



HAL
open science

Études de modèles urbains pour l'intégration de la mobilité électrique

Benjamin Yves Pierre Mousseau

► **To cite this version:**

Benjamin Yves Pierre Mousseau. Études de modèles urbains pour l'intégration de la mobilité électrique. Energie électrique. 2009. dumas-00551317

HAL Id: dumas-00551317

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00551317>

Submitted on 3 Jan 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



MASTER SCIENCES ET TECHNIQUES DES ENVIRONNEMENTS URBAINS

SPECIALITE ATMOSPHERE, EAU ET ENVIRONNEMENTS URBAINS

Année 2008 ./2009

Thèse de Master STEU

Diplôme cohabilité par

l'École Centrale de Nantes,

l'Ecole Nationale Supérieure des Techniques Industrielles et des Mines de Nantes

l'Ecole Supérieure d'Architecture de Nantes,

l'Université de Nantes

Présentée et soutenue par :

Mousseau Benjamin

le 29/09/2009

à l'École Centrale de Nantes



TITRE

ÉTUDES DE MODELES URBAINS POUR L'INTEGRATOIN DE LA MOBILITE ELECTRIQUE

JURY

Président :	Jean-François Sini	(Professeur)
Examineurs :	Laurent Perret	(Maître de Conférences)
	Jean-Michel Rosant	(Chargé de Recherche au CNRS)
	Jean-François Sini	(Professeur)

Directeur de mémoire : Jean-François Sini (Professeur), Anne Sophie Fulda

Laboratoire/ Institution : EIFER (European Institut for Energy Research)

Co-encadrant : ---

Résumé en français (obligatoire)

Les modèles urbains de Land Use/ Transport Interaction (LUTI) permettent de faire des prospectives à 20-30 ans sur un certain nombre d'indicateurs urbains, environnementaux, énergétiques et de transport, ainsi que des bilans énergétiques. Ces modèles ont été étudiés dans le but de connaître les possibilités d'y intégrer un module permettant de réaliser des scénarios de pénétration du véhicule électrique dans le parc roulant, afin de connaître les interactions de ce nouveau mode de mobilité avec l'urbanisation et le transport urbain. Le stage a été réalisé à EIFER (European Institut for Energy Research) à Karlsruhe en Allemagne

Mots-clés : Modélisation, transport, urbanisme, LUTI, bilans énergétiques, véhicule électrique, environnement, mobilité, interactions, pénétration du parc roulant, bornes de rechargement.

Titre et résumé en anglais (très recommandé)

Study of a Land-Use/ Transport Interaction (LUTI) model to create an integrated part for electric vehicles.

The LUTI models are used to give long-term results of the interactions between land use and transport in urban context. This bring environmental and energy outcomes. These models have been studied in the aim to create a special part dedicated to electric vehicles, which could be integrated to the model. The internship took place in Karlsruhe (D) by EIFER (European Institut for Energy Research)

Mots-clés : Modélisation, transport, urbanism, LUTI, energetic outcomes, electric car, environment, mobility, interactions, loading terminals

Discipline : Energy in urban context

SOMMAIRE

I.	Introduction.....	6
1.	Présentation d'EIFER.....	6
1-	Historique.....	6
2-	Activités.....	6
2.	Mise en place du projet.....	9
3.	Présentation du projet.....	11
II.	Approche théorique : MARS et SIMAURIF.....	12
1.	Description des LUTI.....	12
1-	MARS.....	13
2-	SIMAURIF.....	26
2.	Problèmes de LUTI.....	36
1-	Bases de données trop importantes.....	36
2-	Difficulté de la prise en compte environnementale.....	37
3-	Problèmes d'adaptabilité.....	40
III.	Intégration des VE à la simulation.....	41
1.	Réseau de distribution de l'énergie et localisation des bornes.....	41
1-	Réseau de distribution d'électricité.....	41
2-	Localisation des bornes de charges.....	42
2.	VE un mode de déplacement.....	44
3.	VE et Urbanisation.....	45
IV.	Intégration d'un module VE dans les LUTI.....	45
1.	Structure du module.....	45
2.	Interaction avec le LUTI.....	47
1-	Pénétration des VE \leftrightarrow localisation des bornes.....	47

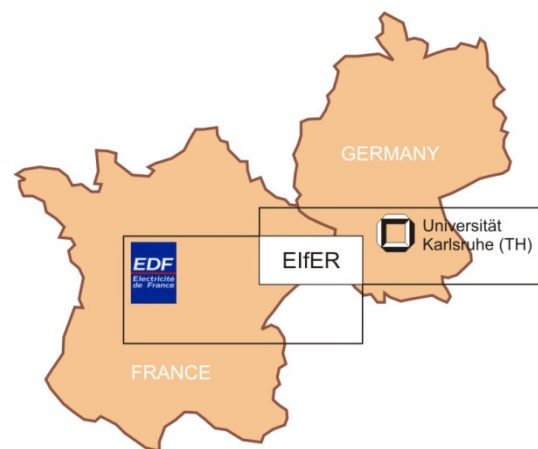
2-	Pénétration des VE \Leftrightarrow LU	47
3-	Pénétration des VE \Leftrightarrow Transport.....	48
4-	Localisation des bornes \Leftrightarrow LU	49
5-	Localisation des bornes \Leftrightarrow Transport.....	50
3.	Intégration de deux sous modèles	50
1-	Localisation des bornes.....	50
2-	Pénétration des VE.....	52
V.	Conclusion	58
VI.	Bilan du stage	59
VII.	Bibliographie.....	60
VIII.	ANNEXES (Principes théoriques)	63
1.	Causal Loop Diagrams (CLD).....	63
2.	Théorie du temps de trajet constant	65
3.	Coefficients de frottements	66
4.	Structure d'optimisation	67
5.	Modèle hédonique	68
6.	ACCESSIBILITÉ: Théorie des Logsum.....	69

I. Introduction

1. Présentation d'EIFER

1- Historique

EIFER est le diminutif d'European Institute For Energy Research (institut européen de recherche sur l'énergie). Fondé le 28 septembre 2001 par EDF et l'université de Karlsruhe, c'est un groupement européen d'intérêt économique (GEIE). Sa naissance est issue d'un accord entre la région du Baden-Württemberg et EDF suite au rachat de parts d'EnBW. En effet, dès les années 60, EDF coopère avec le groupe énergétique du Baden-Württemberg Badenwerk (appelé EnBW depuis 1999).



Quarante ans plus tard, la possibilité de participer au capital d'EnBW s'offre à EDF. EnBW compte alors parmi les principaux producteurs et fournisseurs d'électricité en Allemagne. Ce n'est qu'à la condition que la compagnie française investisse dans la recherche régionale que la région du Baden-Württemberg vend 35% de ses capitaux. C'est le début d'une collaboration franco-allemande avec l'université de Karlsruhe pour une durée minimum de 5 ans.

Bien que sa création soit issue de volontés stratégiques et économiques, ce partenariat est toujours d'actualité. C'est aujourd'hui l'illustration d'une volonté de collaboration entre l'Allemagne et la France dans le domaine énergétique et environnemental.

2- Activités

EIFER est le quatrième centre de recherche et développement (R&D) d'EDF, après ceux de Clamart, Chatou et Les Renardières, situés en banlieue parisienne. Il a débuté avec seulement dix employés, et a su se développer. Le groupe compte maintenant 85 personnes de 10 pays différents, travaillant dans différents domaines et cherche encore à s'agrandir.

Les champs de recherches et les thèmes de travail de l'institut sont principalement basés sur les besoins en R&D d'EDF, mais aussi ceux d'EnBW et de plus en plus répondent à ceux de l'UE, de la France et de l'Allemagne via la participation à des projets européens ou nationaux. L'institut est composé de quatre groupes qui étudient l'Energie en Contexte Urbain, la Planification Energétique Régionale, la Production d'Energie Décentralisée (incluant les Piles à Combustibles et l'Hydrogène) et les Aspects Economiques de l'Energie et de l'Environnement. Ces divers points permettent d'appréhender la situation énergétique actuelle de manière globale et les nouvelles problématiques qui en découlent, notamment d'un point de vue environnemental. Au cœur de l'actualité, ces problèmes environnementaux et la gestion des ressources énergétiques font l'objet de nombreuses études.

Il s'agit donc d'un double objectif visant à développer ou à améliorer des technologies de production d'énergies, tout en mettant en place des techniques et des outils permettant un développement territorial et industriel durable. L'approche proposée par EIFER s'organise autour de 7 échelles ou secteurs d'activités; la très forte interaction existant entre ces divers domaines d'études est une démarche essentielle dans ce centre de recherche. Elle permet de lier les approches techniques et écologiques ainsi que les enjeux sociaux et économiques des différentes problématiques énergétiques actuelles.



Figure 1 : Les 7 échelles/secteurs d'activité autour desquels s'organise la recherche chez EIFER

Afin de mener à bien sa mission, l'institut se compose de quatre groupes, à savoir : l'Energie en Contexte Urbain, Planification Energétique Régionale, Production d'Energie Décentralisée, Aspects Economiques de l'Energie et de l'Environnement. Une ouverture des « frontières » entre ces différentes sections permet de mieux aborder la complexité des problèmes car les échanges sont

favorisés. Ainsi nous évitons une vision trop simpliste des analyses et des résultats obtenus par la recherche. Le détail ci-dessous permettra de mieux comprendre leurs méthodes de travaux dans chacun de ces secteurs.

Le groupe « *Energie régionale durable* » travaille avec les collectivités territoriales (région, département ou commune) afin d'optimiser la gestion de l'énergie tout en favorisant l'économie locale et l'emploi. Cette approche se décompose en trois étapes :

- Evaluation du métabolisme énergétique régional
- Inventaire des ressources énergétiques régionales (éolien, photovoltaïque, géothermie, bioénergie, hydraulique)
- Planification énergétique.

Celui « *d'Energie en contexte urbain* » traite de projets abordant des problématiques énergétiques spécifiques à l'environnement urbain. Les activités de ce groupe s'articulent autour de trois grands axes :

- L'analyse prospective afin d'anticiper l'évolution d'un tissu urbain donné, en terme de besoins énergétiques
- Le management énergétique des villes et des quartiers
- Les nouveaux modèles d'affaires (possibilités d'exploitation rentables).

C'est dans ce groupe que j'ai réalisé mon stage, sur la prospective énergétique liés aux transports urbains.

L'équipe de « *Production décentralisée* » développe des technologies basées sur la combustion et destinées à des applications résidentielles. En procédant de cette manière, EIFER développe des solutions d'intégration aux bâtiments, qui préparent le terrain aux systèmes basés sur les piles à combustible, domaine dans lequel EIFER a déjà déposé plusieurs brevets.

Le groupe « *Aspects économiques de l'énergie et de l'environnement* » travaille notamment sur l'évaluation des impacts de la production d'énergie sur l'environnement ainsi que sur les différents scénarios d'approvisionnement énergétique futur en Europe.

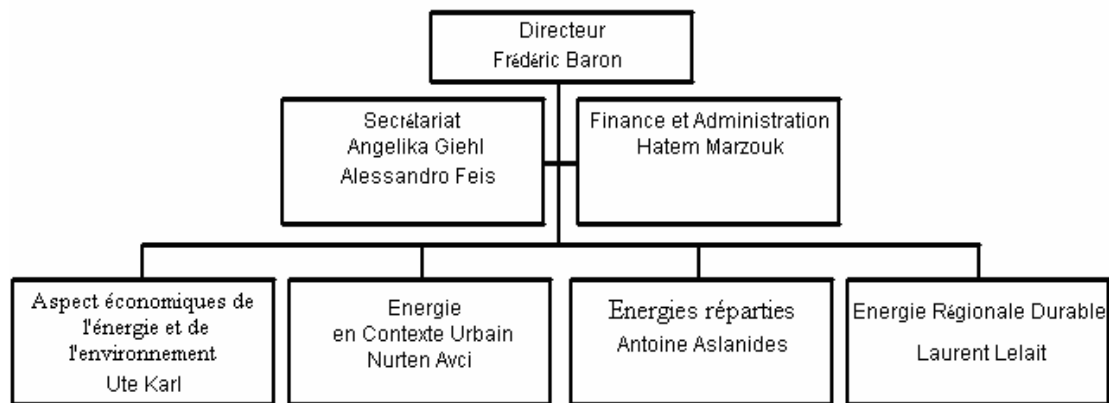


Figure 2 : Organigramme de l'Institut EIFER

2. Mise en place du projet

Une recherche bibliographique sur les LUTI a constitué la première partie de mon stage. Le but était de se familiariser avec ces logiciels ainsi qu'avec les problématiques d'urbanisation et de transport en relation avec ces logiciels. J'ai tout d'abord fait l'inventaire d'un certain nombre de LUTI, puis en ai fait l'étude. Je me suis au départ basé sur le rapport de ma maitre de stage, Anne Sophie Fulda, qui a réalisé un état de l'art des modèles existant. Le but initial de mon stage était de faire une comparaison de différents LUTI, afin de choisir le plus adapté à l'intégration d'un module sur les véhicules électriques. Cette période très enrichissante m'a donné les bases pour les études suivantes. A partir de cette bibliographie, j'ai choisi cinq LUTI à comparer : SUTRA, MARS, UrbanSim, MobiSim, IRPUD. Ils ont été choisis pour l'avancé de leur développement, le nombre de villes modélisées, leur renommé, et le fait qu'ils soient tous très complets. Nous avons ensuite, avec Anne Sophie Fulda, contacté les développeurs afin de les rencontrer pour avoir des informations complémentaires et discuter d'un éventuel partenariat pour les tester. En parallèle, nous avons entrepris un travail de collecte de données sur différentes villes. J'ai répertorié les données nécessaires pour faire tourner les modèles, et les ai classées afin de présenter nos demandes aux villes choisies. Une banque de donnée sur Stuttgart existe déjà à EIFER, utilisé pour un autre projet. Stuttgart représente une ville de taille moyenne, intéressante pour ce genre d'étude car représentative d'un certain nombre de ville et peu atypique par rapport à une grande capitale. Pourtant, l'étude sur les VE ayant pour destinataire EDF, nous souhaitions avoir des données sur l'intégration de la mobilité électrique en France. Il nous fallait donc une banque de donnée d'une ville française. Après des échanges avec différents collègues d'EIFER, nous avons porté notre choix sur Mulhouse. Cette ville a en effet un passé de collaboration avec EIFER. Des projets sur les écoquartiers avaient déjà été menés, et des liens avec les services de la ville étaient déjà forgés. De plus, deux nouveaux projets étaient en négociations, et donc de nouvelles rencontres entre l'équipe d'EIFER et la ville de Mulhouse étaient programmées. J'ai donc rencontré M. Wolf, du SITRAM, la SEM des transports de Mulhouse, ainsi

que M. Bavay, de l'agence d'urbanisme. J'ai pu leur exposer mon projet d'étude d'une ville avec un LUTI. Ils ont été intéressés et nous avons commencé un échange de données. Mulhouse correspondait aussi à une ville de taille intéressante, représentant un certain nombre de ville française. J'ai ensuite rencontré les développeurs de plusieurs LUTI. Nous avons pu être en contact avec les développeurs de trois des cinq LUTI choisis :

- M. Emberger, de l'université de Vienne, développeur de MARS
- M. Wegener, de l'université de Dortmund, développeur d'IRPUD
- M. De Palma, de l'ENS Cachan et Mme Picard, de l'université de Cergy Pontoise, développeurs de SIMAURIF (construit avec Urbansim) en partenariat avec l'agence d'urbanisme de l'Île de France (IAU).

Nous avons tout d'abord organisé une conférence téléphonique avec M. Wegener. L'information principale issue de cette réunion est que pour Wegener, il est irréaliste de vouloir faire tourner un modèle LUTI en moins de 6 mois pour un stagiaire. Le temps nécessaire selon lui est plus proche de trois ans pour une équipe de quatre à cinq chercheurs. Il nous a donc proposé plusieurs pistes dont celle de mettre en place un module sur les véhicules électriques (VE) intégrable aux LUTI, après avoir fait l'étude de certains modèles. Nous avons aussi discuté de ses relations avec les autres développeurs et il s'est proposé de nous présenter à certains d'entre eux. Wegener est un des plus éminent chercheur sur les LUTI, et il a travaillé pendant des années sur son modèle IRPUD. Cependant, il semble qu'il soit vraiment trop complexe, et qu'il demande beaucoup de temps de mise en place. C'est aussi l'avis de M. Emberger, que nous avons rencontré ensuite.

M. Emberger est le développeur de MARS, de l'Institut de planification et de techniques des transports, de l'université de Vienne. La réunion m'a permis de connaître le fonctionnement de MARS, qu'il m'a décrit en faisant tourner le modèle. J'ai pu lui poser différentes questions et lui exposer notre projet. MARS est plus facile et rapide à utiliser que IRPUD, mais il est tout de même difficile selon lui de réaliser l'étude d'une nouvelle ville en peu de temps. Au sujet des VE, il considère que ce n'est pas un thème à intégrer aux LUTI puisque les distances journalières parcourues en ville ne sont pas supérieures à l'autonomie des batteries. Il suffit donc de pouvoir recharger à la maison et l'utilisation des VE ne change rien dans le comportement de transport des usagers. Cela ne correspond pas aux retours d'expérience des utilisateurs de VE, et cette vision de la mobilité électrique est assez restrictive. Cependant, M. Emberger n'est pas réticent à ce projet, si nous le convainquons qu'il est bénéfique. Il s'est dit prêt à travailler avec nous, et nous aider à notre projet si nous le justifions.

Le troisième développeur que nous avons rencontré est M. De Palma, chercheur au THEMA et à l'ENS ainsi que Mme Picard, chercheur à l'université de Cergy Pontoise. Ils ont développé SIMAURIF en collaboration avec l'IAU. La rencontre s'est déroulée dans le cadre d'une réunion de suivi de projet pour le PREDIT. M. De Palma et Mme Picard ont accepté de garder le contact tout au long de mon étude de SIMAURIF, et m'ont informé du lancement d'un projet européen sur le développement d'un LUTI enrichi de plusieurs thèmes, dont l'environnement. Ce projet est une opportunité pour le développement de notre module puisqu'il serait possible de construire notre module dans le but de l'intégrer au logiciel développé. A l'heure actuelle, les bases d'un partenariat entre EIFER et le projet européen Sustainability sont en discussion.

A la suite de ces rencontres, nous avons donc porté notre choix sur MARS et SIMAURIF, puisque IRPUD ne semblait pas utilisable dans le laps de temps qui m'était donné pour mon stage. Nous avons aussi recadré notre étude. La comparaison de plusieurs LUTI en faisant des essais sur une ville devenait impossible au vu du temps nécessaire à la collecte des données, et à l'adaptation des logiciels. J'ai donc axé mon travail sur l'étude des LUTI en collaboration avec les développeurs, et la constitution des bases d'un nouveau module intégrable aux LUTI pour faire des prospectives sur l'arrivée du véhicule électrique dans le parc roulant. J'ai mis de côté la collecte de données sur la ville de Mulhouse, afin de faire l'étude de MARS et SIMAURIF. Je me suis focalisé sur l'étude théorique de ces modèles et sur l'étude des paramètres entrants en jeu dans le développement de la mobilité électrique avec Anne Sophie Fulda, qui travaille à différents projets sur ce thème.

3. Présentation du projet

Le projet s'est constitué en réponse aux besoins de connaître et réaliser des bilans énergétiques des transports tout en considérant les VE. Or, quand il s'agit de prédire le développement des véhicules électriques les regards se tournent aujourd'hui vers la ville. L'intégration du véhicule électrique (VE) est fortement liée à l'urbanisation, du fait de l'autonomie des batteries, qui confine le VE au milieu urbain. L'interaction urbanisation/ transport est donc au cœur du débat sur l'arrivée de la mobilité électrique. La ville conditionne la possibilité et la rapidité de la pénétration du VE sur le parc roulant, aussi bien à travers la structure du transport urbain, que l'évolution de l'agencement de la ville. Les changements morphologiques, la mobilité urbaine et les comportements qu'elle engendre sont autant de facteurs à étudier pour pouvoir évaluer la rapidité de pénétration des VE. Les LUTI sont des outils de modélisation très puissants permettant de faire des prospectives (en général à 30 ans) sur les conséquences des évolutions de l'urbanisation et du transport. Grâce à un cycle de rétroactions entre ces deux thèmes, il est possible de suivre l'évolution d'un certain nombre de paramètres caractérisant les conséquences que peuvent avoir l'un sur l'autre. Les sorties de ces modèles sont principalement des d'indicateurs environnementaux, comme les émissions de CO₂, l'énergie consommé, la disponibilité du sol.

C'est pourquoi le modèle LUTI correspond exactement à la prospective de bilans énergétiques prenant en compte le développement du VE. Il permet de suivre et évaluer de manière complète les nombreux paramètres interagissant avec la mobilité électrique en milieu urbain.

Un avantage des LUTI, hormis le bouclage permettant de suivre les interactions entre urbanisation et transport, est la spatialisation des résultats. En effet, le domaine urbain étudié est découpé en zones d'aire plus ou moins grande, caractérisées chacune par des paramètres et des indicateurs entrant en jeu dans le processus d'itération. De plus, l'utilité de ces logiciels est de pouvoir considérer différentes politiques de transport, d'urbanisme, de taxation, et d'économie, sur une durée de 20 à 30 ans, et de les évaluer au regard des différents indicateurs choisis. Cela se fait par le biais de

scénarios construit en donnant plus ou moins d'importance à certaines données d'entrée, et qui sont le reflet des choix politiques ou économiques visés.

A la suite du rapport sur l'état de l'art des logiciels de simulation des transports (Fulda) cinq logiciels LUTI avaient été retenus: IRPUD, SUTRA, SIMAURIF, MARS et MOBISIM comme étant les plus récents, et les plus complets. Après de fructueux échanges et rencontres avec les développeurs, nous en avons sélectionné deux sur des critères de facilité du maniement, de diversité dans la constitution des modèles et de possibilité de travail en commun avec les développeurs:

- MARS développé à l'université de Vienne à l'institut pour la planification et les techniques du transport.
- SIAMURIF développé par l'IAU (anciennement IAURIF) en partenariat avec l'ENS et le THEMA.

L'objectif de cette recherche est de définir les possibilités d'intégration des VE dans ces modèles ; ainsi ces deux logiciels sont analysés et comparés de manière à répondre aux questions :

Comment pourrait-on appliquer (ou développer) MARS ou SIMAURIF de manière à comparer les bilans énergétiques dans un contexte général de développement urbain sur 30 ans avec ou sans la pénétration des VE et de leurs infrastructures de charge ? Quels sont les thèmes à intégrer à ces modèles afin que ces adaptations apportent des résultats concrets et cohérents ? Comment intégrer ces thèmes aux LUTI ?

Pour répondre à ces questions, les deux modèles seront minutieusement analysés. Leur description est présentée dans la première partie de ce rapport. Dans un deuxième temps, les caractéristiques des véhicules électriques sont exposées et mises en perspective afin de faire des propositions sur la façon de considérer les VE dans les LUTI. C'est l'objet de la deuxième partie. La troisième partie présente enfin les différentes interactions entre les thèmes de la mobilité électrique retenus et le fonctionnement des LUTI. Cela pose les bases du développement du module VE, interagissant avec le LUTI à travers ces interactions.

II. Approche théorique : MARS et SIMAURIF

1. Description des LUTI

Les modèles Land Use/ Transport Interaction (LUTI) sont des outils prospectifs de modélisation de l'espace à l'échelle urbaine prenant en compte les interactions entre le transport et l'utilisation du sol. On les appelle pour cela des modèles intégrés car ils intègrent à la fois un modèle urbain et un modèle de transport. Deux de ces modèles sont décrits dans cette partie : MARS et SIAMURIF. Des lacunes sont tout de mêmes présentes dans les LUTI, notamment quand on souhaite étudier l'arrivée des VE. Ces problèmes sont décrits dans la deuxième partie de ce chapitre.

1- MARS

Présentation générale

MARS est un modèle dynamique développé depuis une dizaine d'années par le professeur Emberger, de l'institut de technique des transports de Vienne.

Ce modèle intègre en amont Vensim, Saturn et EMME. VENSIM est un logiciel pour réaliser les causal loop de MARS, et EMME qui est un logiciel de transport. VENSIM est le plus important car il renseigne toute la structure des loops de MARS (cf. Annexes : Principes théoriques). C'est avec VENSIM que toutes les interactions entre les différents paramètres sont mises en relation.

