



HAL
open science

Les fondements théoriques et méthodologiques de la conception des logiciels d'accessibilité dans la recherche française en géographie et aménagement

Jean-Clément Ullès, Laurent Chapelon

► To cite this version:

Jean-Clément Ullès, Laurent Chapelon. Les fondements théoriques et méthodologiques de la conception des logiciels d'accessibilité dans la recherche française en géographie et aménagement. *Géotransports*, 2023, 20, pp.5-24. hal-04434753

HAL Id: hal-04434753

<https://hal.science/hal-04434753v1>

Submitted on 5 Mar 2024

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

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

Les fondements théoriques et méthodologiques de la conception des logiciels d'accessibilité dans la recherche française en géographie et aménagement

The theoretical and methodological foundations of accessibility software design in French geography and spatial planning research

Jean-Clément ULLÈS * & Laurent CHAPELON **, Laboratoire de Géographie et d'Aménagement de Montpellier (LAGAM), Université Paul-Valéry Montpellier 3, Route de Mende 34199 Montpellier cedex 5

Résumé

Cet article analyse les fondements théoriques et méthodologiques de la conception des logiciels d'accessibilité, en tant que programmes informatiques proposant des fonctionnalités d'analyse de l'accessibilité, dans le champ de la géographie des transports et de l'aménagement du territoire en France. Il propose une lecture chronologique qui vise à replacer ces outils dans le contexte scientifique et les potentialités informatiques de leur époque.

Le renouvellement des paradigmes et des méthodes de recherche en géographie et aménagement (utilisation croissante des mathématiques, de la théorie des graphes et de la notion de réseau) s'est accompagné de l'amélioration constante de l'informatique, permettant de produire des logiciels de plus en plus performants, adaptés à l'analyse de l'accessibilité.

L'article montre qu'au cours de la période étudiée, cette production d'outils n'est pas un processus continu mais se trouve en constante interaction avec de nouvelles questions de recherche (sur la performance des transports collectifs, l'intermodalité, la désagrégation spatiale et temporelle des mesures, etc.), et avec des possibilités de collecte, de traitement et d'analyse de données toujours plus importantes. Mais quelle que soit leur période de fonctionnement et leur trajectoire, ces outils s'inscrivent tous dans une approche opérationnelle, au service de l'aménagement du territoire.

Mots-clés

Accessibilité, logiciel, géographie des transports, aménagement du territoire, théorie des graphes, ordinateur, réseaux, SIG.

Abstract

This article analyses the theoretical and methodological foundations of the design of accessibility software, as computer programmes offering accessibility analysis functions, in the field of transport geography and spatial planning in France. It proposes a chronological reading that aims to place these tools in the scientific context and computer potential of their time.

The renewal of research paradigms and methods in geography and land-use planning (increasing use of mathematics, graph theory and the concept of networks) has been accompanied by constant improvements in computing, making it possible to produce ever more powerful software, adapted to the analysis of accessibility.

The article shows that over the period studied, this production of tools was not a continuous process, but was in constant interaction with new research questions (on the performance of public transport, intermodality, the spatial and temporal disaggregation of measurements, etc.), and with ever greater possibilities for collecting, processing and analysing data. But whatever their period of operation and their trajectory, these tools are all part of an operational approach, at the service of spatial planning.

Keywords

Accessibility, software, transport geography, spatial planning, graph theory, computer, networks, GIS.

* Doctorant, jean-clement.ulles@univ-montp3.fr

** Professeur, laurent.chapelon@univ-montp3.fr

INTRODUCTION

Mesurer l'accessibilité d'un lieu, définie comme la plus ou moins grande facilité avec laquelle il peut être atteint (Bavoux & Chapelon, 2014), est une activité ancienne et qui s'est profondément renouvelée dans le champ scientifique de la géographie des transports. Depuis les années 1960, des méthodes fondées sur les mathématiques tentent, parce que l'espace est fondamentalement anisotrope, d'évaluer les différenciations spatiales afin d'orienter l'aménagement du territoire et les politiques de transport (Chapelon, 2016). Dès lors, l'utilisation de l'informatique s'est imposée pour automatiser les calculs complexes des indicateurs d'accessibilité et leur cartographie. Dans un contexte scientifique favorable à l'utilisation de la théorie des graphes en géographie et aménagement de l'espace, des logiciels vont profondément renouveler l'analyse de l'offre de transport. Nous postulons que, depuis 40 ans, l'évaluation de l'accessibilité a considérablement progressé grâce à l'amélioration de l'informatique, permettant de concevoir des logiciels plus performants et de traiter des bases de données plus volumineuses et plus précises. Cela a conduit à une complexification des questions de recherche (sur les temporalités, l'intermodalité, les choix modaux, la qualité de service, etc.) et à un renouvellement des modalités de représentation cartographique (carroyage, isochrone, graphe, anamorphose, etc.). En s'abstenant de nourrir un déterminisme technologique des processus de recherche (Beauguitte, 2016), il paraît indispensable d'analyser les logiciels de mesure de l'accessibilité dans leur caractère ontologique. Ces logiciels ont été conçus en tant que programmes informatiques proposant des fonctionnalités dédiées à l'analyse de l'accessibilité, en fonction du contexte scientifique et des potentialités informatiques de leur époque et ont connu des trajectoires différenciées (mises à jour successives, abandon de projet, intégration de nouveaux formats de fichiers, etc.). La programmation informatique des logiciels et les fonctionnalités d'analyse de l'accessibilité qu'ils proposent seront abordées dans cet article, toutes deux étant intimement liées.

Les logiciels d'accessibilité peuvent être définis comme des programmes informatiques visant à mesurer (avec une grande diversité de méthodes et de représentations) l'accessibilité spatiale d'un ou

plusieurs modes de transport. Ces logiciels sont essentiellement conçus comme des outils d'aide à la décision publique pour l'aménagement du territoire, avec une forte visée opérationnelle et planificatrice (Bailly & Heurgon, 2001). Ils se différencient des programmes d'ingénierie de trafic qui, mis au point entre les années 1950 et 1960 aux États-Unis et importés rapidement en France dans un contexte économique favorable à l'urbanisation et à la motorisation des ménages, visent à prévoir la demande de transport afin de dimensionner convenablement les infrastructures routières et de planifier les futurs investissements (Dupuy, 1999 ; Masson, 1998 ; Banos & *al.*, 2011). Les logiciels d'accessibilité sont également différents des modèles de choix discrets, apparus à partir des années 1970, dans lesquels les comportements des individus sont modélisés et dont le processus de décision est issu de calculs probabilistes, en utilisant un système multi-agents par exemple (Banos & *al.*, 2011 ; CERTU & ADEME, 1998 ; Masson, 1998).

La compréhension de ces logiciels d'accessibilité est appréhendée à travers les publications scientifiques produites (thèses, articles, chapitres d'ouvrages, rapports, modes d'emploi), souvent issus de la recherche académique. L'approche analytique adoptée dans cet article est volontairement techniciste car les outils issus de l'analyse spatiale constituent le support scientifique fondamental des grandes orientations de l'aménagement territorial.

L'article aborde successivement les fondements épistémologiques et la convergence des paradigmes de l'analyse de l'accessibilité (1), l'évolution de la conception des logiciels d'accessibilité depuis les années 1980 (2) et la standardisation récente des données offrant de nouvelles perspectives d'application (3).

I. ANALYSER L'ACCESSIBILITE : FONDEMENTS EPISTEMOLOGIQUES ET CONVERGENCE DES PARADIGMES SCIENTIFIQUES

a. De Peutinger aux années 1930 : la première utilisation des graphes

À l'interface entre le réticulaire et le spatial, il convient en premier lieu de mentionner le cas unique de la Table de Peutinger. Cette célèbre copie du XIII^e siècle d'une carte romaine représente les routes (avec leur longueur) du monde connu de l'époque, de l'Atlantique à l'Inde (Salway, 2005). D'ailleurs, la

représentation graphique adoptée se rapproche moins de la carte que du graphe, connectant successivement les routes à des nœuds (routiers, urbains, etc.), car l'espace est représenté sous la forme d'un long parchemin horizontal (Fig.1).

Ce graphe routier révèle l'origine ancienne du besoin individuel de planification des itinéraires de déplacement mais ne relève pas du champ de l'analyse de l'accessibilité, impliquant une évaluation (topologique, temporelle, économique, etc.) des potentialités de cheminement dans le graphe pour construire des indicateurs spatialisés. En ce qui concerne les cartes d'itinéraires (de Peutinger à Michelin), la constitution d'un graphe qui affiche les différentes routes est une fin en soi, un objet statique qui possède seulement une fonction informative.

L'analyse de l'accessibilité, comme traitée aujourd'hui, se nourrit des fondements de la théorie des graphes et d'une complexification croissante des modalités de son évaluation depuis les années 1960 (des indices de Karl Kansky à l'intégration de la dimension temporelle, économique et multimodale dans le calcul de l'accessibilité). La théorie des graphes, branche des mathématiques dédiée à l'analyse des relations et des dépendances entre les éléments d'un ensemble (Bavoux & Chapelon, 2014), a transmis des outils essentiels aux géographes pour analyser les interactions entre les objets spatiaux. De

nombreuses applications ont vu le jour en lien avec des questions de transport, de centralité, de localisation optimale, etc. Il est donc essentiel d'explorer les relations étroites entre l'analyse de l'accessibilité spatiale et la théorie des graphes dont les applications ne sont d'ailleurs pas exclusives à la géographie car présentes dans toutes les disciplines scientifiques.

La première utilisation d'un graphe dans un contexte mathématique a été réalisée par Euler en 1736 pour résoudre le problème topologique des sept ponts de Königsberg (Bavoux & Chapelon, 2014). Euler montra que le graphe n'a d'intérêt que s'il est « interrogé » pour répondre à un problème : il est à la fois le support et le produit du calcul mathématique pour mieux comprendre les interactions entre objets et produire des indicateurs d'accessibilité. Cependant la publication d'Euler reste isolée et ne suffit pas, à l'époque, à formaliser une véritable théorie des graphes (Beauguitte, 2022). Il faudra attendre les années 1930 pour voir émerger les premiers travaux contemporains sur les graphes. Le premier manuel rédigé par le mathématicien hongrois Dénes König paraît en allemand en 1936. Les premières applications en sociométrie se trouvent dans les travaux de Jacob Moreno, médecin américain d'origine roumaine, dans les années 1930, avec l'utilisation d'indicateurs d'évaluation issus de la

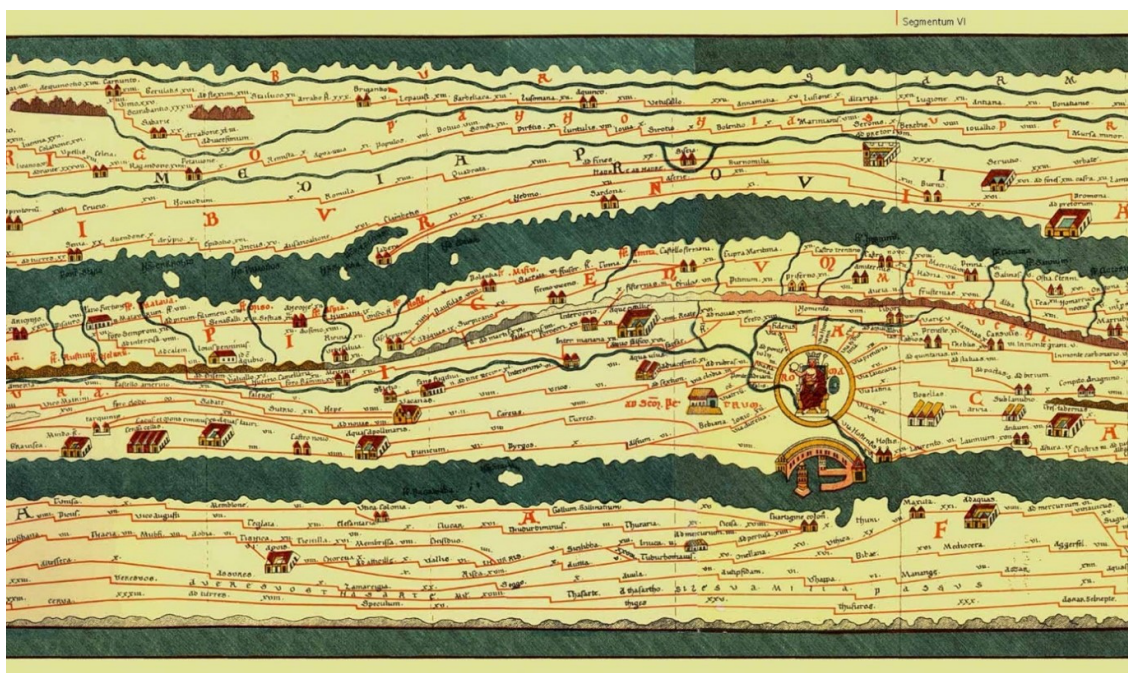


Fig.1 – Reproduction de Konrad Miller en 1887 de la Table de Peutinger, disponible ici : https://www.fh-augsburg.de/~harschi/Chronologia/Lspost03/Tabula/tab_pe06.html (consulté le 05/01/2024)

théorie des graphes (Moreno, 1934 ; Moreno & Jennings, 1938 ; fondation de la revue *Sociometry* en 1937...). Ces premiers travaux ont eu un impact limité dans la recherche scientifique. Le contexte géopolitique d'avant-guerre rend difficile la diffusion du manuel de König et les déséquilibres personnels de Moreno jettent le discrédit sur ses travaux novateurs dans sa discipline (Beauguitte, 2016, 2022).

b. De Claude Berge aux travaux anglo-saxons sur la théorie des graphes et l'analyse de réseaux

Il faudra attendre les travaux du mathématicien français Claude Berge en 1958, et la traduction de son livre en anglais en 1962, pour formaliser les concepts de la théorie des graphes (Berge, 1958). Son ouvrage connaîtra une diffusion très large, au cœur de nouvelles recherches en sciences humaines à cette époque. L'ouvrage est notamment discuté par le mathématicien néerlandais Edsger Dijkstra (1959) dans la formulation de son célèbre algorithme éponyme de calcul des plus courts chemins dans un graphe orienté.

