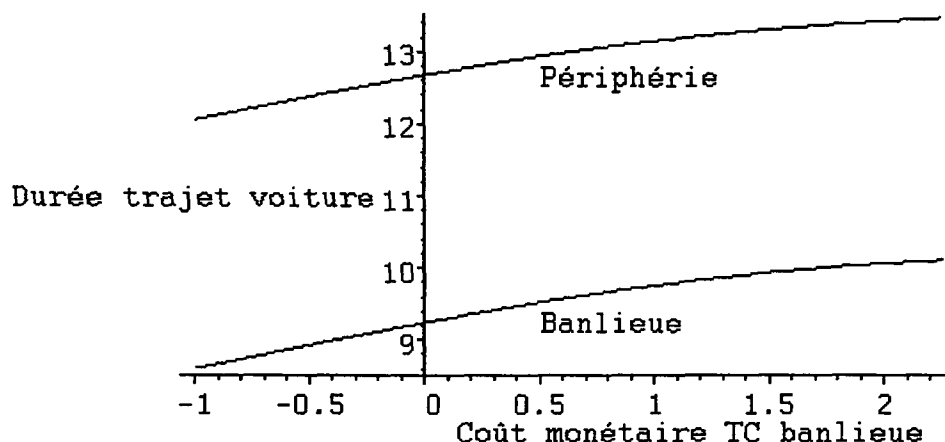
**Figure 71303 : Effet de la taxation des déplacements TC en banlieue sur le pourcentage d'usagers des transports en commun**



Coût monétaire des déplacements TC en banlieue en K€/an  
Part des TC : de 0 à 1 (0,2 = 20%, 0,8 = 80%,...)

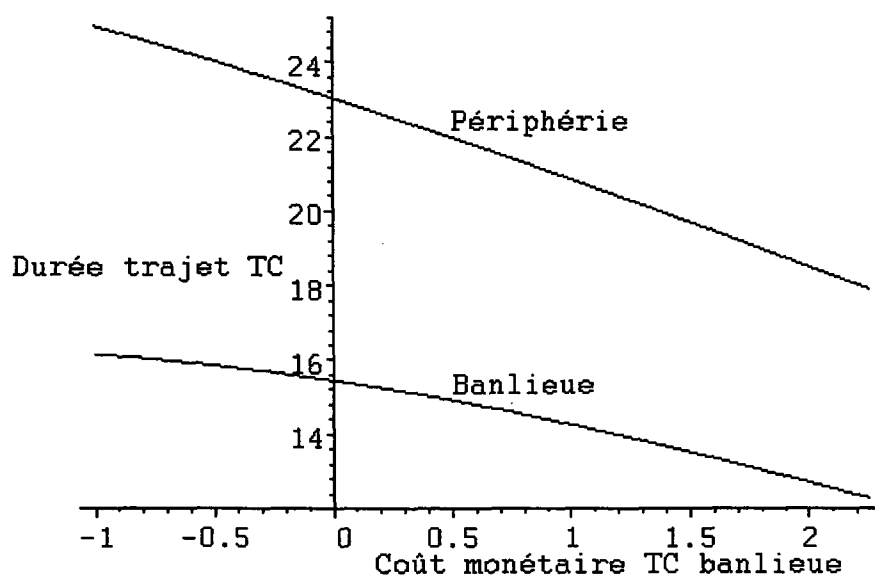
L'effet immédiat de ce report modal est, comme dans les deux scénarios antérieurs, de modifier les niveaux de congestion et les durées de déplacement représentées sur les figures 71304 et 71305.

**Figure 71304 : Effet de la taxation des déplacements TC en banlieue sur les durées de déplacement en voiture.**



Coût monétaire des déplacements TC en banlieue en K€/an  
Durée de trajet en minutes

**Figure 71305 : Effet de la taxation des déplacements TC en banlieue sur les durées de déplacement par les transports en commun.**



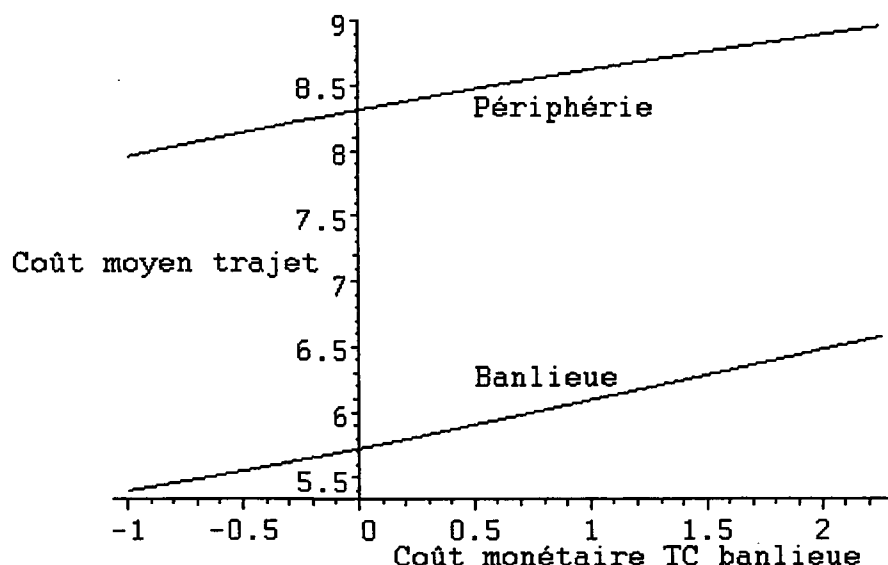
Coût monétaire des déplacements TC en banlieue en K€/an  
Durée de trajet en minutes

En réagissant à une baisse de leur coût monétaire de déplacement par les transports en commun (et donc à un déplacement vers la gauche du graphique) induite par une subvention plus élevée par un report vers les transports en commun, et ce qu'ils habitent en banlieue ou en périphérie, les habitants diminuent partout la congestion du réseau routier et augmentent partout celle du réseau de transports en commun. Aussi, comme on peut le constater sur les graphiques, les temps de déplacement évoluent dans le même sens, que ce soit pour les passages en périphérie ou en banlieue : croissance pour les transports en commun, baisse pour la voiture.

Ce sont ces évolutions des durées de déplacement qui, intégrées aux coûts globaux de transports en utilisant la valeur du temps, expliquent les observations faites plus haut sur la figure 71302. La hausse des durées de déplacement par les transports en commun et la baisse de ces mêmes durées en voiture ont un impact opposé à celui des coûts monétaires, inchangés pour la voiture et diminués par la subvention pour les transports en commun pour l'ensemble des usagers, qu'ils résident en banlieue ou en périphérie. La diminution des durées de déplacement en voiture fait baisser le coût global, en banlieue comme en périphérie. L'augmentation des temps de transport en commun va à l'encontre de la baisse des coûts monétaires, sans toutefois en inverser les effets.

Au total, quand on se déplace de la droite vers la gauche du graphique de la figure 71306 les coûts globaux moyens baissent, que ce soit pour les passages en périphérie ou en banlieue. La subvention des transports en commun a ici des effets opposés à la taxation du stationnement et c'est bien là la différence essentielle qui explique le fait que le planificateur ne choisisse pas le même optimum dans les deux cas.

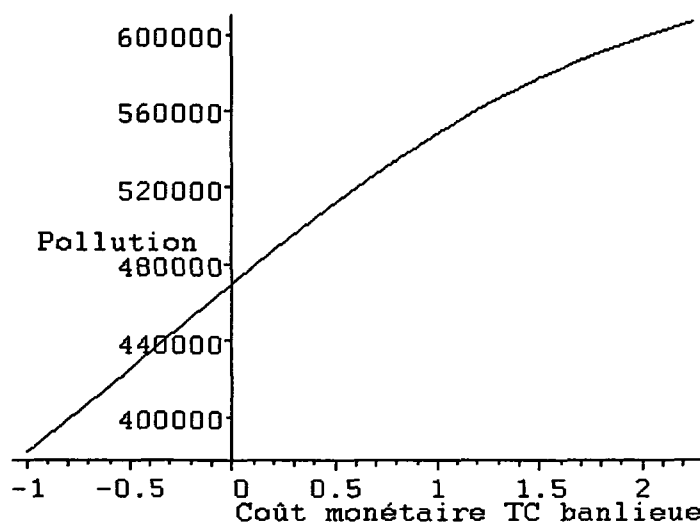
**Figure 71306 : Effet de la taxation des déplacements TC en banlieue sur les coûts moyens de déplacement.**



Coût monétaire des déplacements TC en banlieue en K€/an  
Coût moyen du trajet en K€/an

Avec des coûts de transport plus faibles, le revenu disponible augmente maintenant, à l'opposé de ce qui se passait dans les deux scénarios précédents, et ce en banlieue comme en périphérie. De plus, la baisse de la part modale de la voiture et la diminution de la congestion routière vont toutes deux dans le sens d'une baisse de la pollution, bien visible quand on va de la droite (TC non subventionnés) vers la gauche (TC subventionnés) de la figure 71307.

**Figure 71307 : Effet de la taxation des déplacements TC en banlieue sur la pollution.**

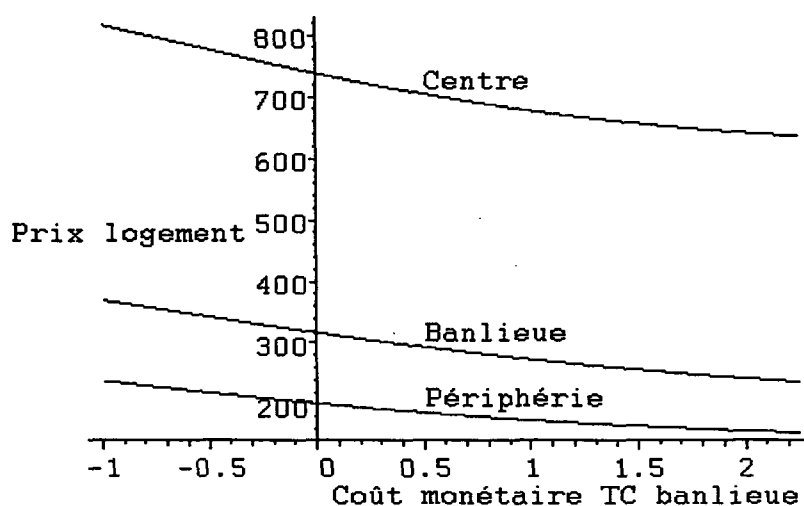


Coût monétaire des déplacements TC en banlieue en K€/an  
La pollution est mesurée par la durée totale journalière (en min) des déplacements automobiles qui la génèrent.

Les deux facteurs ont maintenant des effets convergents sur le marché du logement, au centre comme en banlieue et en périphérie. Tous deux poussent à la hausse les prix fonciers, les ménages de la banlieue et de la périphérie pouvant consacrer à leur logement un revenu plus élevé et la baisse de la pollution renforçant l'attractivité de la ville, y attirant de nouveaux ménages

La figure 71308 confirme cette poussée des prix dans les trois zones de la ville.<sup>11</sup>

**Figure 71308 : Effet de la taxation des déplacements TC en banlieue sur les prix fonciers.**

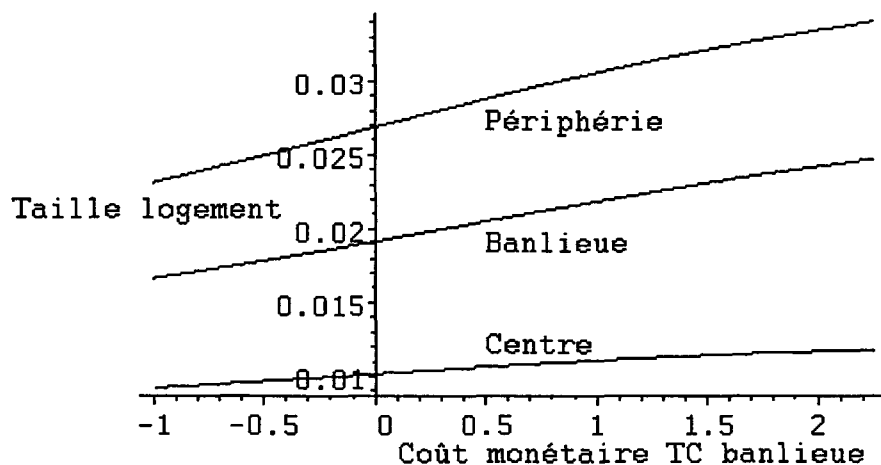


Coût monétaire des déplacements TC en banlieue en K€/an  
Prix du logement en K€/hectare et par an

Comme il est logique, la variation des prix fonciers a pour corollaire une variation de la superficie occupée par les ménages et du nombre d'habitants, qu'on observe figures 71309 et 71310.

<sup>11</sup> Rappelons, au risque d'insister lourdement, que le raisonnement en termes d'accroissement de la subvention et donc de réduction des coûts monétaires conduit à lire les graphiques de cette section de la droite vers la gauche.

**Figure 71309 : Effet de la taxation des déplacements TC en banlieue sur la superficie occupée par les habitants.**

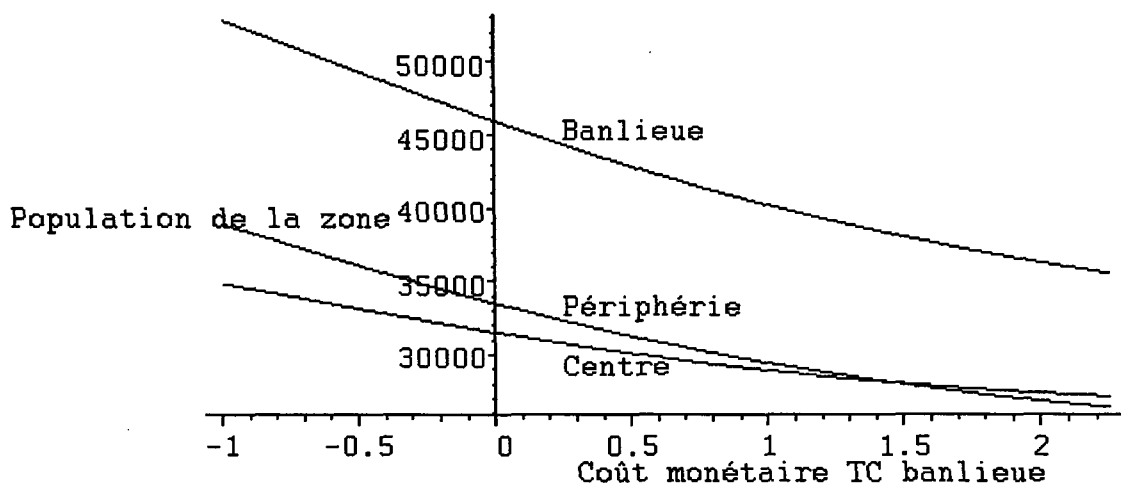


Coût monétaire des déplacements TC en banlieue en K€/an

Taille du logement en hectares

De manière prévisible, les ménages réagissent à l'augmentation des prix fonciers en substituant de la consommation de biens courants à leur consommation de logement. Dans les trois zones, la superficie occupée par chaque ménage diminue, y faisant augmenter le nombre d'habitants. Contrairement à ce que nous avons constaté dans les deux scénarios précédents, ce n'est plus le centre qui est la destination privilégiée par cet afflux de nouveaux habitants. Au contraire, c'est au centre que la population augmente le moins. La périphérie, qui dans le scénario de base, était légèrement moins peuplée que le centre, abrite maintenant plus d'habitants. Et la population de la banlieue a encore plus fortement augmenté.

**Figure 71310 : Effet de la taxation des déplacements TC en banlieue sur le nombre de ménages.**



Coût monétaire des déplacements TC en banlieue en K€/an

Population en nombre de ménages

En résumé, si elle permet comme la taxation des automobilistes de faire fortement augmenter la part modale des transports en commun et, par ce biais, de diminuer la circulation automobile et de réduire la congestion, la subvention des déplacements par les transports en commun aboutit à une structure urbaine très différente. Certes, la ville dégage un surplus plus important et renforce son attractivité, ce qui lui permet d'attirer de la population. Mais, alors que la taxation de la circulation automobile permettait, grâce à l'augmentation des coûts de transport, d'aboutir à une ville plus compacte, des transports en commun subventionnés, en diminuant les coûts de transport, conduisent au contraire à une ville plus étalée.

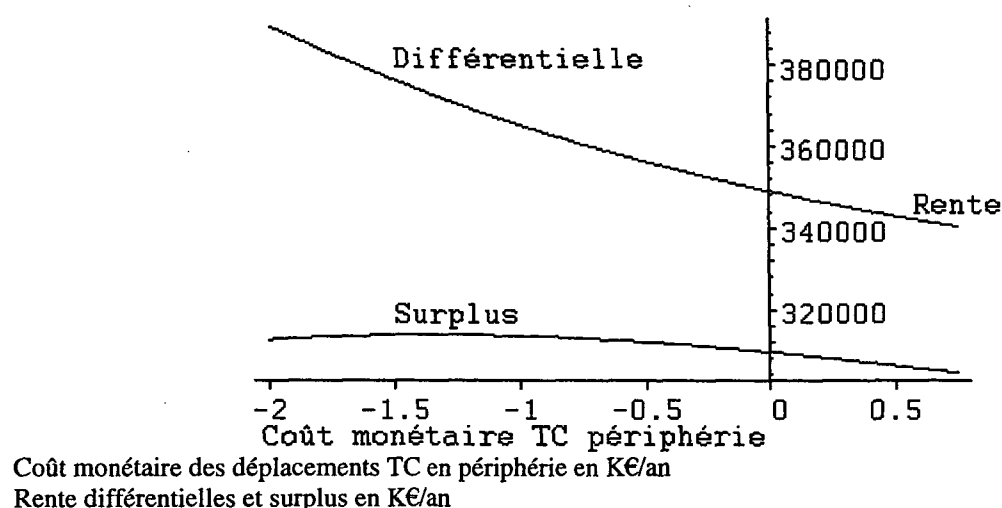
#### 7.1.4 Taxation des déplacements TC en deuxième couronne

Nous allons maintenant modifier les coûts des seuls déplacements par les transports en commun en périphérie. Rappelons que, comme dans les sections précédentes, et pour les mêmes raisons, nous ne présenterons pas les résultats qui suivent en fonction du niveau de taxation mais en fonction du coût monétaire du déplacement par les transports en commun en périphérie. Et que, pour les transports en commun, ce coût monétaire est aussi le coût annuel des titres de transport acquittés par l'utilisateur, le gestionnaire du service de transports couvrant le coût marginal. Un titre de transport de coût inférieur au coût marginal est un titre de transport subventionné par l'autorité publique, qui doit couvrir le déficit du gestionnaire pour que ce dernier puisse continuer à opérer.

Signalons enfin que, de même qu'il était utile de comparer la subvention sur les transports en commun en banlieue avec la taxation du stationnement, il nous sera ici utile de comparer la subvention sur les transports en commun en périphérie à la taxation de la voiture dans cette même périphérie. Tous les deux ont en effet pour conséquence de creuser l'écart entre coûts monétaires des deux modes de transport en périphérie, sans modifier cet écart pour les habitants de la banlieue. Ils le font cependant de manière différente, en augmentant les coûts monétaires de transport d'une catégorie d'utilisateurs avec la taxation ; et au contraire en diminuant les coûts monétaires de transport d'une autre catégorie d'utilisateurs pour la subvention.

On trouvera figure 71401 les valeurs du surplus et de la rente différentielle en fonction du niveau du coût du total du déplacement en périphérie.

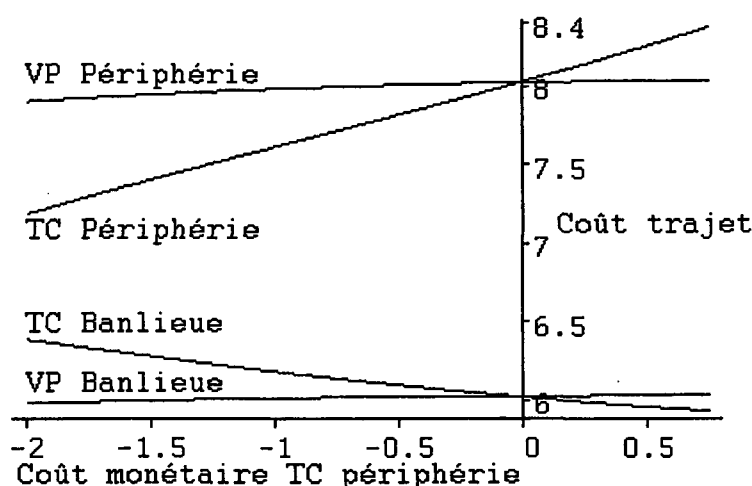
**Figure 71401 : Effet de la taxation des déplacements TC en périphérie sur les rentes et le surplus**



Comme dans le scénario précédent, pour augmenter le surplus en l'absence de taxation des déplacements en voiture, il faut baisser le coût monétaires des transports en commun par rapport au scénario de base où il était fixé à la valeur des coûts marginaux privés, soient 0,75K€, et donc subventionner ; et, à l'optimum, la subvention est de 2K€ par personne et par an conduit à un coût monétaire de déplacement négatif (-1,25K€), la puissance publique payant les usagers pour vaincre leurs réticences à prendre les transports en commun. On retrouve également le fait que la rente différentielle continue à croître quand l'augmentation des subventions fait baisser le coût monétaire de transport en deçà de -1,25.

Le graphique 71402 présente l'évolution des coûts globaux de transport pour chacun des deux modes de transport, en distinguant les habitants de la banlieue de ceux de la périphérie.

**Figure 71402 : Effet de la taxation des déplacements TC en périphérie sur les coûts de transport par mode**



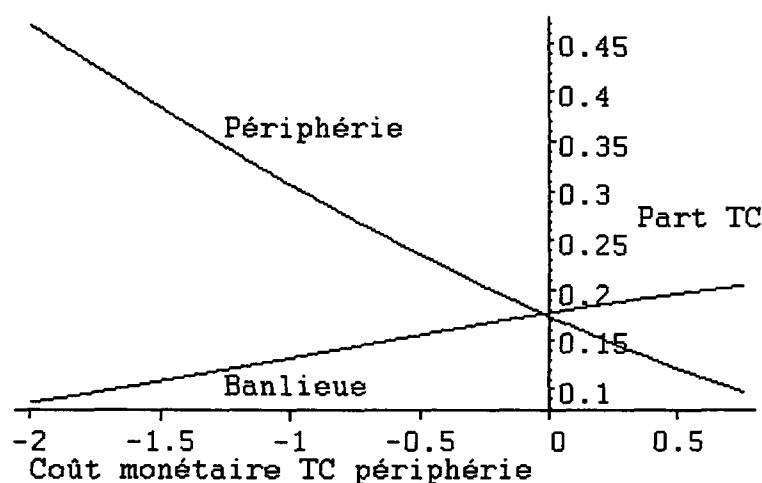
Coût monétaire des déplacements TC en périphérie en K€/an  
Coût du trajet en K€/an

La diminution des coûts monétaires a évidemment un impact direct sur les coûts globaux (somme du coût monétaire et de la traduction monétaire du coût induit par le temps de transport) des transports en commun en périphérie, dont la baisse est cependant plus faible que le montant de la subvention qui leur est allouée. Par contre, elle induit une augmentation des coûts globaux de ce même mode de transport en banlieue. Quant aux coûts de transport en voiture, bien que non affectés directement par la subvention, ils diminuent en banlieue comme en périphérie.

Comme dans les scénarios antérieurs, ces évolutions des coûts globaux de transport sont la conséquence des reports modaux des usagers et des modifications de la congestion qui en résultent.

Le graphique de la figure 71403 montre en effet qu'un accroissement de la subvention à l'usage des transports en commun (qui, rappelons-le, se traduit par une baisse du coût monétaire et donc par un déplacement vers la gauche du graphique) conduit à une augmentation de la part de marché des transports en commun en périphérie et à une baisse en banlieue.

**Figure 71403 : Effet de la taxation des déplacements TC en périphérie sur le pourcentage d'usagers des transports en commun**

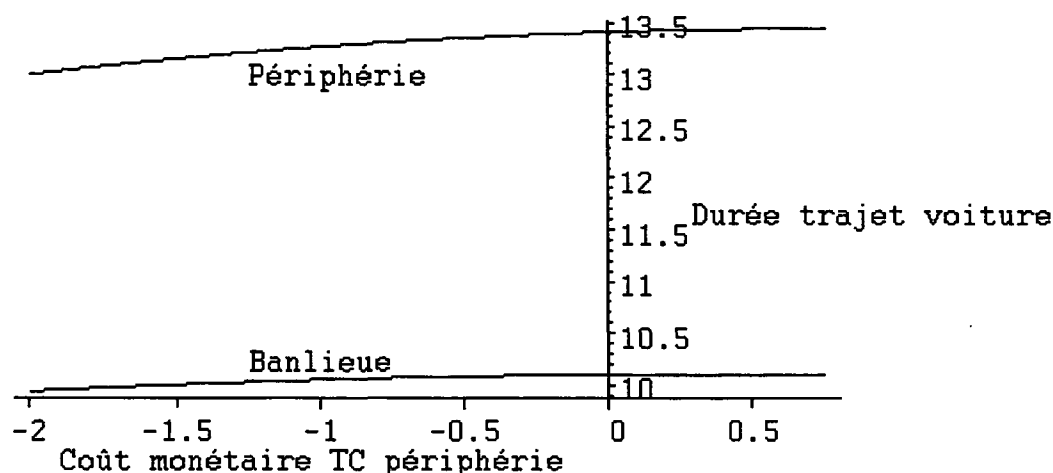


Coût monétaire des déplacements TC en périphérie en K€/an  
Part des TC : de 0 à 1 (0,2 = 20%, 0,8 = 80%,...)

On retrouve l'effet de ciseau que nous avons observé quand le planificateur taxe les déplacements automobiles dans la seule périphérie (figure 71203) : en banlieue, la voiture est encore plus dominante alors qu'en périphérie, si elle reste majoritaire, sa part modale a très nettement diminué, de 90% à 66%. C'est la conséquence du fait que deux mesures ont pour conséquence commune d'augmenter pour les usagers de la périphérie la différence de coût monétaire entre voiture et transports en commun sans modifier les coûts monétaires en banlieue. De plus, à l'optimum partiel, on retrouve le constat fait dans le scénario précédent que le planificateur fait un transfert moins massif vers les transports en commun quand il subventionne ces derniers que quand il taxait la circulation automobile. Les conclusions qu'on en tire sont les mêmes. Il ne s'agit pas d'une plus faible inefficacité de la subvention par rapport à la taxation, la première étant nettement plus faible que la seconde (2K€ contre 3,75K€), mais d'un choix du planificateur sans doute dû au fait qu'à la marge une augmentation de la subvention des transports en commun lui coûte plus que la perte de recettes induite par une augmentation de la taxe sur les véhicules.