Les causal loops de MARS sont regroupées en trois thèmes : Transport, Land Use et Général. Au sein de ces trois grands thèmes, on retrouve différents sous thèmes comme par exemple pour la partie transport : les transports en communs, les trajets à pieds, ou en voiture. Les causal loop sont organisées en schéma autour des paramètres (une ou plusieurs flèche représente une relation mathématique qui édite exactement les relations entre les paramètres reliés). Un code de couleurs permet de repérer les différents paramètres : Rouge = paramètres endogènes, Vert = paramètres que l'on peut modifier, Noir = inputs, ne changent pas, bleu = paramètres entrants en jeu dans les scénarios.

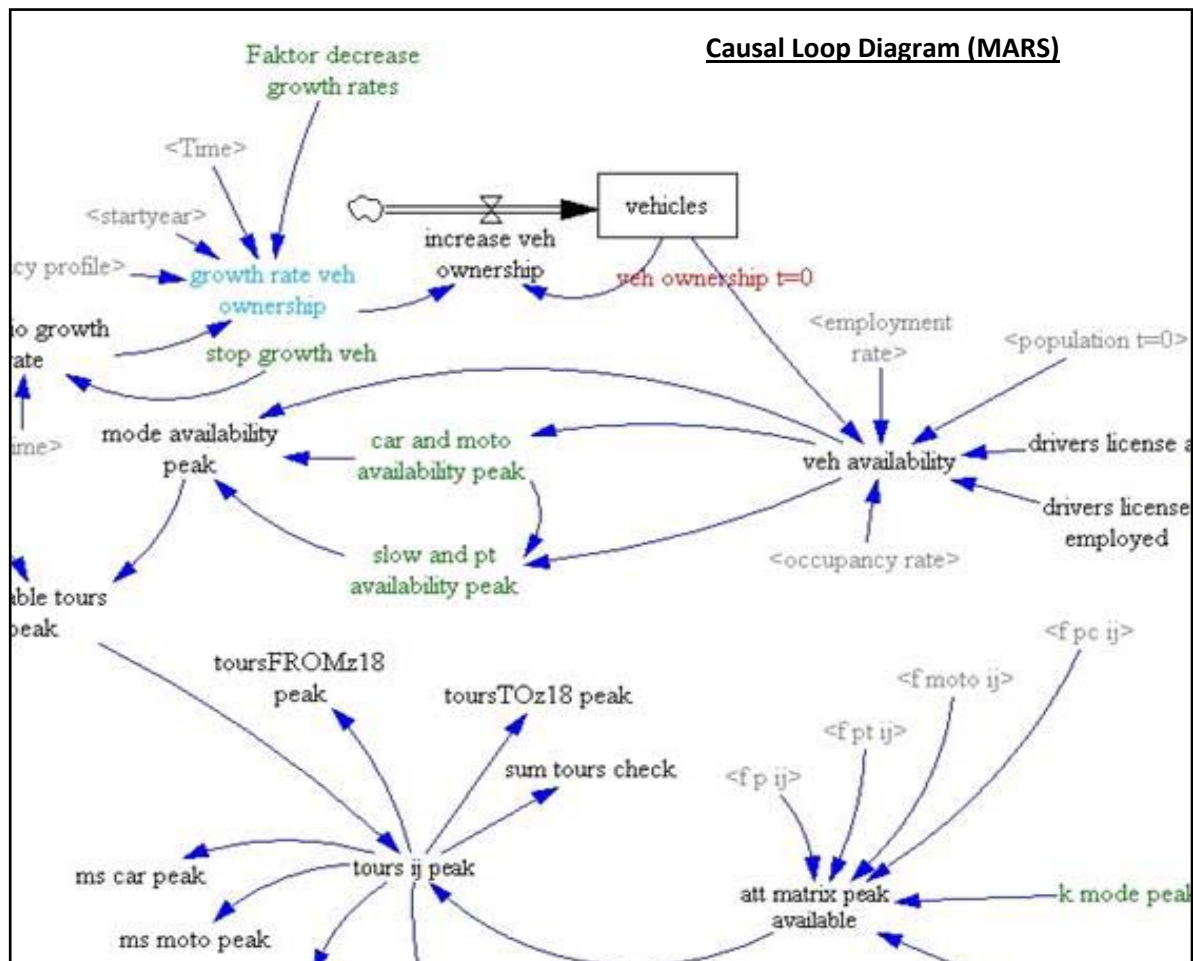


Figure 3 : Code de couleurs des paramètres dans un CLD (extrait) (MARS)

Les paramètres encadrés sont des grandeurs de stock qui représentent une quantité évoluant au cours du temps. Cette évolution peut être visualisée sous forme de courbe. Une fois les causal loops réalisées, viennent les données d'entrées à renseigner. Celles-ci sont sous forme de tableau ou de matrices. MARS a été réalisé de telle manière qu'il ne faille pas trop de manipulation de données à partir des données brutes pour les utiliser dans le modèle.

Les données d'entrée évolutives ne sont pas rétroactives ; elles sont étalées sur la durée de la simulation. Il est donc nécessaire de faire des estimations pour certaines données comme l'évolution de la population, qui ne sont pas des paramètres mais des données d'entrées sans rétroaction. Le temps nécessaire à l'obtention et à la préparation des données est de 5 à 6 semaines selon M. Emberger. Une fois les données toutes renseignées, on peut faire la simulation. Pour cela, on dispose d'une page tableau de bord qui permet de jouer sur les paramètres des scénarios. Chaque paramètre peut être imposé à une valeur pour une ou plusieurs dates. Une fois tous ces réglages réalisés, la simulation est lancée. MARS est un modèle relativement rapide car il n'a besoin que de 3 minutes pour faire la modélisation de Vienne. C'est un des gros avantages de MARS. Cela résulte du fait que beaucoup de données sont renseignées en input puis ne subissent pas de rétroaction pour les recalculer. Cela induit une perte de précision et certaines divergences. Pour le développeur de MARS, il s'agit de se concentrer sur les quelques paramètres influant sur les résultats ; il estime comme moindre les différences en sortie par rapport à un logiciel avec une meilleure définition. Il ne semble pas nécessaire de faire des modélisations trop complexes, avec une précision trop importante puisque le temps de calcul va énormément augmenter pour des résultats qui ne seront finalement très peu améliorés.

Les Sorties de MARS sont sous forme de courbes d'évolution des différents indicateurs ou paramètres de sortie. Chaque courbe correspond à une zone et il est donc possible d'avoir la cartographie du zonage complet. Cette visualisation est très agréable et permet de repérer très rapidement les zones critiques. Il est aussi possible d'avoir un tableur avec toutes les valeurs directement à partir de la cartographie, en cliquant sur la zone que l'on souhaite étudier.

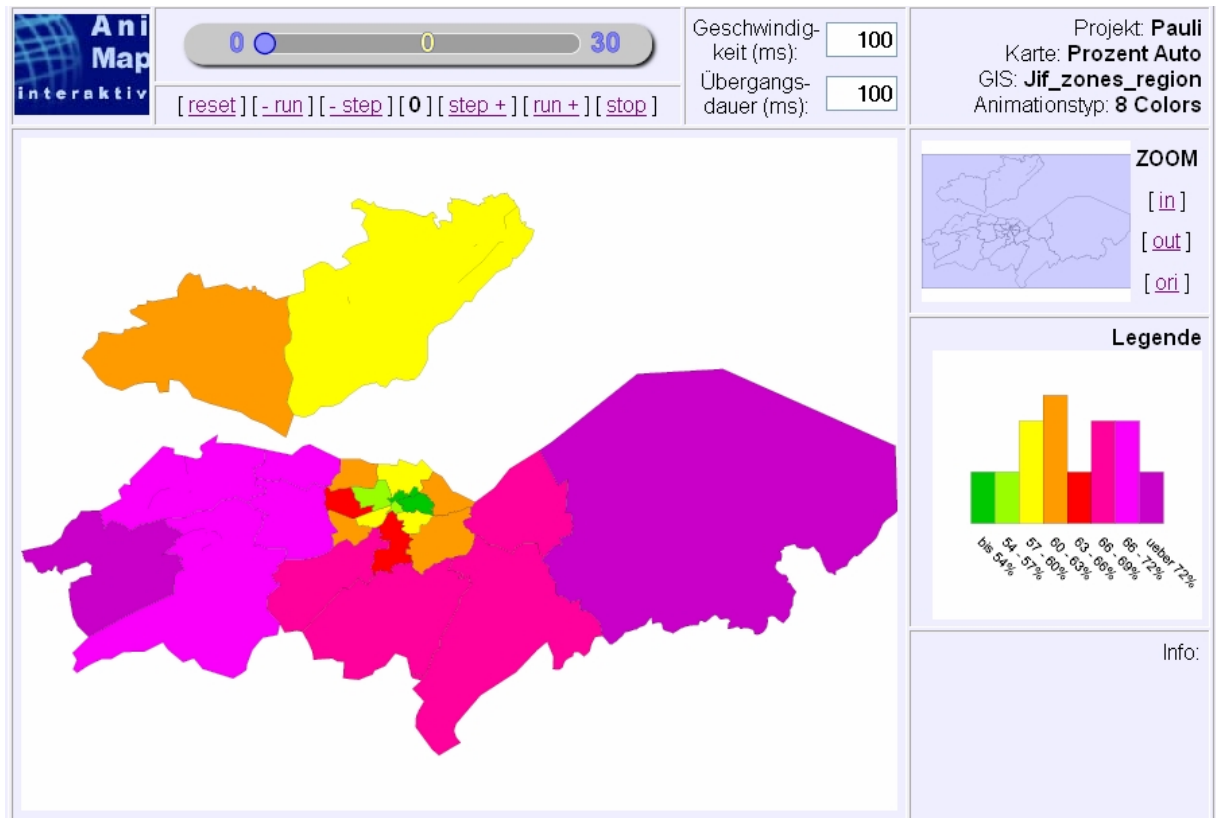


Figure 4 : Vue de l'écran de résultats graphiques de MARS (interface AniMap)

Sous modèle de transports

Le modèle de transport de MARS est un type simplifié des systèmes à quatre étapes, basé sur les logiciels de transports précédemment développés à la TUW-IVV. Le réseau est agrégé ce qui signifie que pour chaque origine-destination, il n'existe qu'une seule route possible. Il n'y a donc pas de choix de route dans MARS. Les modes non motorisés sont représentés comme un unique mode de transport agrégé.

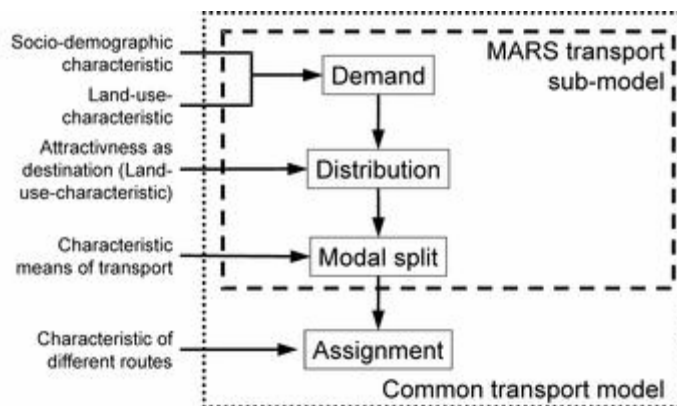


Figure 5 : Structure du sous modèle de transport de MARS (modèle à quatre étapes)

Types de déplacements

Il existe deux types d'activités possibles pouvant générer un déplacement dans MARS : le travail (W) et les autres activités (O). Ainsi ces déplacements forment quatre matrices origine-destination (OD) : HW, WH, HO, OH. De plus, MARS utilise un concept de déplacement allers-retours. Ainsi deux types de déplacements AR sont définis : HOH et HWH. Le principe du temps de trajet constant est appliqué dans MARS. Le nombre de voyages par jour et par personne pour le HWH est constant, et le temps total de transport par jour et par personne en cumulant le HWH et le HOH est aussi constant. Les relations entre les différents paramètres du transport sont décrites dans le diagramme ci après. Certains paramètres sont reliés directement au sous-modèle d'utilisation du sol, et d'autres au sous-modèle de distribution et de choix modal. C'est une illustration des liaisons entre land use et transport dans les LUTI, ce qui fait qu'ils ne sont pas uniquement l'empilement de deux modèles de land use et de transport.

Remarques : Le système de choix des trajets est assez réduit dans MARS. Cela a pour but de ne pas engendrer des calculs trop longs et de ne pas nécessiter trop de manipulation de données qui engendrent des erreurs. Pour autant, le fait que les trajets autres que professionnels soient réunis en une seule catégorie rend le modèle assez imprécis et ne permet pas d'utiliser les données sur les trajets loisirs ou achats. Ces données sont à priori maintenant toujours disponibles dans les enquêtes de déplacements des ménages. La volonté première de ne pas trop désagréger les données en limitant la précision se transforme alors en contrainte nécessitant une agrégation de données. La restriction de précision induit donc des effets contraires à sa justification.

Génération des trajets

Premièrement est calculé le nombre de trajets HWH produits par une zone i . Pour cela on multiplie le nombre d'habitants ayant un emploi et résidants dans cette zone par un ratio correspondant à un nombre moyen constant de voyages. Cette production de trajet doit être calculée avant celle des trajets HOH. Le temps de trajet total pour les HWH est calculé ensuite en sommant sur tous les moyens de transport et sur toutes les zones le produit du temps de trajet unitaire par le nombre de trajets pour chaque combinaison. A partir de ce temps de trajet total, on calcule le temps de trajet total pour les voyages HOH en retranchant au budget personnel de temps de transport le temps utilisé pour les trajets professionnels. Cela veut dire que le temps de trajet pour le travail est prioritaire et il conditionne entièrement la possibilité ou non de faire un trajet HOH. Le nombre de trajets produits par la zone i est ensuite déduit en multipliant le temps total par le nombre d'habitant dans la zone i . La production de trajet est en fait un temps total de transport produit par une zone, aussi bien pour les HWH que pour les HOH.

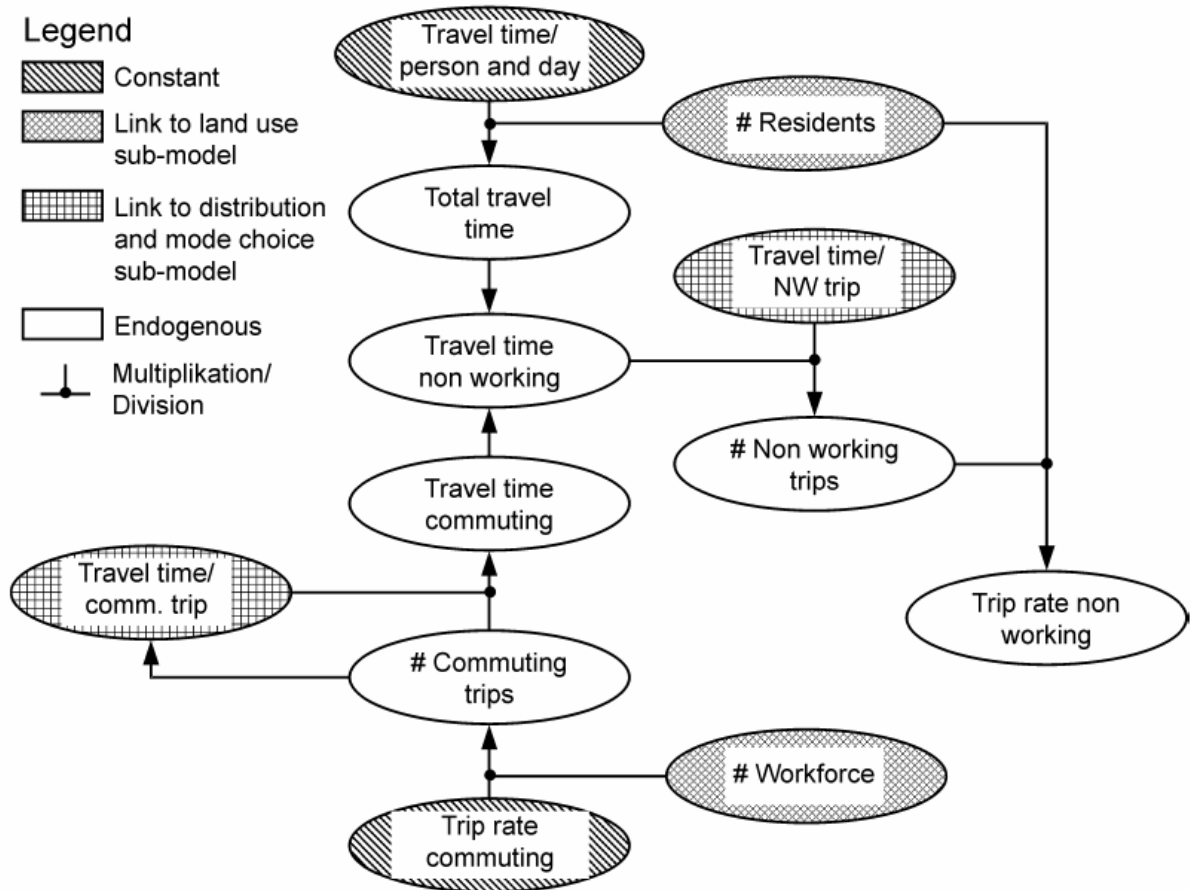


Figure 6 : Structure du sous modèle de génération des déplacements (pffaffenbichler, 2003)

Distribution des trajets et choix modal

Ce sous modèle calcule la probabilité qu'une destination et qu'un mode de transport soit choisi. L'attraction d'une zone j en matière de trajet professionnel est le nombre d'emplois disponibles dans la région. Le prix des transports, le temps de trajet et les matrices OD sont très dépendants des paramètres de politiques que nous définirons plus loin. Seuls les temps de trajet des piétons et le temps de trajet des transports en commun sont exogènes et définis au préalable. Les autres dépendent des paramètres de politiques et des sorties des autres sous modèles. Il existe de nombreux feedbacks sur ces paramètres, souvent par le biais des coefficients de frottement qui évoluent en fonction de l'occupation des véhicules, du trafic dans les transports en commun, etc.

Le sous modèle de distribution des trajets et de choix modal est séparé en deux sous modèles selon les trajets : HOH et HWH. A l'intérieur de ces sous modèles, on distingue encore deux catégories de personnes : ceux qui ont accès à la voiture et les autres. Cela sert à déterminer qui a le choix entre transports en communs/ modes doux et voiture, et ceux qui sont obligé de faire le premier choix. La part de la population ayant accès à la voiture est la multiplication du nombre de voitures pour 1000 habitants par le taux d'occupation des voitures et le pourcentage de possesseurs de permis de conduire. Le tout étant ramené à un pourcentage.

Les trajets et les matrices de voyages (équivalent OD) sont calculés séparément pour les HOH et les HWH. Le modèle de distribution des trajets et de choix modal est basé sur la loi de la gravité et des lois de Kirchhoff (loi des nœuds et loi des mailles en électricité).

Legend

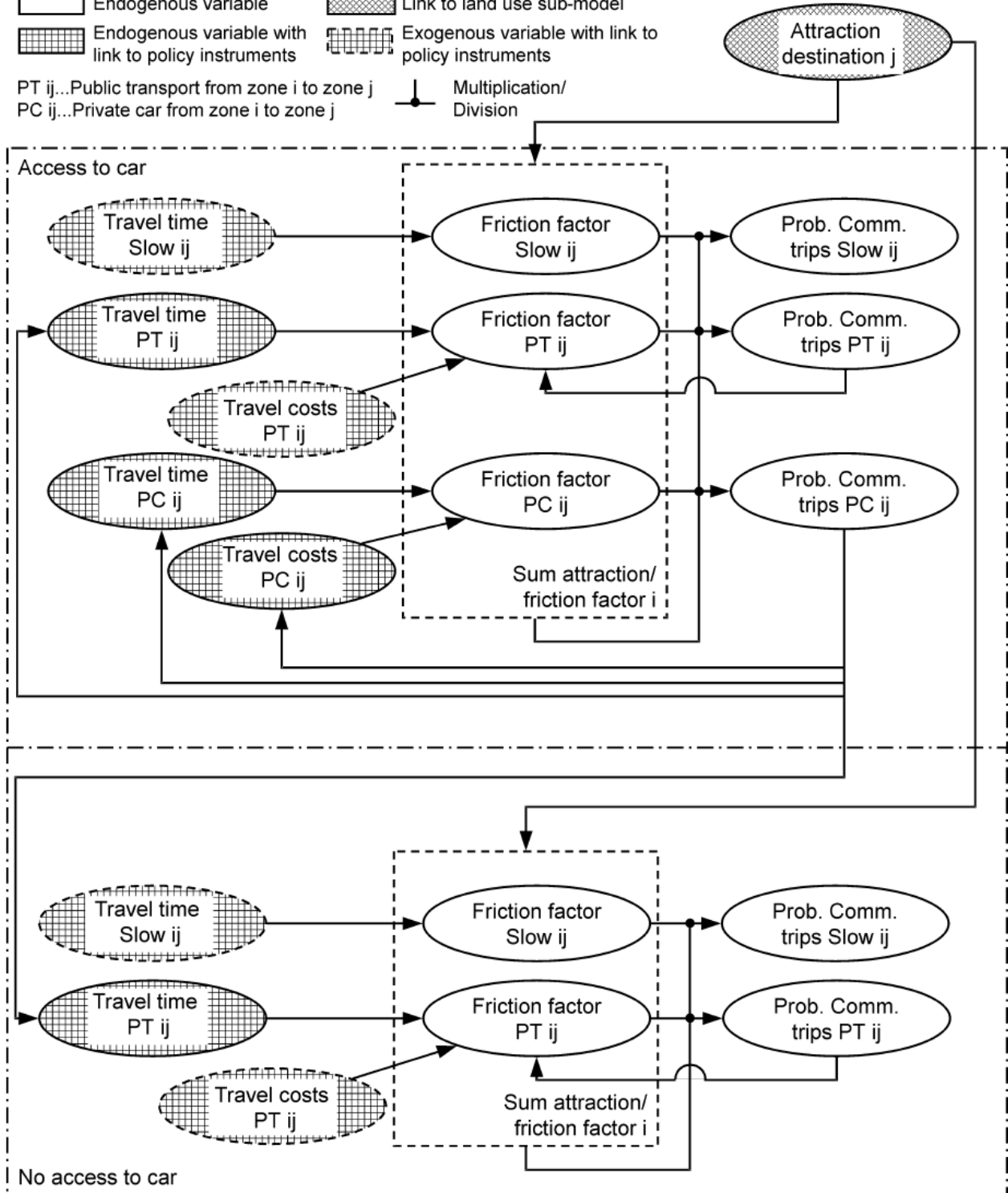
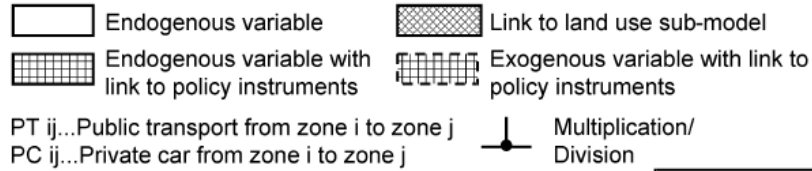


Figure 7 : Structure du sous modèle de distribution et choix modal pour les trajets HWH

Vitesse des véhicules

Les vitesses des véhicules sont rentrées dans des matrices de vitesses. MARS nécessite deux matrices de vitesses : une en considérant qu'il n'y a pas de trafic et une pendant une période de pointe. Ces deux matrices sont établies pour la période initiale, puis la matrice de vitesse de période de pointe est recalculée de manière itérative par le biais du facteur de demande. Le facteur de demande correspond au taux de besoin d'occupation d'un trajet entre deux zones. Ce facteur est recalculé en fonction des capacités du réseau, du nombre de trajets effectués pendant les périodes de pointe, des distances à parcourir entre la zone i et j et des distances intra-zonales. A partir de ce facteur, les matrices de vitesses en période de pointe sont actualisées.

Le modèle de Land-Use va interagir avec ce sous modèle concernant les vitesses de transports par le biais du développement des zones. Si une zone est peu développée, le modèle Land Use (LU) va créer des logements et des emplois, pour augmenter le nombre de trajets. De plus si le nombre de logements et d'emplois devient supérieur à un seuil prédéfini et si la vitesse devient inférieure à un autre seuil prédéfini, MARS va calculer la possibilité de créer de nouvelles infrastructures. Ces changements vont aussi dépendre des instruments politiques tels que les changements de capacité des routes ou l'ajout d'investissements pour le réseau routier.