Les travaux de Claude Berge se sont rapidement exportés aux États-Unis et étaient connus du géographe quantitativiste William Garrison de l'Université de Washington, pionnier dans l'analyse de réseaux (Beauguitte, 2022). Sous sa direction, il forma une génération de chercheurs spécialistes de l'analyse réticulaire : Brian Berry, William Bunge, Duane Marble, John Nystuen, Waldo Tobler et Karl Kinsky. Ces chercheurs formalisent les premiers indicateurs d'analyse de réseaux (hiérarchisation des nœuds, ordre et taille du graphe, etc.) et utilisent le vocabulaire de la théorie des graphes (« adjacent point, directed graph, path, degree, component » (Beauguitte, 2022, p.6)). Cette discipline scientifique se formalise dans un contexte de recherche opérationnelle marqué par la Seconde Guerre mondiale et la guerre froide. William Garrison et ses « *space cadets* » (expression désignant les doctorants qu'il forma (Barnes, 2004)) rencontreront les intérêts de l'armée américaine (autour de questions de défense, de logistique et de stratégie militaire) pour traiter des problématiques de recherche nécessitant l'analyse de réseaux (Barnes & Farish, 2006 ; Beauguitte, 2022). Ce lien étroit entre les champs scientifique et militaire était courant à cette époque.

Pour les géographes français, dans les années 1970, le manuel « *Network Analysis in Geography* »

(Haggett & Chorley, 1969) a fortement contribué à diffuser les principes de l'analyse de réseaux par les graphes. L'ouvrage cite également celui de Claude Berge (1958) paru 11 ans plus tôt, signe que ses formalisations mathématiques ont durablement marqué la discipline. Les manuels de géographie quantitative publiés par Peter Haggett seront fondateurs et leur contenu sera abondamment mobilisé par les géographes français de la Nouvelle Géographie (Cuyala, 2014 ; Pumain & Robic, 2002), en particulier « *Locational Analysis in Geography* » (Haggett, 1965). L'ouvrage du psychologue Claude Flament (1965) « *Théorie des graphes et structures sociales* » a également été une référence majeure pour les géographes (Thibault, 1972).

c. L'appropriation de l'analyse de réseaux dans la géographie française depuis les années 1970

La Nouvelle Géographie et la question des réseaux et de l'accessibilité

Le début des années 1970 correspond à la « rupture épistémologique » (Brunet, 1972, p.73) de la Nouvelle Géographie, caractérisée par le « mouvement de scientification de la géographie française » (Pumain & Robic, 2002, p.123). La naissance d'une « Géographie théorique et quantitative » intervient avec 20 ans de retard par rapport aux travaux nord-américains, anglo-saxons et scandinaves. Dans un contexte de rupture avec la géographie classique, des géographes vont se former aux mathématiques et aux méthodes statistiques dans le cadre du renouvellement de leur champ disciplinaire, en particulier dans les études urbaines (Pumain & *al.*, 1983). De nouvelles méthodes statistiques et de modélisation sont appropriées : régression multiple, analyse factorielle, classification ascendante hiérarchique, graphe, etc. (Pumain & Robic, 2002 ; Sanders, 2011).

Le courant de la Nouvelle Géographie se traduit en France par une appropriation des concepts de la théorie des graphes pour l'analyse de réseaux. Les géographes français découvrent la littérature anglo-américaine et se forment, comme l'illustrent les formations soutenues par le CNRS dans les années 1970. Un stage, en 1975 à Avignon, est d'ailleurs entièrement dédié à la théorie des graphes (Cuyala, 2014).

Ce virage quantitativiste est soutenu par l'arrivée des ordinateurs pour la modélisation et la simulation,

facilitant grandement les calculs d'analyse de données (Pumain & *al.*, 1983 ; Beaujeu-Garnier, 1971 ; Hägerstrand, 1967). Claude Raffestin (1971, p.58) résume : « *En matière de moyens, il est évident qu'actuellement la pierre angulaire est constituée par l'ordinateur que le géographe peut utiliser dans trois directions principales : les triages, les cartes et les calculs. L'ordinateur donne la possibilité d'analyser rapidement des séries énormes de données qui peuvent être croisées les unes avec les autres.* ».

L'usage de l'ordinateur est identifié comme permettant au chercheur d'approfondir son travail d'analyse sans devoir arbitrer entre certaines recherches faute d'un investissement trop lourd en temps : « *Sans ordinateur, le géographe est condamné à faire des choix, souvent douloureux, en fonction d'un temps précieux. Dans ce cas, on pourrait définir l'ordinateur comme un multiplicateur de temps.* » (*Ibid.*, p.59). L'analyse d'un très grand nombre de données permet de gagner en précision dans le propos scientifique : « *Grâce à l'ordinateur, la description est enrichie et les jugements purement qualitatifs évités.* ». La production cartographique assistée par ordinateur facilite la représentation d'un grand nombre de données sur de grands espaces, en particulier des anamorphoses (*Ibid.*).

À notre connaissance, les plus anciens travaux français sur l'accessibilité utilisant une approche quantitative ont été réalisés par Odile Andan et Jacqueline Beaujeu-Garnier (1972, 1973), en deux parties, dans leur article *Transports et aires d'influence urbaine*. Les auteurs ont analysé l'accessibilité de 10 métropoles françaises et leurs aires urbaines respectives en considérant l'automobile, le train et le car. Ces travaux n'utilisent pas spécifiquement les graphes pour mesurer l'accessibilité, bien que les cartes de réseaux de transport et de serpents de charge s'en rapprochent graphiquement. Toutefois, les auteurs ont construit des isolignes d'accessibilité représentant des durées de

déplacement (Fig.2), ce qui est une manière de représenter l'accessibilité d'un mode de transport.

Les nombreuses cartes thématiques et de synthèse reflètent le grand volume de données territoriales et de transport utilisées (population et densité, circulation journalière de véhicules, nombre de trains, de cars et leur fréquentation, etc.). La démarche est clairement hypothético-déductive : les auteures font l'hypothèse que les transports et les échanges sont structurants pour définir les aires d'influence urbaine et confrontent leur hypothèse à leurs données et aux territoires. En outre, cet article est d'intérêt patrimonial pour son inscription méthodologique et thématique, ainsi que sa documentation abondante et précise (116 pages, 85 cartes). Notons que Jacqueline Beaujeu-Garnier était au fait des nouvelles méthodes quantitatives développées depuis les années 1950 dans le monde anglo-saxon et du tournant géographique français des années 1970 (Beaujeu-Garnier, 1971 ; Robic & *al.*, 2006).

Dans la même revue, André Thibault (1972) réalisait une première utilisation de la théorie des graphes et présentait au lecteur son intérêt pour analyser l'organisation d'un espace régional à partir des interactions entre ses composantes spatiales (industrie, agriculture, population, etc.).

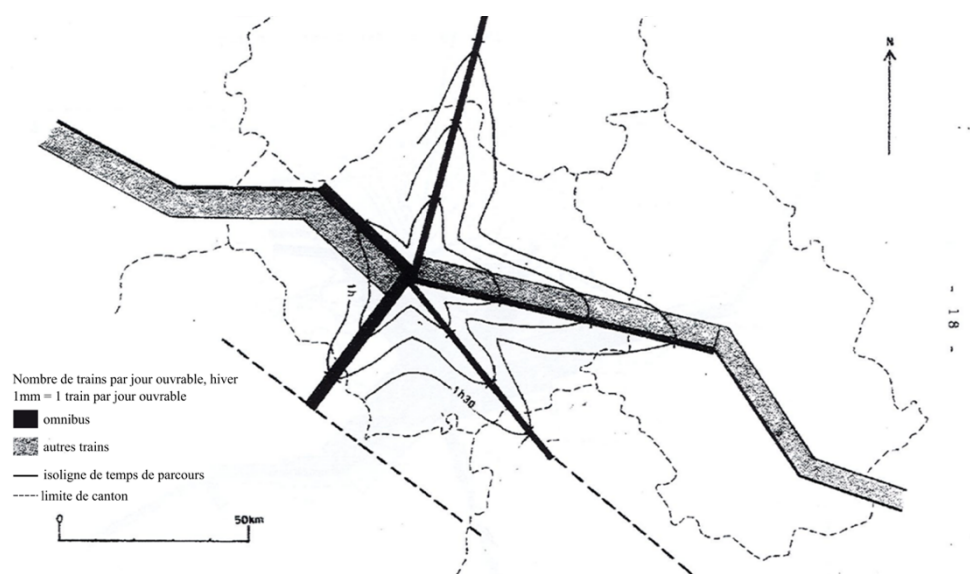


Fig.2 – Isolignes de temps de déplacement
 (Andan & Beaujeu-Garnier, 1972, p.18 du corpus cartographique)

La structuration scientifique de l'analyse de réseaux au cours des années 1980

Les années 1980 correspondent à la décennie où un grand nombre de travaux précurseurs se saisissent de l'analyse des réseaux, au moment où des thèses de doctorat se structurent autour de la géographie théorique et quantitative (Saint-Julien, 1980 ; Pumain, 1980 ; voir Cuyala, 2014). La sociologie, l'économie, la géographie, les sciences politiques et de gestion s'emparent de la notion de « réseau » en percevant un moyen de « renouveler les boîtes à outils tout en procurant une clé de compréhension de la mondialisation et de la post-modernité » car « le réseau permet de représenter le monde avec des points et des flèches. Cette puissance de la raison graphique rend simple la complexité. » (Dupuy & Offner, 2005, p.41). Les graphes et les réseaux occupent une place de premier ordre dans la sémiologie graphique de Jacques Bertin (1967, 1977), au même niveau que les diagrammes et la cartographie. Ces deux ouvrages de Bertin, maintes fois réimprimés et diffusés à l'international – ils connaîtront tous deux une traduction en anglais au début des années 1980 (Palsky, 2012) – ont participé à asseoir la légitimité des graphes et des réseaux parmi les modes de représentation à disposition des géographes français et internationaux.

La Nouvelle Géographie s'est rapidement dotée d'une revue spécialisée fondée par Roger Brunet en 1972, *L'Espace géographique*, en rupture avec les revues classiques de l'époque, telles que les *Annales de Géographie* (Cuyala, 2014). De la même manière, l'exploration des réseaux donne lieu à l'institutionnalisation de supports de réflexion scientifique sur le concept. En 1983, Paul Beaud et Patrice Flichy fondent la revue *Réseaux*, dans le domaine scientifique de la communication. Dans le même temps, un groupe

pluridisciplinaire se constitue, le Groupe Réseaux, précurseur du Groupement de recherche (GDR) CNRS du même nom (Dupuy & Offner, 2005). En 1985, le premier « cahier » du Groupe Réseaux paraît sur la journée d'étude du 6 décembre 1984. Ces cahiers seront publiés jusqu'en 1989 puis la revue *Flux* sera fondée en 1990 dans la continuité. L'engouement pour les réseaux des années 1980 continuera dans la décennie 1990 avec la parution d'ouvrages incontournables (Dupuy, 1986, 1988, 1991...), tandis que Georges Amar posait la question en 1993 « *Qu'est-ce qui n'est pas un réseau ?* ».

Le concept de réseau a ainsi trouvé de nombreuses applications dans le champ de l'analyse de l'accessibilité à partir d'outils mathématiques et informatiques. Dans cette perspective, deux thèses de doctorat réalisées dans les années 1980 ont porté sur le réseau ferroviaire français. D'une part, les travaux de Pascale Dancoisne (1984, 1990) ont donné lieu à l'adaptation des indices d'analyse de réseau de Kansky (*Beta*, *Gamma*, *Êta*, *Théta*, etc.), avec une forte démarche calculatoire issue de l'exploration des graphes (Fig.3).

