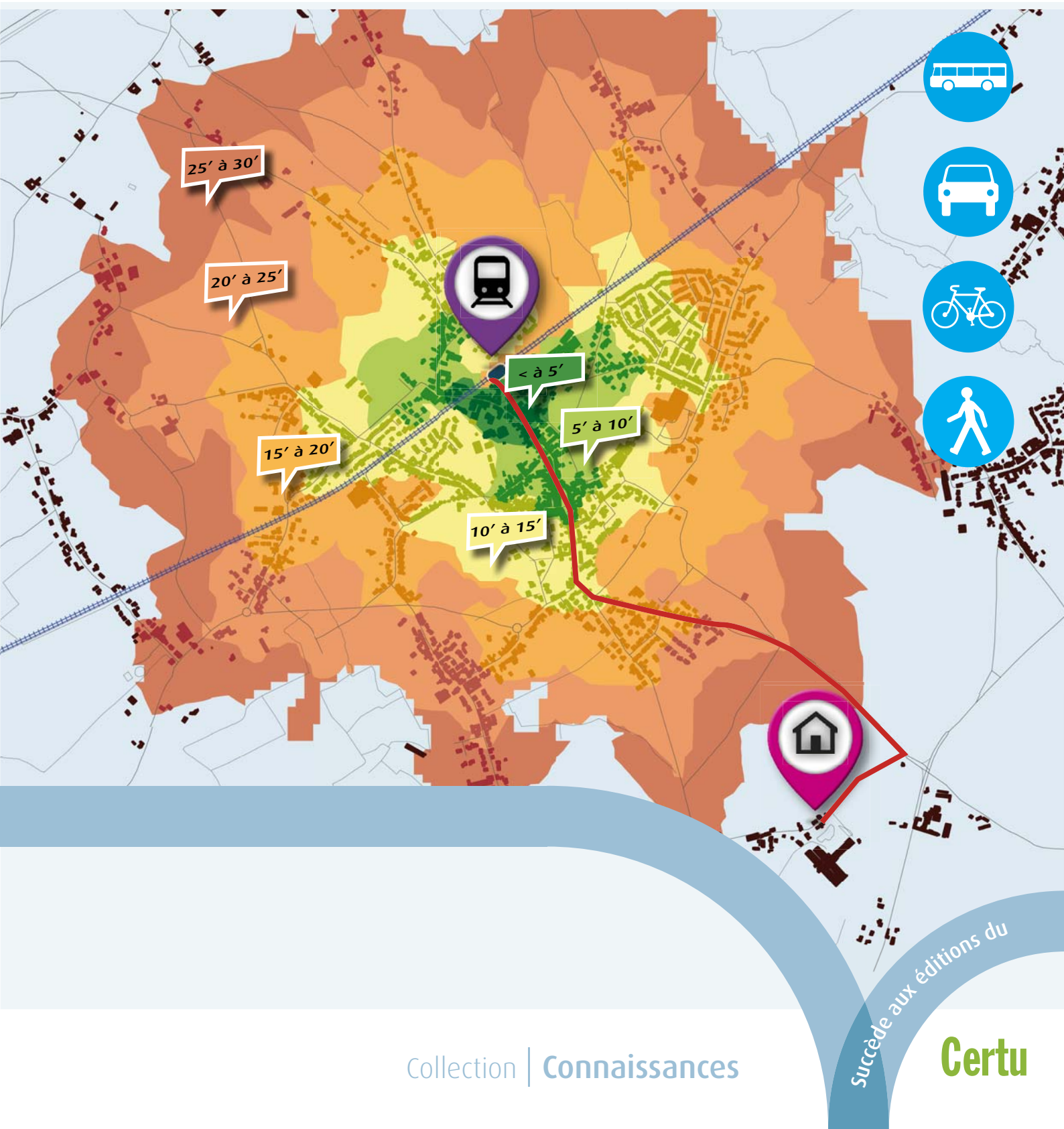


Mesurer l'accessibilité multimodale des territoires

État des lieux et analyse des pratiques



Mesurer l'accessibilité multimodale des territoires

État des lieux et analyse des pratiques

Juin 2015

Collection Connaissances

Cette collection présente l'état des connaissances à un moment donné et délivre de l'information sur un sujet, sans pour autant prétendre à l'exhaustivité. Elle offre une mise à jour des savoirs et pratiques professionnelles incluant de nouvelles approches techniques ou méthodologiques. Elle s'adresse à des professionnels souhaitant maintenir et approfondir leurs connaissances sur des domaines techniques en évolution constante. Les éléments présentés peuvent être considérés comme des préconisations, sans avoir le statut de références validées.

Remerciements

Cet ouvrage est le fruit d'une étude commandée au Cerema par la direction générale des Infrastructures, des Transports et de la Mer (DGITM).

Le groupe de travail ayant réalisé les entretiens auprès des maîtres d'ouvrage et des producteurs d'étude d'accessibilité a été piloté par Laurent Chevereau (Cerema – Territoires et ville). Il était composé de Aurélie Bousquet et David Caubel (Cerema – Centre-Est), Muriel Etcheverry (Cerema – Sud-Ouest), Patrick Gendre (Cerema – Méditerranée) et Patrick Palmier (Cerema – Nord-Picardie).

L'ouvrage a été rédigé par Aurélie Bousquet et David Caubel (Cerema – Centre-Est), sous la coordination de Laurent Chevereau (Cerema – Territoires et ville).

Le Cerema remercie l'ensemble des acteurs interrogés :

Thibaut Descroux, agence d'urbanisme de Lyon,
Katia Ox et Daniel Zobèle, agence d'urbanisme de la région stéphanoise (epures),
Emmanuel Raoult, agence d'urbanisme de la région grenobloise,
Grégory Jean, association Au fil des Séounes,
Olivier Richard, Cerema – Centre-Est,
Mathieu Jacquot, Marc Rauch et Ludovic Huchet, Cerema – Est,
Laura Clergue, Benjamin Saubion, Cerema – Méditerranée,
Thomas Anselme et Pascale Gondeaux, Cerema – Normandie-Centre,
Fabrice Hasiak, Arnaud Lannoy, Sylvie Mathon, Patrick Palmier, Cyprien Richer et Bertrand Zogall, Cerema – Nord-Picardie,
Emmanuel Gambet, Cerema – Ouest,
Lydie Forfanfant, Cerema – Sud-Ouest,
Simon Caen et Hélène Clot, La Métro, métropole de Grenoble,
Jean-Christophe Holderic, Dreal Nord – Pas-de-Calais,
Fabienne Bogiatto, Dreal Aquitaine,
Tram Simonet, DRIEA,
Marie Soulatges, EM-Services (filiale de la RATP),
Damien Dotta et Jacques Pougard, Insee – Direction régionale PACA,
Aurélien Mercier, laboratoire d'Économie des Transports UMR CNRS – ENTPE,
Thomas Leyssens et Alain l'Hostis, laboratoire Ville Mobilités et Territoires UMR IFSTTAR – École des Ponts,
Pierre Franc, MEDDE / DGITM / SAGS,
Julie Jannequin et Cyril Bloudeau, MobiGIS.

Le Cerema remercie également l'ensemble des relecteurs :

Katia Ox et Daniel Zobèle, agence d'urbanisme de la région stéphanoise (epures),
Patrick Gendre, Cerema – Méditerranée,
Thomas Anselme, Cerema – Normandie-Centre,
Muriel Etcheverry, Cerema – Sud-Ouest,
Nicolas Gillio, Cerema – Territoires et ville,
Jean-Christophe Holderic, Dreal Nord – Pas-de-Calais,
Dany Nguyen-Luong, IAU île-de-France,
Aurélien Mercier, laboratoire d'Économie des Transports UMR CNRS – ENTPE,
Julie Vegas, MobiGIS.

Avertissement

La liste de logiciels étudiée dans cet ouvrage n'est pas exhaustive

L'analyse est restreinte aux logiciels utilisés par le groupe de travail ou par un des producteurs d'études interrogés. Leur liste figure en annexe B.

Les informations fournies sur les logiciels ne sont pas garanties

Les éléments qui figurent dans cet ouvrage sont issus de la documentation des logiciels ou d'informations transmises par leurs utilisateurs. Les logiciels n'ont pas été testés en totalité par les auteurs de l'étude. Des imprécisions ou même des erreurs ont donc pu se glisser dans l'analyse. Ce document peut aider le lecteur à mieux cerner ses besoins et à faire un premier tri des logiciels qui y répondent le mieux. Néanmoins, pour les raisons mentionnées ci-dessus, il lui est recommandé de ne l'utiliser qu'à titre indicatif, celui-ci ne remplaçant pas le contact avec les différents distributeurs, une démonstration ou des contacts avec des utilisateurs. Le Cerema ne pourrait être tenu responsable d'éventuelles déconvenues.

Sommaire

Introduction	5
1. Définition et utilisation opérationnelle du concept d'accessibilité	6
1.1 Définition de l'accessibilité	6
1.2 Quelles applications au concept d'accessibilité ?	7
1.3 Contexte de réalisation des études d'accessibilité en France	9
2. Méthodologies de calcul de l'accessibilité	10
2.1 Grandes familles d'indicateurs	10
2.2 Mise en œuvre des indicateurs	27
2.3 Synthèse	42
3. Données et logiciels utilisés	43
3.1 Obtention et mise en forme des données nécessaires	44
3.2 Calcul d'itinéraires	51
3.3 Calcul des indicateurs d'accessibilité	56
3.4 Représentations graphiques et cartographiques	57
3.5 Constats et préconisations sur les logiciels	58
4. Synthèse	60
Bibliographie	61
Annexes	67
Annexe A - Liste et résumés des études ayant fait l'objet d'un entretien avec leur producteur	67
Annexe B - Liste des outils logiciels ayant fait l'objet d'une analyse	73

Introduction

Le concept d'accessibilité des territoires permet de comprendre les enjeux de la mobilité, en évaluant les capacités de desserte des réseaux de transport, en lien avec les usages des territoires et éventuellement avec la demande de déplacements qu'ils génèrent.

Le présent ouvrage s'adresse principalement à des chargés d'études mettant en œuvre des analyses d'accessibilité des territoires. Il propose un retour d'expérience sur les pratiques et les difficultés rencontrées, ainsi que des éléments de méthode pour réaliser de telles études. L'accessibilité est considérée ici dans un contexte multimodal, c'est-à-dire qu'elle peut concerner les transports collectifs, les modes individuels (voiture, vélo, marche) et leurs combinaisons.

Pour élaborer cet ouvrage, des entretiens ont été menés avec deux types d'acteurs : des producteurs et des commanditaires d'études d'accessibilité. Les informations recueillies lors de ces entretiens ont été complétées par les éléments apportés par le groupe de travail réunissant quatre directions territoriales (Nord-Picardie, Sud-Ouest, Méditerranée et Centre-Est) et la direction technique Territoires et ville du Cerema, ainsi que par un travail bibliographique.

Le recensement exhaustif des méthodes et des acteurs n'étant pas envisageable, le groupe de travail a cherché à établir une liste représentative des principaux producteurs d'études d'accessibilité et à diversifier les travaux considérés sur le plan de leurs finalités, ainsi que sur celui des outils et des méthodes utilisés. Les acteurs interrogés par le groupe de travail sont les producteurs d'études du Cerema ainsi que quelques producteurs d'études extérieurs : deux bureaux d'études privés, trois agences d'urbanisme et deux laboratoires de recherche. Les entretiens avec les producteurs d'études ont permis de réaliser un tour d'horizon des méthodes et des outils logiciels que ceux-ci utilisent ainsi que des difficultés qu'ils rencontrent dans la conduite des études d'accessibilité. En complément, quelques entretiens avec des commanditaires d'études ont été menés afin de mieux identifier ce qu'ils en attendent et de cerner les difficultés qu'ils peuvent rencontrer dans leur suivi. La liste des acteurs interrogés figure au début de cet ouvrage, dans la rubrique « Remerciements ». Les études considérées sont présentées en annexe, p. 68 : elles sont numérotées de A à U et souvent mentionnées dans le texte pour illustrer une méthode ou un indicateur. Les logiciels sont présentés en annexe, p. 74.

1. Définition et utilisation opérationnelle du concept d'accessibilité

Dans ce chapitre, nous proposons une définition de la notion d'accessibilité, puis, à partir des entretiens réalisés avec les acteurs, nous identifions les domaines auxquels celle-ci s'applique et nous examinons le déroulement type des études qui la mettent en œuvre.

1.1 Définition de l'accessibilité

Un *déplacement* peut être défini comme un mouvement effectué dans un espace entre deux lieux – une origine et une destination – et caractérisé par un motif.

L'*accessibilité*, quant à elle, peut être définie comme l'accomplissement du franchissement spatial entre deux points répondant au motif du déplacement de la personne. On peut également dire qu'elle est la capacité d'atteindre les biens, les services et les activités désirés par un individu. Le concept d'*accessibilité* a toutefois de multiples définitions selon les contextes et les applications. Classiquement, l'*accessibilité* est définie comme la « *plus ou moins grande facilité pour atteindre les opportunités souhaitées* » (voir référence [1] dans la bibliographie en fin d'ouvrage), comme un « *potentiel d'interaction entre les aménités d'un territoire et les individus* » [2] ou comme une « *utilité retirée des avantages du système des transports et de l'usage des sols* » [3].

La notion d'*accessibilité* revêt plusieurs formes, en fonction des objectifs de développement économique ou d'aménagement du territoire auxquels elle s'applique. « *La notion d'accès aux fonctions urbaines [...] a évolué au cours des cinquante dernières années. L'accessibilité a concerné l'accès géographique ou spatial lorsqu'il s'est agi de faciliter le développement économique en dotant les villes d'équipements de transports, qu'ils soient routiers pour l'automobile ou des infrastructures de transports collectifs [...]. On a ensuite parlé d'accessibilité sociale, pas uniquement en cherchant des solutions au désenclavement de quartiers de plus en plus dispersés mais aussi en cherchant à compenser les inégalités que la naissance ou la fortune a établies entre les individus.* » [4]

Dans [5], l'hypothèse est faite qu'un territoire peut être interprété comme étant l'imbrication de trois sous-systèmes, chacun doté de sa logique de fonctionnement et de transformation et relié aux autres sous-systèmes par des relations de causalité. L'*accessibilité* se définit alors selon les interactions considérées entre ces sous-systèmes [6] :

- la localisation des agents territoriaux, résidences et opportunités (activités, biens et services), qui constitue la *composante spatiale* de l'*accessibilité* : elle renvoie aux questions d'aménagement du territoire et d'usage du sol ;
- les pratiques et rapports sociaux (programmes d'activités) ainsi que les caractéristiques socioprofessionnelles et les perceptions des individus qui constituent la *composante individuelle* de l'*accessibilité* : elle renvoie aux besoins, capacités et opportunités des individus en termes d'*accessibilité* ;
- le système de transport : il est le support des deux précédentes composantes et détermine la distribution spatiale des déplacements et l'effort que les individus fournissent pour atteindre les opportunités du territoire (temps et coûts).

L'*accessibilité* tient compte de la répartition spatiale des opportunités et du potentiel social des individus, c'est-à-dire de leurs capacités individuelles à se déplacer pour atteindre ces opportunités, en utilisant le système de transport. En complément, il convient d'intégrer une *composante temporelle* dans l'interprétation de l'*accessibilité*, puisque celle-ci est influencée par les temps d'ouverture qui régissent l'accès aux biens et aux services à différents moments de la journée, par le temps que les individus accordent à ces activités et par la qualité du système de transport en fonction des moments de la journée (période de pointe, période creuse, soirée...).

L'illustration 1 représente les interactions entre les sous-systèmes qui influencent l'accessibilité des territoires.

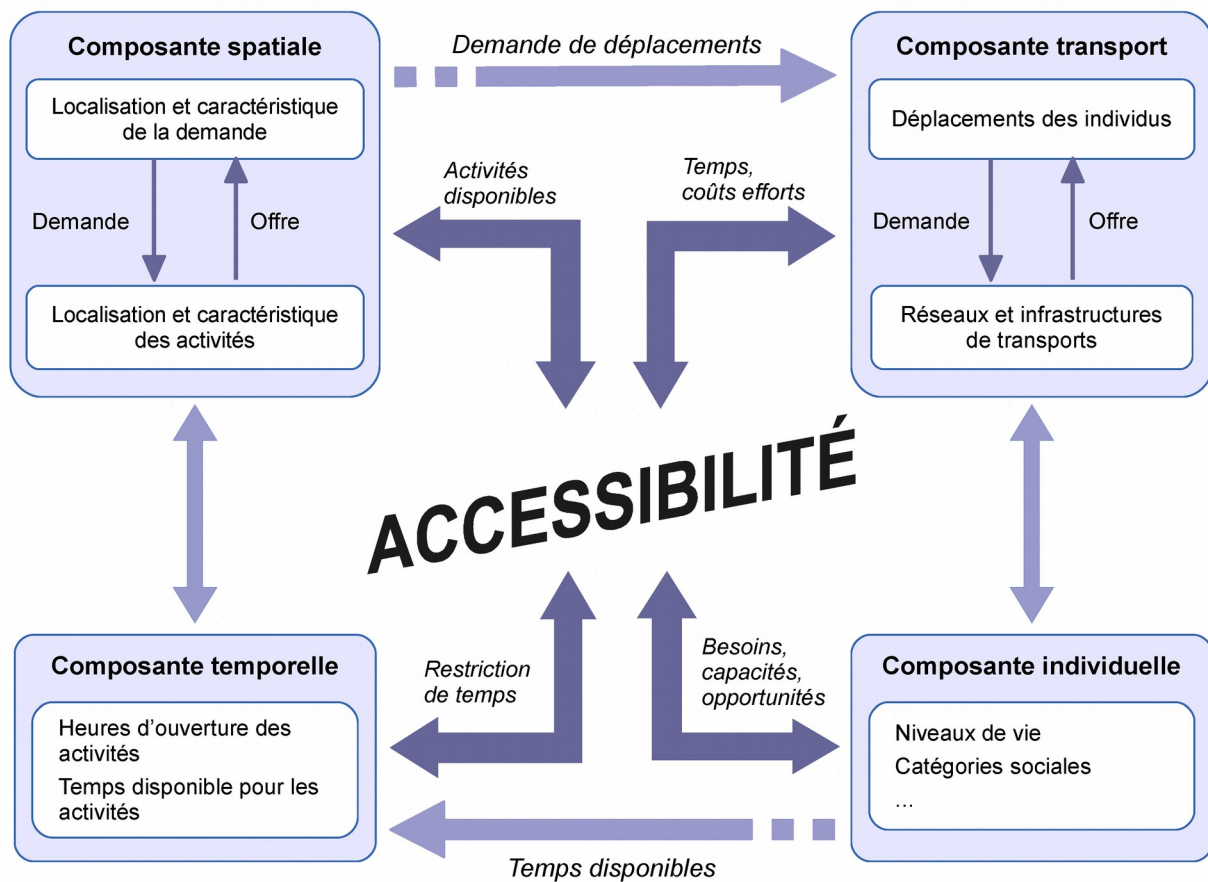


Illustration 1: Les différentes composantes de l'accessibilité

1.2 Quelles applications au concept d'accessibilité ?

Lors des entretiens, différents types de travaux allant d'études apportant une aide à la décision immédiate (par ex. étude F, présentée en annexe) à des travaux de recherche (par ex. études O, P, R et U) ont été recensés. On y retrouve les principaux domaines d'application du calcul d'accessibilité identifiés par l'action COST « *Accessibility Instruments for Planning Practice* » [7] :

1. choix de localisation d'activités, de services ou de zones résidentielles (par ex. études E, F, K, T ou encore [8]) ;
2. gestion des offres de transport et évaluation des mesures à mettre en œuvre pour favoriser le report modal (par ex. études A, B, D, E, I, L, O, P, Q et R) ;
3. évaluation des mesures à mettre en œuvre pour tendre vers une meilleure équité sociale d'accès à la mobilité et aux opportunités offertes par la ville (par ex. études G, H, J et N) ;
4. stimulation de l'activité économique (par ex. études C et M) ;
5. réduction de l'impact environnemental des transports aux travers de leurs émissions de polluants et de la consommation d'énergie (par ex. étude U).

Selon les études, les quatre composantes de l'accessibilité (voir. illustration 1) sont prises en compte de manière plus ou moins complète dans la situation de référence ainsi que dans les éventuels scénarios d'évolution construits.

1.2.1 Focalisation sur la composante *transport*

L'accessibilité est souvent considérée en se focalisant sur la composante *transport*, éventuellement en considérant conjointement la composante *individuelle*, mais sans prendre en compte la composante *spatiale*. On se trouve alors dans une évaluation du potentiel de déplacement offert par le réseau de transport, qui correspond à une vision simplifiée de l'accessibilité. Tous les couples origine-destination étudiés sont considérés comme représentant des potentiels d'activités équivalents, la densité des opportunités n'étant pas prise en compte. Par abus de langage, on parle malgré tout d'*accessibilité* dans ce contexte alors que le lien des transports au territoire n'est pas ou peu fait dans l'analyse.

Les applications recensées concernent l'évaluation de :

- la performance globale des réseaux pour desservir un type de lieux (par ex. étude M) ;
- la coordination entre les différentes offres de transport collectif, en vue de démontrer que des modifications d'horaires des transports collectifs ou une diminution du temps de marche en correspondance par une amélioration de l'organisation d'un pôle d'échange pourraient améliorer le service rendu aux usagers et rendre les transports collectifs plus attractifs (par ex. études E et P, ou encore [9] et [10]) ;
- la vulnérabilité du réseau en cas d'incident, ainsi que les possibilités de reroutage que celui-ci offre aux usagers (par ex. effets d'une panne du métro évalués dans l'étude O), pour aider à la décision concernant la gestion d'incidents et orienter les investissements sur les infrastructures de transport.

Ce type d'approche utilise généralement les vitesses de déplacement et les temps de parcours comme mesure de l'accessibilité. D'autres indicateurs sont parfois utilisés, quantifiant les possibilités de correspondances aux nœuds du réseau de transport collectif, par exemple l'indicateur de *cohérence de l'offre* [11], l'indicateur d'*intensité nodale* [10] ou encore l'indicateur de *contactabilité*, décrivant la possibilité de réaliser un aller-retour sur une journée pour un couple origine-destination donné (par ex. étude P).

1.2.2 Prise en compte de l'interaction entre *transports* et *aménagement du territoire*

Une vision plus complète de l'accessibilité consiste à considérer l'interaction entre les transports et les localisations des opportunités sur le territoire. Se placer dans ce contexte permet de souligner que les transports comme l'aménagement du territoire peuvent constituer des leviers d'action des politiques publiques. L'accessibilité vient alors compléter l'analyse socio-économique des projets.

C'est l'approche retenue par exemple par l'étude E, qui cherche à détecter des décalages entre les projets de localisation d'activités et le réseau de transport existant ou en projet. On retrouve également cette approche dans l'étude R, qui cherche à évaluer l'effet de différentes politiques de tarification des transports sur l'accessibilité à l'emploi dans l'agglomération lyonnaise. La veille et l'évaluation des actions sur le foncier, en fonction de ses caractéristiques d'accessibilité, entrent également dans le cadre de cette approche [8].

1.2.3 Prise en compte de l'équité sociale et territoriale

Enfin, l'accessibilité permet dans certains travaux d'évaluer les inégalités d'accès aux opportunités, à l'intérieur de la population ou entre les territoires. Ainsi, l'étude G propose « *une vision étayée et partagée entre partenaires institutionnels des enjeux et inégalités socio-urbaines (mesure de l'enclavement des quartiers) pour servir de base au Contrat Urbain de Cohésion Sociale* ». C'est aussi le cas de l'étude P proposant de « *faire avancer les connaissances sur les indicateurs d'accessibilité et sur leurs utilisations dans le cadre de l'évaluation de projets de transport, dans l'optique plus particulière d'éclairer les relations entre les transports et l'équité territoriale* ». On relève encore l'étude O, qui évalue de façon différenciée l'accessibilité des pôles d'excellence de l'agglomération lilloise selon la catégorie socioprofessionnelle, ou encore l'étude L, qui évalue la perte d'accessibilité à l'emploi pour les personnes à mobilité réduite, pour les résidents de la périphérie de la ville par rapport à ceux du centre, ainsi que les effets cumulés de ces deux situations (mobilité réduite et résidence en périphérie).

[12] et [13] soulignent également que les mesures d'accessibilité permettent de prendre en compte l'aspect social de la mobilité dans l'évaluation des projets : « *La question de l'égalité de traitement entre les territoires et les agents est souvent posée, mais est peu prise en compte par le calcul socio-économique. Un programme rentable lorsque l'on considère la société dans son ensemble n'est pas nécessairement générateur de justice, dans le cas où ce sont les usagers des régions les plus accessibles initialement qui bénéficient le plus du projet après sa mise en service. L'accessibilité peut être traitée de manière qualitative, notamment par des représentations cartographiques, en plus du calcul socio-économique. Cela peut correspondre à un traitement de l'inégalité sociale dans le cas où les zones dont la desserte est améliorée concentrent des phénomènes d'exclusion et de pauvreté. Cependant, il reste difficile de prévoir quels peuvent être les effets des infrastructures de transport sur les inégalités de répartition des richesses.* » [12]. L'accessibilité apparaît donc comme un indicateur à mettre en balance avec le calcul économique pour évaluer l'opportunité des projets de transport. Cette prise en compte d'effets non monétarisables d'un projet est un des éléments majeurs de la méthode d'évaluation des projets préconisée par le ministère du Développement durable [14].

1.3 Contexte de réalisation des études d'accessibilité en France

Les agences d'urbanisme interrogées signalent une certaine méconnaissance de la mesure d'accessibilité comme outil d'analyse de la part des maîtres d'ouvrage de projets d'aménagement et de transport. Par conséquent, il est parfois nécessaire pour elles de réaliser des productions de leur propre initiative afin de valoriser et de faire connaître ce type d'analyses, notamment en démontrant leur apport complémentaire aux modèles de déplacements statiques.

Certaines études entrent dans le cadre d'observatoires : dans ce cas, le producteur d'études réalise un travail de veille sur un sujet, met à jour son outil de calcul d'accessibilité et fournit de temps en temps une étude sur ce sujet à différents maîtres d'ouvrage. C'est souvent le cas des agences d'urbanisme sur la question de l'accessibilité aux quartiers dits de « politique de la ville ». Ce type d'organisation permet d'être réactif lorsqu'un besoin d'analyse est exprimé par un maître d'ouvrage.

Lorsqu'il y a une commande, celle-ci est parfois assez floue initialement, étant donné la complexité des questions en relation avec l'accessibilité. La méthodologie est souvent affinée au cours du travail pour correspondre au mieux aux souhaits de la maîtrise d'ouvrage et tenir compte des contraintes liées à l'étude, notamment la disponibilité des données et les capacités des outils logiciels. Le producteur de l'étude doit donc présenter au maître d'ouvrage les contraintes qui pèsent sur l'étude ainsi que lui proposer une palette d'indicateurs, de paramétrages et de modes de représentation possibles. Les choix finaux doivent être effectués en coordination avec le maître d'ouvrage, en fonction de son vécu du territoire et de son objectif : ce fut le cas par exemple dans l'étude E pour valider le choix de zones d'activités ou centres commerciaux à rayonnement métropolitain qui seraient étudiés.

L'appropriation des résultats de l'étude par le maître d'ouvrage en vue de leur valorisation nécessite la mise en œuvre d'une démarche pédagogique de la part du producteur d'études. Les entretiens ont permis de mettre en évidence la difficulté que peut représenter la vulgarisation des indicateurs autres que le temps de parcours, notamment l'indicateur gravitaire. Par ailleurs, des maîtres d'ouvrage et producteurs d'études interrogés mentionnent la réticence de certains décideurs à communiquer sur la réalité des temps de parcours en transports collectifs.

2. Méthodologies de calcul de l'accessibilité

On trouve des applications et des définitions des mesures d'accessibilité aussi bien en géographie qu'en économie. L'état de la littérature sur les mesures d'accessibilité, sur la base de [15], met en évidence les modèles utilisés dans les études théoriques ou empiriques sur les transports. Nous faisons ici un tour d'horizon des indicateurs d'accessibilité des territoires les plus classiques d'un point de vue théorique et, dans la mesure du possible, nous précisons leur finalité, leurs avantages, leurs inconvénients et leurs limites, puis nous voyons comment ils sont mis en œuvre dans les études.

2.1 Grandes familles d'indicateurs

Les indicateurs d'accessibilité sont rattachés à une définition plus ou moins précise et poussée du concept d'accessibilité. La littérature propose plusieurs classifications de ces indicateurs par niveau de complexité ou par familles, en tenant compte des contours des sous-systèmes influant sur l'accessibilité (voir chapitre 1).

[16] propose une première catégorisation qui distingue trois types d'indicateurs :

- les indicateurs dits « *réistiques* », qui mesurent les propriétés géométriques de l'espace à travers la structure du réseau de transport (par exemple, les isochrones) ;
- les indicateurs dits « *économiques* », qui caractérisent l'accessibilité potentielle aux opportunités territoriales. Ils prennent en compte dans le calcul de l'accessibilité, plus ou moins complètement, les opportunités ainsi que les interactions spatiales (par exemple, les modèles gravitaires) ;
- les indicateurs dits « *prismes spatio-temporels* » issus de l'école de la « Time Geography », qui mesurent l'accessibilité en tenant compte des possibilités de déplacement dans le territoire dans l'espace et le temps.

Cette catégorisation prend en compte les différentes composantes de l'accessibilité (*spatiale*, *individuelle*, *transport* et *temporelle*), de manière partielle pour certaines de celles-ci, mais ne distingue pas les indicateurs selon leur degré de faisabilité.

Une autre approche, mise en avant par l'agence d'urbanisme de la région stéphanoise [17] conduit à considérer trois niveaux d'indicateurs d'accessibilité :

- *mesures de temps de parcours* depuis ou vers un lieu particulier en décrivant un niveau d'offre de transport (par exemple, les isochrones) : ce premier type d'indicateur se rapproche des mesures « *réistiques* » en ne considérant que la composante transport de l'accessibilité ;
- *croisements entre les informations de temps de parcours et des données socio-économiques du territoire* (par ex. pourcentage de population ou nombre d'emplois à moins de 30 minutes d'une gare) : ces indicateurs visent à décrire sommairement le territoire, mais se confondent partiellement avec les mesures « *réistiques* » (notamment, par les isochrones) et se rapprochent également des mesures « *économiques* » au sens où ils intègrent à minima la complexité des interactions entre opportunités et réseaux de transports (isochrones avec superposition d'informations, modèle gravitaire simple). Ils prennent en compte la composante transport et partiellement la composante spatiale de l'accessibilité ;
- *croisement des données d'offre et de demande de transport* « issu d'une analyse de l'utilité des modes qui s'appuie sur le postulat que, pour un motif donné, le choix de destination des usagers est conditionné par le niveau d'offre de transport. » [17]. Par exemple, on cherchera à mesurer l'utilité des transports collectifs pour le motif de déplacements domicile-travail sur l'ensemble d'un territoire. Ces indicateurs, proches des mesures « *économiques* », s'appuient sur la théorie de maximisation de l'utilité [18] et ont donc tendance à considérer partiellement la composante *sociale* de l'accessibilité.

On peut trouver bien d'autres classifications dans la littérature. Nous choisissons ici d'utiliser une classification en trois familles, proches des deux précédentes, se rapprochant des définitions retenues dans le chapitre précédent, en tentant de classer les indicateurs par finalité et par ordre croissant de complexité.

- *Mesures d'accessibilité basées sur une composante spatiale fixe*
Ces indicateurs prennent en compte principalement la composante *transport* et de manière croissante la composante *spatiale* et leurs interactions. Ils se basent sur le système de transport, sur la localisation fixe

des individus et des opportunités au sein du territoire. Les indicateurs les plus complets prennent en compte la résistance des déplacements ainsi que les interactions spatiales des concurrences entre individus et opportunités.

- *Mesures d'accessibilité basées sur l'individu et le temps, dites « prismes spatio-temporels »*
Ces indicateurs prennent en compte les composantes *transport* et *spatiale* (sans les interactions liées aux concurrences) ainsi que la composante *temporelle* et partiellement *sociale*. Ils se basent sur l'interprétation de l'accessibilité en fonction des contraintes d'espace-temps liées aux déplacements et aux opportunités utilisées par les individus (programmes d'activités quotidiens).
- *Mesures d'accessibilité basées sur le maximum d'utilité*
Ces indicateurs prennent en compte les composantes *transport*, *spatiale* et *individuelle* dans la détermination de l'accessibilité, celle-ci étant interprétée comme la maximisation de l'utilité individuelle parmi l'ensemble des destinations permettant d'accéder à une opportunité d'un type donné. On trouve ici les indicateurs de la théorie des choix discrets [18]. Les indicateurs les plus complets (et donc les plus complexes à mettre en œuvre) vont jusqu'à prendre en compte la composante *temporelle* en couplant les indicateurs d'utilité avec des « prismes spatio-temporels ».