Accessibilité

L'accessibilité est une valeur majeure dans les LUTI, puisqu'elle fait le lien principal entre le modèle de transport et le modèle LU. Pour MARS, c'est une sortie du modèle de transport et une entrée du modèle de LU.

L'accessibilité est calculée différemment pour les emplois et pour les commerces. Ces valeurs dépendent du temps de trajet pour atteindre la zone et du nombre de résidents et la zone. Pour le reste, elle dépend du temps et de facteurs constants qui ont été établis pour Vienne par Knoflachner (« urban development and planning » 1997).

Sous modèle LAND USE (urbanisation)

Le sous modèle Land Use est constitué des modèles de localisation des lieux de travail et de logements. Chaque modèle de localisation est lui-même divisé en 4 sous modèles : un modèle de développement, un modèle d'émigration zonale, un modèle d'immigration zonale et un modèle de distribution.

Localisation résidentielle

Les différents modèles sont présentés dans la structure séquentielle de MARS

Modèle de développement

Le modèle de développement calcule un nombre de logements nouveaux disponibles pour l'année en cours et par zone. Trois facteurs influencent cette construction :

- Le loyer des nouveaux logements dans l'année de construction.
- Le prix du sol dans l'année de la construction.

-La disponibilité du sol dans l'année de construction.

Ces paramètres sont appliqués avec des coefficients issus d'analyses de données de la ville étudiée et organisés les uns avec les autres comme représenté dans la causal loop suivante.

Le modèle de développement calcule le nombre de logements neufs disponibles pour telle date. Ce chiffre dépend de la demande en nouveaux logements (ce chiffre doit être renseigné en temps que donnée d'entrée), mais aussi du prix du loyer pour la zone à l'année de décision (et non pas à l'année de livraison !) et du prix du sol à l'année de décision (considérée comme l'année d'achat). A cela sont appliqués des coefficients issus d'analyses de données sur la ville de Vienne (ou de la ville étudiée si elle est autre).

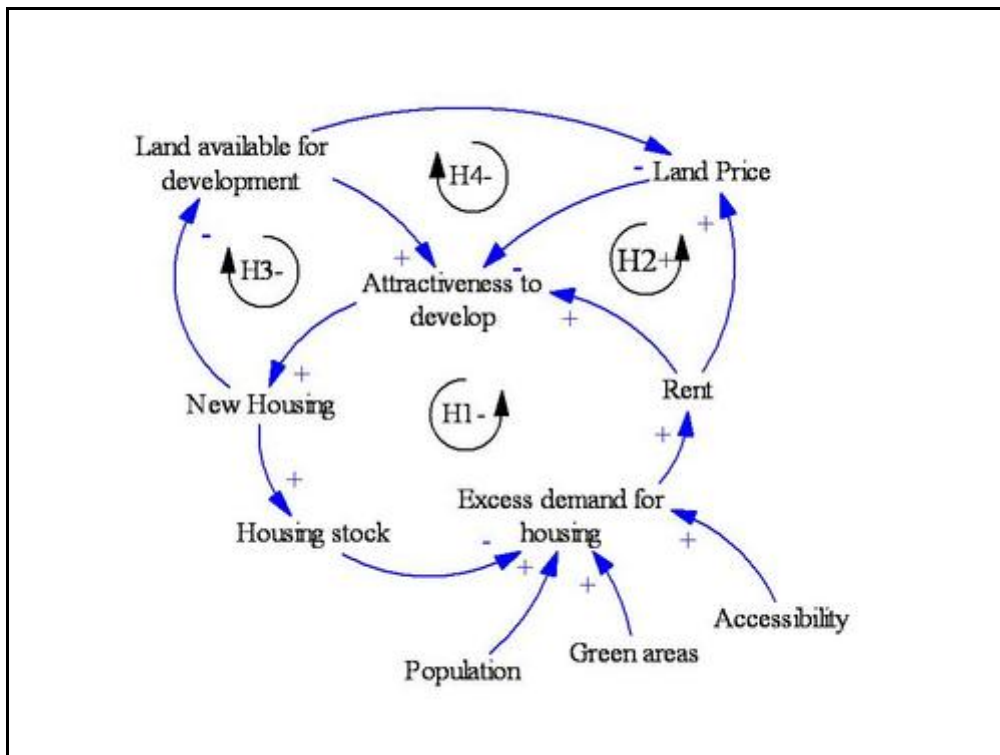


Figure 8 : Sous système de développement des bâtiments résidentiels (CLD)

La construction de nouveaux logements réduit la surface de zones naturelles (lié au cadre de vie) et réduit la disponibilité pour la construction ce qui provoque l'augmentation du prix du sol.

Modèle d'émigration d'une zone

Ce sous modèle permet d'évaluer la distribution spatiale du nombre de maisons vides. En sommant ce nombre au nombre de maisons construites (issu du modèle de développement), on retrouve l'offre de logements disponibles dans telle zone et pour l'année donnée.

Les paramètres pris en compte pour le modèle d'émigration correspondent aux critères de décision de déménagement :

- Le loyer par m² pendant l'année de décision.
- La surface de zones naturelles.
- L'attractivité de la zone c'est à dire les possibilités de loisirs, de commerces et d'emplois.

La somme du nombre de personnes quittant la zone i , avec le nombre de nouveaux logements disponible, et le nombre de logements inoccupés à la date $t-1$ donne le nombre total de logements disponibles pour l'année t .

Ce modèle calcule donc le nombre de ménages quittant une zone ou supprimé (décès). Il dépend en partie d'une valeur représentant le nombre potentiel de départ d'une zone. Ce chiffre dépend du nombre d'habitants et du temps moyen de résidence dans un endroit donné. Le nombre de ménages quittant la zone dépend aussi de l'accessibilité, de la surface d'espaces naturels et du prix du sol.

Remarque : MARS présente une double qualité : celle de prendre en compte la qualité de vie et environnementale liées aux espaces verts et celle de considérer séparément la qualité de vie et l'attractivité.

Le fait que les zones végétalisées soient un indicateur de qualité de vie permet de reboucler avec les indicateurs environnementaux, ce qui n'est pas toujours le cas dans les LUTI.

La qualité de vie ne révèle cependant pas toujours l'attractivité d'une zone. En effet, un centre ville assez dense avec de nombreux services n'aura pas forcément d'espaces verts, mais sera plus attractif (pour certains ménages) qu'une banlieue éloignée sans commerce de proximité.

Modèle d'immigration dans une zone

La structure de ce modèle est proche de celle du modèle d'émigration : son résultat est la distribution spatiale de la demande de logement. Les paramètres pris en compte sont les mêmes que pour le modèle de déménagement : loyer, espaces verts et attractivité et l'évolution démographique de la zone.

La demande en logements est conditionnée par les personnes migrantes et l'évolution démographique de la population (positive ou négative). L'évolution de la population est une valeur exogène, qui est renseignée en entrée de MARS. Si la demande totale de logements ne peut être satisfaite, le surplus est ajouté au nombre de demandes de l'année suivante. La distribution spatiale des demandes de nouveaux logements dépend de l'accessibilité en transports en commun (TC) et voiture, des espaces naturels et du loyer.

Modèle de redistribution de l'offre et la demande résidentielle

Une fois l'offre et la demande définies, il est nécessaire de les comparer afin de déterminer les possibilités d'accéder aux souhaits de localisation des ménages. Le modèle de redistribution compare l'offre et la demande pour chaque zone et répartit les ménages. Certains ménages seront relocalisés vers leur deuxième choix de logement. Si la zone est encore complète, on répète l'opération jusqu'à ce que tous les demandeurs soient logés. Lorsque les possibilités de logements sont trop restreintes, les ménages sans logement sont reportés dans l'itération de l'année suivante.

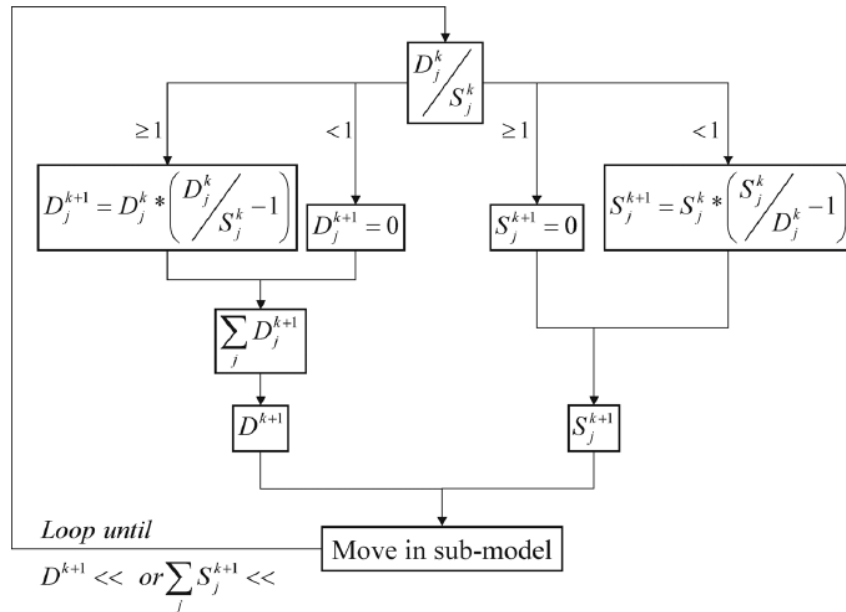


Figure 9 : Diagramme du sous modèle de redistribution de la demande résidentielle

Legend:

- k Number of iteration in the re-distribution process
- j Index of zone
- D Quantity of residences demanded
- S Quantity of residences supplied

Pour la construction de nouveaux logements, c'est la quantité de logements demandés (perçu par les développeurs) qui va évoluer et donc agir sur le modèle de développement. Pour l'évolution du loyer, cela va dépendre du ratio de demandes de logements à satisfaire, et du volume de trafic routier. Ce calcul fait donc interagir le sous modèle de distribution et de choix modal pour le transport et du sous modèle de développement pour la partie LU.

Localisation des emplois

Le modèle de localisation des emplois est appliqué d'une part pour l'industrie et d'autre part pour les services. A partir de paramètres exogènes, des valeurs de disponibilité du sol et d'accessibilité, on calcule le nombre d'emplois s'installant dans une zone donnée, ainsi que la surface qui sera développée pour accueillir des emplois. Cela se traduit par un intervalle de temps donné pendant laquelle les entreprises de chaque secteurs vont décider de déménager. La durée de vie d'une entreprise permet de calculer un pourcentage total d'entreprises se déplaçant chaque année, ce qui est utilisé pour évaluer le nombre d'entreprises déménageant chaque année.

La structure de ce modèle est la même que celle du modèle de localisation résidentielle :

Le *modèle de développement* est dans cette partie un paramètre exogène ; il doit être défini par l'utilisateur. Chaque entreprise est considérée comme son propre développeur et décide elle-même si elle doit se développer ou changer de place. Cela se traduit par un intervalle de temps donné pendant laquelle les entreprises de chaque secteur vont décider de déménager.

MARS ne contient pas de modèle de régulation du travail mais une contrainte de disponibilité du sol.

De même *les modèles de d'émigration et d'immigration* sont des paramètres exogènes. Une restriction est calculée en fonction de la place disponible dans la zone (prix du sol, disponibilité et accessibilité).

Enfin, *le modèle de redistribution des emplois* est proche de celui des logements. Chaque demande de relocalisation qui n'est pas satisfaite est redistribuée dans une autre zone en fonction de différents critères. Le potentiel de relocalisation des emplois est recalculé à pour les choix alternatifs des entreprises, et ce jusqu'à ce que le nombre d'emplois non relocalisé soit inférieur à un seuil défini de manière exogène.

Les trois modèles de transport, localisation des emplois et des logements interagissent entre eux par l'intermédiaire de l'accessibilité (transport \leftrightarrow Localisation des ménages), de la disponibilité du sol (localisation des ménages \leftrightarrow localisation des emplois) et les paramètres transmis d'une année à la suivante sont globalement la distribution spatiale, la disponibilité du sol et les flux de transports. Le modèle de développement a un pas de temps plus important puisqu'il interagit avec l'année $t+T$, T étant la période nécessaire à la construction des logements.

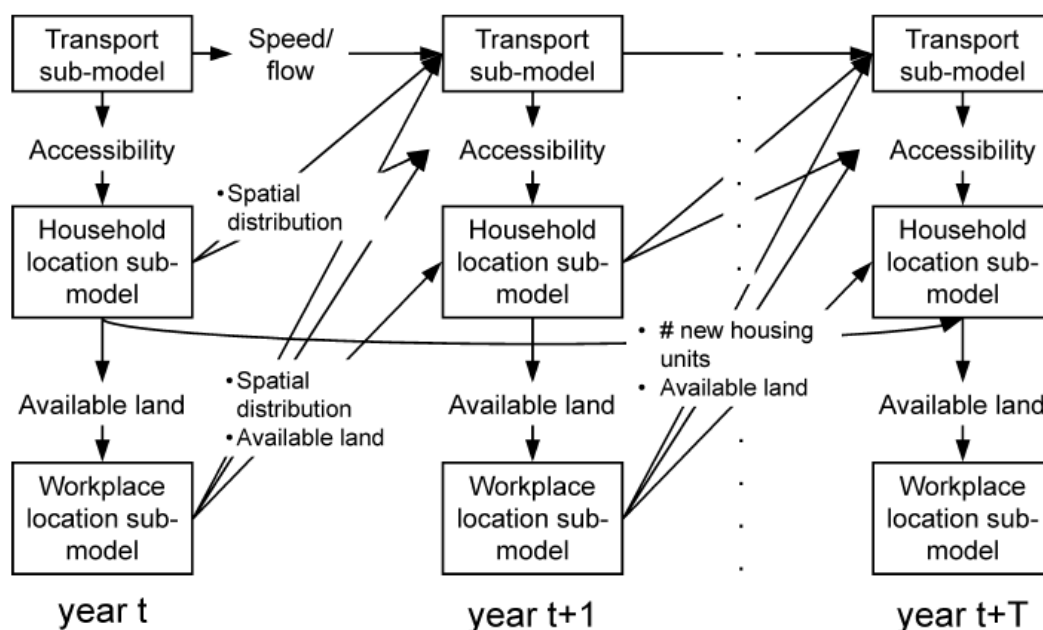


Figure 10 : Schéma de fonctionnement de MARS par le biais des interactions entre les sous modèles.

Les résultats sont ensuite établis à partir des différents sous modèles. Les bilans énergétiques sont calculés en fonction de la charge de transport, de même que les bilans CO2. Ils sont établis suivant chaque zone étudié au regard du trafic dans et entrant dans ces zones. Le suivi de ces résultats est donné depuis l'année de départ de la simulation, jusqu'à l'année butoir de la prospective. Les émissions et les consommations sont issues des résultats de COPERT (Ntziachristos et Samaras, 1998), programme de calcul des émissions pour le transport réalisé par l'agence européenne pour l'environnement (EEA). Ces résultats sont également utilisés pour les recherches sur les VE au sein d'EDF (Picherit).

D'autres résultats tels que la densité urbaine ou l'évolution de la congestion du réseau peuvent apporter des renseignements sur les effets de la mobilité électrique sur la ville.

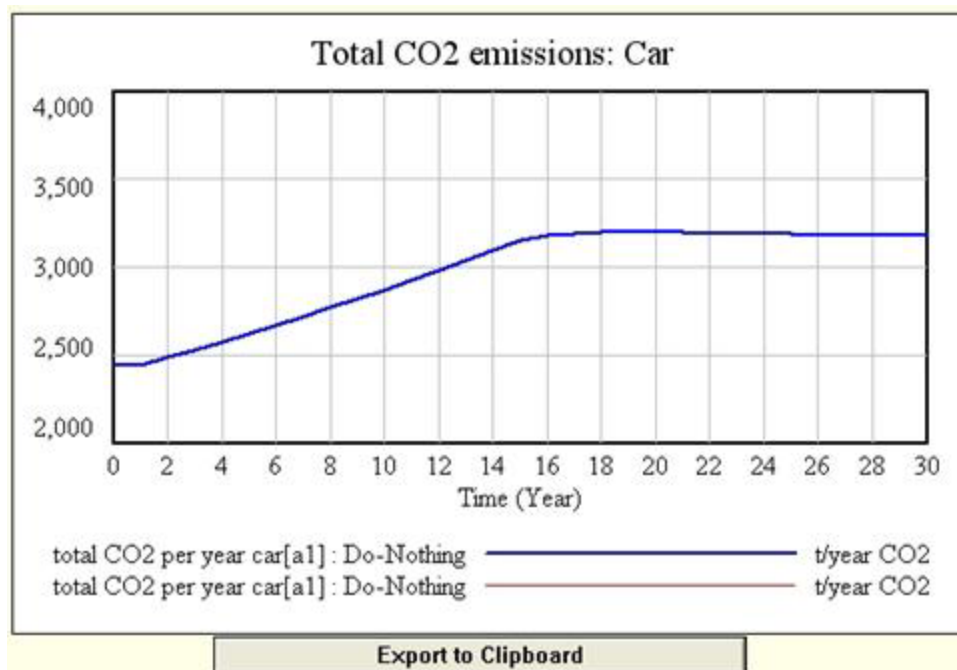


Figure 11 : Courbe de résultat pour les émissions totales de CO2 émises par la voiture

Base de données MARS

La description des différents sous modèles de MARS a permis de faire apparaître la prise en compte de différents paramètres et le calcul d'indicateurs ainsi que l'absence de certains autres.

Les paramètres endogènes sont des indicateurs calculés par le logiciel. Les plus importants sont l'accessibilité, qui fait le lien entre le sous modèle de transport et le sous modèle de localisation des ménages, et la distribution spatiale de la mixité (distribution des logements, distribution des services), puisqu'ils permettent de calculer la disponibilité globale du sol. La consommation d'énergie

fossile est aussi essentielle puisqu'elle représente aussi un des indicateurs de sortie principaux. Les paramètres exogènes sont ceux définis par l'utilisateur, ils sont réduits à quelques données dans le logiciel de MARS ; il s'agit d'un choix volontaire permettant une utilisation plus facile. Le plus important à renseigner dans ces paramètres est l'instrument de politiques. Ils se présentent sous forme d'un tableau de bord sur lequel les différentes variables peuvent être modifiées. Cela permet de connaître les impacts de certaines politiques d'urbanisme ou de transport.

Enfin, les paramètres exclus sont ceux qui ne sont pas considérés ; l'intégration de la logistique est souvent considérée comme allant trop d'ampleur, et difficilement gérable. Le choix des trajets de chaque véhicule s'avère ne pas correspondre au degré de précision du logiciel.

Endogenous	Exogenous	Excluded
Development housing units	Potential growth rate residents	Freight transport
Available green land	Growth rate workplaces (production, services)	Private car route choice
Rent	Car ownership growth rates	GDP
Land price	Household income	Ageing
Distribution households moving out	Household size	
Distribution households moving in	Potential households moving	
Demand factor housing units	Technological improvements fuel consumptions	
Distribution workplaces production	Policy instruments	
Distribution workplaces services		
Number of trips		
Distribution of trips		
Mode share		
Speed private car		
Accessibility		
Fossil fuel consumption		

Figure 12 : Les différents paramètres utilisés dans MARS

2- SIMAURIF

Présentation générale

SIMAURIF est un modèle dynamique développé par les chercheurs du THEMA de l'université de Cergy Pontoise, dont Mr De Palma. Il a déjà été utilisé pour les scénarios mettant en jeu la tangentielle nord, ligne de chemin de fer reliant plusieurs lignes de RER au nord de Paris, au niveau de la deuxième couronne.

Simaurif intègre de nombreux paramètres: les choix de localisation résidentielle des ménages, la relocalisation des entreprises, les marchés fonciers et immobiliers, le choix de localisation des projets de développement, les comportements de mobilité, les gains d'accessibilité, le temps.

SIMAURIF est le couplage de deux modèles existants :

-Davisum-METROPOLIS est un modèle de transport comportant une partie de prévision de la demande grâce à des matrices Origine-Destination (METROPOLIS), une partie d'affectation statique pour les transports en commun (Davisum) et une partie d'affectation dynamique pour les transports routiers (METROPOLIS). Les données de sortie de METROPOLIS ne sont pas directement utilisables par UrbanSim. Un module de préparation des données est utilisé, pour convertir les données en facteur d'Accessibilité (Logsum) et en temps de trajet.

-UrbanSim est un modèle de macro simulation urbaine divisé en quatre sous modèles : un modèle de choix de localisation des ménages, un modèle de localisation des emplois, un modèle de choix de développement urbain et un modèle de prix du foncier

Ainsi, la correspondance des données d'entrée et de sortie de ces deux modèles se fait d'une part par l'intermédiaire des matrices OD, d'autre part selon les temps de trajets et l'accessibilité.

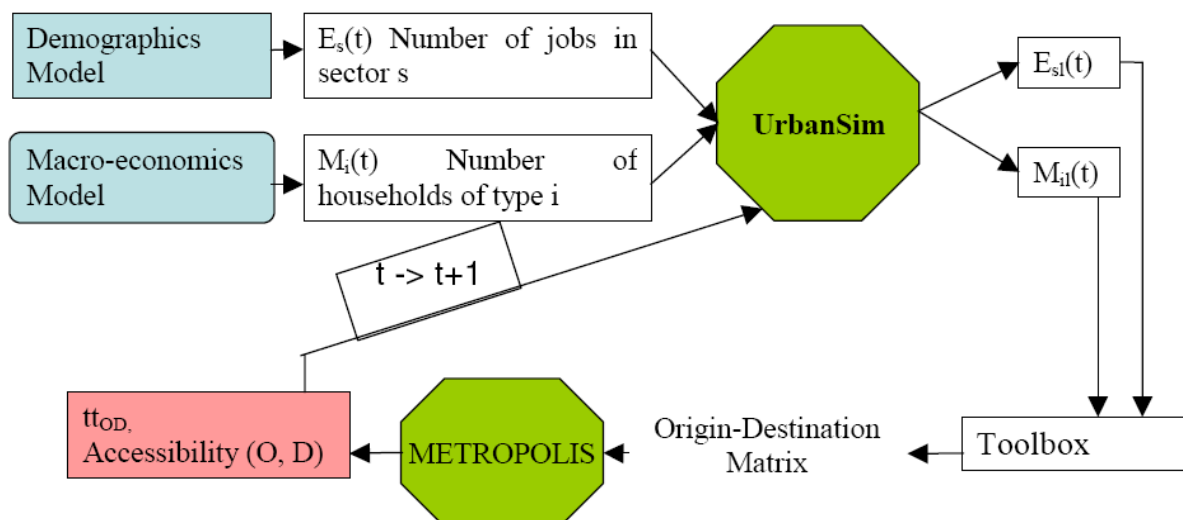


Figure 13 : Le cycle du modèle intégré.

Caractérisation des trajets

Simaurif est basé sur les prix, contrairement à MARS qui calcule en fonction des temps de trajet. Ainsi, on considère les coûts généralisés des transports: le temps nécessaire pour réaliser ce trajet de i à j avec le moyen de transport m , multiplié par le coût d'une heure de transport. Les valeurs moyennes de transformation du temps en coût sont de 11.6€/H pour un trajet professionnel et de 6.4€/H pour un trajet achat/personnel

De même que MARS, SIMAURIF intègre un nombre restreint de trajets type. Il en existe ici un de plus que pour MARS : Domicile -> travail/affaires personnelles, Domicile -> commerce et Autres. Ces différents types de trajets caractérisent un certain nombre de trajets identifiés par leurs motifs, c'est-à-dire le doublet lieu de départ-lieu de destination. (cf. METROPOLIS)

METROPOLIS

METROPOLIS est un modèle dynamique de transport adapté aux réseaux importants. Il introduit des éléments suivants :

- Les choix de mode, d'heure de départ et d'itinéraire des usagers
- Le calcul de situation d'équilibre entre l'offre et la demande
- La simulation totalement dynamique du trafic (seconde après seconde), en période de pointe et en période creuse
- Des données compatibles avec celles des modèles statiques en termes d'offre et de demande
- Des lois de congestion flexibles arbitraires définies par l'utilisateur.

L'élaboration des matrices OD est réalisée en 4 étapes classiques auxquelles vient s'ajouter une étape supplémentaire : du temps de départ.