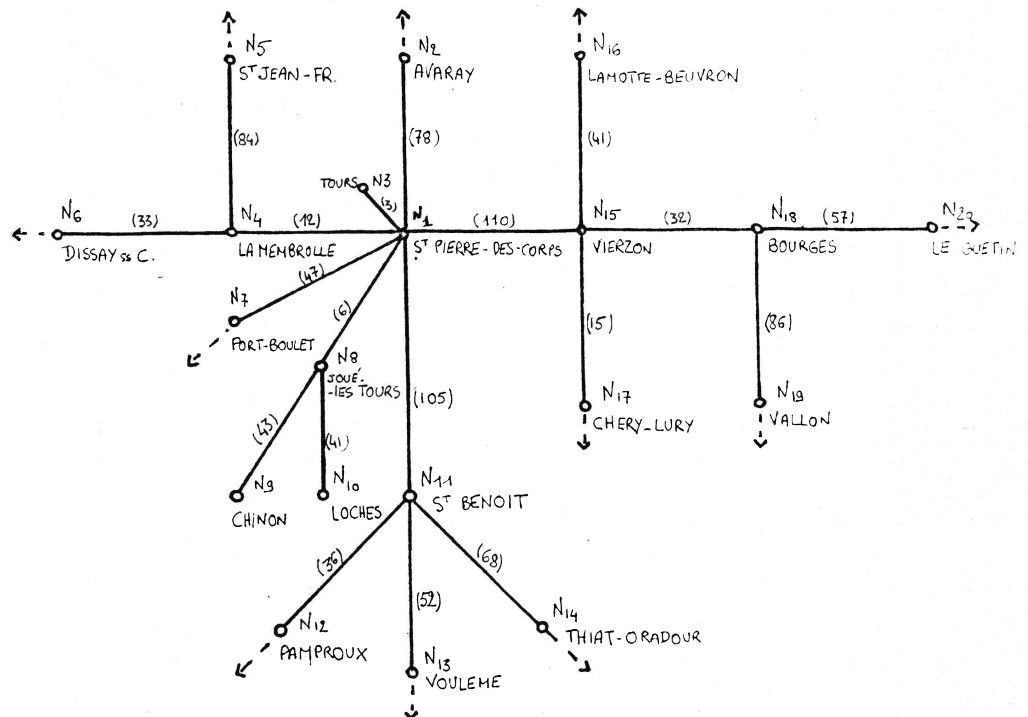


Fig.3 – Graphe du réseau ferré de la région SNCF de Tours
La longueur des liens est indiquée entre parenthèses
(Source : P. Dancoisne, 1984, p.129)

D'autre part, Jean Varlet (1987, 1990) a réalisé une analyse de l'accessibilité ferroviaire fondée sur l'offre de transport de 22 villes-origines vers 53 villes-destinations en fonction de 11 critères d'offre de transport (distances, durées, fréquences, etc.). Pour cela, un travail considérable de collecte et d'analyse de données horaires a été réalisé presque entièrement à la main, tandis que le calcul matriciel et la production des cartes d'accessibilité ont profité d'une automatisation par un programme informatique rudimentaire (TMC-Proto¹ sur micro-ordinateur Apple IIe ou IIc) (Fig.4).

Ces travaux sont précurseurs dans le champ de l'analyse de l'accessibilité à une époque où l'outil informatique n'était pas généralisé et performant, ce qui n'a pas empêché les deux chercheurs de mener des méthodologies quantitatives complexes pour aboutir à la production d'indicateurs synthétiques et spatialisés.

La maturité de la discipline par la formation de nouveaux chercheurs en analyse de réseaux

L'arrivée à des postes clés de ces géographes et ingénieurs spécialistes des méthodes quantitatives a permis la formation de nombreux docteurs spécialistes des réseaux et utilisant volontiers les mathématiques, les statistiques et la théorie des graphes. Par exemple, la modélisation des réseaux de transport par les graphes a été particulièrement soutenue par Philippe Mathis au Centre d'Études Supérieures d'Aménagement (CESA) de Tours en

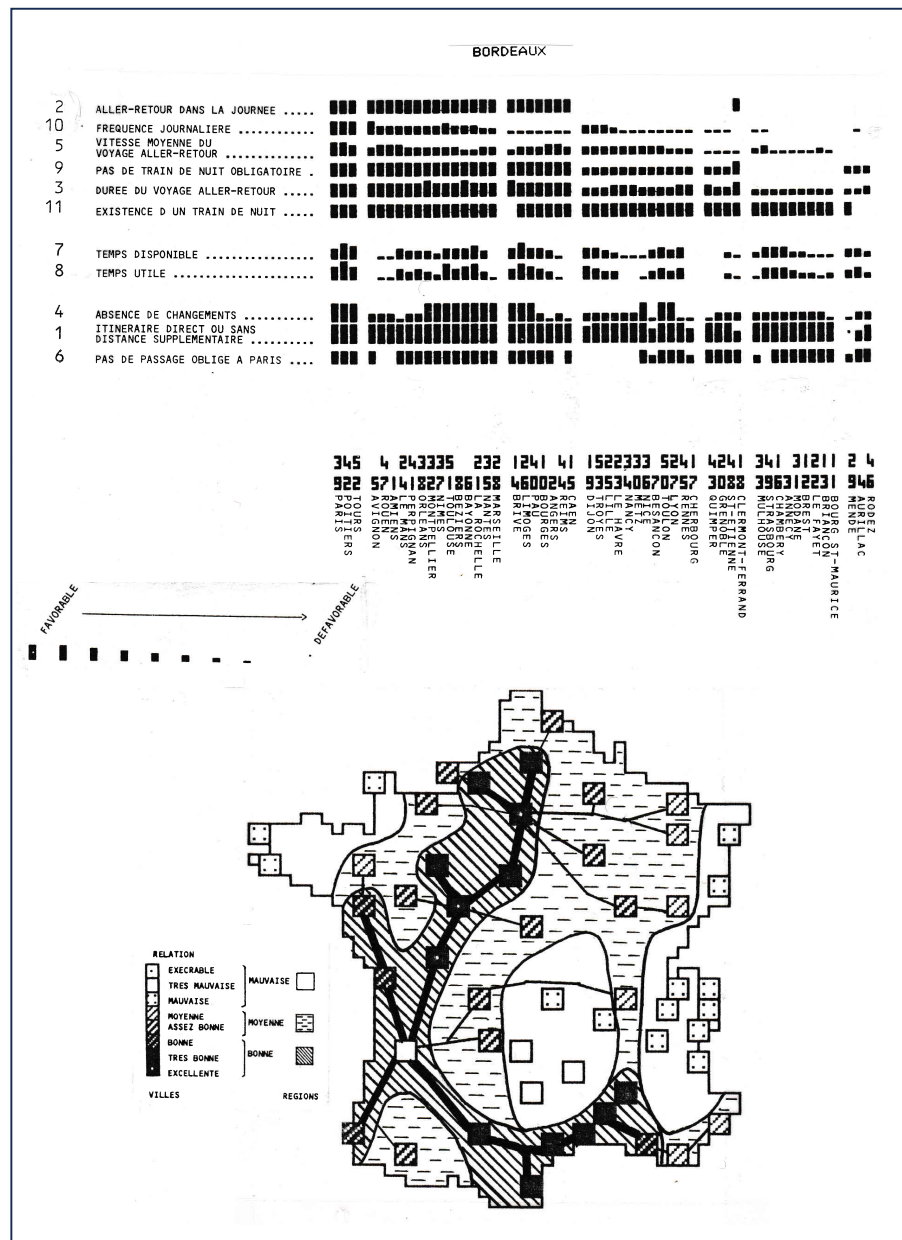


Fig.4 – L'espace de relations ferroviaires de Bordeaux en 1984
Matrice ordonnée et carte réalisées sur TMC-Proto (Source : J.Varlet, 1987, p.91)

formant une génération de docteurs (et futurs chercheurs pour la plupart) en géographie et aménagement durant les décennies 1990 et 2000. Le développement de modèles informatiques issus de la théorie des graphes et appliqués aux transports est un marqueur des thèses et des recherches de cette « École de Tours » (Richer & Palmier, 2012, p.433), bien que les thématiques abordées étaient plus larges (aménagement du territoire, réseaux sociaux, pollution routière, information voyageur...). Parmi eux, deux modèles originaux ont marqué un tournant dans le champ des transports et de l'accessibilité : Map (L'Hostis, 1997) et Nod (Chapelon, 1997). L'analyse

¹ Traitement Matriciel et Cartographique

de réseaux par les graphes a trouvé, dans ce contexte, un axe important de développement et a accru les capacités de modélisation spatiale (Mathis, 2003).

II. L'ÉVOLUTION DE LA CONCEPTION DES LOGICIELS D'ACCESSIBILITÉ DES ANNÉES 1980 A NOS JOURS

a. Les travaux précurseurs

Il n'est pas facile de dater avec précision l'apparition du tout premier programme informatique visant à mesurer et spatialiser l'accessibilité au regard de la littérature disponible aujourd'hui. Nous citerons les principaux, ceux dont nous avons encore la trace, dont les caractéristiques et le fonctionnement ont traversé le temps. Parmi eux, deux approches étaient les plus employées, résultant de questions de recherche différentes : le vecteur et le raster (Bavoux & al., 2005). S'ajoute une troisième approche, portant sur les transformations cartographiques, qui sera également abordée par la suite.

L'approche vectorielle

L'approche visant à analyser et à représenter l'accessibilité territoriale par les vecteurs est, de loin, la plus utilisée car l'association de sommets et d'arcs, fondement de la théorie des graphes, est particulièrement bien adaptée à l'analyse des réseaux de transport. En fonction de l'échelle d'analyse et de la problématique traitée, les sommets peuvent correspondre à des nœuds de réseaux (gares, aéroports, stations, échangeurs, etc.) ou à des localités, comme des communes. Les arcs représentent, quant à eux, les possibilités de déplacement entre des paires de nœuds. L'approche par les graphes permet d'ajouter des informations de natures

diverses aux sommets (population, emploi, pénalité de correspondance, etc.) et aux arcs (longueur, temps de déplacement, sens de circulation, etc.). À partir des informations ajoutées au graphe, l'approche vectorielle permet le calcul de cheminements optimaux entre nœuds, la recherche de localisations optimales d'équipements, etc. (Passegué, 1996, 1997).

Parmi les outils logiciels visant à analyser et à représenter les réseaux par les graphes, deux programmes ont marqué leur génération, RETIS et CRAPO², élaborés dans le cadre de deux thèses de doctorat au cours des années 1980 et 1990. Le logiciel RETIS, développé par la société EURO-DECISION, a été conçu par Nicolas Stathopoulos dans sa thèse, soutenue en 1990, portant sur le programme de restructuration des lignes de bus de la RATP (projet « Autrement Bus »). Dans le cadre de cette restructuration, RETIS était conçu comme un « outil d'aide à la décision [à la conception territoriale des réseaux] » (Stathopoulos, 1990, p.110) visant à analyser la qualité connective des réseaux de bus franciliens (Fig.5).