2.1.1 Mesures basées sur une composante spatiale fixe

Ces indicateurs d'accessibilité considèrent la localisation des individus, des activités, des biens et des services ainsi que le système de transports. On recense dans cette catégorie les indicateurs suivants :

- isochrone ;
- modèle gravitaire simple ;
- modèle gravitaire avec effets de concurrence liés à la demande ;
- modèle gravitaire avec effets de concurrence liés à la demande et à l'offre (facteurs d'équilibres inverses).

Isochrone

Courbe isochrone

L'isochrone désigne une courbe géolocalisée, délimitant un territoire où chaque point est accessible depuis une origine fixée (ou ayant accès à une destination fixée), avec un coût de déplacement inférieur à une valeur x . Ce coût peut correspondre à une distance, un temps ou un coût généralisé (il s'agit alors plutôt d'une courbe « isovaleur »). L'illustration 2 donne un exemple de courbe isochrone pour deux cas monomodaux (voiture et transports en commun) et pour un cas intermodal (voiture + transports en commun).

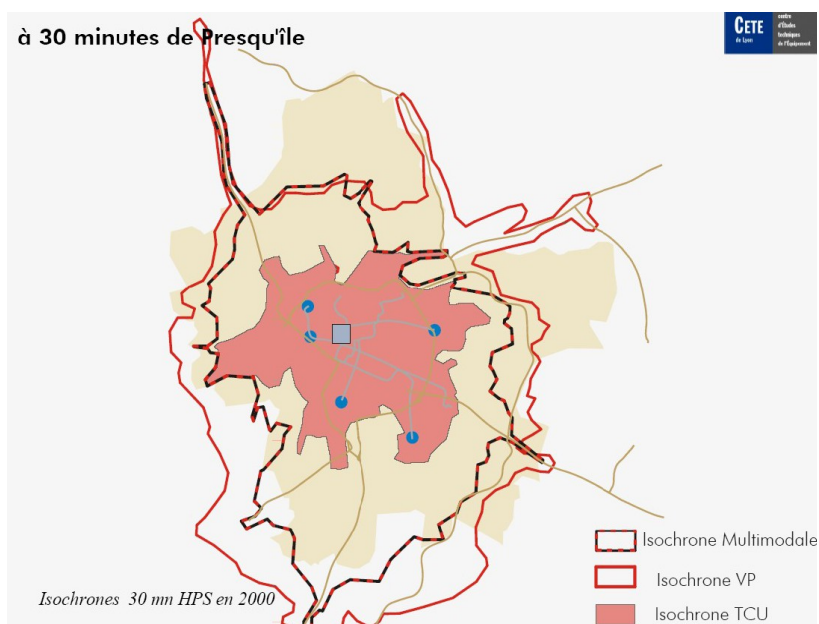


Illustration 2 : Courbes isochrones à 30 minutes depuis le centre de Lyon (unipolaires) en heure de pointe du soir en 2000 en voiture, en transports en commun et en combinant les deux (isochrone multimodale), source [68]

L'illustration 3 présente des variations de courbes isochrones, pour différents scénarios d'offre de transport.

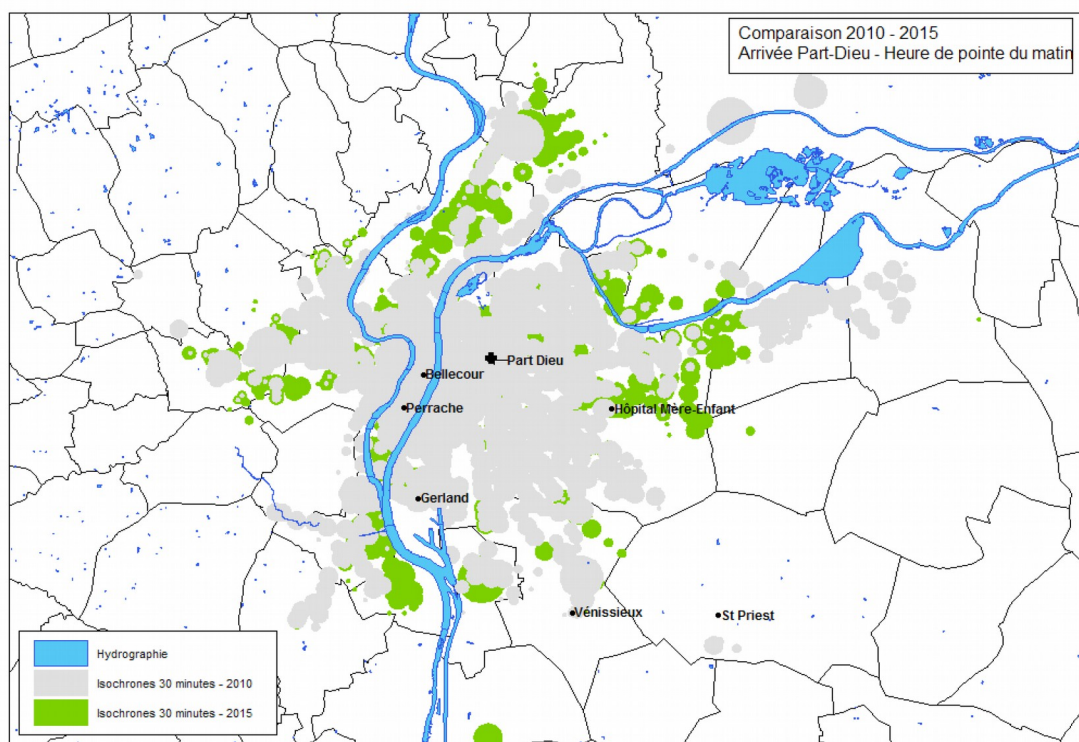


Illustration 3 : Isochrones vers le quartier de la Part-Dieu à Lyon, en transport collectif, pour deux scénarios d'offre de transport, en 2010 et 2015, source [60]

On peut également construire une courbe isochrone multipolaire, c'est-à-dire, par exemple, en reprenant l'illustration 3, représenter la zone accédant en moins de 30 minutes à au moins une des deux gares principales lyonnaises : Lyon Part-Dieu et Lyon Perrache. Cette zone correspond alors à la réunion des zones situées à l'intérieur des courbes isochrones associées à chaque gare.

Indicateur dérivé de la courbe isochrone

La courbe isochrone ne constitue donc pas à proprement parler un indicateur numérique d'accessibilité, toutefois il est possible d'en construire un en dénombrant les opportunités, par exemple les emplois, situées à l'intérieur de cette courbe.

L'indicateur « isochrone » est alors défini par :
$$A_i = \sum_{j/d_{ij} \leq X} O_j$$

avec :

- i , la zone d'origine ;
- j , la zone de destination du déplacement réalisé par un individu depuis la zone i ;
- X , le coût maximum de déplacement acceptable ;
- A_i , l'accessibilité des individus localisés dans la zone i ;
- O_j , le volume d'opportunités de la zone j ;
- d_{ij} , le coût (distance, temps ou coût généralisé) de déplacement entre la zone i et la zone j .

Encadré 1 : Présentation de l'indicateur « isochrone »

Ainsi, l'illustration 4 présente l'accessibilité à la population depuis différents quartiers lyonnais. Chaque point de la courbe représente en ordonnée le décompte de la population comprise dans la courbe isochrone, dont l'amplitude X est donnée en abscisse.

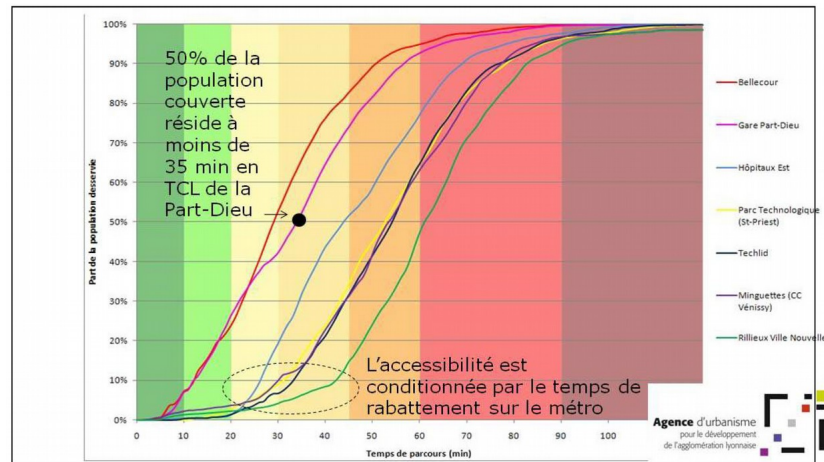


Illustration 4 : Courbe cumulée de la population accessible en fonction du temps de parcours depuis différents quartiers de Lyon, source [60]

Au lieu de fixer des paliers sur la valeur du coût maximum X , on peut en fixer sur le volume d'opportunités atteintes pour une valeur de X donnée, et cartographier par exemple les zones accédant en moins de 60 minutes à 1, 2 ou 3 et plus établissements d'enseignement supérieur, comme présenté dans l'illustration 5.

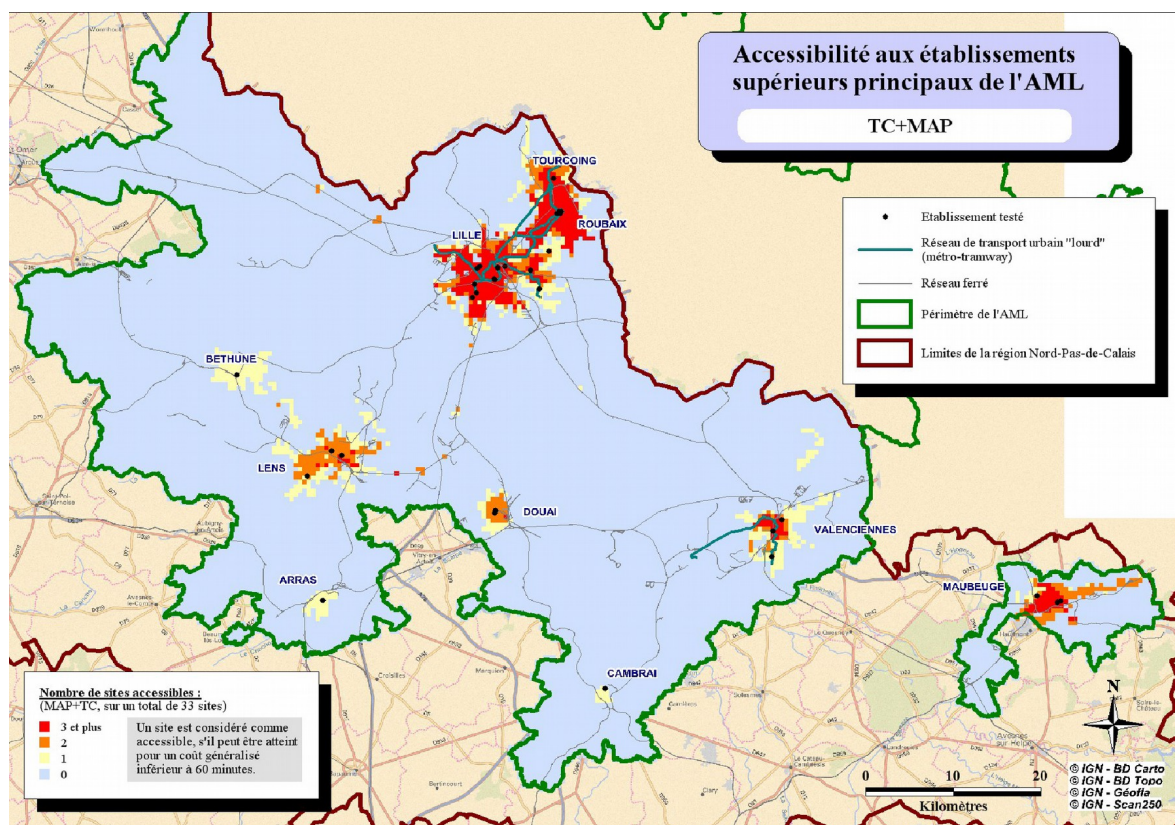


Illustration 5 : Accessibilité aux établissements d'enseignement supérieur en moins de 60 minutes de temps généralisé en transports collectifs + marche à pied dans l'aire métropolitaine lilloise, mesurée par dénombrement des établissements source [60]

Cet indicateur dérivé de l'isochrone est parfois appelé « isochrone multipolaire ». En effet, il permet de représenter au moyen d'un indicateur synthétique l'accessibilité depuis une zone donnée à plusieurs opportunités comparables en termes d'utilité pour l'utilisateur et résulte du croisement de plusieurs courbes isochrones : par exemple, une zone qui accède à deux établissements d'enseignement supérieur est une zone située à l'intérieur de deux courbes isochrones ayant chacune pour origine un des deux établissements.

Enfin, on peut envisager de croiser l'information sur les opportunités à la destination et la demande à l'origine. Après avoir calculé l'indicateur « isochrone » pour l'ensemble du territoire, il faut alors comparer ses valeurs au niveau de demande de la zone à laquelle ils sont associés, par exemple la population dans le cas de l'accès aux établissements d'enseignement supérieur, comme présenté dans l'illustration 6. Ceci permet d'identifier l'adéquation (ou la non-adéquation) entre l'accessibilité aux équipements depuis la zone i (l'offre) et la population de cette zone i (la demande potentielle).

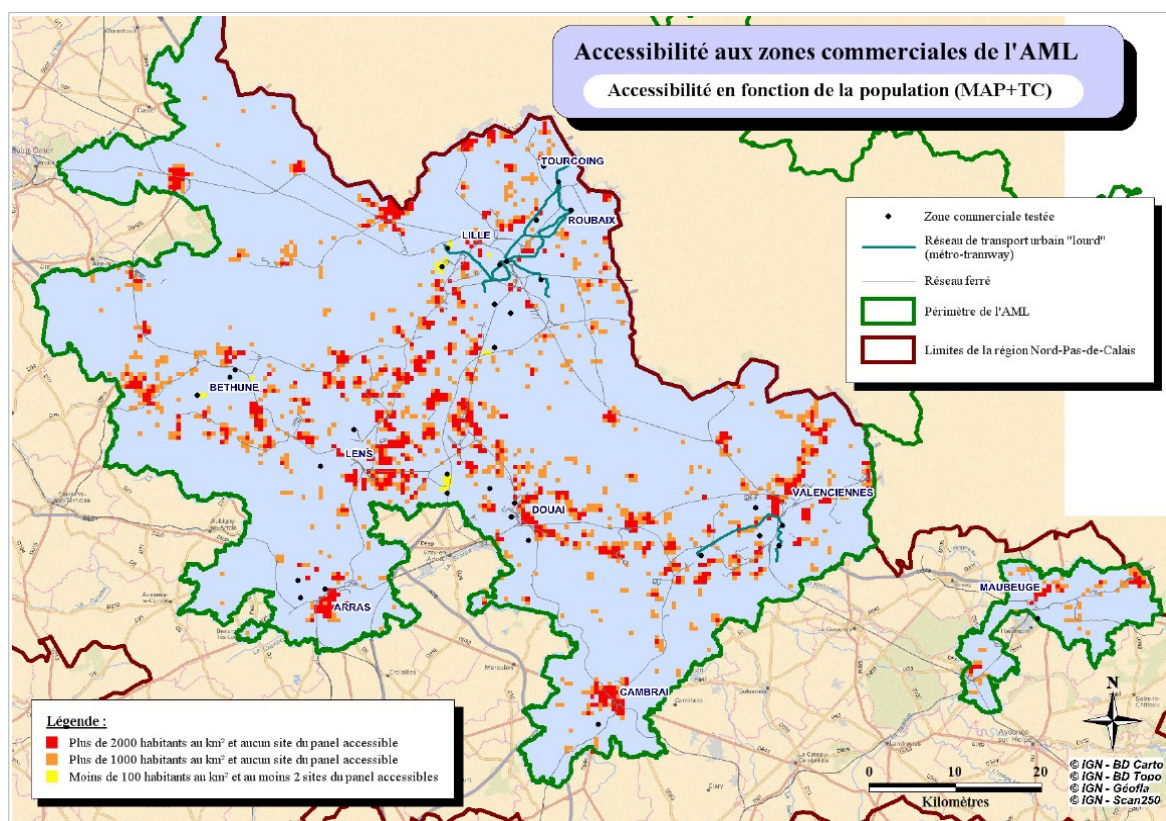


Illustration 6 : Identification des zones pour lesquelles il existe un décalage entre densité de population (demande d'opportunités) et zones commerciales accessibles en moins de 60 minutes de temps généralisé (offre d'opportunités) : ces zones présentent soit une forte densité de population et pas d'opportunité accessible, soit une faible densité de population et plusieurs opportunités accessibles, source [61]

Par rapport à la courbe isochrone, l'indicateur qui en dérive permet de représenter de manière synthétique un niveau d'accessibilité du territoire à un certain type d'opportunités et agrège donc l'information qui serait contenue sur de multiples cartes si on utilisait une courbe isochrone (une carte par opportunité).

Utilisation dans les études

Les mesures d'accessibilité par des courbes isochrones sont très largement utilisées dans la planification (mesure des évolutions d'accessibilité à un type d'opportunité depuis un territoire en situation actuelle et en prospective), en tant qu'outil d'aide à la décision (maximisation des satisfactions par gains d'accessibilité) et dans les études à vocation géographique. Ce succès s'explique par une relative facilité de mise en œuvre (les isochrones nécessitent peu de données en comparaison avec les autres indicateurs), d'interprétation et de communication.

L'isochrone est utilisée la plupart du temps dans un contexte monomodal (par ex. études A1 et A2), et éventuellement pour comparer l'accessibilité procurée par différents modes (par ex. étude A3). On ne rencontre que très exceptionnellement des analyses intermodales (voir illustration 2). Les coûts considérés sont le plus souvent des temps de parcours ou des temps généralisés (voir définitions au paragraphe 2.2.2) et n'intègrent donc pas d'autres dimensions du coût généralisé.

La courbe isochrone n'est pas systématiquement croisée avec des données d'opportunités. Certaines études considèrent uniquement le réseau de transport (par ex. étude A1), valorisant les gains de coût du déplacement et se rapportant donc majoritairement à la composante *transport* de l'accessibilité (voir illustration 3). On compare alors des variations de surface de territoire accessible entre deux scénarios. D'autres études considèrent, conjointement au réseau de transport, la population ou les opportunités accessibles à l'intérieur de l'isochrone (par ex. études A2 et B), valorisant la densité des opportunités ou de la population (voire des deux) conjointement aux gains sur le coût du déplacement et considérant ainsi l'accessibilité de façon plus complète (voir illustrations 5 et 6).

La plupart des isochrones sont basées sur le temps de parcours. Le niveau de service des transports collectifs n'est donc pas complètement pris en compte, notamment parce que le nombre de correspondances nécessaires et les fréquences de passage ne sont pas utilisées pour construire l'indicateur. Pour traiter ce manque, on recense dans l'étude O une approche multicritère de l'accessibilité : les critères *temps*, *intensité* (fréquences) et *pénibilité* (nombre de correspondances) sont évalués et des classes de qualité de desserte sont définies, l'appartenance des zones à ces différentes classes étant ensuite cartographiée. Cette approche permet d'expliquer les différences d'accessibilité des zones de façon distincte par les trois indicateurs, contrairement à un temps généralisé qui agrégerait ces trois dimensions dans un seul indicateur.

Avantages et inconvénients

Malgré sa facilité de mise en œuvre et de communication, l'isochrone ne rend compte qu'imparfaitement des interactions entre les composantes *transport* et *spatiale* de l'accessibilité et ne permet pas une prise en compte poussée de la composante *individuelle* :

- elle ne rend pas compte de la différence d'effort à fournir pour atteindre l'une ou l'autre des opportunités situées à l'intérieur de la courbe isochrone ;
- la dimension temporelle de l'accessibilité ne peut être que partiellement prise en compte (au travers des variations de qualité du système de transport) ;
- les caractéristiques individuelles ne peuvent être prises en compte qu'au travers des propriétés, pour une population donnée (par ex. personnes à mobilité réduite), d'accessibilité physique et de coûts de déplacement des réseaux de transport ;
- les valeurs bornant les différentes zones isochrones sont évaluées de façon arbitraire et, en modifiant ce paramètre, on peut influencer considérablement l'allure de la carte d'accessibilité. « Cela crée une différence artificielle entre les occasions situées à 399 mètres (valorisées) et celles situées à 401 mètres (qui n'ont aucune valeur) » [15].

Modèle gravitaire simple

Présentation de l'indicateur

C'est au milieu du xx^e siècle que le concept de potentialité est introduit pour décrire l'accessibilité reposant sur un modèle gravitaire – au sens physique du terme [2]. Cet indicateur représente le volume potentiel d'opportunités qu'on peut atteindre au sein d'un territoire, pondéré par une fonction de résistance (ou d'impédance) au déplacement entre une zone d'origine i et une zone de destination j . Cette fonction de résistance traduit l'effort que doit fournir l'individu en se déplaçant pour atteindre une opportunité dont il a besoin. [2] présente cet indicateur comme étant le produit d'une fonction d'attraction (les opportunités des zones de destinations) et d'une fonction de résistance (le coût du déplacement).

L'indicateur gravitaire est défini par la formule suivante : $A_i = \sum_j O_j \times F(d_{ij})$

avec :

- i , la zone d'origine ;
- j , la zone de destination du déplacement réalisé par un individu depuis la zone i ;
- A_i , l'accessibilité des individus localisés dans la zone i ;
- O_j , le volume d'opportunités de la zone j ;
- d_{ij} , le coût (distance, temps ou coût généralisé) de déplacement entre la zone i et la zone j .

Encadré 2 : Présentation de l'indicateur gravitaire

$F(d_{ij})$ correspond à la fonction de résistance (ou d'impédance) liée au système de transport, qui est définie de façon générique par la formule $F(d_{ij}) = e^{-\alpha d_{ij}} \times d_{ij}^{-\beta}$.

Le plus souvent, les indicateurs sont construits en supposant $\beta=0$ et la fonction de résistance est alors de forme Logit $F(d_{ij}) = e^{-\alpha d_{ij}}$, comme le proposait Hansen [2].

Le modèle de Kirchhoff suppose quant à lui $\alpha=0$, et donc $F(d_{ij}) = d_{ij}^{-\beta}$ [19].

Notons qu'on peut aussi trouver une variante dans la formulation de la fonction de résistance appelée fonction Box-Cox : $F(d_{ij}) = e^{-\alpha d_{ij}^{\lambda} - 1/\lambda}$ [19].

Pour éclairer l'interprétation des indicateurs gravitaires par rapport aux isochrones, supposons que, depuis un lieu de résidence donné, on évalue l'accessibilité aux commerces alimentaires. Nous obtenons une isochrone à 30 minutes au sein de laquelle nous comptons l'ensemble des commerces alimentaires présents, peu importe qu'ils soient proches ou lointains du lieu de résidence, pourvu que le temps d'accès soit inférieur à 30 minutes. Il est évidemment plus aisé d'atteindre le commerce alimentaire localisé à 5 minutes du lieu de résidence que celui localisé à 25 minutes, qui sont tous deux dans l'isochrone à 30 minutes. Dans l'indicateur gravitaire, le temps de parcours pour atteindre l'activité, moindre dans le premier que dans le second cas, se traduit en résistance, cette résistance augmentant de plus en plus vite lorsque le temps de parcours augmente (fonction non linéaire du temps de parcours), à l'instar du modèle gravitaire en physique.

Ainsi, deux zones ayant accès chacune à exactement 10 commerces en moins de 30 minutes – et donc une même accessibilité au sens de l'isochrone – n'auront pas la même accessibilité gravitaire aux commerces alimentaires.

Encadré 3 : Différence entre indicateur gravitaire et isochrone au travers d'un exemple

On remarque que, lorsque la fonction de résistance comporte une composante « puissance » ($\beta \neq 0$), le coût intrazonal d_{ii} (coût d'un déplacement ayant son origine et sa destination dans la zone i) ne peut pas être considéré comme nul (pour éviter un terme nul au dénominateur). En revanche, dans une formulation de type Logit ($\beta=0$), un coût intrazonal nul revient à compter pour 1 chaque opportunité de la zone.

[20] a cherché à définir des coûts intrazonaux non nuls, en utilisant la formule suivante :

$$d_{ii} = \sqrt{\frac{\sqrt{S_i}}{\pi}} \sqrt[3]{d_{i1} \cdot d_{i2} \cdot d_{i3}}$$

où S_i est la surface de la zone i ,

d_{ii} est la distance intrazonale de la zone i ,

d_{i1}, d_{i2}, d_{i3} correspondent aux distances entre la zone i et les 3 zones les plus proches.

Utilisation dans les études

Comme l'isochrone, l'indicateur gravitaire est généralement utilisé dans un contexte monomodal, pour étudier des variations d'accessibilité entre différents scénarios d'offre de transport, d'aménagement du territoire ou entre différents modes. Sans unité, l'accessibilité gravitaire peut être formulée en référence au point ayant l'accessibilité la plus élevée (voir illustration 7, référence de valeur 100 à la gare de la Part-Dieu) ou encore donnée en valeur brute (voir illustration 8, donnant, sans transformation, l'indicateur d'accessibilité gravitaire aux actifs de Montréal, utile par exemple à une entreprise qui s'implante pour évaluer son potentiel de salariés accessibles).

Accessibilité aux emplois en transport en commun en heure de pointe sur la zone Lyon - La Verpillière

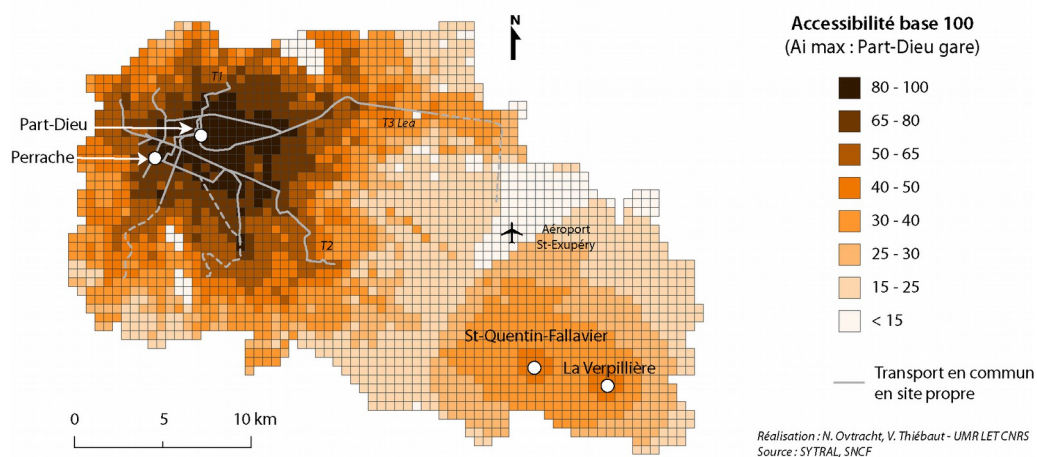


Illustration 7 : Accessibilité gravitaire aux emplois de la zone Lyon - La Verpillière en transport en commun en heure de pointe, source [19]

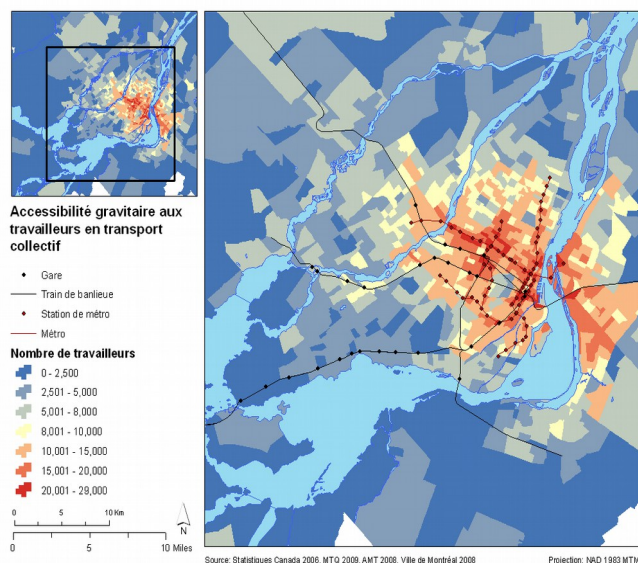


Illustration 8 : Accessibilité gravitaire en transports collectifs aux actifs de Montréal, source [15]

L'indicateur gravitaire reste relativement peu utilisé dans les études (par ex. études A3, K, R), notamment en raison de la difficulté de calibrage du paramètre α qui doit correspondre aux comportements réels des usagers. Il doit être calé à partir de données de mobilité sur la zone d'étude. Plusieurs producteurs d'études interrogés mentionnent leur souhait de disposer de valeurs types calées sur différentes agglomérations pour ce paramètre. En revanche, lorsqu'un modèle de déplacements est disponible, le paramètre α est connu, généralement avec une distinction par motif.

L'indicateur gravitaire est plus complexe à interpréter que l'isochrone puisqu'il donne une valeur d'indice d'interaction potentielle qui n'a pas de sens physique direct : un moyen de rendre plus intelligibles les résultats est d'évaluer des variations d'accessibilité gravitaire par rapport à un scénario, un mode ou un territoire de référence. Ce type d'analyse rend bien compte des forces et des faiblesses comparées d'accessibilité entre deux situations.

Avantages et inconvénients

La mesure de l'accessibilité par le modèle gravitaire simple possède plusieurs avantages :

- elle introduit une résistance au déplacement traduite par une fonction non linéaire de l'éloignement entre le lieu d'origine et le lieu de destination du déplacement, rejoignant ainsi un raisonnement intuitif fait par les individus par rapport à leur environnement géographique ;
- elle tient partiellement compte des interactions entre la composante *transport* et la composante *spatiale* de l'accessibilité (voir illustration 1), notamment en supprimant l'isotropie supposée quant à la localisation des opportunités au regard du lieu d'origine ou de destination considéré.

Malgré cela, les limites et les inconvénients du modèle gravitaire sont nombreux :

- le résultat de la mesure dépend du coût généralisé et du coefficient α choisi, dont le paramétrage est déterminant et délicat à réaliser (voir paragraphe 2.2.3 pour le paramétrage) ;
- si on considère un zonage pour le calcul des temps de déplacements (cas des modèles de déplacements), les opportunités à l'intérieur d'une même zone sont pondérées de la même manière : il faudra donc veiller à utiliser un zonage fin pour limiter ce biais ;
- la fonction de résistance ne prend pas en compte les variations de l'effort ressenti pouvant provenir d'autres facteurs que celui lié à l'éloignement des opportunités et qui relèvent davantage de la composante sociale de l'accessibilité – ici tous les individus sont considérés comme identiques, avec les mêmes fonctionnements, états et capacités [21] ;
- l'indicateur ne prend pas en compte l'effet des concurrences entre les opportunités et entre les besoins des individus au sein du territoire (relation interne à la composante *spatiale* dans l'illustration 1) : au sens économique du terme, cela reviendrait à introduire la relation entre l'offre et la demande d'opportunités. Si le territoire n'est pas à l'équilibre, des effets de concurrence peuvent apparaître, soit sur l'offre (forte par rapport à la demande), soit sur la demande (forte par rapport à l'offre). De même, l'indicateur ne permet pas de prendre en compte le caractère non isotrope de la demande ainsi que les contraintes de capacité de l'offre [22].

Modèle gravitaire avec effets de concurrence liés à la demande

Présentation de l'indicateur

Une des manières d'introduire les effets de concurrence liés à la demande dans les modèles gravitaires est proposée par [22]. Elle se traduit par la prise en compte du potentiel de la demande (c'est-à-dire le nombre d'individus cherchant un type donné d'opportunité) dans le calcul de l'indicateur d'accessibilité gravitaire.

L'offre d'opportunités dans la zone j est divisée par la demande pour cette même zone j . Cela revient donc, selon la formule suivante, à évaluer, pour chacune des zones j , le ratio des offres par rapport à la demande en exerçant une concurrence entre les présents et les entrants sur un territoire qui veulent un type donné d'opportunité.

Cet indicateur se définit donc ainsi :

$$A_i = \sum_j \frac{O_j}{D_j} \times F(d_{ij})$$

avec

- i la zone d'origine ;
- j la zone de destination du déplacement réalisé par un individu depuis la zone i ;
- A_i l'accessibilité des individus localisés dans la zone i ;
- O_j le volume d'opportunités de la zone j ;
- D_j le volume de la demande (individus voulant bénéficier des opportunités de la zone j) ;
- $F(d_{ij})$ la fonction de résistance (ou d'impédance) du système de transport ;
- d_{ij} le temps (distance ou coût) de déplacement entre la zone i et la zone j .

