

Etat de l'art des modèles de stationnement

4.1 Introduction

Ce chapitre propose une analyse bibliographique des modèles de stationnement, de façon générale tout d'abord puis focalisée sur la caractérisation de l'offre, de la demande et de leur interaction. Au vue du large spectre de modèles que recouvre le sujet abordé et des objectifs de notre thèse, notre revue de littérature sera axée essentiellement sur des modèles spatialisés de stationnement. Nous nous intéressons en particulier aux modèles qui traitent explicitement les choix de stationnement et l'équilibre Offre-demande.

L'objectif de ce chapitre est de décrire les représentations de l'offre, de la demande et de leurs interactions, dans le temps et dans l'espace dans les modèles recensés dans la littérature. Plus spécifiquement, ceci revient à établir :

- une caractérisation de l'offre par type, par localisation, par échelle spatiale, par tarification, par régulation, par interaction avec d'autres composantes du système de transport ;
- une caractérisation de la demande *via* la représentation de ses principales caractéristiques, des processus comportementaux et du couplage des choix de stationnement avec d'autres choix de déplacement (choix de l'itinéraire, du mode, de la destination, de l'heure de départ, etc.) ;

- une caractérisation de la relation et de l'interaction entre l'offre et la demande : essentiellement les types de modèle d'équilibre existants et les réponses comportementales de la demande à un changement des caractéristiques de l'offre.

Nous analyserons les fondements théoriques et méthodologiques des modèles, les hypothèses adoptées et enfin les résultats obtenus. Nous identifierons quelques pistes de recherche future.

Notre analyse s'appuie sur un large corpus de connaissances composé d'articles scientifiques couvrant différentes disciplines dont, principalement, l'ingénierie du trafic et des réseaux, l'économie des transports et les mathématiques appliquées¹¹⁹. Plus précisément, les articles analysés sont issus majoritairement d'ouvrages de référence et de revues académiques¹²⁰.

Ce chapitre est structuré en trois parties. La section 4.2 proposera une vision globale des questions afférentes à la modélisation du stationnement. Elle traitera l'évolution des problématiques dans le temps, les enjeux de la modélisation du stationnement et les portées spatiales des modèles. Nous nous intéresserons dans la section 4.3 à la représentation de l'offre et de la demande en mettant l'accent sur les aspects spatiotemporels du stationnement. La troisième section sera consacrée à l'analyse des modèles d'interaction entre l'offre et la demande, et à l'étude de l'équilibre du système.

4.2 Généralités sur la modélisation du stationnement de l'offre

4.2.1 Intérêt de la modélisation du stationnement

Le stationnement est intimement lié à l'usage de l'automobile. Il influence ainsi la performance du système de transport (Polak et Axhausen, 1990), la qualité de l'environnement (Feeney, 1989) et plus généralement le fonctionnement et le cadre de vie, particulièrement en zones denses. Toutefois, sa prise en compte dans les modèles de trafic est souvent partielle, notamment en raison de sa complexité.

Planification des transports et politiques de stationnement

Il est largement reconnu que le stationnement est une question d'importance capitale dans la planification stratégique des transports (Polak et Axhausen, 1990 ; Young et *al.*, 1991 ; Lam et *al.*, 1998 ; Wong et *al.*, 2000 ; Tong et *al.*, 2004 ; Lam et *al.*, 2006).

¹¹⁹ La recherche électronique a été basée sur une combinaison de mots-clés (stationnement, offre, demande, équilibre, modèle, modélisation...), les documents consultés incluent ceux issus de sites Web – essentiellement de ScienceDirect, Springer Link et Informaworld, du moteur de recherche Google Scholar –, ainsi que ceux en libre accès sur Internet.

¹²⁰ Par exemple : Transportation ; Transportation Policy ; Transportation planning and Technology ; Traffic Engineering and Control ; Transportation research, "Part A et B" ; Transportation Research Record ; Journal of Mathematical Modelling and Algorithms in Operations Research ; etc.

Concrètement, le stationnement se traduit par des politiques qui régissent la provision de places, leurs modalités d'usage et la relation entre l'offre et la demande. Les changements de structures tarifaires, de capacité ou de mesures d'exécution peuvent avoir des effets significatifs directs et indirects sur la demande de déplacement. L'action sur le stationnement influence donc directement sur les possibilités et la commodité d'usage de la voiture particulière, et même sur l'usage des autres modes de transport. De nombreuses études ont montré l'importance du stationnement comme dimension spécifique des comportements de mobilité. En effet, les choix de stationnement sont fortement liés à d'autres décisions de la chaîne de déplacement (tels que le choix de la destination, le choix de l'heure de départ, le choix de l'itinéraire et le choix du mode de transport). En conséquence, la compréhension et la prévision des comportements de stationnement en réaction à diverses mesures de politiques de mobilité d'une part, et à la dynamique de fonctionnement interne du système d'autre part, semblent être des éléments indispensables de planification des systèmes de transport. L'un des outils préconisés pour remplir cette fonction est la modélisation. Les modèles présentent un mécanisme de systématisation du processus de planification (Young et *al.*, 1991). Ils fournissent une représentation schématique, abstraite, conventionnelle et simplifiée de la réalité observée, et constituent des outils performants d'aide à la décision.

Une lecture bibliographique chronologique des modèles recensés dans la littérature nous a permis de constater que tous les modèles de stationnement partagent un même et unique objectif général : celui d'évaluer différentes politiques de stationnement et de comprendre les comportements des usagers dans différents contextes de variation des caractéristiques de l'offre et de la demande. Ces modèles servent comme support d'aide à la décision, à la conception et à l'évaluation des projets de transport (Young et *al.*, 1989).

Vision classique du stationnement dans la modélisation des transports

Le stationnement fait souvent figure de parent pauvre dans les modèles de transport. Dans la plupart des modèles traditionnels, il est soit considéré comme non significatif, soit intégré assez grossièrement. Dans les modèles de choix modal, le stationnement est souvent traité d'une façon superficielle, ou carrément négligée. La manière la plus conventionnelle consiste à le prendre en compte en incluant directement son coût dans celui du déplacement (Young et *al.*, 1991). Typiquement, cela revient à inclure le prix et, à la limite, le coût de la marche, dans la fonction du coût généralisé (Coombe, 1997). À ce propos, Feeney (1989) a effectué une revue de dix-neuf modèles de choix de mode, et a révélé que les coûts de stationnement y ont été incorporés en tant que variables distinctes seulement dans cinq modèles, tandis que treize l'ont inclus dans le coût global, et qu'il a été entièrement exclu dans un dernier modèle. Cette représentation est très limitée, surtout si on se réfère à Algiers et *al.* (1975) qui a prouvé que le coefficient du coût de stationnement est deux fois plus important que le temps du déplacement à bord du véhicule, et à Gillen (1978) qui a affirmé que les coûts de stationnement et de déplacement n'ont pas la même valeur et doivent par conséquent être séparés.

Pour ce qui est des modèles d'affectation du trafic, le stationnement reçoit très peu d'attention. La plupart de ces modèles le considèrent comme une impédance à la circulation. L'accès aux lieux de stationnement se fait à travers le réseau routier. Certains prennent en compte la capacité de l'offre mais négligent la représentation des comportements des usagers. Dans certains cas, la contrainte de stationnement est représentée par un coefficient de pénibilité. Toutefois, ces méthodes restent très empiriques et ne permettent pas de bien étudier les dimensions dynamiques du stationnement.

Ces pratiques, même si elles ont le mérite d'exister et d'améliorer la qualité de calibration des modèles, demeurent très réductrices puisqu'elles considèrent le stationnement comme un élément subsidiaire du déplacement automobile. En résumé, ces approches ont échoué à modéliser, de manière satisfaisante, la question des politiques de stationnement et de l'interaction entre la demande et l'offre dans un contexte spatial (Florian, 1980 ; Bonsall, 1991 ; Polak et *al.*, 1990, art. 36). Au cours de la dernière décennie, on a constaté une préoccupation croissante visant à intégrer l'analyse des problèmes de stationnement de façon plus approfondie et plus pragmatique dans le processus de modélisation du transport (Young et *al.*, 1990).

Le stationnement est régi par des relations dynamiques et complexes. Ce constat se justifie par la diversité des comportements de la demande et des rétroactions avec d'autres choix de déplacement, de l'inélasticité de la capacité de l'offre, de la dimension temporelle et dynamique du système, et enfin des interactions multi-échelles entre offre et demande. Cet état des lieux a poussé les chercheurs à recourir à des approches de modélisation plus appropriées. Des tentatives de développement de modèles de stationnement ont ainsi vu le jour pour apporter des éléments de compréhension du système et de ses interactions réciproques avec le système de transport¹²¹.

4.2.2 Enjeux de la modélisation du stationnement

La modélisation du stationnement se heurte au caractère particulièrement complexe de ce système (Papon, 1992 ; Bifulco, 1993). La revue de certaines recherches (Feeney, 1989 ; Young et *al.*, 1991 ; Polak et *al.*, 1990) a confirmé cette affirmation et a mis en évidence certaines considérations importantes.

La question des politiques de stationnement soulève un certain nombre d'exigences de modélisation pour l'intégration desquelles les approches classiques manquent d'aptitude (Bonsall, 1991 ; Polak, 1988). Pour Florian et Los (1980), les modèles précédents ont échoué à représenter de façon satisfaisante l'interaction entre l'offre et la demande de stationnement dans un contexte spatial. De même, Polak et *al.* (1990) ont souligné que « *A number of studies that have explored alternative ways of dealing with parking issues using a variety of conventional and/or more novel modelling approaches (Axhausen, 1990; Gur and Beimborn, 1984; May et al., 1989; Olszewski and Suchorzewski, 1987; Polak and Axhausen, 1989). However, practical experience of the model based assessment of parking*

¹²¹ Young (2000) classe les modèles de stationnement en cinq principales familles : les modèles de conception des parcs de stationnement, les modèles d'affectation du stationnement, les modèles de recherche, les modèles de choix et les modèles d'interaction.

policies is still very limited and no clear methodological guidelines have yet been established ». Les modèles existants ne sont jamais complètement satisfaisants car ils sacrifient délibérément certains aspects du problème. Ils se focalisent sur une seule facette du sujet et ne couvrent qu'une échelle spatiale et un horizon temporel déterminés. Les enjeux de la modélisation du stationnement limitent les champs d'étude d'un modèle et sont typiquement rattachés aussi bien à l'offre et à la demande qu'à leur interaction.

Du côté de la demande, certaines caractéristiques et contraintes sont à mettre en avant. La demande de stationnement est une demande dérivée de l'accomplissement d'une activité, elle est donc assez hétérogène et variable dans le temps et dans l'espace. Le modélisateur ne doit pas perdre de vue que les flux des véhicules sont loin d'être constants et uniformes durant la période de l'analyse, et qu'il est nécessaire d'analyser la demande sur des intervalles de temps séparés de courte durée, de la segmenter en classes d'usagers, et de la traiter de façon désagrégée et stochastique. Les choix de cette demande dépendent fortement du motif de déplacement, de la disponibilité de place (réservée ou non), de l'heure d'arrivée, de la durée de stationnement prévue, du type de tarif, des caractéristiques de l'individu et d'autres critères, tant objectifs que subjectifs, de choix. L'automobiliste ne dispose que d'une information partielle sur les conditions de circulation et sur l'état de l'offre sur les lieux de destination. Il peut être confronté à une recherche de place généralement de durée inconnue, et ne peut agir de manière tout à fait rationnelle.

Par ailleurs, les effets des politiques de stationnement varient dans le temps. Un modèle qui porte sur le court terme est en mesure d'évaluer les effets significatifs d'une politique de stationnement sur le système, par exemple sur les comportements de choix du type et de la localisation du stationnement, mais d'autres réactions comportementales à plus long terme, telles que les changements du mode ou de la destination du déplacement, ne pourront y être étudiées conjointement.

Du côté de l'offre, d'autres aspects rendent plus difficile la modélisation. La coexistence de différents types d'offre avec des structures tarifaires (payant, gratuit, etc.) et des statuts réglementaires variés représente une source de complexité. Le stock de places distribuées dans l'espace de façon discontinue dans des intervalles discrets (Gillen, 1978) est inélastique, et impose une contrainte de capacité. La disponibilité de l'offre est variable dans le temps, elle dépend du volume de la demande pendant une période donnée et de l'occupation des places dans le temps. Modéliser les choix de la demande selon une situation fixe d'offre revient à ignorer cette importante caractéristique.

Du côté de l'interaction offre-demande, d'autres complications s'ajoutent, en raison de la nature dynamique du système. Une dépendance structurelle marque cette relation entre les temps et les zones de stationnement. Les choix de la demande pendant une période donnée influencent la performance de l'offre pour les périodes suivantes (Bifulco, 1996). À ce niveau, le problème majeur est l'interdépendance entre les différentes périodes d'analyse. À la différence des flux de trafic qui sont instantanés et transitoires, les flux de stationnement persistent sur les lieux de stationnement pendant des durées variables et imprévisibles. La distribution spatiotemporelle de l'occupation

dépend à la fois des arrivées et des départs en cours de période, et des arrivées accumulées durant les périodes antérieures.

Le déséquilibre du système est à l'origine de la congestion de l'offre, il a pour conséquence directe d'allonger les durées de recherche de place. Par ailleurs, ces véhicules sont en circulation sur le réseau mais ne forment pas une file d'attente visible. Les effets de congestion induits par le stationnement sont donc difficilement quantifiables et exigent le traitement d'autres choix de la demande tels que le choix d'itinéraire, le choix du mode, ou encore le choix de destination. La caractérisation de la relation de cause à effet entre l'offre et la demande dans une perspective d'équilibre de stationnement concerne l'usage et les réactions comportementales selon certains scénarios.

On peut, d'ores et déjà, noter que ces considérations laissent entrevoir une des conclusions de ce chapitre : il n'existe pas de modèle « universel » capable d'étudier parfaitement le système de stationnement dans son ensemble. À ce titre, sur la base des recherches antérieures (Bonsall, 1991 ; Van der Goot, 1982 ; Polak et *al.*, 1990 ; Bifulco, 1993), un accord général sur les caractéristiques d'un modèle idéal d'évaluation des politiques de stationnement s'est établi. Un tel modèle considère explicitement la capacité et la localisation, la structure tarifaire et les restrictions d'usage de l'offre, ainsi que la perception du risque du stationnement illégal. Il répond aux exigences suivantes :

- capacité à reproduire de près la configuration de référence ;
- demande explicite/modélisation de l'interaction avec l'offre ;
- considération explicite de l'approche temporelle ;
- mise en œuvre d'une demande multiclasse ;
- approche de modélisation multimodale ;
- modélisation explicite de l'élasticité de la demande ;
- utilisation de données facilement disponibles ;
- cohérence mathématique.

Il est clair que la nécessité d'affronter l'ensemble de ces questions dans le développement d'un modèle soulève un certain nombre de difficultés. Néanmoins, l'approche de modélisation et les hypothèses de représentation du système déterminent le niveau de complexité et guident en partie les choix techniques des modélisateurs. Enfin, les considérations qui précèdent soulignent la nécessité d'une représentation explicite du stationnement comme élément de la chaîne de déplacement.

4.2.3 Contextes et évolution des modèles de stationnement

Bien que l'intérêt de l'intégration de la problématique de stationnement (et de ses aspects comportementaux, économiques, sociaux et environnementaux) dans les modèles de transport soit déjà démontré, le développement des modèles de stationnement se caractérise par une certaine intermittence. L'histoire de ces modèles

est marquée par un changement de paradigme des politiques publiques. Ces modèles sont très disparates et forment un corpus éclaté, avec diverses origines disciplinaires et divers champs et échelles d'application. Les fondements théoriques sur lesquels ils s'appuient et les techniques de modélisation utilisées sont semblables à ceux du modèle de transport à quatre étapes. Dans ce qui suit, nous retracerons, de manière chronologique, quelques tendances communes pour l'ensemble des travaux proposés

4.2.3.1 Changement de paradigme et des objectifs des modèles

Le contexte de modélisation du stationnement, corollaire de celui de la planification des déplacements urbains¹²², a subi un changement de paradigme concernant la façon dont les problèmes sont perçus et les solutions éditées. Les objectifs des modèles ont subi à leur tour un renversement de tendance pour répondre aux besoins des planificateurs.

L'ancien paradigme était centré sur la demande. Les premiers modèles avaient pour vocation d'assurer un rôle traditionnel de prévision de trafic, d'évaluation des nouvelles infrastructures et d'étude des comportements de choix. Il y eut ainsi un développement des modèles de génération, d'estimation d'usage des parcs, de conception et d'évaluation des capacités et surtout des choix de stationnement par rapport à une situation donnée de l'offre.

Au début des années 1980, avec la croissance des nuisances liées à l'automobile dans les centres urbains, les interrogations sur le stationnement ont changé de nature. L'orientation fut plutôt de dissuader la demande et d'optimiser l'offre. Des modèles de choix conjoint du mode et du stationnement, ainsi que des modèles portant sur les parcs relais, ont été fournis en réaction à la montée en puissance de l'intérêt pour le report modal de l'automobile vers les transports en commun.

Plus récemment, les modèles d'offre et d'interaction offre-demande ont attiré bon nombre de chercheurs. L'offre a, petit à petit, regagné sa place *via* la modélisation des types de stationnement, l'optimisation de la capacité des parcs, et l'analyse des effets de restriction de l'offre sur la demande. Par ailleurs, une représentation plus détaillée du système est de plus en plus souvent intégrée dans certains modèles qui essaient de tenir compte des contraintes de l'offre et de modéliser l'équilibre du système. Ces dernières années, on assiste à de timides tentatives de développement d'outils de simulation prenant en considération l'offre de stationnement (Boussier, 2007).

4.2.3.2 Évolution des problématiques étudiées

Les prémices de la modélisation du stationnement proprement dite remontent aux modèles proposés par Lambe (1969) concernant le choix de localisation du stationnement, par Ergun (1971) qui a modélisé le choix de stationnement par des modèles logit multinomiaux afin d'étudier l'effet du changement du prix sur le choix

¹²² On est passé d'une logique de préférence à une logique de restriction de l'usage de l'automobile en milieu urbain.

de localisation, par Bourton et *al.* (1971) dont le modèle porte sur la conception des parcs, et aussi par Austen (1973) qui a proposé une optimisation basée sur la minimisation du coût agrégé de déplacement, pour la distribution de la demande sur les sites de stationnement.

Depuis, si les problématiques restent variées, la modélisation des choix est prépondérante. Nous passerons en revue chronologique les modèles les plus courants, puisqu'il est impossible de les lister tous de façon exhaustive. Gillen (1978) a étudié le choix de localisation et de relocalisation selon différentes politiques de stationnement alternatives à partir d'un modèle désagrégé de choix binaire. Il a évalué les élasticités-prix de chaque alternative. Florian et Los (1980) ont utilisé un modèle de prévision de l'occupation d'un parc relais selon une approche de programmation mathématique. Le modèle de la demande était basé sur une maximisation de l'entropie alors que le modèle de l'offre considère explicitement la contrainte de capacité.