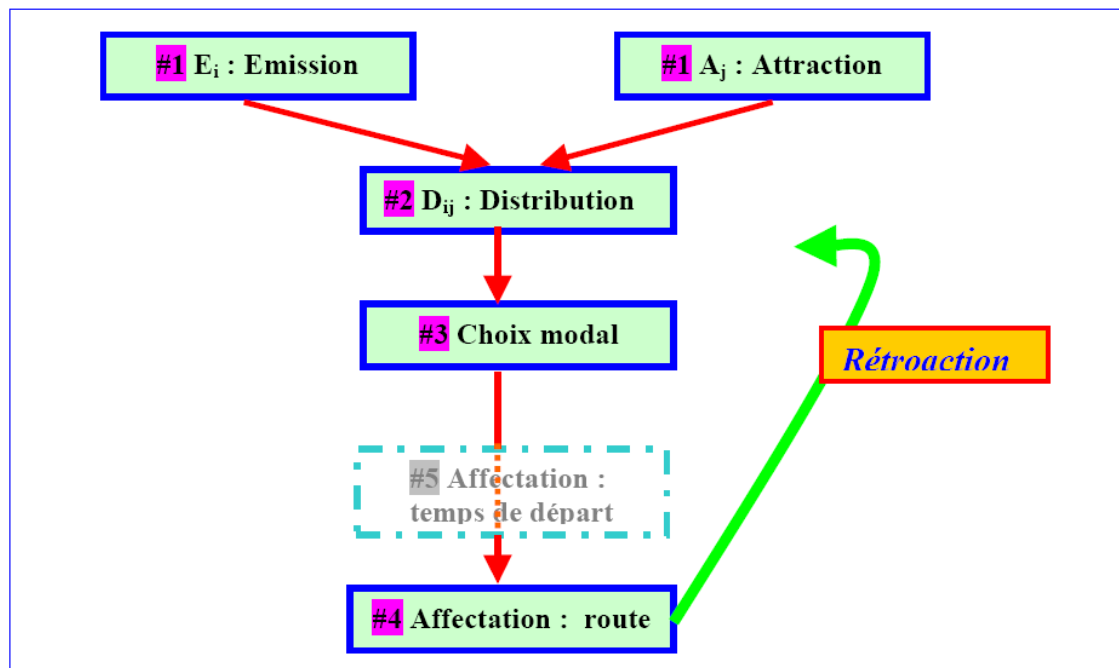


Figure 14 : Représentation synthétique du modèle à 5 étapes. (THEMA, 2004)

Ce modèle en 5 étapes est décrit ci après.

Les motifs

Chaque déplacement va relier deux lieux, appelés les motifs. Dans ce modèle, 9 motifs différents (numérotés de 1 à 9 et nommés par la lettre m) ont été choisis :

$m=1$ Domicile : noté « DO »

$m=2$ Lieu de travail : noté « TR »

$m=3$ Affaires professionnelles : noté « APR »

$m=4$ Affaires personnelles : noté « APE »

$m=5$ Achats : noté « ACH »

$m=6$ Loisirs : noté « LOI »

$m=7$ Ecole/ Enseignement supérieur : noté « ECO »

$m=8$ Santé : noté « SA »

$m=9$ Divers : noté « DIV »

A partir de ces motifs on réalise $M \times (M-1)$ trajets, en excluant les trajets d'un motif vers lui-même. C'est la première étape de création des matrices OD, qui se présenteront sous la forme suivante :

	Domicile	Travail	Affaires Prof.	Affaires Perso.	Achats	Loisirs	Ecole	Santé	Divers
Domicile		DO→ TR	DO→ APR	DO→ APE	DO→ ACH	DO→ LOI	DO→ EC	DO→ SA	DO→ DIV
Travail									
Affaires Prof.									
Affaires Perso.									
Achats									
Loisirs									
Ecole									
Santé									
Divers									

Figure 15 : Matrice motif origine- motif destination (THEMA, 2004)

Génération des trajets (émissions et attraction)

Elle se décompose en deux parties : les émissions et les attractions car chaque zone émet et attire un certain nombre de trajets. Ceux ci correspondent aux départs et arrivés dans chaque zone. On affine à chaque zone les trajets entrant dans cette zone, on ne considère pas ceux la traversant, ni ceux en sortant. Ces deux derniers seront affiliés à la zone vers laquelle ils se dirigent. Cela permet de ne pas affilier des trajets à plusieurs zones, et de réduire le nombre de types de trajets

Remarque : Cette méthode permet d'éviter les doublons, mais elle fausse le résultat de la spatialisation des bilans énergétiques ; en effet les trajets traversant une zone vont polluer cette zone, et ils ne seront pas décomptés puisqu'ils seront affiliés à la zone d'origine.

Les émissions de trajets sont notées E et sont caractérisées par un paramètre d'émission Θ (issus de l'enquête globale des transports) et une variable d'émission X_i . Par exemple, X_i représente la population active dans la zone i et Θ représente le nombre moyen de déplacements vers le lieu de travail depuis le domicile, par jour ouvrable, générés par un actif. Afin de réduire le nombre de données, on peut restreindre le nombre de types de trajets en instaurant des trajets équivalents, ou en se basant uniquement sur les lieux d'origines pour traduire la diversité des voyages.

Les attractions de trajets sont calculées de façon similaire avec un paramètre d'attraction et une variable d'attraction pour chaque zone. Le paramètre peut néanmoins être identique sur toute la zone d'étude. C'est le cas pour SIMAURIF avec toute l'île de France.

Ce modèle calcule une valeur représentant le nombre potentiel de départ d'une zone. Ce chiffre dépend du nombre d'habitants et du temps moyen de résidence dans un endroit donné mais aussi de l'accessibilité, de la surface d'espaces naturels et du prix du sol.

Les calculs d'émission et d'attraction sont basés sur des données statistiques propres aux cellules. Une loi de conservation est appliquée qui spécifie que la somme des émissions sur toutes les zones est égale à la somme des attractions sur toutes les zones. Cette somme représente le nombre de déplacements internes à l'aire étudiée.

Distribution des trajets

Le module distribution consiste à associer à des émissions et des attractions un volume de déplacements d'une origine (zone d'émission) à une destination (zone d'attraction). Ce module va calculer un nombre de déplacements d'une zone à une autre, et ce pour chaque motif (ie motif origine -> motif destination). Ce nombre de déplacements dépend à a fois des émissions de l'origine, de l'attraction de la destination, de coefficients calculés par régression et d'une fonction de coût.

Cette fonction de coût représente une pondération du nombre de trajets en fonctions du temps nécessaire au trajet. Cette fonction de l'impédance représentative d'une durée de trajet est évaluée à partir des données expérimentales. Trois impédances sont choisies pour calculer les matrices OD : un temps correspondant au trajet sur la distance euclidienne entre les deux zones, un temps de trajet en période creuse et un temps de trajet en période de congestion.

Choix modal

Le choix modal se fait uniquement pour les usagers qui ne sont pas captifs des transports en commun (qui possèdent un véhicule) et les usagers qui ne sont pas captif de la voiture (qui ont accès à l'infrastructure des TC). Le choix modal est un choix binaire en fonction d'une probabilité de prendre ou non les TC. La probabilité d'utilisation d'un mode de transport est calculée par un modèle Logit binaire. Les paramètres sont le temps de parcours et son coût pour les deux modes, un facteur d'échelle et un facteur de pénibilité (équivalent des facteurs de frottements dans MARS). Cette probabilité dépend de la congestion ; et comme la sensibilité à la congestion dépend du motif, la probabilité résulte des temps de parcours, des motifs et des heures de départ.

Remarque : Le fait que le choix du mode soit binaire ne permet pas de considérer les modes doux (vélo, piétons).

Choix de l'heure du départ

Il est possible d'intégrer dans les modèles dynamiques le choix de l'heure de départ qui permet de considérer la congestion. C'est pour cela qu'on a précédemment distingué les temps et les coûts de trajets en heure de pointe et en heure creuse. Une fois le choix du mode réalisé, on calcule un coût généralisé de déplacement qui dépend du temps. A partir de ce coût généralisé, on obtient le nombre de trajets réalisés entre deux zones pour tel motif et pendant tel intervalle de temps.

Procédure itérative de calcul des matrices O-D de METROPOLIS

L'enchaînement de ces phases se fait pour chaque matrice jusqu'à ce que le facteur de convergence soit satisfait. Lors de ces phases, les 5 étapes du modèle sont décrites une fois par itération. Tout le cycle est répété ainsi de manière à affiner la précision du résultat.

- **Phase 1 :** Calculs des émissions et des attractions (#1)
- **Phase 2 :** Evaluation des temps de parcours à vide de zone à zone
- **Phase 3 :** Enregistrement des temps de parcours effectifs (qui sont les temps de trajet à vide à la première itération) et les Logsommes effectifs
- **Phase 4 :** Calcul de la matrice O-D par motif de déplacement sur la base des temps de parcours effectifs (ETAPE 3) : résolution de l'algorithme appelé « Réalité » (#2)
- **Phase 5 :** Calcul du choix modal (#3) sur la base des Logsommes effectifs calculés à l'ETAPE 3 et calcul des matrices O-D en VP par type de motifs sur la base des matrices O-D calculées dans l'ETAPE 4
- **Phase 6 :** Affectation dans METROPOLIS de la matrice VP calculée à l'ETAPE 5 (#4 et #5)
- **Phase 7 :** Soit arrêt (si critère de convergence satisfait) soit allez en ETAPE 3. Cette procédure itérative permet de calculer une matrice origine-destination voiture particulière cohérente.

DAVISUM

DAVISUM est un logiciel pour la gestion des transports en commun, développé par PTV (Bureau de consulting des transports allemands). Il est basé sur un modèle statique permettant de calculer la matrice de temps généralisés pour les transports en commun. Cette matrice dépend des émissions de trajet et du graphe des transports en communs (TC) donc de la demande de déplacements et en conséquence de l'évolution de l'urbanisation.

Il est inutile de sortir une matrice de trajets TC pour chaque année puisqu'elle ne changera qu'en cas de modification du réseau TC. Il faut donc uniquement le faire tourner en cas d'ouverture/ fermeture de ligne ou de grands projets de réaménagement des TC.

Le modèle de transport dans lequel sont couplé METROPOLIS et Davisum peut se représenter grossièrement par l'arbre de décision suivant, représentant les grandes étapes des choix déterminant au final le trajet des usagers.

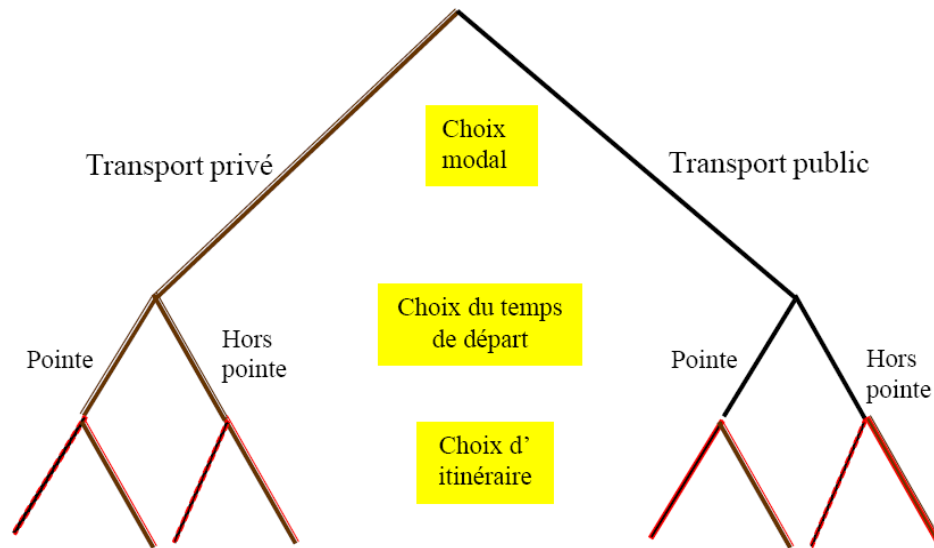


Figure 16 : Arbre de décision du modèle dynamique. (THEMA, 2004)

Urbansim

UrbanSim a été développé à partir de 1996 à l'université de Washington par le professeur Waddell. L'objectif est d'aider les décideurs dans la prise en compte de l'interaction urbanisation-transport dans l'élaboration des plans de transports régionaux imposée par les nouvelles lois américaines sur l'air : ISTEA (1991) et TEA21 (1998).

UrbanSim est un modèle multi-agent à l'échelle microscopique (les cellules de base ont 500m de coté). Il y a trois types d'agents dans Urbansim : les cellules, les ménages et les emplois.

La modélisation est réalisée année par année sur une période de 20 à 30 ans. Les différents modules tournent de manière séquentielle pour chaque année, afin de recalculer les paramètres et les variables nécessaires à la simulation de l'année suivante. Le temps nécessaire au calcul est bien plus long que celui de MARS.

UrbanSim est composé de 6 modules :

-Le module d'accessibilité détermine des variables d'accessibilités qui sont utilisées par d'autres modules. Il utilise pour cela les données relatives au transports, issues des deux modèles de trafic externe : METROSIM et Davisum. Il y a deux types d'accessibilité : celle liée à l'origine du déplacement et celle liée à la destination. La première dépend du nombre d'emplois dans la cellule d'origine et la seconde du nombre de ménages de la gridcell de destination. De plus ces deux mesures de l'accessibilité dépendent du Logsum (cf. Annexes : principes théoriques) qui correspond à la facilité d'accès et au prix du déplacement pour venir ou partir d'une zone donnée.

-Les deux modules d'économie et de transition démographique calculent le nombre d'emplois et de ménages de chaque cellule. Les emplois sont caractérisés par le secteur d'activité et leur localisation, les ménages sont classifiés selon leur taille et leur revenu. Le module prend en compte les dynamiques démographiques et crée ou supprime certains agents.

-Le module de mobilité détermine les changements de localisation des agents (ménage ou emploi) d'une année à l'autre. Les changements sont calculés dans un cadre donné préalablement par des ratios de déplacement suivant le type d'emploi ou de ménage.

-Le module de localisation détermine la localisation des emplois et ménages en fonction de la place vacante et de l'attractivité de chaque cellule. Cette dernière dépend de manière linéaire ou logarithmique de la catégorie de la cellule, l'accessibilité en tant qu'origine et en tant que de destination, la densité, l'âge des installations et le prix du terrain.

- Le module de développement immobilier calcule les éventuels changements dans les décisions de construction et de réhabilitation de chaque cellule. L'utilité de tels changements est linéairement dépendante des éventuels plans de développements déjà existants, des contraintes politiques, du prix du sol et de son évolution, la proximité d'infrastructures d'accès, des développements des cellules voisines et de l'accessibilité pour la population.

-Le module de prix du sol est déterminé par la méthode hédonique (cf. Annexes : principes théoriques) basée sur une liste de caractéristiques influents sur le prix du sol.

Bases de données de SIMAURIF

Toutes les bases de données sont gérées par MySQL, cela permet un échange plus simple entre les différents logiciels intégrés à SIMAURIF et permet des visualisations GIS aisées. Les principales données nécessaires à SIMAURIF sont les données d'entrée d'URBANSIM. En effet, les données d'entrées nécessaires à METROPOLIS sont les sorties d'URBANSIM. Certaines données de sortie de METROPOLIS vont en entrée d'URBANSIM, mais ce modèle nécessite beaucoup d'autres inputs pour tourner. Les données utilisées par Davisum sont les données générales sur le réseau de transport en commun et les trajets, horaires et fréquences des différents modes de TC.

Les données nécessaires à SIMAURIF sont répertoriées ci-dessous, triées par type en 35 catégories. A l'intérieur de ces catégories, on retrouve toutes les caractéristiques nécessaires à la caractérisation des données. (cf. tableau caractérisant une cellule)

Name of tables	Type
Development Events	Scenario
Employment Events	Scenario
Development Constraints	Scenario
Land Use Events	Scenario
Development Constraint Events	Scenario
Transition Types	Scenario
Annual Employment Control Totals	Data
Annual Household Control Totals	Data
Grid Cells	Data
Travel Data	Data
Jobs	Data
Zones	Data
Household Characteristics	Data
Grid Info	Data
Households	Data
Race Names	Constants
Sqft For Non Home Based Jobs	Constants
Cities	Constants
Development Type Group Definitions	Constants
Development Types	Constants
Plan Types	Constants
UrbanSim Constants	Constants
Employment AdHoc Sector Group Definitions	Constants
Counties	Constants
Development Type Groups	Constants
Employment AdHoc Sector Groups	Constants
Residential Units For Home Based Jobs	Constants
Employment Sectors	Constants
Annual Relocation Rates For Households	Parameters
Annual Relocation Rates For Jobs	Parameters
Household Location Choice Coefficients	Parameters
Developer Model Coefficients	Parameters
Employment Location Choice Coefficients	Parameters
Residential Land Share Coefficients	Parameters
Land Price Coefficients	Parameters

Figure 17 : Table de données d'UrbanSim (THEMA, 2005)

Les caractéristiques des cellules sont : le nombre de logements, le nombre de logements vacants, la surface totale de non résidentiel, la surface de non résidentiel vacant, le type de développement, le prix du sol, l'amélioration du résidentiel l'amélioration du non résidentiel, les contraintes

environnementales, la frontière de l'évolution de l'urbanisation, le nom de la ville et de la région et la zone d'analyse du trafic correspondant (issu du logiciel de trafic). Les informations relatives aux ménages sont le nombre total de personnes, d'enfants et de travailleurs, l'âge des occupants, les revenus et la cellule de résidence. Les emplois doivent être identifiés dans une cellule, et le secteur ainsi que le télétravail doivent être renseignés. Les emplois et les ménages peuvent uniquement être détruits, déplacés ou créés. Pour tout changement, il est nécessaire de supprimer l'ancien et de recréer un nouvel agent. Les cellules peuvent aussi être renouvelées. Tous ces changements sont listés dans les données de sorties.

Champ		Type	Unité	Valeur
GRID_ID	1	Entier		De 1 à 49236
RELATIVE_X	2	Entier		Lambert II
RELATIVE_Y	3	Entier		Lambert II
ZONE_ID	4	Entier		De 1 à 572
CITY_ID	5	Entier		Code INSEE
COUNTY_ID	6	Entier		N° département
PLAN_TYPE_ID	7	Entier		0, 1 ou 2
IS_OUTSIDE_URBAN_GROWTH_BOUNDARY	8	Entier		0 ou 1
FRACTION_RESIDENTIAL_LAND	9	Flottant		De 0 à 1
RESIDENTIAL_UNITS	10	Entier		Nb logements
COMMERCIAL_SQFT	11	Entier	m ²	
INDUSTRIAL_SQFT	12	Entier	m ²	
GOVERNMENTAL_SQFT	13	Entier	m ²	
COMMERCIAL_IMPROVEMENT_VALUE	14	Entier	Euros	
INDUSTRIAL_IMPROVEMENT_VALUE	15	Entier	Euros	
GOVERNMENTAL_IMPROVEMENT_VALUE	16	Entier	Euros	
NONRESIDENTIAL_LAND_VALUE	17	Entier	Euros	
RESIDENTIAL_IMPROVEMENT_VALUE	18	Entier	Euros	
RESIDENTIAL_LAND_VALUE	19	Entier	Euros	
YEAR_BUILT	20	Entier	Années	
DISTANCE_TO_ARTERIAL	21	Entier		
DISTANCE_TO_HIGHWAY	22	Entier		
PERCENT_WATER	23	Entier		de 0 à 100
PERCENT_STREAM_BUFFER	24	Entier		
PERCENT_FLOODPLAIN	25	Entier		
PERCENT_WETLAND	26	Entier		
PERCENT_SLOPE	27	Entier		
PERCENT_OPEN_SPACE	28	Entier		
PERCENT_PUBLIC_SPACE	29	Entier		
PERCENT_ROADS	30	Entier		
DEVELOPMENT_TYPE	31	Entier		Formule

Figure 18 : Focus sur les caractéristiques d'une cellule. (THEMA, 2005)

De même que pour MARS, les bilans énergétiques et les émissions de CO₂ sont calculés à partir des résultats des sous modèles de transports. La spatialisation est ici bien plus précise, ce qui permet des résultats mieux localisés. Les indicateurs sont multiples dans SIMAURIF, et peuvent être choisis par

l'utilisateur pour URBANISM, ce qui laisse des possibilités d'études intéressantes. Les résultats sur l'urbanisation peuvent aussi être utilisés pour faire des études énergétiques de demande pour le bâtiment suivant les zones urbaines. Couplés aux résultats du transport, cet outil est donc très avantageux au niveau des bilans énergétiques.

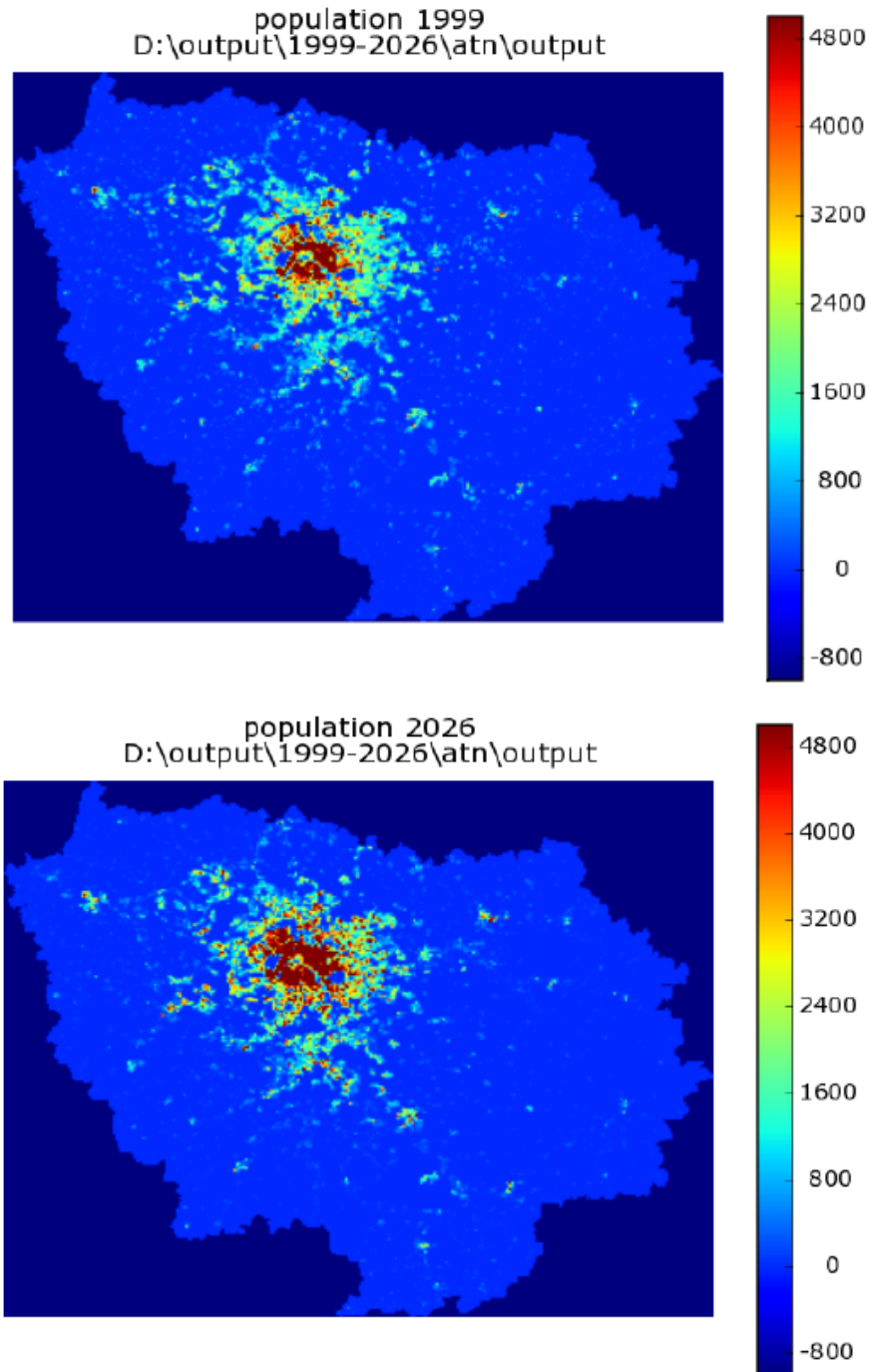


Figure 19 : Prospective d'évolution de la population de l'Île de France 1999-2026 avec SIMAURIF (De Palma et. Al., 2008)

2. Problèmes de LUTI

1- Bases de données trop importantes

L'un des principal défaut des LUTI est le grand nombre d'informations nécessaires avant qu'ils ne soient opérationnels pour une ville donnée. Les LUTI sont des outils très complets qui modélisent des interactions entre des phénomènes à priori assez éloignés référés avec un grand nombre de paramètres. De plus, la période de calage étant d'une dizaine d'années avant l'année de base, avec un pas de temps d'une année, les données doivent être non seulement les plus précises possibles au temps de la modélisation, mais aussi sur toute la période précédente.