Encadré 4 : Construction de l'indicateur gravitaire avec effets de concurrence liés à la demande

L'illustration 9 montre un exemple à Montréal [15] d'accessibilité à l'emploi en voiture particulière en tenant compte de la concurrence entre les travailleurs. La formule précédente s'interprète ainsi :

O_j désigne le nombre d'emplois en zone j et D_j le nombre d'actifs en concurrence pour cette zone j ,

avec $D_j = \sum_i actifs_i \times F(d_{ij})$

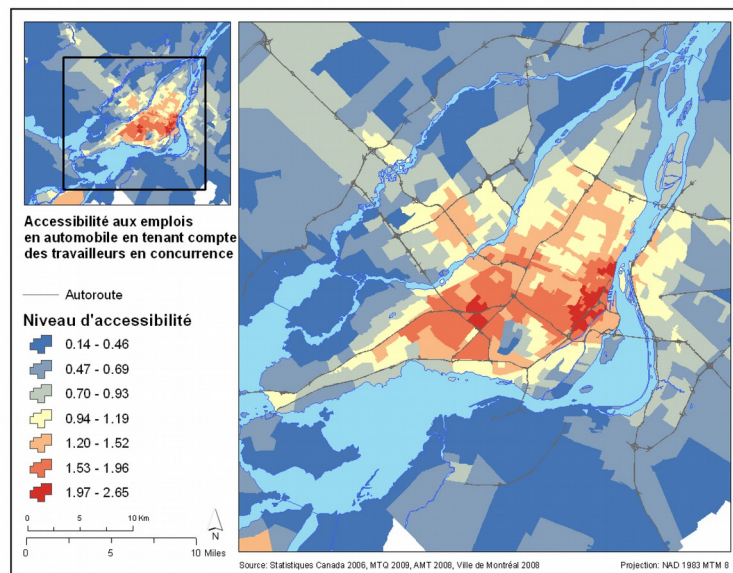


Illustration 9 : Accessibilité concurrentielle (sur la demande) en automobile aux emplois, source [15]

Avantages et inconvénients

Cet indicateur est adapté pour mettre en évidence des potentialités d'accès à l'emploi, car il tient compte de la concurrence entre les demandeurs. Il n'est que partiellement satisfaisant puisqu'il ne prend pas en compte la concurrence liée à l'offre entre l'ensemble des zones de destination. Enfin, l'inconvénient majeur est la difficulté de son interprétation, et donc de sa valorisation et de sa communication.

Modèle gravitaire avec effets de concurrence liés à la demande et à l'offre : facteurs d'équilibre inverses

Présentation de l'indicateur

En plus des effets de concurrence liés à la demande, cet indicateur cherche à prendre en compte la concurrence liée à l'offre. Il vise donc à être plus proche des flux de déplacements observés. Les flux T_{ij} issus d'une zone i ne dépendront pas uniquement du potentiel d'opportunités accessibles en j , mais ils se répartiront parmi l'ensemble des zones j en concurrence. Pour prendre en compte cette double approche des concurrences liées à l'offre et à la demande, et donc pleinement tenir compte des interactions spatiales entre les individus et les opportunités, [23] et [24] formalisent un modèle d'interaction, appelé « facteurs d'équilibre inverses » qui se base sur les principes de maximisation entropique sous contraintes. Ainsi, cela revient à évaluer, de manière itérative, un potentiel d'opportunités et un potentiel de demande pour chaque zone en fonction des flux entrant et sortant. La mise en œuvre de cet indicateur est présentée ci-dessous :

Soit $T_{ij} = a_i b_j O_j P_i F(d_{ij})$

avec :

- T_{ij} le nombre de déplacements entre les zones d'origine i et de destination j ;
- a_i et b_j des paramètres représentant selon la configuration urbaine des coefficients de rareté ou d'abondance, appelés « facteurs inverses d'équilibre » [24] ;
- P_i , le nombre d'individus résidant dans la zone d'origine i ;
- O_j , le nombre de ressources (ex. les emplois) dans la zone de destination j ;
- $F(d_{ij})$ la fonction de résistance (ou d'impédance) du système de transport ;
- d_{ij} , le temps (distance ou coût) de déplacement entre la zone i et la zone j .

En tenant compte de la concurrence liée à la demande ($\sum_i T_{ij} = O_j$) et de la concurrence liée à l'offre

($\sum_j T_{ij} = P_i$), on arrive aux deux équations suivantes :

$$\frac{1}{a_i} = \sum_j (b_j O_j F(d_{ij})) \quad \text{et} \quad \frac{1}{b_j} = \sum_i (a_i P_i F(d_{ij}))$$

La valeur a_i permet d'égaliser le nombre de déplacements partant de la zone d'origine i au nombre d'habitants de cette zone i . La valeur b_j permet d'égaliser le nombre de déplacements arrivant dans la zone j au nombre de ressources présentes dans cette zone j .

Les facteurs a_i et b_j sont mutuellement dépendants. Ils doivent donc être estimés de manière itérative, en imposant une valeur initiale à b_j (cette valeur initiale est souvent prise égale à 1).

Le facteur $1/a_i$, représente la concurrence des destinations possibles perçues par un individu localisé en i . Ce facteur conduit à une mesure de l'accessibilité. Si on atteint un état d'équilibre après plusieurs itérations, a_i peut être multiplié par la valeur moyenne (sur l'ensemble des zones) de b_j .

Le volume d'opportunités de l'ensemble d'un territoire qui peut être atteint depuis une zone i , est alors exprimé :

$$A_i \approx \sum_j O_j F(d_{ij}) \approx \frac{1}{a_i \times \bar{b}}$$

où $\bar{b} = \frac{1}{N} \sum_j b_j$ et N est le nombre de zones de l'espace urbain.

*Encadré 5 : Modèle gravitaire – facteurs d'équilibre inverses,
sources : d'après [23], [24], [13], cités dans [25]*

L'illustration 10 montre un exemple à Montréal d'accessibilité équilibrée en voiture particulière à l'emploi. Elle est à comparer à l'illustration 9, prenant partiellement en compte les effets de concurrence.

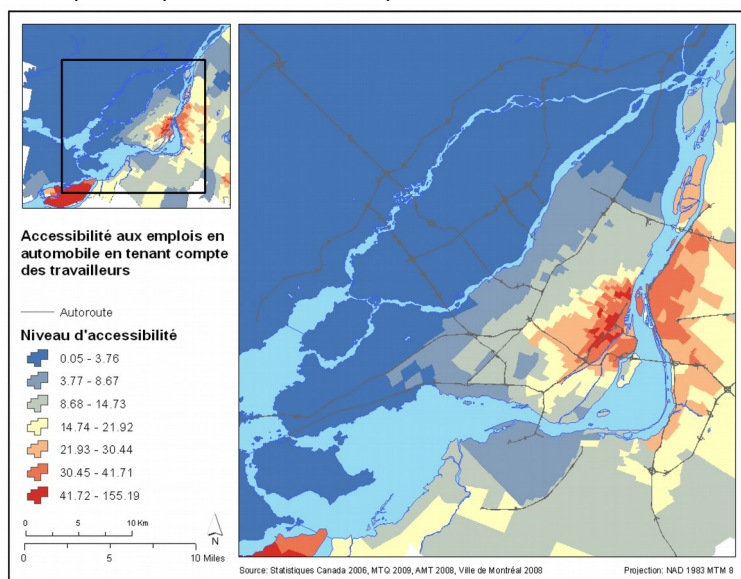


Illustration 10 : Accessibilité équilibrée (concurrence sur l'offre et sur la demande) en automobile à tous les emplois, source [15]

Avantages et inconvénients

Cet indicateur est adapté lorsqu'on souhaite mesurer l'attractivité effective d'un territoire (flux depuis et vers une zone), car il tient compte de la concurrence des offres situées dans les autres zones. Il reste empreint d'un inconvénient majeur lié au fait qu'il résulte d'un processus itératif rendant les résultats difficilement interprétables et communicables et le rendant relativement difficile à calculer. Pour mieux en cerner le fonctionnement et gagner en lisibilité, il convient de séparer les effets de certains facteurs (évolutions de l'usage des sols, des transports...), toutes autres choses étant égales par ailleurs.

Synthèse

Sans chercher à être exhaustifs, nous avons présenté les principaux modèles d'indicateurs d'accessibilité basés sur une composante spatiale fixe. Le tableau ci-dessous propose une synthèse des principaux enseignements à retenir sur ces modèles.

Indicateurs	Prise en compte des composantes				Difficulté d'interprétation, de communication	Limites et inconvénients
	Transport	Spatiale	Sociale	Temporelle		
<i>Isochrone</i>	Oui	Partielle (localisation isotrope des opportunités)	Non	Partielle (prise en compte possible des variations de niveaux de service des transports)	Facile	Pas de prise en compte de la résistance au déplacement Pas de prise en compte des caractéristiques individuelles et temporelles
<i>Modèle gravitaire simple</i>	Oui + résistance au déplacement	Partielle (isotropie partielle)	Non	Partielle (prise en compte possible des variations de niveaux de service des transports)	Assez difficile	Pas de prise en compte des caractéristiques individuelles et temporelles Pas de prise en compte des effets de concurrence
<i>Modèle gravitaire avec effets de concurrence liés à la demande</i>	Oui + résistance au déplacement	Partielle (isotropie partielle + concurrence liée à la demande)	Non	Partielle (prise en compte possible des variations de niveaux de service des transports)	Assez difficile	Pas de prise en compte des caractéristiques individuelles et temporelles Prise en compte partielle des effets de concurrence
<i>Modèle gravitaire avec effets de concurrence liés à la demande et à l'offre</i>	Oui + résistance au déplacement	Oui (effets de concurrence totaux, relation offre-demande)	Non	Partielle (prise en compte possible des variations de niveaux de service des transports)	Difficile	Complexe à calculer Pas de prise en compte des caractéristiques individuelles et temporelles

Tableau 1 : Synthèse des indicateurs basés sur une composante spatiale fixe

2.1.2 Mesures basées sur l'individu et le temps

Comme nous l'avons vu, les indicateurs basés sur une composante spatiale fixe prennent peu en compte la composante *individuelle* et la composante *temporelle*. De plus, ils ne mesurent l'accessibilité que depuis un lieu de résidence ou un lieu d'opportunité, sans tenir compte des boucles de déplacements (et des modes de transports associés) des individus tout le long de la journée. Ces indicateurs sont dits « statiques » [26]. Ils ont tendance à surévaluer l'accessibilité réellement perçue par les individus au sein des territoires, en tenant compte de localisations inaccessibles (contraintes spatio-temporelles) et en ne considérant pas la disponibilité horaire des opportunités.

Prismes spatio-temporels

Présentation des indicateurs

Les mesures d'accessibilité qui tentent de dépasser le cadre « fixe » des précédents indicateurs s'appuient sur la géographie des espaces-temps ([27], [28]). Elles sont développées seulement à la fin des années 1990 ([29], [30]). Ces modèles d'accessibilité intègrent les deux composantes *individuelle* et *temporelle* et prennent en compte les dynamiques de la composante *spatiale* et les interactions des opportunités avec les individus dans le temps. Elles se placent du point de vue de l'individu, à l'inverse des approches précédentes qui moyennent des contraintes et des comportements dans la construction des indicateurs.

Ces modèles dits « prismes spatio-temporels » évaluent alors les volumes d'opportunités potentiellement accessibles par les individus depuis un lieu donné du territoire, à un moment donné de la journée. Ces mesures d'accessibilité varient donc sous les contraintes temporelles et spatiales des individus et des opportunités au cours de la journée. Sur la base de cette observation, [27] et [28] définissent l'*espace-temps contraint* et les *prismes spatio-temporels*.

L'« espace-temps contraint » fait référence à l'effet réducteur des caractéristiques temporelles et spatiales dans le choix des activités. Trois types de contraintes peuvent intervenir :

- les contraintes de « capacité individuelle » [21] : ensemble des états contraignant une personne pour atteindre une destination (par exemple, ne pas avoir de moyens de transports disponibles) ;
- les contraintes de « couplage » : durée pendant laquelle un individu n'est pas disponible du fait de sa présence en un lieu donné pour bénéficier d'une opportunité dont il a besoin (par exemple, la durée de travail) ;
- les contraintes d'« autorité » : règlements et restrictions s'appliquant aux opportunités (horaires d'ouverture et de fermeture, disponibilité en soirée, week-end, saisonnière...).

Un « prisme spatio-temporel » identifie alors l'espace des activités réalisables en respectant un ensemble de contraintes d'espace-temps (contraintes liées aux programmes d'activités, à la localisation géographique des individus et des opportunités ainsi qu'aux limites mises sur les déplacements dans l'espace et dans le temps). Le prisme spatio-temporel représente l'espace potentiel d'action – le volume d'opportunités maximal potentiellement accessible sous les contraintes précédentes ([31], [29]) – d'une personne localisée à un endroit donné, à un moment de la journée, en fonction de son programme d'activités.

Utilisation dans les études

L'indicateur de « *contactabilité* », notamment utilisé dans l'étude P, est un cas simplifié de prisme spatio-temporel : il mesure le potentiel de contact en face-à-face sur une journée entre personnes situées dans des villes différentes. Ici les opportunités sont donc des villes ou des agglomérations urbaines. La *contactabilité* mesure pour une ville donnée les capacités du réseau de transport à permettre une liaison aller-retour avec d'autres villes en une journée tout en autorisant un temps suffisant pour accomplir des activités professionnelles sur place. Aucun autre exemple d'indicateur spatio-temporel n'a été recensé dans les études examinées.

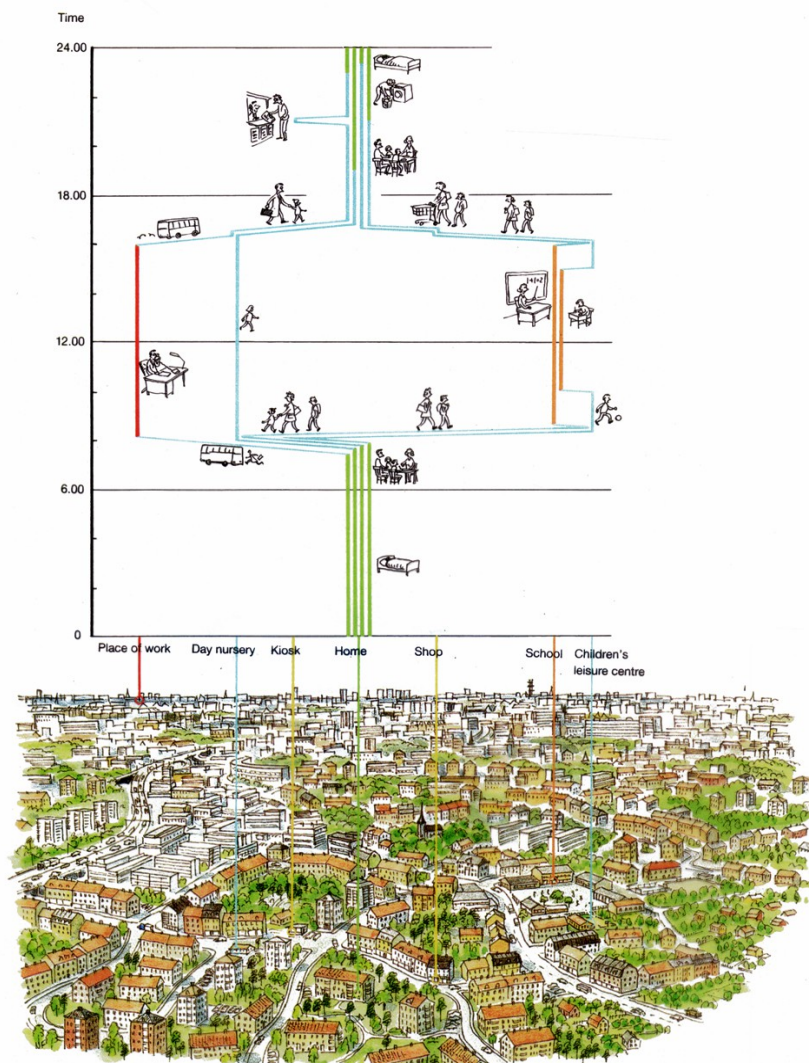


Illustration 11 : Exemple de programmes d'activité, source [69]

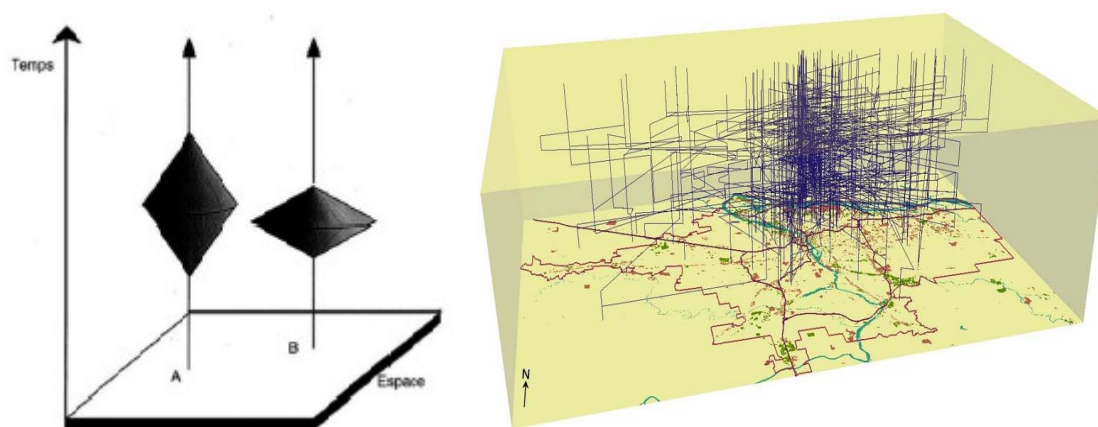


Illustration 12 : Exemples de représentations des prismes spatio-temporels sur une journée ; à gauche représentation idéalisée, source [70], à droite représentation réaliste, source [69]

Avantages et inconvénients

Ce type d'indicateurs a l'avantage de prendre en compte les composantes *temporelle* et *spatiale* (opportunités et individus sous contraintes) de l'accessibilité – il est donc adapté pour évaluer les niveaux d'accessibilité géographique – tout en intégrant aussi la composante *individuelle*. Autrement dit, l'avantage de ce modèle est de considérer l'accessibilité dans l'ensemble de ses composantes et dans leurs interactions.

Les limites de ce type d'indicateurs sont les suivantes :

- les mesures d'accessibilité liées à l'espace-temps sont difficiles à mettre en œuvre et à rendre opérationnelles, du fait d'un besoin important de données individuelles. Ces données peuvent provenir, entre autres, des enquêtes ménages-déplacements quand celles-ci sont disponibles sur le territoire d'étude. Toutefois, la totalité des données nécessaires peut être difficile à obtenir ;
- les mesures sont, par conséquent, faites sur un nombre restreint d'individus. Elles ne prétendent pas à l'exhaustivité des potentiels d'accessibilité observés ;
- bien que les représentations soient relativement aisées à comprendre et à communiquer, elles deviennent inintelligibles lorsqu'un grand nombre d'estimations est fait (voir illustrations précédentes) ;
- même si cet indicateur de prisme spatio-temporel a pour vocation d'avoir une approche exhaustive de la l'accessibilité, il connaît deux limites dans la composante « spatiale » de l'accessibilité qui sont partiellement levées dans les indicateurs considérant une composante spatiale fixe : la résistance aux déplacements et la concurrence liée à l'offre et la demande d'opportunités ne sont pas apparentes.

Ces indicateurs issus de la géographie des espaces-temps sont relativement récents. Ils sont toujours à l'étape de construction et de perfectionnement théorique et opérationnel.

2.1.3 Mesures basées sur le maximum d'utilité

Les modèles d'accessibilité basés sur la théorie des choix discrets ou le maximum d'utilité apparaissent au milieu des années 1970 et montrent comment un choix est déterminé parmi un ensemble d'alternatives qui satisfont toutes essentiellement les mêmes besoins [18] [32].

Maximum d'utilité

Présentation de l'indicateur

On désigne par « coût généralisé du déplacement » le critère à minimiser dans le problème de calcul d'itinéraire sous-jacent au calcul d'accessibilité. Il peut s'agir :

- d'un simple temps de parcours ;
- d'un temps généralisé, dans lequel certaines composantes du temps de parcours ont été pondérées pour représenter les différences de pénibilité entre les différentes étapes du déplacement ;
- ou encore d'une combinaison d'un temps généralisé et d'autres indicateurs (coût financier, coût environnemental du déplacement...) dans une somme pondérée.

[18] postule que la mesure de la contrainte d'accessibilité individuelle exprimée en termes de coût généralisé ne prend en compte qu'un aspect limité des déplacements : la contrainte qu'ils représentent. Son modèle d'accessibilité consiste donc à évaluer l'utilité retirée par un individu de la possibilité de se rendre dans différents lieux d'un territoire afin d'accéder aux activités dont il a besoin. Pour cela, on suppose que les individus associent une utilité cardinale à chaque choix de destination auquel ils sont confrontés et qu'ils choisissent celle qui leur procure une utilité maximale.

L'indicateur est représenté par la formule suivante dans laquelle U_i représente l'utilité ou la satisfaction de l'individu situé dans la zone i par rapport à l'ensemble des choix possibles des opportunités et est assimilée à une mesure de l'accessibilité :

$$U_i = \lambda \times \log \left(\sum_j O_j F(d_{ij}) \right)$$

où :

- λ est une constante d'ajustement ;
- O_j est le volume d'opportunités de la zone de destination j que désirent atteindre les individus. Cet élément d'« attraction » représente l'objectif pour lequel l'individu souhaite accéder à la zone de destination de son déplacement ;
- $F(d_{ij})$ est une fonction du coût généralisé d_{ij} du déplacement entre les zones i et j , dite « fonction de résistance ». On prendra généralement, comme pour le modèle gravitaire : $F(d_{ij}) = e^{-\alpha d_{ij}}$.

Encadré 6 : Définition de l'indicateur du maximum d'utilité

Partant des propositions faites par Koenig, Ben Akiva et Lerman [32] définissent alors l'accessibilité comme étant l'espérance de l'utilité maximale que retire l'individu de son choix parmi un certain nombre d'alternatives possibles pour atteindre les activités dont il a besoin : $A_i = E \left(\max_j (U_{ij}) \right)$.

Notons que, contrairement aux modèles gravitaires, cet indicateur introduit les préférences individuelles de déplacement (composante *individuelle* de l'accessibilité). Toutefois, il ne diffère pas fondamentalement du modèle gravitaire de Hansen [2]. Neuburger [33] fut le premier à établir la relation entre les indicateurs de Hansen et la mesure pour les individus des avantages retirés des localisations des opportunités offertes par le territoire. Ces mesures basées sur la théorie des choix discrets sont cohérentes avec la théorie économique du choix du consommateur (calcul de surplus), tout comme les mesures gravitaires.

Utilisation dans les études

L'agence d'urbanisme de la région stéphanoise réalise ce type d'analyses en interne et réfléchit à utiliser plus largement un tel indicateur dans de futures études ou publications (voir illustration Erreur : source de la référence non trouvée).

Par ailleurs, certaines études d'évaluation des effets d'un projet de transport sont réalisées selon la méthodologie proposée par Jean Poulit, décrite dans l'annexe 2 de l'instruction cadre de 2004 [34]. Basée sur le principe du maximum d'utilité, cette méthode fait débat en raison de ses simplifications calculatoires et de la transposition des gains d'utilité en gains de PIB pour le territoire¹.

1 - Un groupe de réflexion sur la « valorisation de l'accessibilité aux territoires » a été créé en 2012, à l'initiative de Jean Poulit. Ce groupe a approfondi la notion d'accessibilité aux territoires et sa prise en compte dans l'évaluation des effets d'un projet de transport. Pour proposer des améliorations à la méthode décrite dans [34], ce groupe a ainsi publié un rapport en 2014 : <http://www.cdu.urbanisme.developpement-durable.gouv.fr>

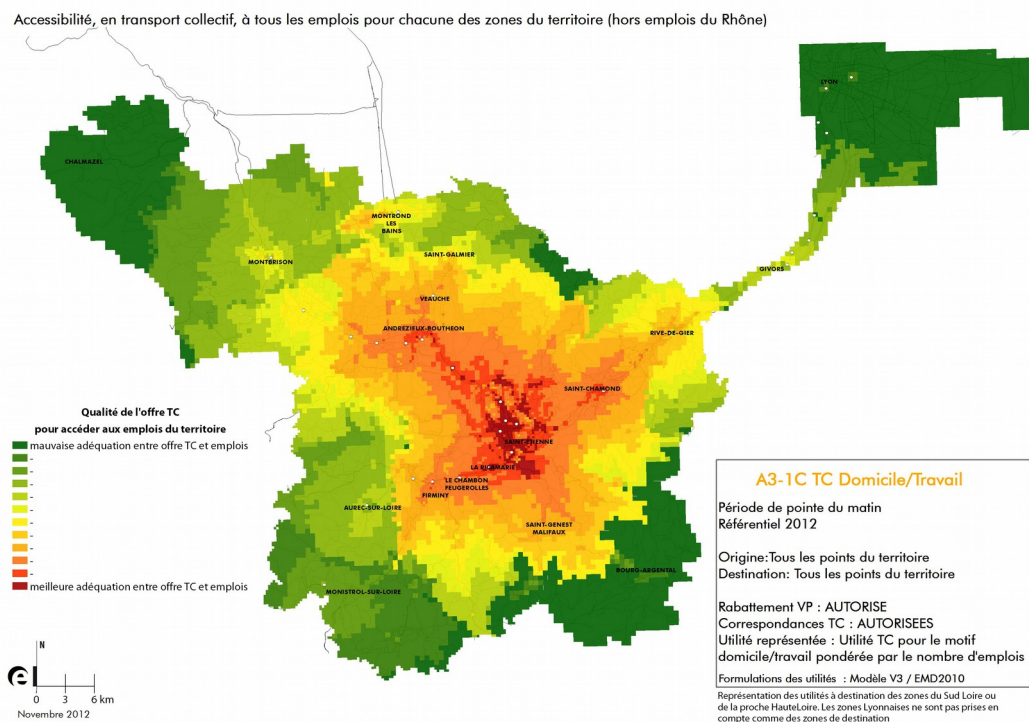


Illustration 13 : Indicateur du maximum d'utilité pour l'accessibilité aux emplois en transports collectifs
Source : « epures », agence d'urbanisme de la région stéphanoise, novembre 2012

Avantages et inconvénients

Cet indicateur basé sur le maximum d'utilité présente l'avantage d'être fondé sur un cadre théorique (celui de la théorie des choix discrets) permettant d'introduire les choix individuels et l'attractivité des destinations, mais également de produire un résultat convertible en valeur monétaire. Il reste toutefois très difficile à interpréter, à vulgariser et à communiquer. Il nécessite des traitements lourds et de nombreuses bases de données pour pouvoir être mesuré. Enfin, les résultats sont difficilement comparables d'un territoire à un autre, l'utilité individuelle étant bien plus subjective que la théorie ne le mentionne.

Enfin, on peut envisager de coupler les programmes d'activités, voire les prismes spatio-temporels avec la maximisation de l'utilité. Le but est alors de prendre en compte l'enchaînement quotidien des déplacements et des activités accomplis par les individus pour choisir les opportunités à utiliser selon le principe de maximisation de l'utilité.

Les indicateurs qui en découlent sont toutefois très complexes à mesurer et très peu utilisés en pratique : données nécessaires nombreuses et difficiles à collecter, résultats complexes à interpréter et à vulgariser. Nous n'avons pas recensé d'études mettant en œuvre ce type d'indicateurs.

Synthèse

Nous avons présenté les principaux indicateurs basés sur la maximisation de l'utilité individuelle. Le tableau ci-dessous dresse une synthèse des principaux enseignements à retenir sur ces modèles.

Indicateurs	Prise en compte des composantes				Difficulté d'interprétation, de communication	Limites et inconvénients
	Transport	Spatiale	Sociale	Temporelle		
Maximum d'utilité	Oui + résistance au déplacement	Oui	Oui (satisfaction individuelle pouvant varier selon les niveaux de vie, etc.)	Non	Difficile	Nombreuses bases de données nécessaires Complexité des calculs
Couplage du maximum d'utilité avec les programmes d'activités ou avec les prismes spatio-temporels				Oui	Très difficile	

Tableau 2 : Synthèse des indicateurs basés sur la maximisation de l'utilité individuelle

2.2 Mise en œuvre des indicateurs

Après avoir présenté les indicateurs d'accessibilité, leurs avantages et leurs inconvénients, il est utile de s'intéresser de plus près à leur mise en œuvre pratique. Dans ce document figurent notamment les valeurs de paramètres des méthodes présentées au paragraphe 2.1 et observées dans les études recensées. Ces informations n'ont pas valeur de recommandations mais permettent aux chargés d'études n'ayant pas de référence disponible sur leur territoire pour un paramètre de connaître l'ordre de grandeur des valeurs communément utilisées. Ce paragraphe ne couvre pas toutefois l'ensemble des paramètres qui peuvent être utilisés dans les méthodes présentées au paragraphe 2.1, certains n'étant pas ou peu utilisés dans les études recensées. Pour la mise en œuvre de ces indicateurs, une prise de connaissance complémentaire de la littérature technique et scientifique est nécessaire.

2.2.1 Représentation des réseaux de transport et des temps de parcours

Les réseaux de transport sont classiquement représentés par des graphes. Ce sont des structures de données composées de nœuds, représentant les points de bifurcation dans le réseau, et d'arcs, représentant les infrastructures ou les services de transport reliant les nœuds. La théorie des graphes propose de nombreuses méthodes pour trouver un chemin optimal dans un graphe, les critères d'optimisation pouvant varier : minimisation du temps de parcours, de la distance, du nombre de correspondances, d'un coût généralisé agrégeant plusieurs indicateurs, etc. La modélisation choisie pour le réseau de transport conditionne les solutions retournées par les algorithmes d'optimisation d'itinéraires.

Représentation du réseau routier

Dans le calcul d'accessibilité, le réseau routier sert de support aux déplacements individuels : marche, vélo ou voiture. Il faut prêter une attention particulière à sa finesse, aux contraintes de circulation qui seront prises en compte ainsi qu'à la manière de définir les temps de déplacement qui sont associés aux arcs routiers.

Finesse du réseau

La finesse (ou *capillarité*) du réseau routier est fonction :

- des données disponibles ;
- de l'utilisation éventuelle d'un modèle de déplacements – dans ce cas, la finesse du réseau est définie en fonction du zonage du modèle, lui-même étant contraint par le découpage géographique des données socio-économiques et des données mesurant la demande de déplacement ;
- de la puissance de calcul des machines et des logiciels utilisés, limitant la taille du graphe manipulable.

[35] a montré, à partir d'un exemple, qu'utiliser un réseau routier d'une très grande finesse par rapport à l'échelle d'analyse des résultats apporte un gain de précision peu significatif dans les mesures d'accessibilité.

La finesse du réseau peut en revanche être cruciale lorsqu'on s'intéresse à l'accessibilité en modes actifs. La non-prise en compte de certaines voiries accessibles uniquement aux modes actifs peut en effet conduire à sous-estimer l'accessibilité de certaines zones (difficulté notamment mentionnée pour l'étude E).

Contraintes de circulation

La prise en compte des contraintes de circulation sur le réseau routier (sens uniques, mouvements tournants interdits) permet d'améliorer le réalisme des itinéraires calculés. Ce besoin est d'autant plus fort que le niveau géographique auquel les résultats sont analysés est fin.

Comme pour la définition du réseau en lui-même, les contraintes de circulation spécifiques aux modes actifs sont généralement mal recensées dans les sources de données disponibles. Leur prise en compte peut pourtant modifier significativement l'accessibilité de certaines zones (prise en compte de contre-sens cyclables par exemple). De plus, nous verrons par la suite que les logiciels ne permettent pas tous une complète prise en compte des mouvements tournants interdits dans le calcul d'itinéraires.

Temps théoriques (en situation fluide) en voiture

Selon les études, les estimations de temps de parcours des véhicules particuliers tiennent compte ou non de la charge des réseaux. Si la congestion n'est pas prise en compte, on peut utiliser une classification des infrastructures basée sur la vitesse moyenne observée à vide ou sur la vitesse limite légale (par ex. études J et S). [35] montre qu'il y a un véritable impact des sources de données routières utilisées sur les estimations de temps de parcours obtenues (comparaison des données Multinet® et BD Carto®), en raison des différences observées dans la géométrie des réseaux et donc dans le calcul des longueurs de tronçons, et dans les classes de vitesses à vide. En plus des classes de voiries, des paramètres comme le fait de se situer en agglomération ou en dehors peuvent être utilisés pour affiner la définition du temps de parcours à vide (par ex. étude U).

Temps en charge en voiture

L'estimation de temps de parcours tenant compte de la charge des réseaux est réalisée au travers d'une des deux approches suivantes :

- l'utilisation de données historiques de suivi GPS fournissant des temps de parcours mesurés à différentes heures de la journée (l'étude M utilise par exemple de telles données pour calculer le temps de parcours des 70 derniers kilomètres de trajet d'accès à une station de sports d'hiver, le temps de parcours du reste du trajet étant estimé sur la base d'un réseau à vide) : une telle approche reste encore peu répandue aujourd'hui, d'une part parce que la couverture du réseau par les données est parfois trop parcellaire et d'autre part parce que le prix d'achat de ces données peut constituer un obstacle, notamment lorsqu'on travaille à l'échelle de larges territoires et de réseaux très maillés ;
- l'utilisation des résultats d'affectation d'un modèle de déplacements (par ex. études B2., I et R) : c'est généralement le besoin d'avoir des temps de parcours en charge qui justifie l'utilisation d'un modèle de déplacement pour le calcul de l'accessibilité (on devra toutefois veiller à ce que le modèle ait bien été calé par rapport à des temps de parcours observés et pas seulement sur des comptages de véhicules).

