



HAL
open science

Images de synthèse pour l'Aménagement du territoire : la déformation de l'espace par les réseaux de transport rapide

Alain L'Hostis

► **To cite this version:**

Alain L'Hostis. Images de synthèse pour l'Aménagement du territoire : la déformation de l'espace par les réseaux de transport rapide. Géographie. Université François Rabelais - Tours, 1997. Français. NNT: . tel-00275807

HAL Id: tel-00275807

<https://theses.hal.science/tel-00275807>

Submitted on 25 Apr 2008

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.

Université François Rabelais – Tours
Centre d'Etudes Supérieures d'Aménagement

Images de synthèse pour l'Aménagement du territoire : la déformation de l'espace par les réseaux de transport rapide

Alain L'Hostis

Thèse de doctorat en Aménagement de l'espace et Urbanisme

Sous la direction de M. le Professeur Philippe Mathis

Soutenue publiquement à Tours le 7 janvier 1997

Devant :

M. le Professeur Pierre MERLIN – Université de Paris 1/ENPC/IFU – Rapporteur

Mme le Professeur Denise PUMAIN – Université de Paris 1/INED

M. Jean-Paul AURAY, Directeur de Recherche – Université de Lyon 1/CNRS

M. le Professeur Jacky PERREUR – Université de Bourgogne

M. le Professeur Philippe MATHIS – Université de Tours

M. Guy JOIGNAUX, Directeur de Recherche – INRETS-TRACES – Rapporteur

« L'Université n'entend donner aucune approbation ou improbation aux opinions émises dans les thèses ; ces opinions doivent être considérées comme propres à leurs auteurs. »

Je tiens à exprimer ma plus vive reconnaissance envers mon directeur de thèse, Monsieur le Professeur Philippe Mathis pour le soutien qu'il m'a apporté, et les conseils et encouragements qu'il m'a prodigués tout au long de ces trois années.

Je remercie tout particulièrement Laurent Chapelon, Hervé Baptiste, Sébastien Larribe et Kamal Serrhini, mes collègues et amis du laboratoire du CESA.

Que Serge Bonetti, Bernard Castagna, Colette Cauvin, Denis Eckert, Guy Joignaux, Michel Mayaud et Denise Pumain soient ici remerciés pour leurs conseils, ainsi que Claude Fougère et Xavier Vannault pour leur aide lors des traductions.

Pour les développements mathématiques, je tiens à exprimer ma gratitude envers M. Dampousse, Karim Hamza, M. Lesimple, Mohamed Menad et M. Polombo, étudiants, enseignants et chercheurs du département de Mathématiques de l'Université de Tours, ainsi que Jean-Paul Auray, de l'Université de Lyon 1, pour leur écoute, leurs conseils et leur aide.

Mes remerciements vont aussi à Pascale Hajji, de la bibliothèque du CESA, et à Mme Langard de la bibliothèque universitaire, pour leur aide précieuse dans la recherche de documents.

Enfin, je remercie Catherine et Charles Fournier, Anne Geay, Stéphane Corbin, et surtout Marie.

« La ligne droite est la plus courte des lignes ayant les mêmes extrémités. »
Archimède, III^{ème} siècle avant notre ère, *De la sphère et du cylindre*.

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	6
CHAPITRE LIMINAIRE : METHODE	8
Section 1 De l'Aménagement au modèle décisionnel.....	9
Section 2 Les représentations de l'espace.....	22
Section 3 Problème spécifique de recherche	33
PARTIE I DES PHENOMENES A LEUR FORMALISATION.....	I-41
INTRODUCTION	I-42
CHAPITRE I L'ESPACE, LES RESEAUX ET LES INTERACTIONS ESPACE/RESEAUX....	I-44
Section 1 Espace : définitions et typologies	I-45
Section 2 Réseaux et systèmes.....	I-53
Section 3 Interactions entre l'espace et les réseaux	I-60
CHAPITRE II LES OUTILS MATHÉMATIQUES DE L'ANALYSE SPATIALE	I-78
Section 1 Hiérarchie des espaces mathématiques.....	I-80
Section 2 Propriétés et transformations mathématiques.....	I-91
Section 3 Distance.....	I-97
Section 4 La question de la ligne droite.....	I-116
Section 5 Du réseau au graphe.....	I-125
CONCLUSION DE LA PARTIE I.....	I-139
PARTIE II REPRESENTATIONS	II-141
INTRODUCTION	II-142
CHAPITRE I LES REPRESENTATIONS DE L'ESPACE	II-143
Section 1 Les quatre démarches de la modélisation de l'espace	II-144
Section 2 Représentations chorotaxiques	II-153
Section 3 Les anamorphoses	II-163
CHAPITRE II LES CARTES EN RELIEF	II-180
Section 1 La construction des cartes en relief.....	II-181
Section 2 Cartographie d'analyse	II-198
Section 3 Cartographie prospective.....	II-209
Section 4 Développement des cartes en relief.....	II-209
CONCLUSION DE LA PARTIE II	II-209
CONCLUSION GENERALE.....	209
ANNEXES	209
LA CONVERGENCE DE L'ESPACE TEMPS	209
ANNEXES MATHÉMATIQUES.....	209
PRESENTATION DU LOGICIEL MAP	209
SIGLES	209
TABLES.....	209
BIBLIOGRAPHIE.....	209
TABLE DES FIGURES.....	209
TABLE DES TABLEAUX.....	209
TABLE DES CARTES	209
TABLE DES MATIERES	209

INTRODUCTION

Il est de plus en plus difficile de concevoir clairement l'espace qui nous entoure. Pour nous déplacer d'un point à un autre, nous utilisons des moyens de transport de plus en plus rapides, de plus en plus performants. Souvent, au cours d'un trajet, nous sommes amenés à emprunter des moyens de transport, des véhicules, des réseaux différents. Or, c'est en parcourant l'espace, ou en imaginant une façon de le parcourir, que nous nous construisons notre propre conception.

Nous parcourons parfois l'espace en avion, à une vitesse proche de celle du son, puis, dans le même trajet, pour peu que le taxi qui nous emmène de l'aéroport vers notre destination finale soit ralenti par les conditions de circulation, nous progressons péniblement à une vitesse 100 fois inférieure. Ou encore, après un trajet en TGV à plus de 300 km/h, nous finissons notre chemin en utilisant des transports en commun qui traversent l'espace urbain seulement 3 fois plus rapidement que ne le ferait un bon marcheur. Dans ces conditions, comment concevoir l'espace dans lequel nous vivons ?

L'Aménagement agissant sur l'espace, une compréhension claire de celui-ci est un préalable indispensable à la démarche. Nous voulons dans cette thèse apporter des éléments qui aident à mieux analyser et comprendre l'espace, mais aussi et surtout à mieux prévoir les évolutions spatiales, qui sont des conséquences des choix d'Aménagement.

La construction d'une représentation de l'espace débute par l'analyse de l'espace. A partir de cette analyse, il est possible d'étudier les principaux formalismes utilisés pour modéliser l'espace, et de choisir une approche qui puisse restituer la complexité de l'objet espace.