Nour Eldin et *al.* (1981) ont étudié la simulation du type et de la localisation par affectation en tenant compte des interactions entre l'offre de stationnement (selon le type et l'emplacement) et la circulation des véhicules. L'offre de stationnement a été représentée *via* une extension des réseaux qui ont été caractérisés par le type de région (CBD, banlieue résidentielle, centre du district externe au CBD et zone rurale). Du côté de la demande, une seule classe d'usagers a été représentée. Le choix d'itinéraire a été déterminé sur la base de l'algorithme du chemin minimum de Moore. L'interaction offre-demande n'a pas été modélisée comme un équilibre de l'utilisateur déterministe mais a suivi une procédure d'affectation incrémentale. Différent des modèles traditionnels d'affectation, ce modèle présente plusieurs avantages, toutefois il n'a pas été validé. Un autre modèle, s'appuyant sur la même approche, a été développé par Gur et Beimborn (1984) pour analyser l'impact des stratégies globales de gestion du transport dans les centres-villes. Il s'agit d'un modèle de simulation des choix selon une approche déterministe d'affectation à l'équilibre. Goyal (1984) a proposé un modèle théorique d'allocation optimale des parcs pour différentes classes d'usagers par le biais d'un modèle de programmation linéaire. Il a traité trois cas dans lesquels l'offre excède, est égale ou est inférieure à la demande.

En 1988, Axhausen et *al.* (1988) ont exploité les données d'une enquête de préférences déclarées pour spécifier le choix du type de localisation par un modèle logit, tout en prenant en compte la perception du stationnement illégal par l'utilisateur. Les modèles de Hunt (1988) et de Hunt et Teply (1993) avaient pour ambition de guider la conception des politiques de stationnement futures. Ils ont étudié les choix de type et de localisation *via* un modèle logit hiérarchique, à partir des données d'une enquête de préférences révélées.

Désormais, les modèles de choix de type et de localisation du stationnement forment une littérature assez riche. D'un point de vue méthodologique, ils vont de la simple régression linéaire à la simulation dynamique et microscopique du trafic, avec un recours prépondérant aux modèles de choix discret – et plus particulièrement aux modèles de type logit –, et à une estimation par le maximum de vraisemblance

(*maximum likelihood estimation*). Ces modèles se sont concentrés surtout sur l'étude de la demande des migrants. Cette tendance est moins accentuée dans les modèles récents.

Bradley et al. (1993) ont proposé un modèle de choix conjoint de stationnement et de mode, considérant explicitement les contraintes de capacité de l'offre et spécifiant des modèles logit hiérarchiques séparés pour chaque motif (travail, achats et autres). La même année, Van der Waerden et al. (1993) ont modélisé les comportements adaptatifs de la demande confrontée à un parc saturé. Ils ont distingué trois principales stratégies d'adaptation : attendre la libération d'une place, recourir au stationnement illégal ou continuer la recherche. Lambe (1996) a utilisé un probit multinomial pour l'étude des choix de localisation des parcs, tandis que Spiess (1996) a développé un modèle de choix de stationnement et de choix intermédiaire de destination avec une contrainte explicite de capacité. Il a traité le problème sous forme de minimisation convexe, avec une solution algorithmique. Van der Waerden et al. (1997) ont ensuite construit un modèle théorique de simulation dynamique de choix de destination et de stationnement, en prenant explicitement en compte les comportements adaptatifs. Le modèle a été développé selon un système d'information géographique, avec une illustration pour l'activité « achats ». Plus tard, Golias et al. (2002) ont construit un modèle désagrégé de choix entre stationnement hors voirie et stationnement sur voirie à l'échelle du centre-ville de Piraeus (Grèce).

Des modèles de choix de stationnement et de mode de déplacement ont été développés au cours des années 2000. Pour étudier les réactions des usagers dont la destination était le CBD face aux restrictions de l'offre, Hensher et King (2001) ont présenté un modèle de choix discret de type logit hiérarchique basé sur les données portant sur les préférences déclarées. Ils ont évalué les élasticités du choix de stationnement, sans pour autant inclure la capacité de l'offre. À ce niveau, le modèle de Coppola (2002) est plus prometteur. Il concerne le choix avec demande élastique pour différents motifs et plusieurs classes d'usagers. Une enquête de préférences révélées a alimenté les estimations d'un logit hiérarchique à l'échelle du centre-ville de Salerno (Italie) et des zones adjacentes. Différents scénarios de variation du prix et de la capacité de l'offre ont été mis en place. Encore aujourd'hui, les modèles de choix continuent de susciter l'intérêt des modélisateurs.

La problématique de recherche de place a reçu beaucoup d'attention depuis le milieu des années 1980. Proposé par Young (1986), PARKSIM est un modèle discret de simulation microscopique, qui permet de représenter le processus de choix du conducteur sur un réseau et sa recherche de place. Ce modèle capte différents aspects liés à la dynamique des sites de stationnement, il peut être utilisé pour concevoir et évaluer différents types d'agencements et effectuer des mesures de performance des parcs de stationnement. Polak et Axhausen (1990) ont réalisé une revue de littérature complète sur les comportements de recherche et leur modélisation. Ils ont distingué sept stratégies, eu égard à la position de l'individu par rapport au stationnement illégal. Ils en ont conclu que ces comportements sont très complexes et qu'il y a besoin urgent d'améliorer les méthodes théoriques et empiriques de leur représentation dans les modèles. Le modèle de Thompson et Richardson (1998) peut être considéré comme un vrai progrès à ce niveau. Les auteurs ont modélisé le choix d'itinéraire et de

stationnement comme un processus de recherche composé d'une séquence de décisions liées entre elles. Leur modèle examine explicitement les aspects temporels et dynamiques du sujet pour différentes classes d'utilisateurs, segmentées selon le motif et la durée. Ce modèle a été vérifié sur un réseau hypothétique, et les résultats de cette recherche ont montré qu'une longue expérience ne conduit pas nécessairement à de meilleurs choix.

Une caractéristique importante de la modélisation du phénomène de recherche est le niveau d'information (statique et dynamique) acquis sur l'état de l'offre. Le développement technologique de collecte et de transmission de l'information en temps réel a ouvert la voie à de nouvelles pistes de modélisation. Allen et *al.* (1993) ont étudié l'impact d'implantation d'un système de guidage et d'information de stationnement (PGI) dans le centre-ville sur les comportements désagrégés des usagers à partir d'une enquête de préférences déclarées. Axhausen et *al.* (1994) ont procédé à une évaluation des effets d'un système PGI pour Nottingham et Frankfurt (Allemagne) sur le plan individuel et global. Les modèles de Axhausen et Polak (1995), Asad et *al.* (1993), Benenson et *al.* (2008) portent sur ce même sujet.

Jusqu'au début de la dernière décennie, très peu d'études de modélisation conjointe de l'offre, de la demande et de l'équilibre du système ont été effectuées. Nous présenterons dans ce qui suit les principaux modèles. Développé et utilisé pour étudier un large éventail d'analyses des politiques de stationnement dans plusieurs villes européennes, le modèle CLAMP (*Computer-based Local Area Model of Parking behaviour*) a été considéré comme un modèle révolutionnaire au sens strict du terme. Il a le mérite de simuler les effets à long terme de l'occupation du stationnement sur la performance du système de transport dans le centre-ville. Les principales caractéristiques de ce modèle tiennent au fait qu'il suit explicitement une approche dynamique, puisqu'il considère les comportements de la demande pendant différents intervalles de temps consécutifs et différents jours, et les interactions qui en découlent. Ce modèle spécifie différentes classes d'utilisateurs et permet d'étudier l'élasticité de la demande pour le choix de la destination et du mode (Polak et *al.*, 1990 ; Young et *al.*, 1991). Plus précisément, l'application de CLAMP combine des éléments de modélisation détaillée de la demande et de modélisation en quatre étapes pour développer une représentation appropriée du système de stationnement¹²³.

Une autre avancée considérable, en dépit du fait qu'il demeure théorique, est celui du travail de Bifulco (1993). L'auteur a proposé un modèle dynamique d'affectation avec choix de stationnement et d'itinéraire pour une période de simulation d'une journée. La demande a été segmentée selon le motif, la durée de stationnement et la période d'accomplissement du déplacement. Elle a été calculée de manière exogène et supposée stable par période. L'offre a été modélisée par extension des tronçons d'accès et de recherche au réseau classique. Un modèle d'équilibre stochastique multi-usagers a été résolu comme un problème de point fixe. L'une des spécificités de ce travail est de supposer que la demande d'une zone peut être satisfaite par les zones

¹²³ Pour plus de détails sur ce modèle, nous conseillons au lecteur de se référer aux travaux de Polak et Axhausen (1989) et de Polak et *al.* (1990).

avoisinentes. Les fondements théoriques et les développements mathématiques de ce modèle ont été largement repris dans les études ultérieures.

Plus récemment, les choix de stationnement ont été explicitement incorporés dans des modèles d'affectation à l'équilibre avec ou sans congestion. Les contributions les plus remarquables sont celles des chercheurs asiatiques. Leurs modèles permettent d'évaluer différentes politiques de stationnement. Ils sont de type réseau et concernent incontestablement le choix d'itinéraire et de stationnement, avec la possibilité d'intégrer d'autres types de choix. Néanmoins, ces modèles sont analytiques et n'ont pas été expérimentés sur des réseaux réels¹²⁴.

Un modèle déterministe d'équilibre traitant le choix de l'itinéraire, du stationnement et de la destination a été édifié par Lam et *al.* (1999). Ce modèle prend explicitement en compte les effets d'élasticité de la congestion routière et ceux du retard sur la demande de stationnement (une seule classe). Le problème a été traité sous forme de programmation linéaire à deux niveaux et a été résolu par un algorithme heuristique. L'étude était étendue sur une période d'une heure, avec une demande élastique. Les effets des trois scénarios caractérisant la relation entre l'offre et la demande ont été étudiés sans tenir compte des possibilités de stationnement illégal.

Huang et *al.* (2005) ont proposé un modèle dynamique d'équilibre déterministe de choix simultané d'une activité (localisation et durée), d'une localisation de stationnement et d'un itinéraire selon une structure hiérarchique. L'originalité de ce travail est d'avoir pour assise l'approche basée sur les activités et d'étudier les comportements de planification des activités. La méthode est basée sur la théorie d'inéquation variationnelle (*variational inequality theory*) avec des solutions algorithmiques heuristiques selon la méthode des moyennes successives (*method of successive average*).

Un modèle d'équilibre du réseau considérant conjointement le choix de l'heure de départ, de l'itinéraire, de la localisation et de la durée de stationnement avec plusieurs classes d'utilisateurs et différents types de stationnement a été développé par Lam et *al.* (2006). Le modèle est dynamique et reconnaît explicitement l'interaction spatiale et temporelle entre la circulation et la congestion du stationnement. Il a été validé par deux exemples numériques pour deux configurations de réseau différentes.

En extension de ces travaux, des modèles d'équilibre statique dans un contexte multimodal ont intégré le choix de stationnement. À titre indicatif, mentionnons que Zhi-Chun et *al.* (2007) ont modélisé l'équilibre de l'utilisateur pour un réseau multimodal avec contrainte de capacité pour le réseau et pour le stationnement. Le modèle s'intéresse au choix du mode, de l'itinéraire et de la localisation de stationnement. Un double algorithme du lagrangien a permis de résoudre ce problème. Par contre, Lam et

¹²⁴ Il nous semble opportun de mentionner que Sattayhatewa et Smith (2003) ont développé un modèle de choix de localisation de parc de stationnement pour les événements spéciaux et saisonniers en considérant aussi le choix de destination. Ils ont adopté une maximisation de l'entropie pour la distribution des déplacements et l'équilibre de l'utilisateur pour l'affectation, en intégrant la contrainte de capacité du stationnement. Les impacts du coût optimal et des coûts minimaux du système par rapport au coût du réseau ont été évalués.

al. (2007) ont évalué le choix du mode, de stationnement et d'itinéraire pour les pendulaires selon une approche d'équilibre du réseau (*super-network approach*). Le modèle incorpore explicitement les contraintes de capacité, l'élasticité de la demande et la congestion d'interaction entre les deux modes.

Pour simuler les choix de stationnement, Gallo et *al.* (2011) ont proposé un modèle d'affectation de trafic sur le réseau routier capable de simuler l'impact de la recherche de stationnement sur la congestion du trafic. Le comportement de l'utilisateur est modélisé selon la théorie du choix discret. Les lots de stationnement sont liés au réseau par des arcs spécifiques. Ce modèle se distingue par une représentation multi-couche du réseau routier (avec une couche de parcours principal, une couche de recherche de stationnement et une couche d'accès piéton). Cette représentation permet de distinguer la phase de la recherche de stationnement et les choix associés. Enfin, Boyles et *al.*, (2015) ont proposé un modèle statique d'équilibre de trafic qui simule le comportement de circuitage de stationnement et le report entre les lots en ajoutant des arcs de recherche et des arcs de transition au réseau principal. Une probabilité de trouver une place varie selon l'intensité du flux de report est associée à chaque arc de recherche de stationnement. Néanmoins, ce modèle adopte l'hypothèse d'un état stationnaire des véhicules sur les arcs du réseau. Ainsi, les fonctions du coût sur les arcs ne sont pas dépendantes du volume trafic.

Dans le champ de la simulation microscopique du trafic, plusieurs modèles de types multi-agent ont traité les interactions spatio-temporelles entre l'offre et la demande de stationnement. Avec une représentation très fine du réseau routier, ces modèles sont capables de simuler les choix de stationnement en interaction avec le choix d'itinéraire et de traiter explicitement la recherche de place sur le réseau. La considération désagrégée de la demande et de l'offre dans ces modèles permet de simuler de manière précise le fonctionnement du système de stationnement. Chaque usager est considéré comme un agent sur le réseau. Les lots de stationnement sont localisés dans l'espace et caractérisés par un type et par capacité. Le processus comportemental de l'utilisateur est segmenté en plusieurs étapes pour distinguer la phase de parcours vers la destination finale/ou le lot choisi et la phase de recherche de stationnement. Benenson et *al.*, (2008) ont développé le modèle Parkagent qui simule les comportements du stationnement dans un quartier résidentiel en heure de pointe du soir. Ce modèle permet, à l'aide d'un ensemble d'indicateur, d'analyser la performance du système de stationnement et d'étudier l'effet d'un lot supplémentaire notamment en termes de temps moyen de recherche de place libre. Dieussaert et *al.*, (2009) ont proposé le modèle Sustapark qui simule les choix de stationnement et ses effets sur le trafic routier. Waraich et Axhausen (2012) ont développé le modèle Matsim qui permet de simuler de manière explicite l'effet de la circulation de recherche de place sur le temps de parcours sur le réseau routier. Enfin, Guo et *al.*, (2013) ont proposé le modèle Transims pour la simulation des choix de stationnement dans un campus universitaire. Ce modèle est capable de quantifier les coûts environnementaux associés à la circulation de recherche de stationnement. L'ensemble des modèles précités permettent de capturer l'interaction entre l'offre et la demande de stationnement. Cependant, leur opérationnalité demeure discutable car leur application à des cas d'études réelles nécessite un grand volume de données et pose une grande complexité informatique.

Cette synthèse chronologique met en lumière les principaux développements thématiques et méthodologiques qui concernent les modèles de stationnement. Elle nous servira d'assise pour distinguer les approches de modélisation employées.

4.2.4 Approches de modélisation du stationnement

Trois principales approches peuvent être recensées dans la littérature, elles peuvent être classées selon deux grandes catégories selon qu'elles représentent ou non le réseau routier¹²⁵.

4.2.4.1 L'approche des choix discrets

Basée sur la théorie de l'utilité aléatoire (Ben Akifa et *al.*, 1985), cette approche est largement répandue pour la modélisation des choix de localisation, du type de stationnement et de la place¹²⁶. À chaque choix possible sont attribués une valeur d'utilité et un résidu aléatoire. L'individu décideur compare la valeur de ces utilités et choisit l'option optimale, il est alors considéré comme un « *homo aconomicus* » parfaitement rationnel, informé et soucieux d'optimiser son utilité.

Le recours à différentes spécifications de l'utilité et différentes hypothèses sur le terme aléatoire est possible. Le plus adopté de ces modèles est le logit¹²⁷. Ces modèles sont souvent alimentés par les enquêtes de préférences révélées et/ou de préférences déclarées, qui sont mises en scène depuis longtemps pour l'investigation des choix (Zhi-Chun et *al.*, 2007).

4.2.4.2 L'approche basée sur la théorie de probabilité

Récemment, l'approche probabiliste a été appliquée par Cassidy et Kobza (1998) qui ont élaboré un modèle pour l'étude des stratégies de sélection des places au sein d'un parc. La performance de la stratégie choisie est évaluée par la loi de probabilité totale. L'approche traite des décisions prises par le conducteur selon la disponibilité des places. Wong et *al.* (2000) l'ont mise en place pour évaluer la demande de stationnement à Hong Kong. Le concept de « *Unitgraph* » a été utilisé pour représenter la probabilité qu'une place soit occupée durant un intervalle de temps donné. En 2003, Dell'Orco et *al.* (2003) se sont basés sur la théorie de probabilité et celle des ensembles flous (*fuzzy set theory*) pour décrire l'incertitude et l'imprécision liées aux coûts perçus, et la probabilité de choix du type de stationnement. Le but était d'étudier comment l'information influence le choix des usagers.

¹²⁵ Pour plus de précisions, voir Bifulco (1996), qui a procédé à une comparaison de l'approche non-réseau et de l'approche réseau.

¹²⁶ Ergun, 1971 ; Van der Goot, 1982 ; Hunt, 1988 ; Axhausen et *al.*, 1988 ; Polak et *al.*, 1990 ; Axhausen et Polak, 1991 ; Hunt et Tepley, 1993 ; Bradley et *al.*, 1993 ; Van der Waerden, 1993 ; Spiess, 1996 ; Lambe, 1996 ; Hensher et King, 2001 ; Copolla, 2002 ; Hess et Polak, 2004.

¹²⁷ À titre d'exemple : l'usage des multinomial logit models (Van der Goot, 1982 ; Polack et *al.*, 1990 ; Lambe, 1996 ; Thompson et Richardson, 1998 ; Van der Waerden, 2003 ; Sattayhatewa et *al.*, 2003), des nested logit models (Hunt et Tepley, 1993 ; Hensher et King, 2001), et des mixed multinomial logit models (Hess et Polak, 2004).

4.2.4.3 L'approche basée sur le réseau

Tous les modèles appartenant à cette catégorie prennent en compte explicitement la structure topologique des réseaux de transport (nœuds et arcs) et considèrent le choix de stationnement comme complémentaire de l'affectation de trafic¹²⁸ (Papon, 2002). Une extension du réseau est effectuée par des liaisons fictives (des arcs qui connectent les tronçons de route aux centroïdes) de recherche, d'accès au stationnement et de marche jusqu'à la destination finale, comme dans Nour Eldin (1981) et Lam et *al.* (2006). Toutefois, seuls les modèles d'affectation à l'équilibre permettent d'analyser l'impact de la congestion du trafic routier sur les comportements de stationnement (Zhi-Chun et *al.*, 2007).

L'usage de cette approche a été fortement influencé par la vitesse croissante des développements informatiques. Elle offre une grande capacité de simulation et un niveau de complexité algorithmique très poussé pour une mise en œuvre sur une agglomération.

Allant du statique au dynamique, ces modèles mettent en évidence la dimension temporelle du système et permettent de bien représenter l'interaction entre le stationnement et la circulation. Au cours de la dernière décennie, les modèles qui reposent sur cette approche se sont multipliés.

4.2.4.4 Limites des approches de modélisation

Malgré leurs avantages et leur incontestable contribution à la compréhension des comportements de stationnement, les deux premières approches présentent quelques limites. Elles ne prennent en compte, explicitement, ni la structure du réseau, ni les contraintes de capacité, ni la dimension temporelle du système. Les modèles développés sont donc incapables d'évaluer les effets de la congestion routière et du stationnement. En l'absence de certaines hypothèses spécifiques, ces modèles peuvent conduire à des prévisions de demande qui dépassent les capacités des itinéraires et du stationnement, et plus généralement à une instabilité des flux de trafic (Zhi-Chun et *al.*, 2007). Quant à la troisième approche, elle ne peut être utilisée que pour des études de court terme.