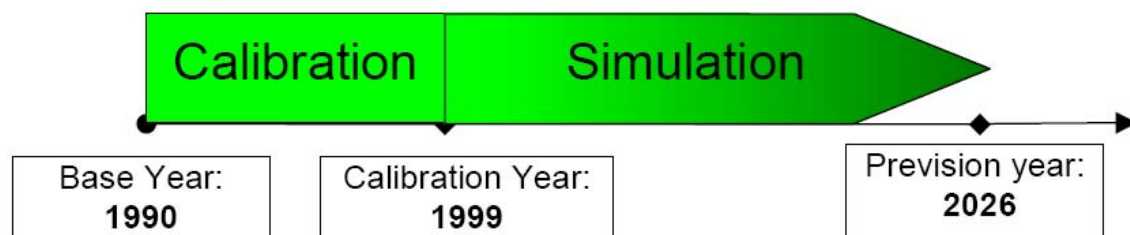


Figure 20 : Diagramme de calibration et de simulation pour SIMAURIF (De Palma et. Al., 2008)

Selon M. Emberger, il n'est pas nécessaire de réaliser des modèles qui soient trop précis. Contrairement à SIMAURIF, qui nécessite beaucoup de temps de mise en œuvre, MARS est relativement « simple » pour un LUTI. En effet, la collecte des informations se fait en 5 à 6 semaines (Emberger). Cela est relativement faible quand on sait que l'application de SIMAURIF pourrait durer 1-2 ans, durée dans laquelle la collecte et l'adaptation des données représentent une grande partie du travail. Selon Emberger, la surenchère de précision et de données ne donne des résultats que très peu affinés par rapport à l'effort demandé pour les collecter et les traiter. Ainsi, il a voulu réaliser un modèle plus rapidement utilisable, et fait en sorte qu'il puisse être utilisé pour d'autres villes que celle pour laquelle il a été créé.

MARS est aussi un modèle dont le maillage n'est pas extrêmement fin. Il y a par exemple 30 zones pour Vienne, ce qui représente des surfaces moyennes d'environ 13 km². Cela est très grand par rapport aux cellules de la première version de SIMAURIF qui étaient de 0.25km² ! La raison pour

laquelle le découpage de MARS n'est pas plus fin vient du fait qu'il est souvent impossible d'avoir des données précises dans tous les thèmes nécessaires pour des petites zones. Les études donnent souvent des chiffres représentatifs de zones de taille moyenne par rapport à la ville. Pour réaliser une étude plus précise, il faut donc désagréger les données statistiques pour qu'elles soient redistribuées selon les zones de plus petites tailles. Cela induit des erreurs et des imprécisions. De plus, les résultats souhaités ne sont pas toujours utiles avec une telle précision, c'est pourquoi il est parfois nécessaire de ré-agréger les données. De nouvelles imprécisions sont alors à attendre, et il est donc plus judicieux de réaliser des études avec une précision moindre.

Le même problème d'adaptation de données est présent dans les anciennes versions de SIMAURIF. En effet, Urbansim réalise un découpage du terrain en cellules carrées. Les données récoltées, que ce soient les données des ménages, les données sur les logements ou les données de transports, ne sont pas calibrées sur des cellules carrées, et encore moins de la taille 500X500 utilisées dans Urbansim. Tout un travail de modification des données est donc là encore nécessaire, avec les inconvénients que cela induit. La future version de SIMAURIF, réalisée dans le cadre d'un projet européen, reviendra à un système découpé en zones correspondant aux données de l'INSEE et des institutions statistiques (zonage ILOT par exemple).

2- Difficulté de la prise en compte environnementale

Très peu de LUTI intègrent de manière complète et pertinente l'environnement. Ce critère est considéré comme un paramètre éventuel de sortie ou d'entrée des LUTI mais il n'est pas utilisé en temps que paramètre rebouclé endogène. Les critères environnementaux peuvent aller de l'emplacement des zones humides à la répartition des pôles d'émission de CO₂, en passant par la qualité de l'air et le bruit. L'étude de Wegener sur les interactions entre land use et transport et environnement les classe en trois catégories et en étudie les interactions :

- **Ressources** : Energie, eau, terrain, végétation, faune, microclimat
- **Emissions** : gaz à effet de serre, pollution de l'air, pollution de l'eau, pollution des sols, déchets solides, bruit
- **Expositions** : qualité de l'air, ruissellement, infiltration, propagation du bruit

Table 1. Interactions between land use and transport and the urban environment

Cause	Effect	Resources						Emissions					Exposure						
		Land Use	Transport	Energy	Water	Land	Vegetation	Wildlife	Microclimate	Greenhouse gases	Air pollution	Water pollution	Soil contamination	Solid waste	Noise	Air quality	Surface water flows	Ground water flows	Noise propagation
Land Use		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Transport		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Energy	Resources	○	○	●					●	●						●			
Water	Resources			●												●	●		
Land	Resources	●		●	●	●	●	●								●	●	○	
Vegetation	Resources	○		○	●	●	●	●	●									●	
Wildlife	Resources					●													
Microclimate	Resources	○			○	○	●												
Greenhouse gases	Emissions							●											
Air pollution	Emissions							●	●							●			
Water pollution	Emissions			●	●	●	●			●	●					●	●		
Soil contamination	Emissions	○		○	●	●	●			●	●					●	●		
Solid waste	Emissions	○		○	○	○	○				●	●							
Noise	Emissions											●						●	
Air quality	Exposure	●			●	○	●			○	○				●				
Surface water flows	Exposure			●	●	●	●								●			●	
Ground water flows	Exposure			●	●	●	●									●			
Noise propagation	Exposure	●				●												●	

○ weak impact ● strong impact

Figure 21 : Interaction entre LU et transport et environnement (Wegner, 2008)

L'interaction entre land use et transport et environnement n'est pas symétrique : land use et transport affectent quasiment tous les indicateurs environnementaux (ressources, émissions et exposition), alors que l'inverse n'est pas le cas. Les changements de land use, principalement les choix de localisation des entreprises et des logements sont très dépendants de la disponibilité du sol, la contamination des terres, la qualité de l'air et le bruit. Les autres paramètres environnementaux ont moins d'influences ou sont décisifs uniquement dans des cas particuliers. Les décisions de transport ne sont pas affectées par l'environnement à part au travers le prix des transports.

Les LUTI ne prennent pas en compte l'environnement, ou très minoritairement. L'environnement est jusqu'alors pris en compte uniquement comme entité subissant les choix de land use et transport, mais il n'y a pas de rebouclage pour définir les effets qu'a l'environnement sur les choix de localisation. Seule la localisation d'espaces verts permet dans MARS de caractériser la qualité de vie dans une zone donnée. Le tableau ci-dessus montre cependant que les effets ne sont pas inexistant, même s'ils sont plus restreints par rapport aux causes.

Il est paradoxal que les modélisateurs de LUTI et les urbanistes n'ai pas pris en compte les rétroactions de l'environnement sur le land use et transport alors que leurs modèles sont en parti créés pour connaître les conséquences environnementales des interactions entre LU et transport.

Selon Alberti (1999), les systèmes urbains doivent être considérés comme des écosystèmes urbains, dans lesquels le transport et le land use ne sont que deux sous systèmes. Il est alors nécessaire de prendre en compte toutes les interactions entre les sous-systèmes de l'environnement urbains, et non pas seulement ceux entre land use transport et environnement.

La qualité environnementale peut être prise en compte dans la possibilité d'investissement lors du choix de localisation ; l'environnement est d'autant plus pris en compte que les revenus des ménages sont importants, ou qu'une entreprise emploie des personnes diplômées (cf. figure 14 et 15).

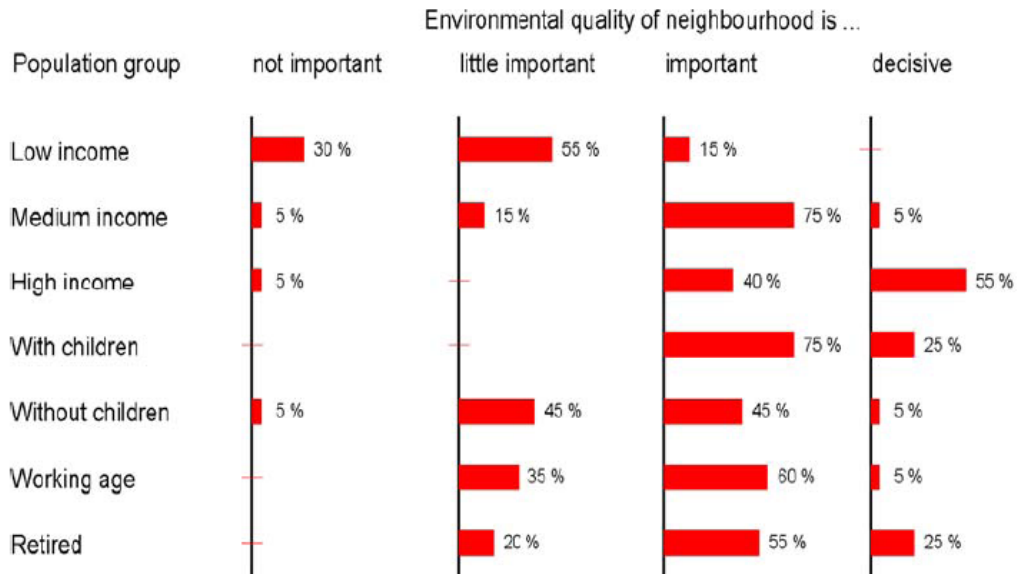


Figure 22 : Comportement des ménages face à la qualité environnementale. (Büttner et al, 2003)

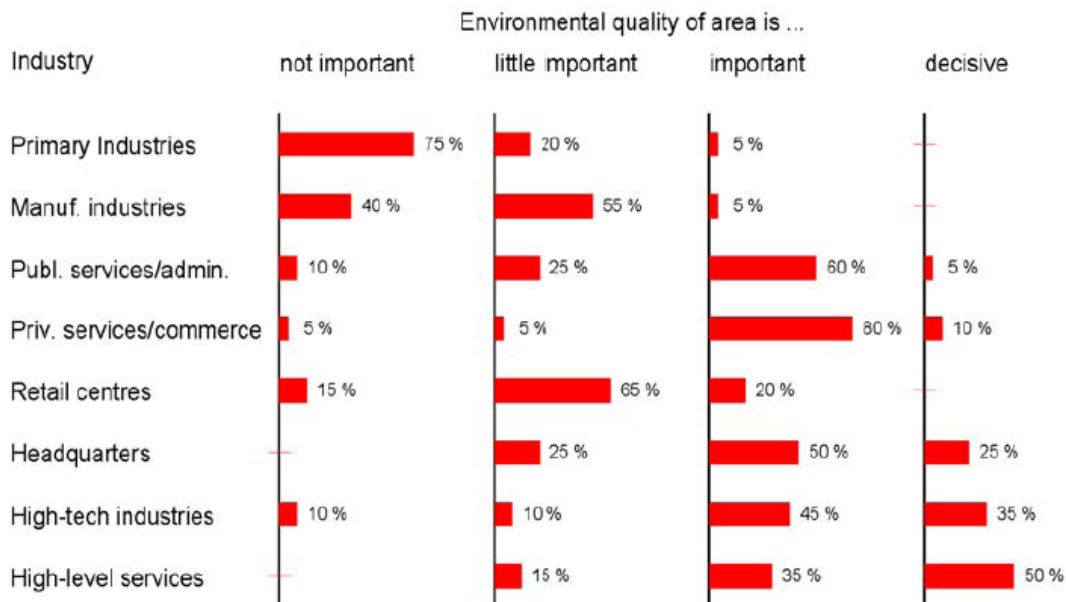


Figure 23 : Comportement des industries face à la qualité environnementale. (Büttner et al, 2003)

La raison pour laquelle certains indicateurs environnementaux ne sont pas pris en compte tient en partie à la résolution spatiale. En effet, la résolution nécessaire pour connaître l'impact au transport routier sur une zone est de l'ordre du réseau routier. Il est donc plus avantageux d'avoir une modélisation en raster plutôt qu'en zonage. L'adaptation des LUTI doit donc intégrer une cartographie en raster.

3- Problèmes d'adaptabilité

La plupart des modèles ont été développés pour une ville et donc sont très orientés de manière à correspondre le mieux possible à la ville en question. L'application de ces modèles dans des contextes différents d'autres villes pose plusieurs problèmes.

La plupart des coefficients des Logsum sont issus d'études propres à une ville. Cela paraît normal car les comportements, les critères d'accessibilité sont assez dépendants de la ville d'étude. Les paramètres les moins intrinsèques sont : les coefficients de frottement, les facteurs de demande, les relations de congestions, l'accessibilité.

$$f(c_{ij}) = c_{ij}^{1.18} \exp(-0.08c_{ij})$$

Figure 24 : Exemple de valeur fortement ancrée dans la ville, le facteur de coût des déplacements dans SIMAURIF.

Ici, on part d'une formule théorique et les différents coefficients 1.18 et -0.08 sont retrouvés grâce aux données de l'agence d'urbanisme de l'île de France (IAU). Si l'étude devait être transposée à une autre ville, il faudrait refaire l'estimation de cette fonction. Beaucoup de valeurs et de fonctions dans les LUTI sont ainsi non transposables à d'autres villes.

D'autre part, la collecte et la préparation des données statistiques sont différentes selon les structures qui les réalisent. Ainsi, les coefficients ne seraient pas exactement les mêmes entre deux villes différentes ce qui crée des divergences entre les résultats.

De plus, les comportements des ménages peuvent varier de manière forte entre les pays, et même entre les villes. En effet, deux villes, même très proches peuvent aussi induire des comportements très différents, notamment dans le choix modal, en fonction du réseau, du climat, de la congestion et des TC proposés.

Enfin, on ne peut adapter un modèle à une ville de taille trop réduite. En effet, les comportements de mobilité sont beaucoup plus ruraux, et donc tournés vers le véhicule privé, indispensable pour réaliser les trajets de rayonnement autour de la ville. L'offre de transport en commun est d'ailleurs beaucoup plus restreinte, les changements urbains assez réduits, et les politiques de ville souvent peu soutenues.

III. Intégration des VE à la simulation

Il est difficile à l'heure actuelle de définir les caractéristiques des VE car l'état de l'avancée technologique évolue de jour en jour et l'utilisation de ces véhicules reste peu connue (d'où la multiplication des projets pilotes dont les retours d'expérience ne sont pas encore disponibles). Néanmoins, les véhicules électriques aujourd'hui sont caractérisés par :

- Substitution énergétique des carburants vers l'électricité (nouveaux réseaux de distribution).
- Une autonomie de 100-120 Km avec des batteries encore trop chères et trop lourdes.
- La charge : temps de charge de 3-6 heures (en 2 heures on peut recharger 80% de la batterie) et coût de charge réduit.
- Une conduite assouplie et calme.
- Des nuisances réduites : pas d'émissions locales (mais des émissions en fonction du mix électrique) et réduction du bruit par rapport aux véhicules thermiques ; les nuisances liées à l'utilisation de l'espace restent inchangées.

Ces aspects sont considérés ci après dans le contexte de l'interaction entre transport et développement urbain.

1. Réseau de distribution de l'énergie et localisation des bornes

1- Réseau de distribution d'électricité

Pour l'intégration des VE dans les LUTI, il importe de prendre en compte les réseaux de distribution de l'énergie. En effet, cela va conditionner fortement les possibilités d'installer des bornes de rechargement. De plus, plusieurs types de rechargement sont possibles, soit des rechargements de courtes durées, soit des rechargements plus lents (à la maison). Cela va influencer sur la courbe de charge, et donc directement sur la production d'électricité. Ainsi, il est nécessaire de connaître les zones de rechargements courts et lents afin de prévoir le réseau en conséquence.

Idée : Dans les modèles LUTI, il serait possible d'intégrer une couche SIG supplémentaire représentant le réseau électrique. Ce réseau interagirait avec le module land use. Il serait alors utile de pouvoir introduire des changements de configurations du réseau ou des prolongements de lignes. Ainsi, la configuration du réseau serait une donnée d'entrée pour la localisation des bornes de rechargement.

Cependant la localisation des réseaux est un paramètre à une échelle très fine. De plus l'utilité de ce paramètre dans la modélisation doit être mise en perspective. Est-ce que les résultats vont vraiment être affectés par la précision apportée par ces informations ? Est-ce qu'une modification de ces réseaux va vraiment être significative, en réalité ? Est-ce qu'on ne va pas avoir tendance à surestimer l'impact de changements dans ces réseaux et donc éloigner le modèle de la réalité ? Pourquoi dans ce cas ne pas localiser aussi les réseaux de chaleurs ou les réseaux haut débit optiques ? Cela a aussi une influence sur l'urbanisation et le choix de développement des nouveaux logements.

Ces questions sont essentielles pour toute modification des LUTI et comme le préconise M. Emberger, les modèles ne doivent pas être trop précis, et ce pour plusieurs raisons : d'une part le temps de collecte des données va être important, d'autre part, il faut bien souvent extrapoler les données pour avoir les informations à l'échelle de précision que l'on souhaite, et il est ensuite nécessaire de les ré agréger pour avoir les résultats. C'est donc beaucoup de manipulation de données, et donc d'accumulation d'erreurs pour un résultat qui ne sera au final pas modifié de manière significative. Enfin, les LUTI sont des modèles de prospective, dont les résultats sont à interpréter avec la marge d'erreur qu'ils induisent. Ainsi, si l'ajout d'une donnée d'entrée, ou l'amélioration de la précision n'apporte qu'une fluctuation inférieure à la marge d'erreur, la modification est jugée comme non pertinente.

2- Localisation des bornes de charges

La localisation des bornes pourrait être rajoutée au modèle de land use. Des paramètres viennent influencer le choix d'implantation des bornes (Fulda-Wirges):

- Localisation des foyers possédant un VE selon un profil d'utilisateur
- Localisation des emplois et considération des trajets pendulaires
- Localisation des lieux principaux de charge (gares, centres commerciaux, équipements sportifs, parking etc.)
- Accord avec le réseau de transport en commun
- Accord avec les zones environnementales ou les péages urbains des villes

La localisation des bornes et par conséquent l'arrivée des VE est fortement conditionnée par la localisation des parkings. Dans MARS, cela fait partie des données d'entrée. Les parkings longue durée et les parkings pour courte durée sont localisés dans chaque zone. Cela est une caractéristique très intéressante car cela conditionne la possibilité de recharger de manière lente ou rapide.

Idée : Il est ainsi possible, avec le même genre de modèle que la localisation des nouveaux logements/ emplois (logit multinomial) de proposer des nouveaux emplacements des bornes. Le but de ce module serait une aide à la décision pour les autorités afin de savoir dans quelles zones il est nécessaire ou attendu d'installer des bornes de rechargement, mais aussi pour les distributeurs d'énergie pour gérer les futur besoin en énergie aux différents endroits de la ville. L'implantation des bornes peut aussi être utilisée en temps que politique de développement d'une zone. En effet, si une

zone est correctement fournie en possibilité de rechargement, son attractivité va croître d'autant plus.

Les interactions avec le reste du modèle seraient :

- Augmentation de la population locale ayant un attrait pour les VE (nul pour MARS/
Possibilité de changer le ratio de la population captive des TC dans METROPOLIS)
- Augmentation de la congestion des routes aux abords des bornes de rechargement (Module de transport METROPOLIS/ Module de transport pour MARS)
- Réduction des émissions de CO2 pour la zone considérée si les véhicules thermiques sont remplacés par les VE et non juste ajout dans le parc.
- Augmentation des trajets courts donc intra-zonaux au sein de la zone étudiée (Module de transport METROPOLIS : choix de distribution).
- Augmentation de l'attractivité de la zone si des bornes sont installées (module de localisation des entreprises et logements)

Cependant, un module calculant la localisation des bornes pose des difficultés en ce qui concerne les échelles. En effet, la localisation des bornes à implanter est à l'échelle du quartier du fait des paramètres énoncés et son application dans les logiciels est plus grossièrement zonée surtout pour MARS. Par exemple, si il existe une mixité importante dans la zone, on ne saura pas dire s'il faut une borne courte ou longue durée, de même, pour le rechargement de longue durée en résidentiel, il est nécessaire de localiser les bornes à chaque logement, et nous n'avons pas la précision suffisante pour pouvoir positionner des bornes sur chaque maison. Néanmoins, il serait intéressant de pouvoir repérer les changements et les réelles conséquences que l'installation de bornes dans un quartier aurait. Malgré le manque de précision géographique des bornes, savoir le nombre de bornes au sein d'une zone peut faire évoluer à la fois son développement immobilier et le trafic au sein de la zone. Une autre solution serait de faire un nouveau découpage uniquement pour le module de localisation des bornes. Ce découpage plus fin ne serait utilisé que pour cette partie de la modélisation et ne nécessiterait pas d'agrégation de données, mais seulement une itération supplémentaire (cf. module de localisation des bornes). Le zonage de SIMAURIF paraît ici mieux adapté.

Prendre en compte le réseau électrique dans les LUTI risque donc d'amener à plus de problèmes de données, de précisions et d'erreurs que de résultats réellement exploitables. La localisation des bornes est à l'inverse un élément très significatif, et d'une résolution acceptable. La prise en compte du réseau électrique est donc à écarter, pour se focaliser sur les choix de positionnement des bornes de rechargement

2. VE un mode de déplacement

Afin de renseigner la proportion des VE dans le parc roulant, il est nécessaire de connaître la courbe de pénétration des véhicules électriques et de la renseigner dans les modèles. MARS n'a pas de rétroaction sur cette donnée, et il faut enregistrer un scénario de pénétration qui ne change plus lors de la modélisation. Cette courbe de pénétration peut être évaluée mais les avis divergent et les pronostiques sont divers. Elles dépendent notamment des politiques et du développement technologique.

Idée : Les courbes de pénétration et l'état du parc roulant sont jusqu'alors des paramètres exogènes dans les LUTI. Si les VE s'intègrent dans les LUTI, la question de l'interaction des VE avec les transports se pose ; et la volonté ou non de choisir un VE pourrait intervenir à un autre endroit. On suggère que ça soit au niveau du choix modal.

Une solution est de considérer le VE comme un VP et d'intégrer un certain pourcentage de VE au cours du temps, selon la courbe de pénétration. Dans ce cas là le choix du VE se fait après avoir fait le choix du VP, et donc il n'y a pas de concurrence entre les TC et les VE. Les critères de choix pour les VP sont alors généraux, et viennent ensuite certains critères pour choisir ou non VT ou VE.

Une autre solution est de considérer le VE comme un nouveau mode, *un véhicule à part entière ; c'est là le seul moyen de le distinguer des autres modes de transport et de lui donner l'occasion de s'en singulariser (Pierre, 2007).*

En plus des paramètres déjà présents pour les véhicules et les TC, il faut prendre en compte l'autonomie et donc les distances réduites des VE. Ce paramètre va être rajouté aux données influençant le choix d'un mode et donc intégré dans le module de choix modal. Ce n'est pas le seul paramètre qui rentre en jeu dans le choix de ce mode de transport, il y a aussi la possibilité de pouvoir recharger ou la volonté de se déplacer en véhicule non polluant par exemple. Ces choix ne sont pas pris en compte dans les LUTI, car pour les véhicules thermiques, on ne prend pas en compte que les usagers vont devoir trouver une station service, ou s'ils préfèrent prendre leur véhicule essence plutôt que le diesel parce que ça pollue moins. Le coût des véhicules est aussi un critère déterminant pour l'utilisation d'un VE : à l'achat, les batteries sont plus chères, mais à l'utilisation, la charge l'est beaucoup moins (1-2 Euro par charge).