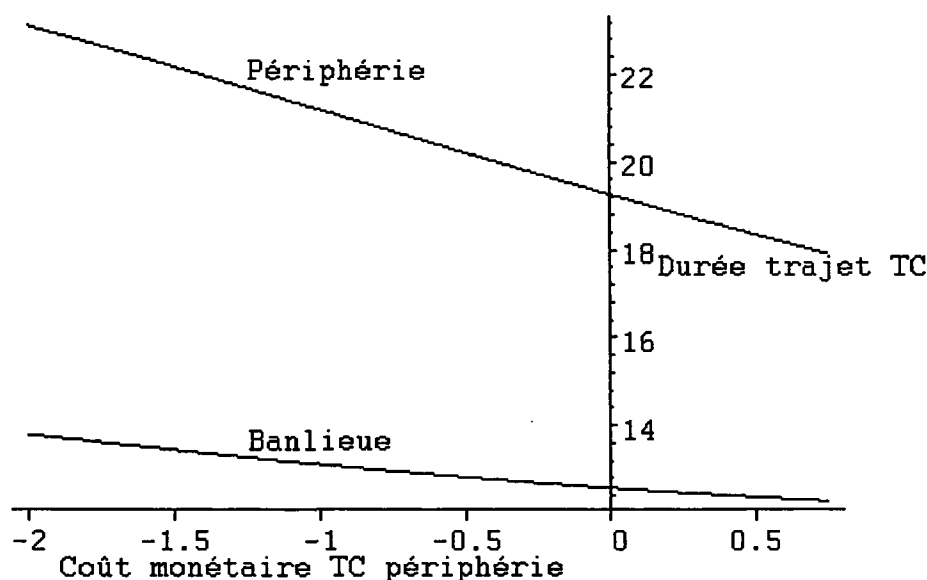
L'effet immédiat de ce report modal est, comme dans les deux scénarios antérieurs, de modifier les niveaux de congestion et les durées de déplacement représentées sur les figures 71404 et 71405.

**Figure 71404 : Effet de la taxation des déplacements TC en périphérie sur les durées de déplacement en voiture.**



Coût monétaire des déplacements TC en périphérie en K€/an  
Durée de trajet en minutes

**Figure 71405 : Effet de la taxation des déplacements TC en périphérie sur les durées de déplacement par les transports en commun.**



Coût monétaire des déplacements TC en périphérie en K€/an  
Durée de trajet en minutes

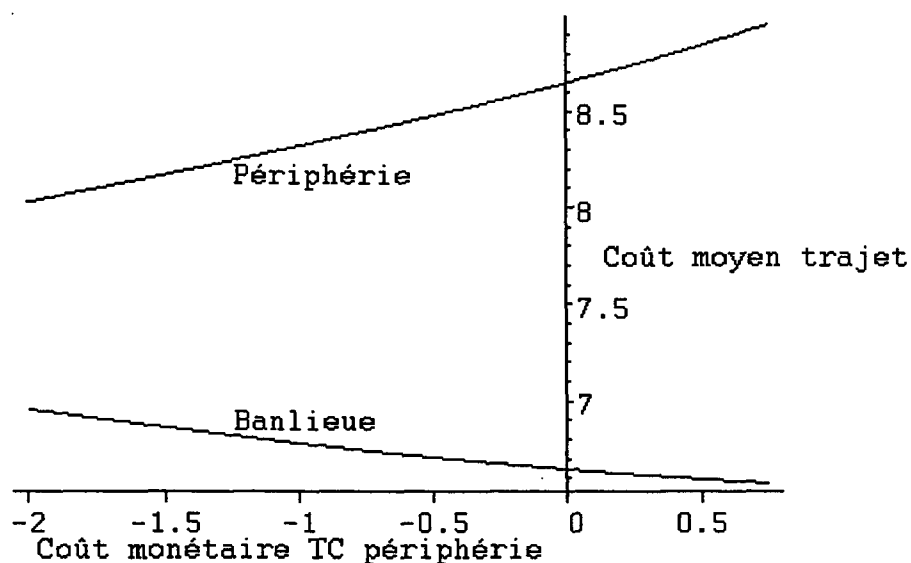
Une subvention plus élevée conduit à une baisse du coût monétaire de déplacement par les transports en commun (et donc à un déplacement vers la gauche du graphique). En réagissant à cette baisse par un report vers les transports en commun, les habitants de la périphérie augmentent partout la congestion du réseau de transports en commun et y augmentent les durées de déplacement, que ce soit en banlieue ou en périphérie. Ils contribuent également à faire baisser la congestion routière et y faire baisser les temps de transport. Cependant, nous avons vu que les habitants de la banlieue réagissaient à cette baisse en se reportant vers la voiture. Ce faisant, ils atténuent le désengorgement du réseau routier,

sans toutefois l'annuler. De ce fait, si les durées de déplacement en voiture diminuent en banlieue, ce n'est que faiblement.

Ce sont ces évolutions des durées de déplacement qui, intégrées aux coûts globaux de transports en utilisant la valeur du temps, expliquent les observations faites plus haut sur la figure 71402. L'augmentation de la congestion sur le réseau de transports en commun atténue l'effet de la subvention pour les habitants de la périphérie, qui en bénéficient et fait croître le coût de déplacements par ce mode de transport pour les banlieusards, qui ne sont pas subventionnés. La baisse des durées de déplacement en voiture, dont les coûts monétaires ne sont pas modifiés, diminue les coûts globaux de transport en voiture, plus fortement en périphérie qu'en banlieue.

Au total, quand on se déplace de la droite vers la gauche du graphique de la figure 71406 les coûts globaux moyens baissent pour les passages en périphérie et augmentent, plus faiblement, pour les passages en banlieue. Dans ce dernier cas, c'est le résultat des évolutions similaires que nous avons constaté plus haut pour la voiture et les transports en commun. Dans le premier cas, cela tient au fait que le renforcement de la congestion induit une hausse des coûts de déplacement par les transports en commun qui est trop importante pour être contrebalancée par la baisse des coûts voiture.

**Figure 71406 : Effet de la taxation des déplacements TC en périphérie sur les coûts moyens de déplacement.**

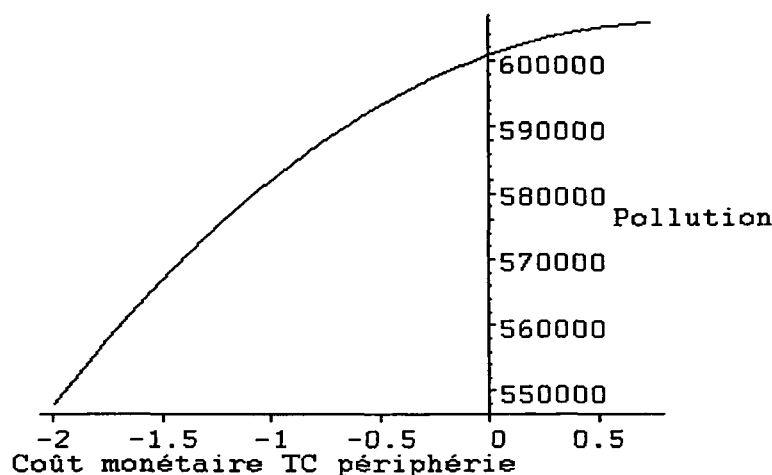


Coût monétaire des déplacements TC en périphérie en K€/an  
Coût moyen du trajet en K€/an

On remarquera qu'ici la subvention des transports en commun en périphérie opère de manière très différente de la taxation de la voiture dans la même zone (Figure 71206). En effet, dans ce second cas, les coûts de transport augmentaient en banlieue comme en périphérie suite à une hausse de la taxe, alors qu'ici nous avons des évolutions en sens opposé. En fait, les mécanismes de base sont les mêmes, mais la balance entre leurs effets change. Dans les deux cas, les coûts de transport en périphérie évoluent parallèlement dans les deux modes de transport, principalement sous l'effet de la taxe ou de la subvention sur le mode de transport qui la subit, sous l'effet du report modal pour l'autre mode de transport. Et dans les deux cas, en banlieue, les effets du report modal font évoluer les coûts de la voiture et ceux des transports en commun en sens opposé. C'est la balance entre ces évolutions opposées qui change.

Avec des coûts de transport plus faibles, le revenu disponible augmente maintenant en périphérie, alors qu'il baisse en banlieue suite à la hausse des coûts de transport qu'on y observe. De plus, la baisse de la part modale de la voiture en périphérie étant d'autant plus faiblement contrebalancée par sa hausse en banlieue que les déplacements à partir de celle-ci sont plus courts et que la diminution de la congestion routière raccourcit les durées de déplacement, on observe une baisse de la pollution, bien visible quand on va de la droite (TC non subventionnés) vers la gauche (TC subventionnés) de la figure 71407.

**Figure 71407 : Effet de la taxation des déplacements TC en banlieue sur la pollution.**

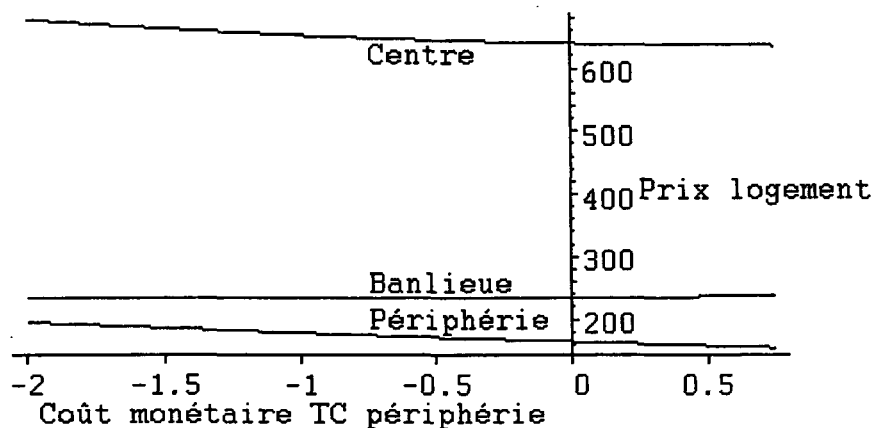


Coût monétaire des déplacements TC en périphérie en K€/an

La pollution est mesurée par la durée totale journalière (en mn) des déplacements automobiles qui la génèrent.

Les deux facteurs ont maintenant des effets divergents sur le marché du logement en banlieue, convergents en périphérie. Au centre, seul l'effet de la baisse de la pollution jouant, les prix fonciers augmentent légèrement. En banlieue, le renforcement de l'attractivité suite à la baisse de la pollution est pratiquement contrebalancé par la hausse des coûts de transport, les prix fonciers sont stables. En périphérie, la baisse de la pollution et la baisse des coûts de transports font tous deux augmenter les prix fonciers<sup>12</sup> (figure 71408).

**Figure 71408 : Effet de la taxation des déplacements TC en périphérie sur les prix fonciers.**



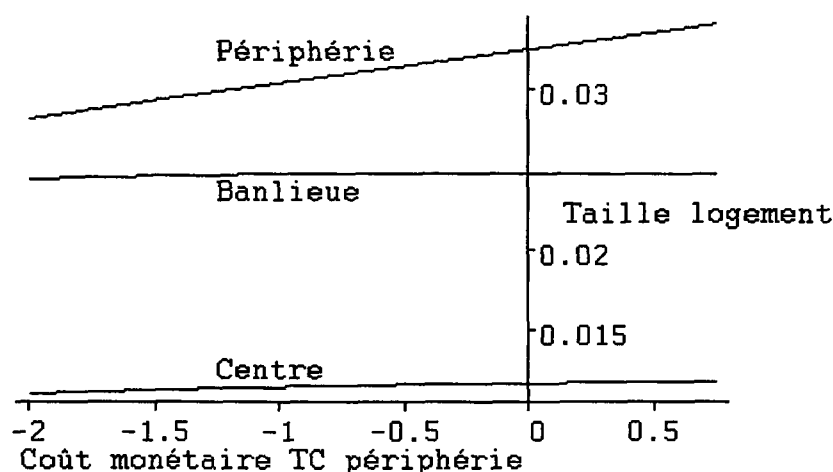
Coût monétaire des déplacements TC en périphérie en K€/an

Prix du logement en K€/hectare et par an

<sup>12</sup> Rappelons, une fois encore, que le raisonnement en termes d'accroissement de la subvention et donc de réduction des coûts monétaires conduit à lire les graphiques de cette section de la droite vers la gauche.

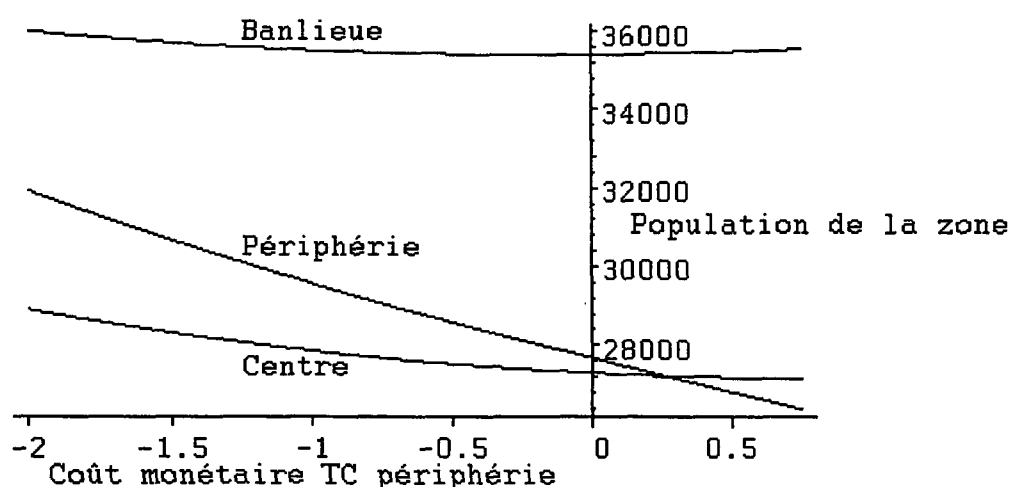
Comme il est logique, la variation des prix fonciers a pour corollaire une variation de la superficie occupée par les ménages et du nombre d'habitants, qu'on observe figures 71409 et 71410.

**Figure 71409 : Effet de la taxation des déplacements TC en périphérie sur la superficie occupée par les habitants.**



Coût monétaire des déplacements TC en périphérie en K€/an  
Taille du logement en hectares

**Figure 71410 : Effet de la taxation des déplacements TC en périphérie sur le nombre de ménages.**



Coût monétaire de stationnement en K€/an  
Population en nombre de ménages

De manière prévisible, les ménages du centre et de la périphérie réagissent à l'augmentation des prix fonciers en substituant de la consommation de biens courants à leur consommation de logement. Quand on augmente la subvention, passant de la droite à la gauche des graphiques 71409 et 71410, la superficie de ces derniers diminue nettement en périphérie, moins au centre, avec pour corollaire une forte augmentation de la population de la périphérie, une augmentation moins marquée de la population du centre. Quant à la banlieue, les prix fonciers n'y évoluant guère, il en est de même de la superficie des logements et la population reste stable.

En résumé, on retrouve, comme dans les scénarios précédents, une ville où la voiture est moins utilisée, ce qui permet de diminuer la pollution. Mais, comme dans le deuxième scénario, le fait de n'intervenir directement que sur la périphérie conduit à des évolutions divergentes de cette dernière et de la banlieue. La structure urbaine à laquelle on aboutit en est la conséquence : si l'usage d'une subvention des transports en commun en périphérie conduit à une ville moins polluée et plus peuplée, la population qui arrive se concentre aux extrêmes, le centre et la périphérie. Ce qui ne va pas dans le sens d'une ville plus compacte.

### 7.1.5 Synthèse et confrontation des scénarios

Nous allons maintenant faire la synthèse et comparer les quatre scénarios précédents qui, rappelons-le, consistaient chacun à manipuler un des instruments fiscaux à la disposition du planificateur :

1. Le paiement du stationnement,
2. La taxation des déplacements à partir de la périphérie (assimilable à un péage urbain).
3. Une subvention uniforme à l'ensemble des déplacements par les transports en commun,
4. La subvention des transports en commun pour les seuls déplacements en périphérie

On comparera tout d'abord, pour le scénario de base et pour chacune des quatre variantes, les coûts monétaires de transport et les niveaux de taxation (signe positif) ou de subvention (signe négatif) qui en résultent (Tableau 71501).

**Tableau 71501 : Coûts monétaires et taxes (signe positif) ou subventions (signe négatif) à l'optimum partiel, en K€/an et par ménage<sup>13</sup>.**

|                         | Scénario de base | Paiement du stationnement | Taxation voiture périphérie | Subvention uniforme TC | Subvention TC périphérie |
|-------------------------|------------------|---------------------------|-----------------------------|------------------------|--------------------------|
| <b>Coûts monétaires</b> |                  |                           |                             |                        |                          |
| Parking                 | 0,00             | 4,75                      | 0,00                        | 0,00                   | 0,00                     |
| Voiture périphérie      | 1,00             | 1,00                      | 4,75                        | 1,00                   | 1,00                     |
| TC banlieue             | 2,25             | 2,25                      | 2,25                        | -0,50                  | 2,25                     |
| TC périphérie           | 0,75             | 0,75                      | 0,75                        | 0,75                   | -1,25                    |
| <b>Taxes</b>            |                  |                           |                             |                        |                          |
| Parking                 | 0,00             | 4,75                      | 0,00                        | 0,00                   | 0,00                     |
| Voiture périphérie      | 0,00             | 0,00                      | 3,75                        | 0,00                   | 0,00                     |
| TC banlieue             | 0,00             | 0,00                      | 0,00                        | -2,75                  | 0,00                     |
| TC périphérie           | 0,00             | 0,00                      | 0,00                        | 0,00                   | -2,00                    |

Comme on l'avait noté plus haut lors de la présentation détaillée de chaque scénario, à l'optimum partiel où il n'utilise qu'un instrument, le planificateur taxe plus la circulation automobile qu'il ne subventionne les transports en commun et intervient plus lourdement avec les instruments qui touchent l'ensemble de la population, banlieue et périphérie (paiement du stationnement et subvention uniforme aux transports en commun) qu'avec les instruments qui touchent seulement la population de la périphérie. Des instruments qui ne touchent directement qu'une partie de la population semblent trouver plus rapidement leurs limites.

Nous allons voir maintenant comment les différents instruments influencent le choix modal (Tableau 71502). Dans le scénario de base, conformément à ce qu'on observe dans les enquêtes transport, les transports en commun sont peu utilisés, surtout en périphérie. Dans

<sup>13</sup> Les coûts monétaires figurant dans ce tableau sont ceux qui correspondent au maximum de la courbe de surplus du scénario correspondant, représentées respectivement en figures 71101 (Paiement du stationnement), 71201 (Taxation voiture périphérie), 71301 (Subvention uniforme TC), 71401 (Subvention TC périphérie). Les autres indicateurs ont été calculés pour ces valeurs des coûts monétaires.

tous les cas, l'usage des instruments tarifaires conduit à des optima partiels où la part des transports en commun a augmenté sur l'ensemble de la ville. Mais, d'une part, les résultats varient fortement d'un scénario à l'autre et les impacts respectifs sur la banlieue et la périphérie sont très différenciés.

**Tableau 71502 : Parts modales des transports en commun à l'optimum partiel.**

|            | Scénario de base | Paiement du stationnement | Taxation voiture périphérie | Subvention uniforme TC | Subvention TC périphérie |
|------------|------------------|---------------------------|-----------------------------|------------------------|--------------------------|
| Banlieue   | 20%              | 98%                       | 6%                          | 78%                    | 12%                      |
| Périphérie | 10%              | 56%                       | 73%                         | 26%                    | 35%                      |
| Ensemble   | 16%              | 80%                       | 30%                         | 56%                    | 22%                      |

En règle générale, on peut dire que le planificateur choisit un optimum conduisant à une part modale des transports en commun d'autant plus élevée qu'il utilise un instrument global touchant toute la population (paiement du stationnement ou subvention aux transports en commun pour tous les usagers) et qu'il préfère la taxation de la circulation automobile à la subvention des transports en commun.

De plus, le choix d'un instrument général (paiement du stationnement ou subvention aux transports en commun pour tous les usagers) a plus d'influence sur le choix modal des habitants de la banlieue que sur celui des habitants de la périphérie qui, bénéficiant de la raréfaction des banlieusards automobilistes, continuent à utiliser largement la voiture. A l'opposé, le choix d'un instrument touchant les seuls habitants de la périphérie ne conduit à un report modal vers les transports en commun que pour ces derniers. La baisse de la congestion routière qui en résulte pousse au contraire les habitants des banlieues à utiliser la voiture encore plus qu'avant.

On trouvera dans le tableau 71503 les conséquences de chacun de ces scénarios sur les durées de déplacement.

**Tableau 71503 : Durées de déplacement à l'optimum partiel, en minutes.**

|                                | Scénario de base | Paiement du stationnement | Taxation voiture périphérie | Subvention uniforme TC | Subvention TC périphérie |
|--------------------------------|------------------|---------------------------|-----------------------------|------------------------|--------------------------|
| TC banlieue                    | 12,3             | 16,1                      | 13,9                        | 15,9                   | 13,3                     |
| TC périphérie                  | 17,9             | 25,8                      | 23,5                        | 24,0                   | 21,7                     |
| Voiture banlieue               | 10,1             | 6,7                       | 9,5                         | 8,9                    | 10,0                     |
| Voiture périphérie             | 13,5             | 9,6                       | 11,9                        | 12,4                   | 13,2                     |
| Moyenne banlieue               | 10,6             | 15,9                      | 9,8                         | 14,4                   | 10,4                     |
| Moyenne périphérie             | 13,9             | 18,7                      | 20,4                        | 15,4                   | 16,1                     |
| Moyenne générale <sup>14</sup> | 8,3              | 10,3                      | 8,9                         | 10,7                   | 9,1                      |

Les durées de déplacement étant déterminées par la congestion, il n'est pas étonnant de constater que, plus le scénario envisagé conduit à un report important de la voiture vers les transports en commun, plus la durée des déplacements par les transports en commun est élevée et plus celle des déplacements en voiture est faible. C'est ainsi que c'est dans le scénario de paiement du stationnement que les durées par les transports en commun sont les plus longues et les durées en voiture les plus courtes ; ce scénario est suivi de près par la subvention uniforme des transports en commun. Les durées moyennes des déplacements en

<sup>14</sup> Cette moyenne générale tient compte de la présence de population au centre, pour laquelle les durées de déplacement sont nulles

banlieue et en périphérie augmentent encore plus en raison du report d'une partie des usagers du mode le plus rapide vers le plus lent. Cependant, si l'on tient compte des différences de répartition de la population, les durées moyennes varient peu, les habitants ayant tendance à quitter les zones où les coûts de transport sont les plus élevés.

Les coûts globaux de déplacement, somme des coûts monétaires et de la valeur monétaire du coût imputé à la durée de déplacement, figurent dans le tableau 71504.

**Tableau 71504 : Coûts globaux de déplacement à l'optimum partiel, en K€/an et par ménage.**

|                                | Scénario de base | Paiement du stationnement | Taxation voiture périphérie | Subvention uniforme TC | Subvention TC périphérie |
|--------------------------------|------------------|---------------------------|-----------------------------|------------------------|--------------------------|
| TC banlieue                    | 5,93             | 7,09                      | 6,43                        | 4,26                   | 6,23                     |
| TC périphérie                  | 8,37             | 10,73                     | 10,05                       | 7,46                   | 7,51                     |
| Voiture banlieue               | 6,03             | 9,77                      | 5,85                        | 5,68                   | 6,01                     |
| Voiture périphérie             | 8,04             | 11,63                     | 11,33                       | 7,71                   | 7,96                     |
| Moyenne banlieue               | 6,57             | 9,53                      | 6,98                        | 5,55                   | 6,82                     |
| Moyenne périphérie             | 8,95             | 11,67                     | 11,24                       | 8,14                   | 8,24                     |
| Moyenne générale <sup>15</sup> | 5,27             | 6,29                      | 5,60                        | 4,79                   | 5,24                     |

C'est, de manière logique, le mode de transport par lequel passent les mesures fiscales dont le coût global varie le plus fortement : en hausse pour la voiture en banlieue et en périphérie avec le paiement du stationnement, en hausse pour la voiture dans la seule périphérie pour la taxation de la voiture dans cette zone, en baisse dans les deux zones avec la subvention uniforme des transports en commun, en baisse dans la seule périphérie avec la subvention des transports en commun réduite à la périphérie. L'autre mode de transport est seulement affecté par les effets de report modal, avec des variations toujours de même sens, mais plus faibles : croissance pour les transports en commun quand on taxe la voiture, baisse pour la voiture quand on subventionne les transports en commun.

Quand on fait les moyennes pour la banlieue et la périphérie, on constate que les variations sont plus fortes avec la taxation de la voiture qu'avec la subvention des transports en commun. Ceci est à relier au fait déjà noté que le planificateur fait une intervention plus forte dans le premier cas que dans le second et que, de plus, il aboutit à un report modal plus important. Cependant, la redistribution de la population entre les différentes zones lisse beaucoup les différences au niveau de la moyenne générale, même si le paiement du stationnement se traduit par une hausse assez forte.

On trouvera tableau 71505 les niveaux de pollution qui résultent des conditions de circulation.

**Tableau 71505 : Niveaux de pollution à l'optimum partiel<sup>16</sup>.**

|           | Scénario de base | Paiement du stationnement | Taxation voiture périphérie | Subvention uniforme TC | Subvention TC périphérie |
|-----------|------------------|---------------------------|-----------------------------|------------------------|--------------------------|
| Pollution | 605861           | 131931                    | 434139                      | 425053                 | 574801                   |

<sup>15</sup> Comme dans le cas précédent, cette moyenne générale tient compte de la présence de population au centre, pour laquelle les durées de déplacement sont nulles

<sup>16</sup> Rappelons que la pollution est mesurée par la durée totale journalière (en mn) des déplacements automobiles qui la génèrent.

Le scénario de paiement du stationnement est, de loin, celui qui parvient le mieux à maîtriser la pollution. La baisse est spectaculaire. Elle reste importante quand on taxe la voiture dans la seule périphérie ou quand on subventionne de manière uniforme les transports en commun. Elle est faible quand on se contente de subventionner les transports en commun en périphérie. De manière générale, la capacité à réduire la pollution est à relier à l'intensité de l'intervention à l'optimum et à sa capacité à transférer des usagers de la voiture vers les transports en commun, ce qui est logique quand on tient compte de l'hypothèse que nous avons faite d'une pollution générée par le seul trafic automobile. Une pollution générée également par les transports en commun, mais avec une intensité moindre qu'avec la voiture, réduirait les écarts mais ne modifierait pas la nature des différences entre scénarios.

On trouvera les prix fonciers dans le tableau 71506.

**Tableau 71506 : Prix fonciers à l'optimum partiel, en K€/ha et par an.**

|            | Scénario de base | Paiement du stationnement | Taxation voiture périphérie | Subvention uniforme TC | Subvention TC périphérie |
|------------|------------------|---------------------------|-----------------------------|------------------------|--------------------------|
| Centre     | 636              | 1098                      | 769                         | 777                    | 658                      |
| Banlieue   | 237              | 238                       | 266                         | 343                    | 234                      |
| Périphérie | 154              | 153                       | 118                         | 219                    | 182                      |

La variation des prix fonciers au centre, dont les habitants ne sont pas affectés par la variation des coûts de transport, est le reflet de la réduction de la pollution: très forte hausse pour le premier scénario, hausse modérée pour les deux scénarios suivants, hausse faible pour le dernier. Comme on l'a précisé dans le commentaire détaillé de chaque scénario, en banlieue et en périphérie, la variation des prix fonciers est déterminée par le jeu spécifique des deux forces que sont la baisse de la pollution, qui pousse à la hausse, et la variation des coûts de transport qui, suivant les cas, pousse également à la hausse ou au contraire est facteur de baisse.