Après avoir pris le soin de présenter les approches de modélisation du stationnement, nous allons maintenant nous intéresser aux échelles spatiales des modèles existants.

4.2.5 Portée spatiale des modèles de stationnement

L'étude du stationnement exige de l'inscrire dans son contexte spatial. Le mouvement et le stockage des véhicules dans l'espace ont été étudiés à différents niveaux du système urbain. Néanmoins, les modèles les plus couramment utilisés se rapportent à une échelle unique d'usage du sol (Young et *al.*, 1990). Dans cette partie, nous reprendrons la classification déjà proposée par Young (2000).

¹²⁸ En conséquence, ces modèles de trafic reposent sur les hypothèses théoriques de choix d'itinéraire.

4.2.5.1 Modèles à l'échelle du parc de stationnement

Ces modèles sont, par essence, microscopiques, et considèrent le parc de stationnement comme une entité isolée. Ils permettent de reproduire en détail les mouvements des véhicules à l'intérieur du parc. Il s'agit généralement de modèles de microsimulation qui décrivent de près le mécanisme de recherche et l'effet des informations acquises au fur et à mesure que les automobilistes avancent dans leur parcours de recherche (Young, 1988 ; Young et *al.*, 1990 ; Young, 2000). L'interaction entre les véhicules garés et ceux en circulation ainsi que les probabilités de disponibilité de place sont explicitement modélisés.

Développé au milieu des années 1980, PARKSIM est un modèle typique à ce niveau (Cassady et Kobza, 1998). Il s'agit d'un modèle discret microscopique de simulation d'événements, qui saisit différents aspects reliés à la dynamique des sites de stationnement. Il peut servir à la conception et à l'évaluation de différents types d'agencement des parcs et à la mesure de leur performance¹²⁹.

4.2.5.2 Modèles à l'échelle du centre-ville

C'est dans le centre-ville que les problèmes de stationnement sont les plus récurrents ; de ce fait, la majorité des modèles appartiennent à cette échelle. Ils concernent, généralement, les choix de localisation et/ou de type de stationnement et l'affectation des flux aux localisations prévues. Ils portent le plus souvent sur un centre d'affaires (ou CBD pour *Central Business District*). À cette échelle, les sites de stationnement et les lieux de destination (un ou plusieurs) sont distribués de façon simplifiée dans le périmètre d'étude. Le modélisateur choisit aussi un ou plusieurs points d'entrée des flux de véhicules dans le centre. Une agrégation par zone et par localisation a déjà été utilisée par Bifulco (1993). D'autres choix conjoints au stationnement, comme celui de la destination ou de l'itinéraire, peuvent être étudiés à cette échelle spatiale. CLAMP est à cet égard un modèle typique, qui simule les effets à court et à long terme de l'occupation du stationnement sur la performance du système de transport dans le centre-ville. Citons aussi, à ce titre, les modèles de Bradley et *al.* (1993) et de Lam et *al.* (2006).

4.2.5.3 Modèles dans une aire urbaine ou suburbaine

Il s'agit des modèles métropolitains – ou subrégionaux – qui portent sur l'analyse des politiques de stationnement, en différenciant l'impact des différentes mesures prises, et permettent de déterminer de façon endogène la demande de déplacement par l'offre en vigueur. Ces modèles, dont le besoin a déjà été souligné par Polak et Axhausen (1989), sont susceptibles d'opérer dans des situations où la congestion se pose comme un problème important et permettent d'appréhender de manière réaliste les interactions demande-offre, et système de stationnement-système de transport. Ils ont la capacité de représenter et de distinguer des réponses comportementales de différents groupes d'utilisateurs, à court et à long terme. Cette échelle est adéquate pour

¹²⁹ Pour une revue détaillée, voir Young et Yue (1992) et Yue et Young (1993), art. 14, art. 72, art. 11.

l'étude des potentialités de report modal comme l'effet de certaines mesures de restriction du stationnement. Le modèle de Hensher et King (2001) fait partie de cette catégorie de modèles.

4.2.5.4 Modèles d'interaction entre système de stationnement et système d'occupation du sol

Ces modèles ne concernent pas directement les politiques de stationnement mais plutôt la planification stratégique du système urbain. Leur objectif est d'étudier les effets indirects du stationnement sur les choix de localisation des ménages et des entreprises à long terme. Leur degré de précision dépend des objectifs assignés au modèle.

4.2.5.5 Vers une hiérarchie des modèles de stationnement

Partant du constat qu'un modèle ne concerne qu'une seule échelle spatiale, Young et *al.* (1989), Young et Taylor (1991) et Young (2000) ont proposé le concept de hiérarchie de modèles pour mettre en relation différents niveaux, échanger les données et adresser des questions particulières de politique de stationnement à chaque niveau de ladite hiérarchie. Pour Young et Taylor (1991), « *The hierarchical approach to modelling offers a practical, integrated methodology for examining transport and parking systems models. It provides a framework by which to judge the appropriate position and use of a particular model, and its relationship to other models* ». La communication entre les modèles permet de fournir une représentation complète et réaliste de l'ensemble du système dans son ensemble.

4.3 Représentation de l'offre et de la demande dans les modèles

La modélisation nécessite une représentation structurée du système étudié afin de faire appel aux méthodes opérationnelles les plus appropriées. Dans cette section, nous mettrons l'accent sur les représentations de l'offre et de la demande de stationnement dans la littérature scientifique.

4.3.1 Caractérisation de l'offre

L'offre est l'expression de la capacité de l'infrastructure dans l'espace et dans le temps. Au sein d'un centre-ville typique, la proportion de consommation de l'espace par l'automobile, entre stationnement et circulation, est assez importante : elle est de l'ordre de 30 % de la superficie totale, dont un tiers est dédié à l'offre de stationnement (Lambe, 1996). La place est l'entité élémentaire de l'offre. Cette place se singularise par un type, un prix, un emplacement et un statut d'occupation. La qualité de service de l'offre totale dans une zone détermine la performance du système.

Les modèles de type offre s'attachent à refléter un certain réalisme physique, économique et fonctionnel de l'offre. À l'encontre des modèles de type demande qui

ont connu un essor considérable, ils sont moins fréquents et concernent essentiellement la conception (dimensionnement, agencement, orientation, géométrie et capacité des parcs)¹³⁰ et la tarification du stationnement. Précisons que l'offre est considérée plutôt comme une contrainte pour le modélisateur. Dans les modèles relevant de l'affectation du trafic, elle est représentée comme un élément du réseau et non plus uniquement en termes d'infrastructure isolée.

4.3.1.1 Attributs typologiques de l'offre

La représentation de l'offre de stationnement par types est une pratique assez commune. Ces types sont introduits dans le but de segmenter les places d'une zone en groupes homogènes. Ils peuvent faire référence à l'emplacement des places (sur voirie ou hors voirie – en surface, multi-étage, souterrain), à leur tarification (gratuites, offertes par l'employeur, payantes), à leur durée (sans limitation de durée, à durée limitée) mais aussi à leur juridiction (privée, publique). La définition du type relève du choix du modélisateur. Selon Axhausen et *al.* (1988) et Van der Goot (1982), il est indispensable de distinguer les différents types d'offre dans la modélisation du stationnement.

Pour caractériser l'offre dans un modèle de simulation de choix du type et/ou de la localisation du stationnement, Gur et Biemborn (1984), Axhausen et *al.* (1988), Polak et Axhausen (1991), Wong et *al.* (2000), ont défini trois types : le stationnement sur voirie, le stationnement hors voirie et le stationnement illégal¹³¹. Hunt (1988) ainsi que Hunt et Teply (1993) ont traité les deux premiers types et le stationnement offert par l'employeur pour évaluer l'attractivité des parcs. Ils ont constaté que le stationnement sur voirie et le stationnement offert par l'employeur sont préférés au stationnement hors voirie. D'autres auteurs ont considéré un seul type d'offre, comme Andrew et Clinch (2006) et Van der Waerden et *al.* (2006) pour le stationnement sur voirie, ou comme Van der Waerden et *al.* (1993 et 1997) et Zhang et *al.* (2009) pour le stationnement hors voirie. Golias et *al.* (2002) ont développé un modèle de choix du type entre le stationnement sur et hors voirie.

L'association de deux ou plusieurs critères de classification est fréquemment employée pour définir le type. À titre d'exemple, Thompson et Richardson (1998) ont couplé l'emplacement du stationnement avec le prix et la durée. Pour leur part, Polak et Axhausen (1991) ont représenté cinq types de stationnement : gratuit sur voirie, payant sur voirie, payant hors voirie, stationnement en étage et stationnement illégal, qu'ils ont décrits à partir de quatre attributs, à savoir : le temps d'accès, le temps de recherche, le temps de sortie et le coût de stationnement.

¹³⁰ Young (1988) a élaboré une revue des modèles de conception des parcs de stationnement, dans laquelle il a distingué différentes approches, heuristiques ou numériques. Ces modèles offrent une approximation de certaines mesures de performance des parcs de stationnement.

¹³¹ Le stationnement illégal n'est pas un type en soi, mais il présente une sorte d'occupation de l'espace liée à l'activité de stationnement et découle généralement de l'insuffisance de l'offre en quantité à proximité des lieux de stationnement ou à un prix prohibitif. Selon Gur et Beimborn (1984), il est irréaliste d'omettre le stationnement illégal dans les zones congestionnées.

4.3.1.2 Attributs économiques de l'offre

Le stationnement présente un coût pour l'utilisateur. Ce coût comporte, en règle générale, deux composantes : l'une monétaire (le tarif) et l'autre non monétaire (le temps). L'ensemble forme le coût généralisé associé à l'usage du service.

Le prix du stationnement

Considéré comme l'un des ultimes instruments de régulation des politiques de stationnement, le prix est une variable clé de caractérisation de l'offre quel que soit le type du modèle¹³². Souvent, le tarif est une variable exogène considérée comme connue. Deux cas de figure ont été relevés dans la littérature. Selon l'emplacement et l'horaire, le prix peut être fixe ou progressif en fonction (linéaire ou non linéaire) de la durée. Ce deuxième cas est de plus en plus répandu puisqu'il prend en compte la dimension temporelle. Hunt et Teply (1993) ont calculé le tarif quotidien en divisant le prix mensuel du stationnement par le nombre de jours par mois pour établir un coût équivalent par jour. Lambe (1996) a utilisé une redevance horaire de stationnement pour les véhicules, avec une durée inférieure à 4 heures – au-delà, les automobilistes paient un tarif journalier.

L'analyse des effets de variation du prix de l'offre sur les comportements de la demande est l'une des problématiques les plus anciennes de la modélisation du stationnement. En 1971, Ergun a étudié l'effet du changement de prix sur les choix de la demande. Hess (2001) a évalué l'impact de la gratuité du stationnement sur le choix du mode et de la demande de stationnement pour les migrants. Dans des modèles récents, des scénarios de changement de prix ont été étudiés. Pour Zhi-Chun et al. (2008) et Lam et al. (2006), le prix est étroitement lié au type (sur voirie et hors voirie) et à la durée moyenne du stationnement. Ces modèles le spécifient selon la classe d'utilisateurs, l'heure d'arrivée et la localisation.

Afin de tenir compte de la pression sur l'offre de stationnement, Huang et al. (2005) ont proposé un modèle d'équilibre dynamique (*a time-dependent equilibrium model*) dans lequel ils ont caractérisé les options alternatives de stationnement en fonction de leur type (sur voirie et hors voirie) et selon une structure de prix variable avec le temps (*time-varying parking charges*) prenant en compte l'heure d'arrivée et la durée de stationnement prévue.

L'effet du subventionnement du stationnement des pendulaires a suscité une littérature abondante. Dans une revue des études empiriques analysant comment l'octroi de subventions aux migrants affecte-il les choix de déplacement, Shoup et Willson (1992) ont constaté que la subvention favorise la conduite solo et que la suppression ou l'absence de cette mesure augmente significativement la part des autres modes de déplacement.

¹³² Il est à mentionner, à ce niveau, qu'on ne tient pas compte des modèles de tarification du stationnement qui étudient le prix sous une approche économique d'équilibre du marché et d'internalisation des coûts externes.

Une autre dimension du coût monétaire est relative au coût du stationnement illégal. L'insuffisance de places en quantité et/ou l'absence de contrôle favorisent le recours à cette manœuvre. Afin de refléter l'état réel de l'offre, ce type de stationnement est de plus en plus pris en compte dans les modèles. Ce coût est représenté sous la forme d'une pénalité, calculée en multipliant la probabilité d'être intercepté par la valeur de l'amende (Bifulco, 1993 ; Bates *et al.*, 1997 ; Thompson et Richardson, 1998). La probabilité d'être condamné à une amende dépend de la fréquence de contrôle et de la durée espérée du stationnement (Dell'Orco *et al.*, 2003 ; Gur et Biemborn, 1984 ; Van der Waerden *et al.*, 1993). Hess et Polak (2004) vont jusqu'à spécifier un paramètre de pénalité de coût de risque différent de celui du prix du stationnement légal, et même à y associer une fonction d'utilité spécifique, puisque selon eux, ces deux coûts ne sont pas perçus de la même manière par l'utilisateur.

Les coûts temporels de stationnement

Si le prix du stationnement est expressément configuré dans les modèles, il n'en va pas de même pour toutes les variables de nature temporelle. Nous mettrons l'accent principalement sur la représentation du temps de marche, du temps de recherche et du temps d'attente.

Le temps de marche terminal

Dans les premiers modèles développés, la seule variable temporelle reconnue comme caractéristique de l'offre de stationnement était le temps de marche ou d'accès à partir de la place de stationnement jusqu'à la destination finale (Gillen, 1978 ; Eldin *et al.*, 1981 ; Ergun, 1971 ; Austen, 1973). Généralement, ce temps est représenté par la distance et la vitesse. La distance est mesurée soit par le plus court chemin, comme pour Hunt et Teply (1993) ou Lam *et al.*, (2006), soit par la distance moyenne comme pour Bifulco (1993). La vitesse de marche varie de 1 à 1,4 mètre par seconde (Bifulco, 1993). Toutefois, certaines exceptions existent, notamment pour Austen (1973) qui a adopté l'hypothèse que ce temps est fixe, et pour Lambe (1996) qui a affecté une distance distincte pour chaque destination finale. Une bonne partie des modèles reconnaissent donc explicitement la corrélation entre le temps de marche et la localisation du stationnement.

Dans des modèles d'affectation à l'équilibre, Huang *et al.* (2005), Lam *et al.* (2006), Zhi-Chun *et al.* (2007) et Lam *et al.* (2007) considèrent ce temps comme une désutilité définie par classe d'utilisateurs et par localisation de stationnement. Dans certains modèles, cette désutilité a été calculée pour l'aller et le retour comme dans Lambe (1996). Toutefois, cette pratique est loin de s'établir comme règle universelle.

Concernant la marche, Van der Goot (1982) a employé le concept de l'accessibilité. Il a établi des facteurs d'accessibilité et distingué différents types de places (sur voirie, hors voirie) et de véhicules (voitures, camions et camionnettes de livraison). Il a alors constaté que les espaces de stationnement sur voirie sont plus attractifs car plus accessibles.

Le temps de recherche de stationnement

Le temps de recherche est la quantité de temps passée pour chercher une place disponible. Dans certains modèles, ce temps¹³³ a été intégré comme variable explicative de choix. Cette pratique a touché en premier ressort les modèles de type réseau, comme ceux de Gur et Biemborn (1984) et de Bifulco (1993). Pour les modèles de type non-réseau, la recherche était considérée comme faisant partie du temps de parcours. Malgré l'importance de cette variable, surtout en milieu à forte densité, elle n'a pas reçu l'attention qu'elle aurait méritée dans les premiers modèles. À la fin des années 1980, une reconnaissance du temps de recherche a vu le jour et des hypothèses simplificatrices ont été adoptées. Axhausen (1989b) rattache le temps de recherche au stationnement sur voirie en le considérant comme nul pour le stationnement hors voirie. Par contre, Golias et *al.* (2002) pensent que ce temps ne peut pas être nul. Une approche simpliste a été proposée par Axhausen et Polak (1991) qui ont mis en corrélation le temps de recherche avec le temps de déplacement à bord du véhicule par le biais d'une enquête de préférences déclarées menée à Karlsruhe.

Dans le modèle de Bifulco (1993), une fonction mathématique a été utilisée pour calculer le temps de recherche selon le type et le nombre de places dans les parcs concurrents, l'occupation du parc au début et à la fin de la simulation, la longueur de places et la vitesse de recherche. Thompson et Richardson (1998) ont adopté une approche similaire prenant en compte l'occupation et les caractéristiques géométriques du parking. Ainsi, certaines fonctions du temps de recherche sont dérivées des données empiriques disponibles, y compris l'occupation des capacités et le contrôle de la disponibilité de chaque place. La recherche se poursuit jusqu'au moment où l'utilité espérée passe en deçà de celle procurée par l'option actuelle. Pour Coppola (2002), une forte corrélation caractérise la relation entre capacité et recherche. L'auteur stipule qu'il existe une dépendance circulaire entre le temps de recherche et le nombre d'usagers qui choisissent un parc de stationnement, et il prend en considération, dans son modèle, l'occupation au début de la période de simulation (qui dépend du nombre d'usagers) et le nombre d'arrivées et de départs durant la période.

Pour Huang et *al.* (2005) ainsi que Lam et *al.* (2006), le temps de recherche est fonction de la capacité du parc, de l'accumulation de l'occupation des places et du flux d'accès libre au parc. Plus récemment, Balijepalli (2008) a modélisé, selon une approche d'équilibre, le choix de l'itinéraire et du stationnement. Il a aussi supposé que le temps de recherche dépend de la capacité physique du parc et de son occupation.

Le temps d'attente

Le temps d'attente correspond au temps écoulé jusqu'à l'obtention d'une place. Ce temps peut résulter du fait qu'un parc soit entièrement occupé, comme il peut représenter le temps passé pour entrer ou quitter un site de stationnement. Kawakami

¹³³ Axhausen et Polak (1991) ont défini le temps de recherche comme « The time spent searching and queuing for the parking space ». Pour Thompson et Richardson (1998), « The car park search time is the time a vehicle spends travelling within a car park in order to find a space ».

et *al.* (1994) ont évalué le temps d'attente d'une place de stationnement à l'aide de la théorie de la file d'attente. Ils ont supposé que l'arrivée du flux de stationnement suit la distribution de Poisson. Hunt et Teply (1993) ont pour leur part évalué le temps d'attente en comptant simplement le nombre de places de stationnement dans la zone d'étude. Le plus grand nombre implique un potentiel plus élevé d'attente associé à des véhicules entrants et existants au sein de l'ouvrage de stationnement.

4.3.1.3 Attributs physiques de l'offre

Localisation du stationnement

Le concept de localisation admet deux acceptions : il peut faire référence directement à la place de stationnement si le modèle est à l'échelle microscopique et porter par exemple sur les mouvements des véhicules au sein d'un parc. Si l'échelle est celle de la zone, du centre-ville ou de l'agglomération, les places sont plutôt agrégées par site de stationnement, et la localisation renvoie alors au lieu ou à l'emplacement géographique de ces places (centre, banlieue, périphérie).