Comme l'invention *ex nihilo* est impossible, nous devons recenser, analyser et critiquer les principaux types de représentation de l'espace. Cette revue suscite et inspire la création d'une nouvelle forme de représentation. C'est à ce moment du raisonnement que l'on peut présenter les cartes qui constituent l'objet essentiel de la thèse. Nous voulons construire une représentation de l'espace et des réseaux de

transport qui intègre plusieurs modes de transport, qui s'adapte à des échelles spatiales différentes, et qui rend compte de la durée des déplacements. Notre but est l'établissement d'un outil opératoire pour l'Aménagement du territoire qui permette d'analyser et de mieux comprendre l'espace et les réseaux de transport, et qui comporte également une dimension prospective.

Pour répondre à cet objectif, le déroulement du raisonnement s'effectue dans le corps principal de la thèse. Celui-ci est constitué de deux parties comprenant chacune deux chapitres. Nous avons choisi de débiter la thèse par un chapitre liminaire qui se place avant les deux parties du corps principal. Ce chapitre présente la méthode et le contexte global de ce travail. L'avantage d'un tel plan est de permettre de dégager le corps principal du propos, d'un ensemble de considérations nécessaires, mais générales. Il s'agit de poser autant que possible les éléments implicites de la démarche. L'Aménagement est une discipline universitaire récente ; elle demande une attention particulière de définition. Le thème de la thèse mobilise des techniques très récentes et qui ne sont pas totalement formalisées : là aussi, un effort de définition est nécessaire.

Le chapitre liminaire doit également être compris comme une introduction détaillée qui aboutit à présenter le propos principal à la thèse.

La thèse s'inscrit dans la discipline Aménagement de l'espace et Urbanisme (24^{ème} section de l'Université). Il nous faut en précision préliminaire établir la distinction entre l'Aménagement du territoire et l'Aménagement de l'espace. Le territoire désigne pour nous une entité spatiale associée à un pouvoir qui émane d'un groupe social. Dans cette définition, on introduit une dimension politique. C'est ce critère qui différencie le territoire de l'Aménagement, de l'espace de l'Aménagement. L'espace recouvre le même objet que le territoire, mais il est dépourvu de la dimension politique. L'intérêt d'une telle définition est de construire un objet qui puisse être soumis à observation. En ce sens, en tant qu'objet scientifique, l'espace de l'Aménagement est proche de l'espace de la Géographie. Alors que le territoire de l'Aménagement se rapproche plutôt de l'objet de la Science Politique.

Nous écrivons Aménagement – avec une majuscule – pour désigner la discipline, le processus, l'acte d'aménager, et nous écrivons aménagement – avec une minuscule – pour signifier le résultat de ce processus.

Nous employons l'expression "analyse spatiale" pour désigner la démarche générale qui se fixe l'espace pour objet. On identifie une analyse spatiale en Géographie ; elle s'inscrit pour l'essentiel dans le courant de la Géographie théorique et quantitative. L'analyse spatiale se retrouve en Economie, dans les champs de l'Economie Spatiale, et de l'Economie Régionale et Urbaine. La Science Régionale est un champ interdisciplinaire qui est étroitement relié à l'analyse spatiale. Cette démarche est aussi une des composantes essentielles de l'Aménagement. Une démarche d'analyse

spatiale en Aménagement ira puiser dans un corpus de travaux de géographes, d'économistes et d'aménageurs.

CHAPITRE LIMINAIRE : MÉTHODE

Introduction

Dans ce chapitre liminaire, nous nous donnons une définition de l'Aménagement. Les transports en sont une composante essentielle. Les politiques d'Aménagement en général, et celles relatives aux transports en particulier, font intervenir les notions d'équité spatiale et d'accessibilité.

Nous abordons ensuite la question du contexte de la décision en matière d'infrastructures de transport : les choix en ce domaine engagent des moyens considérables et peuvent avoir une influence profonde sur les dynamiques des territoires. C'est pourquoi les outils qui sont susceptibles d'apporter des informations utiles à la prise de décision méritent une attention particulière.

Nous portons ensuite la discussion sur l'évaluation des projets d'infrastructures. Cette question soulève immédiatement celle des critères utilisés pour l'évaluation, en particulier la place accordée aux objectifs d'Aménagement du territoire face aux critères économiques. Nous sommes alors en mesure de poser les termes du problème général de recherche.

L'outil que nous voulons construire aura la forme d'un modèle : nous fournissons une définition des modèles utilisables dans un processus décisionnel. Nous abordons ensuite le mode d'exploitation de ces modèles, à savoir la simulation.

Pour appréhender l'espace, l'aménageur utilise des cartes. Nous présentons la cartographie en tant que modèle spatial pour l'Aménagement.

Nous abordons ensuite une question d'importance pour notre objet qui est celle des images de synthèse. Au préalable nous évoquons rapidement l'exemple de l'imagerie médicale en tant qu'outil de diagnostic. Nous définissons ensuite les images de synthèse et nous précisons les liens existant entre les images, la réalité et les modèles.

Une fois le cadre général posé, nous explicitons le problème spécifique de recherche. Nous donnons une première ébauche succincte du principe des cartes en relief et nous présentons un exemple d'application.

Après avoir explicité l'hypothèse principale, nous présentons le plan des deux parties qui composent le corps principal de la thèse.

Section 1 De l'Aménagement au modèle décisionnel

A. *L'Aménagement et les transports*

L'Aménagement part d'une insatisfaction quant à l'état présent de l'espace et/ou à son évolution supposée¹. L'Aménagement est une action qui vise à changer cet état ou à contrecarrer une évolution considérée comme non satisfaisante. L'action porte sur l'espace, et l'objectif de l'action est un état futur de cet espace. En ce sens, l'Aménagement est une discipline praxéologique.

La première phase de la démarche est analytique. Comme l'objectif de l'Aménagement est un état futur de l'espace qui est jugé préférable, une dimension prospective est introduite. La prospective peut permettre de répondre à la question de savoir que faire pour obtenir un état futur souhaité. La réponse à cette question établit la nature prescriptive de l'Aménagement.

Si l'aménageur agit, ce n'est pas lui qui prend la décision de l'action. Il n'entre pas dans les prérogatives de l'aménageur de décider l'action de l'Aménagement. C'est le pouvoir politique qui détient la légitimité de la prise de décision. Le rôle de l'aménageur est de concrétiser les orientations et les choix politiques. En ce sens, l'Aménagement est une action à fort contenu politique.

L'aménageur prend cependant part au processus décisionnel qui aboutit à la décision de l'action de l'Aménagement.

Denis Martouzet, dans sa thèse sur l'éthique de l'aménagement, introduit onze éléments pour définir l'action de l'Aménagement² ; ces éléments sont représentés sur la figure suivante.

¹ Selon les mots de Philippe Mathis.

² Denis MARTOUZET, 1993. - *Recherche du fondement de l'éthique de l'aménagement*. - Thèse : Tours. - p. 92.