La courbe de pénétration serait proposée, et son évolution serait rétroactive avec l'utilisation des ménages et les infrastructures de charge. Il serait intéressant de faire un scénario avec une courbe de pénétration assez rapide des VE, de sorte que beaucoup de ménages aient accès rapidement aux VE. Ensuite, l'observation se ferait au niveau des choix du véhicule pour chaque trajet. Il existe aujourd'hui dans MARS uniquement les VP, les TC et les modes doux, et dans SIMAURIF les TC et les VP. Il faut donc rajouter les VE avec les utilités nécessaires (prix du trajet plus faible, faible distance, ...). Les ménages auraient ainsi le choix entre les trois ou quatre modes, et ce pour différents motifs de transports et distances. La congestion ne changerait pas mais les bilans énergétiques et les émissions pourraient être ainsi mesurées et comparées d'un scénario à l'autre.

3. VE et Urbanisation

Si les VE sont intégrés dans les LUTI : quelles sont les interactions entre les VE et le Land Use ?

Les changements dans la structure de la ville peuvent avoir des effets sur le développement des VE. En effet une ville plus dense avec des trajets courts est plus adaptée à la voiture électrique puisqu'il n'y a pas de grands trajets qui nécessiteraient une pause pour recharger ou échanger la batterie. Cependant, les véhicules électriques avec une autonomie de 80km couvrent la majorité des distances parcourues en milieu urbain dont la moyenne est de 40km par jour. (ENTD, 2009)

Les changements dans le parc roulant avec une grande partie de VE peuvent avoir des effets sur l'étalement des villes. En effet, les personnes éligible pour l'achat d'un VE sont globalement les personnes n'habitant pas en centre ville, dans des maisons et possédant deux voitures dont des grosses cylindrées et des garages (source : ENTD, 2009). Cela correspond principalement à un profil de personnes habitants en milieu périurbain, et assez aisées. Ainsi, se sont surtout les déplacements en périurbains qui vont être affecté aux VE. De par la localisation des usagers potentiels de VE, et du fait que le VE puisse faciliter les déplacements pour les résidents du périurbain, le résultat de l'arrivée du VE peut renforcer l'étalement urbain.

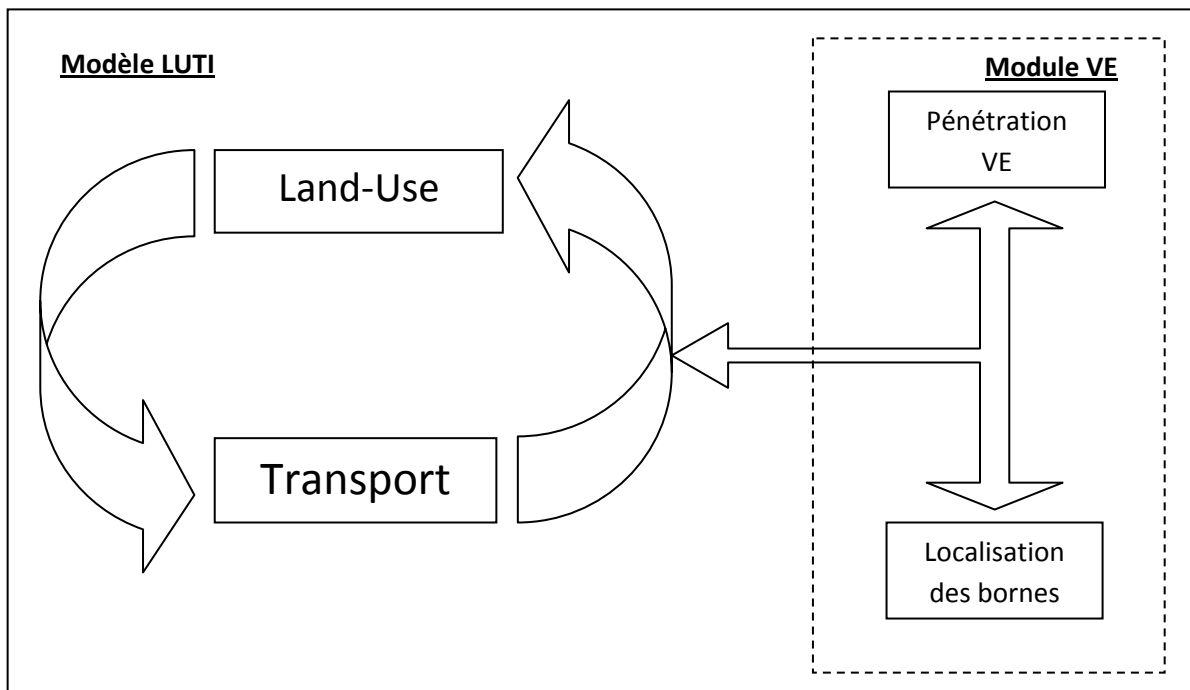
IV. Intégration d'un module VE dans les LUTI

1. Structure du module

A partir de l'analyse des deux LUTI réalisée précédemment, ainsi que de l'analyse des problématiques liées au VE dans ces modèles, il est possible de structurer un module VE, intégrable aux LUTI, qui les utilise pour faire des prospectives sur deux grands thèmes relatifs à l'arrivée des VE en milieu urbain, à savoir la courbe de pénétration des VE dans le parc roulant, et la localisation et le développement des bornes de rechargement.

Ces deux thèmes sont reliés entre eux et dépendent aussi des paramètres utilisés dans les LUTI. Le module VE est donc totalement dépendant du LUTI auquel il se greffe, c'est pourquoi il est important de l'adapter correctement et en respectant les normes de celui-ci.

L'intérêt de ce module est à la fois de pouvoir avoir des résultats de prospections suivant l'évolution de l'urbanisation et des politiques de transports, mais aussi de pouvoir réaliser des scénarios de différentes politiques pouvant agir sur l'intégration des VE. Il est important de pouvoir garder des paramètres d'entrée que l'on peut faire varier afin de réaliser ces scénarios. Globalement le fonctionnement du module se calque sur le fonctionnement du LUTI. La différence majeure est que la courbe d'évolution du parc roulant devient endogène. La courbe de pénétration des VE est aujourd'hui impossible à prévoir de manière certaine, c'est pourquoi il est nécessaire d'avoir un outil capable de donner les grandes tendances de l'évolution de l'arrivée des VE. De même, les bornes de charges seraient intégrées à ce module en corrélation avec les infrastructures de transports et les localisations des emplois et des logements contenus dans LUTI. L'objectif étant de comprendre le rôle que jouent à la fois les paramètres d'urbanisation et de transport sur l'arrivée du VE, mais aussi plus précisément, les interactions entre l'installation des bornes de charges et le développement des VE.



2. Interaction avec le LUTI

Les interactions entre les différents sous modèles sont précisées ci-dessous.

1- Pénétration des VE ↔ localisation des bornes

La relation entre la courbe de pénétration et la quantité des bornes de charges est directement liée au nombre de véhicules électriques. Le nombre de VE influence de manière positive le nombre de bornes présentes dans les villes. Il n'est cependant pas nécessaire que le nombre de prise soit égal ou supérieur au nombre de VE. En effet, le rechargement se fait généralement au domicile. Etant donné que les acheteurs potentiels sont avant tout les personnes possédant un garage ou un box, avec une prise (ou la possibilité d'en installer une), cela réduit le nombre de bornes nécessaires sur l'espace public. En effet, selon l'ENTD, 62% des ménages ont une place de stationnement qui leur est réservée.

A l'inverse, plus le nombre de bornes va croître, plus le nombre de VE va pouvoir augmenter. L'interaction dans ce sens a d'ailleurs probablement plus d'impact. La courbe de pénétration est dépendante de nombreux autres paramètres, mais elle sera freinée par un manque de bornes, car la décision d'acheter un VE pour les ménages est aussi liée au nombre de bornes et à leur localisation. De plus, le choix modal va dépendre de la localisation des bornes, donc l'utilisation des VE vers des zones données sera dépendante de la présence ou non de bornes dans ces zones.

2- Pénétration des VE ↔ LU

On revient dans cette partie aux interactions évoquées dans la partie II-3 entre le VE et le land use. Le facteur urbain le plus prompt à avoir des influences sur l'arrivée des VE est la densité urbaine. Elle va conditionner la possibilité d'adaptabilité du VE à la ville, et est liée aux autres facteurs comme le stationnement, la congestion, l'étalement urbain. Ainsi, certains contextes urbains ne sont pas adaptés à la promotion du VE (Pierre, 2007). Les villes européennes, globalement beaucoup plus denses que les villes des Etats Unis, sont moins propices à l'intégration du VE. C'est une des raisons pour laquelle le VE s'est développé plus tôt en Californie. La question de la densification n'y est pas posée comme en Europe, et les américains souhaitent pouvoir garder la possibilité de vivre en pavillons, souvent éloignés du centre ville. Cette configuration est idéale pour le VE, qui vient en complémentarité des TC (Beillan 1994). Dans les villes européennes, la densité des centres villes pousse les politiques à choisir des TC performants plutôt que de promouvoir les VE. Cela permet de décongestionner le centre. En aucun cas cela ne signifie que les VE ne sont pas adaptés aux villes européennes, mais l'usage en sera différent, et l'intégration du VE sera probablement plus rapide dans les villes ou les zones urbaines moins denses.

3- Pénétration des VE ↔ Transport

Pour ce qui est des transports, le changement principal va être le choix modal des usagers. En effet, on rajoute un mode de transport à ceux existants (VP et TC), donc la répartition des modes va être plus éclatée.

Il semble que les habitudes des usagés des VE ne changeront que de manière négligeable.

En effet, globalement, les personnes possédant un VE ne font pas plus de km qu'avec leur véhicule thermique. *Dans les ménages pour lesquels aucun changement n'est intervenu, les prestations kilométriques (nombre de kilomètres parcourus annuellement) de l'ensemble des véhicules est demeuré presque constant, c'est-à-dire qu'une partie des kilomètres accomplis auparavant par des véhicules classiques l'ont été ensuite par les VEL. (Rapport Mendrisio 2001).* Il se peut même dans certains cas que cela réduise légèrement le kilométrage des déplacements globaux en véhicule privé (VE et VT), comme le montre le retour d'expérience sur Mendrisio ci-dessous. Cela reste tout de même une minorité d'usagers. Les usagers de VE souhaitent en fait avoir les mêmes possibilités de déplacement qu'avant. L'introduction du VE ne va donc pas changer la distance globale de trajets. Cela ne rajoute donc à priori pas de congestion dans la ville. La congestion n'est cependant pas a priori améliorée par l'arrivée du VE, et elle peut être déplacée.

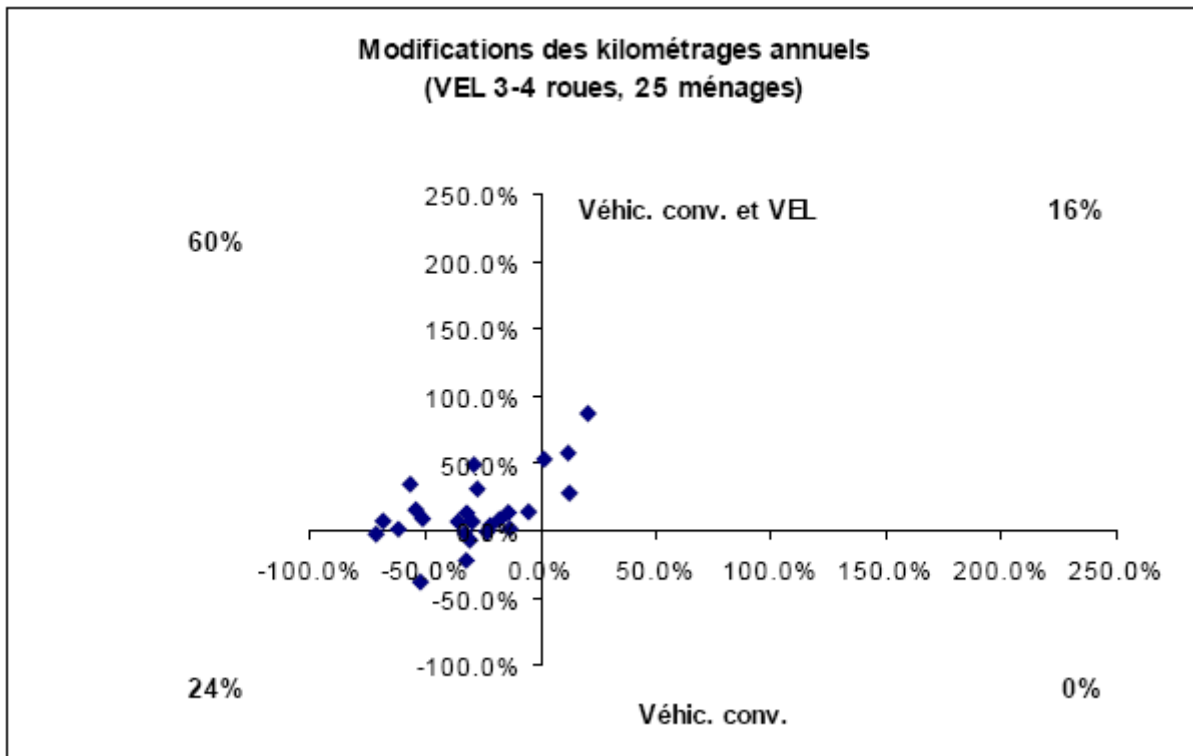


Figure 25 : Modification des kilométrages annuels des ménages possédant un VE au Tessin (Retour d'expérience MENDRISIO, 2001)

Légende ci-dessous.

Kilométrage véhicules conventionnels et VEL		
Roule globalement davantage, mais moins avec véhicules conventionnels	Roule globalement davantage, et davantage avec véhicules conventionnels	Kilométrage véhicules conventionnels seulement
Roule globalement moins, et moins avec véhicules conventionnels	Roule globalement moins, mais davantage avec véhicules conventionnels	

Globalement, les possesseurs de VE 2 roues augmentent légèrement leurs kilométrages global, tout en réduisant leur kilométrage avec leur VT. Pour ce qui est des VE 4 roues, le kilométrage global a fortement diminué et le kilométrage en VE a légèrement augmenté. (Source : *Influence sur le comportement en matière de mobilité (déplacements) 31.3.01 Heidi Hofmann, Dr. Ueli Haefeli, Dr. Eugen Meier-Eisenmann, Gianni Moreni*) Il n'y a donc pas d'augmentation de kilométrage du au passage à la mobilité électrique, et même une légère diminution.

La pénétration des VE pourrait jouer un rôle de renforcement suivant la perception des usagers. Si le trafic est totalement congestionné, les usagers se tourneront avant tout vers les TC, et non vers les VE qui présentent dans ce cas les mêmes inconvénients que les VT. *Plus le réseau est congestionné, plus le choix modal des ménages va se porter sur les TC, plutôt que sur les VP et donc les VE. Ainsi, la courbe de pénétration va aussi dépendre de l'état de la mobilité au sein de la ville (Pierre, 2007).* La congestion est donc un facteur qui limite l'utilisation des VP et donc le développement des VE.

4- Localisation des bornes ↔ LU

La localisation des bornes va être très fortement liée à la place réservée pour les parkings, et au réseau routier. Les places de parking sont indispensables pour pouvoir recharger son VE, et donc il y aura un bouclage doublement positif entre le nombre de place de parking et le nombre de bornes installées. Un point très positif du LUTI MARS est qu'il prend en considération les places de parking pour une durée longue et celles réservées à une durée limitée. Cela est un renseignement précieux par rapport au temps de charge. Cela va influencer plus ou moins la possibilité de recharger son VE sur ces places, en fonction du type de charge, rapide ou lente.

Le réseau routier influence aussi bien sur la possibilité d'installer des bornes de rechargement. Les bornes doivent être accessibles en véhicule, et donc doivent se trouver dans une zone bien desservies. Cela va de paire avec l'attractivité de la zone, qui va être un facteur positif pour les bornes de rechargement. En effet, l'accessibilité prend en compte de nombreux paramètres comme la présence d'emplois, de commerces, qui sont des critères déterminants dans le choix des usagers de venir recharger leurs VE. En témoigne le projet d'implantation de VE à Berlin où toutes les bornes sont localisée sur les parkings de REWE (moyenne surface).

5- Localisation des bornes ↔ Transport

Lorsque les batteries NiCd étaient encore autorisées et répandues sur les VE, il était nécessaire de décharger complètement la batterie régulièrement. Aujourd'hui, elles sont interdites, et le type de batteries le plus répandu est le lithium ions. Le lithium n'a pas de propriété de mémoire, et il n'est donc pas nécessaire de décharger entièrement les batteries. Cela permet de ne plus avoir des distances supplémentaires parcourues par les conducteurs de VE, qui rallongeaient leurs trajets, ou tournaient aux abords des bornes afin de vider la batterie. La localisation des bornes n'a donc à priori pas d'effet sur le volume de transport en général. (cf. pénétration des VE ↔ transport) Cependant, au niveau local, la localisation de bornes dans telle ou telle zone va impliquer une augmentation de l'attractivité. Celle-ci va se voir rajouter un paramètre dans le Logsum pour caractériser la présence et le nombre de bornes de rechargement dans la zone. Cela va en effet avoir un effet positif pour les ménages possédant un VE.

A l'inverse, le transport joue un rôle dans la localisation des bornes. Tout d'abord le réseau de transport en commun, qui est un critère d'installation de point de rechargement. En effet, les parkings relais sont des endroits privilégiés pour recharger son VE. Les personnes utilisant les TC à partir des parkings relais sont des utilisateurs potentiels de VE. Cela correspond à un public vivant en banlieue, plus ou moins lointaine, qui utilise son véhicule pour aller du domicile au parking relais, et ensuite prendre les TC pour se rendre dans le centre ville. *L'achat de la voiture électrique concerne quasi-exclusivement des personnes habitant un tissu pavillonnaire (PIERRE, 2007).* Cela correspond majoritairement à des transports domicile-travail. La localisation de ces utilisateurs potentiels en banlieue les fait rentrer majoritairement dans la catégorie des propriétaires vivants en dehors du centre ville, ce qui correspond à un profil potentiel d'acheteur de VE (ENTD – Ferrière, 2009). Le pôle d'attraction des bornes vis-à-vis du transport est donc le parking relais, et plus généralement la station de transport en commun ou de train.

3. Intégration de deux sous modèles

Pour intégrer les VE dans les LUTI, deux thèmes principaux sont ressortis : la pénétration des VE sur le parc roulant et la localisation des bornes de rechargement. Ces deux grands thèmes feront l'objet de modules intégrés et interagissant avec les autres sous modules des LUTI et auront pour objectif de faire ressortir de manière la plus efficace possible différents indicateurs qui traduiront les effets de l'arrivée des VE dans un milieu urbain.

1- Localisation des bornes

La localisation des bornes dépend de nombreux paramètres issus du transport et de l'urbanisation. Ces paramètres ont été évoqués dans la partie précédente. Cette base théorique va servir à établir une modélisation interagissant avec les autres sous modèles du LUTI utilisé.

Le sous modèle de localisation se base sur le logiciel « Electrical substation service-area estimation ». Ce modèle d'automate cellulaire est destiné à calculer l'aire de service des transformateurs électriques servant de dernière étape à la distribution du courant, avant qu'il soit distribué aux particuliers. Cela correspond assez à l'aire d'attraction des bornes de chargement des VE. En effet, certains critères sont communs et le système est approprié à la connexion de ce modèle aux LUTI.

Un automate cellulaire consiste en une grille régulière de « cellules » contenant chacune un « état » choisi parmi un ensemble fini et qui peut évoluer au cours du temps. L'état d'une cellule au temps $t+1$ est fonction de l'état au temps t d'un nombre fini de cellules appelé son « voisinage ». À chaque nouvelle unité de temps, les mêmes règles sont appliquées simultanément à toutes les cellules de la grille, produisant une nouvelle « génération » de cellules dépendant entièrement de la génération précédente. Pour notre modèle utilisant les LUTI, le découpage spatial est en zones correspondant aux caractéristiques de typologie et à la précision des données accessibles pour la ville étudiée. Il s'agit donc de superposer une grille au zonage déjà effectué. Chaque cellule se verra affilier les propriétés de la zone pour laquelle elle a le plus de surface en commun. Cela fait perdre un peu de précision, mais le but n'est pas d'avoir une finesse extrême, mais de réduire l'échelle du zonage afin de pouvoir évaluer plus finement la localisation des bornes.

Le but de ce module n'est pas de calculer la localisation des bornes à proprement parler, mais c'est une étape de l'itération du sous modèle qui caractérise la densité des bornes et la nécessité d'en installer de nouvelles dans telles ou telle zone.

Le point de départ de ce modèle est le plan d'implantation des bornes de rechargement à l'année t . A partir de la localisation des bornes, chaque cellule va se voir affilier une borne de rechargement, suivant une itération pondérée. Toutes les cellules dans lesquelles une ou plusieurs bornes sont présentes sont aussitôt affiliées à cette borne dès la première itération. Pour les autres itérations, les cellules vont être petit à petit affiliées à des bornes de rechargement en fonction de deux paramètres : leurs caractéristiques et le nombre de points de rechargements dans les cellules voisines. Plus une cellule aura de point de rechargement, plus elle aura la capacité d'agréger une cellule dans sa zone d'influence. Pour ce qui est des caractéristiques de la zone, plusieurs critères rentrent en jeu : la densité d'habitation, le nombre de ménage possédant des VE dans la zone, la mixité (commerces, logements, emplois, ...), ainsi que l'attractivité calculée dans le modèle de Land Use du LUTI. Un autre paramètre important est la distance par rapport à la borne de rechargement. De même, le réseau routier entre en jeu, puisque les bornes sont à priori situées sur le réseau routier élargi (comprenant les parkings). L'itération se répète donc jusqu'à ce que toutes les cellules soient affiliées, cela nous donne l'état à l'année t .

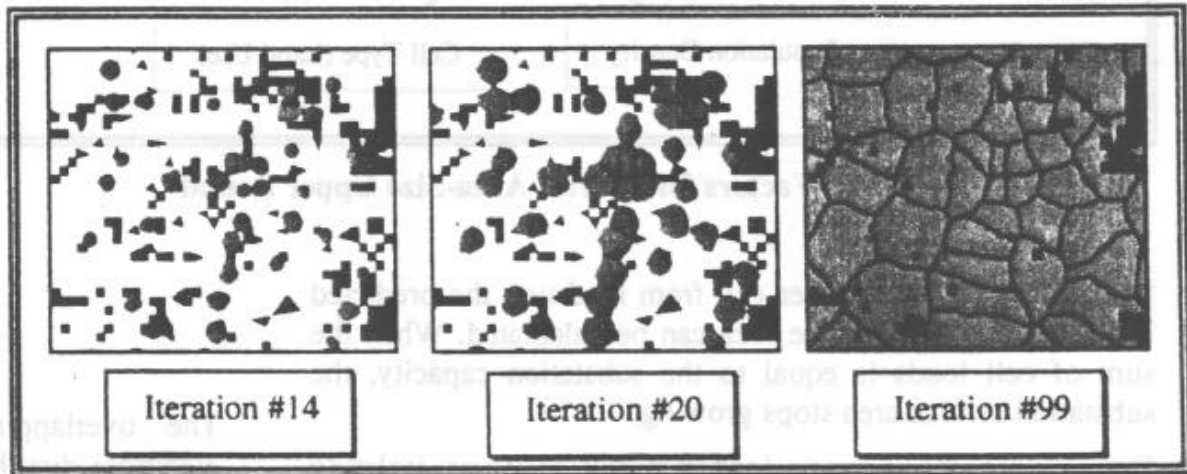


Figure 26 : Illustration de l'itération créant les zones d'affectation (Fenwick/ Dowell, 1998)

Pour connaître les endroits où vont pouvoir s'implanter de nouvelles bornes, il faut alors pouvoir comparer l'attractivité de la zone à un point de rechargement, et le nombre de point de rechargement dans la zone à laquelle il est affilié. Lorsque l'écart entre ces deux valeurs (qui devront être calibrées afin de pouvoir être comparé) dépassent un certain seuil, il est alors nécessaire de considérer qu'une borne doit être installée à et endroit. L'installation des bornes pourra être plus ou moins immédiate suivant les politiques et les financements alloués au développement de la mobilité électrique. Cela se traduira par la valeur du seuil évoqué ci-dessus, et du pas de temps pour lequel la carte des bornes est recalculée. Ces deux valeurs devront être exogène c'est à dire renseignées en entrée.

2- Pénétration des VE

Le module d'évaluation de la pénétration des VE sera basé sur les théories et les perspectives réalisées jusqu'à aujourd'hui. On ne peut pas en effet avoir de certitudes quand à l'allure des courbes de pénétration puisqu'il n'y a pas encore de retour d'expérience sur une durée assez longue. On ne peut aujourd'hui que se baser sur des comparaisons avec le véhicule diesel, et prendre en compte le plus de paramètres possibles.