Temps de recherche de stationnement

Malgré son importance dans le temps de parcours total en voiture, en particulier sur des trajets urbains, le temps de recherche de stationnement n'est quasiment jamais pris en compte. Lorsque le calcul d'accessibilité est réalisé à partir d'un modèle de déplacements, il faut distinguer la prise en compte du stationnement par le modèle (pour la distribution et le choix de mode), de sa prise en compte pour le calcul d'accessibilité en lui-même. Par exemple, dans le modèle détenu par l'agence d'urbanisme de la région grenobloise, un temps de recherche de stationnement est pris en compte pour le choix modal mais pas pour le calcul d'accessibilité. Le modèle détenu par l'agence d'urbanisme de la région stéphanoise prend en compte le temps de recherche de stationnement dans le calcul d'accessibilité au travers d'un coefficient de pénalité distinct selon les trois types de zones : hypercentre, zones bleues et autres.

Certains travaux ont cherché à estimer ce temps à partir de caractéristiques mesurables du quartier [36] : taux d'occupation et type de stationnement (payant, zone bleue...). Toutefois, les données de taux d'occupation par période de la journée manquent généralement sur les zones étudiées, ce qui limite les possibilités d'application d'une telle méthode.

Vitesses en modes actifs

La vitesse de déplacement des modes actifs est généralement définie de façon statique et homogène sur l'ensemble du réseau. Le tableau 3 résume les valeurs classiquement utilisées pour les vitesses de déplacement en modes actifs. Dans les études examinées, nous n'avons pas observé de pénalisation de la vitesse en fonction du dénivelé. Dans certaines zones, le dénivelé pourrait pourtant être à la fois un facteur de pénalisation du temps de parcours et une contrainte sur l'itinéraire interdisant certains tronçons fortement dénivelés, notamment à vélo ou pour des personnes en situation de handicap.

Les vitesses et les durées maximales de déplacement acceptables relevés pour les modes actifs sont résumées dans le tableau 3. On remarque qu'aucune valeur n'a été recensée pour la durée ou la distance maximales de déplacement à vélo et que les temps maximaux de déplacement à pied sont très variables d'une étude à l'autre.

<i>Vitesse moyenne de marche</i>	Pour un déplacement quelconque : 3 à 4,8 km/h. Pour un déplacement bien connu : 5 km/h [8]. Pour un accès à la voiture : 4 km/h [19] (intégrant le temps de prise du véhicule) En situation de difficulté de mobilité : 3 km/h pour les personnes âgées, 3,6 km/h pour les personnes en fauteuil, 2,7 km/h pour les personnes ayant un handicap lié à la marche (étude N).
<i>Vitesse moyenne de déplacement à vélo</i>	Pour un vélo classique : 12 à 16 km/h. Pour un vélo électrique : 20 km/h (étude D).
<i>Temps maximal de marche</i>	<i>Sur l'ensemble du trajet :</i> – 30 min (étude O), – 240 min (dont 20 min pour la marche en début d'itinéraire et 20 min pour la marche en fin d'itinéraire) [37]. <i>En rabattement et diffusion avec les transports collectifs :</i> – 8 min pour un arrêt de bus et 12 min pour une gare ferroviaire [38], – 10 à 15 min en rabattement vers les TC, aucune limite en diffusion (étude F), – 20 min en rabattement vers les TC et 20 min en diffusion (étude B), – 10 min en rabattement vers les TC et 10 min en diffusion (étude H).

Tableau 3 : Paramètres du temps de parcours des modes actifs

Représentation du réseau de transport collectif

Les temps de parcours des transports collectifs peuvent être pris en compte au moyen d'une représentation des services en :

- horaires théoriques (études A1, A2, A3, E, G, I, N, O, P, S, U) ;
- fréquences et temps de parcours moyens par tronçon (études B, D, F, H, K et L).

La prise en compte des horaires théoriques assure une analyse plus fine des potentiels individuels de déplacement. Elle permet d'adopter le point de vue de l'individu et non plus un point de vue moyennant des réalités parfois très diverses. Elle permet notamment d'étudier les performances du réseau en termes de correspondances (par ex. les études O et P). Les indicateurs obtenus pour différentes heures de départ possibles pourront être agrégés a posteriori (voir paragraphe 2.2.4).

En revanche, l'utilisation des fréquences permet une compacité de représentation (moins de données à stocker en mémoire) et une économie de temps de calcul. Elle présente également l'avantage de nécessiter moins de données d'entrée. L'utilisation des fréquences et des temps de parcours moyens permettent également de tenir compte des tranches horaires (les études B et H définissent ces indicateurs pour la période de pointe du matin, pour la période creuse et pour la période pointe du soir).

Le choix d'une solution de représentation (horaires ou fréquences) doit donc être effectué en fonction des objectifs assignés à l'étude, des données disponibles et des capacités informatiques de la machine et du logiciel utilisés.

Lorsque le calcul d'accessibilité est effectué au travers d'un modèle de déplacements, la représentation des temps de parcours est conditionnée par les choix effectués dans le modèle, une représentation en fréquences étant généralement utilisée pour les services très fréquents (urbains) et une représentation par les horaires théoriques étant utilisée pour des modes moins fréquents (interurbains généralement).

Le temps nécessaire pour effectuer une correspondance entre points d'arrêt proches peut être estimé de manière homogène pour tous les couples d'arrêts, ou bien plus finement, à partir d'une mesure sur le terrain (par ex. étude F) ou encore d'une modélisation des cheminements piétons dans les stations (pas d'exemple recensé). Les principaux paramétrages du temps de parcours en transports collectifs sont résumés dans le tableau 4.

<i>Temps d'attente maximum en correspondance</i>	60 min sur l'ensemble du trajet (étude O, [37]) En interurbain (étude M) : 2 heures pour les correspondances avion → bus ou train → bus, 1 heure pour les correspondances bus → bus
<i>Nombre maximum de correspondances</i>	Défini explicitement : 4 correspondances (étude A), 5 correspondances [37] ou limité implicitement par le temps maximal d'attente en correspondance
<i>Méthode d'estimation du temps d'attente</i>	À partir des horaires théoriques (études A1, A2, A3, E, G, I, N, O, P, S et U). ou Demi-temps inter-véhiculaire (études B, D, F, H, K et L). Parfois pénalisé par un temps additionnel destiné à représenter le manque de fiabilité des horaires : 0,75 min pour les trains et 2 min pour les bus dans [38]. Parfois plafonné pour l'attente à l'origine afin de prendre en compte la connaissance des horaires par les usagers (15 min pour les TCU et 20 min pour le ferroviaire dans les études B et H ; 10 min pour les TCU dans l'étude F).
<i>Temps de précaution en correspondance ou à l'origine (temps minimal d'attente pour éviter de rater une correspondance)</i>	1 à 3 min pour les transports collectifs urbains et le train 45 min pour l'avion (étude P) En interurbain (étude M) : 1 heure pour la correspondance avion → bus, 30 minutes pour la correspondance train → bus, 15 min pour la correspondance bus → bus

Tableau 4 : Paramètres du temps de parcours en transports collectifs

Représentation de la multimodalité

Dans ce document, la *multimodalité* désigne l'usage potentiel de plusieurs modes de transport (individuels et collectifs) pour réaliser un déplacement. L'*intermodalité* désigne, quant à elle, l'utilisation effective au cours d'un déplacement de plusieurs modes de transport successifs, avec au moins un mode de transport collectif et un mode individuel (ex : un déplacement VP + TER + marche est considéré comme intermodal).

Les déplacements intermodaux sont globalement marginaux (de l'ordre de 2 % des déplacements). Ils peuvent néanmoins être non négligeables sur certains itinéraires, en particulier ceux partant du périurbain et allant vers les cœurs d'agglomérations, avec des phénomènes de rabattement sur des gares ou stations de transport collectif en limite des zones denses. Ils sont également beaucoup plus importants parmi ceux ayant une extrémité au domicile, pour des raisons de disponibilité du véhicule. De nombreux producteurs d'études mentionnent l'intérêt qu'ils portent à la question de la multimodalité et la difficulté qu'ils ont à la prendre en compte avec les outils et les méthodes actuellement disponibles, notamment pour représenter les rabattements sur les parcs-relais. Nous allons voir comment cette question est traitée dans les études.

Représentations simplifiées de l'accessibilité en transports collectifs

Dans certains cas, le réseau de transport collectif est représenté isolément, sans lien avec un réseau routier (par ex. études A1, A2, F). Le calcul d'itinéraire est alors réalisé d'arrêt à arrêt et des « halos » concentriques sont définis autour des arrêts pour représenter les rabattements sur le réseau qui peuvent être effectués avec différents modes (marche, vélo, voiture...). La portée du rabattement est mesurée à vol d'oiseau à partir d'une vitesse moyenne et par conséquent ne tient pas compte de la forme du réseau viaire et de ses caractéristiques de circulation (voir illustration 14). Les paramètres de rabattement rencontrés sont repris dans le tableau 5.

Un coefficient multiplicateur de la distance à vol d'oiseau est parfois introduit pour représenter la différence avec la distance réellement parcourue. L'étude R utilise par exemple un coefficient de $\sqrt{2}$. [39] utilise un coefficient variable en fonction de l'éloignement entre l'origine et la destination. En effet, plus l'origine et la destination sont éloignées, plus la distance en utilisant le réseau s'approche de la distance à vol d'oiseau, donc plus le coefficient correctif doit être faible. Les valeurs du coefficient varient entre 1,1 et 1,4 et la distance est définie par la formule suivante :

$$D_r = D_{vo} \times (1,1 + 0,3 \times e^{-D_{vo}/20}) \quad \text{pour } D_{vo} \leq 20 \text{ km} \quad \text{et}$$

$$D_r = D_{vo} \times 1,1 \quad \text{pour } D_{vo} > 20 \text{ km} ,$$

où D_r représente la distance estimée, nommée *distance rectilinéaire pondérée* et D_{vo} représente la distance à vol d'oiseau.

Vitesses de rabattement en voiture	10 km/h [35] (en zone urbaine) 5 km/h [40] (en zone urbaine) 50 km/h [19] (vers une gare TER)
Vitesses de rabattement à pied	3,5 km/h [40] 3,5 km/h [19]
Distance maximale de rabattement en voiture	Entre 5 et 20 km selon les quartiers et les études (étude R)
Distance maximale de rabattement à pied	1 km sur une gare TER ou une station de métro (étude R) 500 m sur un arrêt de bus (étude R)

Tableau 5 : Exemples de paramétrages du rabattement sur un réseau à vol d'oiseau

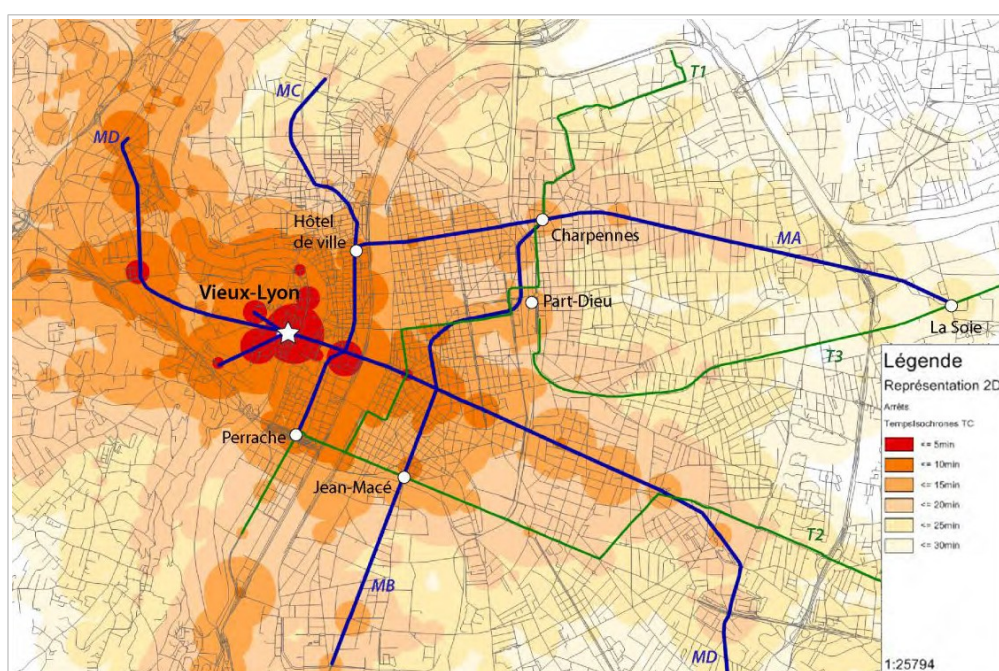


Illustration 14 : Isochrone de 30 minutes en heure de pointe en transports collectifs à partir de l'arrêt Vieux-Lyon, agglomération lyonnaise, source [19]

Parfois, c'est uniquement l'accessibilité aux arrêts de transport collectif qui est mesurée, sans préjuger de la qualité de service offerte par ces arrêts aux usagers. On estime donc quelle partie du territoire a accès à un arrêt de métro, de tramway... en moins de x minutes (par ex. étude T), soit en utilisant des « halos » de rabattement, soit en calculant l'accessibilité à partir du réseau routier à proximité de l'arrêt.

Dans les modèles de déplacements actuels, l'intermodalité n'est, à notre connaissance, pas complètement représentée non plus, ceci pour deux raisons [41] :

- les affectations pour les transports collectifs et pour le mode routier motorisé sont effectuées séparément. Les modes individuels (marche, vélo, voiture) sont généralement représentés par un arc connecteur, qui définit a priori la liaison entre une zone d'origine et un arrêt de transport collectif. Par conséquent, les points d'intermodalité possibles au départ d'une zone d'origine sont présélectionnés (définition d'un bassin d'attraction pour chaque arrêt de transport collectif), de même que les combinaisons modales. On ne tient pas toujours compte du niveau de service sur le trajet de rabattement, lorsque celui-ci est effectué en voiture ;
- les rabattements depuis différents lieux d'une même zone sont représentés à partir du centroïde de zone, donc moyennés en temps de parcours. Les vitesses moyennes de rabattement utilisées classiquement sont listées dans le tableau 5.

Le projet MOSART, calculant des accessibilités à partir d'un modèle de déplacements, a contourné la seconde difficulté en utilisant pour origines et destinations des déplacements des microzones (carroyage de 250 à 500 mètres de côté), subdivisant ainsi les zones utilisées par le modèle de demande de déplacements [19]. Un réseau routier extrêmement fin, tendant vers l'exhaustivité, permet ensuite de calculer avec précision les rabattements depuis les centroïdes des microzones vers le réseau routier principal modélisé et vers les arrêts de

transport collectif. Les indicateurs d'accessibilité peuvent finalement être calculés et cartographiés à l'échelle des microzones, quel que soit le mode de rabattement utilisé (voir illustration 15 avec un rabattement piéton), les temps de parcours pour le mode voiture étant estimés sur la base d'une situation fluide, puisque le réseau routier fin ne fait pas partie du modèle et ne bénéficie donc pas d'une estimation du temps de parcours en charge.

Accessibilité aux emplois en transport en commun en heure de pointe sur la zone Lyon - La Verpillière

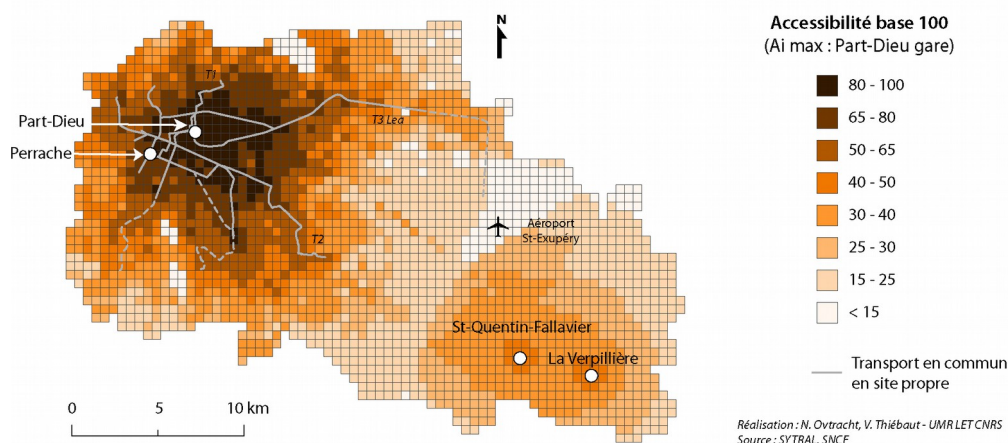


Illustration 15 : Représentation de l'accessibilité à l'échelle des microzones, les temps de parcours étant calculés grâce à un modèle statique de déplacements, source [19]

Représentations « connectées » des réseaux multimodaux

Si on peut légitimement considérer que l'intermodalité a un impact mineur sur un modèle de déplacements d'agglomération, celle-ci peut toutefois représenter un potentiel de déplacement relativement important à une échelle plus vaste (régionale par exemple) ou sur des itinéraires particuliers (déplacements radiaux notamment) et contribuer significativement à l'accessibilité de certains territoires ou équipements. On peut alors calculer des itinéraires multimodaux sur un réseau intégrant les modes individuels et les modes collectifs, et non sur deux réseaux distincts. Cette représentation de la multimodalité laisse le calculateur d'itinéraire déterminer la combinaison modale et les lieux d'intermodalité de l'itinéraire, qui ne sont pas connus a priori, au contraire des précédentes approches.

Dans un réseau multimodal, la finesse de représentation du réseau routier conditionne celle du réseau de transport collectif. En effet, un réseau routier grossier ne permet pas de positionner et de différencier des arrêts de transport collectif proches géographiquement. Si la combinaison modale de l'itinéraire final n'est pas connue a priori, certaines combinaisons modales irréalistes doivent être éliminées (par ex. un trajet ayant pour chaîne modale : voiture particulière + train + voiture particulière). Les logiciels permettant ce type d'optimisation multimodale définissent généralement a priori les combinaisons modales réalistes (par exemple Musliw, qui le définit au travers de la méthode de construction du réseau). La définition de contraintes supplémentaires sur les itinéraires permettra alors d'augmenter le réalisme des solutions générées et de limiter les temps de calcul (lorsque le logiciel le permet) :

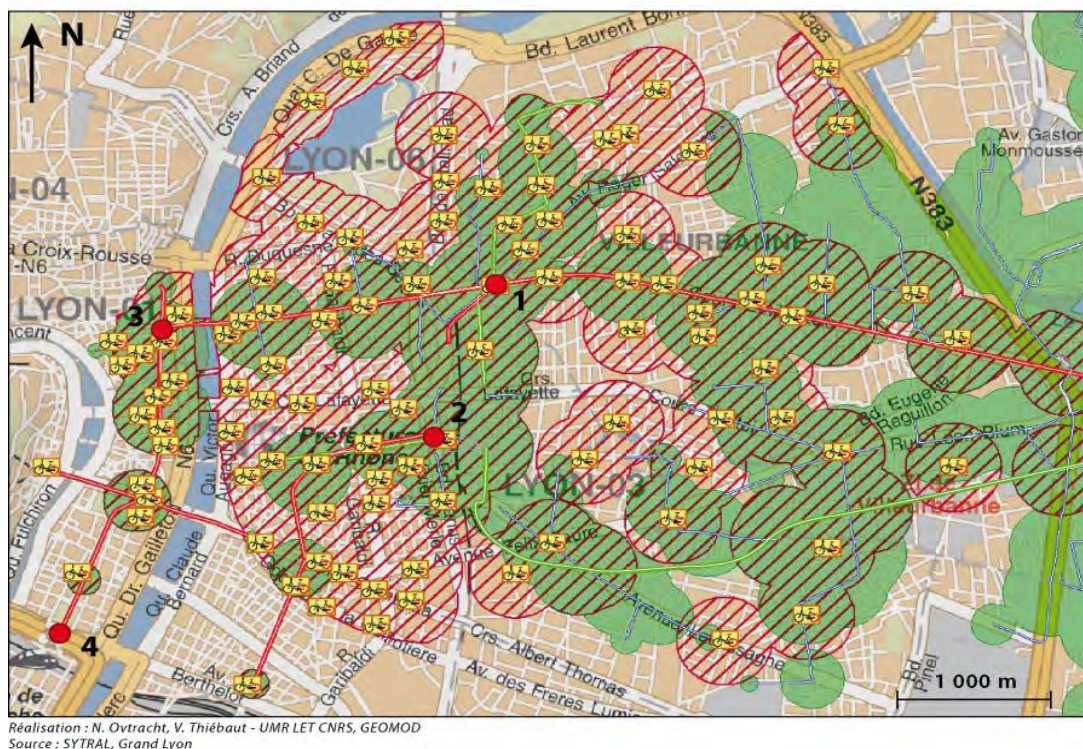
- limiter le temps ou la distance totale parcourue avec un mode ;
- limiter le temps ou la distance parcourue avec un mode pour chaque composante du trajet multimodal (par exemple, pas plus de x minutes de marche à l'origine et à la destination) ;
- limiter le nombre de correspondances...

Prise en compte des modes partagés

Certains travaux prennent également en compte les systèmes de véhicules partagés dans les calculs d'accessibilité (voir illustration 16). Du point de vue de la codification du réseau, cela nécessite simplement de localiser par rapport au réseau routier les points de location et de retour des véhicules, au même titre que les points d'arrêt du réseau de transport collectif. Pour la prise en compte de l'intermodalité, au travers des rabattements piétons sur les stations de location et des rabattements vélo sur les arrêts de transport collectif

(ce second rabattement nécessitant la présence d'une station de location à proximité immédiate de l'arrêt), trois solutions similaires à celles exposées précédemment sont envisageables :

- calcul de l'itinéraire uniquement sur le réseau de transport collectif et représentation simplifiée des rabattements par des halos, la distance étant calculée à vol d'oiseau ;
- intégration du réseau routier pour calculer les rabattements vélos et piétons sur les arrêts de transport collectif, l'itinéraire en transport collectif étant calculé séparément ;
- utilisation d'un réseau multimodal « connecté » entre les transports collectifs et la route, sans connaissance a priori des stations de location initiale et finale utilisées.



Accessibilité :

- Métro
- Tramway
- Bus
- Vélo V

Principales stations TC atteintes :

- 1 - Charpennes : MA - MB - T1
- 2 - Part-Dieu : MB - T1 - T3 Lea/Lesly
- 3 - Hôtel de Ville : MA - MC
- 4 - Perrache : MA

- Marche à pied 300 m autour des stations TC atteintes
- Marche à pied 300 m autour des stations Vélo V

Illustration 16 : Isochrones de 40 minutes en transports collectifs et avec possibilité d'une diffusion en vélo libre-service, depuis la zone industrielle de Meyzieu (agglomération lyonnaise), source [19]

Traitement des chaînes d'activités

La notion d'intermodalité amène à considérer les déplacements non plus isolément mais comme des chaînes, puisque l'utilisation des modes faite sur un déplacement pourra avoir un impact sur les combinaisons modales pour les autres déplacements de la boucle. Ce problème s'illustre particulièrement lorsque l'on utilise des mesures de l'accessibilité des individus au travers de programmes d'activités (voir paragraphe 2.1.2). Toutefois, il est très peu traité dans la littérature et, à notre connaissance, les outils logiciels actuels ne permettent pas sa prise en compte.

2.2.2 Définition du coût généralisé du déplacement

Nous allons voir comment sont définis et paramétrés classiquement le temps généralisé et les autres composantes du coût généralisé (voir définition p. 24).

Construction du temps généralisé

Le temps de parcours correspond au temps réellement expérimenté par l'utilisateur pour se déplacer. Certaines études utilisent directement le temps de parcours pour évaluer l'accessibilité (par ex. les études L et P). D'autres utilisent une notion de *temps généralisé*, au travers de laquelle on cherche à quantifier le ressenti de l'utilisateur vis-à-vis de ce temps, en pondérant certaines dimensions du trajet pour représenter leur pénibilité (par ex. étude E). Des valeurs types pour chacun des paramètres utilisés pour définir le temps généralisé sont présentées dans le tableau 6, sur la base des valeurs observées dans les études et dans la bibliographie. Selon les objectifs de l'étude, on choisira de prendre en compte ou non chacun de ces paramètres.

1. Paramètres du temps généralisé pour les déplacements en transports collectifs	
<i>Pénalité de temps généralisé sur les correspondances (en plus du temps réellement passé à attendre)</i>	Entre 5 et 15 min [42] par correspondance 10 min (étude E) par correspondance
<i>Pondération du temps d'attente dans le temps généralisé</i>	* 1 dans les cas où la pénalité est prise en compte par un temps ajouté ([42] ou étude E) * 1,5 ([12], p. 149) * 2 ([43], cité dans l'étude R) * 5 (étude O)
<i>Pondération du temps passé dans un véhicule en congestion</i>	* 1,5 ([44], page 193) Formule de pondération selon le taux de charge du véhicule en nombre de personnes debout par m ² ([12], p. 154)
<i>Valorisation de l'irrégularité du temps de parcours</i>	Fonction de la probabilité de retard, de l'ampleur du retard et du motif ([12], p. 158-159)
2. Paramètres du temps généralisé pour les déplacements en modes actifs	
<i>Pondération du temps de marche dans le temps généralisé par rapport au temps en transports collectifs</i>	* 1 (étude U) * 1,5 (étude E, étude O), pour tenir compte du contexte peu favorable à la marche en zone périurbaine * 2 ([12], p. 149) en pré et postacheminement ou en correspondance * 2 ([43], utilisé dans l'étude R)
<i>Pondération du temps de déplacement à vélo dans le temps généralisé par rapport au temps en transports collectifs</i>	* 1,5 (étude E), pour tenir compte du contexte peu favorable au vélo en zone périurbaine
3. Paramètres du temps généralisé pour les déplacements en voiture particulière	
<i>Valorisation de l'irrégularité du temps de parcours</i>	Fonction du 90 ^e percentile et de la médiane des temps de parcours observés ([12], p. 157)

Tableau 6 : Paramètres du temps généralisé

Certains producteurs d'études mentionnent leur souhait de prendre en compte la congestion dans les transports collectifs pour calculer l'accessibilité. En effet, la notion de temps d'accès est une mesure insuffisante de l'accessibilité pouvant conduire à encourager l'urbanisation le long de lignes de transport collectif déjà saturées. Le rapport sur l'évaluation socio-économique des investissements publics [12] propose une approche pour prendre en compte l'inconfort lié à la saturation en mesurant le nombre de personnes debout par m² dans les véhicules. Toutefois, cet aspect n'est généralement pas considéré dans les études d'accessibilité, même dans le cas où on dispose d'un modèle de déplacement, du fait du manque de données sources.

Construction du coût généralisé

Les études Q et S minimisent les distances parcourues en plus du temps de parcours. On peut imaginer la minimisation d'autres coûts : le coût financier du déplacement, le volume de CO₂ généré... Ces différents critères d'optimisation peuvent être agrégés, sous la forme d'une somme pondérée, au sein d'une fonction de coût généralisé du déplacement.

Coût financier

Pour la voiture, le coût financier peut être pris en compte au travers d'un coût marginal (uniquement le coût direct du déplacement) ou au travers d'un coût total (incluant les coûts d'amortissement du véhicule, d'assurance et d'entretien). Les valeurs typiques utilisées dans les études examinées sont présentées dans le tableau 7. Le budget de l'automobiliste, publié annuellement par l'Automobile club association [45], donne une estimation de ces coûts.

Pour les transports collectifs urbains, certaines études prennent en compte le coût du ticket à l'unité, d'autres réalisent une moyenne des coûts entre abonnés et non abonnés, en pondérant par le pourcentage d'usagers abonnés sur le réseau lorsque cette donnée est disponible. Pour les usagers non abonnés du train, on utilise généralement un coût kilométrique par tranche de distances auquel s'ajoute une constante, qui permet de reconstituer approximativement le coût réel du billet SNCF pour les trajets en TER et en train Intercités :

$$\text{Prix} = a + b \times d$$

où d est la distance, b est le prix kilométrique, a est une constante, et où a et b ont des valeurs définies par tranche de valeurs de d , les valeurs étant disponibles sur le site de la SNCF pour les trains Intercités [46].

Pour le TGV comme pour l'avion, les variations de prix sont très fortes sur un même train (elles dépendent du moment de réservation du billet et des éventuelles cartes de réductions ou promotions). Par conséquent, une stratégie d'évaluation utilisée par certains producteurs d'études consiste à interroger un calculateur à intervalles réguliers et à agréger les coûts obtenus en un coût moyen.

Une étude commandée par la Fédération nationale des associations d'usagers des transports a permis d'estimer les coûts moyens supportés en 2011 par les usagers pour différents modes de transport [47]. D'après cette étude, le coût moyen kilométrique par voyageur serait :

- sur l'ensemble des réseaux d'Île-de-France de 0,11 € ;
- sur le réseau Transilien de 0,10 € ;
- sur les réseaux urbains de province de 0,13 € ;
- sur les réseaux des conseils généraux de 0,04 € ;
- sur les réseaux TER de 0,08 € ;
- sur le réseau Intercités de 0,09 € ;
- sur le réseau TGV de 0,11 € ;
- sur le réseau aérien traditionnel de 0,15 € ;
- sur les compagnies aériennes à bas coût de 0,06 € ;
- sur l'ensemble des compagnies aériennes de 0,12 € ;
- pour les véhicules particuliers de 0,25 € de coût total dont 0,09 € de coût marginal (supposant un taux d'occupation des véhicules de 1,39) ;
- pour les deux-roues motorisés de 0,33 € de coût total dont 0,08 € de coût marginal (supposant un taux d'occupation de 1,15) ;
- pour les deux-roues non motorisés de 0,15 € de coût total dont 0 € de coût marginal.

Cette étude propose des modulations des coûts moyens selon la distance parcourue ainsi qu'une décomposition des coûts pour certains modes de transport.

	Par véhicule	Par voyageur
<i>Coût total</i>	En 2012 : 0,69 €/km pour une voiture essence, 0,52 €/km pour une voiture diesel [45] (notre calcul indique 0,56 €/km pour un véhicule moyen) En 2011 : 0,34 €/km (recalculé à partir des chiffres figurant dans [47], et notamment le taux d'occupation moyen de 1,39 voyageur par véhicule) En 2008 : 0,49 €/km [19], calcul réalisé à partir du <i>Budget de l'automobiliste</i> 2008 [45] qui estime le coût kilométrique à 0,59 € pour une voiture essence et 0,48 € pour une voiture diesel (notre calcul indique plutôt 0,51 €/km pour un véhicule moyen)	En 2011 : 0,25 €/km [47]
<i>Coût marginal</i>	En 2012 : sur la base de [45], notre calcul indique 0,09 €/km pour un véhicule moyen En 2011 : 0,12 €/km (recalculé à partir des chiffres figurant dans [47], et notamment le taux d'occupation moyen de 1,39 voyageur par véhicule) En 2008 : 0,14 €/km [19], calcul réalisé à partir du <i>Budget de l'automobiliste</i> 2008 [45] (mais avec une définition de coût marginal différente, incluant aussi les frais de réparation. Si on enlève ces frais de réparation, on obtient un coût marginal de 0,08 €/km)	En 2011 : 0,09 €/km [47]

Tableau 7 : Exemples de coûts kilométriques de la voiture particulière

Valeur du temps

Pour agréger le temps généralisé et le coût financier, on introduit la notion de valeur du temps. Celle-ci permet de convertir le temps généralisé en une valeur financière. Des valeurs tutélaires ont été définies au niveau national ([12], p. 146-150). Elles tiennent compte du milieu (urbain ou interurbain) ainsi que :

- du motif de déplacement (professionnel, domicile-travail, autre) en milieu urbain ;
- ou de la distance, du motif et du mode en milieu interurbain.

Elles sont situées dans une fourchette de 6,8 €/heure (valeur pour motif personnel, pour des distances inférieures à 20 km) à 72,9 €/heure (valeur pour motif professionnel, avec le mode aérien).

Toutefois, la valeur du temps utilisée dans les études est généralement unique pour l'ensemble des déplacements du modèle (par ex. étude R où on utilise la valeur du temps correspondant au motif domicile-travail).

Plafonnement des coûts généralisés

Certaines études fixent un plafond de temps de parcours, de temps généralisé ou de coût généralisé au-delà duquel on ne considère plus les opportunités comme accessibles. L'étude E utilise par exemple un plafond de 60 minutes de temps généralisé. Ce plafond est à fixer en fonction des objectifs de l'étude et en particulier des motifs de déplacement visés.