Il existe une littérature assez respectable sur les modèles de choix stationnement dans lesquels l'offre est représentée par différentes localisations. Chacune est considérée comme un bien séparé caractérisé par un prix, un stock, une durée et un temps d'accès (ou de marche) à la destination (Gillen, 1978). L'ensemble forme l'univers de choix pour l'utilisateur, comme dans Hunt (1988) et Hunt et Teply (1993). Le choix de localisation est donc la variable à expliquer. Dans d'autres modèles, la localisation est incorporée comme variable explicative du choix. L'offre, non uniformément distribuée dans l'espace, est considérée comme agrégée et représentée de façon très abstraite.

Gillen (1978), dans un modèle de choix de localisation et de relocation du stationnement, a représenté l'offre par sa localisation et ce, pour différents blocs de distance par rapport à la destination finale. Cette approche avait déjà été employée par Austin (1971) qui, quand la distance est inférieure à un bloc, fusionne dans un même centroïde la localisation de stationnement et la destination finale, les différencie dans les autres cas. Tous ces modèles ou presque reconnaissent l'étroite relation entre la localisation du stationnement et la proximité de la destination finale.

Pour les modèles qui sont basés sur une approche réseau, la localisation est de plus en plus traitée comme une partie du réseau, et représentée par un ensemble de nœuds liés au réseau par des tronçons imaginaires (Gur et Beimbom, 1984 ; Bifulco, 1993 ; Van der Waerden, 1997). La topologie des services est donc mathématiquement décrite comme un réseau de nœuds et d'arcs. Chaque nœud possède une position physique. L'emplacement de chaque arc est fonction de l'emplacement de ses nœuds de connexion. Il s'agit, bel et bien, de la représentation classique du réseau utilisée dans les modèles d'affectation du trafic entre O-D.

Nour Eldin et *al.* (1981) étaient parmi les premiers à utiliser une extension du réseau par une séquence d'arcs visant à relier les localisations de stationnement aux nœuds du réseau. Des arcs artificiels de stationnement, de marche et d'accès au stationnement

ont été ajoutés à la configuration initiale du réseau. Les places ayant les mêmes caractéristiques dans la même zone sont agrégées et accumulées dans le même arc de stationnement (par le barycentre). Cette représentation a été retenue ultérieurement dans la plupart des modèles d'affectation. Lam et al. (1999) et Sattayhatewa et Smith (2003) font exception, puisqu'ils ont considéré les localisations du stationnement comme des destinations finales.

Huang et al. (2005), Lam et al. (2006) et Zhi-Chun et al. (2007) ont utilisé le concept de « *Feasible parking location* » pour capturer l'interrelation entre l'offre et la demande. Lam et al. (2006) le définissent comme « *A parking location is referred to as feasible for a certain origin–destination (OD) pair (r, s) and for a certain user class if and only if the walking distance from the parking location to the destination is within an acceptable threshold* ». L'univers de choix de l'utilisateur est déterminé par la distance de marche terminale.

Capacité de l'offre

La capacité de l'offre fait référence au stock de places fournies. D'après Tong et al. (2004), « *the capacity of a parking facility is the number of parking spaces provided in a facility* ». Les modèles de choix étudient la demande selon une situation donnée de l'offre (Young et al., 1991). À ce niveau, la capacité se présente comme une contrainte, eu égard au caractère inélastique de l'offre. Dans les anciens modèles, la capacité de l'offre n'était pas considérée de façon explicite (Ergun, 1971¹³⁴ ; Gillen, 1978 ; Austin, 1973). Ces modèles permettent donc seulement de spécifier les conditions locales et optimales (Young et al., 1991) sans traiter les cas dans lesquels la demande excède l'offre. L'hypothèse que l'offre est suffisamment disponible ou que la demande excédentaire sera réaffectée à d'autres localisations est implicitement adoptée (Gur et Beimborn, 1984). La non-intégration de la capacité de l'offre est d'ailleurs l'une des principales défaillances de ces modèles puisqu'elle remet en cause la qualité des prévisions, sauf si certaines procédures d'équilibre sont incorporées. Pour Florian et Los (1980), il est irréaliste d'étudier le système de stationnement sans tenir compte des contraintes de capacité.

Désormais, les chercheurs essaient d'apaiser cette limite. Les travaux qui ont traité de la capacité statique de stationnement et l'ont incluse comme variable exogène ont permis des améliorations considérables de la qualité et de la pertinence des modèles. Van der Goot (1982) a inclus la contrainte de capacité de l'offre dans un modèle de choix de place de stationnement. Toutefois, l'effet de l'occupation n'a pas été expliqué de façon satisfaisante. L'auteur a suggéré de séparer la capacité des modèles « demande ». Ce résultat est à prendre avec précaution puisqu'il dépend du contexte et des hypothèses sur lesquels se fonde le modèle.

Alors que Axhausen et al. (1988) et Axhausen et Polak (1991) ont carrément négligé la capacité, les modèles suivants se sont efforcés de la prendre en compte. Bradley et al. (1993), dans un modèle de choix de mode et de type de stationnement, Hunt et Teply (1993) dans un modèle de choix de localisation de stationnement, Cassady et Kobza

¹³⁴ Dans ce modèle, une hypothèse explicite sur l'autorégulation entre l'offre et la demande par le prix a été admise.

(1998) dans un modèle d'évaluation des stratégies de sélection des places dans un parc, Van der Waerden *et al.* (1998) dans un modèle de choix de stationnement et de magasin pour le motif « achats », et Dell'Orco *et al.* (2003) dans un modèle probabiliste de choix du type de stationnement, ont représenté la capacité par un stock de stationnement (variable discrète) et l'ont utilisée comme variable explicative des choix. Par ailleurs, Matsumoto et Rojas (1998), dans un modèle de choix discret de stationnement selon un processus hiérarchique et analytique, ont évalué la probabilité de choix d'une place en fonction de la capacité des parcs.

En effet, la dimension statique tend à prévaloir dans ce type de modèles. Les interactions spatiotemporelles et avec d'autres dimensions du système de transport sont quasi absentes. C'est d'ailleurs l'une des pistes de recherche préconisées pour les futurs modèles.

Dans les premiers modèles de distribution et d'affectation du trafic, qui traitent le plus souvent de l'équilibre du système, la capacité a été intégrée de façon statique. La capacité dynamique reflète la capacité effective d'un parc à un moment donné, elle est fonction de la capacité statique, du nombre de véhicules déjà garés et d'autres éléments stochastiques (Young, 1988). Le développement technologique et la forte capacité de simulation des logiciels ont permis l'intégration de la capacité dynamique qui amplifie le niveau de complexité de la modélisation. Les modèles dynamiques d'affectation du trafic se singularisent par cet aspect.

Austen (1973) a ajouté la capacité du stationnement en utilisant une procédure itérative. Florian et Los (1980) ont développé un modèle gravitaire de maximisation d'entropie à double contrainte (capacité de stationnement et du réseau) pour la provision d'un parc relais à l'arrêt de métro de Lindenwood à Montréal. Le nombre total de places de stationnement offertes était déjà connu. Gur et Biemborn (1984) ont développé un modèle d'équilibre déterministe de l'utilisateur pour simuler le choix de stationnement, et ils ont représenté la capacité par le nombre de places dans chaque localisation. Bifulco (1993) a intégré la capacité du stationnement par type comme variable exogène et comme l'un des déterminants pour le temps de recherche de place dans un modèle d'équilibre stochastique de l'utilisateur. Dans Lam et Yang (1999), la capacité minimale de l'offre a été traitée comme variable endogène déterminée à l'échelle du premier niveau d'un modèle de programmation bi-niveau destiné à la modélisation d'un équilibre offre-demande d'un point de vue stratégique.

Une contrainte de capacité a été rattachée à l'offre de transport dans Huang (2005) et Lam *et al.* (2006). Dans ces travaux, des scénarios d'extension de la capacité de stationnement et/ou du réseau ont été spécifiés. Cette contrainte de capacité est présente aussi dans les modèles de Zhi-Chun *et al.* (2007) ainsi que Lam *et al.* (2007), et ce afin de générer les conditions d'optimalité équivalentes aux exigences d'un contexte de modélisation multimodale. Mentionnons que, pour le cas de ces modèles, la contrainte touche explicitement aussi bien la capacité des parcs de stationnement que celle du réseau routier. La plupart de ces modèles consistent donc en une extension des modèles de choix d'itinéraire.

Tam et Lam (2000) ont également établi un modèle sous contrainte de capacité routière et de stationnement pour estimer la motorisation maximale dans une zone. Dans leur modèle, la demande dans la zone d'attraction doit être inférieure ou égale au nombre de places de stationnement dans la zone de destination. De ce fait, ils ont négligé le stationnement illégal puisqu'à leur sens, celui-ci ne doit pas figurer dans un modèle de planification stratégique.

Représentation formelle de l'offre de stationnement sur le réseau routier

La demande se manifeste dans l'espace et dans le temps, et pour pouvoir être modélisée, l'offre doit être représentée de manière formelle. La façon la plus commune de représentation de l'offre dans les modèles d'affectation du trafic est le réseau routier composé d'un ensemble d'arcs et d'un ensemble de nœuds. À la configuration initiale du réseau, des nœuds et/ou des arcs virtuels de stationnement, de marche et de recherche sont ajoutés pour relier les lots de stationnement au réseau. Chaque nœud a une position physique déterminée. Le positionnement de chaque arc est en fonction de l'emplacement de ses nœuds de connexion. Les coûts sur chaque type d'arc sont définis selon les caractéristiques du modèle et sont imputés au coût du déplacement. Les origines et les destinations peuvent correspondre aussi bien à des bâtiments qu'à des zones, selon le niveau d'agrégation spatiale retenu.

4.3.1.4 Attributs d'usage de l'offre

Régulation et contrôle de l'offre

Nous entendons par régulation l'ensemble des modalités de gestion de l'offre de stationnement. Elle peut se faire par la quantité (capacité de l'offre), le prix, la limitation des durées, la restriction d'accès et le contrôle. Les effets de ces modalités sont généralement évalués sous forme de scénarios de changement de l'offre.

Pour déterminer l'offre minimale qui permet de satisfaire la demande, Lam et *al.* (1999) ont étudié le scénario dans lequel l'offre en capacité est inférieure à la demande, et ils ont trouvé qu'alors le temps de déplacement sur le réseau augmente significativement et engendre des retards de stationnement. Dans le cas inverse, celui dans lequel la capacité de l'offre est plus importante que la demande totale, les gains de temps sont moins importants. Thompson et Richardson (1998) ont étudié l'effet de la limitation des durées dans le CBD, et ils ont constaté un changement significatif dans les schémas comportementaux, une réduction substantielle du temps de recherche et une augmentation du temps de marche. La restriction d'accès à certains types d'offre se matérialise sous forme de réservation des places pour certaines catégories d'utilisateurs, comme les places offertes par l'employeur ou les places pour les résidents.

Le contrôle du stationnement illégal est de plus en plus pris en considération dans les modèles. Gur et Biemborn (1984) ont montré qu'une augmentation du niveau de contrôle conduit à un report vers d'autres emplacements licites. Coppola (2002) a constaté que le doublement du prix de stationnement et du montant de l'amende influence plus les comportements des usagers de longue durée de stationnement que

ceux de courte durée. Il est généralement représenté par la fréquence de contrôle et le montant de l'infraction. Dell'Orco (2003) a souligné que la probabilité de choisir de garer illicitement son véhicule dépend de la fréquence du contrôle et de la durée prévue.

Charge de l'offre de stationnement

La charge de stationnement est représentée par l'occupation ou l'accumulation des véhicules à l'intérieur des sites de stationnement. Elle ne concerne que les modèles qui considèrent explicitement la capacité de l'offre. La représentation de la charge de stationnement diffère selon que le modèle est statique ou dynamique. Pour le premier type, elle renvoie à l'accumulation moyenne des arrivées. Van der Waerden et Timmermans (1997) ont utilisé l'occupation moyenne, les durées moyennes et le taux de rotation moyen par parc pour traiter la charge de l'offre.

Pour le deuxième type, elle dépend de l'occupation au début de la période de simulation, des arrivées et des départs pour chaque tranche de temps et de la capacité totale de l'offre. Un ratio volume/capacité définit cette charge et décrit le degré de saturation et de remplissage du parc. Le traitement du remplissage dynamique présente quelques difficultés. Prendre l'hypothèse de la stabilité du flux dans le temps permet d'atténuer la complexité mais remet en cause la pertinence du modèle, à moins que la période de simulation ne soit divisée en intervalles de temps. Puisque les parcs à forte attractivité seront choisis par les premiers arrivés et que leurs profils d'accumulation seront plus importants en début de période¹³⁵, on parlera donc de congestion de stationnement lorsque la charge totale sera de même ordre que la capacité totale.

4.3.2 Caractérisation de la demande

La demande de stationnement peut être définie comme « l'expression des besoins immédiats de garer un véhicule à un lieu donné pendant une durée déterminée pour un motif particulier ». Elle résulte de la nécessité d'accomplir une activité et est, par définition, dérivée de la demande des déplacements par le mode automobile. Elle se matérialise par des flux de déplacement entre des lieux d'origine (zones d'émission) et un lieu de destination (zone d'attraction) au sein duquel des places de stationnement sont sollicitées. La disparité géographique des zones et la variabilité temporelle des besoins se répercutent directement sur les caractéristiques de la demande.

Les modèles « demande » représentent les choix des usagers et sont assez abondants. Ils concernent généralement l'étude des processus décisionnels des automobilistes et des réactions comportementales face au changement des caractéristiques du système et des facteurs qui influencent ces décisions. Les comportements de stationnement sont caractérisés par des relations dynamiques et complexes entre la demande multidimensionnelle, les performances et les quantités de l'offre (Young et *al.*, 1991). La recherche d'une représentation réaliste des comportements a fait émerger de

¹³⁵ Hunt et Teply (1993) ont constaté que les places les plus proches du centre sont occupées en premier, puis qu'avec le temps, la ligne des places occupées s'étend vers l'extérieur du CBD.

nouvelles « logiques comportementales ». Outre celle du choix, les comportements sont de plus en plus traités comme des processus de recherche décrits, souvent, avec des comportements adaptatifs. Dans ce qui suit, nous présenterons les grandes caractéristiques de la demande puis nous passerons à l'analyse des dynamiques comportementales en matière de stationnement.

4.3.2.1 Grandes lignes de représentation de la demande

Sémantique de la demande de stationnement

La demande de stationnement est équivalente au volume des déplacements automobiles des conducteurs attirés vers une zone ; elle représente l'entrée de trafic suivie par une activité de stationnement. La représentation physique de la demande dans les modèles différencie la demande individuelle de la demande collective selon l'échelle considérée. À l'échelle macroscopique, la demande est classiquement exprimée en termes de flux de déplacement obtenus par des matrices O-D ; à l'échelle mésoscopique, elle concerne des groupes de véhicules automobiles attirés vers une zone donnée et aussi appelés « les arrivées » ; enfin, à l'échelle microscopique, elle est représentée de façon désagrégée en termes de conducteurs individuels.

Ladite demande représente donc des taux d'arrivées dans chaque site de stationnement et dans chaque destination finale. Cette dernière renvoie à un lieu déterminé – l'aire d'étude est par exemple le centre-ville (Florian et Los, 1980 ; Hunt et Teply, 1993) – et à une zone, si le modèle traite différentes destinations (Lambe, 1996) avec une certaine agrégation spatiale. Une représentation agrégée des flux selon les destinations, les modes et les catégories d'utilisateurs conduit à une estimation de la demande de stationnement pour une zone urbaine.

À un niveau désagrégé, la demande peut être représentée par l'accumulation de véhicules en stationnement et peut être estimée *via* une évaluation des arrivées et des départs tout au long des différentes périodes de la journée. Des informations sur le profil et le niveau d'accumulation des voitures, leur mode et leur durée de stationnement sont donc utilisées. Cette représentation peut servir dans des modèles statiques et dynamiques.

Demande : variable exogène ou variable endogène ?

Généralement, selon le type de modèle, la demande de stationnement peut être considérée soit comme un ingrédient connu, exogène et donné (Ergun, 1971 ; Hunt et Teply, 1993 ; Bifulco, 1993) – ce qui implique entre autres une inélasticité de la demande –, soit comme une variable endogène estimée par le modèle. L'estimation peut être réalisée par la génération du nombre de véhicules qui arrivent à la destination sur la base des matrices O-D, ou par le calcul des taux d'arrivées (Van der Waerden *et al.*, 1997). À ce titre, Austen (1973) et Gillen (1978) ont évalué le nombre de véhicules générés pour chaque bloc de distance, pour les déplacements des pendulaires.

Dimension temporelle de la demande

Selon le modèle, la demande de stationnement peut être discrétisée à partir de différents créneaux horaires allant de l'heure à plusieurs mois en passant par l'heure de pointe, une période de temps (mi-journée), une journée, des semaines. Il semble donc évident que les modèles qui se focalisent sur de courtes périodes d'observation ne permettent pas d'étudier les changements de comportement de la demande sur le moyen et le long termes.

Dimension spatiale de la demande

Selon la configuration spatiale des destinations, la demande peut concerner un parc donné ou une échelle plus grande, comme le CBD ou le centre-ville. D'ailleurs, la plupart des modèles se rapportent à ce type d'aire géographique. Les modèles relatifs aux choix de stationnement et de mode portent généralement sur une zone urbaine ou suburbaine.

Demande fixe, demande élastique

La dépendance de la demande vis-à-vis du niveau de service (élasticité)
Le coût de circulation... a un impact sur le volume global de la demande
L'hypothèse que la demande est fixe est souvent admise explicitement par les modèles. Récemment, tout comme dans les autres modèles comportementaux, on a pu noter une tendance à modéliser une demande élastique selon les conditions de l'offre. Citons l'exemple du modèle de Coppola (2002) qui traite une demande élastique pour le choix conjoint du mode et du stationnement. Pour Lam et *al.* (1999), la génération de déplacements et l'attraction de la demande sont élastiques à la congestion du trafic et la disponibilité de places.

Segmentation de la demande en classes d'usagers

Dans le but d'affiner la qualité de la modélisation et de saisir l'hétérogénéité des conducteurs, le recours à la représentation de la demande en classes d'usagers homogènes est de plus en plus courant dans la modélisation du stationnement. La segmentation de la demande est typiquement propre aux modèles « demande » (Bifulco, 1996). Elle offre de la flexibilité en termes de représentation des différentes classes de la population et des différentes dimensions de réponse comportementale. Il n'existe pas de règle universelle de ventilation de la demande, toutefois la tendance pour les modèles de stationnement penche surtout vers le motif de déplacement, la durée du stationnement, ou les deux à la fois¹³⁶.

Le recours à la segmentation des usagers ne date pas de très longtemps. La plupart des anciens modèles souffrent d'une lacune commune, celle de considérer une seule classe

¹³⁶ Selon Coppola (2002), « the model should be multi-user, since behavioral responses to changes in parking system could strongly vary with travelers' characteristics (e.g. the desired parking duration, trip purpose,...): it is rather intuitive to understand that an increase of parking fares will affect much more the choice of travellers with long parking stays than those with short parking stays ».

d'utilisateurs (Goyal et Gomes, 1984 ; Gur et Beimborn, 1984 ; Hunt et Teply, 1993). Bifulco (1993) a mis en place une segmentation tridimensionnelle selon le motif, la durée et l'intervalle horaire de début de déplacement. Cette catégorisation a été ensuite reprise dans les modèles d'affectation comme dans Lam et *al.* (2006) et Zhi-Chun et *al.* (2007). Lambe (1996) a regroupé la demande dans un premier temps par périodes de stationnement puis par destinations. Thompson et Richardson (1998) ont pour leur part utilisé le motif et la durée de stationnement. Dell'Orco et *al.* (2003) ont adopté une classification selon la durée, l'origine et la destination des déplacements. Mentionnons aussi l'exemple des modèles de Huang et *al.* (2005) dans lesquels les pendulaires étaient supposés homogènes dans leur évaluation du temps et dans leur perception de l'utilité, mais différenciés par types d'activité, localisations et durées de stationnement. Dans un modèle d'évaluation de l'effet d'un PGIS, Tatsumi (2003) a représenté les automobilistes en trois classes selon leur degré d'information acquise (fixe, guidé, non guidé). Dans certains cas, on opte pour la prise en compte d'une seule classe d'utilisateurs afin de simplifier le modèle, comme dans Lam et *al.* (1999).