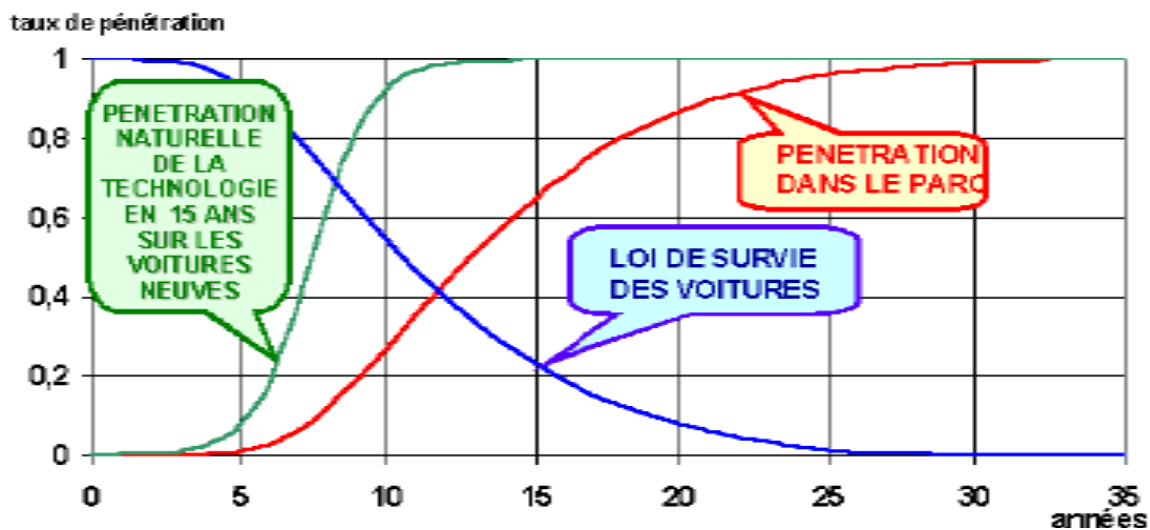


Figure 27 : Pénétration naturelle d'une nouvelle technologie. Analyse globale.
 Source C.Gallez INRETS/ADEME

Ainsi, une technologie n'équipera 100 % du parc que 35 ans après son introduction, 50 % après 13 ans (courbe rouge). Cette prospective générale présente des modifications suivant les différentes politiques de transport.

- La pénétration peut être accélérée par l'adoption d'une nouvelle norme. Cette accélération reste cependant très limitée.
- L'utilisation d'une « prime à la casse » ou d'une nouvelle réglementation pour retirer les anciens véhicules de la circulation n'est pas beaucoup plus efficace. Elle ne permet de gagner que 6 mois sur l'équipement de 50 % du parc et 3,5 ans sur l'équipement de 95 %.
- La combinaison de ces deux types de mesures est elle efficace puisque l'ensemble du parc est équipé/renouvelé au bout de 19 ans au lieu de 35. Trois ans et demi sont gagnés sur l'équipement de 50 % du parc et 7 ans sur celui de 95 %.

De nombreux scénarios ont été réalisés, en étudiant les différents types de véhicules du parc, et en particulier les VE qui nous intéressent ici. Seul un exemple de tendance pour la France est présenté ici. Cela n'est pas exhaustif, mais présente les grandes tendances d'évolution des différents modes de motorisation en intégrant l'électricité. L'étude récemment publiée sur le parc américain est proposée pour donner une idée de l'effet des différents scénarios possibles de l'évolution de l'énergie possible, et de promotion des VE. Seuls quelques uns sont présentés ici, de manière non exhaustive mais la présentation se veut donner les tendances, plus ou moins précises de la pénétration des VE. Elle permet aussi de comparer les perspectives américaines avec les françaises, en prenant en compte les différences du parc et des comportements de mobilité.

Scénario Patrice Nogues

Les Scénarios de Patrice Nogues ont été réalisés pour EDF, afin de connaître l'évolution de la demande énergétique pour les transports. Les hypothèses sont les suivantes :

- taux de croissance des immatriculations neuves : 1% /an à partir de 2005 (on fixe ce taux de manière à retrouver le parc calculé à partir de la population et du taux de motorisation)
- part du diesel dans les ventes de véhicule thermique : 71% en 2006 (observé) puis 75% à partir de 2010.
- Part des VHR dans le neuf : 0.2% en 2012, 1% en 2015, 10% en 2020, 40% en 2030
- Part des VE dans le neuf : 0.1% en 2012, 0.4% en 2015, 2% en 2020, 5% en 2030

On obtient ainsi les parts de chaque type dans le parc :

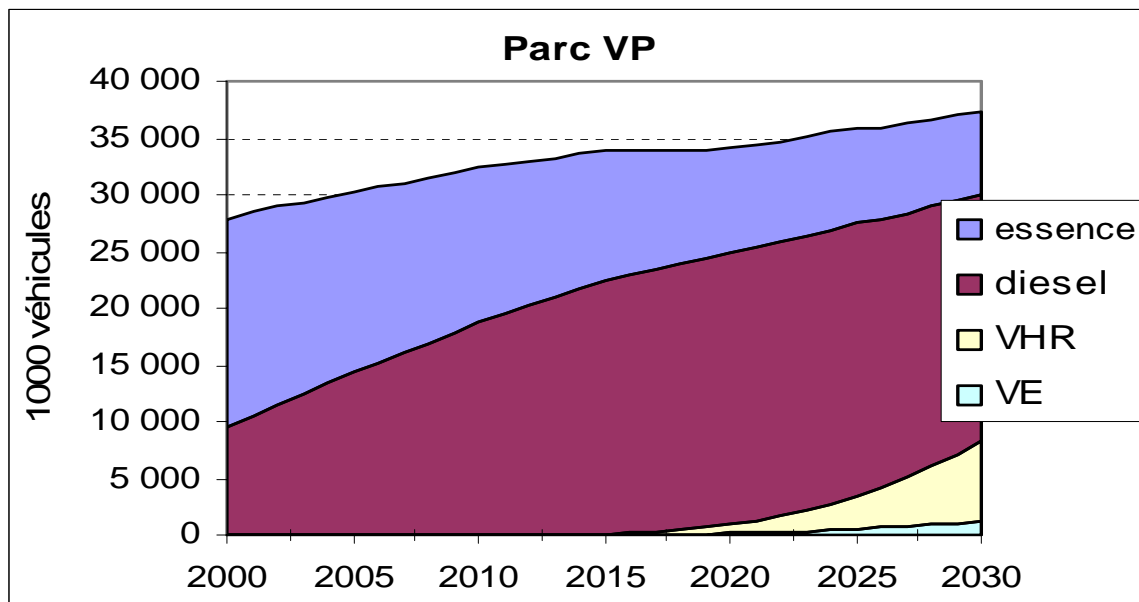


Figure 28 : Courbe prospective de l'évolution du parc roulant intégrant les VE (Nogues)

La pénétration des VE est très lente mais atteint 5% du parc en 2030, et la croissance s'accélère à partir de 2020.

Rapport Université de Berkley (PRWEB) Juillet 13, 2009

Ce rapport réalisé sous la direction de l'économiste Thomas Becker évalue les conséquences de la pénétration massive des voitures électriques dans le marché américain en terme de création d'emploi, de facture santé (via la réduction de la pollution urbaine), de balance commerciale (via la réduction des importations pétrolières) et de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Cette étude issue de la prestigieuse University of California Berkeley se base sur les prévisions de l'Agence Internationale de l'Energie pour ce qui concerne l'évolution du prix du baril de pétrole, et sur les données officielles du département américain à la santé concernant la facture santé. Dans les comparaisons, l'augmentation estimée de l'efficacité énergétique des véhicules thermiques sur la période considérée est intégrée.

Il est à noter que la prévision est réalisée pour des véhicules avec des contrats au kilométrage, qui financent la batterie. L'étude prévoit que les véhicules électriques avec ce type de tarification représenteront 64% des ventes de véhicules légers et 24% du parc automobile des États-Unis en 2030. Ce taux de pénétration est rendu possible par la baisse du prix d'achat et la réduction du prix au km des voitures électriques avec batteries échangeables par rapport au véhicule thermique. Becker considère que séparer l'achat de la batterie avec celui de la voiture est le plus pratique et le plus économique pour répondre aux attentes des clients potentiels.

Les résultats de la pénétration des VE sont présentés dans trois scénarios différents :

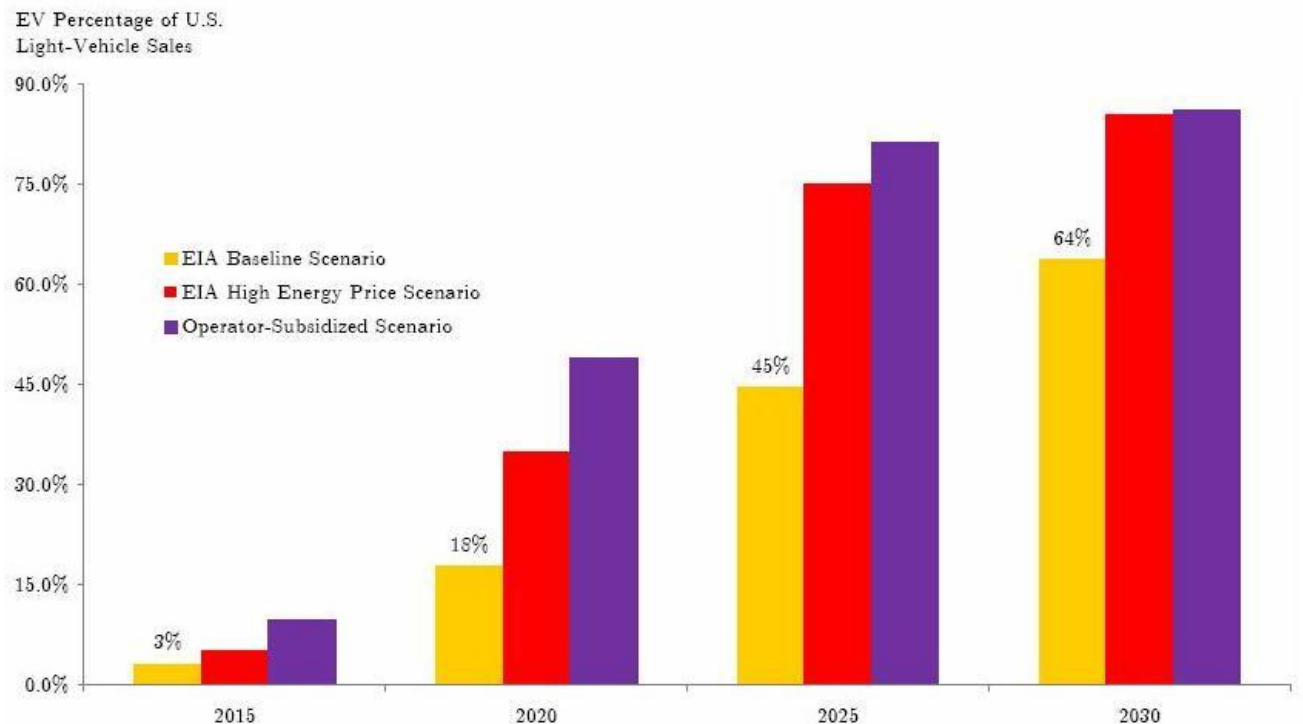


Figure 29 : Diagramme de la pénétration des VE pour trois scénarios différents.

1 - Avec scénario de base de l'Agence Internationale de l'Energie pour l'évolution du prix du baril de pétrole

2 - Avec hypothèse haute de l'Agence Internationale de l'Energie pour le prix du baril de pétrole

3 - Avec recours à un business model type BetterPlace (opérateur de mobilité)

On observe que le recours à un business model type BetterPlace permet de booster les ventes de véhicules électriques dès le début. Dans tous les cas, avec ou sans opérateur du type BetterPlace nous nous dirigeons inévitablement vers l'électro-mobilité.

On observe aussi que le coût du baril de pétrole a un impact majeur sur la vitesse de basculement vers l'électro-mobilité. Les véhicules électriques vont donc vraisemblablement contenir la flambée du prix du baril dans les années à venir, d'une part parce qu'ils permettent de réduire la consommation de pétrole, et d'autre part parce qu'une flambée violente du prix du baril conduirait à un basculement massif vers l'électro-mobilité, ce qui n'est pas dans l'intérêt de l'industrie pétrolière.

Le scénario de base a été détaillé ci-dessus avec l'évolution du parc entre 2000 et 2030.

En bleu : voitures électriques

En vert : voitures à pétrole avec assistance électrique (ou voitures électriques avec extension d'autonomie à pétrole)

En rouge : voitures à pétrole

Colonne de gauche : ventes de chaque type de véhicule

Colonne de droite : part de chaque type de véhicule dans le parc automobile des USA.

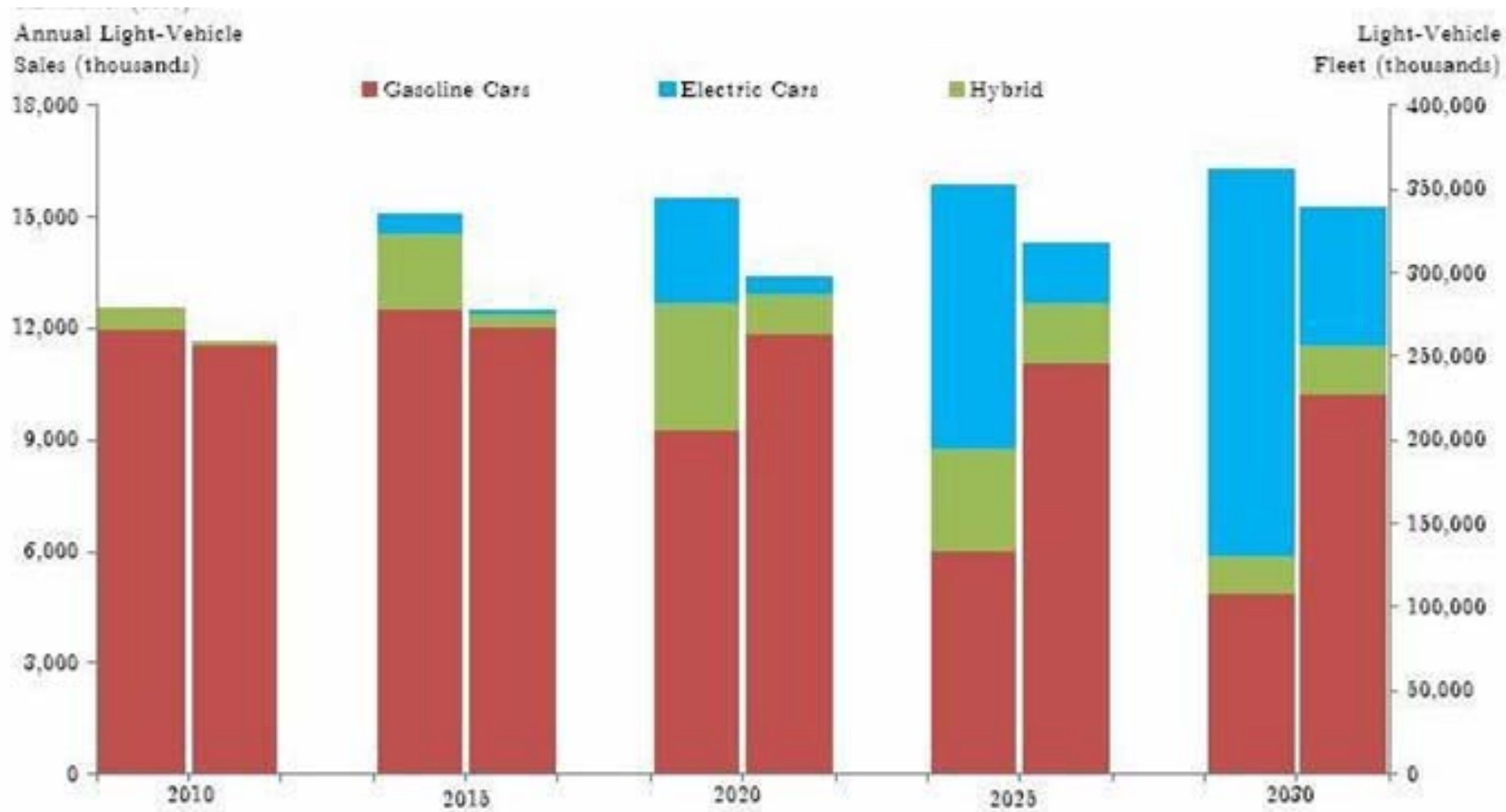


Figure 30 : Evolution des technologies alternatives dans les ventes et dans le parc roulant américain.

Remarques : A la vue de ces trois études, on voit clairement que les prospections sont très différentes les unes des autres. La prise en compte des différents paramètres de manières plus ou moins significative amène à des différences de résultats. De plus, l'étude précédente montre que les changements peuvent aussi venir de la différence de pays que l'on considère. Le parc des USA est totalement différent de celui français, de même que les comportements.

Il est donc nécessaire, en se basant sur les prospectives réalisées, de bien différencier les multiples paramètres qui entrent en jeu dans l'établissement des courbes de pénétration, afin de pouvoir créer une modélisation qui soit valable et réaliste. Cela permettra aussi de réaliser différents scénarios de tendances. Ainsi, grâce à la connaissance des paramètres utiles, on distinguera ceux entrant en jeu de manière endogènes dans les LUTI et ceux qui devront être des données d'entrée. Les paramètres endogènes seront responsables du rebouclage avec les autres modules du modèle, et les paramètres exogènes devront être renseignés de manière statique dans le modèle.

V. Conclusion

Le développement des VE est en phase d'amener des changements aussi bien dans les comportements de mobilité que dans la morphologie des villes. La part des VE dans le parc roulant sera toujours minoritaire en 2030 mais les quelques pourcents (environ 5% selon la plupart des études prospectives) auront des conséquences non négligeables. De plus, le VE aura d'autant plus d'influence que les bénéfices environnementaux sont significatifs, au regard de la différence d'émissions entre véhicule thermique et véhicule électrique. De plus, l'utilisation de l'électricité comme source d'énergie alternative aux énergies fossiles permet de ne pas subir la fluctuation du prix du pétrole. Tous ces avantages par rapport aux énergies non renouvelables sont déterminants pour l'acceptation du public, et la rapidité de développement des technologies des VE. Il paraît donc important de pouvoir les quantifier, et de connaître les paramètres influençant sur la rapidité de déploiement du VE dans le parc automobile. Les LUTI permettent d'obtenir des résultats concrets de prospectives afin d'anticiper les meilleures pratiques à suivre pour amplifier la croissance des VE.

Les logiciels MARS et SIMAURIF ont été analysés dans la première partie du rapport, afin de mieux les connaître et de pouvoir, après avoir défini les différentes interactions de la ville avec le VE, constituer les bases d'un sous modèle Mobilité Electrique, intégrable à un LUTI. Il en ressort des résultats concrets sur les différentes possibilités de courbes de pénétration du VE, et la localisation des bornes de rechargement.

L'analyse des LUTI fait ressortir deux aspects principaux : premièrement, les interactions entre transport et urbanisation ne doivent pas être ignorées, et il est utile de pouvoir les quantifier afin de prévoir les politiques de villes engendrant les résultats voulus dans ces deux domaines. Deuxièmement, ces interactions sont très complexes, et dépendent de nombreux paramètres. Il faut

donc savoir trouver les critères importants à prendre en compte, sans s'étaler dans une précision inutile. Pour autant, les LUTI présentent encore des lacunes, et certains paramètres (de l'environnement par exemple) ne sont pas pris en compte malgré les relations de cause à effet existant avec l'urbanisation ou le transport. Les LUTI sont donc améliorables, et de nouvelles problématiques peuvent leur être intégrés, afin d'enrichir les modèles. C'est le cas de l'arrivée du VE en milieu urbain. De nombreuses interactions avec les thèmes des LUTI sont identifiées, et il est donc intéressant de les modéliser. Les deux principales sont issues de la localisation des bornes et de la pénétration des VE. Elles ont été décrites dans ce rapport, dans le but de pouvoir les quantifier de manière précise. Les bases sont posées et la phase de création du sous modèle, et son intégration à un LUTI (MARS ou SIMAURIF) sont les prochaines étapes de la prospective sur l'arrivée du VE.

VI. Bilan du stage

Mon stage s'est déroulé dans un cadre de travail agréable, multiculturel et dynamique. Les interactions avec l'équipe d'EIFER m'ont permis de faire avancer mon projet de manière fructueuse et d'enrichir ma connaissance dans des domaines variés, recoupant ma formation ou totalement nouveau. Les rencontres avec les développeurs et les acteurs de la ville de Mulhouse ont été pour moi un grand apport, car mon projet faisait le pont entre des études théoriques et les problématiques concrètes des services urbains. Cela rentrait exactement dans le cadre de l'option Villes et Services Durables. De plus, le mode de travail à EIFER, influencé par la culture allemande, convient parfaitement à ce genre de projet. J'ai aussi appris à connaître le monde de la recherche, assez atypique, et cela a renforcé ma capacité de travail en équipe. Il est indispensable de savoir s'organiser et de pouvoir planifier son travail de manière autonome, tout en restant en relation avec l'équipe avec laquelle le travail est mené.

Les nombreux thèmes que regroupent les problématiques du transport et de l'urbanisation m'ont apporté de nouvelles connaissances sur la gestion urbaine. Cela va de la gestion des réseaux de transport en commun, au développement de la mixité urbaine, en passant par les comportements des usagers. Les domaines sont multiples, et cela permet d'interagir avec des spécialistes de différents domaines très variés : architecte, urbaniste, sociologues, planificateurs, etc. Il faut de plus, à chaque échelle de ces différents domaines, savoir prendre en compte les problèmes environnement.