La taille des logements et la population de chaque zone sont donnés par le tableau 71507.

**Tableau 71507 : Superficie des logements (ha) et population des ménages à l'optimum partiel.**

|                                 | Scénario de base | Paiement du stationnement | Taxation voiture périphérie | Subvention uniforme TC | Subvention TC périphérie |
|---------------------------------|------------------|---------------------------|-----------------------------|------------------------|--------------------------|
| <b>Superficie des logements</b> |                  |                           |                             |                        |                          |
| Centre                          | 0,0118           | 0,0068                    | 0,0098                      | 0,0097                 | 0,0114                   |
| Banlieue                        | 0,0248           | 0,0215                    | 0,0216                      | 0,0178                 | 0,0247                   |
| Périphérie                      | 0,0341           | 0,0299                    | 0,0399                      | 0,0249                 | 0,0299                   |
| <b>Population des ménages</b>   |                  |                           |                             |                        |                          |
| Centre                          | 27142            | 46834                     | 32795                       | 33133                  | 28069                    |
| Banlieue                        | 35538            | 40914                     | 40721                       | 49330                  | 35604                    |
| Périphérie                      | 26368            | 30054                     | 22562                       | 36077                  | 30106                    |
| Totale                          | 89049            | 117801                    | 96078                       | 118540                 | 93778                    |

On voit une nette opposition entre les deux scénarios où l'intervention est globale (paiement du stationnement et subvention uniforme des transports en commun) et les deux scénarios où seuls les usagers de la périphérie font l'objet d'une intervention directe. La population de la ville à l'optimum est nettement plus élevée dans le premier cas que dans le second. Cependant, si les populations sont voisines dans le premier et le troisième scénario,

c'est pour des raisons différentes. La ville où le stationnement est payant (et cher) attire parce qu'elle pollue peu, mais les déplacements y sont coûteux. A l'opposé, la ville où l'usage des transports en commun est uniformément subventionnée attire parce que les coûts de transport sont faibles ; mais elle pollue beaucoup plus que la précédente.

On notera de plus des différences importantes de structure d'un scénario à l'autre. La ville du premier scénario (paiement du stationnement) est la plus compacte. C'est la seule où le centre est dominant et la périphérie, tout en étant plus peuplée que dans le scénario de base, y reste un peu à la traîne par rapport aux deux autres zones. En taxant les seuls déplacements voiture à la périphérie, le planificateur diminue l'importance de cette dernière, mais aussi celle du centre qui bénéficie moins de la réduction de la pollution. En subventionnant de manière uniforme les transports en commun, il attire plus d'habitants dans la banlieue que dans les autres zones, la ville est moins compacte. Enfin, dans le dernier scénario, il y a peu de différences par rapport à la structure du scénario de base.

On trouvera enfin tableau 71508 le surplus que dégage la ville dans chaque scénario.

**Tableau 71508 : Surplus à l'optimum partiel, en K€ par an.**

|         | Scénario de base | Paiement du stationnement | Taxation voiture périphérie | Subvention uniforme TC | Subvention TC périphérie |
|---------|------------------|---------------------------|-----------------------------|------------------------|--------------------------|
| Surplus | 304603           | 519005                    | 362766                      | 369107                 | 313934                   |

On retrouve des différences entre scénarios similaires à celles qu'on avait constatées au sujet de la réduction de la pollution. En termes de surplus économique, un scénario visant à faire payer l'usage de la voiture à l'ensemble des usagers, comme c'est le cas du paiement du stationnement, est beaucoup plus performant que les autres, et ce parce qu'il parvient beaucoup plus que les autres à faire basculer le partage modal en faveur des transports en commun. Se restreindre à une cible spécifique ou passer à la subvention des transports en commun permet d'augmenter sensiblement le surplus par rapport au scénario de base, mais beaucoup moins que dans le premier cas. Quand à une subvention des transports en commun ciblée sur la seule périphérie, elle n'a que peu d'effets.

En conclusion, une politique partielle, c'est à dire fondée sur un seul instrument, paraît d'autant plus efficace qu'en taxant la voiture elle en dissuade l'usage et qu'elle touche la population dans son ensemble. Il y là un argument fort en faveur de la tarification du stationnement, si du moins cette dernière n'entraîne pas une forte augmentation du stationnement illégal, une question que nous avons laissée à l'écart de nos analyses.

## 7.2 L'optimisation globale

Nous avons fait maintenant un exercice d'optimisation globale. Le planificateur utilise la panoplie complète des instruments tarifaires et en détermine la valeur qui permet de maximiser le surplus. Nous allons maintenant décrire la situation à laquelle il parvient. Nous la comparerons au scénario de référence. Nous nous interrogerons en outre sur ce qu'ajoute l'optimisation quantitative de la superficie disponible au centre pour le stationnement, en faisant varier celle-ci à partir du scénario de base et à partir de l'optimum tarifaire.

On trouvera tableau 72001 les différents niveaux des coûts monétaires et des taxes pour un ensemble de cinq scénarios. En première colonne, à fin de comparaisons, on retrouve le scénario de base : aucune tarification, les coûts monétaires subis par les usagers étant égaux aux coûts marginaux ; et la superficie consacrée aux parking est celle qui figurait dans nos hypothèses de départ, soient 55 hectares. En deuxième colonne, figure le résultat d'une optimisation tarifaire : sans toucher à la superficie des parkings, le planificateur maximise le

surplus en jouant de toute la gamme des instruments tarifaires : paiement du stationnement, taxation de la voiture au départ de la périphérie (assimilable à un péage urbain), taxation et ou subvention de l'usage des transports en commun dans chacune des deux zones. En troisième colonne, à l'opposé, le planificateur optimise la superficie consacrée au stationnement sans toucher aux instruments tarifaires, les coûts monétaires subis par les usagers étant donc égaux aux coûts marginaux. En quatrième colonne, le planificateur part de l'optimum tarifaire et modifie la superficie des parkings pour en déterminer la valeur optimale pour cette structure tarifaire. Enfin, dans notre dernier scénario, le planificateur part de la superficie du scénario précédent et il cherche à voir dans quelle mesure ce changement de superficie modifie la structure tarifaire optimale. Enfin, on trouvera tableau 72002 les superficies de parking correspondant à chacun des scénarios.

**Tableau 72001 : Coûts monétaires et taxes (signe positif) ou subventions (signe négatif) à l'optimum global, en K€/an et par ménage.**

|                         | Scénario de base | Optimum tarifaire | Parkings optimaux sur scénario de base | Parkings optimaux sur optimum tarifaire | Deuxième optimisation tarifaire |
|-------------------------|------------------|-------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------|
| <b>Coûts monétaires</b> |                  |                   |                                        |                                         |                                 |
| Parking                 | 0,00             | 4,78              | 0,00                                   | 4,78                                    | 4,75                            |
| Voiture périphérie      | 1,00             | 3,55              | 1,00                                   | 3,55                                    | 3,56                            |
| TC banlieue             | 2,25             | 3,22              | 2,25                                   | 3,22                                    | 3,22                            |
| TC périphérie           | 0,75             | 1,34              | 0,75                                   | 1,34                                    | 1,38                            |
| <b>Taxes</b>            |                  |                   |                                        |                                         |                                 |
| Parking                 | 0,00             | 4,78              | 0,00                                   | 4,78                                    | 4,75                            |
| Voiture périphérie      | 0,00             | 2,55              | 0,00                                   | 2,55                                    | 2,56                            |
| TC banlieue             | 0,00             | 0,97              | 0,00                                   | 0,97                                    | 0,97                            |
| TC périphérie           | 0,00             | 0,59              | 0,00                                   | 0,59                                    | 0,63                            |

**Tableau 72002 : Superficies de parking pour différents scénarios, en ha**

|                     | Scénario de base | Optimum tarifaire | Parkings optimaux sur scénario de base | Parkings optimaux sur optimum tarifaire | Deuxième optimisation tarifaire |
|---------------------|------------------|-------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------|
| Superficie parkings | 55               | 55                | 240                                    | 95                                      | 95                              |

A l'optimum tarifaire, le tarif appliqué au stationnement est sensiblement le même que quand le planificateur faisait payer le seul stationnement (4,78 contre 4,75). Par contre, le tarif du péage appliqué aux automobilistes de la périphérie est sensiblement inférieur à celui qui était appliqué dans le scénario correspondant d'optimisation partielle (2,55 contre 3,75) et surtout, la subvention aux transports en commun disparaît. Que ce soit pour les passages en banlieue ou en périphérie, les usagers des transports en commun sont maintenant taxés, quoique beaucoup moins que les automobilistes. Ces résultats s'expliquent assez bien. En l'absence d'une taxation qui frappe l'ensemble des automobilistes, le planificateur qui ne peut taxer que les automobilistes partant de la périphérie est conduit à surtaxer ces derniers par rapport à l'optimum global car c'est le seul instrument dont il dispose pour réduire la pollution.

D'autre part, le planificateur ne peut réduire la pollution qu'en diminuant l'usage de la voiture ; de même, il ne peut réduire la congestion globale qu'en rééquilibrant les parts

modales en direction du mode de transport le moins congestionné, qui sont les transports en commun dans le scénario de base. Dans les deux cas, il faut qu'il pousse les usagers à passer de la voiture aux transports en commun, ce qu'il ne peut faire qu'en jouant sur la différence de coût monétaire entre les deux modes de transports. Le coût monétaire des transports en commun doit être suffisamment faible par rapport à celui de la voiture pour inciter une proportion suffisante d'usagers à se reporter de l'une à l'autre.

En l'absence de taxation des déplacements automobiles, le planificateur n'a d'autre solution que de subventionner les transports en commun. Et nous avons vu que pour que le différentiel soit suffisant, il fallait même payer les usagers des transports en commun. Mais cette subvention n'est que la contrepartie de l'impossibilité de taxer la voiture. Quand cette taxation est rétablie, on retrouve une logique pigouvienne. Toutes les personnes qui se déplacent sont taxées car toutes sont à l'origine d'externalités négatives. Les usagers des transports ne sont à l'origine que d'externalités de congestion, à la contribution marginale desquelles chacun est taxé ; à ces dernières, les automobilistes ajoutent des externalités de pollution, ce qui explique qu'ils soient plus lourdement taxés.

Les scénarios des colonnes trois et quatre permettent de confronter choix tarifaires et choix qualitatifs qui, dans un contexte de politique de stationnement, revient à choisir le volume d'infrastructure affecté à cet usage. Nous l'avons fait en partant de deux situations différentes. Dans le scénario de la troisième colonne, nous sommes partis de la situation de base, aucun mode de transport n'étant taxé. Dans le scénario de la quatrième colonne, nous sommes partis de l'optimum tarifaire calculé avec la surface de stationnement du scénario de base.

Comme on peut le constater sur le tableau 72002, la superficie optimale de stationnement est très différente entre les deux scénarios. Elle est beaucoup plus importante dans le premier cas que dans le second (240 ha contre 95 ha). En conséquence, une optimisation isolée de la superficie des parkings, non accompagnée d'une optimisation des taxes, conduit à consacrer des superficies très importantes au stationnement ; il suffit de comparer les 240 hectares de parkings au centre ville aux 360 hectares de logement... Et ces superficies sont beaucoup trop importantes car beaucoup plus élevées que les 95 hectares considérés comme optimaux dans une situation qui, mobilisant plus d'instruments, est a priori supérieure sur le plan économique.

Cet excès n'est pas étonnant. En l'absence de taxes, la circulation automobile est excessive. Et c'est par rapport à cette circulation excessive que l'on calcule l'avantage marginal des places de stationnement supplémentaires pour les comparer à leur coût. Or, l'excès de circulation conduit à des avantages marginaux plus élevés car la capacité des places supplémentaires à réduire une congestion beaucoup plus importante est beaucoup plus forte. Ainsi, l'absence de politique tarifaire conduit à une distorsion des choix d'aménagement qui s'avère très importante.

En optimisant les choix de taxation puis, sur cette base, les choix d'infrastructure, il n'est pas sûr que nous ayons atteint un optimum global combinant les deux types d'instrument. En effet, en modifiant la superficie consacrée au stationnement, nous avons modifiée la structure spatiale sur la base de laquelle était calculé l'optimum tarifaire. Pour le vérifier, le scénario de la dernière colonne recalcule les taxes optimales avec les nouvelles superficies de parkings. Les modifications tarifaires sont marginales et l'on peut donc conclure à un optimum global pour l'ensemble des instruments utilisés.

Avant d'examiner comment les différents scénarios influencent les comportements des habitants, nous allons examiner leur efficacité à réduire la pollution et à augmenter le surplus (Tableau 72003).

**Tableau 72003 : Niveau de pollution et Surplus pour chacun des scénarios.**

|           | Scénario de base | Optimum tarifaire | Parkings optimaux sur scénario de base | Parkings optimaux sur optimum tarifaire | Deuxième optimisation tarifaire |
|-----------|------------------|-------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------|
| Pollution | 605861           | 75258             | 579295                                 | 78315                                   | 81140                           |
| Surplus   | 304603           | 572403            | 331793                                 | 573191                                  | 573216                          |

Ce tableau permet de souligner le fait que l'instrument tarifaire est de loin le plus efficace, tant pour diminuer le niveau de pollution que pour maximiser le surplus. Même en l'absence de toute modification des superficies consacrées au stationnement, l'essentiel du chemin est parcouru avec les seuls instruments fiscaux. L'usage de la panoplie complète de ces instruments permet d'améliorer sensiblement les performances par rapport au meilleur résultat avec un seul instrument. En effet, nous avons vu plus haut qu'en se contentant de tarifier le stationnement, la pollution descendait au niveau de 131 931 et le surplus atteignait la valeur de 519 005. Ce seul instrument de tarification du stationnement avait déjà permis d'obtenir de bons résultats. L'ajout des autres taxes permet de descendre encore le niveau de pollution à la valeur de 75 258 et de faire monter le surplus au niveau de 572 403. Le passage à une superficie optimale pour le stationnement n'a plus qu'un effet marginal.

Compte tenu de ce caractère marginal de l'intervention sur le stationnement par rapport à la taxation, nous allons maintenant comparer les conséquences sur le comportement du consommateur de l'optimisation partielle du seul tarif de stationnement, de l'optimum tarifaire, et de l'optimisation de la superficie du stationnement à partir du scénario de base. On trouvera d'abord tableau 72004 les résultats sur la part modale des transports en commun.

**Tableau 72004 : Parts modales des transports en commun pour différents scénarios.**

|            | Scénario de base | Paiement du stationnement | Optimum tarifaire | Parkings optimaux sur scénario de base |
|------------|------------------|---------------------------|-------------------|----------------------------------------|
| Banlieue   | 20%              | 98%                       | 85%               | 12%                                    |
| Périphérie | 10%              | 56%                       | 83%               | 7%                                     |
| Ensemble   | 16%              | 80%                       | 84%               | 10%                                    |

Par rapport au scénario de paiement du seul stationnement, l'optimum tarifaire permet d'augmenter encore la part moyenne des transports en commun, qui passe de 80% à 84%. Cependant, en ajoutant à la tarification du stationnement la taxation des déplacements en périphérie, ce qui lui permet de discriminer les deux catégories d'automobilistes, le planificateur atteint ses objectifs avec un tarif de stationnement plus faible auquel s'ajoute, pour les habitants de la périphérie, le péage qui les frappe. Avec pour conséquence l'augmentation des parts modales des transports en commun dans les deux zones. Par rapport au scénario de seul paiement du stationnement, l'optimum tarifaire se caractérise par une part modale nettement plus élevée de la voiture en périphérie, où la somme des deux taxes fait augmenter les coûts voitures ; et par une part plus faible en banlieue, qui bénéficie de l'allègement du tarif de stationnement et de la diminution de la congestion qu'entraîne la progression de la part des transports en commun en périphérie. Il en résulte une part modale des transports en commun qui varie peu entre la banlieue et la périphérie.

Quant à l'optimisation de la superficie de stationnement en l'absence de politique tarifaire, elle favorise la voiture, ce qui se traduit par une forte réduction (presque de moitié) de la part, déjà faible, des transports en commun et ce en banlieue comme en périphérie.

On trouvera tableau 72005 les durées de déplacement dans les différents cas. Par rapport au scénario de seul paiement du stationnement, les durées de déplacement par les transports en commun sont quasiment inchangées, en banlieue comme en périphérie. Ceci tient au fait que, les nouveaux usagers des transports en commun à partir de la périphérie étant compensés par une réduction en banlieue, l'augmentation de la part modale des transports en commun reste peu élevée. Ce même changement est relativement plus important pour la voiture dont la part modale est faible, ce qui explique une légère réduction des durées de déplacement pour ce mode. Au final, si la durée moyenne de déplacement en banlieue a légèrement diminué, le report vers un mode de transport plus lent conduit à une durée moyenne de déplacement à partir de la périphérie sensiblement plus importante, sans qu'on retrouve cette évolution dans la moyenne générale en raison des changements de structure de la population.

**Tableau 72005 : Durées de déplacement pour différents scénarios, en minutes.**

|                                | Scénario de base | Paiement du stationnement | Optimum tarifaire | Parkings optimaux sur scénario de base |
|--------------------------------|------------------|---------------------------|-------------------|----------------------------------------|
| TC banlieue                    | 12,3             | 16,1                      | 16,1              | 11,3                                   |
| TC périphérie                  | 17,9             | 25,8                      | 26,0              | 16,6                                   |
| Voiture banlieue               | 10,1             | 6,7                       | 6,3               | 8,1                                    |
| Voiture périphérie             | 13,5             | 9,6                       | 8,6               | 11,5                                   |
| Moyenne banlieue               | 10,6             | 15,9                      | 14,6              | 8,4                                    |
| Moyenne périphérie             | 13,9             | 18,7                      | 23,0              | 11,9                                   |
| Moyenne générale <sup>17</sup> | 8,3              | 10,3                      | 9,9               | 7,0                                    |

Quant à l'optimisation de la superficie des parkings en l'absence d'intervention tarifaire, elle permet de réduire la congestion routière ainsi que celle des transports en commun, qui perdent des usagers au profit de la voiture. Ce qui dans les deux cas diminue les durées de déplacement.

On trouvera tableau 72006 les coûts globaux de déplacement, somme des coûts monétaires et de la valeur monétaire des durées de déplacement.

**Tableau 72006 : Coûts globaux de déplacement pour différents scénarios, en K€/an et par ménage.**

|                                | Scénario de base | Paiement du stationnement | Optimum tarifaire | Parkings optimaux sur scénario de base |
|--------------------------------|------------------|---------------------------|-------------------|----------------------------------------|
| TC banlieue                    | 5,93             | 7,09                      | 8,05              | 5,64                                   |
| TC périphérie                  | 8,37             | 10,73                     | 12,35             | 7,98                                   |
| Voiture banlieue               | 6,03             | 9,77                      | 9,68              | 5,42                                   |
| Voiture périphérie             | 8,04             | 11,63                     | 13,92             | 7,45                                   |
| Moyenne banlieue               | 6,57             | 9,53                      | 9,52              | 6,23                                   |
| Moyenne périphérie             | 8,95             | 11,67                     | 13,76             | 8,54                                   |
| Moyenne générale <sup>18</sup> | 5,27             | 6,29                      | 6,23              | 5,10                                   |

<sup>17</sup> Cette moyenne générale tient compte de la présence de population au centre, pour laquelle les durées de déplacement sont nulles

<sup>18</sup> Comme dans le cas précédent, cette moyenne générale tient compte de la présence de population au centre, pour laquelle les durées de déplacement sont nulles

Le passage du paiement du seul stationnement à l'optimum tarifaire conduisant à taxer spécifiquement les usagers de la périphérie avec pour conséquence, comme on vient de le voir, un report sur un mode plus lent, on ne sera pas surpris de constater que le coût global moyen de transport a augmenté en périphérie, essentiellement du fait de la voiture ; les coûts des transports en commun ont également augmenté, en banlieue comme en périphérie, pour l'essentiel du fait de l'instauration d'une taxe. Par contre, du fait du rééquilibrage de la population entre les zones, la moyenne générale des coûts de transport a diminué.

Quant à l'optimisation de la seule superficie de stationnement, dans la mesure où elle ne modifie pas les coûts monétaires et réduit les durées de déplacement pour les deux modes de transport, elle réduit également les coûts globaux de transport.

On trouvera enfin les prix fonciers dans le tableau 72007, la superficie des logements et la population de chacune des zones dans le tableau 72008. Plus attractive grâce à une nouvelle réduction de pollution, la ville de l'optimum tarifaire voit ses prix fonciers augmenter au centre et en banlieue. Par contre, le renchérissement des coûts de transport en périphérie pèse sur la disposition à payer des ménages pour s'y loger et les prix fonciers y baissent fortement. Par rapport au scénario de base, l'optimisation de la seule superficie de stationnement ayant légèrement réduit les coûts de transport, les prix fonciers augmentent dans les trois zones.

**Tableau 72007 : Prix fonciers pour différents scénarios, en K€/ha et par an.**

|            | Scénario de base | Paiement du stationnement | Optimum tarifaire | Parkings optimaux sur scénario de base |
|------------|------------------|---------------------------|-------------------|----------------------------------------|
| Centre     | 636              | 1098                      | 1178              | 655                                    |
| Banlieue   | 237              | 238                       | 256               | 258                                    |
| Périphérie | 154              | 153                       | 101               | 171                                    |

L'évolution des superficies occupées et de la population est, comme dans les analyses antérieures, gouvernée par ce mécanisme de modification des prix et par les substitutions entre consommation de logement et autres dépenses qu'il induit. Par rapport à la ville où seul le stationnement est tarifé, la ville de l'optimum tarifaire a gagné des habitants au centre et en banlieue où, face à la hausse des prix fonciers, les ménages occupent des superficies plus faibles. Mais le renchérissement des coûts de transport en périphérie y ayant fait fortement baisser les prix, les superficies occupées par les ménages y augmentent fortement, d'où une diminution importante de la population. On aboutit à une ville légèrement plus petite et qui, ayant perdu une bonne partie des habitants de sa périphérie, s'avère encore plus compacte.

Comparée à la ville du scénario de base, la ville où seul le stationnement est optimisé ayant vu ses prix fonciers augmenter légèrement, les superficies occupées diminuent légèrement dans les trois zones et la population augmentent légèrement. Les différences restent cependant marginales.

**Tableau 72008 : Superficie des logements (ha) et population des ménages pour différents scénarios.**

|                                 | Scénario de<br>base | Paiement du<br>stationnement | Optimum<br>tarifaire | Parkings<br>optimaux sur<br>scénario de<br>base |
|---------------------------------|---------------------|------------------------------|----------------------|-------------------------------------------------|
| <b>Superficie des logements</b> |                     |                              |                      |                                                 |
| Centre                          | 0,0118              | 0,0068                       | 0,0064               | 0,0115                                          |
| Banlieue                        | 0,0248              | 0,0215                       | 0,0200               | 0,0230                                          |
| Périphérie                      | 0,0341              | 0,0299                       | 0,0402               | 0,0313                                          |
| <b>Population des ménages</b>   |                     |                              |                      |                                                 |
| Centre                          | 27142               | 46834                        | 50255                | 27932                                           |
| Banlieue                        | 35538               | 40914                        | 43998                | 38202                                           |
| Périphérie                      | 26368               | 30054                        | 22409                | 28740                                           |
| Totale                          | 89049               | 117801                       | 116662               | 94875                                           |

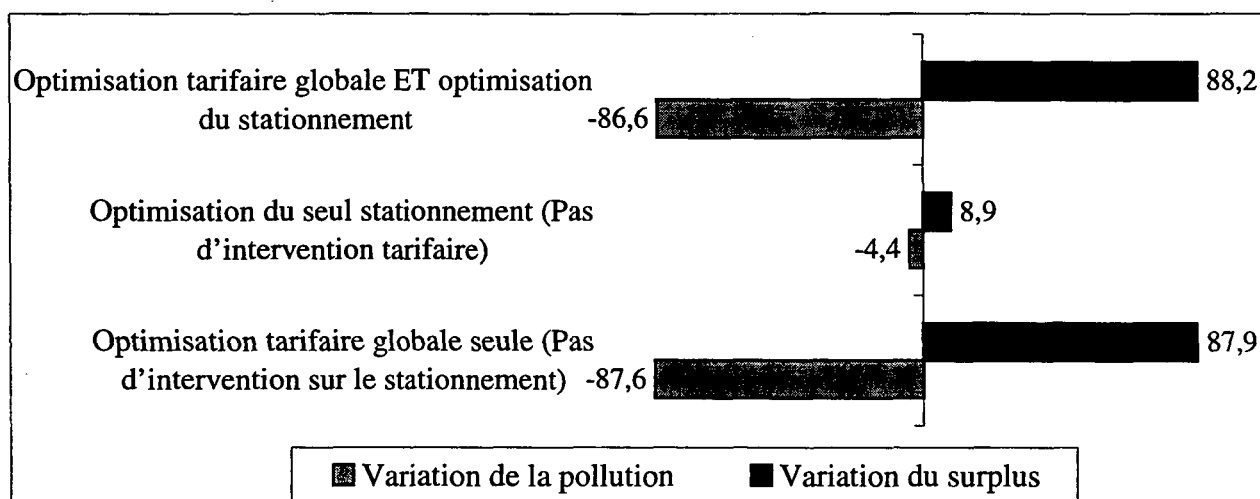
## 8 CONCLUSION GÉNÉRALE

Au terme de ces simulations, quelques conclusions générales s'imposent de la comparaison entre les différents scénarios d'optimisation, partiels ou plus généraux. Résumons les principales :

### *Les politiques tarifaires sont les instruments essentiels, loin devant l'offre de stationnement*

Elles sont essentielles pour l'amélioration des fonctionnements urbains, que ce soit pour réduire la pollution ou, plus généralement, améliorer l'efficacité des fonctionnements urbains. C'est une application triviale du principe de taxation des externalités : en prenant sa voiture, un habitant augmente la congestion automobile, et donc (même très faiblement) la durée de déplacement des autres usagers ; et il augmente le niveau de pollution. Il doit donc payer le coût du temps qu'il fait perdre aux autres automobilistes et le coût de la pollution qu'il génère, sous forme de taxes. Les simulations confirment très fortement l'importance de ces taxes. Le graphique 801 montre la variation du niveau de pollution et du surplus économique de la ville en fonction de l'usage ou non des instruments tarifaires et quantitatifs.