Types de données utilisées

Pour investiguer en profondeur les comportements de recherche de stationnement par les usagers, les informations sur les caractéristiques de déplacement de la demande sont souvent issues des données de matrices entre des zones d'origine et de destination et celles d'autres d'enquêtes. Deux types d'enquête sont couramment appliqués : les préférences révélées (Ergun, 1971 ; Austen, 1973 ; Gillen, 1978 ; Van der Goot, 1982 ; Hunt, 1988 ; Hunt et Teply, 1988), les préférences déclarées (Axhausen et *al.*, 1988 ; Axhausen et Polak, 1991 ; Bradley, 1993 ; Van der Waerden, 1993 ; Hensher, 2001), ou une combinaison des deux techniques¹³⁷ afin de remédier aux insuffisances de l'une ou de l'autre (Tsamboulas, 2001). Il est évident que la taille de l'échantillon considéré et la méthode de collecte d'informations influencent la qualité du modèle.

Pour les modèles de choix discret, les données peuvent être proposées en séries temporelles (*time-series*) pour des observations directes des comportements pendant une période de temps ou sous forme de données transversales (*cross sectional data*) pour comparer les réponses des automobilistes à des variations de l'offre en un point dans le temps. Bien que le premier type de données semble plus approprié pour étudier les politiques de stationnement, la plupart des études de stationnement sont basées sur des données transversales.

4.3.2.2 Représentation de la dynamique des comportements de choix

La modélisation de la demande repose sur l'estimation des comportements des automobilistes. Ces comportements sont édictés par des lois qui régissent les décisions à prendre. Les modèles « demande » sont le plus souvent décrits à partir des modèles de choix (Van der Waerden et Timmermans, 1997), en particulier de localisation et de type de stationnement. L'objectif consiste à comprendre, reproduire et prévoir la

¹³⁷ Pour une comparaison détaillée des deux techniques, on pourra consulter Tsamboulas (2001).

façon dont les conducteurs choisissent leur place de stationnement et de connaître les facteurs qui influencent ces choix.

Les choix de stationnement

Les choix sont le résultat d'une interaction complexe entre les préférences individuelles des conducteurs, leur connaissance des caractéristiques de l'offre, la disponibilité instantanée d'une place et les conditions du trafic (Polak et Axhausen, 1990).

Le conducteur est classiquement confronté à un univers de choix assez large. Ainsi, les options de stationnement peuvent renvoyer à différentes localisations selon leur proximité de la destination finale (place en bordure du trottoir ou localisation intermédiaire), à différents types (stationnement sur ou hors voirie, offert par l'employeur, souterrain, illégal...), ou encore, à un niveau spatial désagrégé, à différents emplacements. Les modèles de choix de localisation et de type de stationnement sont les plus développés. Les attributs de chaque option, tels que le prix et le temps de marche, sont généralement supposés connus par le conducteur. Il est à noter que la distance de marche est le principal facteur qui délimite l'univers de choix pour un usager. Feasible parking location

Certains modèles traitent le stationnement avec d'autres choix conjoints comme le mode, l'itinéraire, la durée, etc. Dans ce cas, l'usager procède à des choix simultanés ou consécutifs selon différents ensembles de choix.

Fondements théoriques

La philosophie des modèles de choix de stationnement est fortement calée sur celle des modèles de choix du mode de transport, tant dans leurs principes, leur méthodologie que dans leurs spécifications. La modélisation de la demande est régie par des travaux ayant généralement pour assise théorique la théorie classique de l'utilité aléatoire (Ben Akifa et *al.*, 1985 ; Ortuzar et William, 1994) qui fournit un cadre conceptuel adéquat pour l'étude du stationnement. Bien ancrée dans les théories microéconomiques, elle est souvent adoptée pour la modélisation des aspects comportementaux de la demande. Le concept de base qui gouverne le processus de choix est celui de la désutilité (Gur et Beimbom, 1984), que l'on représente par un coût généralisé associé à chaque option. L'individu est considéré comme un décideur informé, parfaitement rationnel, censé sélectionner l'alternative avec le plus faible coût généralisé.

La désutilité peut être exprimée par deux composantes, dont l'une est mesurable et déterministe (attributs observables) et l'autre est constituée par un terme d'erreur stochastique (attributs non observables) (Caicedo et *al.*, 2006). Elle obéit souvent à une relation linéaire entre les paramètres. (*formule ??*)

Pour le stationnement, la désutilité dépend des attributs de chaque option de choix et se compose essentiellement de variables monétaires et temporelles, ainsi que d'autres

facteurs intangibles comme les inconvénients ou l'inconfort (Austen, 1973). Une unique unité de mesure, soit monétaire, soit temporelle, est admise pour le calcul du coût généralisé. Dans les modèles d'affectation, les coûts de stationnement font partie des coûts des arcs (Bifulco, 1996).

Les choix de stationnement peuvent se présenter comme un arbre de choix avec un ou plusieurs niveaux. Van der Goot (1982) a pour sa part employé un seul niveau. Axhausen et Polak (1990) ont adopté la même structure pour le choix du type dans quatre villes européennes à partir d'enquêtes de préférences déclarées. À l'origine, la plupart des applications étaient basées sur l'utilisation du logit multinomial (MNL) qui, bien qu'il présente des avantages importants en termes de facilité d'estimation, souffre de certains inconvénients.

En ce qui concerne la structure hiérarchique de choix, Hunt (1988) ainsi que Hunt et Teply (1993) ont examiné le choix de type et d'emplacement du stationnement. Un premier niveau a été réservé au choix entre stationnement sur voirie, hors voirie ou offert par l'employeur, et un second niveau a concerné le choix entre différents emplacements d'une même catégorie. Les options étaient, par hypothèse, complètement indépendantes et identiquement distribuées. Une fonction d'utilité composée a été associée aux groupes des options du niveau inférieur.

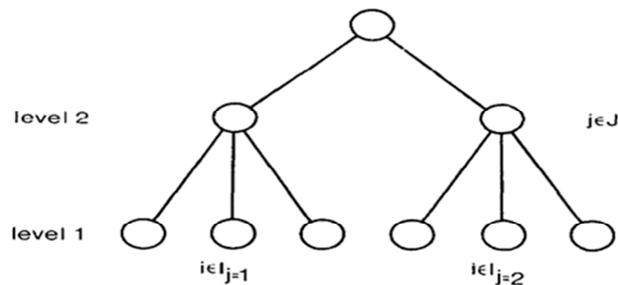


Fig. 1. Example nested structure for nested logit (NL) model.

Figure 4.1: Structure hiérarchique de choix (source : Hunt et Teply, 1993).

Le modèle logit est bien adapté pour résoudre ce genre de problème, cette spécification est d'ailleurs la plus utilisée. Le logit emboîté (*nested logit*) permet d'assembler les différentes options en sous-groupes et de rendre compatibles les éléments du choix. Dans Polak et al. (1990), dans le modèle CLAMP, pour montrer que le changement des services des systèmes de transport et de stationnement affecte le choix de destination, du mode et du stationnement des pendulaires allant vers le centre, une structure à trois niveaux a été adoptée.

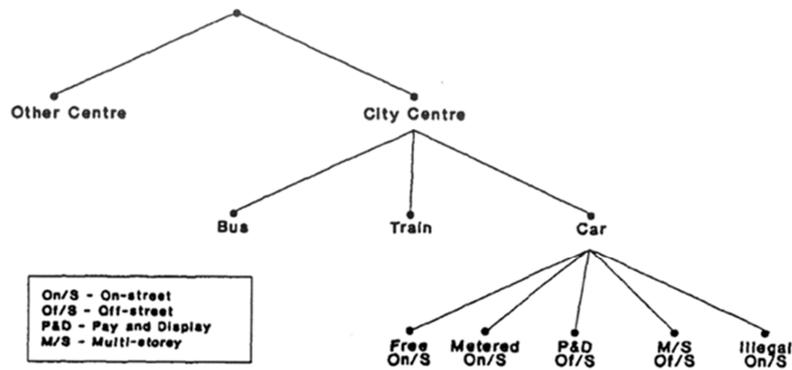


Figure 4.2: Structure hiérarchique de choix de la destination, du mode et du stationnement (source : Polak et *al.*, 1990).

Pour modéliser le choix du type de places de stationnement et de l'itinéraire, Thompson et Richardson (1998) ont utilisé une représentation hiérarchique. Cette même logique a été adoptée dans Huang et *al.* (2005) qui ont conçu une structure de choix hiérarchique tridimensionnel avec choix du type et du lieu de l'activité en premier ressort, choix de la durée de l'activité ensuite, et enfin choix conjoint de l'itinéraire et du stationnement. Pour Lam et *al.* (2006), les individus choisissent d'abord le début et la fin de leurs activités, et sélectionnent ensuite l'emplacement du stationnement qui minimisera leur coût de déplacement. En deuxième niveau, ils choisissent l'itinéraire qui présente le plus court chemin vers cet emplacement.

Hypothèses comportementales adoptées

Il serait illusoire de croire qu'un modèle peut parfaitement expliquer et reproduire les phénomènes observés. Le modélisateur doit impérativement sacrifier certains aspects du problème et énoncer certaines hypothèses simplificatrices. La fiabilité des résultats et la robustesse des modèles sont tributaires du degré de réalisme des hypothèses de base. Nous nous attacherons à expliciter quelques hypothèses relatives à la demande et à discuter leur validité empirique.

Hypothèse de l'information parfaite de l'utilisateur

Un bon nombre de modèles adoptent, implicitement ou explicitement, cette hypothèse qui présume que l'utilisateur dispose d'une information parfaite sur les composantes des coûts des différentes options de choix. Or dans la réalité, les individus, même s'ils connaissent en détail la localisation des parcs de stationnement et leurs tarifs, ne peuvent pas être certains de trouver une place à un moment donné puisque cela dépend de la disponibilité instantanée des possibilités de stationnement. Il est donc impossible d'avoir une parfaite connaissance des différents attributs de l'offre, puisqu'ils sont stochastiques par nature (Thompson et *al.*, 1998). Dans Polak et Axhausen (1990), « *During periods of peak parking demand the spatially diffuse nature of the parking stock and the competition that takes place between drivers for use of the most attractive space*

means that a given driver can never possess perfect information on the instantaneous availability of parking opportunities ». D'ailleurs, c'est en raison de cette information limitée que l'utilisateur s'engage dans une action de recherche de place.

Il est à signaler, en outre, que d'autres types d'information peuvent être alloués à cette hypothèse, tel que la configuration du réseau ou les conditions du trafic, comme dans Huang et al. (2005) et Zhi-Chun et al. (2007), qui ont présumé que l'utilisateur dispose d'une information parfaite sur le stationnement et l'état du trafic. Cette hypothèse présente, en effet, l'une des défaillances comportementales rattachées à ces modèles.

Hypothèse de la hiérarchisation de la structure des choix

Représenter le choix de stationnement comme un processus séquentiel de décisions liées entre elles selon une structure hiérarchique à plusieurs niveaux est très courant. Le recours à cette hypothèse permet de reproduire avec réalisme les comportements des usagers, surtout si le modèle étudie d'autres choix. Dans ce cas, une fonction d'utilité composée est calculée pour le premier niveau de la hiérarchie.

Hypothèse de la stabilité de la demande

La quasi-majorité des modèles de stationnement obéissent à cette hypothèse selon laquelle la demande est uniforme et dans un état stable (*steady state traffic flow*) pendant la période de modélisation. Dans la réalité, la demande est variable dans le temps. Ainsi, la pertinence de cette hypothèse varie selon la longueur de la période de simulation. Dans certains modèles, cette période est divisée en courtes tranches de temps et la stabilité de la demande par intervalles semble plus raisonnable. Les effets du stationnement peuvent être surestimés ou sous-estimés à cause de cette hypothèse.

Hypothèse de l'homogénéité des perceptions de la demande

La variation de la perception des coûts par les usagers est une source majeure de biais. Les modèles déterministes sont critiquables, à ce sujet, car la perception des coûts de stationnement est considérée comme identique pour tous les conducteurs. Or la valeur du temps, par exemple, n'est pas constante et varie d'une personne à une autre, mais aussi pour une même personne selon les circonstances. À ce titre, la segmentation de la demande en classes homogènes permet de répondre en partie à cette hétérogénéité. Les modèles stochastiques reconnaissent cette variabilité de perceptions¹³⁸ et sont bien placés pour la simuler.

¹³⁸ Hess et Polak (2004) ont pris en compte explicitement l'hétérogénéité de la demande à travers un modèle de type « mixed multinomial logit » qui permet de traiter la variation de la perception des usagers, les différences déterministes et aléatoires selon la localisation et le motif de déplacement. Des modèles séparés pour chaque sous-groupe de demande ont été évalués. Les résultats ont montré des différences significatives dans les valeurs du temps de recherche et de marche.

Les variables explicatives du choix de stationnement

À travers les modèles, les analystes essaient de réunir et de mettre en relation des variables pour l'étude des problèmes. Depuis longtemps, de nombreux facteurs, tant quantitatifs que qualitatifs, ont été explicités dans le but de comprendre les choix de type et de localisation des places de stationnement. Les études ont porté sur l'effet de certaines caractéristiques associées aux options de stationnement, au déplacement et à l'individu.

Compromis prix-temps

Les résultats des précédents modèles ont montré que le prix et le temps de marche sont les deux critères les plus décisifs : les individus préfèrent les options les moins coûteuses et situées à proximité de leur lieu de destination finale. Pour l'ensemble de ces modèles, le postulat que les usagers procèdent à un certain arbitrage entre ces deux variables est admis (Ergun, 1971 ; Austin, 1973 ; Gillen, 1978 ; Van der Goot, 1982 ; Axhausen et Polak, 1991). Ainsi, les personnes qui ont une valeur du temps forte sont plus susceptibles de payer, alors que celles qui ont les plus faibles revenus préfèrent marcher¹³⁹. Désormais, tous les modèles ou presque prennent en considération ces deux critères de choix. Il n'en va pas de même pour les autres variables, dont l'importance varie avec l'objectif du modèle.

En effet, le rôle du prix du stationnement n'est pas surprenant, dans la mesure où le tarif est souvent l'une des variables classiques de choix entre deux ou plusieurs options. Une variation du tarif engendre inévitablement un changement de comportement. Gillen (1978) a étudié l'élasticité-prix de la demande et a constaté qu'une augmentation du prix induit une relocalisation éloignée du point de destination. Le prix est placé au centre de plusieurs études, surtout économiques¹⁴⁰.

Par ailleurs, le temps de marche est perçu par les automobilistes comme une perte de temps, et il est, de ce fait, surévalué (Lambe, 1996 ; Golias, 2002). Ce temps dépend de la proximité de la destination, donc de la distance¹⁴¹ et de la vitesse de marche – qui varie d'une personne à l'autre. Hensher (1978) a indiqué que la valeur du temps de marche est deux à trois fois plus importante que celle du temps de déplacement à bord du véhicule (appelé aussi temps d'accès). Cette constatation a été confirmée par les recherches ultérieures. Pour Hess et Polak (1993), l'évaluation du temps de marche est plus élevée que celle du temps d'accès, et pour Lambe (1996), cette valeur est six fois plus importante.

¹³⁹ Selon Golias (2002), tout comme les modèles de choix de déplacement, les variables prix et temps dominent les choix de stationnement.

¹⁴⁰ Pour plus de détails, voir Kelly et Clinch (2006), qui ont étudié trois scénarios de changement du prix à Dublin, et ont constaté que les personnes qui avaient des motifs autres que « Affaires » étaient plus susceptibles de changer leur comportement en cas de hausse du prix. Par ailleurs, Hensher et King (2001) ont examiné le rôle de la tarification sur le partage des places dans le CBD, et Shoup (2006) a étudié le choix des automobilistes entre chercher ou payer.

¹⁴¹ Dans la plupart des modèles, cette distance couvre en moyenne un rayon de 400 à 500 mètres (Lambe, 1996).

Autres variables temporelles

Depuis, les chercheurs ont pris conscience du fait que le prix et le temps de marche ne sont que deux variables parmi tant d'autres, qui s'avèrent avoir des vertus explicatives quand on les intègre dans les modèles.

Pour ce qui concerne, d'abord, les variables de nature temporelle, les analystes ont constaté que le temps de déplacement, le temps de recherche, le temps d'attente, le temps d'accès et de sortie d'un parc, ont aussi un poids considérable dans l'explication des choix.

La prise en compte d'une variable ou d'une autre dans un modèle dépend de sa portée spatiale et de la nature des choix étudiés. Le temps de recherche a reçu une attention particulière, Axhausen et Polak (1990) ont souligné qu'il doit être évalué séparément du temps de déplacement dans l'estimation des modèles, puisque les paramètres de la recherche de stationnement sont significativement différents de ceux du temps d'accès. La recherche de place présente un caractère aléatoire et se heurte à l'incertitude de trouver une place, sa valeur de temps est en conséquence plus importante que celle du temps d'accès (Golias et al., 2002). Selon Polak et al. (1990), elle varie entre 1 et 10 minutes, et entre 5 % et 25 % du temps total de déplacement. Cependant, Shoup (2006) a affirmé qu'au sein des centres congestionnés, ce temps se situe entre 3,5 et 14 minutes en moyenne, et que 8 % à 74 % du trafic est dû à la recherche de place. En outre, Golias et al. (2002) ont remarqué que pour un déplacement vers le travail, le temps de marche semble moins important que le temps dépensé pour chercher une place.

Dans ce même ordre d'idées, les analyses ont révélé des différences importantes d'évaluation de la valeur des composantes temporelles selon le motif, la localisation et le type de stationnement ainsi que selon la ville. D'après Hess et Polak (2004), « *The analysis has shown important differences in the valuation of the components of travel time across different locations and across different journey purposes. Indeed, while access time was valued the lowest in Birmingham and Coventry, it was valued higher than search time and egress time in Sutton Coldfield. Also, while egress time is valued second highest in Birmingham and lowest in Sutton Coldfield, it is valued higher than access time and search time in Coventry, to such an extent that the estimated value of egress time in Coventry is actually more than four times larger than the value of search time and more than five times larger than the value of access time. As for the differences across journey-types, it was observed that workers value egress time the highest, while shoppers place more importance on search time, rating it over three times as highly as workers do (when taking into account the full distribution of the value of time)* ». Des différences substantielles semblent donc s'établir selon le motif.

Motif et durée de stationnement

Certains modèles se sont focalisés sur le stationnement des pendulaires puisqu'ils présentent certaines particularités comportementales (longue durée, fréquence de

déplacement, etc.)¹⁴². D'autres ont segmenté la demande selon le motif de déplacement (Bifulco, 1993 ; Van der Waerden et *al.*, 2003 ; Wong et *al.*, 2007) en distinguant les pendulaires des non-pendulaires (Lam et *al.*, 2006), les motifs contraignants de ceux qui ne le sont pas (Coppola, 2002) et les résidents des non-résidents (Polak et Axhausen, 1990). Les résultats de ces modèles mettent en évidence des variations significatives de valorisation du temps selon le motif. Une autre variable explicative des choix de stationnement, directement corrélée avec les motifs de déplacement, est bel et bien la durée de stationnement.