2.2.3 Calibrage de la fonction de résistance

Pour les mesures basées sur le maximum d'utilité ou les différentes mesures gravitaires, une fonction de résistance de forme combinée est souvent utilisée : $F(d_{ij}) = e^{-\alpha d_{ij}} \times d_{ij}^{-\beta}$

Pour la forme Logit (avec $\beta=0$), l'annexe 13 de l'instruction de 2007 pour l'évaluation économique des projets routiers interurbains [48] proposait une valeur de $\alpha=0,0047$ pour le motif travail : la formule proposée fait décroître l'accessibilité en fonction du temps entre une zone i et une zone j avec la fonction $F(T_{ij}) = e^{-0,0047 \times d_{ij}} = e^{-0,47 \times T_{ij}}$, où T_{ij} est exprimé en heures et d_{ij} en kilomètres, en supposant une vitesse moyenne sur le réseau routier national (routes nationales et autoroutes) de 100 km/h [49]. Cette formulation se base sur des travaux d'Orus et Sanchez [50], qui ont calibré cette fonction de résistance exponentielle pour quatre types de motifs différents : travail, services, tourisme, affaires professionnelles. La valeur de 0,0047 reprise dans l'annexe 13 de l'instruction de 2007 correspond en fait au calibrage pour le motif « affaires professionnelles ».

La fonction combinée est souvent utilisée dans les modèles de déplacements, car le calibrage du modèle peut ainsi traduire une résistance à la distance qui pourra prendre une forme variable selon le motif : parfois proche d'une fonction exponentielle et parfois proche d'une fonction puissance. Dans le projet MOSART, ces différentes fonctions ont été calibrées sur l'agglomération de Lyon, pour différents motifs et différentes périodes horaires, et les paramètres retenus sont indiqués dans [19].

On peut trouver dans la littérature de nombreuses valeurs proposées ([30], [51], [52], [53]), mais il faut être attentif au type et à l'unité de la variable d'utilité retenue (temps, distance, coût...).

2.2.4 Agrégation et représentation des indicateurs d'accessibilité

Agrégation temporelle des indicateurs

Les mesures d'accessibilité avec représentation du temps de parcours des transports collectifs par les horaires peuvent être difficiles à analyser en raison de la très forte variabilité des indicateurs d'une minute à l'autre. Ainsi, comme le soulignent Richer et Palmier [16], le calcul d'accessibilité pour un départ à 9 heures peut donner un résultat très différent du même calcul pour un départ à 9 h 04. On peut également envisager des variations sur le temps de parcours routier, même si celles-ci sont a priori moindres.

Pour fournir un indicateur représentant la période dans son ensemble, il faudra donc agréger les données selon une des deux approches ci-dessous :

- agrégation des données de coût par arc, avant le calcul des itinéraires :
 - pour les transports collectifs, les temps de parcours sont alors moyennés sur la période au moyen d'une approche par fréquences et temps de parcours moyen,
 - pour le mode routier, les temps de parcours sont généralement déjà moyennés sur la période, qu'ils soient issus d'un modèle de déplacements ou d'observations GPS ;
- agrégation a posteriori des coûts d'itinéraires obtenus pour différentes heures de départ :
 - on pourra analyser les résultats en termes de moyenne, de médiane, d'écart-type, de valeur minimale ou maximale... (voir étude R qui utilise le temps de parcours minimal sur la période),
 - les analyses pourront porter sur différents éléments de coût séparément (temps de parcours, coût financier, nombre de correspondances, indicateur de pénibilité de l'itinéraire...), sur le coût généralisé dans son ensemble, ou encore sur un indicateur d'accessibilité calculé à partir du coût généralisé.

L'agrégation des indicateurs en sortie du calcul d'itinéraires, plus lourde en charge de calculs, reflète mieux la réalité vécue par l'utilisateur que l'agrégation en fréquences et temps de parcours avant le calcul d'itinéraires. Lorsque les données et les outils logiciels le permettent et que l'on souhaite adopter le point de vue de l'utilisateur,

il est donc préférable de calculer les indicateurs d'accessibilité en transports collectifs à partir des horaires sur l'ensemble d'une période, avec par exemple un départ toutes les minutes, puis d'agréger les résultats obtenus sur l'ensemble de la période.

Cette recommandation fait toutefois l'objet d'une réserve lorsque l'on souhaite projeter les réseaux en situation future. Il est en effet rare que l'on soit en mesure de construire une grille horaire détaillée pour une situation prospective et, pour rester comparable, les résultats en situation actuelle et en situation future doivent utiliser la même stratégie d'agrégation. C'est la raison pour laquelle la plupart des modèles de déplacements agrègent plutôt les temps de parcours a priori et utilisent donc une représentation en fréquence de passage et temps de parcours moyen par arc.

Si l'on utilise une grille horaire détaillée et qu'on réalise l'agrégation a posteriori, on pourra représenter la notion de *dispersion* des temps de parcours des transports collectifs par l'écart-type des temps de parcours sur l'ensemble des heures de départ ou encore par la mesure du nombre de départs possibles dans la période. En effet, si on a de faibles fréquences de desserte, on a aussi une forte variation du temps de parcours selon le moment où on décide de partir (par ex. étude O, critère d'intensité de l'offre).

Agrégation géographique des indicateurs

L'accessibilité est calculée entre nœuds du graphe représentant le réseau de transport et correspond donc au départ à une notion ponctuelle. Pour représenter sur une carte l'accessibilité depuis (ou vers) l'ensemble des points du territoire et depuis (ou vers) une zone représentant une opportunité, il est nécessaire de définir une technique de passage d'une accessibilité ponctuelle à une accessibilité surfacique. Comme pour l'agrégation temporelle, on peut choisir de réaliser l'agrégation avant ou après le calcul d'itinéraires.

Définition a priori du zonage

Pour représenter les indicateurs d'accessibilité sur un zonage prédéfini, on choisit une des approches suivantes :

- utiliser un zonage correspondant à des unités administratives (ex. : communes ou cantons) ou statistiques (par ex. : zones IRIS de l'INSEE) ou à un regroupement de celles-ci, ainsi qu'à des pôles générateurs de déplacements (zones commerciales, hôpitaux...) ;
- définir un pavage de l'espace composé de subdivisions géométriques du territoire, en vue de s'affranchir des limites administratives lors de l'analyse des résultats et de permettre de descendre à un niveau d'analyse plus fin que les découpages statistiques tels que les IRIS [54]. Le pavage pourra être de forme carrée (par ex. études B, E, F, L...) ou encore hexagonale [37].

Il faut avoir conscience que le choix d'un zonage ou d'un autre peut considérablement modifier l'allure de la carte et l'interprétation qu'on pourra faire des résultats. Ce *problème des unités spatiales modifiables*² est bien connu des géographes et a notamment été examiné par ESPON, l'Observatoire européen pour le développement et la cohésion des territoires [55].

Le zonage devra être choisi en recherchant un compromis entre une précision trop grande qui gênerait la lecture de la carte et induirait un volume important de calculs supplémentaires, et une précision trop faible qui moyenniserait des situations différentes et induirait des erreurs d'interprétation (notamment l'erreur écologique³). La finesse du zonage devra notamment être en lien avec la finesse du réseau routier : il est inutile d'avoir un zonage très fin si on n'a pas de réseau à l'intérieur de certaines zones et, à l'inverse, seul le réseau permettant d'aller d'une zone à une autre est utile. Un réseau trop fin par rapport au zonage introduira donc de la complexité inutile dans la codification du réseau et le calcul d'itinéraires.

On calcule alors pour chaque zone prédéfinie les itinéraires depuis ou vers cette zone en prenant comme extrémité :

- soit un nœud quelconque de la zone, central si possible (par ex. étude O prenant pour origine ou destination le nœud le plus proche du centre géométrique de la zone, pour les pôles d'excellence de Lille Métropole) ;

2 - Problème des unités spatiales modifiables ou *Modifiable Area Unit (MAU) problem* en anglais : (voir http://en.wikipedia.org/wiki/Modifiable_areal_unit_problem)

3 - Erreur écologique : notion utilisée en géographie pour désigner la transposition à une échelle fine de liens de corrélation observés à une échelle plus agrégée.

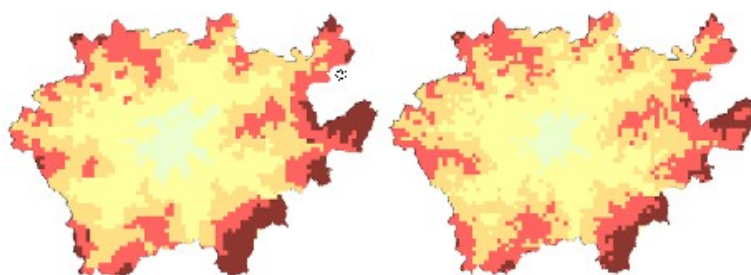
- soit plusieurs nœuds de la zone et en agrégeant a posteriori les résultats (voir [37] dans lequel les itinéraires sont calculés vers ou depuis les différents nœuds d'entrée ou de sortie des zones commerciales et les temps de parcours obtenus pour chaque zone sont moyennés, comme le montre l'illustration 17) ;
- soit en ajoutant un nœud fictif ou *centroïde* (n_0) relié à un ou plusieurs nœuds réels de la zone ($n_1, n_2, n_3, \dots$), le nœud fictif n_0 servant alors d'origine ou de destination depuis ou vers cette zone : il sera alors possible d'affecter un coût à chaque arc ((n_0, n_1) , (n_0, n_2) , (n_0, n_3) ...) qui correspond à un coût de rabattement, qui peut ensuite être estimé, par exemple en tenant compte de la densité ou de la localisation du bâti.



Illustration 17 : Utilisation des points d'entrée dans des zones commerciales comme origines ou destinations pour le calcul d'accessibilité, source [37]

Avec un coût de rabattement nul, c'est le nœud depuis ou vers lequel le coût est le plus faible qui sera retenu comme nœud extrémité de la zone. Sur un pavage carré dans lequel le centroïde d'une zone est situé en son centre géométrique, Di Salvo montre dans [35] que la prise en compte d'un temps de rabattement vers les nœuds réels du réseau peut légèrement modifier les résultats du calcul d'accessibilité (voir illustration 18). L'introduction du temps de rabattement peut en effet permettre de tenir compte de la densité du réseau routier dans le calcul, puisque naturellement le temps de rabattement moyen sera d'autant plus élevé que le réseau est peu maillé dans la zone.

Exemple calculé sur l'aire urbaine d'Agen



Interpolation au plus proche voisin

En tenant compte de la distance à celui-ci

Illustration 18 : Isochrones sans (à gauche) et avec (à droite) prise en compte des temps de rabattement des centroïdes des carreaux vers le réseau, source [35]

Élaboration d'un zonage optimal a posteriori

On peut également utiliser des techniques plus sophistiquées de « krigeage »⁴ qui permettent de définir un zonage en fonction des valeurs des indicateurs d'accessibilité calculés au niveau des nœuds du graphe : on définit la valeur de l'indicateur à attribuer à un point (x, y) de l'espace à partir de la valeur attribuée aux nœuds proches. L'illustration 19 propose un exemple de zones définies par *krigeage*. Nous verrons que peu de logiciels proposent de véritables procédures de *krigeage* à ce jour.

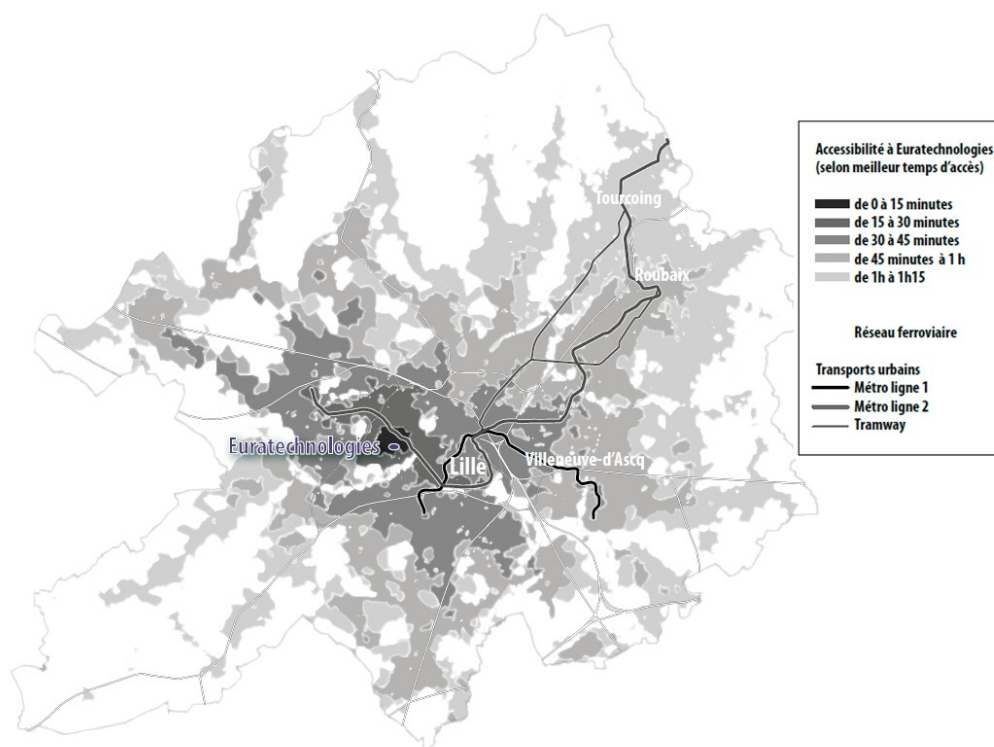


Illustration 19 : Temps d'accès au site d'Euratechnologies dans l'agglomération lilloise en transport collectif, zonage établi par « krigeage », source [16]

4 - <http://fr.wikipedia.org/wiki/Krigeage>

Autres agrégations des indicateurs

Agrégation sur les itinéraires

Dans certaines études (par ex. étude I), on considère que plusieurs itinéraires peuvent relier un nœud A à un nœud B, pouvant correspondre soit aux n chemins de coûts minimaux soit à n optimisations selon des critères différents (variation des valeurs du temps entre les usagers par exemple). On réalise alors une agrégation des indicateurs associés à tous les itinéraires considérés comme admissibles entre ces deux nœuds.

Définition de classes sur les indicateurs

La représentation cartographique nécessite de définir des classes pour les indicateurs d'accessibilité. Les seuils qui délimitent ces classes sont souvent fixés arbitrairement. Leur choix peut pourtant avoir une influence notable sur le rendu final et les possibilités d'interprétation qui en découlent. Utiliser trop de classes peut brouiller le message général de la carte. Au contraire, trop agréger les valeurs de l'indicateur final peut dissimuler des variations entre zones. Là encore, il faut trouver le bon équilibre. Certaines études utilisent des classes de largeurs variables pour mieux représenter les variations de l'indicateur (ex : des surfaces isochrones de 10 minutes pour la plage 0 à 30 minutes puis de 15 minutes pour la plage 30 à 90 minutes). On peut également décomposer les valeurs obtenues en quantiles pour définir des classes, en particulier pour les indicateurs n'ayant pas de signification physique, comme c'est notamment le cas des indicateurs gravitaires.

Agrégation de plusieurs indicateurs

Pour tenir compte de plusieurs indicateurs qualifiant l'accessibilité d'une zone, certaines études définissent des classes d'accessibilité (faible, moyenne ou forte par exemple) sur la base de seuils sur chacun des indicateurs et utilisent éventuellement une méthode de classification (voir étude O et illustration 20).

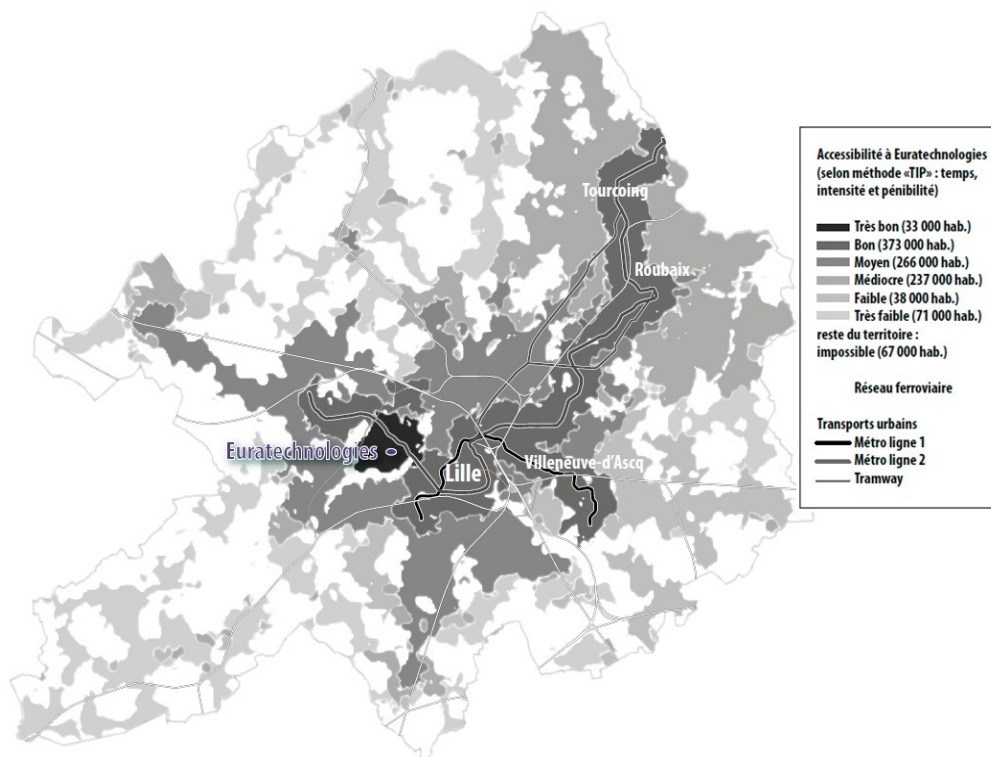


Illustration 20 : Accessibilité au site d'Euratechnologies dans l'agglomération lilloise en transport collectif, agrégée sur les indicateurs « temps », « intensité » et « pénibilité », zonage établi par « krigeage », source [16]

Scénarios

Enfin, les comparaisons de scénarios sont également une forme d'agrégation des indicateurs d'accessibilité par différence. Les éléments variant entre les scénarios pourront concerner le mode choisi, l'heure de départ, l'offre de transport, l'offre d'équipements et d'opportunités sur le territoire (voir illustration 3)...

Représentations graphiques et cartographiques de l'accessibilité

Au-delà des cartes classiques réalisant une analyse thématique sur l'indicateur d'accessibilité que l'on cherche à représenter, des représentations très diverses de l'accessibilité sont imaginables :

- *graphiques en toile d'araignée* (pour chaque lieu dont on évalue l'accessibilité, chaque rayon représente un critère, élément du coût généralisé) ;
- *histogrammes ou courbes cumulées* identifiant le nombre d'opportunités ou la population atteinte en fonction du coût du déplacement (par ex. études A1 et N).
La superposition et les écarts entre ces courbes pour plusieurs scénarios ou différents points de départ ou d'arrivée permettent de comparer les accessibilités. De plus, ces courbes dessinent des points de rupture dans l'évolution de l'accessibilité (par ex. modification de la pente de la courbe quand on entre dans le territoire couvert par le réseau de métro, voir illustration 4) ;
- *anamorphoses* (déformations de cartes pour représenter la plus ou moins grande impédance des déplacements entre zones), *cartographies en relief d'espace-temps*...

Toutefois, les chargés d'études réalisant des calculs d'accessibilité s'accordent à dire que les représentations les plus simples restent dans la majorité des cas les plus efficaces en termes de communication. Les cartes réalisant des analyses thématiques sur l'indicateur d'accessibilité, éventuellement accompagnées de courbes cumulées pour représenter un croisement de l'impédance du déplacement avec une donnée socio-économique sur le territoire, sont les représentations de l'accessibilité les plus largement utilisées.

L'allure des cartes d'accessibilité est étroitement liée aux choix qui ont été faits en matière de modélisation du réseau de transport et de définition du zonage. Par exemple, si on a fait le choix de représenter uniquement le réseau de transports collectifs (sans lien avec le réseau routier) et de calculer les rabattements à vol d'oiseau autour des stations, on aura une représentation cartographique « par halos » (par ex. illustration 14). Si au contraire on a défini un réseau routier, la cartographie de l'accessibilité pourra être ponctuelle (au niveau des nœuds du graphe) ou encore surfacique (voir illustration 18). Si aucun zonage n'a été défini, on pourra mettre en œuvre une procédure de « krigeage » (voir illustrations 19 et 20).

2.3 Synthèse

Ce chapitre 2 a montré que les mesures d'accessibilité sont nombreuses, mais que seules les plus simples sont utilisées dans des contextes d'études opérationnelles : isochrones, indicateurs gravitaires simples et, dans une moindre mesure, indicateurs basés sur le maximum d'utilité. Ces indicateurs peuvent toutefois être déclinés de multiples manières, selon la méthode utilisée pour estimer le temps de parcours, selon les modes et les combinaisons de modes pris en compte, et selon les méthodes d'agrégation temporelle et spatiale des indicateurs. Ces choix conditionnent la représentation graphique et cartographique qui pourra être faite des indicateurs. Ces dimensions méthodologiques de construction des indicateurs peuvent changer l'interprétation qui pourra être faite des résultats, et doivent donc être discutées et validées avec le commanditaire de l'étude.

Le chapitre 3 détaillera les contraintes de mise en œuvre de ces indicateurs – imposées par la disponibilité des données – ainsi que les fonctionnalités et performances des logiciels.

3. Données et logiciels utilisés

Les données disponibles et l'outil logiciel choisi pour le calcul d'accessibilité conditionnent les indicateurs qu'il sera possible de représenter. Les logiciels doivent répondre à quatre grandes fonctionnalités pour réaliser des analyses d'accessibilité, à savoir :

1. mettre en forme et éventuellement corriger les données source ;
2. calculer des itinéraires ;
3. calculer des indicateurs ou mesures d'accessibilité à partir des itinéraires trouvés ;
4. représenter les indicateurs calculés sous forme graphique ou cartographique.

Dans l'offre logicielle actuelle, ces quatre fonctionnalités nécessitent généralement l'utilisation de plusieurs logiciels. L'enjeu est alors que ceux-ci soient capables de s'interfacer et d'échanger facilement des données, celles obtenues en sortie de l'un étant utilisées en entrée de l'autre. C'est cette logique de suite logicielle interconnectée qui prévaut notamment dans le projet MOSART (voir étude R), avec l'utilisation combinée d'un logiciel SIG, d'un logiciel de modélisation de déplacements, d'un système de gestion de bases de données géographiques et d'un outil de calcul statistique.

Trois grands types d'outils sont généralement utilisés pour les analyses d'accessibilité :

- **des outils orientés vers le calcul d'itinéraires** : certains sont fortement intégrés à un système d'informations géographiques (SIG) et automatisent la représentation d'indicateurs basés sur les temps de parcours sous forme d'isochrones (ex. : Musliw et sa macro MapInfo présentés en annexe B-f, ou MobiAnalyst qui est intégré à ArcGIS et présenté en annexe B-e). D'autres ne permettent pas directement la représentation d'isochrones (ex. : Tempus, présenté en annexe B-i, ou des scripts d'interrogation de sites internet d'information voyageurs), les données obtenues en sortie devant être retraitées dans un SIG externe ;
- **des outils dédiés à la modélisation statique des déplacements**⁵ : ils permettent de réaliser des calculs d'itinéraires à l'aide d'algorithmes d'affectation et de représenter certains indicateurs d'accessibilité (généralement des isochrones avec des représentations peu paramétrables) ;
- **des outils plus transversaux** :
 - *outils de traitement statistique* (ex. : R, SAS, ...), *outils de gestion de bases de données* (basés sur le SQL), *tableurs* : ils permettent le traitement des données source (correction et mise en forme), l'estimation des indicateurs à partir des itinéraires calculés et la représentation graphique des indicateurs,
 - *langages de script* (ex. : Python, ...) : ils sont utilisés pour le traitement des données sources et des résultats,
 - *logiciels SIG* : ils permettent la cartographie des indicateurs.

Ce chapitre vise à identifier les principales sources de données et à analyser comment l'offre logicielle actuelle répond aux besoins liés aux calculs d'accessibilité.

La liste de logiciels étudiée dans cet ouvrage n'est pas exhaustive

L'analyse est restreinte aux logiciels utilisés par le groupe de travail ou par un des producteurs d'études interrogés. Leur liste figure en annexe B.

Les informations fournies sur les logiciels ne sont pas garanties

Les éléments qui figurent dans cet ouvrage sont issus de la documentation des logiciels ou d'informations transmises par leurs utilisateurs. Les logiciels n'ont pas été testés en totalité par les auteurs de l'étude. Des imprécisions ou même des erreurs ont donc pu se glisser dans l'analyse. Ce document peut aider le lecteur à mieux cerner ses besoins et à faire un premier tri des logiciels qui y répondent le mieux. Néanmoins, pour les raisons mentionnées ci-dessus, il lui est recommandé de ne l'utiliser qu'à titre indicatif, celui-ci ne remplaçant pas le contact avec les différents distributeurs, une démonstration ou des contacts avec des utilisateurs. Le Cerema ne pourrait être tenu responsable d'éventuelles déconvenues.

5 - Parmi les producteurs d'études rencontrés, certains réalisent des calculs d'accessibilité à partir d'un modèle statique de déplacements. Dans ce chapitre, nous nous concentrons uniquement sur les outils logiciels sous-jacents à ces modèles afin d'explorer leurs possibilités pour le calcul d'accessibilité. Les modèles en eux-mêmes et les principes de construction des indicateurs d'accessibilité qui en découlent ont en effet déjà été présentés dans le chapitre 2.

3.1 Obtention et mise en forme des données nécessaires

Les principales données à obtenir et mettre en forme pour réaliser une étude d'accessibilité concernent la description des réseaux (routier et transports collectifs) ainsi que la localisation de la population et des équipements et opportunités du territoire. En complément, des données sur l'offre de nouveaux services à la mobilité (véhicules en libre-service, covoiturage...) ainsi que sur la demande de déplacements sont parfois utilisées.

3.1.1 Réseau routier

Sources de données

Les principales sources de données recensées dans ce travail pour la représentation du réseau routier et des vitesses de déplacement sont présentées dans le tableau 8. Notons que, dans un réseau multimodal, le réseau routier servant de support au réseau de transport collectif, sa mise à jour nécessite aussi la mise à jour des liens entre ces deux réseaux.

	Source de données	Caractéristiques, qualité et précision	Modalités d'accès
Description du réseau et vitesses « à vide »	Données commerciales de description des réseaux	Bonne qualité de la donnée. Bon niveau de précision (maillage fin et caractéristiques du réseau bien renseignées).	Payant (sauf certaines données IGN qui sont gratuites pour les organismes exerçant une mission de service public et pour les organismes de recherche et d'enseignement).
	Données libres : OpenStreetMap	Précision inégale sur le territoire. Très bon niveau de finesse dans les territoires les plus urbanisés. Données fréquemment mises à jour par les utilisateurs. Problèmes de topologie (connexion des arcs entre eux) qui les rendent difficilement utilisables en l'état pour réaliser des calculs d'itinéraires (nécessité d'un retraitement). Dates de dernières mises à jour inconnues. Impossible de reconstituer un réseau à une date passée.	Gratuit. Téléchargement sur le site d'OpenStreetMap ⁶ ou sur les sites de différents agrégateurs de données.
	Données des collectivités : base « voirie » des agglomérations	Bonne fréquence de mise à jour. Bon niveau de maillage. Erreurs topologiques possibles, car ces données n'ont pas été conçues pour le calcul d'itinéraires.	Nécessite généralement la mise en place d'une convention de réutilisation (gratuit ou peu onéreux). Disponible en Open Data pour certaines collectivités.
	Réseau « 30 000 arcs » du SETRA	Définition d'un réseau structurant au niveau national à partir des données Michelin puis mis à jour en fonction des mises en service de tronçons et des aménagements sur place réalisés. Possibilité d'extraire un réseau représentatif d'une année donnée depuis 1997. Faible maillage du réseau, utilisable pour des études interurbaines uniquement.	Établi par le MEDDE pour son usage interne uniquement.
Vitesse de déplacement en charge	Données commerciales de vitesses observées par suivi GPS de véhicules	Possibilité d'accéder aux vitesses observées à différentes périodes de la journée. Certains itinéraires avec peu d'observations dans la période considérée (significativité statistique faible).	Payant.
	Données de temps de parcours issues d'un modèle de déplacements disponible sur la zone d'étude	Temps de parcours en heure de pointe disponibles. Permet des simulations en projection. Si les données de réseau du modèle et celles utilisées pour le calcul d'accessibilité sont différentes, le « recollement » peut s'avérer complexe et long.	Peut nécessiter une convention de réutilisation des données issues du modèle.

Tableau 8 : Principales sources de données de description du réseau routier

Les entretiens et analyses menés ont fait ressortir que les données sur les réseaux dédiés aux modes actifs sont peu disponibles ou de mauvaise qualité (réseaux autorisés aux modes actifs, présence de voie cyclable, sens de circulation spécifiques, mouvements tournants, dénivelés...). Les sources de données commerciales et les données OpenStreetMap sont encore incomplètes et il est également rare que les bases voiries des

6 - <http://openstreetmap.fr> pour la documentation en français et la réorientation vers les sites permettant le téléchargement des données ; <http://www.openstreetmap.org> pour accéder à la carte en ligne et la modifier (création d'un compte utilisateur nécessaire).

agglomérations soient de bonne qualité sur ce sujet.

Gestion des formats et correction des données

Les données routières n'ont pas de format standardisé. Elles sont généralement mises à disposition sous forme de fichiers géolocalisés (par exemple de type « .shp ») dont la structure varie d'un fournisseur de données à l'autre.

Certaines données routières conçues à la base pour la cartographie mais pas pour le calcul d'itinéraires nécessitent des corrections pour traiter leur caractère « non topologique ». En effet, elles ne composent donc pas nécessairement un graphe connexe et décrivant correctement la topologie du réseau : certains tronçons nécessitent d'être connectés entre eux, d'autres d'être redécoupés.

L'importation automatisée est parfois possible, mais pas systématique. Toutefois, les données routières sont plus faciles à manipuler que les données de transport collectif puisqu'elles se résument souvent à une « couche » SIG, sans information attributaire complexe comme c'est le cas des horaires de transport collectif. En revanche, les informations sur les mouvements tournants peuvent un peu compliquer l'importation des données en l'absence de procédure automatisée.

Logiciels	Formats acceptés en entrée	Validation et correction de données	Facilité de prise en main
<i>MobiAnalyst</i> (voir annexe B, e)	<i>OpenStreetMap</i> , <i>IGN</i> , <i>Navteq®</i> et <i>TomTom®</i> Interfaçage avec les outils de modélisation (<i>Cube</i> , <i>Visum</i> , <i>Emme</i>) pour récupérer des temps de parcours résultant d'affectations Sources de données PostgreSQL-PostGIS et GeoDataBase ESRI acceptées	Non	Installation automatisée Windows
<i>OpenTrip Planner</i> (voir annexe B, g)	<i>OpenStreetMap</i> (fichiers .osm)	Non	Documentation (Github) Linux ou Mac Utilisation en ligne de commande
<i>Tempus</i> (voir annexe B, i)	<i>Navteq®</i> , <i>TomTom®</i> et <i>OpenStreetMap</i> (fichiers shp)	Correction topologique des données <i>OpenStreetMap</i>	Installation automatisée Linux, Windows Utilisation en ligne de commande traitements par lots possibles
<i>TransCAD</i> (voir annexe B, j)	Imports possibles depuis tout format SIG, mais la création d'un réseau formaté n'est pas automatique : la vérification de la connectivité est automatisée, les corrections à faire et le choix des champs à retenir sont manuels.	Détection automatique d'erreurs de connectivité du réseau	Installation automatisée Windows
<i>Visum</i> (voir annexe B, k)	Formats <i>OpenStreetMap</i> , <i>SATURN</i> , <i>TransCAD</i> , <i>Emme</i> , <i>CUBE</i>	Module de vérification du réseau	Installation automatisée Windows

Tableau 9 : Performances des logiciels en termes de chargement et de traitement automatisé des données routières

3.1.2 Offre de transport collectif

Sources de données

Les données d'offre de transport collectif utilisés dans les analyses d'accessibilité concernent les points d'arrêt géolocalisés, les lignes et les horaires de desserte ainsi qu'éventuellement la capacité (en nombre de passagers transportables) et la motorisation des véhicules. Les principales sources de données sont résumées dans le tableau 10. Elles concernent à la fois les données sur les transports collectifs urbains, interurbains, terrestres et aériens.

Certains producteurs d'études mentionnent avoir renoncé à exploiter les données horaires des transports collectifs, faute d'y avoir accès dans des conditions et des formats en permettant une exploitation rapide. Une ressaisie est parfois réalisée, lorsqu'il n'a pas été possible d'accéder à des données exploitables par d'autres

moyens. Elle est très longue à mettre en œuvre et n'est donc pas envisageable pour une étude ponctuelle. Elle est parfois réalisée pour l'alimentation et la mise à jour des modèles de déplacements.