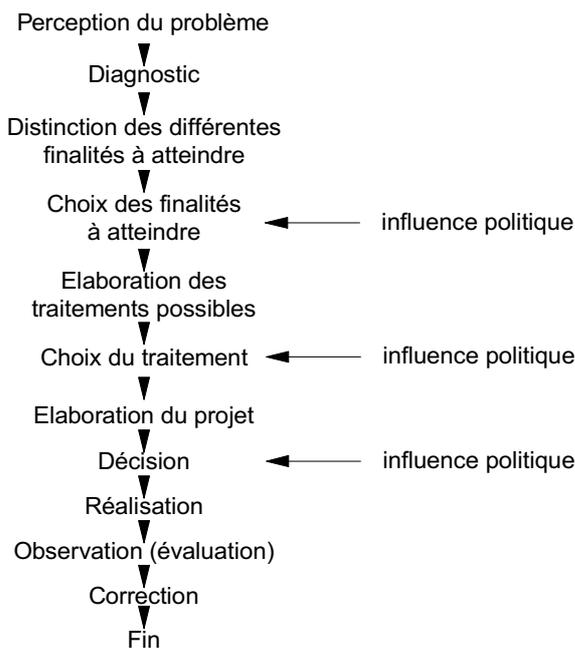


figure 1 : l'action de l'Aménagement³

C'est un schéma théorique : il est linéaire et chronologique, il n'y a pas de boucles de rétroaction et il existe un terme. Il est nécessaire de nuancer ce schéma. D'abord, l'action de l'Aménagement n'est pas close dans le temps, car, on ne connaît pas toutes les conséquences d'un aménagement. D'autre part, dans ce schéma, l'aménageur émet des propositions, mais il ne prend pas la décision. Il n'est pas question ici de décision élargie, c'est-à-dire qu'on ne reconnaît pas la participation de l'aménageur à la prise de décision en tant qu'acteur du processus décisionnel.

On remarque cependant que l'aménageur agit en aval et en amont des décisions politiques. Malgré tout, cette formalisation présente l'avantage d'identifier toutes les facettes de l'action de l'Aménagement. On voit apparaître, à la suite de la perception de l'insatisfaction, la fonction de diagnostic, la recherche des finalités à atteindre, l'élaboration des traitements et des projets, leur réalisation et leur évaluation.

L'établissement du diagnostic, qui est la première étape de l'action d'Aménagement, nécessite une connaissance de l'état présent de l'espace. Pour établir cette connaissance, l'aménageur utilise ou construit des représentations de l'espace.

Jérôme Monod et Philippe de Castelbajac explicitent les grandes orientations politiques de l'Aménagement du territoire. L'Aménagement vise à un développement équilibré : « le but n'est pas de faire la part du feu aux dépens de la prospérité nationale pour apaiser les récriminations de quelques régions, mais d'assumer partout les conditions du bien-être »⁴. Dans cette assertion on voit apparaître la notion

³ Figure largement inspirée de : Denis MARTOUZET, 1993. - *op. cit.* - p. 92.

⁴ Jérôme MONOD, Philippe de CASTELBAJAC, 1991. - *L'Aménagement du territoire.* - Paris : PUF (Que sais-je ?). - p. 14.

économique de bien-être, mais un bien-être qui serait assuré à chaque endroit du territoire. Le développement économique global n'est pas la finalité de l'Aménagement, mais on ne peut pas sacrifier le développement économique à l'Aménagement.

Quant à la méthode utilisée, « pour atteindre cet objectif [d'assumer partout les conditions du bien-être], et alors que l'analyse économique ne retient généralement que les aspects chiffrables de la réalité, l'Aménagement du territoire doit s'efforcer d'en appréhender tous les éléments à la fois, même s'ils échappent à la mesure ou ne peuvent faire l'objet que d'approximations »⁵. L'Aménagement est nécessairement une approche globale. La démarche de l'Aménagement ne peut être que multicritère⁶, de façon à *appréhender tous les éléments à la fois*. La démarche est différente de l'optimisation économique telle qu'elle est définie en Recherche Opérationnelle par exemple. Il ne s'agit pas d'intégrer les différents aspects dans une analyse économique au travers d'une fonction d'agrégation dont on rechercherait l'optimum. Sans entrer plus avant dans un débat qui est toujours d'actualité, nous affirmons que certaines préoccupations de l'aménageur échappent à des conceptions purement économiques.

L'Aménagement, par essence pluridisciplinaire⁷, mobilise les sciences économiques, la Géographie, les sciences sociales, l'Urbanisme et les sciences de l'ingénieur. L'Aménagement n'est pas seulement analytique ; il participe aussi des sciences du projet.

« L'Aménagement du territoire doit s'attacher aussi et plus encore à poser les problèmes en termes d'anticipation. Son approche doit négliger le court terme pour envisager un avenir plus lointain, en considérant la localisation des activités non telle qu'elle est, mais telle qu'elle devrait être pour permettre aux individus de mener une vie plus libre et plus saine et aux entreprises de se répartir d'une manière moins coûteuse pour le pays. »⁸ Jérôme Monod et Philippe de Castelbajac.

L'aménageur se préoccupe de l'état futur souhaité de l'espace. Il cherche à connaître les conséquences à moyen et/ou long terme d'éventuelles décisions.

Selon la définition de Pierre Merlin, « l'Aménagement du territoire est l'art ou la technique [...] de disposer avec ordre, à travers l'espace d'un pays et dans une vision prospective, les hommes et leurs activités, les équipements et les moyens de

⁵ Jérôme MONOD, Philippe de CASTELBAJAC, 1991. - *op. cit.* - p. 14.

⁶ Le mot "multicritère" fait directement référence à la démarche générale de l'aide multicritère à la décision comme Bernard Roy l'a définie (Cf. : Bernard Roy, 1985. - Méthodologie multicritère d'aide à la décision. - Paris : Economica.).

⁷ Denis Martouzet le qualifie d'*interdisciplinaire* car il met en relation les différents aspects d'un projet (Denis MARTOUZET, 1993. - *op. cit.* - p. 97).

⁸ Jérôme MONOD, Philippe de CASTELBAJAC, 1991. - *op. cit.* - p. 15.

communication qu'ils peuvent utiliser, en prenant en compte les contraintes naturelles, humaines et économiques, voire stratégiques »⁹. Le champ d'application des politiques d'Aménagement du territoire inclut la « planification et les priorités dans le développement des réseaux d'infrastructure »¹⁰.

La définition de Pierre Merlin met en évidence l'importance des « moyens de communication », dont le transport de personnes et de marchandises est une composante essentielle, dans l'Aménagement du territoire.

La dimension prospective est, elle aussi, clairement affirmée dans la définition de Pierre Merlin. L'Aménagement naît d'une insatisfaction quant à l'état actuel du territoire et se fixe comme objectif un état futur souhaité. La « vision prospective » correspond à une démarche orientée vers l'avenir.

L'aménageur, en tant qu'acteur d'un processus d'aide à la décision, doit proposer des solutions qui soient cohérentes avec les orientations politiques fixées. C'est la dimension prescriptive de l'Aménagement du territoire.

Les grandes orientations politiques qui président à l'Aménagement du territoire se traduisent, entre autres, par des critères d'accessibilité et d'équité spatiale ; le paragraphe suivant traite des relations qui unissent ces trois notions.

B. Aménagement, accessibilité et équité spatiale

L'existence de lieux différents qui possèdent des caractéristiques différentes est à l'origine du besoin de se déplacer. Les processus de déplacement voient donc leur origine dans l'hétérogénéité de l'espace.