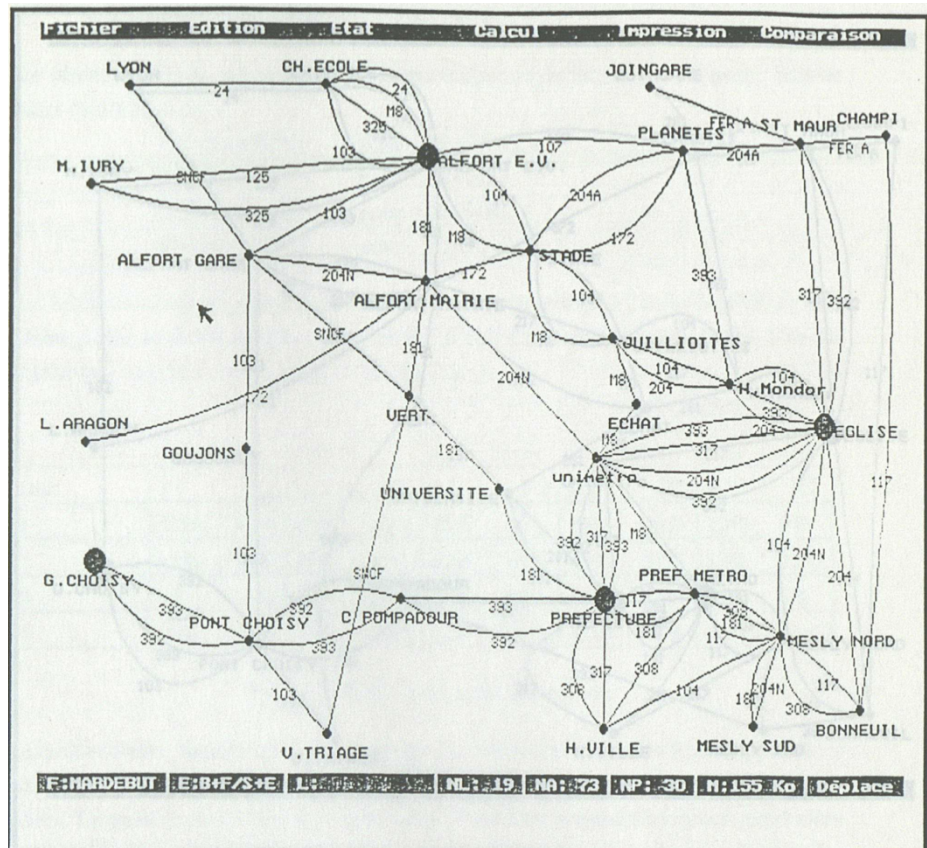


Fig.5 – Exemple d'un réseau dans l'interface graphique de RETIS (Stathopoulos, 1990, p.138)

² Conception des Réseaux Assistée Par Ordinateur

Trois ans plus tard, Jian Jiang (1993) soutient sa thèse au Laboratoire Techniques Territoires et Sociétés (LATTS) à l'université Paris-Est Créteil Val de Marne dans laquelle il développe le logiciel CRAPO. Ce dernier est directement inspiré de RETIS dans sa conception et sa modélisation, mais il apporte une généralisation des calculs d'indicateurs à tous les réseaux de transport alors que RETIS concernait uniquement le réseau de bus d'Île-de-France. Ces deux logiciels offraient la possibilité de calculer des indicateurs topologiques à partir de graphes (connexité, connectivité, nodalité, etc.).

Ces premiers travaux possèdent toutefois des limites, soulignées par Laurent Chapelon (1997), justifiant la création de nouveaux logiciels plus performants. Parmi elles, la limitation de la mémoire de CRAPO et l'impossibilité d'analyser les grilles horaires des transports collectifs ne peuvent pleinement satisfaire l'utilisateur qui se trouve rapidement limité et doit adapter sa méthodologie à la capacité du logiciel (Stransky, 2008).

Enfin, d'autres programmes informatiques d'analyse de l'accessibilité utilisaient une approche raster, avec des types de représentation sans doute moins présents aujourd'hui dans les études d'accessibilité.

L'approche raster

Le contexte de la recherche sur les SIG est marqué par l'intérêt pour le format raster pour représenter les

informations géographiques, et fait notamment l'objet d'une attention particulière dans bon nombre de travaux présentés au colloque Géopoint « *S.I.G. Analyse spatiale et aménagement* » du Groupe Dupont (1994). En effet, le format raster offre des avantages du point de vue tant de la cartographie (représentation spatiale d'une grande lisibilité, choix optimal de la taille de la maille, voir Fig.6) que du traitement des données (gestion des données facilitée, traitement de données spatiales multifformes, etc.) (Brossard & al., 1994 ; Passequé, 1997).

Au cours des années 1990, ces représentations sont communes et font l'objet de nombreux développements, dont Pierre Dumolard (1999) relate l'existence et le fonctionnement. En effet, ces modèles fondés sur l'accessibilité de pixels du territoire ont une forte inscription spatiale, ce qui rend l'outil graphique et démonstratif. Ce rapport privilégié à l'espace se lit dans les écrits des utilisateurs, la représentation raster étant une « surface de friction » (Dumolard, 1999, p.207) ou une « grille de rugosité » (Passequé, 1997, p.358). Le point clé des méthodes d'analyse spatiale en format raster, toutes portant sur le réseau routier, est l'utilisation du logiciel SIG IDRISI, apparu en 1987 à l'université de Clark dans le Massachusetts (Eastman & Collet, 1995), qui intégrait des algorithmes adaptés (Chaire, 1994 ; Passequé, 1997 ; Dumolard, 1999). La simulation de l'accessibilité par les systèmes multi-agents a aussi connu à cette période un développement important fondé sur le

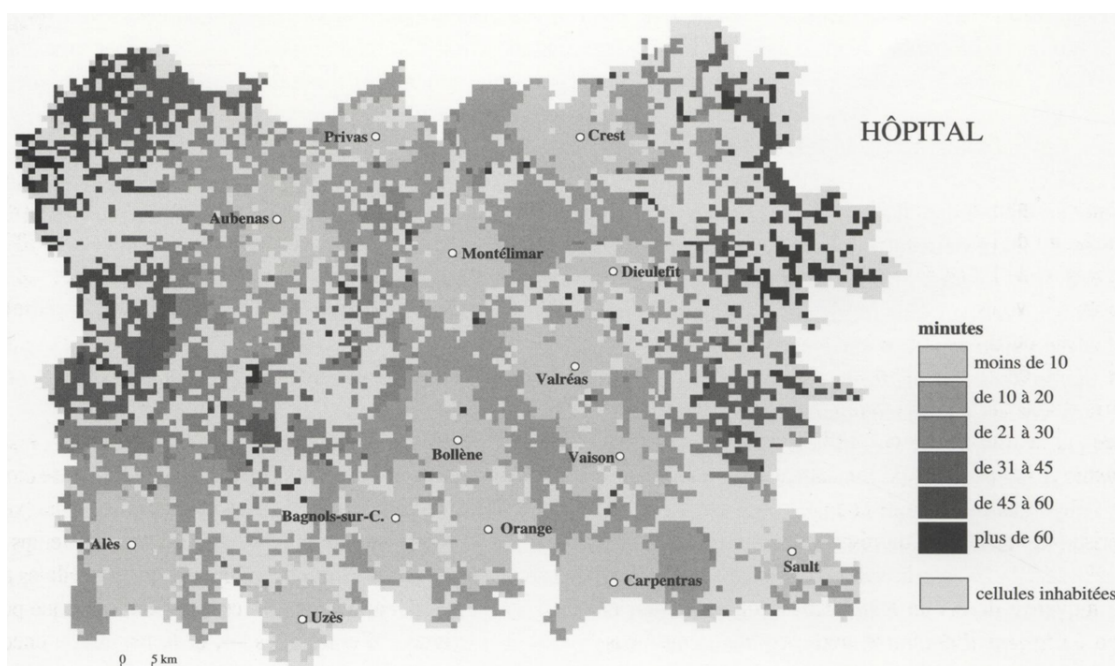


Fig.6 – Exemple d'une carte d'accessibilité à un hôpital (Passequé, 1997, p.363)

raster (Dumolard, 1999). L'utilisation du format raster répond à un choix méthodologique marqué par un paradoxe : les réseaux de transport, sujet principal de l'accessibilité, s'effacent pour laisser place à une caractérisation spatiale (Passegué, 1997). Cependant, l'utilisation de ce format génère un certain nombre de critiques et de défis techniques à résoudre, comme le choix de la taille de la maille adéquate, le changement d'échelle qui nécessite de nouveaux traitements, ou encore la perte d'information due à l'homogénéisation de l'entité spatiale (Brossard & *al.*, 1994). Plus précisément, dans le champ de l'accessibilité, Pierre Dumolard (1999) fait remarquer que le modèle raster considère les réseaux routiers sur une même surface dans laquelle les intersections de routes ne signifient pas systématiquement interconnexion (une route sur un pont au-dessus d'une autre, sans communication entre les deux). Cette approche raster de l'accessibilité a connu une véritable dynamique de recherche au cours des années 1990 et jusqu'à illustrer la première de couverture de l'ouvrage « *La dépendance automobile* » de Gabriel Dupuy (1999) (Fig.7).

Notons enfin que l'approche raster relevait d'une question de recherche plutôt simple visant à mesurer l'accessibilité du réseau routier, le mode automobile s'affranchissant des contraintes horaires et des logiques de lignes des transports collectifs. L'analyse de l'accessibilité par les

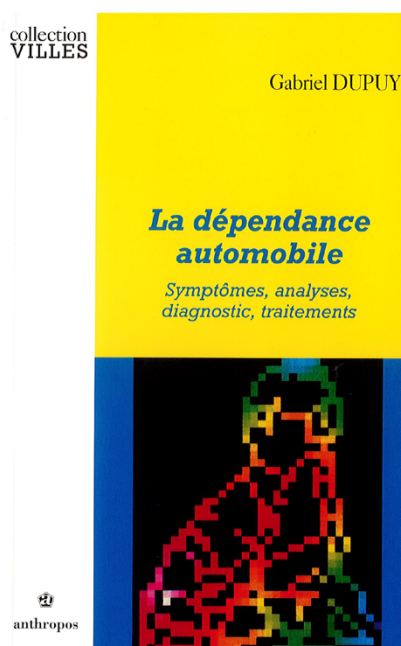
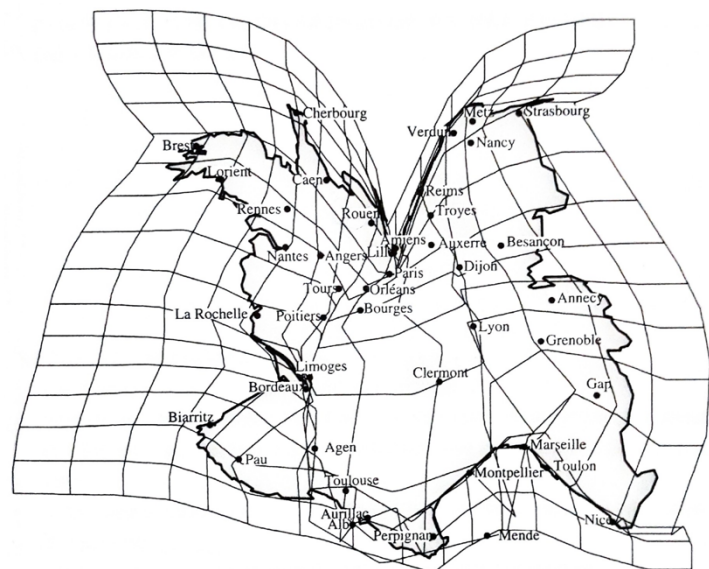


Fig.7 – Illustration de l'accessibilité en format raster par Gabriel Dupuy (1999, première de couverture)

transports collectifs impliquaient des logiciels adaptés et spécifiques où dominait une conception vectorielle des réseaux.

Les transformations cartographiques

Une « troisième voie » aux approches vectorielles et raster correspond aux expérimentations de transformation cartographique pour mesurer l'accessibilité. Cette méthode de représentation cartographique, qui procède à une déformation des entités spatiales, a donné lieu à des développements mathématiques et informatiques complexes, mais avec une diffusion sans doute moins importante dans le champ scientifique en raison de la singularité du rendu graphique. Tout d'abord, les anamorphoses ont connu un développement scientifique important en France sous l'impulsion de Colette Cauvin à partir des travaux initiaux de Waldo Tobler aux États-Unis et qui s'est traduit par des programmes informatiques dédiés (comme le logiciel Darcy qui est maintenu en service par le laboratoire Théma). L'anamorphose est « *un procédé cartographique qui consiste à transposer, à transcrire une variable descriptive des lieux en une variable déformant ces lieux* » (Denain & Langlois, 1998), dont l'application dans le champ des transports et de l'accessibilité a été féconde (Cauvin &



Source : Horaires de train, SNCF, 1993/1994.

Base de données établie par V. OSTER.

Carte établie par C. CAUVIN, I. REYMANN.

Méthode : Analyse multidimensionnelle des proximités et Régression bidimensionnelle (Programme DARCY, écrit par W. Tobler, adaptation A. Serradj, F. Briandet, J. Hirsch).

U.R.A. 902 - C.N.R.S. - LABORATOIRE IMAGE ET VILLE - STRASBOURG.

Fig.8 – Anamorphose des durées de déplacement en train entre les villes françaises (Pumain & Saint-Julien, 2010, p.55 à partir des travaux de Cauvin et Reymann)

Reymond, 1986 ; Cauvin & *al.*, 1989 ; Cauvin & *al.*, 1993 ; Cauvin, 1994 ; voir la figure 8 pour un exemple de représentation sur les durées de déplacement en train).

Un deuxième type de transformation cartographique concerne les « cartes en relief » (aussi appelées « chronocartes ») issues des travaux d'Alain L'Hostis entre 1992 et 1997 et la formalisation du logiciel Map dans sa thèse de doctorat (L'Hostis, 1997 ; L'Hostis & Barbier, 2021). Ces représentations cartographiques de l'espace-temps étaient conçues par déformation de l'espace dans la troisième dimension pour caractériser les différentiels d'accessibilité entre moyens de transport (Fig.9).

Ces deux approches, novatrices dans le traitement cartographique et l'utilisation des moyens informatiques, souffrent néanmoins d'une diffusion moins large que les représentations plus classiques (comme les isochrones par exemple) du fait de la plus grande complexité de leur lecture et de leur interprétation (Denain & Langlois, 1998 ; Moser & *al.*, 2023).