Pour contourner la difficulté de saisie des données, une approche originale a été utilisée dans l'étude A : il s'agissait d'interroger massivement un site de calcul d'itinéraires destiné à l'information des voyageurs et d'en extraire des temps de parcours d'arrêt à arrêt. Cette méthode, assez simple à mettre en œuvre présente toutefois des inconvénients :

- nécessité d'obtenir l'accord du gestionnaire du site pour l'interroger massivement (les requêtes étant lancées la nuit pour ne pas gêner l'utilisation du site par les usagers pendant la journée) ;
- nécessité de mettre à jour le script d'interrogation du site chaque fois que le site est remodelé par son gestionnaire ;
- impossibilité de calculer des indicateurs différents de ceux prévus par le site (généralement uniquement un temps de parcours).

Source de données	Caractéristiques, qualité et précision	Modalités d'accès
« Open Data »	Données documentées Généralement de bonne qualité Mise à jour régulière Formats standards	En libre accès sur Internet Données mises à disposition par certaines autorités organisatrices ou certains exploitants Généralement gratuit (varie selon les usages qui en sont faits).
Extraction d'un site Internet d'information voyageurs ou du système d'aide à l'exploitation du réseau	Formats hétérogènes entre fournisseurs, données parfois manquantes	Généralement gratuit Nécessite parfois la mise en place d'une convention de réutilisation des données avec l'autorité organisatrice
Bases de données commerciales (voir par ex. étude P pour le transport aérien)	Assez bonne qualité de la donnée, données parfois manquantes Données documentées Mise à jour régulière	Payant
Ressaisie de l'offre à partir des données trouvées sur un site Internet d'information voyageurs	Long, risque d'erreurs, à n'utiliser qu'en dernier recours...	Gratuit

Tableau 10 : Principales sources de données d'offre de transport collectif

Un travail d'extrapolation des grilles horaires en projection pour les projets de transports collectifs peut se révéler nécessaire pour la construction de scénarios d'évolution de l'offre. Ce travail a, par exemple, été réalisé dans l'étude C pour représenter les gains de temps sur une future ligne à grande vitesse. Sur des réseaux plus maillés, la définition d'une grille horaire en situation future s'avère toutefois extrêmement complexe, les contraintes d'exploitation reposant sur la grille horaire n'étant pas maîtrisées par les producteurs de l'étude d'accessibilité.

Certains producteurs d'études ne souhaitant pas mettre en œuvre un outil de calcul d'accessibilité en interne se déclarent intéressés par une mise à disposition par les AOT ou par les exploitants de matrices de temps de parcours d'arrêt à arrêt sur leur réseau.

D'autres, à l'inverse, mentionnent leur souhait de disposer de données plus complètes et décrivant la régularité des transports collectifs, car les horaires théoriques ne sont pas toujours respectés, notamment en cas de congestion insuffisamment prise en compte par la grille horaire. Ces données sont toutefois très rarement disponibles.

En dépit des difficultés constatées, l'Open Data se répand progressivement⁷. Les contrats entre les AOT et les exploitants des réseaux de transport collectif incluent de plus en plus fréquemment un volet sur la mise à disposition de données. En mars 2015, un comité national a également remis au secrétaire d'État aux transports un ensemble de recommandations visant à plus d'ouverture des données « transport ». On peut donc espérer pour les années à venir une plus grande facilité d'accès et d'utilisation des données d'offre de transport collectif à

7 - Un panorama des données « transport » ouvertes est disponible dans l'ouvrage du Cerema *L'Open Data en collectivité à la lumière des données de mobilité* : www.certu-catalogue.fr/open-data-en-collectivite-a-la-lumiere-des-donnees-de-mobilite.html

des fins d'études.

Capitalisation des données

Dans le cadre de l'étude E, des conventions ont été établies entre la maîtrise d'ouvrage de l'étude et les Autorités Organisatrices de Transports (AOT) sur le périmètre concerné afin d'accéder aux données d'offre de transport collectif. Toutefois, ces conventions n'ont pas été établies uniquement pour un accès ponctuel mais aussi pour garantir une mise à jour annuelle de ces données et la possibilité de les réutiliser dans le cadre d'autres études, par le maître d'ouvrage ou par n'importe quel autre partenaire public qui en ferait la demande. Cette étude a donc été l'occasion de constituer une base de données unifiée des offres de transport collectif de l'aire métropolitaine lilloise, puis de l'ensemble de la région par la suite, disponible pour réaliser de futures études.

Le travail d'uniformisation des données n'est pas à faire lorsqu'une centrale de mobilité agrège déjà sur le territoire d'étude les données d'offres des différents réseaux. Les AOT fournissant les données à la centrale de mobilité restent toutefois généralement propriétaires de leurs données, et cela ne dispense donc pas de faire une demande de réutilisation à chacune d'elles avant de pouvoir exploiter celles-ci.

Les données d'offre de transport ne sont pas toujours conservées sur le long terme par les AOT, les exploitants des réseaux ou les gestionnaires des sites d'information voyageurs. Il est donc nécessaire, pour réaliser des études nécessitant d'observer l'évolution des réseaux, d'archiver les données annuellement. Le producteur d'études veillera alors à ce que les droits de réutilisation de ces données restent valables à long terme.

Gestion des formats, vérifications de cohérence et correction des données

En France, les données d'offre théorique de transport collectif sont de plus en plus couramment fournies dans les formats Neptune⁸ ou GTFS⁹, en lien avec le développement de l'Open Data. Toutefois, dans de nombreux cas encore, le format des données fournies n'est pas standardisé et résulte soit d'une extraction dans un format propre au logiciel d'aide à l'exploitation du réseau de transport collectif, soit de tableurs ou de fichiers PDF recensant l'offre horaire dans des formats hétérogènes.

Des erreurs sont fréquemment constatées par les producteurs d'études dans les jeux de données qui sont mis à leur disposition. Ils relatent notamment les problèmes suivants :

- présence de doublons dans les arrêts de transport collectif et donc généralement dans l'offre horaire associée (en particulier lorsqu'un arrêt est exploité par plusieurs réseaux) ;
- erreurs de codage des horaires (bus dont la vitesse est trop forte ou négative...).

Des outils de validation de données, adaptés au format GTFS et au format Neptune (voir tableau 11), permettent de détecter certaines erreurs dans les jeux de données (vitesses trop importantes, arrêts sans desserte associée, desserte associée à un identifiant d'arrêt absent de la table des arrêts...). Selon les outils, les rapports d'erreurs sont plus ou moins détaillés et explicites. Les corrections doivent être apportées manuellement. À l'heure actuelle, il n'existe pas à notre connaissance d'outil proposant de mesures de correction automatique ou semi-automatique de ces incohérences (suppression des services liés à un arrêt présent en doublon par exemple).

Les producteurs d'études mentionnent dans leur grande majorité leur souhait de voir s'étendre la disponibilité des données d'offre de transport collectif (incluant les horaires) mises en forme selon des formats standards et soulignent leur intérêt pour le format GTFS en raison de sa portabilité et de sa plus grande facilité d'exploitation et de retraitement (format texte facilement lisible). Ceux qui utilisent un modèle de déplacements seraient intéressés par des interfaces permettant une conversion du format GTFS ou Neptune vers le format d'entrée de leur logiciel, cette interface n'étant pas systématiquement disponible dans l'offre actuelle.

La norme IFOPT¹⁰ permet de décrire les points d'arrêt de transport collectif ainsi que les stations ayant une structure complexe (stations de métro, gares ferroviaires, pôles d'échanges...). Ces données sont rarement utilisées

8 - <http://www.normes-donnees-tc.org/category/neptune/>, consulté le 05/01/2014

9 - <http://www.normes-donnees-tc.org/category/gtfs/>, consulté le 05/01/2014

10 - <http://www.normes-donnees-tc.org/category/ifopt/>, consulté le 05/01/2014

en pratique (elles ne sont utilisées dans aucune des études recensées dans le cadre de ce travail), faute de disponibilité. Par conséquent, la structure interne des stations complexes (nombre d'escaliers à parcourir, présence d'ascenseurs, temps de parcours entre quais, etc.) n'est généralement pas prise en compte, ou bien de façon très partielle, pour calculer les coûts généralisés dans le cadre des études d'accessibilité. Un seul des outils logiciels considéré dans ce travail permet l'importation automatisée de données au format IFOPT (voir tableau 11).

Dans le cas multimodal, le réseau routier et le réseau de transport collectif sont généralement issus de producteurs de données différents et doivent être connectés. Il est rare que cette opération puisse être effectuée de manière complètement automatique. Des vérifications et des corrections manuelles s'imposent pour certains cas particuliers. Le « calage » du tracé des lignes de bus sur le réseau routier peut également être nécessaire pour la cartographie.

Logiciels	Formats acceptés en entrée	Validation et correction de données	Facilité de prise en main
<i>BD Fer</i> (voir annexe B, a)	Données <i>RIHO</i> (CD d'horaires SNCF)	Non	Installation automatisée
<i>Chouette</i> (voir annexe B, b)	<i>Neptune</i> , <i>NeTeX</i> et <i>GTFS</i> , conversion <i>Neptune</i> ↔ <i>GTFS</i> possible	Qualification des données d'offre TC et détection des incohérences.	Installation assez complexe (architecture client-serveur), documentée pour Linux uniquement. Utilisation possible en ligne sur un serveur mis à disposition par les concepteurs.
<i>Google Transit Feed Validator</i> (voir annexe B, c)	<i>GTFS</i>	Détection des incohérences dans un jeu de données	Rien à installer, simple téléchargement d'un outil compilé sous Windows. Rapport décrivant les erreurs trouvées sous forme d'une page html.
<i>MobiAnalyst</i> (voir annexe B, e)	<i>GTFS</i> , <i>Neptune</i> , <i>IFOPT</i> , <i>NeTeX</i> et <i>Rapido</i> Interfaçage avec les outils de modélisation (<i>Cube</i> , <i>Visum</i> , <i>EMME</i>) pour récupérer des temps de parcours résultats d'affectation.	Non	Installation automatisée Windows
<i>Musliw</i> (voir annexe B, f)	<i>GTFS</i> , <i>Neptune</i> ou base de données « <i>Chouette</i> »	Non	Installation automatisée
<i>OpenTrip Planner</i> (voir annexe B, g)	<i>GTFS</i>	Non	Documentation (Github) Linux ou Mac Utilisation en ligne de commande
<i>Tempus</i> (voir annexe B, i)	<i>GTFS</i>	Non	Installation automatisée, compatible avec Linux Windows Utilisation en ligne de commande, traitements par lots possibles
<i>TransCAD</i> (voir annexe B, j)	Formats <i>TRANPLAN</i> , <i>MINUTP</i> , <i>TP+</i> , <i>GTFS</i> Interfaçage avec d'autres outils de modélisation (<i>TRIPS</i> , <i>EMME</i>) Les données SNCF <i>RIHO</i> peuvent être exportées au format <i>TransCAD</i> grâce à l'outil <i>BDFer</i> .	Détection automatique d'erreurs de connectivité du réseau	Installation automatisée Windows
<i>Visum</i> (voir annexe B, k)	Formats <i>GTFS</i> , <i>HAFAS</i> , <i>railML</i> , <i>DIVA</i> , <i>VDV452</i> et <i>Microbus</i>	Module de vérification du réseau	Installation automatisée Windows

Tableau 11 : Performances des logiciels en termes de chargement et de traitement automatisé des données de transport collectif

3.1.3 Données socio-économiques et d'occupation des sols

Sources de données

Des données socio-économiques et éventuellement des données complémentaires d'occupation des sols sont utilisées pour considérer la population et les opportunités d'un territoire dans le calcul des indicateurs d'accessibilité, directement ou au travers d'un modèle de déplacements. Ces données sont issues de différentes sources :

- l'INSEE : population à l'IRIS ou sur un carroyage à 200 mètres ou 1 km, FiLoCom (Fichiers des logements

à l'échelle communale), données SIRENE (Répertoire national des entreprises et des établissements), données CLAP (données sur l'emploi salarié localisées au lieu de travail au niveau communal), DADS (Déclaration annuelle des données sociales), BPE (Base permanente des équipements)... ;

- l'IGN : BD Topo, BD Carto, BD Parcellaire... ;
- la direction générale des Impôts : base de données cadastrale MAJIC (Mise À Jour des Informations Cadastrales)... ;
- les bases de données commerciales ;
- les données produites en interne aux structures du maître d'ouvrage ou du producteur d'études : par exemple une base des équipements, des zones touristiques, des informations sur les individus qui fréquentent un équipement ou un site particulier...

Lorsqu'elles sont obtenues à un niveau trop agrégé ou sur un zonage insatisfaisant, des stratégies de désagrégation ou de lissage sont parfois utilisées. Par exemple :

- utilisation de données d'occupation du sol pour désagréger les données de population sur un zonage plus fin que l'IRIS, afin de tenir compte des densités d'habitat dans l'étude A1 ;
- calcul de la densité de logements par la méthode des noyaux proposée par le Certu [56] dans l'étude K.

Manques identifiés

Les entretiens avec les producteurs et maîtres d'ouvrage d'études ont permis d'identifier leur souhait de disposer de données actualisées plus régulièrement, ainsi que d'accéder à des données plus précises sur l'emploi, notamment des emplois géolocalisés, et sur les équipements et opportunités du territoire : commerces, médecins, crèches, écoles, équipements culturels, etc. La Base Permanente des Équipements (BPE) de l'INSEE semble pouvoir répondre au moins en partie aux besoins de données sur les opportunités et équipements du territoire, bien que pouvant nécessiter un recueil complémentaire de la part du producteur d'études pour en améliorer la précision locale.

3.1.4 Autres données

Des données complémentaires sur l'offre de transport sont parfois utilisées, comme l'offre de vélos ou voitures en libre-service ou encore les aires de covoiturage. Ces données géolocalisées peuvent être obtenues auprès du gestionnaire, à partir d'extraction des données d'OpenStreetMap (lorsque l'information est renseignée) ou ressaisies à partir d'un site internet d'information des usagers.

Enfin, des données de demande de déplacements sont parfois utilisées soit par l'intermédiaire d'un modèle de déplacements, soit au travers d'une analyse directe : par exemple, l'analyse de l'enquête ménages-déplacements pour comparer l'accessibilité (le « potentiel » de déplacements) avec la réalité des déplacements effectués par les habitants dans l'étude U.

3.1.5 Synthèse

Les données nécessaires pour mener à bien les études d'accessibilité sont parfois détenues en interne par les structures productrices d'études. Dans d'autres cas, elles sont achetées, obtenues gratuitement par Internet (Open Data) ou sur demande auprès des partenaires institutionnels qui les produisent. Des conventions sont parfois passées pour permettre la réutilisation de ces données, soit ponctuellement (pour une étude particulière), soit dans la durée. Des mises à disposition plus informelles ont également lieu dans certains cas.

Quelle que soit la nature des données, le producteur d'études doit veiller à ce que leur utilisation se fasse dans un cadre prévu par la convention de mise à disposition ou la licence associée (licence ODBL¹¹ ou licence ouverte Etalab¹² qui s'appliquent aux données ouvertes et licences spécifiques aux fournisseurs pour les données commerciales).

Plusieurs maîtres d'ouvrage mentionnent un manque de lisibilité des données disponibles sur leur territoire et des

11 - <http://opendatacommons.org/licenses/odbl/> et http://fr.wikipedia.org/wiki/Open_Database_License [consultés le 29/01/2015]

12 - <https://www.etalab.gouv.fr/licence-ouverte-open-licence> [consulté le 29/01/2015]

modalités d'accès à ces données, ainsi qu'une difficulté pour la mise à jour des données utilisées dans le cadre d'observatoires de la mobilité, liée à la non-pérennité de certaines sources de données commerciales.

La mise en forme des données peut être particulièrement chronophage si aucune procédure automatisée n'est mise en œuvre. Une procédure automatisée ne sera toutefois complètement efficace que si les formats des données auxquelles les producteurs d'études accèdent sont stables au cours du temps. Ce point est très souvent cité comme une difficulté, un des producteurs d'études interrogé ayant cherché à s'en affranchir en interrogeant directement un site d'information voyageurs, plutôt qu'en réutilisant les données qui l'alimentent (voir étude A1).

Dans le cas où le calcul d'accessibilité est effectué à partir d'un modèle de déplacement, le travail d'obtention et de mise en forme des données d'offre de transport est réalisé au moment de l'élaboration du modèle qui constitue alors une base de données de référence de l'offre de transport. Cette méthode induit toutefois une dépendance du calcul d'accessibilité aux mises à jour du modèle, qui sont généralement des opérations lourdes et peu fréquentes.

L'offre d'outils permettant l'importation automatisée de données dans des formats standards est encore débutante. Certains producteurs d'études ont dû ressaisir l'offre partiellement ou totalement, soit parce qu'ils ne disposaient pas de données dans un format standard, soit parce que l'outil de calcul d'itinéraires utilisé ne permettait pas l'importation automatisée des données. Parfois, des solutions de traitement de données personnalisées ont été développées à l'aide d'un langage de script (SQL, R, Python, langage de script associé à un tableur...) pour permettre la mise en forme des données dans un format compris par le calculateur (par ex. étude E).

3.2 Calcul d'itinéraires

Le calcul d'itinéraires constitue le cœur de la procédure de calcul d'accessibilité. Il peut être réalisé à l'aide de logiciels d'affectation dédiés à la modélisation des déplacements, d'outils spécifiquement dédiés au calcul d'itinéraires ou de sites internet d'information voyageurs et de leurs outils de calcul associés¹³.

3.2.1 Besoins des utilisateurs

Pour le calcul d'itinéraires, les besoins des utilisateurs identifiés lors des entretiens portent sur la possibilité de :

- paramétrer finement les temps de parcours et les contraintes de circulation (mouvements interdits, sens de circulation...) pour chacun des modes ;
- pouvoir maîtriser la manière dont la multimodalité est prise en considération ;
- pouvoir comprendre et paramétrer l'algorithme de calcul d'itinéraire utilisé.

La possibilité d'un paramétrage avancé du calcul, voire de modification des mécaniques algorithmiques, ne doit toutefois pas rendre le logiciel inutilisable par un débutant ou un utilisateur souhaitant réaliser rapidement une analyse simple. Des solutions « par défaut », faciles à mettre en œuvre, doivent être proposées à l'utilisateur pour tous les paramètres et algorithmes utilisés.

Sur le plan de l'ergonomie de l'outil, la possibilité de traiter par lots des volumes importants de requêtes d'itinéraires est une fonctionnalité centrale pour les analyses d'accessibilité. En effet, la construction de certains indicateurs peut nécessiter le calcul et l'analyse de centaines, voire de milliers d'itinéraires dans un réseau de transport. En parallèle, une interface graphique doit permettre de lancer facilement des requêtes unitaires.

3.2.2 Réponses apportées par les logiciels

Représentation des réseaux et des temps de parcours

La représentation des réseaux de transport est généralement peu paramétrable dans les outils. Dans les outils propriétaires, il est difficile de savoir comment est construit le graphe représentant le réseau de transport. Ce point peut poser problème, certaines représentations particulièrement agrégées ou simplifiées pouvant conduire à des approximations dans les résultats du calcul d'itinéraire, en particulier lorsqu'il s'agit de représenter des itinéraires multimodaux.

La définition des temps de parcours est faite à partir de la distance parcourue et d'une vitesse moyenne de déplacement, généralement paramétrable par tronçon (pour le mode automobile) ou pour l'ensemble des arcs (pour les modes doux). Pour les modes doux, les outils examinés ne permettent pas d'intégrer le dénivelé des sections routières dans le calcul du temps de parcours, si ce n'est en modifiant artificiellement la longueur de la section au moyen d'un coefficient à définir par l'utilisateur.

La distance parcourue peut être calculée selon le réseau de voirie ou encore à vol d'oiseau sur des arcs de rabattement. La vitesse de déplacement et la vitesse de rabattement peuvent être paramétrées séparément, la vitesse de rabattement devant être plus faible que la vitesse de déplacement pour le même mode. On considère généralement la vitesse constante sur la période étudiée. Certains logiciels permettent toutefois de définir des variations de la vitesse des véhicules sur la période étudiée au moyen d'une fonction constante par périodes.

13 - Dans le cas des centrales de mobilité alimentant un site internet avec de l'information sur plusieurs réseaux de transport sur un même territoire, des applications *back-office* sont fréquemment mises en place en vue de réaliser des analyses sur les réseaux et notamment des calculs d'accessibilité. Les producteurs d'études interrogés nous ont toutefois signalé que ces applications n'étaient pas exploitables sur leur territoire en raison de leurs très faibles possibilités de paramétrage et de l'impossibilité de basculer les résultats calculés dans une application externe (SIG par exemple) pour réaliser d'autres traitements que ceux directement permis par l'application.

Certains logiciels permettent de définir des pénalités sur les mouvements tournants sur le réseau routier, généralement au moyen d'une séquence de deux sections de route soumise à un temps de parcours ou à un coût supplémentaire : cela permet de représenter des mouvements tournants interdits ou encore des temps différenciés pour la traversée du carrefour selon la direction prise. Les mouvements tournants plus complexes décrits par des séquences de plus de deux sections de routes consécutives (voir par ex. illustration 21) ne sont pas pris en compte par les logiciels examinés, à une exception près.

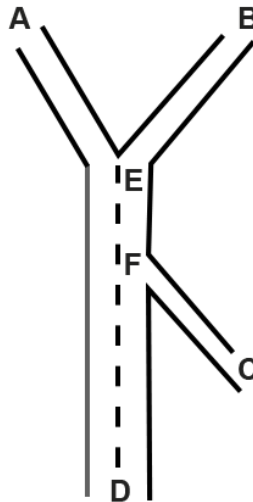


Illustration 21 : Entrecroisement autoroutier avec mouvement interdit à description complexe :
C-F-E-A est interdit alors que D-F-E-A et C-F-E-B sont autorisés, source [67]

Logiciel	Représentation des temps de parcours en transports collectifs	Représentation des temps de parcours en voiture	Représentation du temps de parcours des modes actifs	Représentation des contraintes sur les mouvements tournants
MapNod (voir annexe B, d)	Horaires (génération à la volée dans l'algorithme)	Statique	Paramétrage d'une vitesse moyenne par mode	Non
MobiAnalyst (voir annexe B, e)	Horaires ou fréquences	Statique ou dynamique (vitesse constante par morceaux sur la période considérée) Pas de temps de recherche de stationnement	Paramétrage d'une vitesse moyenne par mode	Non
Musliw + réseaux.mbx (voir annexe B, f)	Horaires uniquement Intégration d'un calendrier d'offre	Statique ou dynamique (vitesse constante par morceaux sur la période considérée) Temps de recherche de stationnement : pénalité au changement du mode VP vers un autre	Paramétrage d'une vitesse moyenne par mode	Contraintes ou pénalités de temps de parcours sur des mouvements à description simple (2 arcs consécutifs).
OpenTrip Planner (voir annexe B, g)	Horaires ou fréquences	Statique	Paramétrage d'une vitesse moyenne par mode Prise en compte possible du relief (automatique pour le format américain : National Elevation Dataset)	Interdictions sur des mouvements à description complexe (2 ou 3 arcs consécutifs).
Tempus (voir annexe B, i)	Horaires ou fréquences Intégration d'un calendrier d'offre	Statique ou dynamique (vitesse constante par morceaux sur la période considérée) Temps de recherche de stationnement : pénalité au changement du mode VP vers un autre mode	Paramétrage d'une vitesse moyenne par mode Calcul du dénivelé par itinéraire possible mais pas intégré dans l'estimation du temps de parcours	Interdictions ou pénalités de temps de parcours sur des mouvements à description complexe (2 arcs consécutifs et plus).

Logiciel	Représentation des temps de parcours en transports collectifs	Représentation des temps de parcours en voiture	Représentation du temps de parcours des modes actifs	Représentation des contraintes sur les mouvements tournants
TransCAD (voir annexe B, j)	Fréquences uniquement	Statique : Le temps de parcours peut être un temps à vide ou un temps en charge issus des affectations Temps de recherche de stationnement : pénalité possible au changement du mode VP vers un autre mode	Vitesse moyenne par mode (peut être variable selon le type d'arc et modifié arc par arc)	Pénalités sur des mouvements à description simple (2 arcs consécutifs), à remplir manuellement ou automatiquement. Possibilité d'utiliser des courbes temps/débit spécifiques pour les franchissements de carrefour (prise en compte du phasage des feux ou des mouvements gênants).
Visum (voir annexe B, k)	Horaires ou fréquences	Statique : Le temps de parcours peut être un temps à vide ou un temps en charge issus des affectations	Vitesse moyenne par mode (peut être variable selon le type d'arc et modifié arc par arc)	Pénalités sur des mouvements à description simple (2 arcs consécutifs), à remplir manuellement ou automatiquement.

Tableau 12 : Représentation des réseaux et des temps de parcours dans les outils de calcul d'itinéraires

Méthodes d'optimisation des itinéraires

Les algorithmes de calcul d'itinéraire implémentés dans les outils logiciels sont généralement des algorithmes standards proposant des solutions exactes pour le problème de plus court chemin (Dijkstra [57], Bellman [58] et variantes) et la plupart du temps, un seul algorithme est proposé. Le détail des algorithmes n'est pas toujours connu de l'utilisateur, induisant un fonctionnement en « boîte noire » que les producteurs d'études regrettent, puisqu'ils souhaiteraient pouvoir paramétrer les algorithmes existants ou utiliser d'autres algorithmes.

Quelques logiciels proposent toutefois une petite variété d'algorithmes (Dijkstra [57] et variantes, « *Graph Growth Algorithm* » à intervalles [59]) qui diffèrent soit par leurs performances, soit par leurs fonctionnalités (par exemple, par la prise en compte ou non de la multimodalité).

La prise en compte de la multimodalité est plus ou moins poussée selon les outils. Comme souligné dans [41] en 1999, les logiciels de modélisation des déplacements s'y prêtent mal, car :

- ils ont des représentations des réseaux et des procédures d'affectation séparées pour les transports individuels et collectifs ;
- la prise en compte des conditions de correspondance, de stationnement et des systèmes tarifaires (déterminants de l'intermodalité) est difficile voire impossible : notamment, le rabattement sur un arrêt ou un parc-relais est prédéfini pour chaque zone d'origine ou de destination du modèle, ce qui est une représentation limitante de la multimodalité.

L'utilisation de sites d'information voyageurs pour le calcul des itinéraires ne permet pas une représentation satisfaisante de la multimodalité, puisque les réseaux représentés dans ces systèmes sont généralement des réseaux de transport collectif avec une représentation du réseau routier pour la marche uniquement en rabattement.

Les outils orientés vers le calcul d'itinéraires comme MobiAnalyst, Musliw et Tempus permettent une représentation multimodale des réseaux et une réelle optimisation multimodale, sans a priori sur les lieux d'intermodalité, ni sur la combinaison modale de l'itinéraire.

Le critère d'optimisation de l'itinéraire est plus ou moins paramétrable selon les logiciels : certains sont complètement verrouillés sur ce point et ne permettent de considérer que des temps de parcours simples ou des distances, d'autres permettent de considérer un temps généralisé dont les composantes sont paramétrables, les plus souples intègrent d'autres dimensions que le temps et la distance et les agrègent dans un coût généralisé.

Remarque : Les outils « open source » permettent de modifier le coût généralisé et le paramétrage des algorithmes de calcul d'itinéraires, voire de redéfinir complètement ses propres algorithmes pour les utilisateurs les plus avertis. Ce second point nécessite toutefois un investissement important : bonne connaissance du langage de programmation utilisé et appropriation de la logique de développement du projet.

Logiciel	Représentation du temps généralisé	Définition du coût généralisé	Paramétrage de la multimodalité	Algorithme d'optimisation d'itinéraire
<i>MapNod</i> (voir annexe B, d)	Pas de pondération des composantes du temps de parcours	Temps de parcours uniquement	Optimisation mode par mode (réseau routier ou réseau à horaires)	Dijkstra, Floyd
<i>MobiAnalyst</i> (voir annexe B, e)	Pas de pondération des composantes du temps de parcours	Distance ou temps uniquement	Optimisation multimodale complète	Algorithme « propriétaire » dérivé de Dijkstra.
<i>Musliw + réseaux.mbx</i> (voir annexe B, f)	Représentation des pénalités de changement de mode Pondération des temps de parcours par type de réseau/mode de transport	Temps de parcours uniquement	Optimisation multimodale complète	« Graph growth algorithm » à intervalles, Dijkstra à intervalles
<i>OpenTrip Planner</i> (voir annexe B, g)	Pas de pondération des composantes du temps de parcours	Temps de parcours uniquement	Le calcul se fait pour une combinaison de modes prédéfinie	A*, Contraction hierarchy
<i>Tempus</i> (voir annexe B, i)	Représentation des pénalités de changement de mode Pondération des temps de parcours par type de réseau/mode de transport	Temps de parcours uniquement	Optimisation multimodale complète	Dijkstra, A* et variantes
<i>TransCAD</i> (voir annexe B, j)	Possibilité de pondérer les temps	Coût généralisé paramétrable	Optimisation mode par mode (possibilité de coder des parcs-relais mais que dans un sens : origine – P + R – arrêt TC – arrêt TC – destination).	Algorithmes d'affectation VP (à l'équilibre, variante pseudo-stochastique) et TC (stratégie optimale, pathfinder)
<i>Visum</i> (voir annexe B, k)	Possibilité de pondérer les temps	Coût généralisé paramétrable	Optimisation mode par mode (possibilité de coder des parcs-relais, la combinaison VP – P+R – TC est alors une nouvelle combinaison modale).	Algorithmes d'affectation VP (à l'équilibre, variantes stochastiques, variante avec Analyse de Capacité d'Intersection, TRIBUT) et TC (affectation en tout ou rien sur un réseau statique ne prenant pas en compte les temps de correspondance, affectation selon la cadence ou affectation selon les horaires).

Tableau 13 : Méthodes d'optimisation utilisées par les outils de calcul d'itinéraires et paramétrages possibles

Performances et limites d'utilisation

Nous ne disposons pas d'informations complètes sur les temps de calcul des logiciels. Aucune évaluation de cette dimension n'a été effectuée dans le cadre de ce travail. Les informations ont uniquement été recherchées auprès des producteurs d'études. On sait par exemple que l'interrogation des sites d'information voyageurs au moyen d'un script client a pris entre 4 et 17 heures par isochrone réalisée sur l'agglomération lyonnaise et la région urbaine de Lyon respectivement (voir étude A1) et qu'un calcul d'accessibilité sur un carroyage de taille 700 x 700 zones prend une demi-journée environ dans le projet MOSART, le calcul d'itinéraires étant basé sur le logiciel Visum (voir étude R). On voit donc que les temps de calcul peuvent être une dimension limitante, notamment lorsque l'on souhaite étudier des territoires larges avec des zonages fins ou étudier une multitude de scénarios.

Le temps de calcul et la quantité de mémoire vive nécessaires peuvent donc représenter des limites d'usage des logiciels sur certains réseaux. Par ailleurs, les logiciels de modélisation des déplacements sont parfois « bridés » sur le nombre de zones d'origines et de destinations ou sur le nombre de nœuds et d'arcs qu'il est possible d'utiliser. Cette limitation est souvent liée au type de licence dont on dispose, une limitation pouvant rester présente même avec la licence de coût maximal.

La plupart des logiciels permettent un traitement par lots des requêtes d'itinéraires ; cet aspect est crucial étant donné le nombre potentiellement important de requêtes à lancer pour construire un indicateur.

Logiciel	Limites d'utilisation
<i>MapNod</i> (voir annexe B, d)	Usage limité à 800 nœuds et 10 000 arcs.
<i>MobiAnalyst</i> (voir annexe B, e)	Des réseaux de plusieurs millions d'arcs ont pu être chargés. Traitements par lots, sauvegarde des résultats et comparaisons possibles. Interrogation possible depuis un module graphique intégré à ArcGIS.
<i>Musliw + réseaux.mbx</i> (voir annexe B, f)	Des réseaux de plusieurs millions d'arcs ont pu être chargés. Traitements par lots. Interface graphique simple pour définir les paramètres des calculs.
<i>OpenTripPlanner</i> (voir annexe B, g)	Taille de réseau : agglomération marseillaise OK, Île-de-France difficile. Utilisation possible via un serveur web local. Traitements par lots possibles.
<i>Tempus</i> (voir annexe B, i)	Des réseaux de plusieurs millions d'arcs ont pu être chargés. Traitements par lots (Python), sauvegarde des résultats et comparaisons possibles. Interrogation du calculateur via un <i>plugin</i> graphique de QGIS (interface plus conviviale).
<i>TransCAD</i> (voir annexe B, j)	Pas de limite connue du logiciel dans les calculs (des exemples avec des réseaux de plusieurs centaines de milliers d'arcs, et des matrices 36 000 x 36 000).
<i>Visum</i> (voir annexe B, k)	Taille du réseau limitée par la licence.