Autres caractéristiques de l'offre

D'autres caractéristiques ergonomiques et de qualité de service de l'offre interviennent, de façon non négligeable, dans l'orientation du choix des automobilistes. Il s'agit, à juste titre, du type de parc, de son emplacement, de sa position géographique, de sa capacité, de sa sécurité, de la disponibilité instantanée d'une place, de l'information disponible, de la fréquence du contrôle et du montant de l'amende associée au stationnement illicite.

Caractéristiques de l'usager

Utilisées dans certains modèles, les variables socio-économiques (âge, sexe, revenu) se sont avérées très peu, voire pas du tout significatives. Toutefois, certaines de ces variables peuvent intervenir indirectement dans le coût et les paramètres temporels des alternatives de stationnement (Ergun, 1971 ; Golias, 2002 ; Van der Waerden et *al.*, 2003). Elles peuvent aussi servir de variable proxy ou variable muette (*dummy*) pour calibrer les modèles. Pour ce qui est de l'expérience individuelle de stationnement, Thompson et Richardson (1998) ont constaté qu'elle n'a qu'un effet assez marginal : une longue expérience ne conduit pas à de meilleurs choix, ce qui peut s'expliquer en partie par l'incertitude de trouver une place libre.

Résultats de quelques modèles

Pour le choix de localisation, Van der Goot (1982) a trouvé que les individus préfèrent les parcs hors voirie avec de faibles taux d'occupation dans le but de minimiser le temps de recherche de place. Gur et Biemborn (1984) ont souligné que l'automobiliste procède à un compromis entre le temps de marche, le temps de recherche et les coûts associés au stationnement. Hunt (1988) a constaté que ce choix n'est pas influencé seulement par le prix et la proximité de la destination, mais aussi par l'orientation géographique du parc par rapport à l'axe principal de circulation, son type et le temps de recherche et d'attente d'une place. Les automobilistes préfèrent le stationnement hors voirie car il nécessite moins de temps d'accès et de sortie.

Pour Polack et Axhausen (1990) « parking choices are typically the outcome of a complex interaction between individual drivers parking preferences, their prior knowledge of the characteristics of the parking stock, the instantaneous availability of

¹⁴² Voir Hunt et Teply, 1993 ; Arnott, André de Palma et Lindsey, 1991 ; Willson et Shoup, 1990 ; Lam et al., 2007 ; Balijepalli et al., 2008.

parking opportunities and prevailing traffic conditions ». Thompson et Richardson (1998) classifient les variables de choix selon l'usage (prix, amende et temps de marche), l'attente (temps d'attente), et l'accès (temps de déplacement, temps de recherche). Bradley et al. (1993) ont conclu que le stationnement hors voirie devient plus attractif sur de longues durées.

Pour le choix du type, Golias et al. (2002) ont proposé un modèle de choix entre stationnement sur voirie et hors voirie, et le résultat indique que le prix et la disponibilité des places sont les critères les plus décisifs. Shoup (2006) a supposé que le stationnement sur voirie est gratuit mais nécessite un temps de recherche, et que hors voirie, il est payant mais immédiatement disponible et que le temps de marche est le même pour les deux types. Il a inclus les variables suivantes dans son modèle : le prix du stationnement sur voirie, la durée de stationnement, le temps de recherche d'une place sur voirie, le coût de l'essence pour la recherche, le nombre de personnes dans le véhicule, la valeur du temps, et il a calculé le temps de recherche à l'équilibre pour lequel l'automobiliste montre une indifférence entre les deux choix. Ce temps est de l'ordre de 6 minutes qui équivalent au paiement d'1 dollar.

Asad et al. (1993) ont cherché à savoir comment évaluer et mesurer la connaissance des parcs de stationnement et comment elle influence d'autres variables de choix. Cette connaissance peut être aussi bien statique (nom, localisation et taille du parc) que dynamique (occupation, disponibilité, file d'attente...). D'après les résultats de cette recherche, avec des niveaux de connaissance variables, les usagers se comportent différemment dans des situations semblables. Le choix du parc est essentiellement déterminé par le prix, la capacité et la proximité de la destination. Pour Lam et al. (2006) et Zhi-Chun et al. (2007), les comportements de stationnement sont affectés par la demande de déplacement, la distance de marche, la capacité des parcs et le prix.

Interdépendance entre les variables

On ne doit pas perdre de vue que les variables de choix ne doivent, en aucun cas, être évaluées de manière absolue puisqu'elles sont indirectement corrélées. En effet, une longue durée de stationnement légitime un temps de recherche plus considérable qu'une courte durée. La durée détermine aussi le prix du stationnement. Ce dernier peut être influencé par le revenu de l'automobiliste. La charge de l'offre se répercute sur la disponibilité de places et donc sur le temps de recherche, qui peut être déterminé à son tour par le niveau d'information acquis et l'heure de départ.

Enfin, quelles que soient les variables explicatives retenues, il est raisonnable d'admettre que le choix final est influencé, mais pas complètement déterminé, par ces variables explicites puisque, si certaines renvoient à une réalité physique facilement mesurable – comme le prix –, d'autres sont moins facilement quantifiables mais tout aussi concrètes – comme la qualité de service de l'offre. Une question d'importance cruciale est la différence de perception et d'évaluation des critères de choix par les automobilistes.

4.3.2.3 Les comportements de recherche de stationnement

Cette approche en est à ses débuts (Golias, 2002). Elle met en avant le phénomène de recherche et le considère plus comme un schéma comportemental de stationnement que comme un processus qui finit par un choix. Les modèles « recherche » tentent de remédier aux lacunes des modèles antérieurs qui ne prenaient pas en considération les aspects temporels et dynamiques des choix liés à l'incertitude sur la disponibilité d'une place.

Leur assise théorique est très similaire à celle des modèles de choix de stationnement, les différences se situent surtout au niveau des hypothèses adoptées. Ces modèles « recherche » sont souvent évalués à une échelle microscopique et nécessitent des données assez fines. Ils permettent de reproduire les comportements des conducteurs assez finement, leurs choix d'itinéraire, leurs choix de sens de la circulation, des files d'attente, l'effet sur la circulation et le réseau (Thompson et Richardson, 1998 ; Arnott et Inci, 2005). Ils sont donc désagrégés et stochastiques, et traitent les aspects aléatoires et dynamiques du système.

Polak et Axhausen (1990) ont effectué une revue de littérature sur la recherche de stationnement, qu'ils définissent comme « the process by which drivers are able to reconcile their parking intentions with the actual availability of parking opportunities. During the search process drivers inspect a succession of parking opportunities which they can either accept (and park) or reject (and continue to search) according to their evaluation of the attractiveness of each opportunity¹⁴³ ». Thompson et Richardson (1998) considèrent le processus de recherche comme un nombre de décisions liées entre elles et prises à différents points dans le temps. L'utilisateur commence sa recherche, examine et évalue les opportunités disponibles, et selon les cas accepte ou refuse l'option proposée. Dans ce dernier cas, il décidera d'attendre la libération d'une place ou de reprendre la recherche. Il s'agit ainsi d'un processus séquentiel qui fournit une excellente représentation des comportements de choix du parc dans un centre urbain.

¹⁴³ Ils ont proposé le concept de « Parking Search Strategy » pour qualifier l'ensemble des règles comportementales adoptées par l'automobiliste pour trouver une place. Ils ont fixé sept stratégies selon la perception du conducteur du stationnement illégal (voir aussi Caicedo et al., 2006).

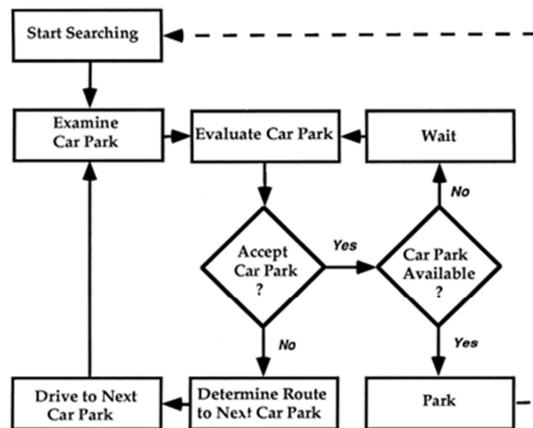


Figure 4.3: Processus de recherche de stationnement (source: Thompson et Richardson, 1998).

Thompson et Richardson (1998) ont adopté cette approche pour simuler les choix de stationnement et d'itinéraire avec une prise en compte explicite du réseau, de la capacité, de l'occupation des parcs, de la taille de la file d'attente et de la perception subjective des valeurs du temps par les usagers. Benenson et *al.* (2008) ont proposé le modèle PARKAGENT basé sur les agents pour l'étude de l'effet d'une augmentation de l'offre sur les comportements de stationnement.

Van der Waerden et *al.* (2003) se sont intéressés à la recherche à l'intérieur du parc, et ils ont constaté que la distance d'une part, entre la position de la place de stationnement et l'horodateur, et d'autre part, entre la position de la place et le point de sortie déterminent le comportement de l'automobiliste¹⁴⁴.

Sous l'égide de cette approche, le rôle de la connaissance¹⁴⁵ de l'offre et de l'information dans l'orientation des comportements a suscité un grand intérêt auprès des chercheurs. Ces dernières années, avec le développement des PGIS (*Parking Information and Guidance System*), les modèles se tournent vers l'étude de l'effet de l'information en temps réel sur les comportements des automobilistes (pour un approfondissement, voir Axhausen et *al.*, 1994 ; Allen, 1993 ; Tatsumi, 2003 ; et Zhang et *al.*, 2009).

4.3.2.4 Les comportements adaptatifs de stationnement

La non-prise en compte de la contrainte de capacité de l'offre dans les modèles de choix de stationnement admet l'hypothèse implicite que le conducteur effectue un choix libre et que l'offre est suffisamment disponible. Or ce n'est pas toujours le cas. Les comportements adaptatifs sont nés de cette discordance entre les modèles théoriques et le monde réel. Lorsque les conducteurs se trouvent face à un parc

¹⁴⁴ Voir Benenson et Martens (2008).

¹⁴⁵ Voir Asad et *al.* (1993).

occupé et à une congestion du stationnement, ils doivent adapter leurs choix en fonction des circonstances.

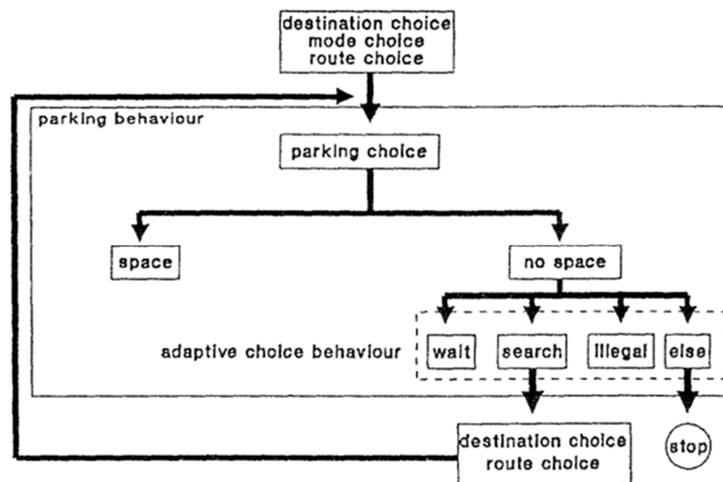


Figure 4.4: Représentation des comportements adaptatifs de choix (source : Van der Waerden et al., 1993).

Van der Waerden (1993) a proposé un modèle de choix des comportements adaptatifs. Il a modélisé les réactions des conducteurs confrontés à une saturation du parc visité par un logit polychotomique. Trois stratégies de choix adaptatif ont été identifiées : attendre qu'une place soit libérée, utiliser une place illégale, ou continuer la recherche dans un autre parc. La probabilité de choix d'une stratégie ou d'une autre dépend de plusieurs facteurs : nombre de parcs visités, temps d'attente prévu, nombre de véhicules en attente, perception du coût du stationnement illégal, probabilité de trouver une place. L'auteur a conclu que le temps d'attente maximal acceptable est de 5 minutes et que le prix n'est pas significatif dans ce type de comportement.

Le modèle ci-dessus se base sur les données d'une enquête de préférences déclarées et fait partie d'un modèle de simulation des choix de stationnement. À notre sens, la considération des comportements adaptatifs dans les modèles d'affectation est l'une des pistes de recherche future. Elle permettra de mieux représenter les comportements des conducteurs et de quantifier les effets de congestion de stationnement sur la circulation.

4.3.2.5 Couplage du stationnement avec d'autres choix de déplacement

L'importance des interdépendances entre système de transport et système de stationnement dans les processus de planification constitue le fondement de modélisation des choix de stationnement simultanément avec d'autres choix de déplacement. En effet, une bonne part des travaux modélisent les choix de stationnement de façon isolée. Dans la réalité, la demande de stationnement influence et est influencée par d'autres choix tels que le mode, l'itinéraire, la destination et même l'activité. D'ailleurs, selon Zhi-Chun et al. (2008), « *it is necessary to study the combination of*

travel and parking choices in a unified framework ». Négliger cette spécificité rend la représentation peu réaliste et peut donc conduire à une mauvaise spécification.

Choix commun du mode et du stationnement

L'usage de l'automobile est inévitablement suivi par une activité de stationnement. La modélisation conjointe du choix du mode de déplacement et du type de stationnement a connu son essor avec la naissance du concept de parc relais, considéré comme une solution intéressante pour attirer les automobilistes vers les transports en commun. D'après Young et *al.* (1991), le prix et le temps de recherche de place influencent, d'une façon ou d'une autre, le choix du mode de déplacement.

Florian et Los (1980) ont proposé un modèle agrégé de choix du parc relais sous une approche de maximisation de l'entropie en considérant la capacité de l'offre, sans pour autant modéliser explicitement le choix modal. Gantvoort (1984) a étudié l'effet de restriction de la capacité de l'offre de stationnement sur le choix modal, il a constaté des changements dans les comportements de stationnement et un report modal considérable de la voiture vers les transports collectifs, le vélo ou le covoiturage. Bradley (1993) a étudié différents segments d'offre, dont le P + R. Son modèle avait pour objectif d'étudier les effets du changement de l'offre de stationnement sur le mode de transport utilisé à court terme. Les effets à plus long terme peuvent être analysés par le modèle CLAMP (Polak et Axhausen, 1989). Coppola (2002) a utilisé un *nested logit* pour représenter les choix successifs de mode de déplacement (moto, voiture, marche et bus) d'abord, et du stationnement des pendulaires ensuite par un logit multinomial pour la ville de Los Angeles. Il en a conclu que la subvention du stationnement augmente significativement la probabilité d'aller au travail en conduite solo, et qu'il existe une relation linéaire entre le prix du stationnement et le choix modal. Citons enfin les modèles de Lam et *al.* (2007) et de Zhi-Chun et *al.* (2007), dont une description plus détaillée figure dans la section suivante.

Couplage du stationnement avec d'autres choix de déplacement

La modélisation combinée du stationnement avec d'autres choix de déplacement (heure de départ, itinéraire, destination, etc.) est de plus en plus répandue. À ce titre, le couplage avec le choix d'itinéraire se fait par les modèles d'affectation du trafic dont la structure conceptuelle offre un cadre propice à cette combinaison. Par ailleurs, les usagers peuvent différer ou anticiper l'heure de leur déplacement s'ils espèrent alors rencontrer de meilleures conditions. Les modèles dynamiques offrent la possibilité de simuler les choix qui dépendent du temps, tels que le choix d'heure de départ ou d'heure d'arrivée, et le choix des durées de stationnement. C'est d'ailleurs l'objet du modèle de Lam et *al.* (2006). D'autres exemples de travaux de ce genre sont explicités dans la section suivante.

Le choix de destination finale et du stationnement a fait l'objet de certains travaux. Évoquons à titre illustratif le travail de Van der Waerden et Timmermans (1998) dans lequel l'automobiliste choisit son stationnement et le magasin à visiter, ou de Huang

et *al.* (2005) qui ont étudié le choix d'activité (localisation et durée) et du stationnement.

4.4 L'interaction spatiotemporelle offre-demande : vers un équilibre du stationnement

Après avoir décrit de façon séparée les représentations des deux composantes fondamentales du système de stationnement, à savoir l'offre et la demande, nous pouvons nous pencher sur les modèles d'interaction qui caractérisent leurs relations.

Les modèles « demande » sont généralement dimensionnés selon une offre déterminée, ils ignorent donc les dynamiques de l'offre (le processus de chargement et d'accumulation des véhicules, la variation du temps de recherche...). Les modèles « offre » représentent de façon très abstraite la demande et négligent ses dynamiques (variabilité spatiotemporelle, comportements, choix). Bien que ces deux types de modèles jouent un rôle central dans l'étude du stationnement, leur portée demeure partielle car ils ne traitent qu'une seule face du problème et sacrifient le caractère interactif du système. Dans la réalité, la qualité de service de l'offre et les choix de la demande sont interreliés et s'influencent mutuellement dans le temps et dans l'espace. Les modèles d'interaction se prêtent à une représentation systémique du stationnement, ils caractérisent sa dynamique interne et l'ensemble des changements qui surviennent. Il importe de savoir que les effets de ces interactions s'échelonnent sur des temporalités différentes (court, moyen et long termes) et qu'ils touchent aussi bien le système de stationnement que le système de transport.

Le stationnement se caractérise souvent par un équilibre temporaire et un déséquilibre permanent. Malgré cette particularité, le concept d'équilibre est le plus approprié pour modéliser ses interactions et leurs effets. La modélisation de l'équilibre propose un cadre conceptuel approprié pour l'aide à la décision. Dans ce qui suit, après une présentation desdits effets, nous esquisserons les modèles d'interaction à court et à long terme.

4.4.3 Effets de l'interaction offre-demande

Les relations entre l'offre et la demande de stationnement sont très dynamiques. Nous distinguons trois situations différentes. La première situation relève d'une offre supérieure à la demande. Outre les faibles taux d'occupation des parcs, le gaspillage et la concurrence de consommation de l'espace¹⁴⁶, cet état de fait est contrebalancé car il induit une demande additionnelle de stationnement (Lam et *al.*, 1999). On se retrouve alors vite dans la deuxième situation où la demande excède l'offre. C'est le cas des centres urbains denses où la rareté de l'espace s'impose comme une contrainte

¹⁴⁶ Elle revient à l'occupation due au stationnement sur voirie en double file et aux manœuvres d'entrée et de sortie des espaces de stationnement hors voirie. Ce phénomène participe considérablement à la congestion routière.

majeure. Les effets de ce déséquilibre sont assez connus, principalement la congestion du stationnement et de la circulation.

La congestion du stationnement découle d'une situation de saturation de la capacité d'un parc ou de l'offre en général, avec un ratio volume de demande/capacité qui avoisine ou dépasse l'unité. Elle a pour conséquence d'allonger les temps de recherche de place et la durée des manœuvres d'entrée et de sortie des véhicules. Coppola affirmait déjà en 2002 qu'il existe une dépendance circulaire entre le volume de la demande et le temps de recherche.