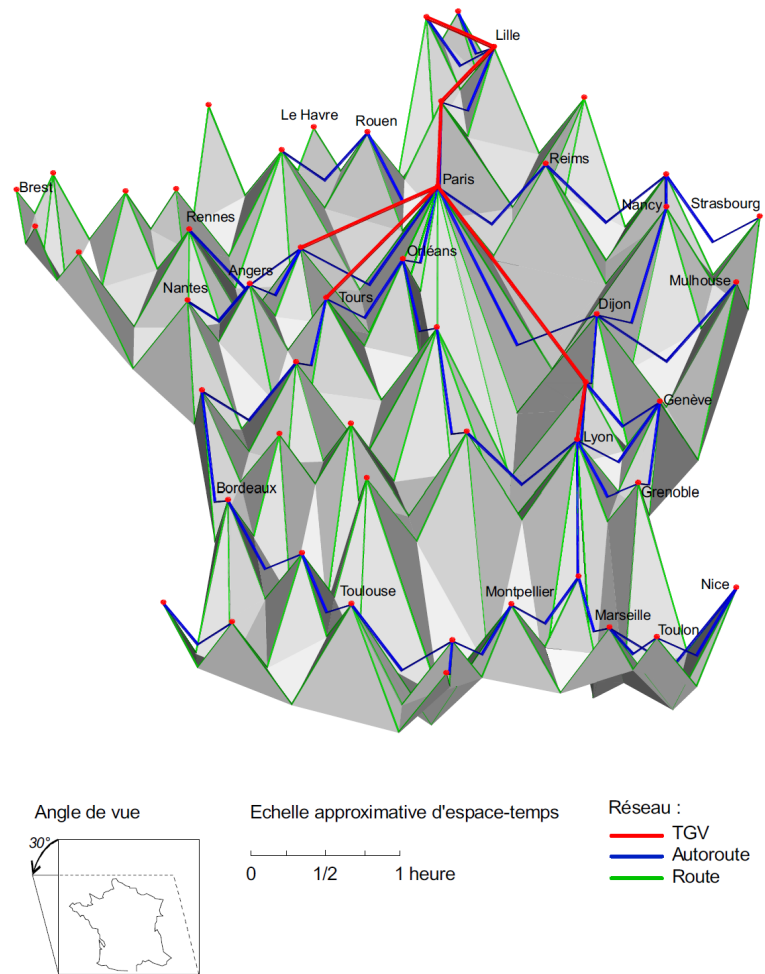


Fig.9 – Carte en relief d'espace-temps du TGV en France (L'Hostis, 1997, p.40)

b. Le tournant des années 2000

MapNod, Musliw, MOSART, Tempus, OpenTripPlanner... de nombreux logiciels d'analyse de l'accessibilité ont émergé au tournant des années 2000 dans un contexte scientifique marqué par de nouvelles questions de recherche sur la performance des transports collectifs, l'intermodalité, la mobilité durable, la désagrégation des mesures dans l'espace et le temps, etc. Certains d'entre eux, élaborés à la fin des années 1990 et au début des années 2000, ont connu une diffusion importante dans le champ scientifique ainsi qu'une longévité remarquable. Nous portons notre attention sur deux d'entre eux, MapNod et Musliw, pour leur trajectoire d'élaboration et leur diffusion dans le champ scientifique et dans celui de l'aide à la décision publique. L'innovation majeure de ces deux logiciels est d'avoir intégré, avec une grande efficacité, la logique horaire dans les calculs d'accessibilité en transports collectifs, permettant des mesures d'accessibilité désagrégées à la minute.

Le logiciel MapNod

La conception du logiciel MapNod au cours des années 1990-2000, sous la direction de Philippe Mathis au CESA, a été un tournant dans la production informatisée d'indicateurs d'accessibilité. Ce logiciel est issu du regroupement en 1998 des logiciels Map et Nod développés au CESA entre 1992 et 1997. Map a été conçu par Alain L'Hostis et Nod par Laurent Chapelon au cours de leurs thèses respectives (Chapelon, 1997 ; L'Hostis, 1997). Le premier permettait de produire des cartes d'accessibilité, dont les « cartes en relief » d'espace-temps, tandis que le second était un logiciel d'évaluation de projets de modification de l'offre de transport pour l'aide à la décision en aménagement basé sur le calcul d'indicateurs d'accessibilité désagrégés dans l'espace et le temps à partir de graphes multimodaux et d'algorithmes issus de la Recherche Opérationnelle (Fig.10, représentation concrète de son utilisation).

Le logiciel Nod développe deux innovations par rapport à CRAPO (Stransky, 2008). La première

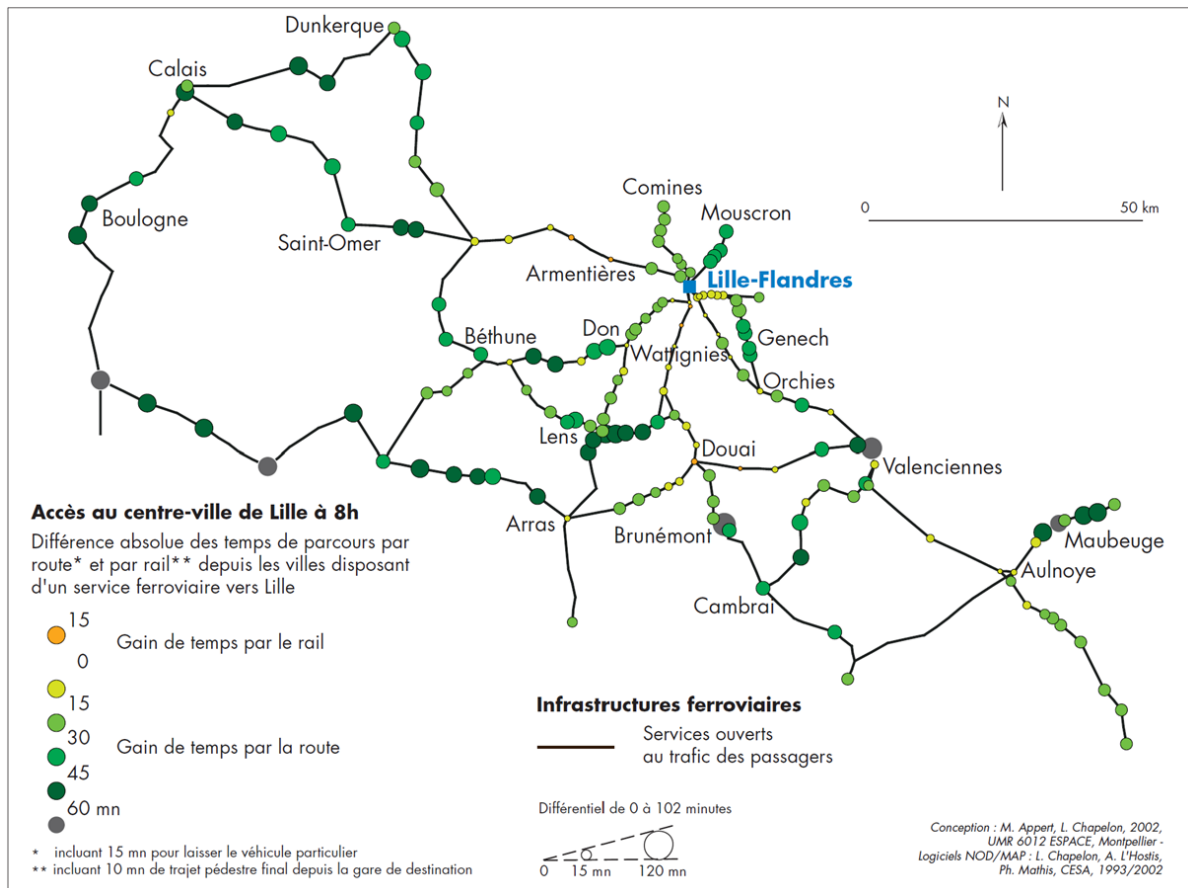


Fig. 10 – Comparaison dans MapNod des temps d'accès rail – route à la gare Lille Flandres à 8h du matin (Appert & Chapelon, 2002, p.56)

nouveauté est la méthode de zoom nodal. Il est possible de représenter des réseaux de transport à une échelle plus fine que l'échelle principale d'étude en zoomant à la demande sur les nœuds correspondants. Ce procédé permet de mieux tenir compte des imbrications spatiales des réseaux, à l'échelle locale ou interurbaine, afin de décrire plus précisément les chaînes multimodales. La seconde innovation tient dans la possibilité d'ajouter des grilles horaires afin de tenir compte du positionnement horaire des services de transports collectifs dans les mesures d'accessibilité. Dès lors, l'algorithme de calcul des plus courts chemins (Floyd) a été modifié en conséquence pour prendre en considération le caractère « temporisé » et multimodal du graphe (Baptiste, 2003). Il combine les durées de parcours des modes individuels et les horaires de circulation des modes collectifs. Notons que le logiciel MATISSE, développé à l'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (INRETS), était également en capacité d'analyser des grilles horaires mais il était programmé pour l'estimation de trafics interrégionaux de longues distances (Chapelon, 1997).

Le logiciel MapNod, en libre accès, s'est largement diffusé dans la littérature scientifique servant de support à de nombreuses études notamment sur le développement de la grande vitesse ferroviaire en France. En plus des thèses de Laurent Chapelon et d'Alain L'Hostis, au moins trois autres docteurs ont eu recours à MapNod : Sandra Bozzani sur l'intermodalité aéro-ferroviaire (2006), Alexis Conesa sur la modélisation des transports collectifs urbains (2010) et Thomas Leysens sur l'urbanisme orienté vers le rail (2011). Ce dernier a développé un outil de mesure de la qualité des correspondances, dénommé PerfNod, qui utilise les résultats des mesures d'accessibilité de MapNod.

Le logiciel Musliw

Le Centre d'études techniques de l'équipement Nord Picardie (CETE, devenu Cerema) a également été précurseur dans l'analyse de l'offre de transport, avec le développement d'outils informatiques dès la fin des années 1990. À partir de 1995, le CETE acquiert le logiciel SIG MapInfo qui ne contenait pas de module d'analyse de graphes. Le CETE a donc développé ses propres algorithmes, en interopérabilité

avec MapInfo : détermination des chemins optimaux (algorithme de Dijkstra), construction de la topologie des nœuds, génération du graphe, calculs d'accessibilité et dessin des isochrones. Mais une limite du logiciel est apparue lors du développement d'un algorithme de calcul d'accessibilité basé sur les horaires des transports collectifs : des temps de calcul trop importants. Face à cette limite et devant la nécessité de faire évoluer les fonctionnalités, tant au niveau du langage informatique que de la complexité des algorithmes, le logiciel Musliw a été diffusé à partir de 2010 (Palmier, 2010). Un atout important de celui-ci par rapport à MapNod est son caractère plus flexible, grâce à son interopérabilité avec les logiciels SIG MapInfo et TransCAD, avant de connaître d'autres améliorations ultérieures (intégration à QGIS, prise en charge du format de fichiers GTFS, etc.).

Un exemple d'utilisation de Musliw a été présenté par Cyprien Richer et Patrick Palmier (2012) afin de mesurer l'accessibilité en transports en commun aux

pôles d'excellence de Lille Métropole. La figure 11 permet de constater que le logiciel est suffisamment performant pour intégrer un réseau viaire très dense ainsi que toutes les lignes de transports collectifs avec leurs horaires (35 025 nœuds, 113 845 arcs et 451 729 services horaires).

Le logiciel Musliw a ensuite été adapté à partir de 2014 en plugin intégré au logiciel SIG QGIS³, sous le nom de « Networks ». Les fonctionnalités ont également été traduites en anglais signifiant que les auteurs souhaitent renforcer la portée internationale de leur production.