Tableau 14 : Limites d'utilisation des outils de calcul d'itinéraires

3.3 Calcul des indicateurs d'accessibilité

3.3.1 Besoins des utilisateurs

Comme on l'a vu dans le paragraphe 2.1, les indicateurs d'accessibilité sont nombreux et variés par leur forme. L'utilisateur ne peut donc attendre d'un outil d'être capable de calculer par quelques clics tous les indicateurs, d'autant plus que ceux-ci peuvent être déclinés à l'infini selon les différents paramétrages et agrégations des résultats envisagés. L'utilisateur souhaite donc avant tout que l'outil logiciel lui permette de définir et de paramétrer ses propres indicateurs. Dans ce but, l'interfaçage du calculateur d'itinéraires avec des outils statistiques ou des systèmes de gestion de bases de données permettant l'usage d'un langage de requêtes sur les données est particulièrement intéressant.

En complément, il reste utile que les outils réalisant le calcul d'itinéraires proposent un calcul convivial d'indicateurs simples (temps de parcours zone à zone, distances, indicateur gravitaire simple) à destination d'utilisateurs peu expérimentés ou souhaitant une mise en œuvre rapide et facilitée d'une analyse d'accessibilité.

3.3.2 Réponses apportées par les logiciels

Les outils actuels permettent essentiellement de calculer des indicateurs simples (distance, temps de parcours, nombre de correspondances...) à partir des itinéraires calculés et de les agréger spatialement et temporellement pour former des isochrones. Celles-ci peuvent être présentées seules ou croisées avec une couche SIG représentant des données territoriales (population, emploi...), selon un zonage prédéfini.

Il est possible et très souvent nécessaire d'utiliser d'autres outils pour calculer soi-même des indicateurs différents (tableur comme Calc ou Excel, ou encore langages de script éventuellement intégrés à un outil de calcul statistique : R, SAS, Python, SQL...). La taille des fichiers générés en sortie des outils de calcul d'itinéraires peut parfois être un obstacle pour leur ouverture et leur traitement avec des outils bureautiques classiques (tableur, éditeur de texte ou SIG). Dans ce cas, l'utilisation de scripts de traitement des données sera incontournable.

Logiciel	Données de sorties
<i>MapNod</i> (voir annexe B, d)	Tableur avec une valeur par nœud (qui peut être exporté en parallèle avec un export au format .dxf du fichier des nœuds pour cartographier le résultat).
<i>MobiAnalyst</i> (voir annexe B, e)	Résultats statistiques (table attributaire) et SIG (export en shapefile/GDB/Mif-Mid/Kml et autres formats SIG). Temps de parcours, distance parcourue, émission de CO ₂ , temps d'attente pour les TC, pour l'itinéraire global ou par mode utilisé. Pour les isochrones, surface accessible par seuil et par mode.
<i>Musliw + reseaux.mbx</i> (voir annexe B, f)	Fichiers texte avec différents niveaux de détail possibles : par arc, par mouvement tournant, par itinéraire, par service horaire... Données compatibles avec l'outil <i>reseaux.mbx</i> pour leur visualisation sous MapInfo. Fichier log rappelant le réseau utilisé et les requêtes lancées.
<i>OpenTripPlanner</i> (voir annexe B, g)	Données tableurs ou SIG.
<i>Tempus</i> (voir annexe B, i)	Base de données stockant la feuille de route de chaque itinéraire, le tracé SIG et les paramètres de la requête. Fichier texte avec performance des algorithmes en termes de temps de calcul. Fichier log (caractéristiques du réseau, nombre d'itérations de l'algorithme...).
<i>TransCAD</i> (voir annexe B, j)	Caractéristiques de l'offre TC par OD sous forme de matrices (avec distinction des attributs, par ex. les différentes composantes du temps), qui peuvent être exportées ensuite dans un tableur.
<i>Visum</i> (voir annexe B, k)	Résultats statistiques (table attributaire avec une valeur par destination pour chaque mode) et cartographiques (export SIG possible).

Tableau 15 : Données obtenues en sortie des logiciels de calcul d'itinéraires

3.4 Représentations graphiques et cartographiques

3.4.1 Besoins des utilisateurs

À partir des valeurs des indicateurs d'accessibilité, on peut souhaiter réaliser deux types principaux de cartographies :

- simple analyse thématique de l'indicateur sur un zonage prédéfini ;
- mise en œuvre d'une procédure de « krigeage » pour l'estimation d'un zonage optimal à partir des résultats obtenus au niveau des nœuds.

Des cartographies plus sophistiquées peuvent être recherchées (par ex. anamorphoses). Toutefois, ces représentations restent extrêmement rarement utilisées.

3.4.2 Réponses apportées par les logiciels

La représentation cartographique de l'accessibilité peut être réalisée au moyen d'outils greffés sur les SIG, bénéficiant donc de la palette des fonctionnalités natives des SIG. Des modules ont été spécifiquement développés pour la représentation de l'accessibilité avec les principaux logiciels SIG (voir tableau 16). Lorsqu'on cherche à représenter les indicateurs à partir d'un zonage prédéfini dans un SIG, une simple analyse thématique (fonctionnalité native des SIG) est satisfaisante. Les cartographies plus spécifiques permises par les modules additionnels vont de la représentation isolée d'un itinéraire calculé à des procédures de « krigeage » pour la représentation des indicateurs d'accessibilité calculés au niveau des nœuds et des arcs. Lorsque la fonctionnalité de « krigeage » est proposée, la grille d'interpolation peut être paramétrée en vue de générer des contours isovaleurs ou des rasters.

Les outils de modélisation des déplacements permettent généralement le tracé d'isochrones assez frustes. Les résultats peuvent alors nécessiter un traitement extérieur, au moyen d'un SIG. De la même manière, les fonctionnalités « back office » des systèmes d'information usagers comprennent fréquemment une fonction de cartographie d'indicateurs. Toutefois, ces outils sont généralement faiblement paramétrables et les représentations proposées très insuffisantes. Les exports de données vers un SIG ne sont de plus pas toujours possibles, ce qui les rend très limitants voire inutilisables pour les analyses d'accessibilité.

Les représentations graphiques sont à envisager à partir d'outils de type « tableurs » ou d'outils d'analyse statistique.

Logiciel	Fonctionnalités de cartographie
<i>MapNod</i> (voir annexe B, d)	Cartographie en relief d'espace-temps (module MAP).
<i>MobiAnalyst</i> (voir annexe B, e)	Intégration à ArcGIS. Symbolologie et mise en forme modifiables. Calcul d'isochrones paramétrable.
<i>Reseaux.mbx</i> (voir annexe B, f)	Intégration à MapInfo. Fonctionnalités avancées d'interpolation et de krigeage : génération de contours iso-valeurs ou de rasters à partir de valeurs associées à des objets ponctuels ou linéaires. Prise en compte possible de périmètres non traversables. Plusieurs algorithmes disponibles.
<i>OpenTrip Planner</i> (voir annexe B, g)	Application web locale interactive : tracé d'itinéraire ou d'isochrone.
<i>Tempus</i> (voir annexe B, i)	Intégration à QGIS. Cartographie d'itinéraires isolés uniquement.
<i>TransCAD</i> (voir annexe B, j)	Fonctionnalités propres comme la représentation graphique d'isochrones (SIG intégré, mais très simple sur la qualité de rendu). Possibilité d'export en shp ou tab pour une mise en forme plus aboutie en faisant un post-traitement sur un logiciel SIG plus adapté.
<i>Visum</i> (voir annexe B, k)	Représentation basique d'isochrones. Peu paramétrable.

Tableau 16 : Fonctionnalités cartographiques des logiciels

3.5 Constats et préconisations sur les logiciels

3.5.1 Points d'attention pour le choix des outils

Les constats aujourd'hui

L'état des lieux réalisé souligne la diversité des outils développés autour du calcul d'accessibilité. Toutefois, les besoins ne sont pas couverts de façon exhaustive par un même outil et les outils souffrent pour beaucoup d'un manque de possibilité de paramétrage. Par conséquent, il peut être nécessaire pour le producteur d'études de s'équiper et de se former sur plusieurs logiciels pour être en mesure de répondre à l'ensemble des commandes qu'il reçoit.

Selon les objectifs de l'étude à réaliser et les données disponibles, certains outils peuvent se révéler mieux adaptés que d'autres. Toutefois, les raisons avancées par les producteurs d'études expliquant le choix d'un outil pour une étude donnée sont avant tout historiques :

- connaissance antérieure de l'outil en raison d'une utilisation sur d'autres études et, pour les outils propriétaires, disponibilité de la licence ;
- développement d'un modèle de déplacement basé sur ce logiciel sur le territoire étudié ;
- développement de l'outil par un chargé d'études de la structure, ce qui permet de bénéficier d'une assistance et d'envisager en interne des développements supplémentaires pour satisfaire d'éventuels nouveaux besoins (notamment dans un contexte d'étude exploratoire ou de recherche).

Au-delà des raisons historiques, les motifs de choix les plus fréquemment évoqués par les producteurs d'études sont : la facilité de prise en main, la gratuité, les performances, les possibilités de paramétrage et d'interconnexion avec d'autres outils, le dynamisme du développement logiciel et, parfois, la possibilité de réutiliser des données de réseaux déjà mises en forme pour l'outil.

Le choix d'un logiciel dans une structure est donc souvent réalisé pour du moyen voire du long terme (plusieurs dizaines d'années). Il conditionne ensuite les méthodes qu'il sera possible de déployer. En effet, l'effort de formation et de mise en forme des données pour un outil est souvent très conséquent. De plus, la compatibilité doit être assurée avec les autres choix logiciels effectués dans la structure (système de gestion de bases de données, logiciel d'information géographique, logiciel de modélisation statique des déplacements...).

Préconisations

Le choix d'un logiciel ne peut être remis en question à chaque nouvelle commande d'étude. Il y a un fort enjeu à s'orienter vers des outils logiciels ayant les fonctionnalités les plus diversifiées possibles. Des aspects plus généraux sont également à considérer au moment du choix :

- la facilité de prise en main : l'ergonomie et l'existence d'une documentation et de sessions de formation sont la garantie d'une bonne appropriation de l'outil par les chargés d'études ;
- les possibilités d'évolution de l'outil : il faut évaluer la qualité et la modularité des développements, l'existence d'une communauté d'utilisateurs et le dynamisme du développement pour la correction d'erreurs et l'évolution des fonctionnalités (on note que certains logiciels utilisés par les producteurs d'études interrogés ont vu leur développement arrêté) ;
- la compatibilité : avec les différents systèmes d'exploitation et avec d'autres logiciels (capacité d'interfaçage, au travers de l'utilisation de formats d'échange standards) ;
- le coût d'acquisition et le type de licence.

3.5.2 Pistes d'évolution de l'offre logicielle

Les constats aujourd'hui

La faiblesse de l'offre logicielle sur la fonctionnalité d'importation et de correction automatisée des données ainsi que l'hétérogénéité de formats des données mises à disposition des producteurs d'études limitent les possibilités de mise en œuvre du calcul d'accessibilité sur de nouveaux territoires ainsi que les possibilités d'actualisation des données précédemment utilisées. En effet, les producteurs d'études se limitent souvent au territoire couvert par l'outil dont ils disposent, la saisie de l'offre ayant été réalisée parfois plusieurs années auparavant. D'autres analyses qui pourraient les intéresser ne sont pas mises en œuvre, car le temps de mise en forme des données décrivant l'offre de transport serait beaucoup trop important.

De manière générale, le calcul d'itinéraires apparaît dans la plupart des logiciels actuels comme une « boîte noire » aux fonctionnalités faiblement paramétrables. Dans les études, les représentations de comportements multimodaux ou la définition fine des coûts généralisés sont fréquemment limitées par les outils de calcul d'itinéraires.

Enfin, la plupart du temps, la représentation cartographique des indicateurs se fait à l'aide d'un zonage prédéfini, basé sur les zonages administratifs ou encore sur des carroyages de l'espace. On sait que le choix d'un zonage par rapport à un autre peut influencer de façon non négligeable l'interprétation des résultats. La généralisation de procédure de « krigeage » permettrait de s'affranchir de ces limites liées au zonage, toutefois l'offre logicielle actuelle est extrêmement limitée sur ce point.

Préconisations

Lachance-Bernard soulignait en 2008 [37] que l'offre de logiciels permettait de répondre à la plupart des questions posées par le calcul d'accessibilité mais que l'utilisation des outils était lourde et les résultats parfois fournis avec un niveau de détail insuffisant, les fonctionnements de type « boîte noire » pouvant poser problème lorsqu'un paramétrage fin des calculs d'accessibilité était souhaité. Ces remarques nous semblent toujours valables aujourd'hui. En effet, les principales attentes des producteurs d'études en matière de logiciels vont vers plus d'interconnexion entre les différents outils, de la souplesse d'utilisation, des possibilités de paramétrage accrues et la possibilité d'avoir différents niveaux d'utilisation d'un même outil (débutant, intermédiaire, expert). Pour les logiciels de modélisation des déplacements, l'accès à une assistance réactive est cité comme un besoin par plusieurs producteurs d'études.

Sur le plan de l'importation et de la correction des données, il serait souhaitable de réunir dans un même outil les fonctionnalités suivantes, encore rares à ce jour :

- intégration de données sur les points d'arrêt au format IFOPT ;
- correction automatique des erreurs de topologie sur les données routières ;
- importation automatisée des données routières (réseau et ses caractéristiques, mouvements tournants) dans les formats de données les plus courants ;
- correction semi-automatisée d'erreurs sur les données d'offre de transport collectif.

L'utilisation d'un outil interfacé avec un logiciel SIG est intéressante pour la correction des données. Les fonctionnalités natives du SIG permettent en effet de visualiser les réseaux et de faire des corrections manuelles, lorsque les corrections automatiques sont insuffisantes.

Concernant le calcul d'itinéraires, il serait souhaitable de :

- permettre un paramétrage plus fin des temps de parcours pour les modes actifs (prise en compte du dénivelé) et pour les modes motorisés (mouvements tournants) ;
- permettre une prise en compte plus souple de la multimodalité ;
- diminuer les temps de calcul des algorithmes.

Enfin, la généralisation de l'offre de procédures d'interpolation et de krigeage pour la représentation cartographique des indicateurs est souhaitable, afin de s'affranchir de zonages prédéfinis pouvant biaiser l'interprétation des résultats.

4. Synthèse

Ce document recense les pratiques françaises en matière de calcul d'accessibilité des territoires, en termes de méthodologie de calcul, de données et de logiciels utilisés.

Sur le plan de la méthodologie, les entretiens réalisés montrent la diversité des questions posées et analysées au travers du calcul d'accessibilité. L'analyse bibliographique permet de mettre en regard les indicateurs proposés dans la littérature et ceux utilisés de façon opérationnelle : seuls les indicateurs les plus simples de la littérature, que sont les isochrones et dans une moindre mesure les indicateurs gravitaires, sont réellement mis en œuvre dans les études actuelles. Cela s'explique en majeure partie par la difficulté à obtenir certaines données d'entrée nécessaires, par la lourdeur des calculs et par la difficulté à communiquer sur les indicateurs les plus complexes.

De plus, les études analysées ont permis de mettre en relief les divers paramétrages et méthodes d'agrégation et de représentation graphique et cartographique des indicateurs utilisés. Trois points de vigilance méthodologique se dégagent, leur influence sur l'interprétation finale des résultats pouvant être non négligeable :

- le paramétrage du coût généralisé ;
- la méthode de prise en compte de la multimodalité ;
- le zonage choisi.

Sur le plan des données, les entretiens avec les producteurs d'études ont permis de recenser leurs principaux besoins :

- une meilleure lisibilité des données existantes ;
- des modalités d'accès aux données simplifiées, en particulier pour l'offre de transport collectif ;
- la mise à disposition de données plus riches et plus exhaustives sur les réseaux dédiés aux modes actifs et sur les équipements et opportunités des territoires ;
- la mise à disposition de données socio-économiques (en particulier l'emploi et la population) et d'occupation des sols plus désagrégées et plus fréquemment actualisées ;
- l'uniformisation des formats de données, en particulier pour l'offre de transport collectif ;
- en l'absence de formats unifiés, le développement d'outils de conversion entre les formats de données les plus courants, notamment ceux acceptés par les logiciels permettant les calculs d'itinéraires.

Sur le plan des logiciels, l'analyse réalisée permet de constater qu'aucun outil ne couvre à lui seul l'ensemble des besoins. Pour autant, l'offre logicielle globale permet de satisfaire la majeure partie des attentes des producteurs d'études. Il est donc préconisé ici de construire des suites logicielles basées sur les outils existants, avec des capacités d'interconnexion qui restent à améliorer.

Parmi les points faibles recensés en termes de fonctionnalités des outils, figurent l'importation et la correction automatisées des données d'entrée mais également le paramétrage des calculs. Celui-ci est parfois bridé par les logiciels, qui devraient aller vers plus de souplesse en permettant d'accéder aux mécaniques algorithmiques, voire de les modifier et de définir finement les paramètres d'entrée du calcul. Les fonctionnements de type « boîte noire » doivent absolument être évités. Les logiciels « open source » pour lesquels l'accès à l'ensemble du code est garanti permettent de satisfaire ce besoin de paramétrage mais souffrent parfois d'un manque d'ergonomie ou de documentation.

Ce document rassemble donc les besoins exprimés autour des études d'accessibilité du territoire. L'explicitation de ces besoins vise la mise en place d'actions qui faciliteront la réalisation de ces études et en rehausseront la qualité. Cette amélioration des pratiques amènera ensuite à s'interroger sur un éventuel besoin d'homogénéisation des pratiques.

Bibliographie

- [1] Morris J. M., Dumble P. L. et Wigan M. R. (avril 1979). *Accessibility Indicators for Transport Planning Transportation Research Part A: General*, vol. 13, n° 2, p. 91-109, disponible sur : [http://dx.doi.org/10.1016/0191-2607\(79\)90012-8](http://dx.doi.org/10.1016/0191-2607(79)90012-8).
- [2] Hansen W. G. (1959). *How Accessibility Shapes Land Use Journal of the American Institute of Planners*, vol. 25, n° 2, p. 73-76, disponible sur : <http://dx.doi.org/10.1080/01944365908978307>.
- [3] Ben-Akiva M. et Lerman S. R. (1979). « Disaggregate Travel and Mobility-choice Models and Measures of Accessibility », *Behavioural Travel Modelling*, Croom Helm, p. 654-679.
- [4] Dejeammes M., Valgalier J.-L. et Vincent P. (5 octobre 2002). *Concept – Ville accessible à tous*, Certu, disponible sur : <http://www.certu-catalogue.fr/concept-ville-accessible-a-tous.html>.
- [5] Bonnafous A. et Puel H. (1983). *Physionomie de la ville*, Les éditions ouvrières, « Initiation économique ».
- [6] Geurs K. T. et van Wee B. (juin 2004). « Accessibility Evaluation of Land-use and Transport Strategies: Review and Research Directions », *Journal of Transport Geography*, vol. 12, n° 2, p. 127-140, disponible sur : <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2003.10.005>.
- [7] Hull A., Silva C. et Joutsiniemi A. (2012). « Accessibility Instruments Survey », *Accessibility Instruments for Planning Practice*, p. 205-237.
- [8] Leysens T. (24 mars 2011). « Outils et méthodes au service de l'observation croisée foncier-transport », 11^e colloque du groupe de travail *Mobilités Spatiales et Fluidité Sociale (MSFS)* de l'Association Internationale des Sociologues de Langue Française (AISLF) : *Mobilités spatiales et ressources métropolitaines* : l'accessibilité en questions, disponible sur : <http://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00640125>.
- [9] L'Hostis A. et Conesa A. (août 2008). « Définir l'accessibilité intermodale », *Systèmes de transport urbain*, p. 22.
- [10] Richer C. et Vuidel G. (4 janvier 2012). « L'intensité nodale, une évaluation de la performance de l'intermodalité dans les pôles d'échanges » dans *Actes de Théo Quant 2011, Dixièmes rencontres Théo Quant*, disponible sur : <http://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00798567>.
- [11] Stransky V. (2008). « Vers une métrique de la connexion intermodale : un essai de quantification de la cohérence entre modes de transport complémentaires », *Les Cahiers scientifiques du transport*, n° 53, p. 57-90.
- [12] Quinet E. (septembre 2013). *Évaluation socio-économique des investissements publics*, Commissariat général à la stratégie et à la prospective, disponible sur : http://www.strategie.gouv.fr/blog/wp-content/uploads/2013/09/CGSP_Evaluation_socioeconomique_17092013.pdf.
- [13] Bonnafous A. et Masson S. (2003). « Évaluation des politiques de transports et équité spatiale », *Revue d'économie régionale et urbaine*, n° 4, p. 547-572.
- [14] Directeur général des Infrastructures, des Transports et de la Mer, ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie. *Note technique du 27 juin 2014 relative à l'évaluation des projets de transport*, disponible sur : http://circulaire.legifrance.gouv.fr/pdf/2014/07/cir_38526.pdf.
- [15] El-Geneidy A. M. et Cerda A. (2013). *Mesures d'accessibilité – Mesures de performance pour la planification de l'utilisation du sol et du transport dans la région métropolitaine de Montréal*, ministère des Transports du Québec, disponible sur : <http://site.ebrary.com/lib/celtitles/docDetail.action?docID=10652421>.

- [16] Richer C. et Palmier P. (2012). « Mesurer l'accessibilité territoriale par les transports collectifs. Proposition méthodologique appliquée aux pôles d'excellence de Lille Métropole », *Cahiers de géographie du Québec*, vol. 56, n° 158, disponible sur : <http://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00798642>.
- [17] epures (Agence d'urbanisme de la région stéphanoise) (2012). « Les données du territoire – Déplacements », *Représentation de l'accessibilité*, disponible sur : <http://www.epures.com/publications/transports-deplacements/249-representation-de-l-accessibilite>.
- [18] Koenig G. (1974). « Théorie économique de l'accessibilité urbaine », *Revue économique*, vol. 25, n° 2, p. 275-297, disponible sur : <http://dx.doi.org/10.2307/3500570>.
- [19] Bonnafous A., Crozet Y., Mercier A., Ovtracht N. et Thiébaud V. (décembre 2009). *MOSART: un prototype d'outil d'aide à la décision, individuelle et collective pour une mobilité durable – Rapport final*, Laboratoire d'économie des transports – UMR ENTPE, université Lyon-II, CNRS.
- [20] DRIEA (20 mai 2008). *Modus – Documentation détaillée du modèle de déplacements de la DREIF*, disponible sur : http://www.driea.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Documentation_MODUSv2-1-2_cle25e7bd.pdf.
- [21] Sen A. K. (1989). *The Territory of Justice (Discussion Paper / Harvard Institute of Economic Research)*, Harvard Institute of Economic Research, Harvard University.
- [22] Shen Q. (1998). « Location Characteristics of Inner-city Neighborhoods and Employment Accessibility of Low-wage Workers », *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol. 25, n° 3, p. 345-365.
- [23] Kirby H. R. (1970). « Normalizing Factors of the Gravity Model – An Interpretation », *Transportation Research*, vol. 4, n° 1, p. 37-50, disponible sur : [http://dx.doi.org/10.1016/0041-1647\(70\)90073-0](http://dx.doi.org/10.1016/0041-1647(70)90073-0).
- [24] Wilson A. (1971). *Entropy in Urban and Regional Modelling*, Pion Ltd, London.
- [25] Caubel D. (31 mars 2006). *Politique de transport et accès à la ville pour tous? Une méthode d'évaluation appliquée à l'agglomération lyonnaise*, université Lumière, Lyon.
- [26] Kwan M.-P. et Weber J. (2003). « Individual Accessibility Revisited: Implications for Geographical Analysis », *Twenty-first Century Geographical Analysis*, vol. 35, n° 4, p. 341-353, disponible sur : <http://dx.doi.org/10.1111/j.1538-4632.2003.tb01119.x>.
- [27] Hägerstrand T. (1970). « What About People in Regional Science? », *Regional Science*, vol. 24, n° 1, p. 7-24, disponible sur : <http://dx.doi.org/10.1111/j.1435-5597.1970.tb01464.x>.
- [28] Lenntorp B. (1976). *Paths in Space-time Environments: a Time-geographic Study of Movement Possibilities of Individuals*, Dept. of Geography, Royal University of Lund.
- [29] Dijst M. et Vidakovic V. (1997). « Individual Action Space in the City », *Activity-based Approaches to Travel Analysis*, Pergamon, p. 117-134.
- [30] Kwan M.-P. (1998). « Space-time and Integral Measures of Individual Accessibility: A Comparative Analysis Using a Point-based Framework », *Geographical Analysis*, vol. 30, n° 3, p. 191-216, disponible sur : <http://dx.doi.org/10.1111/j.1538-4632.1998.tb00396.x>.
- [31] Burns L. D. (1980). *Transportation, Temporal and Spatial Components of Accessibility*, disponible sur : <http://trid.trb.org/view.aspx?id=151310>.
- [32] Ben-Akiva M. E. et Lerman S. R. (1985). *Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand*, MIT Press.
- [33] Neuberger H. (janvier 1971). « User Benefit in the Evaluation of Transport and Land Use Plans », *Journal of Transport Economics and Policy*, disponible sur : <http://trid.trb.org/view.aspx?id=134105>.

- [34] Comité directeur des Transports, ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer (25 mars 2004). *Instruction cadre relative aux méthodes d'évaluation économique des grands projets d'infrastructures de transport*.
- [35] Di Salvo M. (janvier 2006). *Calculs d'accessibilité. Impact des spécifications du réseau routier sur les calculs d'accessibilité. Données sources méthodes*, disponible sur : <http://lara.inist.fr/bitstream/handle/2332/578/1074T1.pdf?sequence=1>.
- [36] Belloche S. et El Faouzi N.-E. (septembre 2011). « Connaissance du temps de recherche d'une place de stationnement sur voirie », *T.E.C.*, vol. 211, p. 54-57.
- [37] Lachance-Bernard N. (2008). *Modélisation des coûts généralisés de déplacement en transport privé et public – Automatisation des spécifications de paramètres pour la géo-simulation*, École supérieure d'aménagement et de développement – université Laval, Québec, disponible sur : <http://archimede.bibl.ulaval.ca/archimede/meta/25404>.
- [38] TFL (avril 2010). *Measuring Public Transport Accessibility Levels – Summary*, Transport For London, disponible sur : <http://data.london.gov.uk/documents/PTAL-methodology.pdf>.
- [39] Gallez C. et Hivert L. (1998). *BEED : mode d'emploi – Synthèse méthodologique pour les études « Budget Énergie Environnement des Déplacements »*.
- [40] Mercier A. (2007). *Accessibilité et concurrence modale : l'exemple strasbourgeois*. Présentation Journées de l'AFITL.
- [41] Lichère V. (septembre 1999). *La modélisation des déplacements intermodaux*, SEMALY, disponible sur : <http://portail.documentation.developpement-durable.gouv.fr/dri/document.xsp?id=Drast-004492>.
- [42] Litman T. (2008). « Valuing Transit Service Quality Improvements », *Journal of Public Transportation*, vol. 11, n° 2, p. 43-63.
- [43] Coindet J.-P. (1999). « La valorisation du confort – Les vicissitudes de l'approche de la qualité de service », *Métropolis*, vol. Évaluer et décider dans les transports, n° 106-107, p. 43-50.
- [44] Boiteux M. (2001). *Transports : choix des investissements et coûts des nuisances*, disponible sur : <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/rapports-publics/014000434/index.shtml>.
- [45] *Budget de l'Automobiliste – Automobile Club Association*, disponible sur : <http://www.automobile-club.org/voiture/budget-automobiliste.html>.
- [46] SNCF. *Voyager au prix qui vous convient – Tarifs Intercités*, disponible sur : <http://www.voyages-sncf.com/ext/editorial/guide-voyageur/voyager-au-meilleur-prix-intercites-loisir.pdf>.
- [47] Beauvais J.-M. (juin 2013). *Coûts d'usage des différents modes de transport*, FNAUT (Fédération Nationale des Associations d'Usagers des Transports), disponible sur : <http://www.fnaut.fr/actualite/etudes-et-debats/199-couts-d-usage-des-differents-modes-de-transport>.
- [48] Direction générale des Routes (23 mai 2007). *Instruction relative aux méthodes d'évaluation économique des investissements routiers interurbains*, disponible sur : http://cpdp.debatpublic.fr/cdpd-castrestoulouse/DOCS/DOSSIER_MO/METHODES_EVALUATION_ECONOMIQU_4.PDF.
- [49] Villalba T. et Lemaître H. (juillet 2013). *Calculs d'accessibilité – Calibrage de la fonction de distribution gravitaire des déplacements*, SETRA, disponible sur : http://www.infra-transport-materiaux.cerema.fr/IMG/pdf/1311w_rapport_calcul_accessibilite.pdf.
- [50] Orus J.-P. et Sanchez Flores O. (1995). *Révision du schéma directeur routier national – Méthodologie de prise en compte des objectifs d'aménagement du territoire avec un critère d'accessibilité – Application aux liaisons interurbaines pour les déplacements de personnes*.

- [51] Masson S. (1 janvier 2000). *Les interactions entre système de transport et système de localisation en milieu urbain et leur modélisation*, Lyon-II, disponible sur : <http://www.theses.fr/2000LYO22027>.
- [52] Johansson B., Klaesson J. et Olsson M. (2002). « Time Distances and Labor Market Integration », *Regional Science*, vol. 81, n° 3, p. 305-327, disponible sur : <http://dx.doi.org/10.1111/j.1435-5597.2002.tb01236.x>.
- [53] Karlsson C., Gräsjö U. et Andersson M. (31 mai 2006). *Regional Knowledge Accessibility and Regional Economic Growth*, Royal Institute of Technology, CESIS – Centre of Excellence for Science and Innovation Studies, disponible sur : <http://econpapers.repec.org/paper/hhscesisp/0066.htm>.
- [54] Vigné P., Richard M., Mary J.-F., Cahierre S., Joly O. et Gourgand B. (octobre 2011). *Traitements géomatiques par carreaux pour l'observation des territoires*, disponible sur : <http://www.certu-catalogue.fr/traitements-geomatiques-par-carreaux-pour-l-observation-des-territoires.html>.
- [55] Grasland C., Madelin M., Ben Rebah M., Mathian H., Sanders L., Lambert N., Charlton M., Cheng J., Fotheringham S., Holm E., Holme K., Stromberg M., Lennert M., Medina Lockard P., Vandermotten C., Vincent J.-M., Mathis P., Serrhini K. et Rase W.-D. (novembre 2006). *The Modifiable Areas Unit Problem*, ESPON, disponible sur : http://www.espon.eu/export/sites/default/Documents/Projects/ESPON2006Projects/StudiesScientificSupportProjects/MAUP/espon343_maup_final_version2_nov_2006.pdf.
- [56] Di Salvo M., Gadais M. et Roche-Woillez G. (avril 2005). *L'estimation de la densité par la méthode des noyaux : méthode et outils*, Certu, disponible sur : <http://lara.inist.fr/handle/2332/879>.
- [57] Dijkstra E. W. (1959). « A Note on Two Problems in Connexion with Graphs », *Numerische Mathematik*.
- [58] Bellman R. (1958). « On a Routing Problem Quarterly », *Applied Mathematics*, vol. 16, n° 1, p. 87-90.
- [59] Pallottino S. (1984). « Shortest-path Methods: Complexity, Interrelations and New Propositions », *Networks*, vol. 14, n° 2, p. 257-267, disponible sur : <http://dx.doi.org/10.1002/net.3230140206>.
- [60] Crozet Y., Mercier A., Ovtracht N., Sapet L., Duprez F., Wagner N. et Descroux T. (juin 2012). *Outils pour la mesure et la visualisation de l'accessibilité : une plate-forme collaborative à l'échelle de la région lyonnaise*, disponible sur : www.predit.prd.fr/predit4/document/43672.
- [61] Palmier P. (juin 2013). *Constitution d'une base de données régionales de l'offre en transports en commun (urbaine, départementale et ferroviaire)*. Présentation JTD RST 2013, Lyon, disponible sur : http://www.rst.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/3_Atelier_5_Palmier_CETE_NP_cle291631.pdf.
- [62] Dotta D. et Pougard J. (2012). *Marseille Provence Métropole – Une complémentarité entre bus, métros et tramways à renforcer*, INSEE, disponible sur : http://www.insee.fr/fr/themes/document.asp?reg_id=5&ref_id=19225.
- [63] Clergue L., Buttignol V., Raffegau J.-R., Saubion B., Troullioud O., Haddjéri M. et Bouchard P. (février 2014). *Mesures de l'accessibilité aux massifs montagneux français – 6 sites d'études dans les Alpes et les Pyrénées – Prise en compte des phénomènes de cumul de fréquentation avec utilisation de relevés de traces GPS*, Cerema – DTerMed, disponible sur : http://www.territoires-villes.cerema.fr/IMG/pdf/Accessibilite_Montagne_Cerema_fev2014_vdef_cle76cdb8.pdf.
- [64] Senouci S., Richard O. et Déchaux A. (août 2014). *Mesure de l'accessibilité du territoire de l'agglomération de Lyon en transport en commun*, Cerema, direction territoriale Centre-Est.
- [65] L'Hostis A. et Leysens T. (2012). *Les méthodes de mesure et de représentation de l'accessibilité dans les méthodes d'évaluation des projets de transport interurbains et périurbains de voyageurs : méthode, indicateurs, applications et limites de la contactabilité*, disponible sur : <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00734212>.
- [66] Palmier P., Cousin G. et El Hage A. (juillet 2009). *Construction d'un SIG du transport ferroviaire national de voyageurs sous TransCAD*, SETRA.