Les systèmes de transport, organisés en réseaux, ont pour fonction de permettre le déplacement des individus et des marchandises. La forme d'organisation spatiale qu'est le réseau génère des disparités spatiales : un point situé à proximité du réseau de transport sera considéré plus accessible – on introduit ici la notion d'accessibilité – qu'un point éloigné. Ainsi, paradoxalement, les systèmes de transport, dont l'existence est due à l'hétérogénéité de l'espace, génèrent des disparités d'accessibilité, c'est-à-dire une nouvelle forme d'hétérogénéité.

Or, comme l'affirme François Plassard, « la logique qui préside depuis la fin de la seconde guerre mondiale à l'Aménagement du territoire repose sur une conception égalitaire de l'espace »¹¹, et consiste à réduire les disparités spatiales au moyen des

⁹ Pierre MERLIN, 1988. - *Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement*. - Paris : PUF. - p. 30.

¹⁰ *Ibid.* - p. 31.

¹¹ François PLASSARD, 1993. - « Les Enjeux territoriaux des transports ». - p. 50. - in *Circuler demain*. - dirigé par Alain Bonnafous, François Plassard, Bénédicte Vulin. - La Tour d'Aigues : DATAR/Editions de l'Aube (Monde en cours, Prospective et territoires).

réseaux de transport pour permettre à chacun « de disposer des mêmes conditions d'accessibilité à l'ensemble des grands centres nationaux ou étrangers »¹². La recherche d'une plus grande équité spatiale réside donc dans la réduction des inégalités dans l'accessibilité aux autres lieux de l'espace.

On constate ici que, si le développement des systèmes de transport dans le cadre d'une politique d'Aménagement du territoire a pour but la réduction des inégalités territoriales et spatiales, il a aussi comme conséquence de générer de nouvelles disparités. Il y a là un paradoxe majeur qui oppose l'objectif d'une politique d'Aménagement du territoire, aux propriétés des systèmes qui sont mis en place pour répondre à ces grandes orientations.

Une synthèse possible de cet antagonisme passe nécessairement par la prise en compte de la disparité intrinsèque de l'espace qui, comme le pose Abraham Moles, implique la construction d'un « *Aménagement du territoire* qui [soit] basé sur les possibilités de *transport* »¹³.

Il faut noter que l'hétérogénéité d'un territoire est une notion qui dépend du niveau des entités territoriales que l'on considère. Une politique d'Aménagement du territoire dont le but serait d'assurer la présence d'au moins un équipement d'un type particulier dans chaque département français procède de l'homogénéisation au niveau départemental. Cependant, observons les conséquences de cette politique à un niveau territorial plus fin : l'équipement en question sera implanté à l'intérieur du département dans une localisation appartenant à une commune. La conséquence de cette politique d'Aménagement est la création d'une hétérogénéité des communes du département vis-à-vis de l'équipement en question. En Economie, ces problèmes peuvent être abordés au travers de la notion de « bien public spatialisé »¹⁴.

C. *Infrastructures lourdes, temps long*

« Il faut le plus souvent environ une génération entre le moment où émerge l'idée du recours à un nouvel équipement de transport pour un service donné et celui où cette idée a pu être popularisée et est prête à devenir opérationnelle »¹⁵. Ces infrastructures, dont la genèse a pris 25 ans, vont être utilisées pendant « des décennies, des générations, des siècles »¹⁶. Voilà le contexte général de la prise de décision en Aménagement des transports. Le décideur doit faire des choix d'une

¹² François PLASSARD, 1993. - *op. cit.* - p. 50

¹³ Abraham MOLES, 1992. - « Vers une psycho-géographie ». - p. 200. - in *Encyclopédie de Géographie*. - sous la dir. de Antoine Bailly, Robert Ferras, Denise Pumain. - Paris : Economica. - (C'est l'auteur qui souligne).

¹⁴ Pierre-Henri DERYCKE, Frédéric GANNON, 1994. - « Biens publics spatialisés. » - p. 127-131. - in *Encyclopédie d'économie spatiale*. - sous la dir. de Jean-Paul Auray, Antoine Bailly, Pierre-Henri Derycke, Jean-Marie Huriot. - Paris : Economica (Bibliothèque de Science Régionale).

¹⁵ Pierre MERLIN, 1994. - *Les Transports en France*. - Paris : La Documentation française (Economie). - p. 6.

¹⁶ *Ibid.*

importance cruciale, par l'importance des coûts engagés¹⁷, par la très longue durée des conséquences de ces choix, et par l'étendue spatiale de leurs répercussions¹⁸.

L'importance des investissements justifie le fait que, dans le domaine des transports, la puissance publique exerce seule la fonction de décideur. Cette fonction s'exprime au travers « des trois principales commandes que sont les investissements d'infrastructures, l'administration du secteur et son contrôle et la politique de tarification et de financement »¹⁹. Pour expliquer la prééminence de la puissance publique, Gabriel Dupuy avance, en plus, des raisons de sécurité, des objectifs d'équité, mais aussi des objectifs militaires et stratégiques²⁰.

Dans un tel contexte, on comprend que les choix en matière d'investissements d'infrastructures de transport constituent un champ privilégié de la formalisation de l'aide à la décision. Nous abordons maintenant cette question.

D. *L'aide à la décision*

L'aide à la décision, pour Henry G. Zoller et Hubert Beguin, consiste à « apporter l'information qui autorise une appréciation plus sûre du champ des possibles et une anticipation plus correcte des résultats susceptibles de découler des actions projetées, de manière à faire se dérouler le processus autour de la table plutôt que sur le terrain »²¹. L'aide à la décision est une démarche prospective.

¹⁷ Le coût moyen d'investissement (en francs 1990) (Cf. : Pierre MERLIN, 1991. - *Géographie, économie et planification des transports*. - Paris : PUF (Fondamental). - p. 226-228) :

- ◆ pour un kilomètre d'autoroute à 2 × 2 voies :
 - 25 millions de francs en rase campagne.
 - de 50 à 90 millions de francs en périphérie d'agglomération.
 - de 125 à 350 millions de francs en proche banlieue et centre (hors région parisienne).
- ◆ Pour un kilomètre de ligne de TGV :
 - 23,6 millions de francs pour la ligne Sud-Est.
 - 38,5 millions de francs pour la ligne Atlantique.

¹⁸ Pour la spécificité du problème éthique de l'aménagement cf. : Denis MARTOUZET, 1993. - *op. cit.*

¹⁹ Alain BONNAFOUS, 1994. - « Réseaux de transport ». - p. 325. - in *Encyclopédie d'économie spatiale*. - sous la dir. de Jean-Paul Auray, Antoine Bailly, Pierre-Henri Derycke, Jean-Marie Huriot. - Paris : Economica (Bibliothèque de Science Régionale).

²⁰ Gabriel DUPUY, 1993. - « Géographie et économie des transports ». - *L'Espace Géographique*, n° 3. - p. 196.

²¹ Henry G. ZOLLER, Hubert BEGUIN, 1992. - *Aide à la décision*. - Paris : Economica (Bibliothèque de Science Régionale). - p. 13.