La congestion de la circulation découle en partie de la demande excédentaire de stationnement qui se manifeste aussi bien par la formation des files d'attente à l'entrée des parcs que par la circulation de recherche de place entre différentes localisations. Ces véhicules se propagent sur le réseau, se mêlent au trafic existant et ralentissent les vitesses de circulation. Ce phénomène amplifie la congestion routière et prolonge les temps de parcours des conducteurs. Les conséquences de cette situation se matérialisent sous forme d'une pollution acoustique et atmosphérique, d'un gaspillage de ressources et plus généralement d'une dégradation de l'environnement et de la qualité de vie.

La gestion des interactions entre l'offre et la demande constitue la genèse même des politiques de stationnement. Aujourd'hui, la tendance revient à maîtriser la demande par l'offre, à travers une modification de ses caractéristiques comme la variation de la capacité, des prix, des types, le renforcement de la régulation et du contrôle, la réglementation d'accès et d'usage, etc. Les réactions comportementales de la demande face à ces mesures dépendent fortement du motif et des circonstances. Elles peuvent aboutir à des changements de localisation ou de type de stationnement, de l'heure de départ, du mode utilisé, de la destination finale, ou même par une annulation du déplacement (Feeney, 1989 ; Young et *al.*, 1991). Coombe et *al.* (1997) évoquent même un changement du taux d'occupation des véhicules, de la fréquence des déplacements, de la durée du stationnement et de l'itinéraire.

Il en résulte que la mise en œuvre sur le terrain de politiques de stationnement conduit à un basculement progressif des deux premières situations de déséquilibre vers une troisième qui est celle de l'équilibre, qui est optimale dans le sens où elle permet de satisfaire la demande et de garantir la performance de l'offre.

Bien que le but ultime, qui est de parvenir à l'équilibre, ne puisse jamais être obtenu dans le monde réel, le concept d'équilibre constitue la pierre angulaire pour modéliser les interactions entre l'offre et la demande, en présence ou non de congestion, de manière statique ou dynamique et avec des choix déterministes ou stochastiques.

4.4.4 Modélisation de l'équilibre de stationnement

Le concept d'équilibre est dérivé des principes fondamentaux de la théorie économique. Il fournit un cadre conceptuel adéquat pour la modélisation des interactions entre l'offre et la demande, et détermine les conditions dans lesquelles

l'utilisateur va effectuer son déplacement selon les qualités de l'offre en question. La modélisation de l'équilibre du stationnement a reçu très peu d'attention, et ce à cause d'une part, de la complexité du système et d'autre part, de la difficulté de traitement de l'axe temporel.

4.4.4.1 Intérêt des modèles d'équilibre de stationnement

Les modèles d'équilibre constituent des outils puissants de compréhension et d'évaluation des changements de comportement de la demande suite à une variation des qualités de l'offre. Ils proposent un éclairage pertinent sur les impacts de ces politiques à court et à long terme. Ces modèles admettent une grande variété d'applications et présentent un support efficace d'aide à la décision pour la planification stratégique et la conception des politiques de gestion de stationnement. La représentation conjointe des attributs de l'offre et des critères de choix de la demande dans ce type de modèle traduit le fonctionnement et l'évolution du système.

4.4.4.2 Temporalité des modèles d'équilibre de stationnement

Comme nous l'avons déjà évoqué au début de ce chapitre, les modèles de stationnement peuvent porter sur différentes échelles spatiales. Les modèles d'équilibre peuvent concerner des granularités temporelles différentes. Nous différencierons les modèles de court terme de ceux de long terme.

Modèles d'interaction à court terme

Nous nous intéresserons ici plus particulièrement aux modèles économiques et aux modèles d'affectation du trafic, qui ont été à l'origine d'avancées considérables dans l'approche de modélisation de l'équilibre du système de stationnement.

Les modèles d'affectation du trafic

Un modèle d'affectation du trafic routier simule le choix d'itinéraire opéré par un automobiliste sur un réseau routier, en fonction des caractéristiques du conducteur et du réseau (Leurent, 1995). Ce modèle présente l'avantage de relier des faits corrélés de choix des usagers, de la structure de l'offre (configuration, contrainte de capacité, volume des flux...) et d'affectation des flux sur les arcs. Il permet de simuler la réaction de la demande face à une modification de l'offre. Bien entendu, ce type de modèle est basé sur une approche réseau.

Le cadre conceptuel d'étude des problèmes d'affectation sur le réseau fournit un environnement approprié pour la modélisation de l'équilibre de stationnement. Ces modèles permettent l'affectation des véhicules aux espaces de stationnement concurrents juste avant ou en même temps que l'affectation des véhicules sur le réseau. Ils considèrent simultanément les choix d'itinéraire et les choix de localisation du stationnement, et permettent de déterminer de quelle façon les voitures se répartissent sur le réseau et dans les places des différents types de sites de

stationnement. Des arcs artificiels de stationnement et de marche sont ajoutés à la configuration initiale du réseau, engendrant des coûts supplémentaires pour l'utilisateur.

Les informations d'entrée d'un modèle d'équilibre sont constituées de deux éléments. D'une part, d'un sous-modèle de demande qui présente le résultat des processus de prise de décision des individus, considérés comme rationnels et omniscients. Le comportement de l'utilisateur suit donc une action d'optimisation qui revient à minimiser son coût généralisé de déplacement. D'autre part, d'un sous-modèle d'offre qui définit la configuration du réseau et les fonctions de chaque type de coût. Classiquement, en présence de stationnement, le coût généralisé pour un usager est composé du temps de parcours à bord du véhicule de l'origine à l'emplacement du stationnement choisi (très important, il dépend du temps de parcours à vide et de la charge du réseau), du temps de recherche de place dans le parc, du prix du stationnement et du temps de marche jusqu'à la destination finale. Chaque élément de ce coût est représenté par une fonction mathématique qui dépend des caractéristiques du modèle en question, avec une même unité de mesure et certains paramètres de pondération pour les valeurs de temps. L'estimation du coût généralisé se ramène à la somme de ses composantes.

La caractérisation de l'équilibre renvoie à un état stable soumis à des forces qui sont contrebalancées sous l'effet de la pression de la demande et de la réaction de l'offre (croissance du temps de parcours en fonction du débit et du temps de recherche de place dans un parc en fonction de son occupation). Le principe de base d'affectation à l'équilibre est la minimisation du coût généralisé pour tous les usagers. Ainsi, pour chaque paire O-D et chaque classe d'utilisateurs, l'équilibre de stationnement est atteint lorsque aucun conducteur ne peut réduire son coût en procédant unilatéralement à un autre choix, cette condition est appelée condition d'équilibre de l'utilisateur. Il en résulte qu'à l'équilibre, les coûts des options utilisées sont égaux et minimaux, inférieurs à ceux des options non utilisées. En ce sens, l'équilibre de stationnement est calqué sur l'équilibre d'affectation. L'état d'équilibre s'établit par calcul itératif à partir d'une affectation par tranches.

Les modèles d'affectation du trafic qui traitent le stationnement sont en mesure de simuler les effets de la congestion du réseau et de la congestion du stationnement, et ce par la prise en compte explicite des contraintes de capacité des arcs et des parcs. Ils peuvent porter sur un réseau monomodal ou multimodal. Bien qu'il existe une littérature de recherche extrêmement riche sur les modèles d'affectation du trafic, les modèles d'équilibre de stationnement sont assez rares.

La spécificité de modélisation du stationnement réside dans la façon de traiter son attrait temporel et sa dynamique d'incertitude de l'existence d'une place libre dans le lieu de destination. Ainsi, afin d'explicitier plus en profondeur les aspects particuliers des modèles d'équilibre de stationnement, nous avons choisi de les catégoriser d'abord comme statique et dynamique, ensuite comme déterministe et stochastique.

De l'équilibre statique à l'équilibre dynamique

La considération explicite de la dimension temporelle du système, de la variabilité de la demande et du chargement graduel des réseaux dans le temps font la différence entre un modèle statique et un modèle dynamique.

Les modèles d'équilibre statique

Un modèle statique présente l'état du système sur une période donnée, avec des niveaux de demande maintenue uniforme (*steady state traffic flow*) et en présence de conditions de trafic stationnaires (trafic moyen sans écoulement de temps) tout au long de la période de simulation. Les interactions offre-demande sont censées aboutir à une situation d'équilibre stable pendant ladite période.

Nour Eldin et *al.* (1981) ont développé un modèle différent des modèles traditionnels d'affectation en considérant l'interaction entre l'offre et la demande de stationnement par type et par localisation. Le réseau était caractérisé par type d'aire spatiale (CBD, banlieue résidentielle, centre du district externe au CBD et zone rurale). Une procédure d'affectation incrémentale a été utilisée avec chargement d'une partie de la matrice O-D dans un premier temps, ensuite des nouveaux temps de déplacement ont été calculés pour la partie restante. La procédure se poursuit jusqu'à l'équilibre. Bien que ce modèle n'ait pas été validé, sa méthode a été reprise dans les modèles suivants. Le modèle de Gur et Beimborn (1984) en fait partie. La demande était supposée uniforme pendant la période de simulation. Les temps de parcours étaient fixes et identiques pour tous les conducteurs. Un temps moyen de recherche a été calculé selon la capacité statique du parc, le volume de la demande et l'accumulation moyenne de véhicules pendant la période de simulation.

Lam et *al.* (1999) ont modélisé le choix d'itinéraire, de stationnement et de destination pour une demande élastique aux effets de la congestion routière. Les temps de parcours sur les arcs étaient continus et croissants en fonction des flux. La demande par zone a été générée à l'aide d'un modèle d'attraction pour déterminer la capacité minimale nécessaire selon les contraintes de la demande. Les coûts de stationnement dépendent du flux en libre accès au parc, du temps de recherche de place et du prix. Dans ce même ordre d'idées, un modèle d'équilibre bimodal (voiture et parc relais) a été proposé par Lam et *al.* (2007), en prenant en compte le choix d'itinéraire, de stationnement et de mode pour une demande élastique à la congestion. Un modèle d'équilibre multimodal a été développé par Zhi-Chun et *al.* (2007) pour l'évaluation des politiques de transport avec des contraintes de capacité. Dans ces deux derniers modèles, le coût de recherche dépend du flux en libre accès au parc et de la demande divisée par la capacité offerte. Pour l'ensemble de ces travaux, le temps de parcours correspond à la somme des coûts sur chaque arc emprunté. Il peut dépendre du volume des flux mais pas dans le temps. Par ailleurs, les temps de recherche sont calculés à partir d'un ratio volume/capacité. Bien qu'elle constitue un aspect primordial de modélisation du stationnement, l'accumulation des véhicules dans les parcs apparaît à la marge.

Même s'ils sont en mesure d'intégrer la congestion du trafic, les modèles statiques ne reflètent pas tout à fait la réalité, car ils ne peuvent capturer ni l'interaction entre véhicules sur le réseau, ni l'interaction entre les véhicules et l'infrastructure. La congestion du stationnement au sein des parcs ne peut donc être étudiée par ce type de modèle.

Les modèles d'équilibre dynamique

Les modèles dynamiques prennent explicitement en compte l'écoulement du temps ainsi que la propagation physique du trafic sur le réseau et le chargement des infrastructures de stationnement. Ils permettent de capturer les aspects temporels de l'état du réseau et des comportements de la demande et de prévoir les variations des flux résultant d'un changement instantané du niveau de la demande, des capacités du réseau, de la vitesse de circulation, de la congestion, ou de l'information en temps réel.

Souvent, l'intervalle d'affectation est divisé en plusieurs tranches temporelles de courte durée. Le seul lien entre deux tranches de temps successives est en rapport avec le calcul de l'occupation et le mécanisme de chargement de l'infrastructure de stationnement (Bifulco, 1993). La charge et le temps généralisé sont déterminés séparément pour chacune de ces tranches. Cette subdivision de l'intervalle de simulation illustre la variabilité des volumes de la demande de stationnement pendant la journée, même dans l'hypothèse d'une stabilité au sein de chaque tranche de temps. Les modèles dynamiques sont intéressants car ils permettent de représenter les états provisoires de saturation du réseau ainsi que l'évolution de la congestion de stationnement qui induit l'allongement des temps de recherche. Outre le choix d'itinéraire et de stationnement, un modèle dynamique peut être utilisé pour les choix de l'heure de départ ou d'arrivée et des durées de stationnement. On note enfin que dans un modèle dynamique, l'équilibre est calculé à chaque instant.

Du point de vue de la composition des fonctions des coûts de l'offre, les principales différences entre un modèle d'équilibre statique et un modèle d'équilibre dynamique concernent le calcul des coûts dans chaque intervalle de temps. On a ainsi les éléments suivants :

- le temps de parcours (*in vehicle travel time*) dépend du temps de parcours à vide, des flux sur les arcs et des retards dus aux conditions de trafic qui sont donc prises en compte ;
- le temps de recherche de place (*search delay time*) dépend du temps d'accès libre et du ratio volume/capacité, où l'accumulation totale est calculée par la différence entre les arrivées cumulées et les départs cumulés dans chaque période ;
- le coût monétaire (*parking charge*) dépend du prix horaire, de la durée de stationnement mais aussi de l'heure d'arrivée dans l'intervalle de simulation ;
- un coût supplémentaire de pénalité du temps d'arrivée (tôt ou tard) (*schedule delay cost*) est ajouté au coût généralisé dans chaque période de simulation.

La prise en compte de l'axe temporel et de la variabilité de la demande ajoute une dimension supplémentaire à la difficulté de modélisation du stationnement. En conséquence, il existe peu de références et très peu correspondent à des modèles dynamiques de stationnement.

Le modèle d'équilibre stochastique de Bifulco (1993) est le premier du genre. L'auteur a pris en compte une seule tranche de temps et a développé une fonction de recherche assez compliquée qui intègre le nombre de places par zone, le nombre de places en compétition dans une même zone, l'occupation des parcs au début et à la fin de la simulation par type d'offre (sur voirie, hors voirie), la vitesse de recherche et la longueur moyenne d'une place de stationnement, tout en différenciant les cas de sous et de sursaturation. La complexité tient au fait de considérer que la demande d'une zone peut être satisfaite par l'offre des zones voisines. Néanmoins, l'effet du trafic additionnel de recherche de place sur la congestion routière n'a pas été simulé.

Des modèles d'équilibre dynamique multi-usagers ont été proposés par Lam et *al.* (2006)¹⁴⁷ et Zhi-Chun et *al.* (2007) pour la simulation des choix d'heure de départ, d'itinéraire, de localisation et de durée de stationnement. La principale différence entre ces travaux consiste dans l'intégration de la demande fixe pour le premier et élastique au prix pour le second. Le travail de Zhi-Chun et *al.* (2008) appartient à cette même catégorie. Il se particularise cependant par la stochasticité de la demande. L'étude de Gallo et *al.* (2011) présente un modèle d'affectation à l'équilibre qui prend en compte le choix de stationnement. L'auteur a simulé le trafic additionnel de recherche de place sur les arcs du réseau. Pour ce faire, il a présenté une configuration multicouche avec une couche pour les déplacements (temps de parcours), une couche pour la recherche sur le réseau et une dernière couche pour la marche. Une application sur le réseau de la ville de Benevento (Italie) a été effectuée et le modèle semble prometteur pour la simulation des impacts de la congestion du trafic. Mentionnons enfin que les modèles d'affectation dynamique à l'équilibre qui étudient les choix de stationnement sont tous basés sur l'approche des déplacements, la seule exception étant celle de Huang et *al.* (2005) dont le modèle porte sur un paradigme basé sur les activités.

En résumé, en raison de la nature dynamique du système de stationnement et de l'incertitude sur la disponibilité de places libres, les modèles dynamiques semblent les mieux placés pour sa modélisation. D'ailleurs, la comparaison des résultats d'un modèle dynamique et d'un modèle statique a montré que ce dernier type de modèle sous-estime les durées moyennes de stationnement et surestime la rotation moyenne, l'occupation moyenne des parcs et les recettes de stationnement hors voirie – et vice versa pour le stationnement sur voirie (Lam et *al.*, 2006). Les modèles statiques définissent un état d'équilibre dont l'intérêt est de caractériser, voire de quantifier, les effets à l'origine du déséquilibre du système de stationnement sans caractériser l'interaction spatiale et temporelle entre le trafic et la congestion du stationnement. Ils sont incapables de représenter des phénomènes pertinents comme la variation de la demande au fil du temps et les effets de la saturation du réseau et du stationnement. Enfin, on ne doit pas perdre de vue que la mise en place des modèles dynamiques nécessite un travail fastidieux de construction et une quantité considérable de données.

¹⁴⁷ Les files d'attente physiques des véhicules sur les itinéraires ne sont pas prises en considération.

C'est la raison pour laquelle les modèles statiques sont les plus développés car plus simples à traiter.

De l'équilibre déterministe à l'équilibre stochastique

La distinction entre un modèle déterministe et un modèle stochastique dépend de la caractérisation des effets aléatoires. Un modèle déterministe considère que les usagers disposent d'une information parfaite sur l'état du réseau et du stationnement, qu'ils sont identiques et qu'ils choisissent en toute connaissance de cause et de façon purement rationnelle. Un modèle stochastique représente la variabilité de perception des coûts par les usagers sur le réseau. La stochasticité reflète l'incertitude de la décision ou l'incertitude reliée au monde réel. Les différences de perception peuvent être attribuées à une différence objective de définition des choix, à des différences de perception du degré d'information mais aussi aux effets de la congestion. Une caractéristique propre à ces modèles est qu'ils écartent l'hypothèse standard d'information parfaite de l'utilisateur, les choix de la demande se basent ainsi sur des utilités perçues. Une question capitale dans les modèles stochastiques est celle de la loi de distribution du terme aléatoire de l'utilité.

Hormis dans les cas d'une réservation de place ou de la disponibilité de l'information en temps réel, l'incertitude caractérise désormais le choix de stationnement. Un usager ne peut jamais être à cent pour cent certain de la disponibilité de la place souhaitée à proximité de son lieu de destination. Les modèles stochastiques explicitent bien cette particularité¹⁴⁸. Néanmoins, le développement de ce type de modèle demeure assez limité. Mis à part Bifulco (1993), Zhi-Chun et *al.* (2008) et Gallo et *al.* (2011), les modèles d'équilibre de stationnement sont tous déterministes. Cet état de fait est lié aux difficultés opérationnelles et pratiques de leur application.

Méthodes mathématiques et solutions algorithmiques de résolution de l'équilibre

Les méthodes de calcul des modèles d'affectation du trafic et du stationnement à l'équilibre sont utilisées en identifiant, généralement, des problèmes mathématiques dont les spécificités répondent aux propriétés des réseaux et du modèle en question. L'équilibre peut être formulé à travers une programmation mathématique à un seul ou à deux niveaux, souvent comme un problème de point fixe (Bifulco, 1993 ; Zhi-Chun et *al.*, 2008 ; Gallo et *al.*, 2011) ou comme un problème d'inéquation variationnelle (Gracia et *al.*, 2002 ; Huang et *al.*, 2005 ; Lam et *al.*, 2006 ; Lam et *al.*, 2007). Ensuite, des solutions algorithmiques permettent de résoudre numériquement le problème, par un processus itératif qui progresse vers un optimum global. Les algorithmes de Frank-

¹⁴⁸ Dans Zhi-Chun et *al.* (2008), l'équilibre stochastique est atteint lorsque « for each OD pair and each user class, no traveler can improve his or her perceived expected travel disutility by unilaterally changing Departure time, route or parking location », ce qui revient à dire que « at equilibrium the perceived expected travel disutilities of all of the used combinations of departure time, route and parking location are equal and minimal, and the perceived expected travel disutility of any unused combination of departure time, route and parking location is greater than or equal to the minimal perceived expected travel disutility », p.367.