- [67] Palmier P. (mars 2011). *Musliw. Logiciel de calcul d'accessibilité multimodale*, SETRA, disponible sur : http://prd59.documentation.developpement-durable.gouv.fr/document.xsp?id=CETENP-C59OUV00124315&qid=sd_x_q0&n=629&q=&depot=notices.
- [68] Lasserre V. (11 mars 2009). *Les analyses d'accessibilité réalisées au CETE de Lyon*, Présentation Réunion LET - CETE de Lyon.
- [69] Lenntorp B. (février 2003). « The drama of real life in a time-geographic disguise », *6^e Rencontres de Théo Quant*, université de Franche-Comté, p. 10.
- [70] Chardonnel S. (2001). « La Time-geography : les individus dans le temps et l'espace », *Modèles en analyse spatiale*, Paris, Lavoisier, p. 129-156.

Annexes

Annexe A - Liste et résumés des études ayant fait l'objet d'un entretien avec leur producteur

A) Outils pour la mesure et la visualisation de l'accessibilité : une plate-forme collaborative à l'échelle de la région lyonnaise

Maître d'ouvrage : PREDIT

Producteur de l'étude : Agence d'urbanisme de Lyon, CETE de Lyon, LET

Date du rapport final : juin 2012

Référence publication : [60]

1) Contribution de l'agence d'urbanisme de Lyon

L'objectif de cette étude est d'abord méthodologique : il s'agissait pour l'agence de montrer qu'on peut réaliser des cartes isochrones sans avoir à utiliser un modèle de déplacements. Sur le plan applicatif, il s'agissait de comparer l'accessibilité en temps à différents sites depuis l'ensemble de l'agglomération lyonnaise. Un bilan est réalisé des travaux de l'agence sur l'accessibilité (2008) alimentant l'observatoire des déplacements qu'elle anime. Ces travaux ont ensuite été étendus à une échelle de territoire plus large (aire métropolitaine au lieu du Grand Lyon) et en traitant toutes les offres de transport collectif de façon combinée (urbain et interurbain).

2) Contribution du CETE de Lyon

Cette seconde approche vise à évaluer l'impact du plan Atobus (refonte des lignes et des horaires du réseau lyonnais en septembre 2011) sur l'accessibilité à différents pôles de l'agglomération lyonnaise. Des cartes isochrones sont utilisées pour mesurer l'accessibilité au centre de l'agglomération (gare Part-Dieu), à un centre d'emploi de périphérie (zone d'activités Techlid).

3) Contribution du LET (Laboratoire d'Économie des Transports)

Une analyse de l'accessibilité gravitaire aux emplois du Grand Lyon est réalisée en heure creuse et en heure de pointe pour le mode automobile et en heure de pointe pour les transports collectifs. La comparaison des accessibilités par mode montre qu'elle est en faveur des modes collectifs dans toute la zone centrale. Enfin, une comparaison avec les dynamiques de construction de logement à l'œuvre dans l'agglomération montre que les gains de vitesse permis par les nouvelles infrastructures de transport ont tendance à créer la périurbanisation.

B) Accessibilité au quartier de Saint-Étienne Chateaucroix

Maître d'ouvrage : agence d'urbanisme de la région stéphanoise

Producteur de l'étude : agence d'urbanisme de la région stéphanoise

Référence publication : [17]

Cette étude a été réalisée en vue de présenter les possibilités du modèle de déplacements de la région stéphanoise en termes de calcul d'accessibilité. Elles sont illustrées par la mesure de l'accessibilité au quartier de la gare de Chateaucroix, pôle multimodal d'intérêt régional. Les données de temps d'accès en transports collectifs sont croisées avec les données de population.

C) Accessibilité aux zones touristiques en Aquitaine*Maître d'ouvrage : DREAL Aquitaine**Producteur de l'étude : CETE du Sud-Ouest**Date de rendu de l'étude : septembre 2011*

Les projets de LGV Tours-Bordeaux, Bordeaux-Espagne, Bordeaux-Toulouse et Poitiers-Limoges devraient avoir une influence sur l'attractivité de la région Aquitaine. L'objectif de cette étude est d'évaluer l'accessibilité actuelle des zones touristiques d'Aquitaine depuis quelques métropoles françaises et européennes et d'estimer leur accessibilité à l'horizon 2020, compte tenu de l'amélioration de l'offre de transports (projets prévus dans le SNIT notamment). Le fer, l'aérien et la route sont pris en compte.

D) Accessibilité des aires de covoiturage dans le Lot-et-Garonne*Maître d'ouvrage : association Au fil des Séounes**Producteurs de l'étude : MobiGIS et Au fil des Séounes**Date de rendu de l'étude : juin 2012*

Au Fil des Séounes est une association environnementale préoccupée par les problématiques de mobilité qui a réalisé un schéma départemental des alternatives à l'usage individuel de la voiture. Ce schéma propose un certain nombre d'aires de covoiturage et vise à inciter les communes à en aménager sur leur territoire. L'accessibilité des aires de covoiturage proposées a été étudiée au moyen des modes de transport collectif, de l'automobile et des modes actifs.

E) Accessibilité en transports en commun et modes actifs du territoire de l'aire métropolitaine lilloise*Maître d'ouvrage : DREAL Nord-Pas-de-Calais**Producteur de l'étude : CETE Nord -Picardie**Référence publication : [61]*

En 2009, la DREAL Nord-Pas-de-Calais a initié une démarche en vue de procurer un cadre de cohérence pour l'aménagement et les transports à l'échelle de l'aire métropolitaine de Lille. L'objectif de cette étude est d'apporter aux partenaires de l'Aire Métropolitaine de Lille (AML) une méthode leur permettant de mieux formaliser les enjeux de cohérence du système de transport actuel avec d'autres enjeux, sociaux, économiques ou environnementaux. Les opportunités étudiées sont les pôles commerciaux, les pôles universitaires et les zones d'activités économiques.

F) Choix de localisation d'acteurs économiques (études multiples, confidentielles)*Maîtres d'ouvrage : divers, non communiqués**Producteur des études : EM Services*

Dans le cadre de projets de nouvelles implantations ou de déménagements de sites existants, les entreprises font appel à EM Services pour évaluer les conditions d'accessibilité des différents sites pressentis et ainsi apporter une aide à la décision. Les analyses sont réalisées pour la voiture et pour les transports en commun. Les sites sont comparés à la fois en fonction de l'accessibilité pour les salariés et de l'accessibilité pour les clients et fournisseurs.

G) Contrat urbain de cohésion sociale, politique de la ville 2007-2009 dans l'agglomération grenobloise – diagnostic et projets territoriaux*Maître d'ouvrage : EP SCoT de la région urbaine de Grenoble**Producteur de l'étude : agence d'urbanisme de la région grenobloise**Date de rendu de l'étude : 2008*

Le diagnostic réalisé regroupe des données permettant de décrire la situation sociale et économique de l'agglomération grenobloise et en particulier des secteurs les plus concernés par la politique de la ville. Il s'appuie sur les travaux d'observation de la cohésion sociale conduits par l'agence d'urbanisme depuis 2000 et recense les objectifs et projets d'intervention poursuivis par les élus sur ces territoires. Le calcul d'accessibilité est un des outils utilisés pour mesurer les disparités existantes et l'effet des politiques à l'œuvre pour agir sur ces disparités.

H) Dispositif de veille des quartiers stéphanois*Maître d'ouvrage : Ville de Saint-Étienne**Producteur de l'étude : agence d'urbanisme de la région stéphanoise, epures**Date de rendu de l'étude : février 2013*

La ville de Saint-Étienne organise une veille sur les quartiers. Les aspects pris en compte dans la veille sont divers : évolution démographique, effectifs scolaires, qualité de l'habitat, précarité sociale, taux de chômage, délinquance et accessibilité par les transports collectifs. Une carte isochrone est réalisée pour chaque quartier.

I) Étude de trafic du Grand Paris Express : quels enseignements ?*Maître d'ouvrage : DRIEA**Producteur de l'étude : DRIEA**Date de rendu de l'étude : août 2012*

Résumé : Ce travail entre dans un cadre de soutien technique et méthodologique à la Société du Grand Paris mis en œuvre en 2011-2012 sur différentes études afin de préparer l'enquête publique. Cette étude vise à mettre en avant les principaux indicateurs et éléments de synthèse concernant l'impact du projet sur le déplacement des franciliens. Les calculs d'accessibilité permettent d'alimenter la troisième partie du rapport.

J) Fragmentation socio-spatiale : accessibilité automobile des équipements de l'Isère, atlas cartographique*Maître d'ouvrage : conseil général de l'Isère**Producteur de l'étude : agence d'urbanisme de la région grenobloise**Date de rendu de l'étude : février 2013*

Résumé : L'agence d'urbanisme de la région grenobloise mène depuis 2008 une réflexion exploratoire pour comprendre quels sont les mécanismes à l'œuvre dans les phénomènes de fragmentation spatiale et de polarisation sociale et quels sont les réponses possibles au travers de l'aménagement du territoire. Dans cette étude, on cherche à connaître les inégalités de couverture territoriale des équipements en Isère à travers le prisme de l'accessibilité routière à certains équipements existants (ceux recoupant les financements ou les compétences détenus par le conseil général) :

- équipements culturels et de divertissement ;
- équipements sociaux ;
- équipement de santé ;
- équipements sportifs.

K) Intensification urbaine dans la région de Colmar*Maître d'ouvrage : DDT 68**Producteur de l'étude : CETE de l'Est**Date de rendu de l'étude : 2011*

Résumé : La DDT a souhaité identifier des secteurs intéressants en termes d'accessibilité non automobile pour urbaniser. Cette étude se situe dans la dynamique du SCoT et constitue une étape pour identifier les secteurs à densifier et les espaces denses à mieux desservir.

L) Marseille Provence Métropole : une complémentarité entre bus, métros et tramways à renforcer*Maître d'ouvrage : Marseille Provence Métropole**Producteur de l'étude : INSEE PACA**Publication : [62]*

Résumé : Dans le cadre de la révision de son Plan de Déplacements Urbains (PDU) en 2012, la Communauté urbaine de Marseille Provence Métropole a développé un schéma directeur des transports en commun en site propre (TCSP). L'objectif de cette étude était de fournir des éléments objectifs et partagés pour l'élaboration du PDU et du Schéma directeur des TCSP. Il s'agit d'une part de représenter à un niveau infracommunal (carreaux de 200 mètres) quelques déterminants socio-démographiques de la mobilité et, d'autre part, de les confronter aux lignes du réseau actuel des transports. Elle permet de caractériser la desserte de ces lignes et de repérer d'éventuelles zones à enjeux (zones mal desservies avec de nombreux usagers potentiels ou, à l'inverse, zones bien desservies avec peu de bénéficiaires potentiels).

M) Mesure d'accessibilité aux massifs montagneux français*Maître d'ouvrage : Certu et Atout France**Producteur de l'étude : CETE Méditerranée**Référence publication : [63]*

Résumé : Cette étude s'inscrit dans le programme d'études du Certu d'amélioration des connaissances sur l'accessibilité aux sites touristiques des massifs montagneux français. Son objectif était d'analyser l'impact de différentes périodes caractéristiques (saisons, vacances scolaires, week-ends...) sur l'accessibilité multimodale (route, ferroviaire et aérien) en temps aux secteurs d'étude. L'originalité de cette étude réside dans le type de données utilisées pour la réaliser : des relevés de traces GPS obtenues par l'intermédiaire de l'outil « Custom Travel Times » mis en place par Tom-Tom.

N) Mesure de l'accessibilité du territoire en transports en commun pour les personnes à mobilité réduite*Commanditaire de l'étude : Certu**Producteur de l'étude : CETE de Lyon dans le cadre du PST Rhône-Alpes**Référence publication : [64]*

Résumé : Cette étude s'intègre au projet « cumuls d'inégalités dans le cadre des mobilités quotidiennes » porté par le LET (Laboratoire d'Économie des Transports). Elle vise à mesurer les cumuls entre inégalités territoriales (par rapport au lieu de résidence) et difficultés de mobilité dans les déplacements en transports collectifs dans l'agglomération lyonnaise. L'accessibilité est évaluée depuis et vers des pôles d'emplois, des pôles universitaires, des zones résidentielles périphériques, des pôles de santé et des pôles de loisirs. L'étude montre une augmentation du temps de parcours et une limitation des zones desservies pour les personnes à mobilité réduite, en raison de l'augmentation des temps de correspondances, de l'impossibilité d'accéder à certains arrêts et de la réduction de la distance acceptable pour le rabattement sur l'arrêt de transport collectif. Un test de sensibilité sur la vitesse de marche montre que les correspondances sont optimisées pour une certaine plage de vitesses et que les personnes à mobilité réduite vont avoir tendance à manquer leurs correspondances et donc à avoir des temps d'attente plus longs. Par ailleurs, l'étude met en évidence l'effet de cumul des handicaps : habiter en périphérie et avoir une vitesse de déplacement plus faible que la moyenne conduit à une baisse très significative de l'accès aux emplois.

O) Mesurer l'accessibilité territoriale par les transports collectifs : proposition méthodologique appliquée aux pôles d'excellence de Lille Métropole*Maître d'ouvrage : Certu**Producteur de l'étude : CETE Nord-Picardie**Référence publication : [16]*

Résumé : L'accessibilité n'est pas un concept univoque. Si toutes les approches insistent sur l'enjeu du potentiel de mobilité pour l'espace et les sociétés, il convient de distinguer les multiples dimensions du système d'accessibilité territoriale (approche théorique). Cet article porte sur une de ses facettes, celle de l'accessibilité structurelle du territoire en transport collectif à travers la construction d'un indicateur multicritère (croisement de critères de temps, d'intensité des relations et de pénibilité des déplacements). L'enjeu est d'estimer plus finement des potentiels d'accessibilité en transport collectif (approche méthodologique) et d'interpréter (approche opérationnelle) les (dés)équilibres d'accès aux pôles d'excellence dans le territoire métropolitain lillois. Les résultats fournis par l'outil de calcul de l'accessibilité multimodale MUSLIW développé au CETE Nord-Picardie permettent de mettre en débat les politiques stratégiques de LMCU (Lille Métropole Communauté Urbaine) dans une optique d'aide à la décision. La démarche développée dans cet article est mise en perspective avec la méthode anglo-saxonne PTAL (Public Transport Accessibility Level) utilisée dans la planification stratégique au Royaume-Uni. Ce croisement des regards donne la mesure de l'enjeu d'une meilleure estimation de la performance territoriale des réseaux de transport collectif pour assister les autorités responsables de l'aménagement, par exemple, dans leur choix d'urbanisation et de normes de stationnement.

P) Les méthodes de mesure et de représentation de l'accessibilité dans les méthodes d'évaluation des projets de transport interurbains et périurbains de voyageurs*Maître d'ouvrage : DGITM**Producteur de l'étude : IFSTTAR/Laboratoire Ville Mobilité et Territoire (LVMT)**Référence publication : [65]*

Résumé : Dans un contexte de réduction de la consommation d'espace et de volonté de développer un urbanisme plus durable, il semble pertinent de s'interroger sur les conditions d'accès aux différentes ressources. Il s'agit de savoir de quelle manière il est possible de satisfaire l'objectif d'accessibilité aux ressources et selon quels principes, moyens et formes. Il convient donc de s'interroger sur les théories et méthodes de mesure de l'accessibilité afin de déterminer dans quelle mesure il est possible de compléter les approches actuelles (notamment dans les directives du ministère). Nous avons décidé d'étudier le transport de voyageurs et plus précisément les possibilités de contact dans le cadre d'allers-retours dans la journée entre les pôles urbains. Nous avons, pour ce faire, mobilisé les concepts de la Time-Geography et de la contactabilité au travers des travaux de l'école de Géographie de Lund, ainsi que les travaux menés dans le cadre d'ESPON. Ces études nous ont permis d'adapter et de tester les indicateurs de contactabilité et de mettre en évidence leur intérêt dans la mesure de l'accessibilité et plus largement pour l'évaluation des projets de transport. Ces indicateurs peuvent d'ailleurs être intégrés dans les calculs économiques et représentent des pistes de recherche intéressantes pour une meilleure évaluation de la VAN (Valeur Actuelle Nette).

Q) Mobilités, déplacements et technologies de l'information et la communication (dans le cadre du SCoT du Val d'Adour)

Maître d'ouvrage : Pays du Val d'Adour

Producteurs de l'étude : MobiGIS et Inddigo

Date de rendu de l'étude : juin 2012

Résumé : Territoire situé en limite de trois départements et sur deux Régions, sa position géographique et son caractère rural freinent le développement d'une offre de transport collectif performante. Les objectifs de cette étude étaient :

- d'analyser l'offre de transport collectif et l'usage des technologies de l'information et de la communication pour proposer des alternatives à la voiture individuelle, tout en prenant en compte les contraintes de ce territoire ;
- de mesurer l'impact de l'ouverture de l'A65 (entre Bordeaux et Pau) sur l'accessibilité du territoire ;
- d'analyser l'accessibilité en voiture aux arrêts de transports collectifs et l'accessibilité tous modes aux points d'intérêt situés à l'intérieur ou à proximité du territoire.

R) MOSART : un prototype d'aide à la décision individuelle et collective pour une mobilité durable

Maître d'ouvrage : PREDIT

Producteur de l'étude : Laboratoire d'Économie des Transports

Référence publication : [19]

Résumé : Cette étude vise à illustrer les possibilités d'utilisation de la plate-forme MOSART développée par le LET pour réaliser des simulations d'accessibilité selon les modes et les périodes de la journée à un niveau zonal très détaillé et à l'échelle de l'aire urbaine lyonnaise. Dans une première partie, les principes de la plate-forme et ses aspects techniques sont présentés. Dans un second temps, 3 applications utilisant cette plateforme sont présentées.

1) Analyse de l'accessibilité et de la concurrence modale en situation de référence

Un scénario de référence d'accessibilité aux emplois est évalué en période de pointe du matin pour les transports collectifs et la voiture. L'indicateur gravitaire est utilisé et les différences d'accessibilité pour les deux modes sont examinées.

2) Le péage urbain

Le scénario de péage urbain vise à compenser les écarts de temps de parcours entre les deux modes (plutôt en faveur de l'automobile) par un coût d'utilisation de la voirie. L'étude simule un accroissement du coût monétaire (3 €) des déplacements automobiles à destination des communes de Lyon et de Villeurbanne en heure de pointe. Les déplacements qui transitent à travers la zone ne sont pas concernés par le péage. L'étude montre que ce scénario n'est pas en mesure de renverser le partage modal dans l'aire d'étude mais qu'il permet de maintenir un bon niveau d'accessibilité routière avec des temps de parcours fiables en diminuant la congestion, les automobilistes payant cette accessibilité au prix fort.

3) La taxe sur l'usage de l'automobile

Le scénario suivant étudie l'impact d'une taxe carbone sur le carburant (4 centimes par litre d'essence et 4,8 centimes par litre de gasoil). Étant donné qu'il ne modifie que très marginalement le coût total du km, ce scénario ne modifie pas les comportements de déplacement et donc l'accessibilité dans l'aire urbaine. Par conséquent, une taxe « extrême » est testée : le prix du carburant est passé à 3 € le litre. On considère que cette taxe est

progressive et ne modifie pas les déplacements des automobilistes. Ceux-ci ne le prennent donc pas en compte, dans un premier temps, dans le choix modal et dans la distribution des déplacements. Cette hausse des prix du carburant présente des résultats plus favorables aux transports collectifs que le péage urbain, toutefois la part des zones pour lesquelles l'accessibilité en transports collectifs est moins bonne que l'accessibilité automobile reste comparable à la part en situation de référence. Un dernier test combine le péage urbain et la taxe carbone. La conclusion globale des tests est qu'une dégradation du coût monétaire de l'automobile, même importante, n'est pas en mesure à elle seule de renverser à l'échelle de l'aire urbaine la concurrence modale.

4) Une analyse de l'attractivité par l'accessibilité : l'exemple du tramway T4

Face à la très forte fréquentation observée à la suite de la mise en service du tramway T4, avec pourtant un rapport entre l'accessibilité automobile et en transports collectifs largement favorables à la voiture sur les zones desservies, les auteurs cherchent à évaluer le coefficient attracteur des transports collectifs dans ces zones, c'est-à-dire la perception du temps de déplacement qui permettrait d'égaliser l'accessibilité pour les deux modes. Ce coefficient est évalué à 25 %, c'est-à-dire qu'il faudrait que le temps passé à bord des transports collectifs soit perçu comme 25 % du temps réel. Les auteurs concluent qu'obtenir de tels résultats au travers d'une amélioration du confort de déplacement semble irréaliste.

S) Plan global de déplacements du pays Tolosan

Maîtrise d'ouvrage : Pays Tolosan

Producteurs de l'étude : Iter et MobiGIS

Date de rendu de l'étude : février 2011

Résumé : Le Pays Tolosan est un territoire à forte tendance résidentielle, confronté à des problématiques d'accès à l'agglomération toulousaine mais aussi de desserte interne. Le Pays a un rôle de fédérateur des acteurs sur le territoire autour de la question de la mobilité. L'objectif du plan global de déplacements était d'analyser le territoire et l'offre de mobilité, afin de mettre en avant ses forces et faiblesses et d'analyser les besoins de déplacements. Pour cela, l'accessibilité à différents pôles urbains et aires de covoiturage du territoire a été cartographiée.

T) Plan local habitat durable de Nancy

Maître d'ouvrage : communauté urbaine du Grand Nancy

Producteur de l'étude : CETE de l'Est

Date de rendu de l'étude : 2012

Résumé : Cette étude vise à apporter une aide à la décision pour la réalisation du PLH en identifiant les parcelles les mieux connectées à pied aux arrêts du futur BHNS et en réalisant des analyses ciblées par secteur pour savoir où développer l'offre de logement en priorité.

U) Transports Orientations Urbanisme Climat Habitat (TOUCH) : accessibilité et utilisation des modes alternatifs à la voiture, quelle indépendance à l'automobile des populations du SCoT Flandre-Dunkerque ?

Maître d'ouvrage : Certu et communauté urbaine de Dunkerque

Producteur de l'étude : CETE Nord-Picardie

Date de rendu de l'étude : avril 2013

Résumé : Cette recherche fait partie d'un projet commun à l'ADEME et à la Région Nord – Pas-de-Calais qui s'intéresse à la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre induites par l'étalement urbain à l'échelle d'une agglomération, en l'occurrence celle de Dunkerque. La recherche menée par le CETE Nord-Picardie porte sur l'accessibilité multimodale des territoires. L'objectif de ce volet est de construire des indicateurs permettant de caractériser des territoires en fonction de l'accessibilité multimodale qu'ils procurent à leurs habitants. Sur le périmètre du SCoT, des indicateurs d'indépendance à l'automobile ont été évalués, suivant le lieu de résidence des individus. L'idée générale est de pouvoir affecter un coefficient d'indépendance automobile « fort », « moyen » ou « faible » par logement pour compléter, par exemple, les critères des démarches Haute Qualité Environnementale (HQE) des logements qui généralement n'intègrent pas la dimension de desserte et d'accessibilité aux aménités urbaines (services, commerces, emplois...). La démarche de recherche se veut pédagogique (pour le citoyen mais aussi pour la collectivité), en affichant les coûts réels des différents modes de transport et en mesurant les économies qui pourraient être faites par les Dunkerquois s'ils optimisaient leurs déplacements en utilisant au mieux l'offre de transport alternative à la voiture.

Annexe B - Liste des outils logiciels ayant fait l'objet d'une analyse

a) **BD Fer**

Développement : Cerema / Direction Territoriale Nord-Picardie

Licence : diffusion à la demande en interne au MEDDE

Système d'exploitation : Windows

Documentation : [66]

Conversion des données d'offre SNCF en un format d'entrée pour Musliw ou pour TransCAD, via une base Access.

b) **Chouette**

Développement sous maîtrise d'ouvrage AFIMB (MEDDE)

Licence : open source

Système d'exploitation : Windows, Linux

<http://www.chouette.mobi>

Chargement, validation et conversion des données d'offre de transport collectif. Architecture client-serveur.

c) **Google Transit Feed Validator**

Licence : open-source

<https://github.com/google/transitfeed/wiki/FeedValidator>

Détection d'erreurs dans les données d'offre de transport collectif au format GTFS.

d) **MapNod**

Développement : IFSTTAR / LVMT

Licence : diffusion à la demande gratuitement

Système d'exploitation : Windows

Maintenance / évolutions : maintenu, TP tous les ans à l'université utilisant l'outil

<http://mapnod.free.fr/>

Calcul d'accessibilité destiné à tous les modes à horaires (train, avion, transports collectifs urbains...) couplé à un SIG

e) **MobiAnalyst**

Développement : MobiGIS

Licence : propriétaire, diffusion depuis 2011

Système d'exploitation : Windows

<http://www.mobianalyst.fr/>

SIG-Transport d'analyses multimodales, développé comme une extension d'ArcGIS,

Module de génération automatique de réseaux multimodaux,

Calculateur d'itinéraire indoor/outdoor monomodal/multimodal,

Calculateur de matrice de temps de parcours et d'isochrone d'accessibilité.

f) **Musliw + reseaux.mbx**

Développement : Cerema / direction territoriale Nord-Picardie depuis 2007

Licence : diffusion à la demande en interne au MEDDE et aux collectivités territoriales

Systèmes d'exploitation : Windows, Linux

Documentation : [67]

Musliw : calcul d'accessibilité multimodal à horaires et calendrier, affectation,

Reseaux.mbx : outil Mapbasic pour la visualisation cartographique sous Mapinfo et le calcul d'accessibilité routière.

g) Open Trip Planner

Développement : groupe projet open-source

Licence : open source, diffusion en 2012

Système d'exploitation : Linux de préférence

<http://opentripplanner.com/>

Outil de calcul d'itinéraire et de représentation d'isochrones sous forme d'une application web, programmé en java, Interrogeable au travers d'une API, Requêtage par lots possible.

h) Surcouche Visum/MapInfo CETE de Lyon

Développement : Cerema / direction territoriale Centre-Est, développement lancé en 2003, arrêté à ce jour

Licence : pas de diffusion

Système d'exploitation : Windows

Outil d'interrogation du calculateur d'itinéraires de Visum, de récupération des résultats dans une base Access et de mise en forme pour une visualisation d'isochrones sous MapInfo.

i) Tempus

Développement sous maîtrise d'ouvrage IFSTTAR/LICIT + directement par l'IFSTTAR/LICIT et le CEREM /direction territoriale Centre-Est lancé en 2012

Licence : open source

Systèmes d'exploitation : Windows, Linux

<http://tempus.ifsttar.fr>

Bibliothèque d'algorithmes de calcul d'itinéraires, programmée en C++, requêtes par lots possibles en Python, Interface graphique d'interrogation et de visualisation des résultats sous forme d'un plugin QGIS, Données d'entrée stockées dans une base PostgreSQL – PostGIS et données de sortie dans une base Spatialite.

j) TransCAD

Développement : Caliper

Licence : commerciale

Système d'exploitation : Windows

<http://www.caliper.com/tcovu.htm>

Outil de modélisation des déplacements couplé à un SIG.

k) Visum

Développement : PTV

Licence : commerciale

Système d'exploitation : Windows

<http://vision-traffic.ptvgroup.com/fr/produits/ptv-visum/>

Outil de modélisation des déplacements couplé à un SIG.

Measuring the multimodal accessibility of regions: an inventory and analysis of practices

The concept of accessibility of regions helps to better understand mobility issues, by assessing the coherence between transport network coverage and how the regions are used. The maps and indicators that result from this are central to studies for planning and evaluating transport projects, making it possible to communicate quantified and visual results.

This publication sheds light on the potential of these analyses of accessibility in the regions, both for the parameters that can be taken into account and for the types of results that can be generated. It provides feedback on the practices and difficulties encountered, as well as notions about the method used to conduct these studies. Accessibility is considered in a multimodal context, i.e. it may concern public transport or individual modes (cars, cycling, walking), and combinations of these.

This publication is intended primarily for those carrying out accessibility studies. It will also be of interest to contracting authorities and all who wish to better understand how these studies are carried out.

Medir la accesibilidad multimodal de los territorios – inventario y análisis de las prácticas

El concepto de accesibilidad de los territorios permite comprender mejor los desafíos de movilidad, evaluando la coherencia entre el servicio de las redes de transporte y los usos de los territorios. Los mapas e indicadores que derivan de ello están en el corazón de los estudios de planificación y de la evaluación de los proyectos de transporte, permitiendo una comunicación sobre resultados cuantificados y visuales.

Esta obra explica las posibilidades que ofrecen estos análisis de accesibilidad de los territorios, ya sea en los parámetros que pueden considerarse o en los tipos de resultados que pueden generarse. Propone un retorno de experiencia sobre las prácticas y las dificultades encontradas, así como elementos de método para realizar estos estudios. La accesibilidad se considera en un contexto multimodal, es decir que puede referirse a los transportes colectivos, los modos individuales (coche, bicicleta, marcha) y sus combinaciones.

Esta obra se dirige principalmente a los productores de estudios de accesibilidad. También es interesante para las entidades adjudicadoras y todos aquellos que deseen comprender mejor el desarrollo de estos estudios.

© 2015 - Cerema

Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement , créé au 1^{er} janvier 2014 par la fusion des 8 CETE, du Certu, du Cetmef et du Sétra.

Le Cerema est un établissement public à caractère administratif (EPA), sous la tutelle conjointe du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie et du ministère du Logement, de l'Égalité des territoires et de la Ruralité. Il a pour mission d'apporter un appui scientifique et technique renforcé, pour élaborer, mettre en œuvre et évaluer les politiques publiques de l'aménagement et du développement durables, auprès de tous les acteurs impliqués (État, collectivités territoriales, acteurs économiques ou associatifs, partenaires scientifiques).

Toute reproduction intégrale ou partielle, faite sans le consentement du Cerema est illicite (loi du 11 mars 1957). Cette reproduction par quelque procédé que ce soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

Coordination – Maquettage : service éditions Cerema – Territoires et ville (B. Daval)

Couverture : Cerema – Territoires et ville ; fond d'illustration : C. Richer

Dépôt légal : juin 2015

ISSN : 2417-9701

ISBN : 978-2-37180-079-3

Éditions du Cerema

Cité des mobilités

25 avenue François Mitterrand

CS 92803

69674 Bron Cedex

Bureau de vente

Cerema / Direction technique Territoires et ville

2 rue Antoine Charial

CS 33927

69426 Lyon Cedex 03 – France

Tél. 04 72 74 59 59 – Fax. 04 72 74 57 80

www.cerema.fr Rubrique « Nos éditions »

La collection « Connaissances » du Cerema

Cette collection présente l'état des connaissances à un moment donné et délivre de l'information sur un sujet, sans pour autant prétendre à l'exhaustivité. Elle offre une mise à jour des savoirs et pratiques professionnelles incluant de nouvelles approches techniques ou méthodologiques. Elle s'adresse à des professionnels souhaitant maintenir et approfondir leurs connaissances sur des domaines techniques en évolution constante. Les éléments présentés peuvent être considérés comme des préconisations, sans avoir le statut de références validées.

Mesurer l'accessibilité multimodale des territoires

État des lieux et analyse des pratiques

Le concept d'accessibilité des territoires permet de mieux comprendre les enjeux de mobilité, en évaluant la cohérence entre la desserte des réseaux de transport et les usages des territoires. Les cartes et indicateurs qui en découlent sont au cœur des études de planification et de l'évaluation des projets de transport, en permettant une communication sur des résultats quantifiés et visuels.

Cet ouvrage vient éclairer les possibilités offertes par ces analyses d'accessibilité des territoires, que ce soit dans les paramètres qui peuvent être pris en compte ou dans les types de résultats qui peuvent être générés. Il propose un retour d'expérience sur les pratiques et les difficultés rencontrées, ainsi que des éléments de méthode pour réaliser ces études. L'accessibilité y est considérée dans un contexte multimodal, c'est-à-dire qu'elle peut concerner les transports collectifs, les modes individuels (voiture, vélo, marche) et leurs combinaisons.

Cet ouvrage s'adresse principalement aux producteurs d'études d'accessibilité. Il intéressera aussi les maîtres d'ouvrage et tous ceux qui souhaitent mieux comprendre le déroulement de ces études..

Sur le même thème

Évaluation a posteriori des transports collectifs en site propre

Note méthodologique - 2015

En téléchargement gratuit sur catalogue.territoires-ville.cerema.fr

L'Open Data en collectivité à la lumière des données de mobilité - 2015

En téléchargement gratuit sur catalogue.territoires-ville.cerema.fr

Mobilités et transports - Outils et méthodes (série de fiches)

Fiche n°4 : Normes et standards de l'information voyageur - Des outils pour favoriser l'interopérabilité 2014

En téléchargement gratuit sur catalogue.territoires-ville.cerema.fr

ISSN : 2417-9701
ISBN : 978-2-37180-079-3