**Graphique 801 : Effets des optimisations tarifaires et quantitatives sur la pollution et le surplus (%)**



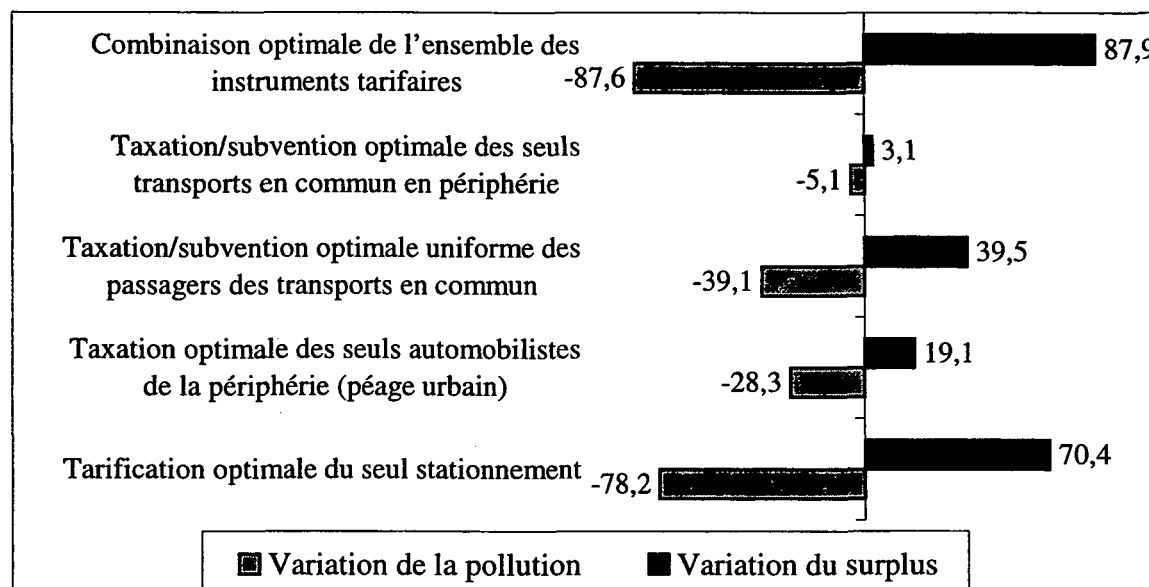
Les leçons de ce graphique sont claires : alors que la politique tarifaire a des effets très importants, une politique d'offre quantitative de stationnement n'a guère d'efficacité quand elle est utilisée seule. Elle doit être combinée avec une politique tarifaire appropriée. Cependant, même dans ce cas, l'amélioration qu'elle apporte est marginale. L'essentiel du chemin est parcouru avec les seuls instruments tarifaires. La politique de stationnement utilisée seule risque de plus de conduire à un très important excès d'offre, favorisant une circulation automobile déjà excessive.

### *Les instruments tarifaires globaux ont plus d'effet que des mesures partielles ne visant qu'une seule zone (comme un péage urbain)*

Si l'on ne peut jouer sur la totalité de la gamme des instruments tarifaires, on a avantage à utiliser les instruments les plus généraux, applicables à l'ensemble de la population concernée, plutôt que des instruments partiels applicables à une seule catégorie de population. Les instruments généraux peuvent certes pêcher par une plus faible capacité à discriminer entre des populations différentes qui ne contribuent pas au même niveau à la pollution et à la congestion. Ainsi, par exemple, un automobiliste partant de la périphérie circule plus

longtemps et parcourt des distances plus longues qu'un automobiliste partant de la banlieue, à proximité du centre. De ce fait, le premier contribue plus à la congestion automobile et pollue plus que le second. Il devrait donc être taxé plus lourdement, ce que ne permet pas aisément un instrument général. Il en résulte un écart à l'optimum qu'on pourrait obtenir en individualisant la contribution de chacun. Mais il apparaît que cet écart est faible par rapport aux inefficacités qu'engendre le fait de laisser certaines catégories de population à l'écart des politiques tarifaires. Le graphique 802, qui reprend les variations de pollution et de surplus induites par chacun des instruments tarifaires illustre bien ce fait.

**Graphique 802 : Effets des différents instruments tarifaires sur la pollution et le surplus (%)**



Que ce soit pour la voiture ou pour les transports en commun, les effets de l'instrument global (troisième et cinquième ligne) sont nettement plus importants que les effets de l'instrument partiel (deuxième et quatrième ligne). Il y a ici un argument très important en faveur des politiques de stationnement dont on peut constater que leur seule mise en œuvre permet déjà de se rapprocher fortement de l'optimum global.

***Les politiques de taxation de la circulation automobile sont plus efficaces que les aides aux transports collectifs***

Quand elles peuvent être mises en œuvre, il est essentiel de recourir aux politiques de taxation de la circulation automobile. Comme on peut le constater en comparant la deuxième et la troisième ligne du graphique 802 présenté au point précédent avec la quatrième et la cinquième ligne, elles apparaissent beaucoup plus efficaces que les politiques tarifaires portant sur les seuls transports en commun, plus susceptibles d'influer sur le report modal.

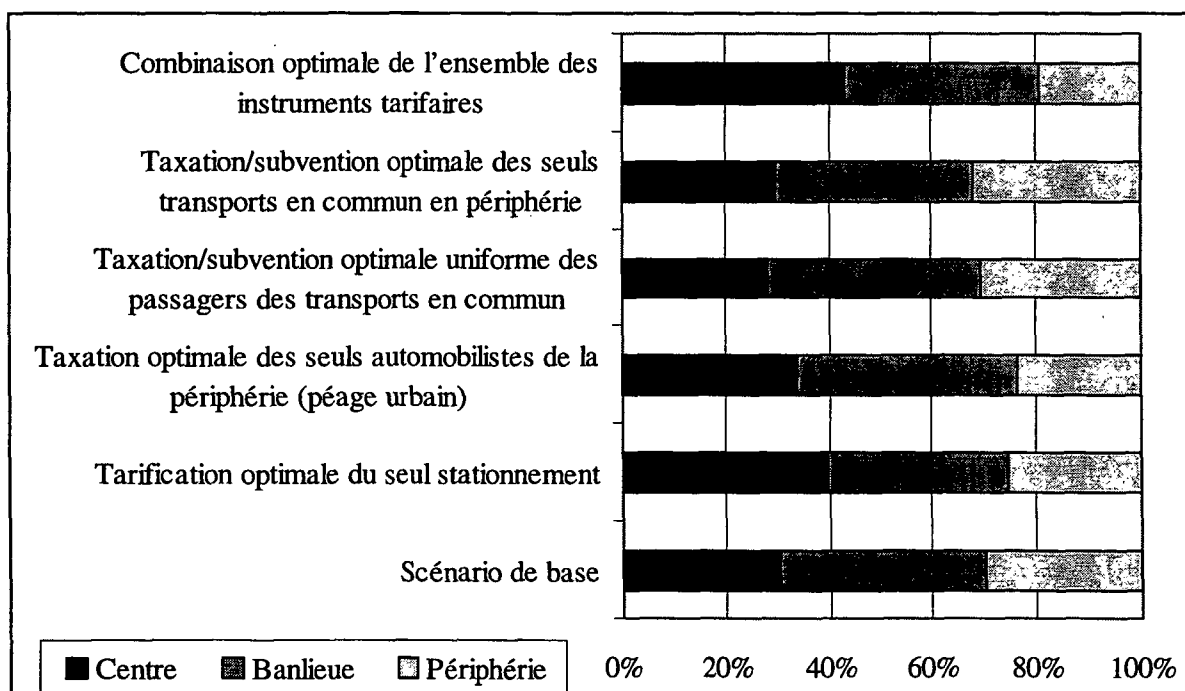
Qui plus est, en leur absence, le planificateur est contraint de subventionner les transports en commun, ce qui va à l'encontre du principe de taxation des externalités de congestion rappelé plus haut. C'est ainsi que, dans le scénario de taxation ou subvention uniforme des usagers des transports en commun, à l'optimum, on va même jusqu'à payer les usagers pour qu'ils empruntent les transports en commun. Il en est de même, de manière encore plus marquée dans le scénario de taxation ou subvention des transports en commun dans la seule périphérie. Ces valeurs sont à comparer aux résultats de l'optimum tarifaire global, où maintenant les usagers des transports en commun sont taxés.

La difficulté évidemment est de mettre en œuvre la tarification automobile dont on sait bien qu'elle pose des problèmes techniques et d'acceptabilité politique, que le présent modèle n'explore pas. On notera cependant que cet argument va, là encore, en faveur des politiques de stationnement, qui sont parmi les mesures les plus aisées à mettre en œuvre pour taxer la circulation automobile, permettant alors à une tarification adaptée des transports en commun de jouer son rôle.

***D'avantage d'étalement urbain quand les transports en commun sont fortement subventionnés***

Le choix d'une politique tarifaire a des conséquences importantes sur la structure de la ville, comme on peut le voir sur le graphique 803, en comparant le scénario de base avec chacune des autres scénarii. Quand tous les instruments tarifaires sont utilisés, la ville devient compacte, avec un centre dont la part a fortement augmenté et une périphérie peu peuplée. A l'opposé, si le planificateur n'utilise pas la taxation de véhicules automobiles, se contentant de subventionner les transports en commun en périphérie, l'importance de cette dernière augmente au détriment du centre et de la banlieue.

**Graphique 803 : Répartition de la population entre centre, banlieue et périphérie, suivant le scénario (%)**



## LES ÉQUATIONS DU MODÈLE

Cette annexe décrit le modèle de manière détaillée, avec l'ensemble de ses hypothèses techniques.

### A1.1 Structure physique

La ville comporte un centre urbain (repéré par  $x=0$ ) où sont localisés tous les emplois ainsi qu'une partie de la population résidente, et deux couronnes résidentielles, la banlieue et la périphérie (repérées respectivement par  $x=1$  et  $x=2$ ). Il n'y a pas de coûts de déplacement à l'intérieur du centre urbain (on pourrait également envisager un coût forfaitaire, mais cela ne changerait pas grand chose). La quantité de terre disponible dans la zone  $x$  est égale à  $S(x)$ . En banlieue et en périphérie, cette quantité de terre peut être répartie entre trois usages, l'usage résidentiel, en quantité  $L(x)$ , l'usage routier (stationnement inclus) en quantité  $R(x)$  et l'usage par les transports en communs, en quantité  $A(x)$ . On a évidemment

$$S(x) \leq L(x) + R(x) + A(x)$$

Les entreprises occupent une superficie nulle. Les ménages consomment directement de la terre. On néglige donc l'existence du bâti.

### A1.2 Structure résidentielle

Les habitants de la ville, tous identiques (dans cette première version), font un arbitrage entre leur consommation de bien banal monétaire,  $m$ , et leur consommation de terre,  $h$ , sur la base de préférences représentables par la fonction d'utilité  $U(m, h)$ . La contrainte budgétaire d'un habitant localisé dans la zone  $x$  est

$$m + p_h(x) \leq w - t(x)$$

où  $w$  est le niveau des ressources du consommateur,  $p_h(x)$  est le prix de la terre à une distance  $x$  du centre et  $t(x)$  est le coût de transport vers le centre, déterminé plus haut. Les terres aménagées étant parfaitement substituables entre elles quelle que soit leur localisation et les habitants parfaitement mobiles, le niveau d'utilité est uniforme dans la ville, égal à  $u$ . En utilisant les méthodes de la théorie duale du consommateur, on détermine la fonction d'enchère  $e(x)$  du consommateur en  $x$ , sa demande de terre  $h(x)$  et sa demande de bien banal  $c(x)$ , sous la forme

$$e(x) = E(w - t(x), u)$$

$$h(x) = H(w - t(x), u)$$

$$m(x) = M(w - t(x), u)$$

telles que

$$E(w - t(x), u) = \max_{m, h} \left[ \frac{w - t(x) - m}{h} \mid U(m, h) = u \right]$$

$$(M(w - t(x), u), H(w - t(x), u)) = \arg \max_{m, h} \left[ \frac{w - t(x) - m}{h} \mid U(m, h) = u \right]$$

Avec des habitants homogènes, on a dans chaque zone  $p_h(x) = e(x) = E(w - t(x), u)$ . Dans la zone  $x$ , la ville abrite  $N(x) = L(x)/h(x)$  habitants.

### A1.3 Les choix et les coûts de transport

#### A1.3.1 Le choix entre voiture et transports en commun

Le coût de transport  $t(x)$  est un coût moyen sur les déplacements faits à chaque période. A une date donnée, chaque consommateur choisit le moyen de transport (voiture ou transports en commun) qui minimise son coût de transport. Pour un trajet donné, les coûts respectifs de la voiture et des transports en commun évalués subjectivement par un consommateur localisé en zone  $x$  sont

$$\tilde{t}_v(x) = t_v(x) - \mu \ln(1 + \zeta) + \mu \varepsilon_v$$

$$\tilde{t}_c(x) = t_c(x) - \mu \ln(1 - \zeta) + \mu \varepsilon_c$$

où  $\varepsilon_c$  et  $\varepsilon_v$  sont des aléas indépendamment distribués d'un trajet à l'autre et entre modes, suivant une loi de Gumbel<sup>19</sup> de type III et  $\zeta$  est un paramètre compris entre -1 et 1 mesurant la préférence relative pour la voiture relativement aux transports en commun. Quand  $\zeta$  est nul, l'agent est neutre par rapport au choix du mode de transport. Quand  $\zeta$  est proche de 1, il a une très forte préférence pour la voiture, le coût subjectif d'usage des transports en commun étant proche de l'infini. Quand  $\zeta$  est proche de -1, il a au contraire une très forte préférence pour les transports en commun, le coût subjectif d'usage de la voiture étant proche de l'infini. Enfin,  $t_v(x)$  et  $t_c(x)$  sont des coûts objectifs de transport, dont la mesure est précisée plus loin et  $\mu$  est un paramètre d'incertitude.

Il s'ensuit que la probabilité qu'un agent choisisse l'un des deux modes suit un modèle logit. Plus précisément, pour qu'un consommateur prenne les transports en commun, il faut que  $\tilde{t}_c(x) < \tilde{t}_v(x)$ , soit

$$\tilde{t}_c(x) - \tilde{t}_v(x) = t_c(x) - t_v(x) - \mu \ln \frac{1 + \zeta}{1 - \zeta} + \mu(\varepsilon_c - \varepsilon_v) < 0$$

et donc

$$\varepsilon_c - \varepsilon_v < \frac{t_v(x) - t_c(x)}{\mu} + \ln \frac{1 - \zeta}{1 + \zeta}$$

En conséquence, sachant que  $\varepsilon_c - \varepsilon_v$  est distribué suivant une loi logistique et en faisant jouer la loi des grands nombres, dans la zone  $x$ , le nombre  $N_c(x)$  de consommateurs empruntant les transports en commun est tel que

$$\begin{aligned} \frac{N_c(x)}{N(x)} &= \frac{1}{1 + \exp \left\{ -\frac{t_v(x) - t_c(x)}{\mu} - \ln \frac{1 - \zeta}{1 + \zeta} \right\}} \\ &= \frac{\exp \{ t_v(x)/\mu + \ln(1 - \zeta) \}}{\exp \{ t_v(x)/\mu + \ln(1 - \zeta) \} + \exp \{ t_c(x)/\mu + \ln(1 + \zeta) \}} \\ &= \frac{(1 - \zeta) \exp \{ t_v(x)/\mu \}}{(1 - \zeta) \exp \{ t_v(x)/\mu \} + (1 + \zeta) \exp \{ t_c(x)/\mu \}} \end{aligned}$$

Le coût de transport moyen  $t(x)$  est égal à l'espérance du coût de transport sachant que l'usager a choisi le meilleur mode, soit

<sup>19</sup> La loi de Gumbel de type III a pour cumulative  $\exp(-\exp(-\varepsilon))$

$$t(x) = E[\min(\tilde{t}_c(x), \tilde{t}_v(x))] \\ = \mu \ln \left[ \frac{1}{1+\zeta} \exp\{t_v(x)/\mu\} + \frac{1}{1-\zeta} \exp\{t_c(x)/\mu\} \right]$$

ce qui permet de réécrire  $N_c(x)$  sous la forme

$$\frac{N_c(x)}{N(x)} = \frac{1}{1+\zeta} \exp \frac{t_v(x) - t(x)}{\mu}$$

### A1.3.2 Les coûts privés de déplacement par les transports en commun

Pour la spécification des coûts privés de déplacement par les transports en commun, on utilise une fonction de coût généralisée, somme du coût monétaire direct et de la valeur monétaire de la durée de déplacement, soit

$$t_c(x) = p_c(x) + \gamma \theta_c(x)$$

où  $p_c(x)$  est le coût monétaire direct, égal au prix du billet fixé par l'autorité organisatrice des transports,  $\theta_c(x)$  est la durée du déplacement de la zone  $x$  vers le centre et  $\gamma$  est la valeur du temps.

Le coût monétaire direct est un paramètre utilisable par le planificateur. Dans la pratique, on rencontre en général des tarifs fixes ( $p_c(x) = p_c$ ) et des tarifs linéaires ( $p_c(x) = p_c x$ ), mais il n'y a pas de raison de se limiter à ces deux possibilités.

La spécification de la durée de déplacement est plus délicate. On ne fait pas ici une spécification directe. On écrit

$$\theta_c(1) = \theta_c'(1) \\ \theta_c(2) = \theta_c'(1) + \theta_c'(2)$$

où  $\theta_c'(x)$  est l'inverse de la vitesse de déplacement à la distance  $x$ . Celle-ci est déterminée par la capacité du système de transports en commun, mesurée par son emprise au sol  $A(x)$ , et par le flux  $\phi_c(x)$  de personnes transitant par les transports en commun à travers la zone  $x$ , égal au nombre d'usagers de ce mode de transport résidant dans la zone  $x$  et dans les zones qui sont plus éloignées du centre. En conséquence,

$$\theta_c'(x) = \theta_c'(A(x), \phi_c(x)) \\ \phi_c(2) = N_c(2) \\ \phi_c(1) = N_c(1) + N_c(2) \\ \phi_c(0) = N_c(0) + N_c(1) + N_c(2)$$

On a évidemment  $\partial \theta_c'(x) / \partial A > 0$  et  $\partial \theta_c'(x) / \partial \phi_c < 0$ .

### A1.3.3 Les coûts privés de déplacement en voiture

Pour la spécification des coûts privés de déplacement en voiture, on utilise également une fonction de coût généralisée, soit

$$t_v(x) = p_v(x) + \gamma \theta_v(x)$$

où  $p_v(x)$  est le coût monétaire direct,  $\theta_v(x)$  est la durée du déplacement de la zone  $x$  vers le centre et  $\gamma$  est comme plus haut la valeur du temps.

La spécification de la durée de déplacement en voiture est similaire à celle des transports en commun, tout en tenant compte des contraintes éventuelles de stationnement. On écrit

$$\theta_v(1) = \theta_g(0) + \theta_v'(1)$$

$$\theta_v(2) = \theta_g(0) + \theta_v'(1) + \theta_v'(2)$$

où  $\theta_g(0)$  est le temps nécessaire à l'obtention d'une place de stationnement et  $\theta_v'(x)$  est l'inverse de la vitesse de déplacement à la distance  $x$ . Celle-ci est déterminée par la capacité du système routier, mesurée par son emprise au sol  $R(x)$ , et par le flux  $\phi_v(x)$  de personnes transitant en voiture à travers la zone  $x$ , égal au nombre d'usagers de ce mode de transport résidant dans la zone  $x$  et dans les zones qui sont plus éloignées du centre. En conséquence,

$$\theta_v'(x) = \theta_v'(R(x), \phi_v(x))$$

$$\phi_v(2) = N_v(2)$$

$$\phi_v(1) = N_v(1) + N_v(2)$$

$$\phi_v(0) = N_v(0) + N_v(1) + N_v(2)$$

On a évidemment  $\partial \theta_v'(x) / \partial R > 0$  et  $\partial \theta_v'(x) / \partial \phi_v < 0$ .

A ce stade de l'exercice, on suppose que tous les résidents disposent d'un véhicule automobile. Le centre ville doit permettre le stationnement des  $\phi_v(0)$  habitants de la périphérie qui s'y rendent chaque jour. Pour simplifier, nous supposons que, au centre ville, la superficie  $R(0)$  est entièrement consacrée au stationnement mais que peut s'y ajouter une capacité de stationnement  $G(0)$  fournie par des parkings souterrains ou des parkings à plusieurs niveaux. Le temps  $\theta_g(0)$  nécessaire à l'obtention d'une place de stationnement est fonction du nombre de voitures à garer au centre ville et du nombre de places disponibles pour les garer, soit

$$\theta_g(0) = \theta_g(R(0) + G(0), \phi_v(0))$$

avec évidemment,  $\partial \theta_g(x) / \partial (R + G) > 0$  et  $\partial \theta_g(x) / \partial \phi_v < 0$ .

Nous avons envisagé d'introduire un stationnement résidentiel qui empièterait sur la voirie et qui permettrait d'examiner les problèmes soulevés par la tarification différentielle des résidents et des visiteurs au centre ville. Nous ne l'avons pas fait dans cette version parce que, pour que ces problèmes soient pertinents, il faut que les usagers aient le choix entre posséder une voiture et ne pas en posséder. Sinon, tous possèdent une voiture et une augmentation du tarif de stationnement résidentiel au centre ville ne peut entraîner aucune réaction de la part des usagers dont, de ce fait, la demande de stationnement est parfaitement inélastique. Dans ce cas, l'autorité peut taxer le stationnement résidentiel à tout niveau qui n'annule pas les rentes foncières, ce qui n'est pas un résultat intéressant. Mais, introduire le choix entre posséder ou non la voiture entraîne qu'il y a deux types de ménages dans le modèle, ceux qui n'ont pas de voiture étant totalement dépendants des transports en commun. D'où une complexification du modèle que nous n'introduirons que dans une étape ultérieure.

Enfin les coûts monétaires directs  $p_v(x)$  comprennent les coûts d'usage du véhicule,  $p_v(x) - p_v(0)$ , qui sont une fonction croissante de la distance, et l'éventuel coût de stationnement  $p_v(0)$  quand ce dernier est payant. Dans la mesure où tous les habitants sont propriétaires d'un véhicule, on néglige ici les coûts fixes, ce qui revient à les intégrer dans le revenu  $w$ . Les coûts fixes n'ont en effet d'importance qu'à partir du moment où se pose la question de posséder ou non un véhicule.

## **A1.4 La production de transport**

### **A1.4.1 Les transports en commun**

La production de transport en commun nécessite de manière complémentaire de la terre et du capital. On suppose que l'aménagement d'un réseau de transports en commun utilisant une quantité globale de sol  $A(x)$  représente un coût en biens privés  $\kappa_c A(x)$ , où  $\kappa_c$  est le coût du capital utilisé sur une superficie égale à l'unité. Les transports en commun n'engendrent pas de nuisances. En particulier, ils n'ont pas d'effet sur l'environnement.

### **A1.4.2 Le réseau routier**

L'utilisation de la voiture suppose l'utilisation d'un réseau routier aménagé par le gestionnaire urbain, éventuellement complété en centre ville par des parkings hors voirie (souterrains ou construits au-dessus de la voirie). L'aménagement de la superficie  $R(x)$  consacrée à la voiture a un coût  $\kappa_r R(x)$ , quel qu'en soit l'usage (voirie ou parking en surface). L'aménagement de la superficie complémentaire de parkings hors voirie dans le centre ville a un coût égal à  $\kappa_g G(0)$ .

A ce coût privé s'ajoute un coût social, conséquence de l'émission  $E$  de polluants. Nous supposons que cette émission est proportionnelle à la durée totale des déplacements en voiture, ce qui revient à considérer que l'émission de polluants est la même quelle que soit la vitesse des véhicules. On a donc, en choisissant une échelle de mesure appropriée,

$$E = n_v(1)\theta_v(1) + n_v(2)\theta_v(2)$$

La pollution est un bien public pur néfaste, dont l'effet sur le bien-être des agents est séparable de l'effet des deux autres biens pris en compte par les consommateurs, le bien banal monétaire et la terre. Les préférences entre ces trois biens sont représentables par la fonction d'utilité  $V(m, h, E) = U(m, h) - \psi_0(E)$ .



## L'ÉQUILIBRE

Nous raisonnons à structure physique donnée de la ville. Pour chacune des trois zones, le centre ( $x=0$ ), la banlieue ( $x=1$ ) et la périphérie ( $x=2$ ), la répartition de la superficie  $S(x)$  disponible entre le logement,  $L(x)$ , l'emprise des transports en commun,  $A(x)$ , et la voirie routière ou le stationnement de surface,  $R(x)$ , ainsi que la quantité  $G(0)$  de parkings sont données. Les choix du planificateur ont également été arrêtés et sont considérés comme fixés par le consommateur qui prend comme données les coûts monétaires de transport,  $p_c(x)$  et  $p_v(x)$ . Le coût d'opportunité de la terre,  $c_h$ , est donné et indépendant de la localisation.

La ville étant ouverte, le niveau d'utilité global atteint par les agents quand ils sont hors de la ville,  $v = u - \psi_0(E)$  est fixé et l'équilibre est décrit par un ensemble de variables

- $N(x)$ ,  $x=0,1,2$  déterminant le nombre d'habitants de la zone  $x$ ,
- $N_c(x)$  et  $N_v(x) = N(x) - N_c(x)$ ,  $x=1,2$ , donnant pour la zone  $x$  le nombre d'usagers des transports en commun et de la voiture,
- $h(x)$ ,  $x=0,1,2$  déterminant la consommation de terre pour le logement des habitants de la zone  $x$ ,
- $p_h(x)$ ,  $x=0,1,2$  donnant le prix du logement dans la zone  $x$ ,
- $\theta_c(x)$  et  $\theta_v(x)$ ,  $x=1,2$ , donnant les durées de déplacement vers le centre pour les résidents de la zone  $x$ ,
- $\phi_c(x)$  et  $\phi_v(x)$ ,  $x=0,1,2$ , donnant les flux de trafic à travers la zone  $x$ ,
- $t(x)$ ,  $x=1,2$  déterminant le coût de transport moyen pour un consommateur habitant dans la zone  $x$ ,
- $RDT$  mesurant la rente différentielle totale collectée par les propriétaires fonciers,

Ces quantités sont solutions du système suivant:

- Fonctionnement du marché foncier

$$\forall x = 0,1,2, \quad p_h(x) = E(w - t(x), v + \psi_0(E))$$

$$\forall x = 0,1,2, \quad h(x) = H(w - t(x), v + \psi_0(E))$$

$$RDT = p_h(0)L(0) + p_h(1)L(1) + p_h(2)L(2)$$

- Occupation de la ville

$$\forall x = 0,1,2, \quad N(x) = \frac{L(x)}{h(x)}$$

- Choix de transport

$$N_c(x) = \frac{N(x)(1-\zeta)\exp\{t_v(x)/\mu\}}{(1-\zeta)\exp\{t_v(x)/\mu\} + (1+\zeta)\exp\{t_c(x)/\mu\}} = \frac{N(x)}{1+\zeta} \exp \frac{t_v(x) - t(x)}{\mu}$$

$$N_v(x) = N(x) - N_c(x) = \frac{N(x)}{1-\zeta} \exp \frac{t_c(x) - t(x)}{\mu}$$

- Flux de transport

$$\phi_c(2) = N_c(2)$$

$$\phi_c(1) = N_c(1) + N_c(2)$$

$$\phi_c(0) = N_c(0) + N_c(1) + N_c(2)$$

$$\begin{aligned}\phi_v(2) &= N_v(2) \\ \phi_v(1) &= N_v(1) + N_v(2) \\ \phi_v(0) &= N_v(0) + N_v(1) + N_v(2)\end{aligned}$$

- Temps de transport

$$\begin{aligned}\forall x=1,2 \quad \theta_c'(x) &= \theta_c'(A(x), \phi_c(x)) \\ \theta_c(1) &= \theta_c'(1) \\ \theta_c(2) &= \theta_c'(1) + \theta_c'(2) \\ \forall x=1,2 \quad \theta_v'(x) &= \theta_v'(R(x), \phi_v(x)) \\ \theta_g(0) &= \theta_g(R(0) + G(0), \phi_v(0)) \\ \theta_v(1) &= \theta_g(0) + \theta_v'(1) \\ \theta_v(2) &= \theta_g(0) + \theta_v'(1) + \theta_v'(2)\end{aligned}$$

- Coûts généralisés de transport

$$\begin{aligned}\forall x=1,2 \quad t_v(x) &= p_v(x) + \gamma \theta_v(x) \\ \forall x=1,2 \quad t_c(x) &= p_c(x) + \gamma \theta_c(x) \\ \forall x=1,2 \quad t(x) &= \mu \ln \left[ \frac{1}{1+\zeta} \exp \left\{ \frac{t_v(x)}{\mu} \right\} + \frac{1}{1-\zeta} \exp \left\{ \frac{t_c(x)}{\mu} \right\} \right]\end{aligned}$$

## LE CALCUL DES EFFETS MARGINAUX

### A3.1 Présentation générale

Le module de calcul des effets marginaux comporte plusieurs sections :

- Dans une première section, on reprend l'ensemble des paramètres du modèle
- Puis, dans une deuxième section, on recalcule les valeurs de l'ensemble des variables à l'équilibre à partir des valeurs d'équilibre des variables de bouclage.
- On passe alors à la troisième section du programme, qui regroupe l'ensemble des variables dans des matrices pour faciliter les calculs, et qui définit des matrices supplémentaires, nécessaires pour effectuer les calculs.
- La quatrième section (Calcul des matrices Omega) est la plus importante. Elle contient les calculs, souvent complexes, des matrices permettant de déterminer les effets marginaux.
- Le programme se termine par la cinquième section, qui fournit les effets marginaux. Ces derniers sont calculés pour les deux grandes catégories de variables exogènes que sont les coûts monétaires de transport (manipulables par l'intermédiaire de billets, péages, tarifs,...) et les quantités de surfaces aménagées.