L'analyse de l'accessibilité au service de la recherche opérationnelle

L'analyse de l'accessibilité s'est construite dans la recherche académique internationale depuis les années 1960 afin d'élaborer des méthodes scientifiques d'évaluation. Les indicateurs produits et les logiciels conçus pour faciliter leur calcul ont immédiatement trouvé une application opérationnelle

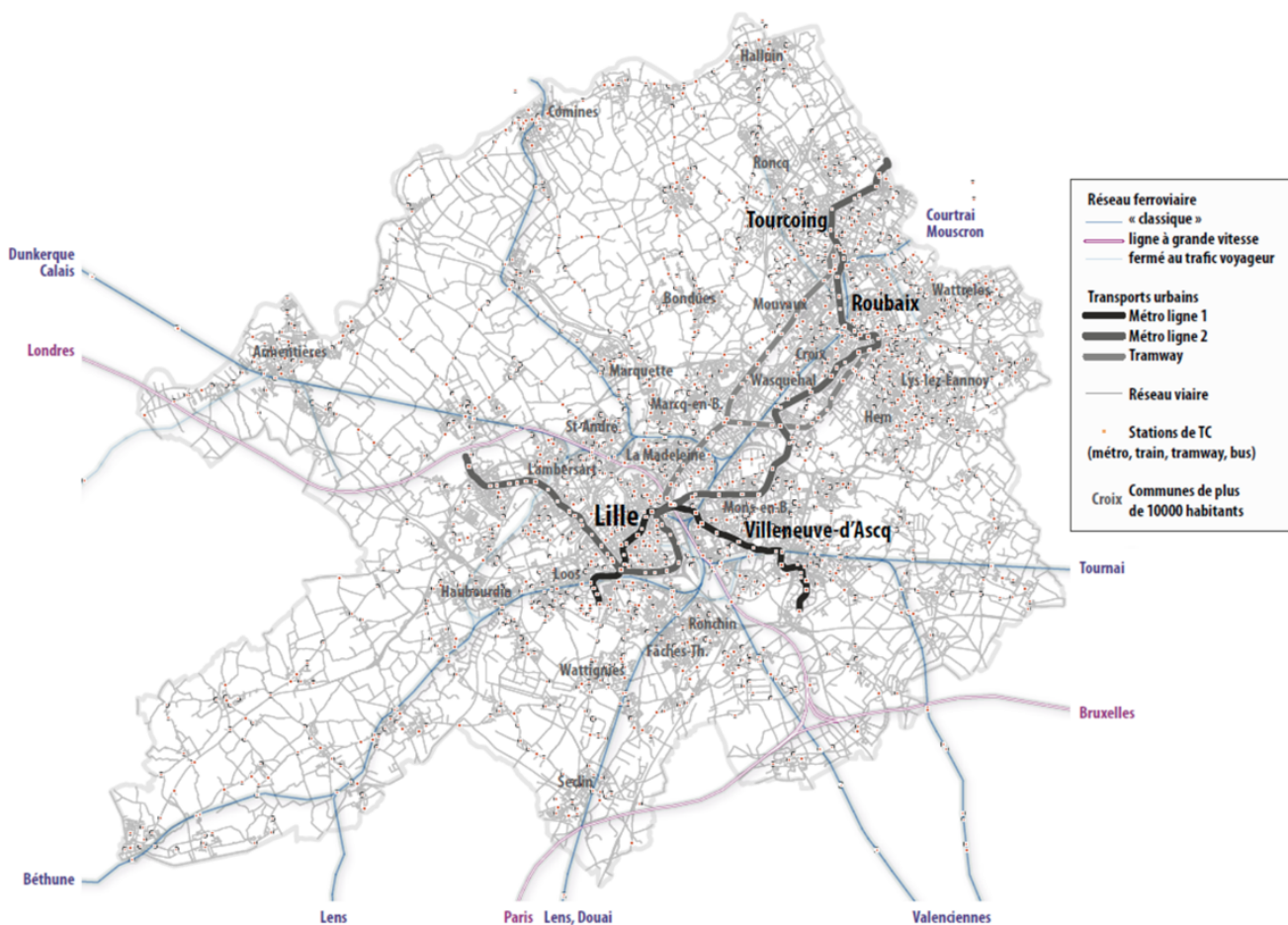


Fig.11 – Visualisation des réseaux de la métropole de Lille dans Musliw (Richer & Palmier, 2012, p.41)

³ <https://plugins.qgis.org/plugins/networks/> (consulté le 05/01/2024)

pour orienter l'action publique. Les nombreux travaux français dont il a été question jusqu'ici permettent de s'en convaincre. Les indicateurs d'accessibilité ont pu être mis en œuvre dans des contextes opérationnels variés (exemple du bilan LOTI de la LGV Sud Europe Atlantique (LISEA, 2018)) ou développés dans le cadre prospectif de la DATAR⁴ (Bonnafeous & al., 1993). MapNod et Musliw ont participé à la conception d'indicateurs pour des rapports de recherche (Appert & Chapelon, 2002 ; Mathon & Palmier, 2012 ; Rozenblat & al., 2004, ...) ou pour éclairer l'action publique (Chapelon & al., 2004 ; DREAL Hauts-de-France, 2020...). Ces deux logiciels ont connu une utilisation conjointe dans le programme de recherche « *Contactability* » pour aboutir à la production des indicateurs d'accessibilité (L'Hostis, 2012 ; L'Hostis & Leysens, 2012).

c. Synthèse : les cadres de production des logiciels d'accessibilité

Depuis la création des premiers logiciels visant à analyser l'accessibilité spatiale, leurs modalités de production et de gouvernance se sont inscrites dans différents cadres (Tab.1), avec une forte structuration de la recherche académique. Les thèses de doctorat et les projets de recherche sont nombreux témoignant de l'investissement important que la production de logiciels requiert sur un temps long.

Le récent projet OpenTripPlanner a la particularité d'être avant tout un logiciel destiné initialement au *Mobility as a Service* (MaaS), mais qui facilite également la production d'indicateurs d'accessibilité multimodale (plus courts chemins, isochrones, résultats désagrégés dans l'espace et le temps, etc.). OpenTripPlanner est un logiciel libre développé en langage de programmation Java à partir de 2009 sous l'impulsion de TriMet (autorité organisatrice de transport de l'Oregon aux États-Unis) permettant de réaliser des calculs d'itinéraires multimodaux⁵. OpenTripPlanner suscite aujourd'hui un fort engouement en raison de son utilisation, en France et à

l'international, dans le secteur en pleine croissance des mobilités servicielles. Des développements réguliers du logiciel, dont le code est libre de droit et d'accès⁶, sont réalisés en particulier par des exploitants de transport (Entur en Norvège, Skånetrafiken en Suède, etc.) et des autorités organisatrices de transport (HSL en Finlande, TriMet aux États-Unis, etc.).

Notons enfin le nombre important de logiciels développés par le laboratoire ThéMA⁷, librement accessibles, portant notamment sur la production des anamorphoses (Darcy, IsoDistAngle) et le calcul de plus courts chemins dans des réseaux multimodaux (MODAccess).

III. L'ENJEU DE LA STANDARDISATION ET DE L'INTEROPERABILITE DES OUTILS

a. L'intégration des logiciels d'accessibilité aux SIG

L'intégration des logiciels d'accessibilité à des SIG déjà existants a toujours été une question ouverte lors de leur développement. En effet, les SIG généraux offrent des fonctionnalités favorables à l'analyse de l'information géographique, notamment sur les transports (Ducruet & Beauguitte, 2014 ; Miller, 1999), permettant de concentrer la programmation sur les algorithmes d'accessibilité.

D'une part, nous avons constaté avec le logiciel IDRISI que les SIG ont, dès leur origine, intégré des modules d'analyse de l'accessibilité des réseaux de transport. Jiang (1993) cite aussi le cas du module PC

Cadre de production	Logiciels
Thèse de doctorat	RETIS (avec l'entreprise EURO-DECISION, à destination de la RATP), CRAPO, Map, Nod
Expertise scientifique et technique pour les collectivités territoriales (Cerema)	Musliw (et plugin Networks de QGIS), Tempus Access (plugin QGIS de Tempus)
Recherche en laboratoire	MOSART (financement PREDIT et ANR « Ville Durable », Laboratoire d'Économie des Transports (Bonnafeous et al., 2013)), logiciels du laboratoire ThéMA (Darcy, IsoDistAngle, MODAccess, etc.)
Partenariat public-privé	Tempus (Isttar - Oslandia, précédé de plusieurs thèses de doctorat au Laboratoire Ingénierie Circulation Transports (LICIT) (Buisson et al., 2019))
Collaboration publique et privée internationale	OpenTripPlanner

Tab.1 – Le cadre de production des logiciels d'accessibilité depuis les années 1980

⁴ Délégation interministérielle à l'aménagement du territoire et à l'attractivité régionale

⁵ <https://docs.opentripplanner.org/en/v2.4.0/History/> (consulté le 05/01/2024)

⁶ <https://github.com/opentripplanner/OpenTripPlanner> (consulté le 05/01/2024)

⁷ <https://thema.univ-fcomte.fr/logiciels/analyse-spatiale> (consulté le 05/01/2024)

NETWORK de ARC/INFO (SIG commercial développé par Esri⁸). Enfin, les SIG actuels sont équipés de fonctionnalités d'analyses topologiques de base. Le module le plus connu est probablement Network Analyst d'ArcGIS mais des développements similaires ont été effectués dans MapInfo et QGIS.

D'autre part, la construction d'un logiciel d'accessibilité intégré à un SIG peut aussi être problématique en raison de la dépendance à un environnement numérique contraint et de sa possible inadéquation au projet souhaité, par exemple lorsque Musliw s'est autonomisé par rapport à MapInfo, ce qui n'a pas empêché son intégration depuis 2014 en plugin QGIS. Quant à MapNod, il s'est développé en autonomie et a construit son propre SIG.

Enfin, sans être pour autant affilié directement à un SIG existant, un logiciel peut entretenir une interopérabilité. L'avantage est de pouvoir construire librement le logiciel voulu tout en profitant des outils performants d'un SIG le cas échéant. C'était du moins prévu pour le projet Tempus, développé au cours des années 2010 par Oslandia et l'fsttar⁹ et qui s'appuyait sur des thèses de doctorat préparées au LICIT (Buisson & al., 2019). Le logiciel *open source* devait être porté sur plusieurs plateformes, à la manière d'un logiciel et d'un plugin QGIS¹⁰. Le projet Tempus, dont la dernière version a été publiée en 2018¹¹, n'est plus actif aujourd'hui mais s'est dernièrement concrétisé par un plugin QGIS, Tempus Access, repris en main et développé par le Cerema, en interopérabilité avec le plugin Networks (contenant Musliw) de ce même producteur¹². Plus récemment, le logiciel OpenTripPlanner est interopérable avec QGIS et R au moyen respectivement d'un plugin et d'une bibliothèque (Morgan & al., 2019).

b. La standardisation des données d'entrée et de sortie : un enjeu majeur

Sans standardisation, des opérations de collecte et de traitement chronophages

La conception de logiciels dédiés à l'analyse de l'accessibilité multimodale a permis de lever de nombreux verrous méthodologiques pour mobiliser de nouvelles données et répondre à certaines

problématiques de recherche sur la performance des transports collectifs. Cependant, elle impliquait une collecte des données au préalable et un traitement des résultats *a posteriori* souvent longs et complexes. C'était au moins le cas pour MapNod et Musliw.

Un exemple éloquent du temps considérable qu'exigeait la collecte des données se trouve dans la thèse de Sandra Bozzani (2006) sur l'intermodalité aéro-ferroviaire. La collecte des données aériennes et ferroviaires a été réalisée à partir des informations délivrées par les agences de voyage Thomas Cook (un guide des horaires papier sur le ferroviaire) et Amadeus (sur un site internet pour l'aérien). Les informations de l'offre de transport ont ensuite été rangées dans plusieurs tableurs afin d'analyser l'intermodalité dans MapNod. Ainsi, la seule collecte des données a duré 5 mois, en ayant notamment recours à un logiciel (appelé *Automate 5*) d'extraction automatique des données horaires d'un site internet vers un tableur. L'Hostis et Leysens (2012) citent également le logiciel Shaddock permettant de collecter et de formater les données ferroviaires du site internet de la Deutsche Bahn vers un tableur (cette méthode a été employée par Alexis Conesa (2010) dans sa thèse de doctorat), pointant que cela « demande des compétences relativement poussées en informatique et en programmation » (*ibid.*, p.58). Cet exemple met en lumière que la collecte et le traitement des données pour un sujet complexe représentaient des verrous méthodologiques importants en raison du temps nécessaire et de la technicité requise.

Cyprien Richer et Patrick Palmier (2012), dans leur étude sur l'accessibilité en transports collectifs de cinq pôles d'excellence de Lille Métropole, ont utilisé le logiciel Musliw pour produire leurs résultats. Ainsi, le calcul des 60 simulations (une simulation par minute) renvoie un fichier résultat d'environ 650 Mo (correspondant à 5 millions d'enregistrements) de données pour chaque pôle. Ainsi, plus de 3 Go de données ont dû ensuite être traités pour aboutir aux indicateurs, ce qui n'est pas négligeable au regard du nombre de simulations réalisées.