François Plassard et Jean-Louis Routhier²² proposent – dans le cadre d’une recherche sur les outils graphiques utilisés pour l’évaluation et la décision dans le domaine des transports²³ – une typologie des processus d’aide à la décision. Ces derniers répondent à trois types de demandes des décideurs qui correspondent à autant de fonctions :

1. la fonction de diagnostic consiste à dégager les points faibles, les potentialités et les dysfonctionnements du système de transport d’une région d’un département ou d’une agglomération. L’objectif d’une telle démarche est « d’assurer une connaissance suffisante de l’environnement pour permettre une intervention efficace sur ce dernier »²⁴ ;
2. la fonction d’évaluation apparaît dès qu’un projet commence à voir le jour : la question se pose alors de juger sa pertinence ou son efficacité par rapport aux objectifs recherchés. Cette fonction, à la différence de la précédente, est explicitement normative ;
3. la fonction de proposition revêt deux aspects très différents selon que les suggestions sont de nature technique ou politique. Même s’il n’est jamais possible de séparer totalement les deux domaines – « toute solution technique a une dimension politique et réciproquement »²⁵ – il y a un écart entre une action ponctuelle, à la portée limitée, et un projet majeur qui sert d’axe à toute une politique.

Les décisions à prendre en matière de transport en Europe peuvent impliquer différents niveaux institutionnels – Communauté européenne, états, régions – suivant l’inscription territoriale des projets ; d’autre part, l’évaluation intervient à différents niveaux d’avancement des projets²⁶.

La question centrale pour l’aide à la décision dans le domaine de transport est celle de l’évaluation des projets ; c’est l’objet du paragraphe qui suit.

²² Laboratoire d’Economie des Transports (LET) à Lyon.

²³ François PLASSARD, Jean-Louis ROUTHIER, 1987. - *Sémiologie graphique et évaluation*. - Lyon : A.R.T.U.R.

²⁴ *Ibid.* - p. 6.

²⁵ *Ibid.*

²⁶ Le groupe « Transports 2010 » distingue trois niveaux décisionnels qui se situent en aval de l’orientation stratégique et des grands choix de politique réglementaire, tarifaire, financière, d’exploitation, d’organisation, etc. :

- les schémas directeurs à échelle nationale sont conçus en coordination avec les schémas européens ainsi que les schémas régionaux et d’agglomération. La LOTI fixe la manière de mettre en place les schémas directeurs d’infrastructures. Pour le groupe de travail « Transports 2010 », c’est au niveau des schémas directeurs que la prise en compte de l’aménagement du territoire doit être effectuée de manière privilégiée.
- Un niveau de vision stratégique à moyen terme permet de faire le choix des priorités pour une période de 5 à 7 ans.
- Le choix des tracés, avec la mise en place des financements et des dates de mise en service.

E. L'évaluation des projets d'infrastructures

En France, l'article 14 de la Loi d'orientation sur les transports intérieurs²⁷ (LOTI) et son décret d'application 84-617 du 17 juillet 1984²⁸ ont rendu obligatoire l'évaluation des projets d'infrastructures de transport et ont défini les principes généraux de cette évaluation.

Dans le prolongement des travaux du groupe interministériel « Transports 2010 »²⁹, l'analyse des méthodes d'évaluation des projets d'infrastructure de transport, dans le cadre de la LOTI, a fait l'objet d'un groupe de travail³⁰.

L'évaluation est faite pour aider à prendre une décision. Cette décision peut prendre une des quatre modalités suivantes :

- on réalise ou on ne réalise pas tel projet ;
- on réalise tel projet plutôt que tel autre ;
- on réalise tel projet avant tel autre ;
- on met en chantier tel projet, à telle date.

L'évaluation repose sur une comparaison avec une situation de référence. Cette situation est rarement le *statu quo*, car des investissements seront souvent nécessaires en l'absence du projet pour maintenir la qualité de service à un niveau raisonnable.

L'évaluation des projets n'a de sens que si l'on définit le (ou les) critère(s) mis en œuvre.

F. Les critères de l'évaluation

Le cadre théorique « à peu près universellement retenu pour évaluer les politiques de transport »³¹ est celui du calcul économique. Selon ce principe, on postule l'existence d'un optimum qui est jugé préférable, en se basant sur une analyse coût-avantage. Les projets sont évalués selon leur contribution à une fonction d'utilité collective qui est, pour les économistes, un indicateur du bien être collectif. Cependant, « le critère de rentabilité économique aboutit à décider de construire des infrastructures là où il y a une demande suffisante existant déjà ou devant se manifester à court terme »³². Ce

²⁷ « Loi n° 82-1153 du 30 décembre 1982 d'orientation des transports intérieurs ». - Journal Officiel, France, 31 décembre 1982.

²⁸ « Décret d'application n° 84-617 du 17 juillet 1984 ». - Journal Officiel, France, 18 juillet 1984.

²⁹ Commissariat général du Plan, 1992. - *Transports 2010*. - Paris : La documentation française.

³⁰ Commissariat général du Plan, 1994. - *Transports*. - Paris : La documentation française. - p. 11.

³¹ Commissariat général du Plan, 1992. - *op. cit.* - p. 359.

³² *Ibid.* - p. 30.

critère à été utilisé pour décider de la réalisation des premières infrastructures ferroviaires à grande vitesse en France. Le résultat obtenu est un réseau en étoile autour du plus gros générateur de trafic du territoire : Paris. Cette logique de développement conduit à favoriser les régions à forte densité, déjà bien pourvues en infrastructures de transport mais soumises à la saturation, au détriment des régions les moins bien dotées.

Le réseau ainsi construit ne correspond pas aux objectifs d'Aménagement énoncés par la DATAR d'éviter « la surconcentration parisienne et de permettre une bonne desserte de l'ensemble du territoire »³³. On voit bien que « les objectifs de l'Aménagement du territoire, et à travers eux, la recherche d'une certaine équité territoriale, ne sont pas naturellement compatibles avec la recherche d'un optimum dans le secteur des transports »³⁴. Alain Bonnafous formule cette incompatibilité en affirmant que « les objectifs d'efficacité du secteur des transports sont contradictoires avec les objectifs d'équité et de diffusion de l'Aménagement du territoire »³⁵. L'antagonisme des deux objectifs fait dire à François Plassard qu'il semble « difficile de tenir à la fois un discours sur une meilleure répartition des activités et des hommes à travers l'espace, ce qui est une des options possibles d'Aménagement, et en même temps de retenir des critères de choix des modes à privilégier et des liaisons à réaliser qui ne se fondent que sur l'efficacité économique et les possibilités de les financer par appel à des capitaux privés »³⁶.

Les objectifs d'Aménagement du territoire sont présents dans la LOTI pour l'évaluation des projets d'infrastructures. Si le fondement de l'évaluation reste la comparaison coût-avantage, l'Aménagement du territoire « a pris une importance considérable dans la sélection des projets »³⁷. La loi du 4 février 1995 d'orientation pour l'aménagement et le développement du territoire (LOADT) marque une avancée de la part des pouvoirs publics dans le sens d'une plus grande équité spatiale en termes d'accès aux infrastructures de transport rapide. En effet, les orientations communes aux schémas sectoriels des infrastructures de transport stipulent qu'à l'horizon 2015, « aucune partie du territoire français métropolitain continental ne sera située à plus de cinquante kilomètres ou de quarante-cinq minutes d'automobile soit d'une autoroute ou d'une route express à deux fois deux voies en continuité avec le

³³ Commissariat général du Plan, 1992. - *op. cit.* - p. 340.