Pour les coûts monétaires de transport, les colonnes de chaque matrice correspondent respectivement :

- Au coût TC en première couronne,
- Au coût TC en deuxième couronne,
- Au coût voiture en première couronne,
- Au coût voiture en deuxième couronne.

Pour les surfaces aménagées, les colonnes de chaque matrice correspondent respectivement :

- Au volume TC en première couronne,
- Au volume TC en deuxième couronne,
- Au volume voiture en première couronne,
- Au volume voiture en deuxième couronne,
- A la disponibilité de stationnement en centre ville.

Pour les effets sur les trafics, chaque ligne correspond respectivement

- Aux effets marginaux sur les déplacements TC des habitants de la première couronne,
- Aux effets marginaux sur les déplacements TC des habitants de la deuxième couronne,
- Aux effets marginaux sur les déplacements voiture des habitants de la première couronne,
- Aux effets marginaux sur les déplacements voiture des habitants de la deuxième couronne,

Pour les effets sur les durées de déplacement, chaque ligne correspond respectivement

- Aux effets marginaux sur les durées TC des habitants de la première couronne,
- Aux effets marginaux sur les durées TC des habitants de la deuxième couronne,
- Aux effets marginaux sur les durées voiture des habitants de la première couronne,
- Aux effets marginaux sur les durées voiture des habitants de la deuxième couronne,

Pour les effets sur la population, chaque ligne correspond respectivement

- Aux effets marginaux sur le nombre d'habitants de la première couronne,
- Aux effets marginaux sur le nombre d'habitants de la deuxième couronne,

Pour les effets sur les prix du logement, chaque ligne correspond respectivement

- Aux effets marginaux sur les prix au centre,
- Aux effets marginaux sur les prix en première couronne,
- Aux effets marginaux sur les prix en deuxième couronne,

### A3.2 Le module de calcul

#### EFFETS MARGINAUX SUR L'EQUILIBRE

##### *Affectation des paramètres*

```

> S0:=320.00: # Superficie au centre
> R0:=0: # Pas de route au centre
> G0:=55.00: # Usage stationnement
> A0:=0: # Pas de TC au centre
> L0:=S0-R0-A0: # Usage résidentiel au centre
> S1:=1200: # Superficie première couronne
> R1:=250.0: # Usage routier en première couronne
> A1:=70.0: # Usage TC en première couronne
> L1:=S1-R1-A1: # Usage résidentiel en première couronne
> L2:=900.0: # Usage résidentiel en deuxième couronne
> R2:=250.0: # Usage routier en deuxième couronne
> A2:=70.0: # Usage TC en deuxième couronne
> S2:=L2+R2+A2: # Superficie deuxième couronne
> v:=5.0: # Niveau d'utilité exogène
> w:=30.0: # Richesse
> #les fonctions E et H sont dérivées de la fonction d'utilité
U(h,c)=A*h^(1/4)*c^(3/4), avec A=(1/4)^(-1/4)*(3/4)^(-3/4)
> # Elles sont de la forme E(budget,utilité)
> E:=(x,y)->(x/y)^4: # Fonction d'enchères
> H:=(x,y)->(1/4)*x^(-3)*y^4: # Fonction de demande hicksienne
> mu:=0.5: # Paramètre d'incertitude
> zeta:=0.65: # Préférence relative pour la voiture
> pg0:=0: # Coût monétaire direct du stationnement
> pc1:=2.25: # Coût monétaire direct des TC banlieue-centre
> pc2:=0.75: # Coût monétaire direct des TC
périphérie-banlieue
> pv1:=3: # Coût monétaire direct de la voiture banlieue-centre
> pv2:=1: # Coût monétaire direct de la voiture périphérie-
banlieue
> ctc1:=2.25: # Coût marginal d'un voyageur TC banlieue-centre
> ctc2:=0.75: # Coût marginal d'un voyageur TC périphérie-
banlieue
> ctv1:=3: # Coût d'usage de la voiture en banlieue-centre
> ctv2:=1: # Coût d'usage direct de la voiture périphérie-
banlieue
> gamma1:=0.3: # Valeur du temps
> cth:=100: # Coût d'opportunité de l'unité de logement
> cta:=50: # Coût d'opportunité de l'unité d'aménagement TC
> ctr:=50: # Coût d'opportunité de l'unité d'aménagement route
> ctg:=70: # Coût d'opportunité de l'unité de garage
> # La fonction thetap calcule une durée de déplacement. t0, p1
et p2 sont des paramètres déterminant la durée de déplacement
sans congestion (t0) et l'effet de la congestion (p1 et p2).
Les variables x et y correspondant respectivement à la
disponibilité de terre et au flux de circulation passant par la
zone.
> thetap:=(t0,p1,p2,x,y)->t0+p1/(1+p2*x/y):

```

```

> thct1 := 8.0: # Durée minimale de déplacement TC banlieue-
centre
> thct2 := 4.0: # Durée minimale de déplacement TC périphérie
banlieue
> thcp1 := 10.0:thcp2 := 187.5: # Paramètres fonction de
congestion TC
> thvt1 := 5.0: # Durée minimale de déplacement VP banlieue-
centre
> thvt2 := 2.0: # Durée minimale de déplacement VP périphérie
banlieue
> thvp1 := 4.0: thvp2 := 187.5: # Paramètres fonction de
congestion VP
> thgt := 0.0: # Durée minimale d'obtention d'un stationnement
> thgp1 := 300.0:thgp2 := 93750.0: # Paramètres congestion
stationnement
> psi0:=x->x/10^6*(20.0/3.0)^(1/4): # Coût marginal de
pollution
> derHw:=D[1](H):derHu:=D[2](H):
> derEw:=D[1](E):derEu:=D[2](E):
> thetaF:=D[5](thetap):thetaA:=D[4](thetap):
> thetacsF:=D[3](thetapc):thetacsA:=D[2](thetapc):
> thetavsF:=D[3](thetapv):thetavsR:=D[2](thetapv):
> thetagpF:=D[2](thetap):thetapG:=D[1](thetap):
> psip0:=D(psi0):
> psi1:=x->0:
> kv:=ctr:kc:=cta:kg:=ctg:
Les valeurs d'amorçage
> N0 := 27142.45407: # Population au centre
> n1 := 35538.25380: # Population en première couronne
> n2 := 26368.21449: # Population en deuxième couronne
> pic1 := .2046069151: # Part modale TC en première couronne
> pic2 := .0971545842: # Part modale TC en deuxième couronne
> piv1:=1-pic1:piv2:=1-pic2:
> nc1:=pic1*n1:
> nv1:=n1-nc1:
> nc2:=pic2*n2:
> nv2:=n2-nc2:
Les variables issues de l'équilibre
> Flux par modes de transport
> phic0:=nc1+nc2;phic1:=nc1+nc2;phic2:=nc2;
phic0 := 9833.165393
phic1 := 9833.165393
phic2 := 2561.792915
> phiv0:=nv1+nv2;phiv1:=nv1+nv2;phiv2:=nv2;
phiv0 := 52073.30290
phiv1 := 52073.30290
phiv2 := 23806.42158
Durées de déplacement
> thetac1:=thetap(thct1,thcp1,thcp2,A1,phic1);
thetac1 := 12.28307978
> thetac2:=thetac1+thetap(thct2,thcp1,thcp2,A2,phic2);
thetac2 := 17.91616879
> hetav1:=thetap(thgt,thgp1,thgp2,G0,phiv0)+thetap(thvt1,thvp1
,thvp2,R1,phiv1);
hetav1 := 10.10449911
> thetav2:=hetav1+thetap(thvt2,thvp1,thvp2,R2,phiv2);

```

```

thetav2 := 13.45175111
Coûts généralisés
> tc1:=pc1+gamma1*thetac1;tc2:=pc1+pc2+gamma1*thetac2;
tc1 := 5.934923934
tc2 := 8.374850637
> tv1:=pv1+gamma1*thetav1;tv2:=pv1+pv2+gamma1*thetav2;
tv1 := 6.031349733
tv2 := 8.035525333
> t1:=mu*ln(1/(1+zeta)*exp(tv1/mu)+1/(1-zeta)*exp(tc1/mu));
t1 := 6.574294415
> t2:=mu*ln(1/(1+zeta)*exp(tv2/mu)+1/(1-zeta)*exp(tc2/mu));
t2 := 8.950863660
Fonctionnement du marché foncier
> e:=piv1*n1*thetav1+piv2*n2*thetav2;
e := 605860.7350
> ph0:=E(w,v+psi0(e));ph1:=E(w-t1,v+psi0(e));ph2:=E(w-
t2,v+psi0(e));
ph0 := 636.1512669
ph1 := 236.5081445
ph2 := 154.1744835
> h0:=H(w,v+psi0(e));h1:=H(w-t1,v+psi0(e));h2:=H(w-
t2,v+psi0(e));
h0 :=.01178964877
h1 :=.02476204957
h2 :=.03413200400
> RT:=ph0*(S0-R0-A0)+ph1*(S1-R1-A1)+ph2*L2; # Rente totale
RT := 550452.6078
Les paramètres à l'optimum
> a1:=A1-A0:a2:=A2-A1:
> r1:=R1-R0:r2:=R2-R1:
> Lp1:=L1-L0:Lp2:=L2-L1:
> ths1cF:=thetaF(thct1,thcp1,thcp2,A1,phic1):
> ths2cF:=thetaF(thct2,thcp1,thcp2,A2,phic2):
> ths1nF:=thetaF(thvt1,thvp1,thvp2,R1,phiv1):
> ths2nF:=thetaF(thvt2,thvp1,thvp2,R2,phiv2):
> thpgF:=thetaF(thgt,thgp1,thgp2,G0,phiv0):
> ths1cA:=thetaA(thct1,thcp1,thcp2,A1,phic1):
> ths2cA:=thetaA(thct2,thcp1,thcp2,A2,phic2):
> ths1nR:=thetaA(thvt1,thvp1,thvp2,R1,phiv1):
> ths2nR:=thetaA(thvt2,thvp1,thvp2,R2,phiv2):
> thpgG:=thetaA(thgt,thgp1,thgp2,G0,phiv0):
> Hp0w:=derHw(w,v+psi0(e)):Hp1w:=derHw(w-t1,v+psi0(e)):
> Hp2w:=derHw(w-t2,v+psi0(e)):
> Hp0u:=derHu(w,v+psi0(e)):Hp1u:=derHu(w-t1,v+psi0(e)):
> Hp2u:=derHu(w-t2,v+psi0(e)):
> Ep0w:=derEw(w,v+psi0(e)):Ep1w:=derEw(w-t1,v+psi0(e)):
> Ep2w:=derEw(w-t2,v+psi0(e)):
> Ep0u:=derEu(w,v+psi0(e)):Ep1u:=derEu(w-t1,v+psi0(e)):
> Ep2u:=derEu(w-t2,v+psi0(e)):
Effets marginaux
> with(linalg):
Warning, new definition for norm
Warning, new definition for trace
> # CALCULS PRELIMINAIRES
> #Définition des variables

```

```

> theta:=matrix(4,1,[thetac1,thetac2,thetav1,thetav2]):
> A:=matrix(6,1,[A1,A2,R1,R2,G0,R0]):
> nu:=matrix(4,1,[nc1,nc2,nv1,nv2]):
> T:=matrix(4,1,[tc1,tc2,tv1,tv2]):
> P:=matrix(4,1,[pc1,pc2,pv1,pv2]):
> t:=matrix(3,1,[0,t1,t2]):
> N:=matrix(3,1,[0,n1,n2]):
> H:=matrix(3,1,[h0,h1,h2]):
> Ph:=matrix(3,1,[ph0,ph1,ph2]):
> t:=matrix(3,1,[0,t1,t2]):
> K:=matrix(3,1,[kc,kv,kg]):
> L:=matrix(3,1,[L0,Lp1,Lp2]):
> S:=matrix(3,1,[S0,S1,S2]):
> C:=matrix(3,6,[0,0,0,0,0,0,1,0,1,0,0,0,0,1,0,1,0,0]):
> C1:=matrix(3,6,[0,0,0,0,0,0,1,1,0,1,0,0,0,0,1,0,1,0]):
> C2:=matrix(3,6,[0,0,0,0,0,0,1,1,0,1,0,0,0,0,1,0,1,0]):
> C3:=matrix(3,6,[1,1,0,0,0,0,0,0,1,1,0,1,0,0,0,0,1,-1]):
> Cp:=matrix([ [1,0,0,0], [1,1,0,0], [0,0,1,0], [0,0,1,1] ]):
> SEL1:=matrix([ [1,0,0,0,0], [0,1,0,0,0], [0,0,1,0,0], [0,0,0,1,0],
[0,0,0,0,1], [0,0,0,0,0] ]):
> IDEN3:=diag(1,1,1):
> IDEN4:=diag(1,1,1,1):
> yThp:=matrix(4,4,[ths1cF,ths1cF,0,0,ths1cF,ths1cF+ths2cF,0,0,
0,0,thpgF+ths1nF,thpgF+ths1nF,0,0,thpgF+ths1nF,thpgF+ths1nF+
ths2nF]):
> AThp:=matrix(4,6,[ths1cA,0,0,0,0,0,ths1cA,ths2cA,0,0,0,0,0,0,
ths1nR,0,thpgG,0,0,0,ths1nR,ths2nR,thpgG,0]):
> pi:=matrix(4,3,[0,nc1/n1,0,0,0,nc2/n2,0,nv1/n1,0,0,0,nv2/n2]
):
> Z:=matrix(4,1,[-nc1*nv1/(mu*n1),-
nc2*nv2/(mu*n2),nc1*nv1/(mu*n1),nc2*nv2/(mu*n2)]):
> Delta:=matrix(4,4,[1,0,-1,0,0,1,0,-1,1,0,-1,0,0,1,0,-1]):
> F:=matrix(2,4,[0,0,1,0,0,0,0,1]):
> vE:=matrix(4,1,[1,1,1,1]):
> eb:=matrix(3,1,[0,1,1]):
> DZ:=diag(-nc1*nv1/(mu*n1),-
nc2*nv2/(mu*n2),nc1*nv1/(mu*n1),nc2*nv2/(mu*n2)):
> Y:=matrix(4,1,[-mu/(1-zeta),-mu/(1-
zeta),mu/(1+zeta),mu/(1+zeta)]):
> pit:=matrix(4,3,[0,nv1/n1,0,0,0,nv2/n2,0,nc1/n1,0,0,0,nc2/n2]
):
> DiN:=diag(0,n1,n2):
> DiH:=diag(h0,h1,h2):
> DwH:=matrix(3,3,[0,0,0,0,Hp1w,0,0,0,Hp2w]):
> DuH:=matrix(3,3,[0,0,0,0,Hp1u,0,0,0,Hp2u]):
> DwE:=matrix(3,3,[0,0,Ep0w,0,Ep1w,0,0,0,Ep2w]):
> DuE:=matrix(3,3,[0,0,Ep0u,0,Ep1u,0,0,0,Ep2u]):
>
> # Calcul des matrices Omega
> Omega1:=evalm(1-gamma1*(DZ,Delta,DyThp)):
> Omega13:=evalm(&*(DyThp,inverse(Omega1),DZ,Delta)):
> Omega14:=evalm(IDEN4+gamma1*Omega13):
> Omega2:=evalm(&(inverse(DiH),DiN,DwH,transpose(mpit))):
> Omega3:=evalm(IDEN3-
gamma1*(amp;(Omega2,DyThp,inverse(Omega1),mpi))):
> mega4:=evalm(&(transpose(theta),transpose(F),F,inverse(Omega1),
mpi)+amp((transpose(nu),transpose(F),F,DyThp,inverse(Omega1),
mpi))):

```

```

> Omega5:=evalm(&*(inverse(Omega3),inverse(DiH))):
> Omega7:=evalm(&*(Omega4,t)-
&*(Omega4,inverse(Omega3),Omega2,Omega14,T)-
&*(&*(transpose(nu),transpose(F),F,DyThp)+&*(transpose(theta),t
ranspose(F),F),inverse(Omega1),DZ,Delta,T)+&*(Omega4,inverse(Om
ega3),inverse(DiH),DiN,DwH,t)):
> mega8:=evalm(&*(Omega4,inverse(Omega3),Omega2,Omega14)+&*(&
(transpose(nu),transpose(F),F,DyThp)+&*(transpose(theta),transp
ose(F),F),inverse(Omega1),DZ,Delta)):
> Omega9:=evalm(1+psip0(e)*(&*(Omega4,Omega5,DiN,DuH,eb))):
> mega19:=evalm(&*(&*(transpose(nu),transpose(F),F,(IDEN4+DyTh
p))+gamma1*(&*(Omega4,inverse(Omega3),Omega2,DyThp)),inverse(
Omega1),Z)):
> Omega10:=evalm(&*(Omega5,DiN,DuH,eb)):
> Omega10:=evalm(&*(Omega5,DiN,DwH)):
> Omega11:=evalm(&*(Omega10,inverse(Omega9))*psip0(e)):
> mega20:=evalm(gamma1*(&*((&*(inverse(Omega3),Omega2,Omega14)
-psip0(e)*&*(Omega10,inverse(Omega9),Omega8)),DATHp))+psip0(e
)*(&*(Omega10,inverse(Omega9),(&*(Omega4,Omega5,C)+&*(transpose
(nu),transpose(F),F,DATHp))))-&*(Omega5,C)):
> mega12:=evalm(gamma1*(&*(transpose(mpit),DyThp,inverse(Omega
1),mpi))):
> mega15:=evalm(psip0(e)*(&*(DuE,eb,inverse(Omega9),(gamma1*(&
*(Omega8,DATHp))-&*(Omega4,Omega5,C)-
&*(transpose(nu),transpose(F),F,DATHp))))-
&*(DwE,(gamma1*(&*(transpose(mpit),Omega14,DATHp))+&*(Omega12,O
mega20))))):
> Omega16:=evalm(psip0(e)*(&*(DuE,eb,inverse(Omega9),Omega8))-
&*(DwE,(&*(Omega12,(&*(inverse(Omega3),Omega2,Omega14)-&*(Ome
ga11,Omega8)))+&*(transpose(mpit),Omega14))))):
> Omega17:=evalm(-
&*(DwE,(&*(Omega12,(gamma1*(&*(inverse(Omega3),Omega2,DyThp,inv
erse(Omega1),Z))-
&*(Omega11,Omega19)))+gamma1*(&*(transpose(mpit),DyThp,inverse(
Omega1),Z))))+psip0(e)*(&*(DuE,eb,Omega19))):
> mega18:=evalm(&*(DwE,(&*(Omega12,(&*(Omega11,Omega7)+&*(IDEN
3+Ome10,t)-&*(inverse(Omega3),Omega2,Omega14,T)))-
&*(transpose(mpit),Omega14,T)+t))+psip0(E)*(&*(DuE,eb,inverse(O
mega9),Omega7))+&*(DwE,t-
psip0(e)*(&*(eb,inverse(Omega9),Omega7))))):
> Omega21:=evalm(&*(DwE,(transpose(mpit)+&*(Omega12,(IDEN3-
&*(Omega11,Omega4)),inverse(Omega3),Omega2)))-
psip0(e)*(&*(DuE,eb,inverse(Omega9),Omega4,inverse(Omega3),Ome
ga2))))):
> Omega22:=evalm(&*(DwE,Omega12,(&*(Omega11,Omega4,Omega5,DiN,D
wH)-Ome10))+psip0(e)*(&*(DuE,eb,inverse(Omega9),Omega4,Ome
ga5,DiN,DwH))-DwE):
> Omega23:=evalm(&*(DwE,Omega12,(Omega10-
&*(Omega11,Omega4,Omega5,DiN,DuH,eb)))-
psip0(e)*(&*(DuE,eb,inverse(Omega9),Omega4,Omega5,DiN,DuH,eb))+
&*(DuE,eb)):

```

#### QUELQUES EFFETS MARGINAUX

Effet des coûts monétaires de transport (en colonne) sur les trafics (en ligne)

```

> evalm(&*(inverse(Omega1),DZ,Delta,Cp));
-4859.652684 1223.623340 4859.652684 -1223.623340
-1084.330454 -2307.953794 1084.330454 2307.953794

```

4859.652680 -1223.623339 -4859.652680 1223.623339  
 1084.330454 2307.953794 -1084.330454 -2307.953794

Effet de l'augmentation des surfaces aménagées (en colonne) sur les trafics (en ligne)

> evalm(gamma1\*(&\*(inverse(Omega1),DZ,Delta,DAThp,MSEL1)));

50.99724816 -7.165491297 -5.815488150 1.311939594 -78.71151525  
 11.37897558 13.51528880 -1.297605264 -2.474532697 -17.56283804  
 -50.99724810 7.165491291 5.815488144 -1.311939593 78.71151516  
 -11.37897558 -13.51528880 1.297605264 2.474532697 17.56283804

Effet des coûts monétaires de transport (en colonne) sur les durées de déplacement (en ligne)

> evalm(&\*(Omega14,Cp));

.5559582812 -.08100426051 .4440417188 .08100426051  
 .3824525218 .5496957034 .6175474782 .4503042966  
 .1358347250 .02477963442 .8641652750 -.02477963442  
 .1480435433 .05076561357 .8519564566 .9492343864

Effet de l'augmentation des surfaces aménagées (en colonne) sur les durées de déplacement (en ligne)

> evalm(gamma1\*(&\*(Omega14,DAThp,MSEL1)));

-.005834232252 .0004743578391 -.0005313794052 -.00008685082506 -.007192118202  
 -.004013460924 -.003218996931 -.0007390116690 -.0004828054653 -.01000238102  
 -.001425451082 -.0001451085877 -.001034136232 .00002656812963 -.01399683530  
 -.001553570555 -.0002972814838 -.001019526086 -.001017746340 -.01379908977

Effet des coûts monétaires de transport (en colonne) sur les populations de la couronne (en ligne)

> evalm(&\*(matrix([[0,1,0],[0,0,1]]),&\*(inverse(Omega3),Omega2, Omega14)-&\*(Omega11,Omega8),Cp));

-2903.293628 308.7774361 689.2695289 884.1065099  
 -1788.569708 -1751.493654 -104.1955357 -966.3576017

Effet de l'augmentation des surfaces aménagées (en colonne) sur les populations de la couronne (en ligne)

> evalm(&\*(matrix([[0,1,0],[0,0,1]]),Omega20,MSEL1));

.23642800 7.491506286 -35.13079212 6.682565578 -66.32090006  
 26.09056618 -10.93162465 4.623889389 -21.30814062 -36.50888312

Effet des coûts monétaires de transport (en colonne) sur les prix du logement (en ligne)

> evalm(&\*(Omega16,Cp));

-41.63845002 -39.58840838 1.28139461 -20.47144729  
 -23.32040210 2.849842439 -.866116890 5.271188100  
 -12.35201767 -13.58293246 -5.363890200 -9.211517330

Effet de l'augmentation des surfaces aménagées (en colonne) sur les prix du logement (en ligne)

> evalm(&\*(Omega15,MSEL1));

.6117846495 .4248590175 .1043303122 .1867308371 -.954203823  
 .3163932783 .04662279457 .04667631345 .04699818765 -.3382674885  
 .1746860062 .1302427800 .03608637178 .05427161943 -.1215077439

Effet des coûts monétaires de transport (en colonne) sur la pollution

> evalm(&\*(inverse(Omega9),Omega8,Cp));

28783.57445 1296.118021 -82312.41015 -30342.20478

Effet de l'augmentation des surfaces aménagées (en colonne) sur la pollution

> evalm(&\*(inverse(Omega9),gamma1\*&\*(Omega8,DAThp)- (&\*(Omega4,Omega5,C)+&\*(transpose(nu),transpose(F),F,DAThp)),MSEL1));

-519.2997146 -234.0326244 .6987647600 -144.9868924 2949.821195



## LES PROCÉDURES ITÉRÉES DE SIMULATION

### A4.1 Structure générale

Elles sont construites de la manière suivante :

- Le cœur du modèle comprend l'ensemble des équations, regroupées dans une procédure intitulée *equastatio*. Cette procédure part des valeurs des paramètres du modèle (superficies, prix, coûts, etc...) et introduit ces valeurs dans les équations du modèle.
- En amont du modèle, la procédure *paramstatio* part d'une liste des paramètres et de leurs valeurs pour construire une structure où sont conservés les noms de ces paramètres et les valeurs correspondantes, structure utilisée par les autres procédures. Cette procédure initiale est accompagnée d'autres fonctions satellites : la procédure *listeparam* qui fait la transformation inverse (construction d'une liste à partir de la structure) ; la procédure *valparam* qui fournit la valeur d'un paramètre, la procédure *majparam* qui modifie la valeur d'un paramètre. On peut également fournir des intitulés, ou labels, pour chaque variable, qui sont utilisés par les graphiques. Ces labels ont manipulés par la procédure *extrailabel*
- En aval du modèle, se trouvent les procédures de simulation. Celles-ci sont au nombre de quatre:

Les deux procédures les plus importantes sont *simulstatio* et *multisimul*. Toutes les deux partent de la structure donnant les valeurs des paramètres et d'une liste comprenant les noms et les valeurs d'initialisation des variables de bouclage. La procédure *simulstatio* part de ces éléments pour effectuer une simulation. La procédure *multisimul*, pour sa part, fait une suite de simulations en faisant varier un paramètre. Pour ce faire, on lui fournit le nom de la variable dont les valeurs varient d'une simulation à l'autre et la liste des valeurs qu'elle prend à chaque simulation. Pour chaque simulation, les deux procédures appellent *paramstatio* pour obtenir les équations du modèle, puis la procédure Maple *fsolve* pour résoudre le modèle et enfin recalculer les valeurs de l'ensemble des variables endogènes, qu'elles fournissent en sortie. Ces procédures sont suivies par la procédure *resusimu* qui met en forme les résultats de simulation sous forme d'une liste qui, au nom de chaque variable endogène, associe les vecteur des valeurs qu'il prend lors de simulations successives.