Dans un ouvrage méthodologique sur la modélisation et l'analyse de l'accessibilité, Alain

⁸ <https://www.esri.com/fr-fr/what-is-gis/history-of-gis> (consulté le 05/01/2024)

⁹ <https://lesrencontres.decryptageo.fr/la-collaboration-au-service-du-transport-tempus/> (consulté le 05/01/2024)

¹⁰ <https://oslandia.com/2014/12/18/new-version-of-tempus-a-framework-for-multimodal-route-planning/> (consulté le 05/01/2024)

¹¹ <https://github.com/Universite-Gustave-Eiffel/Tempus/releases> (consulté le 05/01/2024)

¹² https://gitlab.com/tempus-projects/tempus_access_qgis/ (consulté le 05/01/2024)

L'Hostis et Thomas Leysens (2012, p.57) résumant la problématique de collecte des données : « Ces calculs demandent à la fois beaucoup de temps, des compétences précises et complémentaires ainsi que des programmes spécifiques afin de mener à bien les différentes étapes du processus de modélisation ». Les deux auteurs prennent un exemple pour la modélisation de transports ferroviaires et aériens. L'activité est qualifiée de « chronophage » (*ibid.*, p.57) car il faut construire les graphes et intégrer toutes les informations sur les horaires. Enfin, la mise en forme des données et leur exploitation nécessitent la maîtrise d'un logiciel de gestion de bases de données de type « Access, MySQL et son interface PhpMyAdmin » (*ibid.*, p.58).

Ces exemples montrent que le problème de l'accès aux données et de leur standardisation dans un format informatique lisible est saillante. Or, ce n'est que très récemment que sont apparus des formats internationaux standardisés de données (données vectorielles, OpenStreetMap, GTFS...) interopérables avec des logiciels dédiés à l'étude de l'accessibilité.

De la non compatibilité à l'interopérabilité des logiciels

La succession de générations de logiciels s'est accompagnée d'un soin apporté par les concepteurs à l'interopérabilité que pouvait entretenir leurs logiciels avec certains formats de données et avec d'autres logiciels standards de leur époque. Les premiers logiciels conçus (RETIS, CRAPO, Map, Nod) n'offraient pas de compatibilité avec d'autres SIG. Ce n'est pas le cas de Musliw qui, dès le début, s'est déployé en interopérabilité avec les SIG MapInfo et TransCAD puis QGIS (plugin Networks). Ensuite, tous les logiciels post-années 2010 (MOSART, Tempus, Tempus Access, MODAccess, OpenTripPlanner)

intégraient des formats de fichiers standardisés communs aux logiciels SIG ou de transport (Tab.2).

La standardisation des données de l'offre de transports en commun : le GTFS

Le deuxième processus de standardisation, probablement le plus important, concerne les données de l'offre théorique des transports collectifs. L'élaboration et l'établissement d'un format de données identique pour toutes les autorités organisatrices est une étape cruciale permettant d'uniformiser les informations. Ainsi, le *General Transit Feed Specification* (GTFS) s'est imposé comme le format utilisé à l'échelle mondiale. Bibiana McHugh (2013), co-fondatrice du format GTFS, retrace l'invention de ce format de données, les enjeux et la trajectoire historique de son adoption à l'échelle mondiale.

Apparu en 2005, le GTFS est le fruit d'un partenariat et d'une réflexion commune entre l'agence TriMet et les services de Google. En effet, un besoin réciproque a animé cette démarche. D'une part, TriMet possédait les données de l'offre théorique des transports collectifs et souhaitait les publier pour enrichir les moteurs de recherche d'itinéraires. D'autre part, le moteur d'itinéraires Google était utilisé pour les déplacements en voiture mais aucune alternative en transports en commun n'était possible. De ce fait, un format type a été défini afin d'intégrer l'offre théorique dans le calculateur d'itinéraires de Google. Le format s'est rapidement répandu, d'abord aux États-Unis puis au Japon et dans le reste du monde, permettant aux autorités organisatrices de diffuser leur offre théorique. Le GTFS est pensé dès son origine dans un format léger, sous la forme d'un csv, volontairement pour que tout un chacun puisse se

saisir des données facilement, les utiliser et les modifier sans l'aide d'un programme tiers. Les bases de données GTFS prennent aujourd'hui la forme d'un dossier compressé (.zip) dans lequel toutes les informations sont intégrées dans des fichiers en format texte (.txt).

La diffusion du GTFS, en tant que format de fichier normalisé, a permis à de nombreuses applications informatiques de se développer en intégrant l'offre de transport public. Le premier à en profiter a été Google *via* son moteur de recherche d'itinéraires, mais pas seulement puisque le

Logiciels	Interopérabilité
MOSART	NAVTEQ, VISUM, données vectorielles (INSEE, localisations, IGN, Corine Land Cover...), PostGIS
Musliw	MapInfo, TransCAD, fichier texte
Networks (adaptation QGIS de Musliw)	Données vectorielles, GTFS, fichier texte
Tempus	GTFS, OpenStreetMap, QGIS, NAVTEQ, TomTom, données vectorielles, PostGIS
Tempus Access (adaptation QGIS de Tempus)	Données vectorielles, GTFS
MODAccess	Données vectorielles, fichier texte, GTFS
OpenTripPlanner	GTFS, OpenStreetMap, QGIS, R

Tab.2 – Les formes d'interopérabilité informatique des logiciels d'accessibilité

GTFS étant un format aisément manipulable, des développeurs privés ont aussi créé leurs propres applications pour la mobilité servicielle.

Le format GTFS s'est imposé du fait de son adoption par Google afin de référencer les déplacements en transports en commun, ce qui ne manque pas d'interroger la capacité d'un acteur dominant du numérique à imposer une norme internationale. Plusieurs dispositions ont été prises pour limiter la marque de Google dans ce format. Tout d'abord, le GTFS a changé de nom, de *Google Transit Feed Specification* à *General Transit Feed Specification*. Ensuite, dès 2006, TriMet dépose le format GTFS en licence Creative Commons.

La prise en compte du format GTFS en tant que norme des données des transports publics dans les logiciels d'accessibilité a été un tournant. Son intégration dans ces logiciels et les SIG permet d'afficher les réseaux (les lignes et les arrêts de transport) et de connaître l'offre exhaustive (jours et horaires de circulation) sans devoir intégrer les données manuellement comme dans MapNod et Musliw (dans sa version originelle). La première version de Musliw, diffusée à partir de 2010, n'intégrait pas le GTFS alors que le plugin QGIS Networks permet aujourd'hui la lecture de ces nouvelles données de mobilité, remplaçant les séances chronophages de préparation des données. Enfin, dès l'origine du projet Tempus, le GTFS est indiqué comme source de données utilisables tandis qu'il est compatible avec MODAccess et indispensable pour OpenTripPlanner.

CONCLUSION

Cet article a été l'occasion de revenir sur le binôme paradigme-technologie au service de l'analyse de l'accessibilité territoriale, l'un étant indissociable de l'autre dans la conception des logiciels.

D'une part, l'étude de l'accessibilité s'est inscrite dans une profonde mutation de la géographie française et internationale : contexte scientifique favorable à l'utilisation de nouvelles techniques issues des mathématiques, ouverture à de nouvelles questions de recherche impliquant des approches plus complexes sous l'impulsion notamment de la Time-Geography (Hägerstrand, 1970), soutien à la diffusion des avancées scientifiques dans la recherche académique, formation de générations de docteurs et chercheurs spécialistes, financement des projets de

recherche, etc.

D'autre part, le volet technologique a joué un rôle fondamental dans l'élaboration de ces outils, à travers l'amélioration de la capacité de calcul des ordinateurs et la standardisation progressive des formats de données.

Finalement, l'élaboration des logiciels s'est constamment nourrie de ces deux approches, elles-mêmes en interaction : une nouvelle question de recherche innovante implique de nouveaux outils pour la traiter, et l'outil permet d'imaginer de nouvelles problématiques pour continuer d'approfondir la connaissance d'un phénomène spatial.

L'analyse de l'accessibilité n'est pas un processus continu dans le champ scientifique, mais elle s'est puissamment renouvelée au gré des nouveaux questionnements et des logiciels conçus pour y répondre. Certains d'entre eux ont eu une longévité exceptionnelle (et continuent d'être utilisés aujourd'hui) mais tous s'inscrivent dans une forte démarche opérationnelle, ancrée dans l'aménagement du territoire.

BIBLIOGRAPHIE

- Amar G., 1993, Qu'est-ce qui n'est pas un réseau ?, *Flux*, n°13, pp.56-58.
- Andan O. & Beaujeu-Garnier J., 1972, Transports et aires d'influence urbaine (1^{ère} partie), *Cahiers du centre de recherches - Analyse de l'Espace*, n°4 et 4 bis, pp.1-62.
- Andan O. & Beaujeu-Garnier J., 1973, Transports et aires d'influence urbaine (2^{ème} partie), *Cahiers du centre de recherches - Analyse de l'Espace*, n°1 et 1 bis, pp.1-53.
- Appert M. & Chapelon L., 2002, *Planification des transports régionaux en Languedoc-Roussillon et Nord-Pas-de-Calais : Évaluation de la concurrence rail-route*, UMR ESPACE, 83p.
- Bailly J.-P. & Heurgon É., 2001, *Nouveaux rythmes urbains : Quels transports ?*, Éditions de l'Aube, 221 p.
- Banos A., Boffet-Mas A., Chardonnel S., Lang C., Marilleau N. & Thévenin T., 2011, MIRO : des trajectoires individuelles à la ville en mouvement, in Antoni J.-P. (dir.), *Modéliser la ville. Formes urbaines et politiques de transport*, Economica, 438 p. (pp.216-245).
- Baptiste H., 2003, Détermination des chemins optimaux dans un graphe temporel, in Mathis P. (dir.), *Graphes et réseaux : Modélisation multinationale*, Hermès science : Lavoisier, 361 p. (pp.93-112).
- Barnes, T. J., 2004, Placing ideas: Genius loci, heterotopia and geography's quantitative revolution, *Progress in Human Geography*, n°5, pp.565-595.
- Barnes T. J. & Farish M., 2006, *Between Regions: Science,*

- Militarism and American Geography from World War to Cold War, *Annals of the Association of American Geographers*, n°4, pp.807-826.
- Bavoux J.-J., Beaucire F., Chapelon L. & Zembri P., 2005, *Géographie des transports*, Armand Colin, 232 p.
- Bavoux J.-J. & Chapelon L., 2014, *Dictionnaire d'analyse spatiale*, Armand Colin, 608 p.
- Beauguitte L., 2016, L'analyse de réseaux en sciences sociales et en histoire, in Letricot R., Cuxac M., Uzcatégui M. & Cavaletto A. (dir.), *Le réseau. Usages d'une notion polysémique en sciences humaines et sociales*, Presses Universitaires de Louvain, 232 p. (pp.9-24).
- Beauguitte L., 2022, Théorie des graphes et analyse de réseau en géographie : Histoire d'un lien faible (1950-1963), *Passerelle SHS*, n°1, 14 p.
- Beaujeu-Garnier J., 1971, *La géographie: Méthodes et perspectives*, Masson, 143 p.
- Berge C., 1958, *Théorie des graphes et ses applications*, Dunod, 275 p.
- Bertin J., 1967, *Sémiologie graphique : Les diagrammes, les réseaux, les cartes*, Mouton - Gauthier-Villars, 431 p.
- Bertin J., 1977, *La graphique et le traitement graphique de l'information*, Flammarion, 277 p.
- Bonnafous A., Crozet Y., Mercier A., Ovtracht N., Péguy P.-Y. & Puech F., 2013, MOSART et le projet PLAINSUDD : une plate-forme de modélisation et de simulation de l'accessibilité pour l'aide à la décision et l'aménagement du territoire, in Antoni J.-P. (dir.), *Modéliser la ville. Formes urbaines et politiques de transport*, Economica, 438 p. (pp.186-210).
- Bonnafous A., Plassard F. & Vulin B. (dir.), 1993, *Circuler demain*, Éditions de l'Aube, 191 p.
- Bozzani S., 2006, *Grandes vitesses, métropolisation et organisation des territoires : l'apport de l'intermodalité aéro-ferroviaire à grande vitesse au rayonnement métropolitain*, Thèse de doctorat en géographie et aménagement de l'espace, Université de Lille 1, 609 p.
- Brossard T., Joly D. & Wieber J.-C., 1994, Systèmes d'information géographiques et cartographie par carroyage, in Groupe Dupont (dir.), *S.I.G., analyse spatiale et aménagement*, Actes du colloque Géopoint, 25 et 26 mai 1994, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Avignon, 247 p. (pp.75-76).
- Brunet R., 1972, Les nouveaux aspects de la recherche géographique : rupture ou raffinement de la tradition?, *L'Espace géographique*, n°2, pp.73-77.
- Cauvin C., 1994, Accessibilité de système et accessibilité locale, *Flux*, n°16, pp.39-48.
- Cauvin C., Martin J.-P. & Reymond H., 1993, Une accessibilité renouvelée, in Bonnafous A., Plassard F. & Vulin B. (dir.), *Circuler demain*, Éditions de l'Aube, 191 p. (pp.93-127).
- Cauvin C. & Reymond H., 1986, *Nouvelles méthodes en cartographie*, GIP-Reclus, 56 p.
- Cauvin C., Reymond H. & Schaub G., 1989, Accessibilité, temps de séjour et hiérarchie urbaine : l'exemple du réseau aérien pour 53 villes d'Europe de l'Ouest, *Sistemi Urbani*, n°3, pp. 297-324.
- Chapelon L., 1997, *Offre de transport et aménagement du territoire: Évaluation spatio-temporelle des projets de modification de l'offre par modélisation multi-échelles des systèmes de transport*, Thèse de doctorat en aménagement de l'espace et urbanisme, Université de Tours François Rabelais, 552 p.
- Chapelon L., 2016, Évaluation de la performance des chaînes intermodales de transport par les mesures d'accessibilité, in Chapelon L. (dir.), *Transports et intermodalité*, ISTE Editions, 325 p. (pp.107-135).
- Chapelon L., Jouvaud B. & Ramora S., 2004, La grande vitesse ferroviaire en Provence-Alpes-Côte d'Azur : évolution 2004-2020 des niveaux de desserte territoriale et conséquences sur l'accessibilité aux grands pôles urbains, Montpellier/Paris : UMR ESPACE/RFF, Étude préparatoire au débat public sur la LGV PACA, 55 p.
- Chaire O., 1994, Réalisation de cartes de temps de trajets dans un réseau avec un SIG en mode raster, in Groupe Dupont (dir.), *S.I.G., analyse spatiale et aménagement*, Actes du colloque Géopoint, 25 et 26 mai 1994, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Avignon, 247 p. (pp.81-84).
- Conesa A., 2010, *Modélisation des réseaux de transports collectifs métropolitains pour une structuration des territoires par les réseaux: applications aux régions Nord-Pas-de-Calais et Provence-Alpes-Côte d'Azur*, Thèse de doctorat en géographie et aménagement de l'espace, Université de Lille 1, 494 p.
- Cuyala S., 2014, *Analyse spatio-temporelle d'un mouvement scientifique. L'exemple de la géographie théorique et quantitative européenne francophone*, Thèse de doctorat en géographie, Université de Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 453 p.
- Dancoisne P., 1984, *Théorie des graphes et constitution du réseau ferré français*, Thèse de doctorat en géographie, Université de Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 280 p.
- Dancoisne P., 1990, Utilisation de la théorie des graphes pour l'analyse des réseaux ferroviaires, *Revue d'histoire des chemins de fer*, n°2, pp.103-127.
- Denain J.-C. & Langlois P., 1998, Cartographie en anamorphose, *Mappemonde*, n°1, pp.16-19.
- Dijkstra E. W., 1959, A note on two problems in connexion with graphs, *Numerische Mathematik*, n°1, pp.269-271.
- Ducruet C. & Beauguitte L., 2014, Spatial Science and Network Science: Review and Outcomes of a Complex Relationship, *Networks and Spatial Economics*, n°3-4, pp.297-316.