³⁴ *Ibid.* - p. 338.

³⁵ Alain BONNAFOUS, 1994. - *op. cit.* - p. 327.

³⁶ François PLASSARD, 1993. - « Les Enjeux territoriaux des transports ». - p. 50. - in Circuler demain. - dirigé par Alain Bonnafous, François Plassard, Bénédicte Vulin. - La Tour d'Aigues : DATAR/Éditions de l'Aube (Monde en cours, Prospective et territoires).

³⁷ Commissariat général du Plan, 1994. - *op. cit.* - p. 53.

réseau national, soit d'une gare desservie par le réseau ferroviaire à grande vitesse »³⁸. Cette indication correspond à un objectif général d'accessibilité³⁹.

D'autre part, l'émergence des objectifs d'Aménagement est particulièrement manifeste dans le schéma directeur routier qui doit définir « les grands axes du réseau autoroutier et routier national dans un objectif de desserte équilibrée et de désenclavement de l'ensemble du territoire, quels que soient les trafics constatés »⁴⁰. La LOADT appelle la mise en place d'une desserte équilibrée du territoire, même là où les niveaux de trafics sont insuffisants pour assurer le financement des infrastructures.

L'Aménagement du territoire appelle une stratégie d'égalisation des chances de toutes les zones. Dans un tel contexte, le calcul économique ne perd toutefois pas toute utilité : « il peut servir à chiffrer l'insuffisance de rentabilité envisagée, et par conséquent l'effort demandé à l'ensemble de la collectivité pour assurer cette équité »⁴¹.

G. *Énoncé du problème général*

L'Aménagement est une action qui s'inscrit dans des grandes orientations politiques. L'aménageur est un des acteurs du processus décisionnel dont le résultat est l'aménagement. La démarche de l'aménageur relève de l'aide à la décision telle qu'elle est définie par Henry G. Zoller et Hubert Beguin et qui consiste à apporter une information de caractère prospectif. L'objet de l'Aménagement étant l'espace, l'aménageur utilise ou construit des représentations de l'espace. Parce que l'aménageur est un acteur du processus décisionnel, ces représentations peuvent être vues comme des outils d'aide à la décision.

Le problème général de recherche porte sur l'élaboration d'outils d'aide à la décision pour l'Aménagement. Le thème général de ce travail est la représentation de l'espace pour l'Aménagement.

³⁸ « Loi n° 95-115 du 4 février 1995 d'orientation pour l'aménagement et le développement du territoire ». - art. 17 - I. - p. 1977. - *Journal Officiel*, France, 5 février 1995.

³⁹ Il est à noter qu'un indicateur d'accessibilité est susceptible d'apporter une information cohérente avec l'approche en termes d'équité, et complémentaire à celle fournie par la rentabilité socio-économique. Les indicateurs d'accessibilité classiques fournissent une information sur l'offre de transport. Cependant, comme « il est difficile de concevoir que l'ensemble du territoire soit desservi de manière uniforme sans entraîner de coût excessif, on pourra construire un autre type d'indicateur d'offre pondéré par la population desservie » (Commissariat général du Plan, 1994. - *op. cit.* - p. 55).

⁴⁰ « Loi n° 95-115 du 4 février 1995 d'orientation pour l'aménagement et le développement du territoire ». - art. 18 - I. - p. 1977.

⁴¹ Commissariat général du Plan, 1992. - *op. cit.* - p. 30.

Les dimensions du problème général de recherche sont l'Aménagement, l'espace de l'aménagement, les réseaux transports, les interactions entre l'espace et les réseaux de transport, les outils d'aide à la décision, la modélisation, et la représentation.

L'outil que nous voulons élaborer prend la forme d'un modèle ; nous fournissons maintenant une définition générale des modèles.

H. Les modèles

« La vision du monde que chacun d'entre nous s'est constituée n'est rien d'autre qu'un modèle. Toutes nos décisions sont prises à partir de modèles. »⁴² Jay W. Forrester.

Selon la définition du géographe Peter Haggett, « **un modèle est une représentation schématique de la réalité élaborée en vue d'une démonstration** »⁴³. En suivant l'analyse de François Durand-Dastès⁴⁴, on peut expliciter cette définition en distinguant trois points :

- en tant que représentation schématique, un modèle est une simplification qui aide à comprendre la réalité. Le modèle est une abstraction ;
- le modèle est une représentation élaborée, une construction intellectuelle. Il est issu de la réalité et permet d'y revenir, mais il ne prétend pas coïncider avec elle ;
- un modèle est toujours « créé pour un propos déterminé »⁴⁵. « Orienté vers une démonstration, un modèle a une double valeur heuristique et didactique »⁴⁶. Il est heuristique quand il sert à confirmer ou infirmer des hypothèses, à comprendre des propriétés. Il est didactique quand il est utilisé pour exposer le fonctionnement d'un processus.

Notre objectif est de construire un outil qui permette de présenter graphiquement un ensemble de données. Cet outil prendra la forme d'un modèle. Il possédera donc les caractéristiques d'un *modèle décisionnel* selon la terminologie de Bernard Walliser :

⁴² Jay W. FORRESTER, 1979. - *Dynamique urbaine*. - Paris : Economica (Economie publique de l'Aménagement et des transports). - p. 135.

⁴³ « A model may be described as simplified version of reality built in order to demonstrate [...] ». - Peter HAGGETT, Andrew S. CLIFF, Allan FREY, 1965. - *Locational models*. - London : Arnold.- p. 17. (C'est nous qui soulignons).

⁴⁴ François DURAND-DASTÈS, 1992. - « Les Modèles en Géographie ». - p. 311. - in Encyclopédie de Géographie. - sous la dir. de Antoine Bailly, Robert Ferras, Denise Pumain. - Paris : Economica.

⁴⁵ Jay W. FORRESTER, 1979. - *op. cit.* - p. 135.

⁴⁶ François DURAND-DASTÈS, 1992. - *op. cit.*

un modèle décisionnel a pour fonction de « fournir à un décideur des informations lui permettant d'éclairer une décision visant à modifier le système »⁴⁷.

Il faut noter que la décision en question peut être celle de ne rien faire, c'est-à-dire de décider de conserver le système tel quel.

Le modèle décisionnel n'a pas pour vocation de fournir à lui seul tous les éléments nécessaires à la prise de décision. Son rôle est d'apporter des informations utiles pour le problème posé. Le développement des méthodes multicritères d'aide à la décision⁴⁸ a montré l'intérêt, pour les décisions importantes, d'intégrer des critères multiples qui peuvent être parfois antagonistes. On ne peut prétendre produire la totalité des informations nécessaires en ne mobilisant qu'un seul critère. En matière de choix d'infrastructures de transport, on l'a vu, l'Aménagement produit seulement une partie des critères mobilisés pour la prise de décision.