Wolfe, de Monte-Carlo et du gradient, et la méthode des moyennes successives sont assez répandus. À ce niveau se posent aussi les questions de convergence et d'unicité de l'équilibre.

Développement de scénarios de politiques de stationnement

À travers des applications de cas numériques, les modèles d'affectation à l'équilibre permettent de tester les effets de différents leviers des politiques de stationnement sur le système lui-même et sur les conditions de circulation, en modifiant certaines variables d'entrée. Différents scénarios sont développés et analysés dans la littérature académique, selon l'objectif de chaque modèle.

Gur et Beimborn (1984) ont montré qu'une augmentation du volume de la demande aboutit à une saturation de l'offre de stationnement et à la formation des files d'attente. Dans une approche dynamique, ce scénario délocalise vers l'avant la pointe de départ des usagers qui cherchent à réduire les pénalités de retard d'arrivée et par conséquent la pointe de stationnement (Lam et *al.*, 2006).

L'accroissement de la capacité totale de l'offre prend deux formes, soit par l'augmentation du nombre de places dans les parcs existants, soit par l'ajout de nouvelles aires de stationnement. Dans le premier cas, on constate une réduction du coût de déplacement – temps de parcours et de stationnement – (Huang et *al.*, 2005), de la congestion du trafic (Lam et *al.*, 2006) et du stationnement illégal (Zhi-Chun et *al.*, 2008). Dans le deuxième cas, une demande supplémentaire est induite et un changement des comportements de choix est constaté (Gur et Beimborn, 1984), tandis que la désutilité des déplacements et le temps de parcours sont plus importants (Zhi-Chun et *al.*, 2007).

Le prix est une variable significative de choix de stationnement et les chercheurs n'ont pas manqué d'étudier l'effet de l'augmentation et du doublement du prix sur les comportements des conducteurs – c'est d'ailleurs le scénario le plus répandu. On a constaté que le prix influence significativement l'occupation, le profil d'accumulation et le niveau de congestion de stationnement (Lam et *al.*, 2006). Dans un contexte multimodal, il peut induire un report important vers les transports en commun (Zhi-Chun et *al.*, 2008).

La réaction de la demande face à l'augmentation du montant de l'amende du stationnement illégal ou à un renforcement du niveau de régulation et de contrôle consiste à procéder à un report vers d'autres localisations légales. Ce type de réaction touche plutôt les usagers avec de longues durées de stationnement, comme les pendulaires (Gur et Beimborn, 1984). Il est à noter enfin que le couplage entre deux leviers peut aussi être opéré.

Limites des modèles d'affectation à l'équilibre

Les modèles d'affectation à l'équilibre constituent un support considérable d'aide à la décision dans la conception des politiques de stationnement. L'intervalle temporel

observé est souvent réduit à la journée ou aux heures de pointe, la prise en compte de plusieurs jours successifs fait défaut. Ces modèles ne sont donc en mesure d'étudier les réactions comportementales de la demande face à un changement de l'offre qu'à court, voire à très court terme. Les réactions admissibles sont limitées essentiellement à un changement de type ou d'emplacement du stationnement, à la modification de l'heure de départ ou à l'annulation du déplacement. D'autres réactions à moyen et à long terme (modification de destination, du mode de déplacement...) sont étudiées de façon marginale. Une autre lacune tient dans le fait que ces modèles n'intègrent pas beaucoup de variables explicatives des choix. Enfin, dans le sens où ils sont souvent validés par des applications numériques et pas sur un réseau réel, leur portée opérationnelle demande beaucoup de données et d'efforts.

Les modèles d'équilibre économique

Sur ce sujet, la littérature est assez restreinte (Arnott et Rowse, 2009 ; Arnott, 1999, Arnott et *al.*, 1991). Ces modèles s'attachent à étudier le stationnement sous sa dimension économique. Leur structure répond aux standards de l'économie traditionnelle dans la mesure où ils représentent pleinement les mécanismes théoriques du marché. L'équilibre entre offre et demande est atteint à la fois pour les comportements des usagers et pour le marché unique de stationnement. Ils partent du constat que sans tarification, l'équilibre du marché est inefficace socialement, que les places de stationnement souffrent du problème des ressources de propriété commune et qu'à l'équilibre, l'ajustement de la demande à l'offre s'établit par un prix de marché équivalent au coût marginal¹⁴⁹.

Souvent, un modèle porte sur un motif de déplacement et un type de stationnement donnés. Une comparaison des situations d'équilibre avec et sans tarification du stationnement avec l'optimum social du système amène à proposer la politique tarifaire la plus convenable. Certains modèles étudient les effets du phénomène de recherche de places et de la saturation de l'offre sur la congestion.

Dans ce qui suit, nous résumerons, en guise d'illustration, le propos de certains modèles. Arnott et *al.* (1991) ont construit un modèle dynamique d'équilibre déterministe pour étudier les effets de la tarification du stationnement sur la congestion dans le centre d'affaires aux heures de pointe du matin sur une route étroite, avec une capacité maximale par unité de temps. Ils ont étudié et comparé l'efficacité d'un péage routier sous différents régimes, avec et sans prise en compte du stationnement, pour dégager le profil spatial optimal de tarification. Ils ont montré qu'en présence de stationnement, le coût des files d'attente peut être éliminé et les retards engendrés peuvent être minimisés par la mise en œuvre d'un péage routier variable dans le temps et d'une tarification de stationnement dépendante de la localisation des places : ainsi, l'optimum social est atteint. Le modèle a porté sur le

¹⁴⁹ La tarification du stationnement est considérée comme un moyen efficace de gestion de la congestion et de réduction de la demande de déplacement. En la comparant au péage urbain, elle semble un moyen plus acceptable et plus facile à mettre en place. Elle favorise la rotation des places et de courtes durées de stationnement.

stationnement sur voirie pour les pendulaires supposés identiques et ayant une même préférence d'heure d'arrivée. Les éléments de coût, tels que le temps d'attente, le temps de marche, le délai de retard prévu, le coût du péage et les frais de stationnement, ont été pris en considération. Les principales lacunes de ce modèle concernent la représentation du centre comme une ligne dans l'espace et le fait qu'il se focalise sur les déplacements du matin sans attacher d'importance aux déplacements des pendulaires aux heures de pointe du soir.

L'extension¹⁵⁰ de ce modèle a été réalisée par Zhang *et al.* (2008), qui ont supposé que les déplacements du matin et du soir ne sont pas symétriques et qu'il convient de les étudier différemment. Le modèle a caractérisé l'équilibre de Nash pour les déplacements du soir et le cas particulier de l'équilibre de l'utilisateur (pour lequel les coûts de déplacement sont identiques et ne peuvent être réduits de façon individuelle) pour traiter les déplacements du matin. La demande de déplacement du soir a été retenue comme fixe, et celle du matin comme élastique. Différents régimes d'équilibre ont été analysés pour le cas d'une ville linéaire simplifiée avec deux zones, l'une de travail et l'autre de résidence. Les auteurs ont conclu que le péage routier du soir affecte tous les déplacements (du matin et du soir), tandis que celui du matin est sans impact sur les déplacements du soir. Ainsi, ils ont proposé pour les déplacements matinaux un péage variable dans le temps et une tarification du stationnement dépendante des localisations, et pour le soir un péage urbain. L'optimum du système ne peut être atteint que par la mise en place simultanée d'un péage routier et de la tarification du stationnement.

Anderson et De Palma (2004) se sont intéressés à la recherche de place pour des déplacements peu fréquents et de courte durée. Ils ont trouvé que dans le cadre d'un marché de concurrence monopolistique, les propriétés privées de parcs peuvent conduire à une décentralisation de la configuration de l'optimum, si un arbitrage est fait entre le prix proposé et le volume de la demande dans un parc. Plus le prix est élevé, plus bas sera le niveau de la congestion à l'équilibre. Leur travail de 2007 a cherché à savoir comment le stationnement influence la configuration spatiale de la ville. L'optimum social a été analysé pour une offre avec et sans réservation de place, et avec des opérateurs privés de stationnement.

Conscients du fait que le stationnement n'est pas un service comme les autres, conscients également de l'incertitude qui entrave la disponibilité de place, Arnott et Rowse (1999) se sont intéressés à l'équilibre stochastique stable du marché de stationnement. Ils ont essayé de modéliser l'effet stochastique de la disponibilité de places libres et de leur externalité. L'objectif était de savoir de quelle façon les prix doivent être fixés en présence de congestion de stationnement. Une comparaison entre l'équilibre avant et après la mise en place de la tarification est élaborée. Les résultats montrent que le prix de stationnement doit être fixé au niveau de la valeur de l'externalité de la congestion et qu'un prix qui décentralise l'optimum social ne garantit pas de l'atteindre. Dans ce travail, la congestion routière a été ignorée. De même, l'homogénéité spatiale et temporelle a été considérée avec un nombre fixe de places de

¹⁵⁰ Les modèles d'Arnott et al. (1991) et de Zhang et al. (2008) constituent une extension de celui de Vickrey (1969).

stationnement par unité de distance. Ce modèle se heurte à un niveau élevé de complexité.

Arnott (2006) a traité le cas d'une demande élastique. Il a étudié la concurrence spatiale entre les garages de stationnement dans le centre-ville. Il a traité le cas de plusieurs opérateurs privés en considérant la contrainte de capacité à l'équilibre. En présence de stationnement sur voirie, le niveau de recherche de place ajuste à l'équilibre le coût des deux types de stationnement et le prix équivaut au coût marginal. Le modèle présente l'avantage de proposer un équilibre unique et en état stable. Le travail d'Arnott et Rowse (2009) se place dans cette même voie de recherche.

Limites des modèles d'équilibre économique

Le niveau de sophistication des modèles d'équilibre économique du stationnement demeure limité pour représenter la dynamique du stationnement. Les hypothèses adoptées réduisent le degré de réalisme des modèles. Souvent, la distribution de l'offre est considérée comme homogène d'un point de vue spatial et dans un état stable, ce qui est loin d'être le cas dans la réalité où elle est répartie de façon discontinue. L'offre n'est donc pas inscrite convenablement dans son contexte spatial. Par ailleurs, elle se présente plutôt comme une variable exogène, de ce fait la contrainte de capacité n'est pas toujours explicitée. Du côté de la demande, celle-ci est généralement considérée comme fixe et stable, et les individus sont considérés comme identiques avec une destination commune. Les questions de stabilité et d'unicité de l'équilibre, traitées en termes de coûts individuels et sociaux, sont d'une importance capitale. Les futurs travaux devront approfondir les questions de l'hétérogénéité de la demande et ses caractéristiques socio-économiques (motifs, valeurs du temps, durées, distances de déplacement...), mettre davantage l'accent sur la congestion routière due à la circulation de recherche de place et évaluer ses effets. Il convient aussi de considérer différents segments de l'offre du marché du stationnement, par exemple le cas de l'offre privée de stationnement réservé par l'employeur, du stationnement résidentiel ou les cas de complémentarité ou de concurrence entre stationnement sur voirie, en ouvrage et en souterrain.

Modèles d'interaction à long terme

Certaines réactions comportementales de la demande face aux changements de l'offre de stationnement surviennent à moyen et à long terme, comme le changement de destination, de localisation résidentielle ou de lieu de travail et les décisions de motorisation. La modélisation de la boucle de rétroaction offre-demande et des réponses comportementales à long terme fait défaut dans la modélisation du stationnement. On peut même parler de pénurie de modèles.

Le modèle CLAMP (*Computer-based Local Area Model of Parking Behaviour*) est un modèle typique et unique à ce titre (Polak et Axhausen, 1989 ; Bates et Bradley, 1986). Développé au cours des années 1980, ce modèle fournit une aide pour la conception et la gestion des politiques de stationnement (tarification, localisation, type, régulation)

selon l'échelle de prise de décision. Son avantage majeur est qu'il permet de capturer les différentes dimensions et de saisir les rétroactions importantes entre les politiques de stationnement et les différentes dimensions de la demande de déplacement.

Le cadre conceptuel du modèle est basé sur une représentation réaliste et dynamique de la configuration spatiale du centre-ville – où les niveaux de congestion sont les plus importants –, de la structure du réseau et des comportements de déplacement. L'offre est définie par types, capacités, prix, avec considération explicite de la congestion relative au nombre de véhicules en circulation. La demande est désagrégée par motifs, heures de départ vers le centre, durées de stationnement et par une variable socioéconomique utilisée comme variable proxy. Les comportements sont étudiés à un niveau désagrégé pour le choix du mode et du type de stationnement des automobilistes entrants dans le centre-ville, puis à un niveau agrégé pour lequel la redistribution de la demande exogène s'effectue vers le centre sur la période de temps, afin de calculer les choix par destination et par tranche de temps. Une fois que ce niveau de demande est connu pour la période de temps, une approche de microsimulation est employée pour modéliser les choix du mode et du type de stationnement (Young et *al.*, 1991).

CLAMP permet d'estimer les déplacements des individus durant des périodes successives pendant la journée et pour des journées successives. Selon Young et *al.* (1991), les interactions entre la demande, le réseau et l'offre de stationnement se manifestent à trois niveaux consécutifs :

à l'intérieur d'une période de temps : relation entre le volume de la demande et le report modal ainsi que le niveau de congestion et son impact sur le choix de stationnement ; dans l'interaction entre les périodes : cela survient lorsque les sorties d'une période affectent les entrées d'une autre, comme les arrivées et les départs des conducteurs pour le stationnement ; dans l'interaction entre les jours : pour représenter les interactions à court et à long terme des politiques de stationnement. CLAMP est considéré comme le modèle de simulation des comportements de choix de stationnement le plus complet. Il a été utilisé pour étudier un large éventail de politiques de stationnement dans des villes européennes.

En résumé, puisque le stationnement est l'un des maillons de la chaîne de déplacement et que les effets des politiques de stationnement sont variables au fil du temps, il est urgent de développer les modèles d'interaction qui traitent non seulement les interdépendances entre offre et demande de stationnement mais aussi celles entre stationnement et autres choix de déplacement. Ce besoin concerne aussi les modèles d'interaction à long terme entre le système de stationnement et le système d'usage de sol.

4.5 Synthèse et conclusion

L'objectif de ce chapitre était de proposer une revue bibliographique des modèles spatialisés de stationnement en mettant l'accent sur les représentations de l'offre, de la demande et de leurs interactions, dans le temps et dans l'espace. Le tableau ci-dessous récapitule les principales caractéristiques des modèles de stationnement.

Tableau 4.1 : Principales caractéristiques des modèles de stationnement.

	Modèles comportementaux	Modèles microscopiques de trafic	Modèles macroscopiques de trafic
Approche de modélisation	Théorie de choix discrets	Modèle de types multi- agents	Modèle d'équilibre de trafic
Comportement de la demande	<ul style="list-style-type: none"> - Choix de type/localisation de stationnement - Choix d'itinéraire - Comportement de recherche de stationnement 	<ul style="list-style-type: none"> - Choix de type/localisation de stationnement - Choix d'itinéraire - Choix de recherche de stationnement 	<ul style="list-style-type: none"> - Choix de type/localisation de stationnement - Choix d'itinéraire - Choix de recherche de stationnement
Représentation de l'offre	<ul style="list-style-type: none"> - Type de places - Mode de gestion 	<ul style="list-style-type: none"> - Type et localisation - Mode de gestion - Remplissage 	<ul style="list-style-type: none"> - Type et localisation - Mode de gestion - Remplissage
Représentation de l'espace	Implicite et agrégée	Explicite et désagrégée	Explicite et agrégée
Interaction circulation- stationnement	Implicite	Explicite, sans circuitage	Explicite, avec circuitage
Principales références	<ul style="list-style-type: none"> - Hunt et Temply (1993) - Hensher et King (2001) - Thompson et Richardson (1998) - Kaplan et Bekhor (2011) 	<ul style="list-style-type: none"> - Benenson et al., (2008) - Dieussaert et al., (2009) - Waraich et Axhausen (2012) - Guo et al., (2013) 	<ul style="list-style-type: none"> - Bifulco (1993) - Lam et al., (2006) - Gallo et al., (2011) - Boyles et al., (2015)

Notre analyse révèle une grande hétérogénéité des modèles développés. La modélisation a commencé à se faire jour au début des années 1970 pour répondre au besoin de la planification des transports. Au fil du temps, les problématiques étudiées se sont diversifiées ainsi que les méthodologies appliquées. Néanmoins, aucun modèle ne semble, jusqu'à présent, être capable d'appréhender l'ensemble du système de stationnement de manière satisfaisante. Chaque modèle correspond à un problème spécifique, porte sur une échelle spatiale et temporelle déterminée et traite d'aspects limités, d'où la naissance de différentes familles de modèles. Il apparaît donc que la modélisation du stationnement n'est pas un problème compliqué mais complexe, ce qui signifie que la difficulté réside non pas dans l'appréhension et la compréhension

des mécanismes du système, mais plutôt dans ses représentations et dans la reproduction de ses interactions spatiotemporelles. Cette complexité est encore plus considérable si le modélisateur s'efforce de placer le stationnement dans le cadre de son système de transport en particulier et dans celui du système urbain en général, afin d'examiner les effets aussi bien à l'échelle macroscopique que microscopique ainsi qu'à court, moyen voire long terme. La modélisation du stationnement présente donc de multiples enjeux.

Une représentation partielle de l'offre, de la demande ou de leurs interactions entravent les modèles développés. Plusieurs conclusions pragmatiques peuvent déjà être tirées pour guider le choix d'un modèle dans le futur. Du côté de la demande, la caractérisation tend à privilégier un traitement désagrégé, qui met en lumière sa dynamique et sa variabilité dans l'espace et dans le temps, l'hétérogénéité de perception des usagers, leur sensibilité à la qualité de l'offre et aux conditions du trafic, et les mécanismes de leurs choix. Croisées avec l'incertitude sur la disponibilité des places, les considérations énumérées ouvrent la voie au développement de modèles stochastiques, qui considèrent une demande multiclasse et élastique à l'offre. Du côté de l'offre, une caractérisation abstraite a marqué les modèles existants. Si le prix, le type et la localisation sont les attributs communs de représentation, la capacité de l'offre se présente plutôt comme une contrainte pour le modélisateur. La difficulté majeure réside dans la manière représenter le phénomène d'accumulation des véhicules sur les lieux de stationnement et de modéliser l'interdépendance entre différentes périodes de temps. Le traitement dynamique de la variabilité de charge au fil du temps est si difficile qu'aucun consensus méthodologique n'a encore été trouvé qui propose une approche générale et efficace pour la modéliser.

L'interaction de l'offre et de la demande est résolument dynamique. Les modèles d'équilibre de stationnement reposent sur la confrontation des comportements de la demande aux qualités de l'offre. Une dépendance structurelle marque la relation entre l'offre et la demande dans le temps et dans l'espace. Le temps de recherche de place dépend de la capacité de l'offre et du volume de la demande, les choix des usagers sont stochastiques à cause de l'incertitude sur la disponibilité de places. La modélisation des interactions a reçu très peu d'attention et l'approche statique tend à prévaloir dans les modèles, tandis que l'approche dynamique est un sujet d'intérêt relativement récent.

Afin de garantir un certain réalisme physique, économique et fonctionnel du système simulé, les améliorations de la modélisation du stationnement doivent passer d'abord et avant tout par une meilleure caractérisation des interactions entre l'offre et la demande. C'est la clé de voûte grâce à laquelle l'étude des effets de l'interdépendance entre la circulation et le stationnement devient possible. Par ailleurs, la modélisation du stationnement exige de l'inscrire dans son contexte spatial. Les modèles ont porté sur une échelle unique d'usage de sol, il convient de développer des modèles multi-échelle.