- Dumolard P., 1999, Accessibilité et diffusion spatiale, *L'Espace géographique*, n°3, pp.205-214.
- Dupuy G., 1986, *Systèmes, réseaux et territoires: Principes de réseautique territoriale*. Presses de l'École nationale des ponts et chaussées, 168 p.
- Dupuy G., 1988, *Réseaux territoriaux*, Paradigme, 286 p.
- Dupuy G., 1991, *L'urbanisme des réseaux: Théories et méthodes*, Armand Colin, 198 p.
- Dupuy G., 1999, *La dépendance automobile: Symptômes, analyses, diagnostic, traitements*, Economica, 160 p.
- Dupuy G. & Offner J.-M., 2005, Réseau: Bilans et perspectives, *Flux*, n°4, pp.38-46.
- Flament C., 1965, *Théorie des graphes et structures sociales*, Mouton - Gauthier-Villars, 167 p.
- Groupe Dupont (dir.), 1994, *S.I.G., analyse spatiale et aménagement*, Actes du colloque Géopoint, 25 et 26 mai 1994, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Avignon, 247 p.
- Hägerstrand T., 1970, What about people in regional science?, *Papers of the regional science association*, n°1, pp. 7-21.
- Hägerstrand T., 1967, The Computer and the Geographer, *Transactions of the Institute of British Geographers*, n°42, pp.1-19.
- Haggett P., 1965, *Locational Analysis in Human Geography*, Arnold, 339 p.
- Haggett P. & Chorley R., 1969, *Network Analysis in Geography*, Arnold, 348 p.
- Jiang J., 1993, *Conception assistée par ordinateur des réseaux de transport : Modèle interactif graphique CRAPO*, Thèse de doctorat en urbanisme et aménagement de l'espace, Université Paris-Est Créteil Val de Marne, 273 p.
- König D., 1936, *Theorie der Endlichen und Unendlichen Graphen*, Teubner, 280 p.
- Leysens T., 2011, *Reconfiguration des réseaux de transport et renouveau urbain : l'enjeu d'un urbanisme orienté vers le rail*, Thèse de doctorat en géographie et aménagement de l'espace, Université de Lille 1, 409 p.
- L'Hostis A., 1997, *Images de synthèse pour l'Aménagement du territoire: la déformation de l'espace par les réseaux de transport rapide*, Thèse de doctorat en aménagement de l'espace et urbanisme, Université de Tours François Rabelais, 310 p.
- L'Hostis A., 2012, Contactability, in Hull A., Silva C. & Bertolini L. (dir.), *Accessibility Instruments for Planning Practice*, COST European Science Foundation, 384 p. (pp.85-90).
- L'Hostis A. & Barbier J.-F., 2021, Villes qui se rapprochent, espace qui s'éloigne: Outils visuels pour représenter le paradoxe de l'espace-temps géographique, *Talweg - La distance*, n°6, pp.60-67.
- L'Hostis A. & 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*, 91 p.
- Masson S., 1998, Interactions entre système de transport et système de localisation. De l'héritage des modèles traditionnels à l'apport des modèles interactifs de transport et d'occupation des sols, *Les Cahiers Scientifiques du Transport*, Vol.33, pp.79-108.
- Mathis P. (dir.), 2003, *Graphes et réseaux: Modélisation multiniveau*, Hermès science: Lavoisier, 361 p.
- Mathon S. & Palmier P. (dir.), 2012, *Vélo et politique globale de mobilité durable*, Rapport PREDIT Groupe opérationnel (GO) n°3, 75 p.
- McHugh B., 2013, Pioneering Open Data Standards: The GTFS Story, in Goldstein B. & Dyson L. (dir.), *Beyond Transparency: Open Data and the Future of Civic Innovation*, Code for America Press, 303 p. (pp.125-135).
- Miller H. J., 1999, Potential Contributions of Spatial Analysis to Geographic Information Systems for Transportation (GIS-T), *Geographical Analysis*, n°4, pp.373-399.
- Moreno J. L., 1934, *Who Shall Survive: A New Approach to the Problem of Human Interrelations*, Nervous and Mental Disease Publishing Co, 466 p.
- Moreno J. L. & Jennings H. H., 1938, Statistics of Social Configurations, *Sociometry*, n°3-4, pp.342-374.
- Morgan M., Young M., Lovelace R. & Hama L., 2019, OpenTripPlanner for R, *Journal of Open Source Software*, n°44, p.1926.
- Moser J., Wenner F. & L'Hostis A., 2023, Visualising Transformations of Geographical Time-Space by Transport Systems. The Case of Germany, 1990 - 2020, *KN - Journal of Cartography and Geographic Information*, n°4, pp.301-315.
- Palsky G., 2012, MAP DESIGN VS SÉMIOLOGIE GRAPHIQUE: Réflexions sur deux courants de la cartographie théorique, *Cartes et Géomatique*, n°212, pp.7-12.
- Passegué S., 1996, *L'accessibilité aux équipements en milieu rural: Analyse spatiale à travers un s.i.g. raster*, Thèse de doctorat en géographie, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, 332 p.
- Passegué S., 1997, Rugosité routière et mesures de temps d'accès en milieu rural: Une modélisation par carroyage, *L'Espace géographique*, n°4, pp.355-366.
- Pumain D., 1980, *Contribution à l'étude de la croissance urbaine dans le système urbain français*, Thèse de Doctorat d'État en géographie, Université de Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 492 p.
- Pumain D. & Robic M.-C., 2002, Le rôle des mathématiques dans une «révolution» théorique et quantitative: La

géographie française depuis les années 1970, *Revue d'Histoire des Sciences Humaines*, n°1, pp.123-144.

Pumain, D. & Saint-Julien, T., 2010 (1^{ère} ed. 1997), *Analyse spatiale - Les localisations*. Armand Colin, 190 p.

Pumain D., Saint-Julien T. & Vigouroux M., 1983, Jouer de l'ordinateur sur un air urbain, *Annales de géographie*, n°511, pp.331-346.

Raffestin C., 1971, Géographie humaine et méthodes d'analyse, *Le Globe*, n°111, pp.53-64.

Richer C. & 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*, n°158, pp.427-461.

Robic M.-C. (dir.), Gosme C., Mendibil D., Orain O. & Tissier J.-L., 2006, *Couvrir le monde: Un grand XX^e siècle de géographie française*, ADPF-Ministère des Affaires étrangères, 229 p.

Rozenblat C., Cattedra R., Chapelon L., Joly O., Lavaud-Letilleul V., Lemarchand A., Martell H., Rodrigues-Malta R. & Cicille P., 2004, *Les villes portuaires en Europe, analyse comparative*, Maison de la Géographie de Montpellier, 168 p.

Saint-Julien T., 1980, *Industrie et système urbain: contribution à l'étude des relations entre un processus de diffusion industrielle et les transformations récentes du système urbain français*, Thèse de Doctorat d'État en géographie, Université de Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 524 p.

Salway B., 2005, The Nature and Genesis of the Peutinger Map, *Imago Mundi*, n°2, pp.119-135.

Sanders L., 2011, Géographie quantitative et analyse spatiale: Quelles formes de scientificités? in Martin T. (dir.), *Les sciences humaines sont-elles des sciences ?*, Vuibert, 192 p. (pp.71-91).

Stathopoulos N., 1990, *Pour une conception territoriale des réseaux: Modèles conceptuels, aspects stratégiques et outils d'aide à la décision*, Thèse de doctorat en sciences de gestion, Université de Paris IX - Dauphine, 448 p.

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*, Vol.53, pp.57-90.

Thibault A., 1972, Le système d'interrelations en géographie régionale, tentative méthodologique, *Cahiers du centre de recherches - Analyse de l'Espace*, n°3, pp.50-85.

Varlet J., 1987, *Géographie des relations ferroviaires en France*, Thèse de doctorat en géographie, Université de Clermont-Ferrand 2, 219 p.

Varlet J., 1990, Réseau ferroviaire et relations interrégionales en France, *Revue d'histoire des chemins de fer*, n°2, pp.87-102.

Publications d'un organisme

Buisson C., Badin A.-L., Bousquet A., Ditchi N., Duret A., Hans E., Lasserre V., Lecointre W. & Lejri D., 2019, *Rapport de synthèse de l'opération de recherche MESSIGEO*, Cerema, Ifsttar, ENTPE, 163 p.

CERTU & ADEME, 1998, *Comportements de déplacement en milieu urbain: Les modèles de choix discrets. Vers une approche désagrégée et multimodale*, CERTU, 136 p.

DREAL Hauts-de-France, 2020, *Analyse de l'offre de transports en commun dans la région Hauts-de-France*, Rapport, 11 p.

Eastman R. & Collet C., 1995, *IDRISI: Version 4.0 et 4.1*, Centre Régional IDRISI Francophone (CRIF), pagination multiple.

LISEA, 2018, *Bilan LOTI intermédiaire de la LGV Sud Europe Atlantique*, Rapport bilan LOTI, 88 p.

Palmier P., 2010, *Mode d'emploi MUSLIW, logiciel de calcul d'accessibilité multimodale*, Sétra, 59 p.

Sitographie

https://www.fh-augsburg.de/~harsch/Chronologia/Lspost03/Tabula/tab_pe06.html (consulté le 05/01/2024)

<https://plugins.qgis.org/plugins/networks/> (consulté le 05/01/2024)

<https://docs.opentripplanner.org/en/v2.4.0/History/> (consulté le 05/01/2024)

<https://github.com/opentripplanner/OpenTripPlanner> (consulté le 05/01/2024)

<https://thema.univ-fcomte.fr/logiciels/analyse-spatiale> (consulté le 05/01/2024)

<https://www.esri.com/fr-fr/what-is-gis/history-of-gis> (consulté le 05/01/2024)

<https://lesrencontres.decryptageo.fr/la-collaboration-au-service-du-transport-tempus/> (consulté le 05/01/2024)

<https://oslandia.com/2014/12/18/new-version-of-tempus-a-framework-for-multimodal-route-planning/> (consulté le 05/01/2024)

<https://github.com/Universite-Gustave-Eiffel/Tempus/releases> (consulté le 05/01/2024)

https://gitlab.com/tempus-projects/tempus_access_qgis/ (consulté le 05/01/2024)