Dans le cadre de cette thèse, nous nous proposons d'élaborer un outil qui permette la lecture de scénarios à l'aune de critères d'Aménagement. Il s'agit de construire un outil qui puisse s'insérer dans un processus décisionnel, un modèle qui fournisse des éléments qui permettent d'éclairer la décision.

Le mode d'utilisation des modèles décisionnels est la simulation, c'est-à-dire l'exploration des évolutions hypothétiques.

I. *La simulation*

Simuler, pour Edmond Couchot, c'est construire un modèle et l'expérimenter à diverses fins de manière à « anticiper le devenir des choses »⁴⁹. Selon cette définition, « le modèle est le moteur même de la simulation »⁵⁰. Les « diverses fins » qui orientent la simulation correspondent aux « propos déterminés »⁵¹ pour lesquels les modèles sont créés. Le but peut être l'exploration d'un champ inconnu ou bien la démonstration d'une hypothèse.

Une approche utilisant la simulation dans une démarche prospective permet d'élaborer un outil d'aide à la décision. Le but est de simuler des décisions hypothétiques et surtout de fournir des indications sur les conséquences de ces

⁴⁷ Bernard WALLISER, 1977. - *Systèmes et modèles*. - Paris : Seuil. - p. 191.

⁴⁸ Cf. : Bernard ROY, 1985. - *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. - Paris : Economica. ainsi que : Alain SCHÄRLIG, 1985. - *Décider sur plusieurs critères*. - Lausanne : Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.

⁴⁹ Edmond COUCHOT, 1988. - *Images*. - Paris : Hermès. - p. 212.

⁵⁰ *Ibid.* - p. 214.

⁵¹ Voir page 14, « Les modèles ».

actions. La démarche de référence est celle décrite par Jean-Louis Le Moigne⁵² qui consiste à décider non en **connaissance des causes**, mais en **connaissance des conséquences**.

Il faut noter que la simulation est le plus souvent mise en œuvre à l'aide d'ordinateurs. Cela signifie que l'on construit le modèle décisionnel « avec des modèles langagiers, ou, plus exactement, avec des modèles (des algorithmes) qui s'énoncent – et se pensent – à l'aide de langages formalisés »⁵³. L'utilisation de l'outil informatique influence fortement l'établissement du modèle : l'ordinateur sert à faire fonctionner le modèle, mais surtout, il est utilisé pour le construire. Comme l'écrit Sylvie Rimbart, « c'est un aspect nouveau de cette fin de siècle que de voir les techniques exercer des pressions sur la réflexion intellectuelle »⁵⁴.

Les modèles informatisés autorisent un mode de fonctionnement qu'on appelle interactif. Pour Edmond Couchot, « un modèle interactif est un modèle qui porte en lui une potentialité expérimentale quasi infinie, et c'est en ce sens seulement qu'il peut devenir une simulation efficace du réel »⁵⁵. Le modèle interactif permet « d'actualiser un nombre extrêmement grand d'aspects ou d'images de ce réel, il permet d'automatiser cette épreuve, d'expérimenter des solutions différentes, de faire des essais ; il permet d'éprouver le modèle. C'est donc à la fois une représentation symbolique du réel, de ses lois [...] et une potentialité d'expérimentations symboliques effectuelles, éprouvables, par l'ordinateur. »⁵⁶

Nous avons défini les modèles ainsi que leur mode d'utilisation. Parce que l'objet de l'Aménagement est l'espace, les modèles que l'aménageur utilise sont très souvent liés à des représentations de l'espace. Nous abordons maintenant cette question.

⁵² Jean-Louis LE MOIGNE, 1977. - *La Théorie du système général*. - Paris : PUF. - p. 37.

⁵³ Edmond COUCHOT, 1988. - *op. cit.* - p. 213.

⁵⁴ Sylvie RIMBERT, 1992. - « Géographie et cartographie ». - p. 135. - in *Encyclopédie de Géographie*. - Paris : Economica.

⁵⁵ Edmond COUCHOT, 1988. - *op. cit.* - p. 215.

⁵⁶ *Ibid.*

Section 2 Les représentations de l'espace

« *Ce que je n'ai pas dessiné, je ne l'ai pas compris* ». Goethe.

« *Tout discours sur l'espace s'appuie sur une représentation de l'espace, c'est-à-dire une abstraction, un acte de création* »⁵⁷. Jean-Marie Huriot, Jacky Perreur et Isabelle Derognat.

Comme l'annonce très clairement Bernard Rouget dans l'introduction de sa thèse sur l'analyse spatiale en économie urbaine, « toute recherche d'une compréhension de la ville suppose une représentation, implicite ou explicite, de l'espace analysé »⁵⁸. La portée des résultats de la recherche en question dépend très largement du type de représentation adopté.

« *Prise dans un réseau de rapports sociaux, vivant dans un espace donné, chaque personne développe sa propre représentation de son cadre de vie qui permet de pratiquer et d'imaginer son pays, sa région, le monde* »⁵⁹. Antoine Bailly.

Les représentations peuvent être de trois ordres : les propositions, les modèles et les images. Les propositions s'expriment à l'aide du langage et permettent de représenter un niveau très général et/ou très abstrait. Par ordre de spécificité croissante, on classe en premier les propositions, qui sont de la sphère des représentations linguistiques, en deuxième les modèles, et en dernière position les images⁶⁰. Les images expriment les modèles, mais à travers une "vue" spécifique.

Les cartes sont des « représentations imagées de l'espace »⁶¹, mais elles sont aussi des modèles⁶². Les cartes sont des représentations qui participent de deux niveaux d'abstraction : ce sont des images et ce sont des modèles.

La carte devient une véritable technologie intellectuelle lorsque, comme l'affirme Pierre Lévy⁶³, indépendamment de sa présence concrète, son image mentale est utilisée par un individu pour évaluer la distance entre deux points d'un territoire, ou pour établir une stratégie quelconque. Même quand elle n'est physiquement plus là, la carte est devenue un élément essentiel des représentations mentales d'un individu.

⁵⁷ Jean-Marie HURIOT, Jacky PERREUR, Isabelle DEROGNAT, 1994. - *op. cit.* - p. 37.

⁵⁸ Bernard ROUGET, 1975. - *L'Analyse spatiale en économie urbaine*. - Thèse de doctorat d'état : Dijon. - p. 6.

⁵⁹ Antoine BAILLY, 1990. - « Les Représentations de la distance et de l'espace ». - *RERU*, n° 2. - p. 265.

⁶⁰ On retrouve le modèle pythagoricien qui oppose le *logos* à la géométrie.

⁶¹ Jean-Marie HURIOT, Jacky PERREUR, Isabelle DEROGNAT, 1994. - *op. cit.* - p. 40.

⁶² C. BOARD, 1967. - « Maps as models ». - p. 671-725. - in *Models in Geography* - éd. par Richard J. Chorley et Peter Haggett. - London : Methuen (University paperbacks).

⁶³ Pierre LÉVY, 1991. - *op. cit.* - p. 82.