La troisième procédure, *itersimul*, permet d'itérer aisément les simulations. On lui fournit le vecteur des paramètres, la liste des résultats (sortie de *resusimu*) et la liste des valeurs du paramètre modifié à chaque itération lors d'une simulation précédente, ainsi que le numéro d'ordre de la simulation qui sert de point de départ, le nom du nouveau paramètre qu'on souhaite modifier et le type de modification à apporter. En sortie, on retrouve les trois premiers ingrédients fournis en entrée, ce qui permet d'itérer à nouveau.

La quatrième procédure, *itersimax*, fait de même à une différence près : elle détermine elle-même d'où elle part dans la simulation précédente, en choisissant la simulation ayant fourni la valeur maximale du surplus.

- Ces procédures de simulation sont accompagnées de procédures auxiliaires :
  1. *Extrairesu*, qui permet d'extraire le vecteur des valeurs d'une variable endogène,
  2. *Extraisimul* qui permet d'extraire les valeurs de l'ensemble des variables endogènes pour une itération déterminée,
  3. *Rnkmaxresu*, qui permet de déterminer le rang de la simulation ayant permis d'atteindre la valeur maximale d'une variable endogène donnée,
  4. *Tableresu*, qui construit une table pour une liste de variables donnant les valeurs de ces variables pour un ensemble de simulations séparées.

5. *Listeresu*, fait de même, mais pour un ensemble d'itérations d'une même simulation itérée par *itersimul*.
6. *Resuplot*, qui permet de représenter graphiquement une variable endogène.
7. *Resmultiplot*, qui permet de représenter graphiquement et simultanément plusieurs variables endogènes, avec une étiquette pour chacune.
8. *Reuresu*, qui permet de fusionner les listes de valeurs des variables endogènes issues de plusieurs simulations multiples
9. *Reuniter*, qui permet de fusionner les valeurs des variables endogènes et les valeurs de la variable dont les valeurs varient pour une suite de simulations itérées.

## A4.2 Les procédures de simulation

> **with(linalg):**

Crée une structure de paramètres à partir d'une liste d'arguments, chacun de la forme nom=valeur

```
> paramstatio:=proc() local vecvar,vecparam,i,nn;
  vecvar:=seq(op(1,args[i]),i=1..nargs);
  vecparam:=seq(op(2,args[i]),i=1..nargs);
RETURN([vecvar],[vecparam],nargs); end;
```

Crée une liste de paramètres à partir de la structure 'param' contenant les noms et les valeurs

```
> listeparam:=proc(param) ;
RETURN(seq(param[1,ii]=param[2,ii],ii=1..param[3])); end;
```

### Equations du modèle.

Le paramètre param est la structure contenant les noms et les valeurs des paramètres

```
> equastatio:=proc(param) local
ii,lisvv,thetap,psip0,E,H,nc1,nv1,nc2,nv2,phic0,phic1,phic2,p
hiv0,phiv1,phiv2,thetac1,thetac2,thetav1,thetav2,tc1,tc2,tv1,
tv2,t1,t2,eqpic1,eqpic2,e,ph0,ph1,ph2,h0,h1,h2,eqn0,eqn1,eqn2
,RT,RD,Surplus,typret;
lisvv:=seq(param[1,ii]=param[2,ii],ii=1..param[3]);
thetap:=(t0,p1,p2,x,y)->t0+p1/(1+p2*x/y):
psip0:=x->x/10^6*(20.0/3)^(1/4):
E:=(x,y)->(x/y)^4:
H:=(x,y)->(1/4)*x^(-3)*y^4:
nc1:=pic1*n1: nc2:=pic2*n2:
nv1:=n1-nc1: nv2:=n2-nc2:
phic0:=nc1+nc2: phic1:=nc1+nc2: phic2:=nc2:
phiv0:=nv1+nv2: phiv1:=nv1+nv2: phiv2:=nv2:
thetac1:=thetap(eval(thct1,lisvv),eval(thcp1,lisvv),eval(thcp
2,lisvv),eval(A1,lisvv),phic1):
thetac2:=thetac1+thetap(eval(thct2,lisvv),eval(thcp1,lisvv),e
val(thcp2,lisvv),eval(A2,lisvv),phic2):
thetav1:=thetap(eval(thgt,lisvv),eval(thgp1,lisvv),eval(thgp2
,lisvv),eval(G0,lisvv),phiv0)
+thetap(eval(thvt1,lisvv),eval(thvp1,lisvv),eval(thvp2,lisvv),e
val(R1,lisvv),phiv1):
thetav2:=thetav1+thetap(eval(thvt2,lisvv),eval(thvp1,lisvv),e
val(thvp2,lisvv),eval(R2,lisvv),phiv2):
tc1:=eval(pc1+gamma1*thetac1,lisvv):
tc2:=eval(pc1+pc2+gamma1*thetac2,lisvv):
tv1:=eval(pg0+pv1+gamma1*thetav1,lisvv):
tv2:=eval(pg0+pv1+pv2+gamma1*thetav2,lisvv):
```

```

t1:=eval(mu*ln(1/(1+zeta)*exp(tv1/mu)+1/(1-zeta)*exp(tc1/mu))
,lisvv):
t2:=eval(mu*ln(1/(1+zeta)*exp(tv2/mu)+1/(1-zeta)*exp(tc2/mu))
,lisvv):
eqpic1:=eval(1/(1+zeta)*exp((tv1-t1)/mu),lisvv):
eqpic2:=eval(1/(1+zeta)*exp((tv2-t2)/mu),lisvv):
e:=(1-eqpic1)*n1*thetav1+(1-eqpic2)*n2*thetav2:
ph0:=E(eval(w,lisvv),eval(v+psip0(e),lisvv)):
ph1:=E(eval(w-t1,lisvv),eval(v+psip0(e),lisvv)):
ph2:=E(eval(w-t2,lisvv),eval(v+psip0(e),lisvv)):
h0:=H(eval(w,lisvv),eval(v+psip0(e),lisvv)):
h1:=H(eval(w-t1,lisvv),eval(v+psip0(e),lisvv)):
h2:=H(eval(w-t2,lisvv),eval(v+psip0(e),lisvv)):
eqn0:=eval(S0,lisvv)/h0: eqn1:=eval(S1-R1-A1,lisvv)/h1:
eqn2:=eval(L2,lisvv)/h2:
RT:=eval(ph0*(S0-R0-A0)+ph1*(S1-R1-A1)+ph2*L2,lisvv):
RD:=eval((ph0-cth)*(S0-R0-A0)+(ph1-cth)*(S1-R1-A1)+(ph2-cth)*
L2,lisvv):
Surplus:=eval(RD+nc1*(pc1-ctc1)+nc2*(pc1-ctc1+pc2-ctc2)+nv1*(
pg0+pv1-ctv1)+nv2*(pg0+pv1-ctv1+pv2-ctv2)-cta*(A1+A2)-ctr*(R1
+R2)-ctg*G0,lisvv):
RETURN(eqpic1,eqpic2,eqn1,eqn2,nc1,nv1,nc2,nv2,phic0,phic1,ph
ic2,phiv0,phiv1,phiv2,thetac1,thetac2,thetav1,thetav2,tc1,tc2
,tv1,tv2,t1,t2,e,ph0,ph1,ph2,h0,h1,h2,eqn0,RT,RD,Surplus):
end;

```

#### Procédure de simulation de base

En entrée: **param** est la structure contenant les valeurs et les noms des paramètres, **debeq** est la liste des valeurs initiales des variables de bouclage. En sortie, **arreq** est un tableau de valeurs

```

> simulstatio:=proc(param,debeq) local
modelstatio,equild,arreq; arreq:=array(1..1);
modelstatio:=equastatio(param);
equild:=fsolve({pic1=modelstatio[1],pic2=modelstatio[2],
n1=modelstatio[3],n2=modelstatio[4]},debeq,{pic1=0.001..0.999,p
ic2=0.001..0.999,n1=1..infinity,n2=1..infinity});
arreq[1]:=eval(modelstatio,equild);
RETURN(arreq); end;

```

#### Procédure de simulation pour un ensemble de valeurs d'un paramètre

En entrée: **param** est la structure contenant les valeurs et les noms des paramètres, **debeq** est la liste des valeurs initiales des variables de bouclages, **vval** est une liste de la forme {parm=val}, où parm est le nom d'un paramètre et val est un vecteur ligne contenant ses valeurs. En sortie, **arreq** est un tableau de valeurs

```

> multsimulst:=proc(param,debeq,vval) local
nmv,i,i2,ji,nmp,xx,vecp1,modelstatio,equild,arreq,nomval,vsol
u;
nmv:=[seq(param[1][i]=i,i=1..param[3])];
nmp:=eval(op([1,1],vval),nmv);i2:=op([1,2,2,2,2],vval);
arreq:=array(1..i2);vecp1:=param;
equild:=debeq;
for i from 1 to i2 do
vecp1[2][nmp]:=op([1,2],vval)[1,i];
modelstatio:=equastatio(vecp1);
equild:=fsolve({pic1=modelstatio[1],pic2=modelstatio[2],
n1=modelstatio[3],n2=modelstatio[4]},equild,

```

```

        {pic1=0.001..0.999,pic2=0.001..0.999,n1=1..infinity,
        n2=1..infinity});arreq[i]:=eval(modelstatio,equild);
od;
RETURN(arreq); end;

```

### Mise en forme des résidus de simulation

En entrée: **param** est la structure contenant les valeurs et les noms des paramètres, **arreq** est le tableau contenant les résultats de la simulation. En sortie, **[vsolu]** est une liste dont chaque élément est de la forme nom=[valeurs], où nom est le nom d'une variable et [valeurs] est le tableau contenant la suite de ses valeurs pour chacune des valeurs du paramètre

```

>
resusimu:=proc(param,arreq) local ii,ij,idf,nomval,vsolu,msur;
idf:=op([1,2,1,2],arreq);
nomval:=[pic1,pic2,n1,n2,nc1,nv1,nc2,nv2,phic0,phic1,phic2,ph
iv0,phiv1,phiv2,thetac1,thetac2,thetav1,thetav2,tc1,tc2,tv1,t
v2,t1,t2,e,ph0,ph1,ph2,h0,h1,h2,n0,RT,RD,Surplus];
vsolu:=seq(nomval[ij]=[seq(arreq[ii][ij],ii=1..idf)],ij=1..35
);
RETURN([vsolu]);end;

```

### Extraction des valeurs d'une variable après simulation

En entrée, **nomv** est le nom de la variable dont on souhaite extraire les valeurs, **lresu** est la liste des résultats de simulation (obtenue en sortie de resusimu). En sortie, on obtient un tableau de valeurs.

```

> extrairesu:=proc(nomv,lresu) local ii;
for ii from 1 to nops(lresu) do;
    if nomv=op(1,lresu[ii]) then RETURN(op(2,lresu[ii])) fi;
od;
RETURN(nomv); end;

```

### Extraction des valeurs de toutes les variables d'une itération après simulation

En entrée, **lresu** est la liste des résultats de simulation (obtenue en sortie de resusimu), **niter** est le numéro de l'itération pour laquelle on souhaite extraire les valeurs des variables. En sortie, on obtient un tableau de valeurs

```

> extraisimul:=proc(lresu,niter) local ii;
RETURN([seq(op([ii,1],lresu)=[op([ii,2,niter],lresu)],ii=1..n
ops(lresu))]); end;

```

### Extraction du label d'une variable

**nomv** est le nom de la variable dont on souhaite extraire le label, . En sortie, on obtient un tableau de valeurs. **lbv** est une liste de labels de la forme {nom='label',...} ou {nom={'label1','label2',...},...}, **nn** est un numéro d'ordre. En sortie, on obtient la valeur de 'label' associée à nomv, ou dans le cas d'une liste, le label n° nn.

```

> extlabel:=proc(nomv,lbv,nn) local ii;
if type(op([2],lbv[1]),list) then
    for ii from 1 to nops(lbv) do;
        if nomv=op(1,lbv[ii]) then RETURN(op([2,nn],lbv[ii])) fi;
    od;
else
    for ii from 1 to nops(lbv) do;
        if nomv=op(1,lbv[ii]) then RETURN(op(2,lbv[ii])) fi;
    od;
fi;
RETURN(); end;

```

### Mise à jour de la valeur d'un paramètre.

En entrée: **param** est la structure contenant les valeurs et les noms des paramètres, **nompar** est le nom

du paramètre à modifier, **valpar** est sa nouvelle valeur. En sortie, **para1** est la structure modifiée.

```
> majparam:=proc(param,nompar,valpar) local nmv,nmp,para1,ii;
nmv:=[seq(param[1][ii]=ii,ii=1..param[3])];
nmp:=eval(nompar,nmv);
para1:=param;
para1[2][nmp]:=valpar;
RETURN(para1); end;
```

### Retrouve la valeur d'un paramètre.

En entrée: **param** est la structure contenant les valeurs et les noms des paramètres, **nompar** est le nom du paramètre à trouver..

```
> valparam:=proc(param,nompar) local ii;
RETURN(param[2][eval(nompar,[seq(param[1][ii]=ii,ii=1..param[
3])])]); end;
```

### Détermine le rang de la valeur maximale d'une variable après simulation

En entrée, **nomv** est le nom de la variable dont on souhaite déterminer le mximum, **lresu** est la liste des résultats de simulation (obtenue en sortie de resusimu). En sortie, **rkm** est le rang du maximum.

```
> rnkmmaxresu:=proc(nomv,lresu) local ii,ij,rkm,valm,xv;
xv:=extrairesu(nomv,lresu);
rkm:=1;valm:=xv[1];
for ij from 2 to nops(xv) do;
  if xv[ij]>valm then;rkm:=ij;valm:=xv[ij]; fi;
od;
RETURN(rkm); end;
```

### Enchaîne une simulation derrière une autre

En entrée, **param** est la structure contenant les valeurs et les noms des paramètres, **lresu** est la liste des résultats de simulation (obtenue en sortie de resusimu) de la simulation précédente, **vecv** est la liste des valeurs du paramètre variant dans la simulation précédente, **rnk** est le rang du résultat à partir duquel enchaîner, **nomv** est le nom de la nouvelle variable à modifier, **nnv** est le nombre de valeurs à donner à cette variable, **pasv** est le pas de simulation, les valeurs successives étant espacées de 1/pasv. En sortie, on obtient la suite des nouvelles valeurs de param, lresu, vecv, ce qui permet d'enchaîner à nouveau.

```
> itersimul:=proc(param,lresu,vecv,rnk,nomv,nnv,pasv) local
rnkm,par1,inisim1,vcv2,arrq,solures;
rnkm:=rnk+1;
par1:=majparam(param,op([1,1],vecv),op([1,2],vecv)[1,rnkm]);
inisim1:={pic1=extrairesu(pic1,lresu)[rnkm],pic2=extrairesu(p
ic2,lresu)[rnkm],n1=extrairesu(n1,lresu)[rnkm],n2=extrairesu(
n2,lresu)[rnkm]};
vcv2:={nomv=evalm(matrix(1,nnv+1,valparam(par1,nomv))+matrix(
1,nnv+1,[seq(i,i=0..nnv)]/pasv))};
arrq:=multsimulst(par1,inisim1,vcv2);
solures:=resusimu(par1,arrq);
RETURN(par1,solures,vcv2); end;
```

### Enchaîne une simulation derrière une autre en partant de la valeur maximale du surplus de la simulation précédente

En entrée, **param** est la structure contenant les valeurs et les noms des paramètres, **lresu** est la liste des résultats de simulation (obtenue en sortie de **resusimu**) de la simulation précédente, **vecv** est la liste des valeurs du paramètre variant dans la simulation précédente, **nomv** est le nom de la nouvelle variable à modifier, **nnv** est le nombre de valeurs à donner à cette variable, **pasv** est le pas de simulation, les valeurs successives étant espacées de  $1/\text{pasv}$ . En sortie, on obtient la suite des nouvelles valeurs de **param**, **lresu**, **vecv**, ce qui permet d'anchaîner à nouveau.

```
> itersimax:=proc(param,lresu,vecv,nomv,nnv,pasv) local
rnkm,par1,inisim1,vcv2,arrq,solures,ii;
rnkm:=rnkmaxresu(Surplus,lresu);
par1:=majparam(param,op([1,1],vecv),op([1,2],vecv)[1,rnkm]);
inisim1:=(pic1=extrairesu(pic1,lresu)[rnkm],pic2=extrairesu(p
ic2,lresu)[rnkm],n1=extrairesu(n1,lresu)[rnkm],n2=extrairesu(
n2,lresu)[rnkm]);
vcv2:={nomv=evalm(matrix(1,nnv+1,valparam(par1,nomv))+matrix(
1,nnv+1,[seq(i,i=0..nnv)])/pasv)};
arrq:=multsimulst(par1,inisim1,vcv2);
solures:=resusimu(par1,arrq);
RETURN(par1,solures,vcv2); end;
```

### Représente graphiquement les valeurs d'une variable simulée en fonction des valeurs du paramètre variable

En entrée, **param** est la structure contenant les valeurs et les noms des paramètres, **lresu** est la liste des résultats de simulation (obtenue en sortie de **resusimu**) de la simulation précédente, **vecv** est la liste des valeurs du paramètre variant dans la simulation précédente, **lbv** est une liste de labels de la forme {nom='label',...}, **nomv** est le nom de la variable à représenter graphiquement,

```
> resuplot:=proc(param,lresu,vecv,lbv,nomv) local ii;
PLOT(CURVES([seq([op([1,2],vecv)[1,ii],extrairesu(nomv,lresu)
[ii]],ii=1..op([1,2,2,2,2],vecv)]),AXESLABELS(extlabel(op([1
,1],vecv),lbv),extlabel(nomv,lbv))));
end;
```

### Représente graphiquement les valeurs de plusieurs variables en fonction des valeurs du paramètre variable

En entrée, **param** est la structure contenant les valeurs et les noms des paramètres, **lresu** est la liste des résultats de simulation (obtenue en sortie de **resusimu**) de la simulation précédente, **lbv** est une liste de labels de la forme {nom='label',...} où 'label' servira à dénommer l'axe des abscisses, **vecv** est la liste des valeurs du paramètre variant dans la simulation précédente, **lbv2** est une liste de labels de la forme {nom={'label1','label2'},...}, où 'label1' sert à dénommer l'axe des ordonnées et 'label2' à identifier la série, **nomv** est une liste de variables entre crochets.

```
> resmultiplot:=proc(param,lresu,lbv,vecv,lbv2,nomv) local
ii,ij;
PLOT(seq(CURVES([seq([op([1,2],vecv)[1,ii],extrairesu(op([ij,
1],nomv),lresu)[ii]],ii=1..op([1,2,2,2,2],vecv)]),ij=1..nops
(nomv)),seq(TEXT([op([1,2],vecv)[1,round(op([1,2,2,2,2],vecv)
/2]),extrairesu(op([ij,1],nomv),lresu)[round(op([1,2,2,2,2],v
ecv)/2)]),extlabel(nomv[ij],lbv2,2),ALIGNRIGHT,ALIGNABOVE),ij
=1..nops(nomv)),AXESLABELS(extlabel(op([1,1],vecv),lbv),extla
bel(nomv[1],lbv2,1))));
end;
```

### Produit une table de résultats sur un ensemble de simulations isolées

En entrée, **lisnm** est la liste des noms des variables pour lesquelles on fait un tableau de résultats. Les paramètres suivants, en nombre variable, sont des listes de résultats d'une simulation (obtenues en sortie de **resusimu** après simulation par **simulstatio** ou extraites d'une simulation itérée par **estraisimul**). En sortie on obtient un tableau dont chaque ligne suivante donne les valeurs de chacune des variables de la liste **lisnm**. La première colonne contient le nom de la variable, les colonnes suivantes les valeurs des variables pour chacune des simulations.

```
> tableresu:=proc(lisnm) local arres,ii,ij;
arres:=array(1..nops(lisnm),1..nargs):
for ii from 1 to nops(lisnm) do;
  arres[ii,1]:=lisnm[ii];
  for ij from 2 to nargs do;
    arres[ii,ij]:=extrairesu(lisnm[ii],args[ij])[1];
  od;
od;
RETURN(op(1,arres)); end;
```

### Produit une table de résultats sur une sélection d'itérations d'une simulation

En entrée, **lresu** est la liste des résultats d'une simulation (obtenue en sortie de **resusimu**), **vecv** est la liste des valeurs du paramètre variant dans cette simulation, **lisnm** est la liste des noms des variables pour lesquelles on fait un tableau de résultats et **lisiter** est la liste des numéros des itérations dont on veut imprimer les résultats. En sortie on obtient un tableau dont la première ligne donne les valeurs du paramètre pour chacune des itérations sélectionnées et les lignes suivantes donnent les valeurs de chacune des variables de la liste **lisnm**. La première colonne contient le nom de la variable, les colonnes suivantes les valeurs des variables pour chacune des itérations sélectionnées.

```
> listeresu:=proc(lresu,vecv,lisnm,lisiter) local arres,ii,ij;
arres:=array(1..nops(lisnm)+1,1..nops(lisiter)+1):
arres[1,1]:=op([1,1],vecv);
for ij from 1 to nops(lisiter) do;
  arres[1,ij+1]:=op([1,2],vecv)[1,lisiter[ij]];
od;
for ii from 1 to nops(lisnm) do;
  arres[ii+1,1]:=lisnm[ii];
  for ij from 1 to nops(lisiter) do;
    arres[ii+1,ij+1]:=extrairesu(lisnm[ii],soluequib)
      [lisiter[ij]];
  od;
od;
RETURN(op(1,arres)); end;
```

### Fusion de résultats

En entrée; chaque argument est une liste de résultats de simulation (sortie de **resusimu**). En sortie, ces listes sont fusionnées en une seule

```
> reuresu:=proc() local ii,ij,ik,slr; slr:=args[1];
for ii from 2 to nargs do;
  slr:=[seq(op([ij,1],slr)=seq(op([ij,2],slr)[ik],
    ik=1..nops(op([ij,2],slr))),seq(op([ij,2],args[ii])[ik],
    ik=1..nops(op([ij,2],args[ii]))),ij=1..nops(slr))];
od;
RETURN(slr); end;
```

## Fusion de simulations

En entrée; chaque groupe de trois arguments correspond aux sorties de itersimul et de itersimax ou aux trois premiers paramètres en entrée de ces procédures. En sortie, trois éléments correspondant à la fusion des simulations pour chacun des trois types d'arguments: valeurs des paramètres, résultats de simulation, listes des valeurs du paramètre variable

```
> reuniter:=proc() local ii,ij,ik,prm,slr,vcv,xxx;
prm:=args[1];
slr:=args[2];vcv:=args[3];
for ii from 4 to nargs do;
  if modp(ii,3)=2 then
    slr:=[seq(op([ij,1],slr)=seq(op([ij,2],slr)[ik],
    ik=1..nops(op([ij,2],slr))),seq(op([ij,2],args[ii])[ik],
    ik=1..nops(op([ij,2],args[ii]))),ij=1..nops(slr))];
  fi;
  if modp(ii,3)=0 then
    vcv:={op([1,1],vcv)=matrix(1,op([1,2,2,2,2],vcv)
    +op([1,2,2,2,2],args[ii]),[seq(op([1,2],vcv)[1,ik],
    ik=1..op([1,2,2,2,2],vcv),seq(op([1,2],args[ii])[1,ik],
    ik=1..op([1,2,2,2,2],args[ii]))]);
  fi;
od;
RETURN(prm,slr,vcv);end;
```

## A4.3 Un exemple de simulation

On entre d'abord la liste des paramètres et de leurs valeurs

```
> prst:=paramstatio(A0 = 0, A1 = 70.0, A2 = 70, G0 = 55.0,
R0 = 0, R1 = 250.0, R2 = 250, S0 = 320.0, S1 = 1200.0,
L2 = 900.0, pg0 = 0, pc1 = 2.25, pc2 = 0.75, pv1 = 3.0,
pv2 = 1.0, ctc1 = 2.25, ctc2 = 0.75, ctv1 = 3.0,
ctv2 = 1.0, thct1 = 8, thct2 = 4, thcp1 = 10, thcp2 = 187.5,
thvt1 = 5, thvt2 = 2, thvp1 = 4, thvp2 = 187.5, thgt = 0, thgp1
= 300, thgp2 = 93750, gamma1 = .3, zeta = .65, mu = .5, w =
30.0, v = 5.0, cth = 100.0, cta = 50.0, ctr = 50.0,
ctg = 70.0):
```

On définit une liste de label longs. Ces labels servent pour les graphiques d'une série pour donner des noms aux axes

```
> labelvar:={pv1="Coût monétaire voiture banlieue",pv2="Coût
monétaire voiture périphérie",pc1="Coût monétaire TC
banlieue",pc2="Coût monétaire TC périphérie",pg0="Coût
monétaire stationnement",Surplus="Surplus",RD="Rente
différentielle",RT="Rente totale",n0="Population
centre",n1="Population banlieue",n1="Population
périphérie",ph0="Prix logement centre",ph1="Prix logement
banlieue",ph2="Prix logement périphérie",h0="Taille logement
centre",h1="Taille logement banlieue",h2="Taille logement
périphérie",pic1="Part TC banlieue",pic2="Part TC
périphérie",thetac1="Durée trajet TC banlieue",thetac2="Durée
trajet TC périphérie",thetav1="Durée trajet voiture
banlieue",thetav2="Durée trajet voiture périphérie",tc1="Coût
trajet TC banlieue",tc2="Coût trajet TC périphérie",tv1="Coût
trajet voiture banlieue",tv2="Coût trajet voiture
périphérie",t1="Coût moyen trajet banlieue",tv2="Coût moyen
trajet périphérie",e="Pollution"}:
```

On définit une liste de paires de labels courts. Ces labels servent pour les graphiques de plusieurs séries. Le premier label sert à nommer les axes des ordonnées, le deuxième à identifier la série.

```
> labelv2:={Surplus=["Rente","Surplus"],RD=["Rente","Différentielle"],RT=["Rente","Totale"],n0=["Population de la zone","Centre"],n1=["Population de la zone","Banlieue"],n2=["Population de la zone","Périphérie"],ph0=["Prix logement","Centre"],ph1=["Prix logement","Banlieue"],ph2=["Prix logement","Périphérie"],h0=["Taille logement","Centre"],h1=["Taille logement","Banlieue"],h2=["Taille logement","Périphérie"],pic1=["Part TC","Banlieue"],pic2=["Part TC","Périphérie"],thetac1=["Durée trajet TC","Banlieue"],thetac2=["Durée trajet TC","Périphérie"],thetav1=["Durée trajet voiture","Banlieue"],thetav2=["Durée trajet voiture","Périphérie"],tc1=["Coût trajet","TC Banlieue"],tc2=["Coût trajet","TC Périphérie"],tv1=["Coût trajet","VP Banlieue"],tv2=["Coût trajet","VP Périphérie"],t1=["Coût moyen trajet","Banlieue"],t2=["Coût moyen trajet","Périphérie"]}:

```

On définit la liste des variables de bouclage et leurs valeurs d'initialisation

```
> inisimul:={pic1 = .2046069151, pic2 = .09715458419, n1 = 35538.25380, n2 = 26368.21449};

```

*inisimul* :=

```
{ pic1 = .2046069151, pic2 = .09715458419, n1 = 35538.25380, n2 = 26368.21449 }
```

On fait la liste des valeurs de la variable *pvl* (coût monétaire voiture en banlieue) pour lesquelles on désire faire une simulation. On part de sa valeur dans la liste des paramètres, retrouvée grâce à la fonction *valparam*, et on lui ajoute des incréments allant de 0 à 3 par pas de 0,25.

```
> vecval:={pvl=evalm(matrix(1,13,valparam(prst,pvl))+matrix(1,13,[seq(i,i=0..12)])/4)};
vecval := { pvl = [3.0, 3.250000000, 3.500000000, 3.750000000, 4.0, 4.250000000, 4.500000000, 4.750000000, 5.0, 5.250000000, 5.500000000, 5.750000000, 6.0] }

```

On fait une première série de simulations. Il y en aura 13, une pour chaque valeur de la variable *pvl*.

```
> arrequib:=multsimulst(prst,inisimul,vecval);

```

*arrequib* := *arreq*

Maintenant, la simulation étant terminée, on fabrique la liste des valeurs de chacune des variables endogènes.

```
> soluequib:=resusimu(prst,arrequib):

```

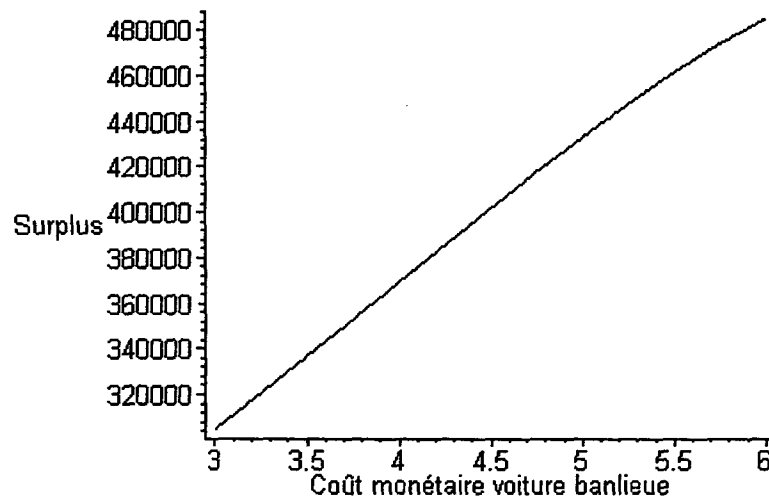
On extrait la liste des valeurs de la variable *Surplus*. Cette liste comprend 21 valeurs, correspondant à chacune des valeurs de la variable exogène *pvl*.

```
> extrairesu(Surplus,soluequib);
[304602.6087, 320768.4056, 337009.1577, 353312.5778, 369644.2712, 385939.4640, 402094.7253, 417961.6356, 433345.2164, 448010.2427, 461697.9104, 474153.0549, 485158.3868 ]

```

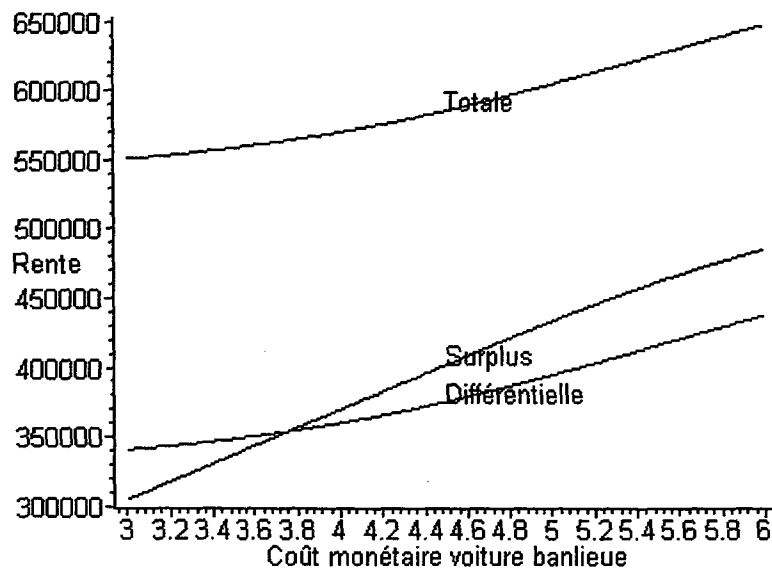
On représente graphiquement les valeurs de la variable *Surplus* en fonction des valeurs de *pvl*.

```
> resuplot(prst,soluequib,vecval,labelvar,Surplus);
```



On représente maintenant graphiquement les valeurs de trois variables : *Surplus*, *RT* qui est la valeur de la rente totale et *RD* qui est la valeur de la rente différentielle.

```
> resmultiplot(prst,soluequib,labelvar,vecval,labelv2,
{Surplus, RD,RT});
```



A la recherche d'un maximum, on décide d'itérer les simulations en partant de la dernière valeur simulée et en simulant à nouveau pour 12 valeurs de *pv1*, avec toujours un pas de 1/4.

```
> rssim:=itersimul(prst,soluequib,vecval,12,pv1,12,4):
```

On fusionne les résultats des deux simulations successives. Le groupe des trois premiers arguments, *prst,soluequib,vecval*, correspond au vecteur des paramètres, à la solution, et à la liste des valeurs de la première simulation. Le quatrième argument, *rssim*, regroupe les trois mêmes informations pour la deuxième simulation

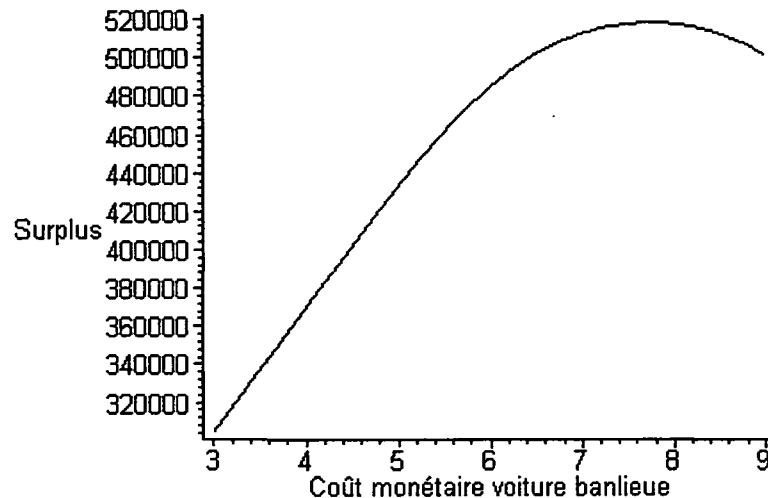
```
> rssim1:=reuniter(prst,soluequib,vecval,rssim):
```

En sortie de *reuniter*, on retrouve les mêmes arguments, dans le même ordre.

```
> prst1:=rssim1[1]:soluequib1:=rssim1[2]:vecval1:=rssim1[3]:
```

On représente graphiquement la série fusionnée en constatant qu'elle atteint bien un maximum.

```
> resuplot(prst1,soluequib1,vecval1,Surplus);
```



Le maximum de la variable surplus est atteint pour la vingt et unième simulation

```
> rnm:=rnkmaxresu(Surplus,soluequib1);
```

```
rnm := 21
```

Valeur du maximum

```
> extrairesu(Surplus,soluequib1)[rnm];
```

```
519004.9595
```

Ce maximum est atteint pour  $pvl=7,75$ .

```
> op([1,2],vecval1)[1,rnm];
```

```
7.750000000
```

Extraction des valeurs de l'ensemble des variables à l'optimum

```
> extraisimul(soluequib1,rnm);
```

```
[[pic1 = .9783767504], pic2 [= .5636664812], [n1 = 40913.83303], [nc1 = 40029.14302],
```

```
[nv1 = 884.69001], [nc2 = 16940.42766], [nv2 = 13113.56391], [phic0 = 56969.57068],
```

```
[phic1 = 56969.57068], [phic2 = 16940.42766], [phiv0 = 13998.25392],
```

```
[phiv1 = 13998.25392], [phiv2 = 13113.56391], [thetac1 = 16.12752973],
```

```
[thetac2 = 25.76205050], [thetav1 = 6.732068304], [thetav2 = 9.606472561],
```

```
[tc1 = 7.088258918], [tc2 = 10.72861515], [tv1 = 9.769620491], [tv2 = 11.63194177],
```

```
[t1 = 9.530163075], [t2 = 11.66820040], [e = 131930.8855], [ph0 = 1097.663884],
```

```
[ph1 = 237.9259917], [ph2 = 153.0399307], [h0 = .006832692691], [h1 = .02150861786],
```

```
[h2 = .02994610545], [n0 = 46833.65907], [RT = 698363.2533], [RD = 488363.2533],
```

```
[Surplus = 519004.9595]]
```

Préparation d'une table des variables extraite des simulations itérées, comparant le point de départ et le surplus maximum

```
> tableresu([thetac1,thetac2,thetav1,thetav2,tc1,tc2,tv1,tv2],  
soluequib,soluopty);
```

```
thetac1 12.28307975 16.12752973
```

```
thetac2 17.91616875 25.76205050
```

```
thetav1 10.10449911 6.732068304
```

```
thetav2 13.45175111 9.606472561
```

*tc1* 5.934923926 7.088258918  
*tc2* 8.374850625 10.72861515  
*tv1* 6.031349733 9.769620491  
*tv2* 8.035525332 11.63194177

Une autre manière d'obtenir une table

```
> listeresu(soluequib1,vecval1,  
[ph0,ph1,ph2,h0,h1,h2,n0,n1,n2],[1,10]);
```

*pv1* 3.0 5.250000000  
*ph0* 636.1512672 822.0422344  
*ph1* 236.5081451 245.1958788  
*ph2* 154.1744839 151.5675354  
*h0* .01178964876 .009123618823  
*h1* .02476204952 .02260491383  
*h2* .03413200390 .03242523180  
*n0* 27142.45407 35073.80200  
*n1* 35538.25380 38929.58879  
*n2* 26368.21449 27756.16242

## LES EQUATIONS DE CALCUL DE L'EQUILIBRE

BOUCLES DES LOCALISATIONS ET DES DEPLACEMENTS

```

[ Affectations des paramètres (sur l'exemple de Brest)
[ > S0:=320:      # Superficie au centre (Ha)
[ > R0:=0:        # Pas de route au centre
[ > G0:=55.0:     # Usage stationnement
[ > A0:=0:        # Pas de TC au centre
[ > S1:=1200:     # Superficie première couronne
[ > R1:=250.0:    # Usage routier en première couronne
[ > A1:=70.0:     # Usage TC en première couronne
[ > L2:=900.0:    # Usage résidentiel en deuxième couronne
[ > R2:=250.0:    # Usage routier en deuxième couronne
[ > A2:=70.0:     # Usage TC en deuxième couronne
[ > v:=5.0:       # Niveau d'utilité exogène
[ > w:=30.0:      # Richesse
[ > #les fonctions E et H sont dérivées de la fonction d'utilité
[    $U(h,c)=A \cdot h^{(1/4)} \cdot c^{(3/4)}$ , avec  $A=(1/4)^{(-1/4)} \cdot (3/4)$ 
[ > # Elles sont de la forme E(budget,utilité)
[ > E:=(x,y)->(x/y)^4:      # Fonction d'enchères
[ > H:=(x,y)->(1/4)*x^(-3)*y^4: # Fonction de demande hicksienne
[ > mu:=0.5:      # Paramètre d'incertitude
[ > zeta:=0.65:   # Préférence relative pour la voiture
[ > pg0:=0:       # Coût monétaire direct du stationnement
[ > pc1:=2.25:    # Coût monétaire direct des TC banlieue-centre
[ > pc2:=0.75:    # Coût monétaire direct des TC périphérie-banlieue
[ > pv1:=3:       # Coût monétaire direct de la voiture
[   banlieue-centre
[ > pv2:=1:       # Coût monétaire direct de la voiture
[   périphérie-banlieue
[ > ctc1:=2.25:   # Coût marginal d'un voyageur TC banlieue-centre
[ > ctc2:=0.75:   # Coût marginal d'un voyageur TC
[   périphérie-banlieue
[ > ctv1:=3:      # Coût d'usage de la voiture en banlieue-centre
[ > ctv2:=1:      # Coût d'usage direct de la voiture
[   périphérie-banlieue
[ > gamma1:=0.3:  # Valeur du temps
[ > cth:=100:     # Coût d'opportunité de l'unité de logement
[ > cta:=50:      # Coût d'opportunité de l'unité d'aménagement TC
[ > ctr:=50:      # Coût d'opportunité de l'unité d'aménagement
[   route

```

```

[ > ctg:=70:      # Coût d'opportunité de l'unité de garage
[ > # La fonction thetap calcule une durée de déplacement. t0, p1 et
[   p2 sont des paramètres déterminant la durée de déplacement sans
[   congestion (t0) et l'effet de la congestion (p1 et p2). Les
[   variables x et y correspondant respectivement à la disponibilité
[   de terre et au flux de circulation passant par la zone.
[ > thetap:=(t0,p1,p2,x,y)->t0+p1/(1+p2*x/y):
[ > thct1 := 8.0:  # Durée minimale de déplacement TC
[   banlieue-centre
[ > thct2 := 4.0:  # Durée minimale de déplacement TC périphérie
[   banlieue
[ > thcp1 := 10.0:thcp2 := 187.5: # Paramètres fonction de
[   congestion TC
[ > thvt1 := 5.0:  # Durée minimale de déplacement VP
[   banlieue-centre
[ > thvt2 := 2.0:  # Durée minimale de déplacement VP périphérie
[   banlieue
[ > thvp1 := 4.0: thvp2 := 187.5: # Paramètres fonction de
[   congestion VP
[ > thgt := 0.0:   # Durée minimale d'obtention d'un stationnement
[ > thgp1 := 300.0:thgp2 := 93750.0:  # Paramètres congestion
[   stationnement
[ > psip0:=x->x/10^6*(20.0/3.0)^(1/4): # Coût marginal de pollution
[ Les équations de la boucle des déplacements
[ Répartition par modes de transport
[ > nc1:=pic1*n1; # nombre d'usagers TC en première couronne
[   
$$nc1 := pic1\ n1$$

[ > nv1:=n1-nc1; # nombre d'usagers voiture en première couronne
[   
$$nv1 := n1 - pic1\ n1$$

[ > nc2:=pic2*n2; # nombre d'usagers TC en deuxième couronne
[   
$$nc2 := pic2\ n2$$

[ > nv2:=n2-nc2; # nombre d'usagers voiture en deuxième couronne
[   
$$nv2 := n2 - pic2\ n2$$

[ Flux par modes de transport
[ > phic0:=nc1+nc2; # Flux TC au centre
[   
$$phic0 := pic1\ n1 + pic2\ n2$$

[ > phic1:=nc1+nc2; # Flux TC en première couronne
[   
$$phic1 := pic1\ n1 + pic2\ n2$$

[ > phic2:=nc2;      # Flux TC en deuxième couronne
[   
$$phic2 := pic2\ n2$$

[ > phiv0:=nv1+nv2; # Flux voiture au centre
[   
$$phiv0 := n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2$$

[ > phiv1:=nv1+nv2; # Flux voiture en première couronne
[   
$$phiv1 := n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2$$


```

> phiv2:=nv2; # Flux voiture en deuxième couronne

$$phiv2 := n2 - pic2 \cdot n2$$

Durées de déplacement

> thetac1:=thetap(thct1,thcp1,thcp2,A1,phic1); # Temps TC première couronne

$$thetac1 := 8.0 + 10.0 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 \cdot n1 + pic2 \cdot n2}}$$

> thetac2:=thetac1+thetap(thct2,thcp1,thcp2,A2,phic2); # Temps TC deuxième couronne

$$thetac2 := 12.0 + 10.0 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 \cdot n1 + pic2 \cdot n2}} + 10.0 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic2 \cdot n2}}$$

> thetav1:=thetap(thgt,thgp1,thgp2,G0,phiv0)+thetap(thvt1,thvp1,thvp2,R1,phiv1); # Temps voiture première couronne

$$thetav1 := 300.0 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + 5.0$$

$$+ 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}}$$

> thetav2:=thetav1+thetap(thvt2,thvp1,thvp2,R2,phiv2); # Temps voiture deuxième couronne

$$thetav2 := 300.0 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + 7.0$$

$$+ 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 \cdot n2}}$$

Coûts généralisés

> tc1:=pc1+gamma1\*thetac1; # Coût généralisé TC première couronne

$$tc1 := 4.65 + 3.00 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 \cdot n1 + pic2 \cdot n2}}$$

> tc2:=pc1+pc2+gamma1\*thetac2; # Coût généralisé TC deuxième couronne

$$tc2 := 6.60 + 3.00 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 \cdot n1 + pic2 \cdot n2}} + 3.00 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic2 \cdot n2}}$$

```

tv1:=pg0+pv1+gamma1*thetav1; # Coût généralisé voiture banlieue
tv1 := 4.50 + 90.00  $\frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}}$ 
+ 1.20  $\frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}}$ 
> tv2:=pg0+pv1+pv2+gamma1*thetav2; # Coût généralisé voiture
deuxième couronne
tv2 := 6.10 + 90.00  $\frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}}$ 
+ 1.20  $\frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}}$  + 1.20  $\frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 \cdot n2}}$ 
> t1:=mu*ln(1/(1+zeta)*exp(tv1/mu)+1/(1-zeta)*exp(tc1/mu)); # Coût
généralisé moyen de déplacement en première couronne
t1 := .5 ln(.6060606061 e
 $\left( \frac{9.000000000 + 180.00000000 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} \right)$ 
+ 2.857142857 e  $\left( \frac{9.300000000 + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 \cdot n1 + pic2 \cdot n2}} \right)$ 
> t2:=mu*ln(1/(1+zeta)*exp(tv2/mu)+1/(1-zeta)*exp(tc2/mu)); # Coût
généralisé moyen en deuxième couronne
t2 := .5 ln(.6060606061 e
 $\left( \frac{12.200000000 + 180.00000000 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 \cdot n2}} \right)$ 
+ 2.857142857 e  $\left( \frac{13.200000000 + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 \cdot n1 + pic2 \cdot n2}} + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic2 \cdot n2}} \right)$ 
Choix modal
> eqpic1:=1/(1+zeta)*exp((tv1-t1)/mu); # part usagers TC première
couronne

```

$$\begin{aligned}
 eqpic1 := & .6060606061 e \left( \frac{9.000000000 + 180.0000000}{1 + .515625000 \cdot 10^7} \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2} \right. \\
 & + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00} \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2} - 1.000000000 \ln(.6060606061) \\
 & e \left( \frac{9.000000000 + 180.0000000}{1 + .515625000 \cdot 10^7} \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00} \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2} \right) \\
 & + 2.857142857 e \left( \frac{9.300000000 + 6.000000000}{1 + 13125.00} \frac{1}{pic1 \cdot n1 + pic2 \cdot n2} \right) \Bigg)
 \end{aligned}$$

> **eqpic2:=1/(1+zeta)\*exp((tv2-t2)/mu); # part usagers TC deuxième couronne**

$$\begin{aligned}
 eqpic2 := & .6060606061 e \left( \frac{12.200000000 + 180.0000000}{1 + .515625000 \cdot 10^7} \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2} \right. \\
 & + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00} \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00} \frac{1}{n2 - pic2 \cdot n2} - 1.000000000 \ln(.6060606061) e \\
 & \frac{12.200000000 + 180.0000000}{1 + .515625000 \cdot 10^7} \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00} \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2} \\
 & + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00} \frac{1}{n2 - pic2 \cdot n2} \Bigg) \\
 & + 2.857142857 e \left( \frac{13.200000000 + 6.000000000}{1 + 13125.00} \frac{1}{pic1 \cdot n1 + pic2 \cdot n2} + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00} \frac{1}{pic2 \cdot n2} \right) \Bigg)
 \end{aligned}$$

>

### Boucle des localisations

Fonctionnement du marché foncier

> **e:=(1-eqpic1)\*n1\*thetav1+(1-eqpic2)\*n2\*thetav2; # Pollution locale**

$$e := \left( 1 - .6060606061 e \left( \frac{9.000000000 + 180.0000000}{1 + .515625000 \cdot 10^7} \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2} \right) \right)$$

$$\begin{aligned}
& + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} - 1.000000000 \ln(.6060606061) \\
& e \left( 9.000000000 + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} \right) \\
& + 2.857142857 e \left( 9.300000000 + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 n1 + pic2 n2}} \right) \Bigg) n1 \left( \right. \\
& 300.0 \frac{1}{1 + .515625000 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} + 5.0 \\
& + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} \Bigg) + \left( 1 - .6060606061 e \right. \left. 12.20000000 \right) \\
& + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} \\
& + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 n2}} - 1.000000000 \ln(.6060606061) e \left( 12.20000000 \right) \\
& + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} \\
& + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 n2}} \Bigg) \\
& + 2.857142857 e \left( 13.200000000 + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 n1 + pic2 n2}} + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic2 n2}} \right) \Bigg) n2 \left( \right. \\
& 300.0 \frac{1}{1 + .515625000 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} + 7.0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left. + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 n2}} \right) \\
> \text{psip0 (e) ;} \\
& .1606856838 \cdot 10^{-5} \left( 1 - .6060606061 e \right. \\
& \quad \left. + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} - 1.000000000 \ln(.6060606061 \right. \\
& \quad \left. \left( 9.000000000 + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} \right) \right. \\
& \quad \left. + 2.857142857 e \left( 9.300000000 + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 n1 + pic2 n2}} \right) \right) \\
& \quad \left. \right) n1 \left( \right. \\
& \quad 300.0 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} + 5.0 \\
& \quad \left. + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} \right) + .1606856838 \cdot 10^{-5} \left( 1 - .6060606061 e \right. \\
& \quad \left. 12.20000000 + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} \right. \\
& \quad \left. + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 n2}} - 1.000000000 \ln(.6060606061 e \right. \\
& \quad \left. + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} \right. \\
& \quad \left. + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 n2}} \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + 2.857142857 e \left( \left( \left( \frac{13.20000000 + 6.000000000}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 \ n1 + pic2 \ n2}} + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic2 \ n2}} \right) \right) \right) n2 \left( \right. \\
& \left. \frac{300.0}{1 + .515625000 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \ n1 + n2 - pic2 \ n2}} + 7.0 \right. \\
& \left. + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \ n1 + n2 - pic2 \ n2}} + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 \ n2}} \right) \\
& > ph0 := E(w, v + psip0(e)); \quad \# \text{ prix du logement au centre} \\
& ph0 := 810000.0000 \ 1 / \left( 5.0 + .1606856838 10^{-5} \left( 1 - .6060606061 e \right. \right. \\
& \left. \left. + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \ n1 + n2 - pic2 \ n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \ n1 + n2 - pic2 \ n2}} - 1.000000000 \right. \right. \\
& \left. \left. \ln(.6060606061 \right. \right. \\
& \left. \left. \left( 9.000000000 + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \ n1 + n2 - pic2 \ n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \ n1 + n2 - pic2 \ n2}} \right) \right) \right) \\
& + 2.857142857 e \left( \left( \left( \frac{9.300000000 + 6.000000000}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 \ n1 + pic2 \ n2}} \right) \right) \right) n1 \left( \right. \\
& \left. \frac{300.0}{1 + .515625000 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \ n1 + n2 - pic2 \ n2}} + 5.0 \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} \left( + .1606856838 \cdot 10^{-5} \left( 1 - .6060606061 e \right) \right. \\
& 12.20000000 + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} \\
& + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 n2}} - 1.000000000 \ln(.6060606061 e) \left( 12.20000000 \right. \\
& + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} \\
& + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 n2}} \left. \right) \\
& + 2.857142857 e \left( 13.20000000 + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 n1 + pic2 n2}} + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic2 n2}} \right) \left. \right) n2 \left(
\end{aligned}$$

$$300.0 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} + 7.0$$

$$\left( + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 n2}} \right)$$

> ph1:=E(w-t1,v+psip0(e)); # prix du logement en première couronne

$$\begin{aligned}
ph1 := & \left( 30.0 - .5 \ln(.6060606061 e \right. \\
& \left. 9.000000000 + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + 2.857142857 e^{\left( \left( \frac{9.300000000 + 6.000000000}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1\ n1 + pic2\ n2}} \right) \right)} \Bigg/ \left( 5.0 + \right. \\
& .1606856838 \ 10^{-5} \left( 1 - .6060606061 e^{\left( \frac{9.000000000 + 180.0000000}{1 + .515625000 \ 10^7 \frac{1}{n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2}} \right)} \right. \\
& + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2}} - 1.000000000 \ln(.6060606061 \\
& e^{\left( \frac{9.000000000 + 180.0000000}{1 + .515625000 \ 10^7 \frac{1}{n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2}} \right)} \\
& + 2.857142857 e^{\left( \left( \frac{9.300000000 + 6.000000000}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1\ n1 + pic2\ n2}} \right) \right)} \Bigg) n1 \left( \right. \\
& 300.0 \frac{1}{1 + .515625000 \ 10^7 \frac{1}{n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2}} + 5.0 \\
& + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2}} \Bigg) + .1606856838 \ 10^{-5} \left( 1 - .6060606061 e^{\left( \right. \right. \\
& \frac{12.200000000 + 180.0000000}{1 + .515625000 \ 10^7 \frac{1}{n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2}} \\
& + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2\ n2}} - 1.000000000 \ln(.6060606061 e^{\left( 12.200000000 \right.} \\
& + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 \ 10^7 \frac{1}{n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 \, n2}} \\
& + 2.857142857 e \left( \left( \left( 13.20000000 + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 \, n1 + pic2 \, n2}} + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic2 \, n2}} \right) \right) \right) n2
\end{aligned}$$

$$300.0 \frac{1}{1 + .515625000 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} + 7.0$$

$$\begin{aligned}
& + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 \, n2}}
\end{aligned}$$

> ph2:=E(w-t2,v+psip0(e)); # prix du logement en deuxième couronne

$$\begin{aligned}
ph2 := & \left( 30.0 - .5 \ln \left( .6060606061 e \left( \left( 12.20000000 + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} \right. \right. \right. \right. \\
& + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 \, n2}} \\
& \left. \left. \left. + 2.857142857 e \left( \left( 13.20000000 + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 \, n1 + pic2 \, n2}} + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic2 \, n2}} \right) \right) \right) \right) \right)
\end{aligned}$$

$$\left( 5.0 + .1606856838 10^{-5} \left( 1 - .6060606061 e \left( 9.000000000 \right) \right) \right)$$

$$+ 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} - 1.000000000$$

$$\begin{aligned}
& \ln(.6060606061 \\
& e \left( \left( 9.000000000 + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} \right) \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + 2.857142857 e \left( \left( \left( \frac{9.300000000 + 6.000000000}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1\ n1 + pic2\ n2}} \right) \right) \right) n1 \left( \right. \\
& 300.0 \frac{1}{1 + .515625000 10^7 \frac{1}{n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2}} + 5.0 \\
& + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2}} \left. \right) + .1606856838 10^{-5} \left( 1 - .6060606061 e \right. \\
& 12.20000000 + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 10^7 \frac{1}{n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2}} \\
& + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2\ n2}} - 1.000000000 \ln(.6060606061 e) \left( 12.20000000 \right. \\
& + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 10^7 \frac{1}{n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2}} \\
& + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2\ n2}} \left. \right) \\
& + 2.857142857 e \left( \left( \left( \frac{13.20000000 + 6.000000000}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1\ n1 + pic2\ n2}} + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic2\ n2}} \right) \right) \right) n2 \left( \right. \\
& 300.0 \frac{1}{1 + .515625000 10^7 \frac{1}{n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2}} + 7.0 \\
& + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2}} + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2\ n2}} \left. \right) ^4
\end{aligned}$$