VII. Bibliographie

- ARUM, (2009) *Tableau de bord de la région mulhousienne*
- ATN, (2005) *Plateforme de simulation pour l'étude prospective de la mobilité urbaine des agglomérations françaises et européennes Mobisim SMA structure et algorithmes du modèle*
- ATN S.A. (décembre 2002). *Simulation de scénarios d'évolution prospective de la mobilité urbaine à 20 ans application à l'aire urbaine de Lyon du modèle Mobisim 1 rapport de résultats. Paris*
- Becker (2009) *Electric cars in the United States: a new model with forecasts to 2030 - University of California Berkeley*
- Boulter, McCrae, (2007) *Assessment and reliability of transport emission models and inventory systems (Artemis), Final report*
- Caratti, Pinelli, Tarzia, (2002) *-SUTRA – d11: scenarios of sustainable urban transportation, Fondazione Eni Enrico Mattei*
- Croissant (2005) *Les modèles multinomiaux*
- Delons, Coulombel, Leurent (2008) *Pirandello an integrated transport and land-use model for the Paris area, 88th trb meeting*
- De palma, Nguyen-Luong et al. (2008) *Simaurif : modèle dynamique de simulation de l'interaction urbanisation-transports en région Île-de-France application à la tangentielle nord perfectionnement et valorisation, IAURIF, THEMA*
- De Palma, Nguyen-Luong et al. (2007) *Simaurif : modèle dynamique de simulation de l'interaction urbanisation-transports en région Île-de-France application à la tangentielle nord rapport final de la 2ème phase, IAURIF, THEMA*
- De Palma, Nguyen-Luong et al. (2005) *Simaurif : modèle dynamique de simulation de l'interaction urbanisation-transports en région Île-de-France application à la tangentielle nord rapport intermédiaire de la 2ème phase, IAURIF, THEMA*
- De Palma et al. (2005) *Congestion pricing on a road network: a study using the dynamic equilibrium simulator Metropolis*
- De Palma, Nguyen-Luong et al. (2004) *Simaurif : modèle dynamique de simulation de l'interaction urbanisation-transports en région Ile-de-France application à la tangentielle nord rapport final de la 1ère année, IAURIF, THEMA*
- Deymier, Nicolas (2005) *Rapport intermédiaire n°1 du projet Simbad, simuler les mobilités pour une agglomération durable*

- Emberger, g. And I. Riedl (2007). „MARS meets Animap“ die koppelung der modelsuite mars mit dynamischer internet-kartographie
- Emberger et al. (2007) National scale land-use and transport modelling: the MARS Austria model, Institute for transport planning and traffic engineering, association for european transport and contributors
- Emberger et al. (2007) Guidance to data collection using the MARS data user interface Institute for transport planning and traffic engineering
- Emberger, g., r. Haller, et al. (2005). Mars metropolitan activity relocation simulator institute for transport planning and traffic engineering, university of technology
- Fedra, k. (2003). SUTRA sustainable urban transportation, project deliverable: d15.3: final report. Brussels
- Fenwick et Dowell, (1998) Electrical substation service-area estimation using cellular automata: an initial report
- Ferrière (2009) Exploitation de l'enquête nationale des transports et des déplacements 2008 - EDF
- Fulda (2008) Etat de l'art des logiciels de simulation de la mobilité urbaine, Eifer institut
- Gallez (2003) Définition et implications du concept de voiture propre – Rapport d'office parlementaire
- Gravel (1999) La méthode hédonique d'évaluation des biens immobiliers : intérêts et limites pour les parcs HLM – Théma unité mixte de recherche du CNRS n° 7536
- Homocianu, (2009) Modélisation de l'interaction transport – urbanisme – choix résidentiels des ménages dans l'aire urbaine de Lyon – Thèse pour le doctorat en sciences économiques mention économie des transports
- Insee (2002) Les découpages infra-communaux - Les notes méthodologiques du programme ACTEUR
- Knoflachner (2001) Logistics for city planning, Institute for transport planning and traffic engineering
- Kouwenhoven (2008) Incidence de l'accessibilité sur le choix des aéroports – Centre conjoint de recherche sur les transports
- Mathis (2005) Cohérence entre politique des transports et politique d'aménagement – Le cas de Mulhouse par modélisation prospective – Rapport final tome 2 et Rapport final provisoire
- McFadden (2009) Massachusetts institute of technology, econometric models for probabilistic choice among products*
- Meier-Eisenmann et al. (2001) Batteries des VEL: expériences des propriétaires, Mendrisio
- Meier-Eisenmann et al. (2001) Influence sur le comportement en matière de mobilité (déplacements), Mendrisio

Meier-Eisenmann et al. (2001) Utilisation des bornes de recharge et des places de stationnement réservées

Modelistica (2007) Tranus: integrated land use and transport modeling system

Nogues, p. (2007). Modèle transports. Edf R&D, p. Nogues

Ntziachristos, I. (2007). Emep/ corinair emission inventory guidebook - 2007 group 07 road transport. Brussels, EEA (European environment agency)

Ntziachristos, I. And z. Samaras (2000). COPERT III computer programme to calculate emissions from road transport, methodology and emission factors (version 2.1), European environment agency

Penth (2007) Elektromobilität und erneuerbare energien – IFEU

Pfaffenbichler, Shepherd (2006) Sustainable transport policies under scarcity of oil supply, Engineering sustainability 159 issue es2

Pfaffenbichler, p. (2003). The strategic, dynamic and integrated urban land use and transport model MARS (metropolitan activity relocation simulator). Technische universität Wien, Institut für verkehrsplanung und verkehrstechnik

Pfaffenbichler, Emberger (2002) Die bewertung der nachhaltigkeit innovativer städtebaulicher maßnahmen mit dem simulationsmodell MARS

Pierre (2009) Les bornes de recharge dans les espaces publiques: quels usages pour les conducteurs de véhicules électriques? Quels enjeux pour la filière?

Pierre, (2007) Quel public et quels usages pour la voiture électrique ? Enseignements issus des retours d'expérience conduits à EDF R&D.

Predit (2005). Mobilité, territoires et développement durable Simaurif : modèle dynamique de simulation de l'interaction urbanisation-transport en région Ile-de-France application à la tangentielle nord

Schock (2000) Projecting land-use change: a summary of models for assessing the effects of community growth and change on land-use patterns - Science applications international corporation – EPA –

ThéMA, (2008) lettre d'information relative au développement du projet de modélisation Mobisim

Verband region Stuttgart, (2006) regional monitor region Stuttgart, strukturen und entwicklungen in der region Stuttgart

Waddell et al. (2009) Users guide and reference manual communities University of Washington

Waddell et al. (2008) Urbansim: an evolving planning support system for evolving communities University of Washington

Waddell et al. (2008) Opus: an open platform for urban simulation communities University of Washington

- Wegener, (2008) Overview of land-use transport models Spiekermann & Wegener urban regional research*
- Wegener, Spiekermann (2008) Environmental feedback in urban models Spiekermann & Wegener Urban and Regional Research (s&w)- International journal of sustainable transportation, 2:41–57,*
- Wegener et al. (2004) Propolis planning and research of policies for land use and transport for increasing urban sustainability final report second edition*
- Wegener, (2000) A new ISGLUTI: the Spartacus and Propolis projects, Institute of spatial planning university of Dortmund/ Second Oregon symposium on integrated land use and transport models*
- Wegener, m. And f. Fürst (1999). Land-use transport interaction: state of the art deliverable 2a of the project Transland*
- Wegener, m. (1998). Applied models of urban land use, transport and environment: state-of-the-art and future developments*
- Wegener, m. (1998). The IRPUD model: overview. . Institut der raumplanung der université Dortmund*
- Wegmann, Schwegler, (2001) Rapport de synthèse du projet Mendrisio*
- Wilson, (1997) Land-use/transport interaction models past and future, Journal of transport economics and policy*
- Young, Taylor (1991) A parking model hierarchy, department of civil engineering, Monash university, Melbourne, Australia*

VIII. ANNEXES (Principes théoriques)

1.Causal Loop Diagrams (CLD)

Les Causal Loop Diagrams (CLD) sont utilisés dans MARS. Les CLD sont des descriptions qualitatives des relations entre des entités. Les entités sont des éléments qui en affectent d'autres et qui sont elles même affectées. Elles sont reliées les unes des autres par des relations représentées par des flèches. Les flèches portent l'indication same : (s) ou opposite : (o) qui caractérise la relation entre les deux entités. Une flèche marquée (s) signifie que l'entité en amont de la flèche va accentuer l'entité

en aval. Pour une flèche (o), c'est l'inverse, c'est-à-dire qu'une accentuation de l'entité d'amont va faire régresser l'entité en aval. Lorsque dans une boucle (relation fermée entre plusieurs entités), toutes les flèches sont (s), on peut la qualifier de (R) ie Renforcing. Dans le cas d'un équilibre (s)/ (o), la boucle est qualifiée de (B) ie Balancing. Ce type de loop est divergente et s'éloignera toujours d'un point d'équilibre. Au contraire, s'il existe des flèches de différents types (s) et (o), alors la loop est soit convergente vers un point d'équilibre, soit fluctuante.




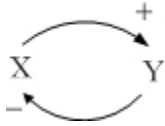
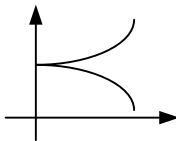
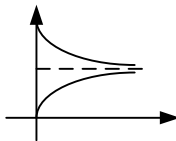
<p>D'une augmentation de X, résulte une augmentation de Y</p> 	<p>D'une augmentation de X, résulte une diminution de Y</p> 
<p>Une boucle constituée uniquement de relations de la même polarité est une boucle se renforçant (R)</p> 	<p>Une boucle constituée de relations de polarités différentes est une boucle s'équilibrant (B)</p> 
<p>Croissance entretenue (croissance ou décroissance exponentielle)</p> 	<p>Comportement convergent (Croissance limitée ou diminution exponentielle)</p> 

Figure 31 : The four rules of Causal Loop Diagram (CLD) and the two main behaviours, K.Vogstad 2004

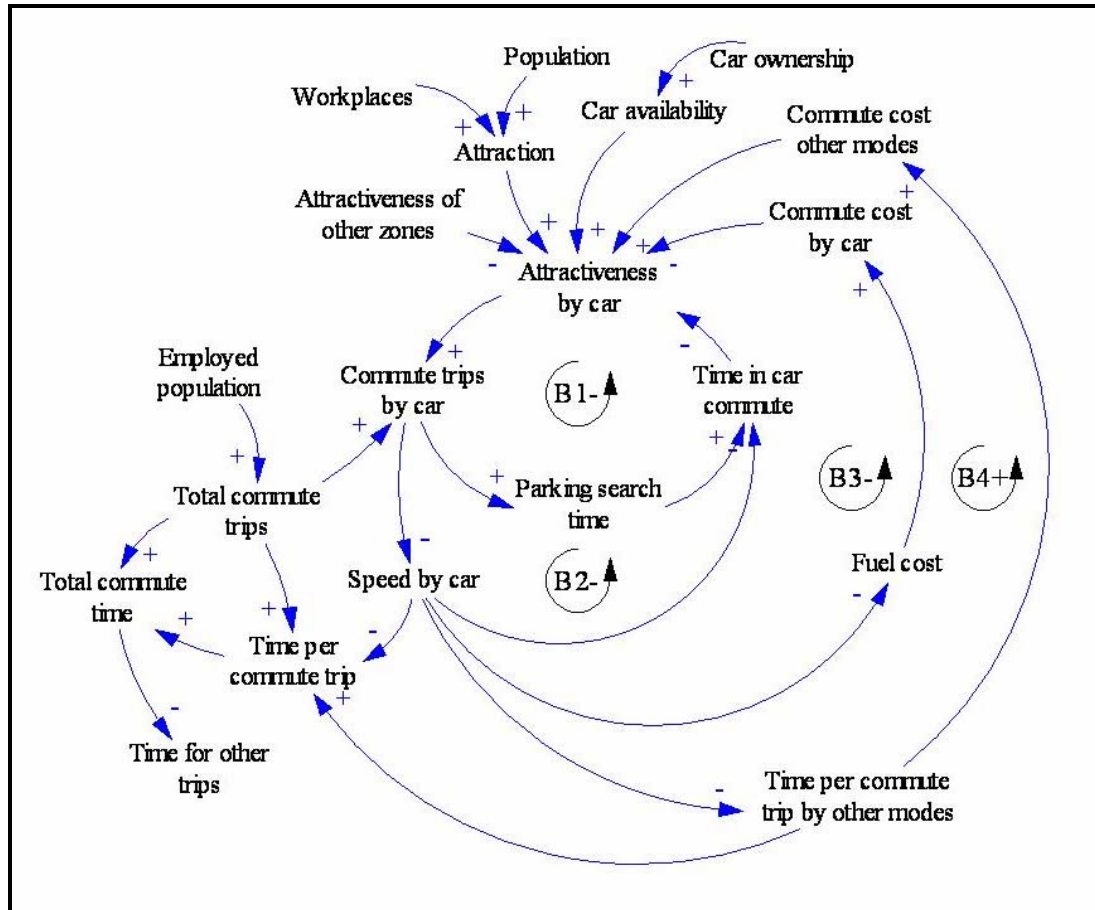


Figure 32 : Exemple de CLD : génération des trajets professionnels en voiture (Emberger)

2. Théorie du temps de trajet constant

Dans MARS, les trajets sont ramenés à des temps de parcours. On considère que le prix d'un trajet peut être ramené à un temps. Ainsi, tous les paramètres du trajet, autres que des temps, sont évalués en temps grâce à des transpositions prédéfinies. Cela se base sur le fait que les usagers des transports réalisent en générale toujours le même temps de trajet. Ce sont des théories établies dans le domaine du transport entre autre par Szalai et al. (1972), Zahavi (1979). On constate en effet que les distances parcourues sont de plus en plus importantes, mais il est aussi avéré que les transports sont plus rapides, ce qui donne au final un temps de trajet constant. Les usagers ne souhaitent pas passer plus de temps dans les transports, mais la rapidité de ceux-ci leur permet de pouvoir vivre plus loin en banlieue par exemple, tout en mettant toujours autant de temps pour venir travailler dans le centre ville. Cela coïncide aussi avec le fait que l'étalement urbain est de plus en plus important, car la performance des transports permet de s'éloigner des villes pour améliorer son cadre de vie. Ainsi, MARS se base sur cette théorie, et alloue à chaque usager un temps de trajet constant par jour. Chaque usager a un budget de temps de transport donné, et réalise ses voyages en fonction de cela. Les déplacements vers le travail sont prioritaires, donc si ceux-ci sont trop importants, les trajets autres (loisir, achats...) ne pourront être réalisés. Le budget de temps de

chacun est calculé en fonction des caractéristiques du ménage, de la localisation de celui-ci, de l'emploi occupé et des choix modaux possibles pour chacune des personnes se déplaçant.

3. Coefficients de frottements

La perception du temps de trajet est basée sur le besoin d'énergie physiologique pendant le trajet. Il a été démontré que le temps de trajet et encore mieux la perception du temps de trajet étaient des paramètres beaucoup plus représentatifs que la longueur de celui-ci. C'est la théorie de Knoflach, et ses études sur les embouteillages qui montrent qu'ils sont une bonne chose parce qu'ils augmentent le temps de trajet et encore plus la perception du temps passé dans les transports, et ainsi pousse les automobilistes soit à prendre un autre trajet, soit à prendre les transports en communs.

Le coefficient de frottement pour les transports est un coefficient qui traduit le désagrément causé par tel ou tel trajet. Si un trajet est très désagréable selon l'usager, sa résistance va être très forte. Chaque type de trajet avec chaque mode possède un coefficient de frottement propre. Ce coefficient est multiplié au temps de parcours et est calculé à partir d'expériences. Il est ensuite validé par un certain nombre de comparaison avec la réalité.

Les paramètres suivants sont pris en compte dans le calcul des coefficients de frottements :

Véhicule individuel motorisé

- Distance à pied de la maison à la voiture
- Vitesse du véhicule lors du trajet
- Temps de recherche d'une place de parking
- Distance à pied de la voiture à la destination
- Consommation en fonction de la vitesse
- Prix du carburant
- Coût d'utilisation de la voiture (excluant les prix des taxes et des assurances)
- Occupation de la voiture

Transports en commun

- Mode de transport (bus/tram, RER/métro, TER)
- Distance marchée
- Fréquence du service
- Vitesse pendant le trajet en véhicule
- Nombre de changement/ temps de changements
- Type de ticket saisonnier (transférable ou non)
- Prix du ticket

Trafic cyclo et piétons

- Fonction de résistance correspondant à la zone

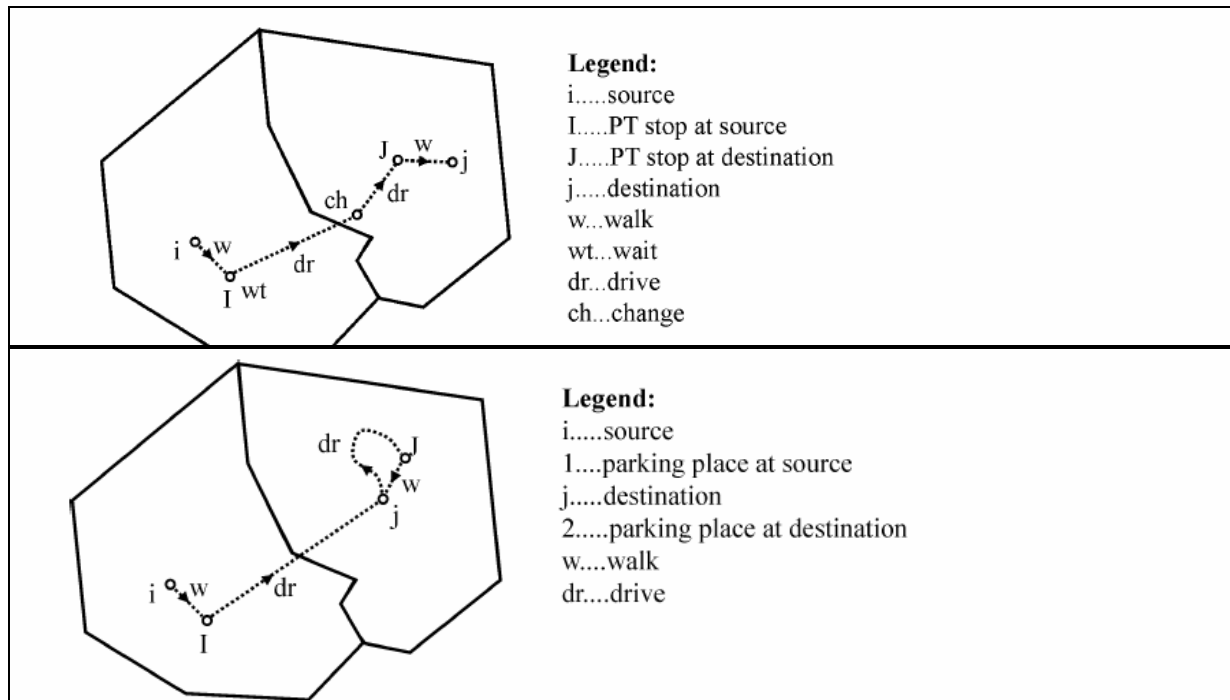


Figure 33 : Composantes d'un trajet en TC (haut) et d'un trajet en véhicule privé (bas). Chaque partie, ainsi que chaque point d'attente va comporter un coefficient de frottement caractérisant le décalage entre le temps réellement nécessité, et le temps perçu.

4. Structure d'optimisation

Elle est basée sur la théorie des Simplexes. En géométrie, un simplexe ou n simplexe est l'analogie à n dimensions du triangle. Un simplexe tire son nom du fait qu'il soit l'objet géométrique clos le plus "simple" qui a n dimensions, par exemple sur une droite (1dimension) l'objet le plus simple à 1 dimension est le segment, alors que dans le plan (2 dimensions) l'objet le plus simple à 2 dimensions est le triangle, et dans l'espace (3 dimensions) l'objet le plus simple à 3 dimensions est le tétraèdre (pyramide à base triangulaire).

L'algorithme du simplexe de George Dantzig est une technique à la fois fondamentale et très populaire pour les problèmes de programmation linéaire. Ainsi, étant donné un ensemble d'inégalités linéaires sur n variables réelles, l'algorithme permet de trouver la solution optimale pour une fonction objectif, qui est elle aussi linéaire (l'algorithme fonctionne encore quand la fonction est croissante en chacune de n variables).

En termes géométriques, l'ensemble des inégalités linéaires définit un polytope dans l'espace à n dimensions (polygone en 2 dimensions et polyèdre en 3 dimensions) et il s'agit de trouver le sommet optimal pour la fonction de coût donnée. L'idée de l'algorithme consiste à partir d'un sommet quelconque du polytope et, à chaque itération, d'aller à un sommet adjacent s'il est possible d'en trouver un meilleur pour la fonction objectif. S'il n'y en a pas, l'algorithme s'arrête en concluant que

le sommet courant est optimal. En général, il y a plusieurs sommets adjacents au sommet courant qui sont meilleurs pour l'objectif. Il faut en sélectionner un seul, la règle de sélection est appelée règle de pivotage.

Il a été montré pour les principales règles de pivotage employées que l'algorithme du simplexe pouvait prendre un temps de calcul exponentiel. En particulier, on ne sait pas s'il existe une règle de pivotage qui assurerait que l'algorithme se termine après un nombre polynomial d'étapes.

On peut montrer que le nombre d'itérations de l'algorithme est majoré par : $\frac{N-2}{\nu-1}$ où ν est le plus petit nombre d'arêtes reliées à un même sommet du polytope parcouru par le simplexe et N est le nombre de sommets. On remarquera que ν est minoré par la dimension de l'espace dans lequel vit le polytope.

Néanmoins, l'algorithme du simplexe est très efficace en pratique et il est implémenté dans tous les solveurs de programmes linéaires. Les autres algorithmes de résolution de programmes linéaires sont basés soit sur la méthode de l'ellipsoïde soit sur la méthode du point intérieur.

5. Modèle hédonique

La théorie hédonique de calcul du prix du foncier est une méthode beaucoup utilisée aux Etats-Unis, et depuis une dizaine d'année arrivée en Europe. Cette méthode part du principe très simple qu'un logement est attractif uniquement à cause de ses particularités et du jugement que va en faire le locataire/acheteur ou le bailleur/vendeur. Un logement en soit n'existe pas, il n'est qu'un vecteur de paramètres qui le caractérise, et le prix de ce logement va donc dépendre uniquement des coordonnées de ce vecteur. Ces coordonnées sont les représentations des caractéristiques du logements : surface, nombre de pièces, parking, jardin, nombre de salles de spectacle pour mille habitants, etc. Cela peut avoir un choix de valeurs discrètes ou continues. Le nombre de caractéristiques est appelé K mais il est évident que certaines ne seront pas évaluables pour la zone considérée. C'est pourquoi on réduit le nombre de caractéristiques à un nombre $C \leq K$, qui correspond au nombre réel de caractéristiques prises en compte. Ainsi pour chaque logement j , on le représente de la façon suivante : (x_1^j, \dots, x_K^j) en prenant en compte les K paramètres. Ensuite, on peut décomposer temporellement chaque paramètre. En effet chaque paramètre évolue sur un nombre d'années donné T , ainsi soit G le nombre de paramètres différents, on a $G \times T = K$. A partir de ces vecteurs, on calcule le prix du logement qui est une fonction de ce vecteur, pour chaque logement j .

$$p_j = h(x_{11}^j, \dots, x_{1G}^j, x_{21}^j, \dots, x_{2G}^j, \dots, x_{T1}^j, \dots, x_{TG}^j)$$

La fonction h peut prendre plusieurs formes :

$$\hat{h}(x_1^j, \dots, x_C^j, \varepsilon_j) = (\lambda(\beta_0 + \sum_{i=1}^C \beta_i x_i^j + \varepsilon_j) + 1)^{\frac{1}{\lambda}} \quad \text{si } \lambda \neq 0$$

$$\hat{h}(x_1^j, \dots, x_C^j, \varepsilon_j) = e^{\beta_0 + \sum_{i=1}^C \beta_i x_i^j + \varepsilon_j}$$

Sinon.

Les différents paramètres utilisés dans cette fonction sont calculés en fonction des données récoltées dans la zone étudiée.

Cette méthode permet de connaître l'évolution des prix du foncier au cours des années à venir. Un des gros problèmes de la théorie hédonique est qu'elle ne prend pas en compte l'offre et la demande, qui font tout de même évoluer le prix du marché.

6. ACCESSIBILITÉ: Théorie des Logsum

La notion d'accessibilité se définit souvent de façon intuitive, mais il n'est pourtant pas inapte de quantifier cette variable. Les définitions sont nombreuses, dont certaines sont simples et d'autres plus complexes. Elles peuvent se ranger en trois catégories :

1. Les définitions qui ne tiennent compte que de la seule durée des déplacements.

Telles sont celles qui :

- mesurent le temps qu'il faut pour rejoindre un lieu ; ou
- tracent les contours de la zone qui englobe tous les lieux d'où il est possible de rejoindre le lieu de destination en un laps de temps donné. Ces définitions simples ne rendent toutefois compte que d'une des dimensions de l'accessibilité.

2. Les définitions qui tiennent compte d'autres paramètres tels que le coût des déplacements, le coût du stationnement, la fiabilité des temps de déplacements et le niveau de service. La plupart de ces définitions monétisent la valeur du temps de déplacement, de la fiabilité, du niveau de services et d'autres paramètres. Cette monétisation permet de faire la somme de tous les paramètres pris en compte.

Cette somme est appelée « coût généralisé de déplacement ».

3. Les définitions qui font entrer plusieurs modes en ligne de compte. Les définitions précédentes ne prennent qu'un seul mode, qui est généralement la voiture, en considération. Celles qui font entrer plusieurs modes (voiture, train, bus, etc.) en ligne de compte doivent pondérer l'accessibilité de chacun d'eux, ce qui peut se faire en utilisant la somme logarithmique comme mesure de l'accessibilité (voir par exemple Ben-Akiva et Lerman, 1985) :

$$\text{LogSum} = \log \left(\sum_{i=\text{mode}} e^{-\beta \cdot \text{GenCost}(i) + X} \right)$$

La somme est calculée sur l'ensemble des modes disponibles et X désigne tous les autres facteurs inclus dans la fonction d'utilité.

Cette somme logarithmique est une espèce d'impédance inverse du déplacement : sa valeur est d'autant plus élevée (et l'accessibilité d'autant meilleure) qu'il y a de modes possibles de déplacement. Les modes rapides et bon marché apportent davantage que les modes lents et chers. Cette somme logarithmique a l'avantage de faciliter considérablement les comparaisons relatives (c'est-à-dire la comparaison de l'accessibilité de plusieurs lieux différents) et de permettre de calculer la modification de la rente du consommateur pour les besoins des analyses coûts-avantages des projets de transport (de Jong et al., 2007).