> h0:=H(w,v+psip0(e)); # superficie de logement au centre

$$\begin{aligned}
 h0 := & .9259259260 \cdot 10^{-5} \left( 5.0 + .1606856838 \cdot 10^{-5} \left( 1 - .6060606061 e^{\left( 9.000000000 \right. \right. \right. \\
 & + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} - 1.000000000 \\
 & \ln(.6060606061 \\
 & \left. \left( 9.000000000 + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} \right) \right) \\
 & + 2.857142857 e^{\left( 9.300000000 + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 \cdot n1 + pic2 \cdot n2}} \right)} \Bigg) n1 \left( \right. \\
 & 300.0 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + 5.0 \\
 & \left. + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} \right) + .1606856838 \cdot 10^{-5} \left( 1 - .6060606061 e^{\left( \right. \right. \\
 & 12.20000000 + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} \\
 & + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 \cdot n2}} - 1.000000000 \ln(.6060606061 e^{12.20000000} \\
 & + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} \\
 & \left. + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 \cdot n2}} \right) \Bigg)
 \end{aligned}$$

$$+ 2.857142857 e \left( \left( \left( \frac{13.20000000 + 6.000000000}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1\ n1 + pic2\ n2}} + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic2\ n2}} \right) \right) \right) n2 \left($$

$$300.0 \frac{1}{1 + .515625000 10^7 \frac{1}{n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2}} + 7.0$$

$$+ 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2}} + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2\ n2}} \left. \right) ^4$$

> h1:=H(w-t1,v+psip0(e)); # superficie de logement en première couronne

$$h1 := \frac{1}{4} \left( 5.0 + .1606856838 10^{-5} \left( 1 - .6060606061 e \right. \right. \left. \left. 9.000000000 \right) \right)$$

$$+ 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 10^7 \frac{1}{n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2}} - 1.000000000$$

$$\ln(.6060606061 e \left( \left( \left( 9.000000000 + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 10^7 \frac{1}{n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2}} \right) \right) \right)$$

$$+ 2.857142857 e \left( \left( \left( \frac{9.300000000 + 6.000000000}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1\ n1 + pic2\ n2}} \right) \right) \right) n1 \left($$

$$300.0 \frac{1}{1 + .515625000 10^7 \frac{1}{n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2}} + 5.0$$

$$\begin{aligned}
& + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} \Bigg) + .1606856838 \, 10^{-5} \left( 1 - .6060606061 \, e \right. \\
& 12.200000000 + 180.00000000 \frac{1}{1 + .515625000 \, 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} + 2.4000000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} \\
& + 2.4000000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 \, n2}} - 1.0000000000 \ln(.6060606061 \, e) \left( 12.200000000 \right. \\
& + 180.00000000 \frac{1}{1 + .515625000 \, 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} + 2.4000000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} \\
& + 2.4000000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 \, n2}} \Bigg) \\
& + 2.857142857 \, e \left( \left( 13.200000000 + 6.0000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 \, n1 + pic2 \, n2}} + 6.0000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic2 \, n2}} \right) \right) \Bigg) n2 \left(
\end{aligned}$$

$$300.0 \frac{1}{1 + .515625000 \, 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} + 7.0$$

$$+ 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 \, n2}} \Bigg)$$

$$\left( 30.0 - .5 \ln(.6060606061 \, e) \right.$$

$$\begin{aligned}
& \left( 9.0000000000 + 180.00000000 \frac{1}{1 + .515625000 \, 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} + 2.4000000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} \right) \\
& + 2.857142857 \, e \left( \left( 9.3000000000 + 6.0000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 \, n1 + pic2 \, n2}} \right) \right) \Bigg)
\end{aligned}$$

> h2:=H(w-t2,v+psip0(e)); # superficie de logement en deuxième couronne

$$\begin{aligned}
 h2 := & \frac{1}{4} \left( 5.0 + .1606856838 \cdot 10^{-5} \left( 1 - .6060606061 e \right. \right. \\
 & \left. \left. + 180.00000000 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + 2.4000000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} - 1.0000000000 \right. \right. \\
 & \left. \left. \ln(.6060606061 \right. \right. \\
 & \left. \left. \left( 9.000000000 + 180.00000000 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + 2.4000000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} \right) \right. \right. \\
 & \left. \left. + 2.857142857 e \left( 9.300000000 + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 \cdot n1 + pic2 \cdot n2}} \right) \right) \right. \\
 & \left. \left. \left. \right. \right. n1 \left( \right. \right. \\
 & \left. \left. 300.0 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + 5.0 \right. \right. \\
 & \left. \left. + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} \right) + .1606856838 \cdot 10^{-5} \left( 1 - .6060606061 e \right. \right. \\
 & \left. \left. 12.20000000 + 180.00000000 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + 2.4000000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} \right. \right. \\
 & \left. \left. + 2.4000000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 \cdot n2}} - 1.0000000000 \ln(.6060606061 e \right. \right. \\
 & \left. \left. + 180.00000000 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + 2.4000000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} \right. \right. \\
 & \left. \left. + 2.4000000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 \cdot n2}} \right) \right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + 2.857142857 e \left( \left( \left( 13.20000000 + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1\ n1 + pic2\ n2}} + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic2\ n2}} \right) \right) \right) n2 \left( \right. \\
& 300.0 \frac{1}{1 + .515625000 10^7 \frac{1}{n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2}} + 7.0 \\
& + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2}} + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2\ n2}} \left. \right)^4 \\
& / \left( 30.0 - .5 \ln \left( .6060606061 e \left( \left( 12.20000000 + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 10^7 \frac{1}{n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2}} \right) \right) \right. \right. \\
& + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2\ n2}} \left. \right) \\
& + 2.857142857 e \left( \left( \left( 13.20000000 + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1\ n1 + pic2\ n2}} + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic2\ n2}} \right) \right) \right)^3
\end{aligned}$$

> RT:=ph0\*(S0-R0-A0)+ph1\*(S1-R1-A1)+ph2\*L2; # Rente totale

$$\begin{aligned}
RT := & .2592000000 10^9 1 / \left( 5.0 + .1606856838 10^{-5} \left( 1 - .6060606061 e \left( \left( 9.000000000 \right. \right. \right. \right. \\
& + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 10^7 \frac{1}{n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2}} - 1.000000000 \\
& \ln \left( .6060606061 \right. \\
& \left. \left( 9.000000000 + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 10^7 \frac{1}{n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2}} \right) \right) \\
& e
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + 2.857142857 e \left( \left( \left( 9.300000000 + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 \, n1 + pic2 \, n2}} \right) \right) \right) n1 \left( \right. \\
& 300.0 \frac{1}{1 + .515625000 \, 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} + 5.0 \\
& + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} \left. \right) + .1606856838 \, 10^{-5} \left( 1 - .6060606061 e \right. \\
& 12.200000000 + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 \, 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} \\
& + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 \, n2}} - 1.000000000 \ln(.6060606061 e \left( 12.200000000 \right. \\
& + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 \, 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} \\
& + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 \, n2}} \left. \right) \\
& + 2.857142857 e \left( \left( \left( 13.200000000 + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 \, n1 + pic2 \, n2}} + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic2 \, n2}} \right) \right) \right) n2 \left( \right. \\
& 300.0 \frac{1}{1 + .515625000 \, 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} + 7.0 \\
& + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 \, n2}} \left. \right) + 880.0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left( 30.0 - .5 \ln \left( .6060606061 e \right. \right. \\
& \left. \left. \frac{9.000000000 + 180.0000000}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + \frac{2.400000000}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} \right) \right) \\
& + 2.857142857 e \left( \frac{9.300000000 + 6.000000000}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 \cdot n1 + pic2 \cdot n2}} \right)^4 \Bigg/ \left( 5.0 + \right. \\
& .1606856838 \cdot 10^{-5} \left( 1 - .6060606061 e \right. \\
& \left. \frac{2.400000000}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} - 1.000000000 \ln \left( .6060606061 \right. \right. \\
& \left. \left. \frac{9.000000000 + 180.0000000}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + \frac{2.400000000}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} \right) \right) \\
& e \left( \frac{9.300000000 + 6.000000000}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 \cdot n1 + pic2 \cdot n2}} \right)^4 \Bigg) n1 \left( \right. \\
& 300.0 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + 5.0 \\
& \left. + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} \right) + .1606856838 \cdot 10^{-5} \left( 1 - .6060606061 e \right. \\
& \left. \frac{12.200000000 + 180.0000000}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + \frac{2.400000000}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 n2}} - 1.000000000 \ln \left( .6060606061 e \right) \left( 12.200000000 \right. \\
& + 180.00000000 \frac{1}{1 + .515625000 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} \\
& + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 n2}} \left. \right) \\
& + 2.857142857 e \left( \left( 13.200000000 + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 n1 + pic2 n2}} + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic2 n2}} \right) \right) \left. \right) n2 \left( \right. \\
& 300.0 \frac{1}{1 + .515625000 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} + 7.0 \\
& + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 n2}} \left. \right) + 900.0 \\
& \left( 30.0 - .5 \ln \left( .6060606061 e \right) \left( 12.200000000 + 180.00000000 \frac{1}{1 + .515625000 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} \right. \right. \\
& + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 n2}} \left. \right) \\
& + 2.857142857 e \left( \left( 13.200000000 + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 n1 + pic2 n2}} + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic2 n2}} \right) \right) \left. \right) \\
& \left( 5.0 + .1606856838 10^{-5} \left( 1 - .6060606061 e \right) \left( 9.000000000 \right. \right. \\
& + 180.00000000 \frac{1}{1 + .515625000 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} - 1.000000000
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \ln(.6060606061) \\
& e^{\left( \frac{9.000000000 + 180.0000000}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + \frac{2.400000000}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} \right)} \\
& + 2.857142857 e^{\left( \frac{9.300000000 + 6.000000000}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 \cdot n1 + pic2 \cdot n2}} \right)} \Bigg) n1 \left( \right. \\
& \left. \frac{300.0}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + 5.0 \right. \\
& \left. + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} \right) + .1606856838 \cdot 10^{-5} \left( 1 - .6060606061 e^{\left( \right. \right.} \\
& \left. \frac{12.200000000 + 180.0000000}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + \frac{2.400000000}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} \right. \\
& \left. + \frac{2.400000000}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 \cdot n2}} - 1.000000000 \ln(.6060606061 e^{\left( \frac{12.200000000}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 \cdot n2}} \right)} \right. \\
& \left. + \frac{180.0000000}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + \frac{2.400000000}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} \right. \\
& \left. + \frac{2.400000000}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 \cdot n2}} \right) \\
& + 2.857142857 e^{\left( \frac{13.200000000 + 6.000000000}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 \cdot n1 + pic2 \cdot n2}} + \frac{6.000000000}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic2 \cdot n2}} \right)} \Bigg) n2 \left( \right. \\
& \left. \frac{300.0}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + 7.0 \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left. \left. \left. + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 \, n2}} \right) \right) \right\} \\
> RD := (ph0 - cth) * (S0 - R0 - A0) + (ph1 - cth) * (S1 - R1 - A1) + (ph2 - cth) * L2; \\
\# \text{ Rente différentielle} \\
RD := .2592000000 \, 10^9 \, 1 / \left( 5.0 + .1606856838 \, 10^{-5} \left( 1 - .6060606061 \, e \right. \right. \\
\left. \left. + 180.00000000 \frac{1}{1 + .515625000 \, 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} + 2.4000000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} - 1.0000000000 \right. \right. \\
\left. \left. \ln(.6060606061 \right. \right. \\
\left. \left. \left( 9.0000000000 + 180.00000000 \frac{1}{1 + .515625000 \, 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} + 2.4000000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} \right) \right. \right. \\
\left. \left. e \right. \right. \\
\left. \left. \left( 9.3000000000 + 6.0000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 \, n1 + pic2 \, n2}} \right) \right) \right) \right) \\
+ 2.857142857 \, e \left. \right) n1 \left( \right. \\
300.0 \frac{1}{1 + .515625000 \, 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} + 5.0 \\
\left. \left. \left. + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} \right) + .1606856838 \, 10^{-5} \left( 1 - .6060606061 \, e \right. \right. \right. \\
\left. \left. \left. 12.200000000 + 180.00000000 \frac{1}{1 + .515625000 \, 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} + 2.4000000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} \right) \right) \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 n2}} - 1.000000000 \ln \left( .6060606061 e \right. \\
& + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} \\
& + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 n2}} \left. \right) \\
& + 2.857142857 e \left( \left( 13.200000000 + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 n1 + pic2 n2}} + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic2 n2}} \right) \right) \left. \right) n2 \left( \right. \\
& 300.0 \frac{1}{1 + .515625000 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} + 7.0 \\
& + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 n2}} \left. \right) \left. \right)^4 \\
& - 210000.0 + 880.0 \left( 30.0 - .5 \ln \left( .6060606061 e \right. \right. \\
& \left. \left( 9.000000000 + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} \right) \right. \\
& + 2.857142857 e \left( \left( 9.300000000 + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 n1 + pic2 n2}} \right) \right) \left. \right) \left. \right)^4 \left. \right) \left. \right) \left( 5.0 + \right. \\
& .1606856838 10^{-5} \left( 1 - .6060606061 e \right. \left( 9.000000000 + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} \right) \left. \right) \left. \right) \left. \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} - 1.000000000 \ln(.6060606061) \\
& e \left( \frac{9.000000000 + 180.0000000}{1 + .515625000 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} + \frac{2.400000000}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} \right) \\
& + 2.857142857 e \left( \frac{9.300000000 + 6.000000000}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 n1 + pic2 n2}} \right) \Bigg) n1 \left( \right. \\
& 300.0 \frac{1}{1 + .515625000 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} + 5.0 \\
& + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} \Bigg) + .1606856838 10^{-5} \left( 1 - .6060606061 e \right) \\
& \frac{12.20000000 + 180.0000000}{1 + .515625000 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} + \frac{2.400000000}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} \\
& + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 n2}} - 1.000000000 \ln(.6060606061) e \left( 12.20000000 \right. \\
& + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} + \frac{2.400000000}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} \\
& + \left. \frac{2.400000000}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 n2}} \right) \\
& + 2.857142857 e \left( \frac{13.20000000 + 6.000000000}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 n1 + pic2 n2}} + \frac{6.000000000}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic2 n2}} \right) \Bigg) n2 \left( \right. \\
& 300.0 \frac{1}{1 + .515625000 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} + 7.0
\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
& + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} \Bigg) + .1606856838 \, 10^{-5} \left( 1 - .6060606061 \, e \right) \\
& 12.20000000 + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 \, 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} \\
& + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 \, n2}} - 1.000000000 \ln \left( .6060606061 \, e \right) \left( 12.20000000 \right. \\
& + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 \, 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} \\
& + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 \, n2}} \Bigg) \\
& + 2.857142857 \, e \left( \left( 13.20000000 + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 \, n1 + pic2 \, n2}} + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic2 \, n2}} \right) \right) \Bigg) \Bigg) n2 \left( \right.
\end{aligned}$$

$$300.0 \frac{1}{1 + .515625000 \, 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} + 7.0$$

$$\begin{aligned}
& + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 \, n2}} \Bigg) \Bigg) \Bigg) \Bigg)
\end{aligned}$$

**> Surplus := RD + (nc1 \* (pc1 - ctc1) + nc2 \* (pc1 - ctc1 + pc2 - ctc2) + nv1 \* (pg0 + pv1 - ctv1) + nv2 \* (pg0 + pv1 - ctv1 + pv2 - ctv2)) - (cta \* (A1 + A2) + ctr \* (R1 + R2) + ctg \* G0) ;**  
**# Surplus**

$$\text{Surplus} := .2592000000 \, 10^9 \, 1 / \left( 5.0 + .1606856838 \, 10^{-5} \left( 1 - .6060606061 \, e \right) \right) \left( 9.000000000 \right)$$

$$\begin{aligned}
& + 180.00000000 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + 2.4000000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} - 1.0000000000 \\
& \ln(.6060606061 \\
& e \left( 9.0000000000 + 180.00000000 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + 2.4000000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} \right) \\
& + 2.857142857 e \left( \left( \left( 9.3000000000 + 6.0000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 \cdot n1 + pic2 \cdot n2}} \right) \right) \right) n1 \left( \right. \\
& 300.0 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + 5.0 \\
& \left. + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} \right) + .1606856838 \cdot 10^{-5} \left( 1 - .6060606061 e \right) \\
& 12.20000000 + 180.00000000 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + 2.4000000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} \\
& + 2.4000000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 \cdot n2}} - 1.0000000000 \ln(.6060606061 e \left( 12.20000000 \right. \\
& + 180.00000000 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + 2.4000000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} \\
& + 2.4000000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 \cdot n2}} \left. \right) \\
& + 2.857142857 e \left( \left( \left( 13.2000000000 + 6.0000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 \cdot n1 + pic2 \cdot n2}} + 6.0000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic2 \cdot n2}} \right) \right) \right) n2 \left( \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& 300.0 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + 7.0 \\
& + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 \cdot n2}} \Bigg) \\
& - 245850.0 + 880.0 \left( 30.0 - .5 \ln \left( .6060606061 e \right. \right. \\
& \left. \left( 9.000000000 + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} \right) \right. \\
& \left. + 2.857142857 e \left( 9.300000000 + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 \cdot n1 + pic2 \cdot n2}} \right) \right) \Bigg) \Bigg) / \left( 5.0 + \right. \\
& \left. .1606856838 \cdot 10^{-5} \left( 1 - .6060606061 e \right. \right. \\
& \left. + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} - 1.000000000 \ln \left( .6060606061 \right. \right. \\
& \left. \left( 9.000000000 + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} \right) \right. \\
& \left. + 2.857142857 e \left( 9.300000000 + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 \cdot n1 + pic2 \cdot n2}} \right) \right) \Bigg) \Bigg) \Bigg) n1 \left( \right. \\
& 300.0 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + 5.0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} \left. \vphantom{\frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}}} \right\} + .1606856838 \cdot 10^{-5} \left( 1 - .6060606061 e \right) \\
& 12.20000000 + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} \\
& + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 n2}} - 1.000000000 \ln(.6060606061 e) \left( 12.20000000 \right. \\
& + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} \\
& + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 n2}} \left. \vphantom{\frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 n2}}} \right) \\
& + 2.857142857 e \left( 13.20000000 + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 n1 + pic2 n2}} + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic2 n2}} \right) \left. \vphantom{\frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic2 n2}}} \right) \left. \vphantom{\frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic2 n2}}} \right) n2 \left( \right. \\
& 300.0 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} + 7.0 \\
& + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 n2}} \left. \vphantom{\frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 n2}}} \right) + 900.0 \\
& \left( 30.0 - .5 \ln(.6060606061 e) \left( 12.20000000 + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} \right. \right. \\
& + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 n2}} \left. \vphantom{\frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 n2}}} \right) \\
& + 2.857142857 e \left( 13.20000000 + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 n1 + pic2 n2}} + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic2 n2}} \right) \left. \vphantom{\frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic2 n2}}} \right) \left. \vphantom{\frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic2 n2}}} \right) \left. \vphantom{\frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic2 n2}}} \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left( 5.0 + .1606856838 \cdot 10^{-5} \left( 1 - .6060606061 e \right) \right. \\
& + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} - 1.000000000 \\
& \ln(.6060606061 \\
& e \left( 9.000000000 + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} \right) \\
& + 2.857142857 e \left( \frac{9.300000000 + 6.000000000}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 \cdot n1 + pic2 \cdot n2}} \right) \Bigg) n1 \left( \right. \\
& 300.0 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + 5.0 \\
& + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} \Bigg) + .1606856838 \cdot 10^{-5} \left( 1 - .6060606061 e \right) \\
& 12.20000000 + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} \\
& + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 \cdot n2}} - 1.000000000 \ln(.6060606061 e \left( 12.20000000 \right. \\
& + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} \\
& + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 \cdot n2}} \Bigg)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + 2.857142857 e \left( \left( \left( \frac{13.20000000 + 6.000000000}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 \ n1 + pic2 \ n2}} + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic2 \ n2}} \right) \right) \right) n2 \left( \right. \\
& \left. \frac{300.0}{1 + .515625000 \ 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \ n1 + n2 - pic2 \ n2}} + 7.0 \right. \\
& \left. + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \ n1 + n2 - pic2 \ n2}} + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 \ n2}} \right) n1 \left( \right. \\
& > eqn0 := S0/h0; \quad \# \text{ Population au centre} \\
& eqn0 := .3456000000 \ 10^8 \ 1 / \left( 5.0 + .1606856838 \ 10^{-5} \left( 1 - .6060606061 e \right. \right. \\
& \left. \left. + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 \ 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \ n1 + n2 - pic2 \ n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \ n1 + n2 - pic2 \ n2}} - 1.000000000 \right. \right. \\
& \left. \left. \ln(.6060606061 \right. \right. \\
& \left. \left. \left( 9.000000000 + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 \ 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \ n1 + n2 - pic2 \ n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \ n1 + n2 - pic2 \ n2}} \right) \right. \right. \\
& \left. \left. + 2.857142857 e \left( \left( \left( \frac{9.300000000 + 6.000000000}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 \ n1 + pic2 \ n2}} \right) \right) \right) n1 \left( \right. \right. \\
& \left. \left. \frac{300.0}{1 + .515625000 \ 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \ n1 + n2 - pic2 \ n2}} + 5.0 \right. \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} \left. + .1606856838 \cdot 10^{-5} \left( 1 - .6060606061 e \right) \right\} \\
& 12.20000000 + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} \\
& + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 n2}} - 1.000000000 \ln \left( .6060606061 e \right) \left. \left( 12.20000000 \right) \right\} \\
& + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} \\
& + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 n2}} \left. \left( 13.20000000 + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 n1 + pic2 n2}} + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic2 n2}} \right) \right\} \\
& + 2.857142857 e \left. \right\} n2 \left(
\end{aligned}$$

$$300.0 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} + 7.0$$

$$\left. \left. \left. + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 n2}} \right) \right) \right\}^4$$

> eqn1 := (S1-R1-A1)/h1; # Population en première couronne

$$eqn1 := 3520.0 \left( 30.0 - .5 \ln \left( .6060606061 e \right) \right)$$

$$\left( 9.000000000 + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 n1 + n2 - pic2 n2}} \right)$$

$$\begin{aligned}
& + 2.857142857 e^{\left( \left( \left( 9.300000000 + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1\ n1 + pic2\ n2}} \right) \right) \right)^3} \Bigg/ \left( 5.0 + \right. \\
& .1606856838 \cdot 10^{-5} \left( 1 - .6060606061 e^{\left( \left( 9.000000000 + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2}} \right) \right)} \right. \\
& + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2}} - 1.000000000 \ln(.6060606061 \\
& e^{\left( \left( 9.000000000 + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2}} \right) \right)} \\
& + 2.857142857 e^{\left( \left( \left( 9.300000000 + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1\ n1 + pic2\ n2}} \right) \right) \right)^3} \Bigg) n1 \left( \right. \\
& 300.0 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2}} + 5.0 \\
& + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2}} \Bigg) + .1606856838 \cdot 10^{-5} \left( 1 - .6060606061 e^{\left( \right. \right. \\
& 12.20000000 + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2}} \\
& + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2\ n2}} - 1.000000000 \ln(.6060606061 e^{12.20000000} \\
& + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1\ n1 + n2 - pic2\ n2}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 \, n2}} \Bigg) \\
& + 2.857142857 \, e \left( \left( \left( 13.200000000 + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 \, n1 + pic2 \, n2}} + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic2 \, n2}} \right) \right) \right) \Bigg) n2 \Bigg)
\end{aligned}$$

$$300.0 \frac{1}{1 + .515625000 \, 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} + 7.0$$

$$\begin{aligned}
& + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 \, n2}} \Bigg) \Bigg) \Bigg) \Bigg)
\end{aligned}$$

> eqn2:=L2/h2; # Population en deuxième couronne

$$\begin{aligned}
eqn2 := & 3600.0 \left( 30.0 - .5 \ln \left( .6060606061 \, e \right. \right. \\
& + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 \, 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} \\
& + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 \, n2}} \Bigg) \\
& + 2.857142857 \, e \left( \left( \left( 13.200000000 + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 \, n1 + pic2 \, n2}} + 6.000000000 \frac{1}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic2 \, n2}} \right) \right) \right) \Bigg) \Bigg)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left( 5.0 + .1606856838 \, 10^{-5} \left( 1 - .6060606061 \, e \right. \right. \\
& + 180.0000000 \frac{1}{1 + .515625000 \, 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \, n1 + n2 - pic2 \, n2}} - 1.000000000 \\
& \left. \ln(.6060606061) \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& e \left( \frac{9.000000000 + 180.0000000}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + \frac{2.400000000}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} \right) \\
& + 2.857142857 e \left( \frac{9.300000000 + 6.000000000}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 \cdot n1 + pic2 \cdot n2}} \right) \Bigg) n1 \left( \right. \\
& \frac{300.0}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + 5.0 \\
& \left. + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} \right) + .1606856838 \cdot 10^{-5} \left( 1 - .6060606061 e \right. \\
& \frac{12.200000000 + 180.0000000}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + \frac{2.400000000}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} \\
& \left. + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 \cdot n2}} - 1.000000000 \ln \left( .6060606061 e \right. \right. \\
& \frac{180.0000000}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + \frac{2.400000000}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} \\
& \left. + 2.400000000 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 \cdot n2}} \right) \\
& + 2.857142857 e \left( \frac{13.200000000 + 6.000000000}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic1 \cdot n1 + pic2 \cdot n2}} + \frac{6.000000000}{1 + 13125.00 \frac{1}{pic2 \cdot n2}} \right) \Bigg) n2 \left( \right. \\
& \frac{300.0}{1 + .515625000 \cdot 10^7 \frac{1}{n1 - pic1 \cdot n1 + n2 - pic2 \cdot n2}} + 7.0
\end{aligned}$$

$$\left[ \begin{array}{c} +4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n1 - pic1 \ n1 + n2 - pic2 \ n2}} + 4.0 \frac{1}{1 + 46875.00 \frac{1}{n2 - pic2 \ n2}} \end{array} \right] \Bigg)^4$$

[ >



**direction  
des Affaires  
économiques  
et internationales**

**Service  
économique  
et statistique**

**Tour Pascal B  
92055**

**La Défense cedex**

**téléphone :**

**(33/0) 1 40 81 13 15**

**télécopie :**

**(33/0) 1 40 81 13 30**

**[www.equipement.gouv.](http://www.equipement.gouv.fr/statistiques)**

**[fr/statistiques](http://www.equipement.gouv.fr/statistiques)**