Nous présentons ici la cartographie comme un outil pour l'Aménagement. Nous voyons ensuite l'exemple de l'imagerie médicale en tant qu'outil de diagnostic. Les grands principes de cette technique sont posés : ils rejoignent pour partie les préoccupations qui sont les nôtres. Nous abordons ensuite la notion d'image de synthèse. Cette technique émergente possède des caractéristiques spécifiques qui en font un support susceptible de constituer un outil décisionnel en Aménagement.

Pour Jean-Paul Sartre, « l'image n'est ni une illustration, ni un support de la pensée, mais qu'elle est elle-même pensée et qu'à ce titre elle comprend un savoir, des intentions »⁶⁴.

A. *La carte*

Nous voulons, à l'aide d'un modèle, apporter des informations utiles à la prise de décision pour l'Aménagement de l'espace et les transports. Nous allons maintenant développer certains aspects de la cartographie pour montrer en quoi les cartes sont utiles aux objectifs que nous nous sommes fixés. La carte constitue un outil privilégié au service de l'aménageur : elle permet de comprendre, d'expliquer et de simuler les structures spatiales.

Comme l'écrit Jean-Paul de Gaudemar, « la carte [...] reste ce qui a été inventé de mieux pour traduire concrètement toute pensée spatialisée »⁶⁵.

D'une manière très générale, toute carte est composée de deux ensembles distincts :

« l'ensemble des localisations, appelé contenant, qui correspond à l'étendue cartésienne, où les positions relatives des lieux peuvent être définies par des distances ou des directions »⁶⁶ ;

l'ensemble des attributs associés aux localisations. Ce sont « les caractéristiques des lieux, les liens entre ces lieux, les personnes qui vivent dans ces lieux »⁶⁷.

1. **Cartes d'étude, cartes de communication**

Dans le domaine des représentations cartographiques, une séparation importante apparaît suivant le but recherché : la cartographie d'étude s'oppose à la cartographie de communication :

⁶⁴ Jean-Paul SARTRE, 1940. - *L'Imaginaire*. - Paris : Gallimard.

⁶⁵ Jean-Paul de GAUDEMAR, 1992. - « L'Aménagement du territoire ». - p. 1036. - in Encyclopédie de Géographie. - Paris : Economica.

⁶⁶ Colette CAUVIN, 1984 b. - *op. cit.* - p. 87.

⁶⁷ *Ibid.*

la cartographie de communication est destinée au plus grand nombre. Le critère essentiel est la transmission du message. Pour obtenir une bonne transmission du message, l'accent est mis sur la lisibilité. C'est une cartographie didactique ;

la cartographie d'étude est utilisée pour « la recherche de faits organisateurs de l'espace, elle participe à la démarche d'analyse »⁶⁸. Elle procède d'une démarche heuristique. Cette cartographie est destinée à l'usage d'un public averti : elle est destinée « à un nombre restreint de lecteurs, déjà informés des choix, prêts à faire l'effort d'apprendre à décrypter une légende complexe, pourvu qu'elle alimente bien leur problématique »⁶⁹.

Le propos de ce travail est de construire un outil cartographique qui puisse s'insérer dans un processus d'aide à la décision. Dans ce sens, nous insisterons beaucoup plus sur la dimension heuristique que sur les aspects didactiques du modèle.

2. La carte, outil d'aide à la décision

François Plassard et Jean-Louis Routhier proposent une analyse de l'utilisation des représentations graphiques dans les processus d'aide à la décision⁷⁰. Ils estiment que « l'outil graphique peut [...] devenir un instrument du dialogue entre le technicien qui propose des éléments d'évaluation et le décideur qui devra choisir en dernier ressort »⁷¹. A condition d'être lisible, la carte est utilisable en tant qu'outil d'évaluation des projets.

Le rôle des cartes est de « donner une représentation simplifiée des conséquences de telle ou telle décision , et de conduire ainsi le décideur à maintenir sa décision ou, au contraire, à la modifier »⁷². En ce sens, la carte est un outil de simulation.

La carte – en tant que représentation graphique – possède au moins deux niveaux de lecture : on perçoit globalement l'aspect général du caractère ou du phénomène représenté, mais aussi, dans le détail, ses variations spatiales. Le but de la carte est de fournir « une vue synthétique du phénomène représenté »⁷³.

3. Exploitation des cartes

Les informations auxquelles les cartes donnent accès sont d'une très grande richesse. Le GIP-RECLUS et le S.T.U. ont mené en 1989 une étude sur l'exploitation des

⁶⁸ *Chiffres et cartes : une union réfléchie.* - S.T.U./GIP RECLUS, 1989. - Paris : S.T.U. - p. 8.

⁶⁹ *Ibid.* - p. 8.

⁷⁰ François PLASSARD, Jean-Louis ROUTHIER, 1987. - *op. cit.* - Lyon : A.R.T.U.R.

⁷¹ *Ibid.* - p. 4.

⁷² *Ibid.* - p. 9.

⁷³ *La Cartographie des transports urbains.* - C.E.T.U.R./GIP RECLUS, 1992. - Bagneux : C.E.T.U.R./GIP RECLUS. - p. 5.

cartes comme support pour l'aide à la décision. Il apparaît d'abord que « cartographe c'est montrer des différences dans l'espace et rendre perceptibles d'un seul coup d'œil les structures qu'introduisent ces différences »⁷⁴.

Ensuite, « une carte montre des structures spatiales qui prennent d'autant plus de sens que le lecteur sait y reconnaître quelques principes organisateurs de l'espace »⁷⁵. Il peut s'agir de la rupture, du contact, de la diffusion, d'un système centre/périphérie, d'un système d'axe, etc.

Pour parvenir à un tel niveau de lecture « un système de repères pour la localisation, l'identification des lieux est probablement indispensable »⁷⁶. Il est essentiel que les principaux repères géographiques⁷⁷ de l'aire considérée soient identifiables. Toute carte est conventionnelle : elle fait référence explicitement à des repères et des conventions de représentation⁷⁸.

Les disciplines dont le but est l'action utilisent des outils de diagnostic. Les aménageurs utilisent essentiellement des cartes pour représenter, analyser et comprendre l'espace. Les médecins eux aussi utilisent des images pour établir des diagnostics. L'imagerie médicale est un exemple très illustrateur du rôle de l'image et de l'ordinateur dans un processus décisionnel.

B. L'exemple de l'imagerie médicale

Dans le domaine de la médecine, un ensemble de nouvelles techniques d'aide au diagnostic à partir d'images de l'intérieur du corps humain apparaît depuis plusieurs dizaines d'années⁷⁹. La radiographie, qui fut la première "imagerie", permet de projeter – en ombres chinoises – une image de l'intérieur du corps sur un film. Tous les plans sont superposés et le contraste est faible. Le scanner X est apparu au début de la décennie 1970. Il produit des coupes transversales du corps humain, avec un très fort contraste et une résolution spatiale extrêmement fine. L'imagerie par résonance magnétique nucléaire (IRM) est une autre technique d'imagerie en trois dimensions qui apporte des informations différentes⁸⁰ et qui entre en concurrence

⁷⁴ *Chiffres et cartes*. - op. cit. - p. 8.

⁷⁵ *Ibid.* - p. 9.

⁷⁶ *Ibid.*

⁷⁷ Le découpage territorial, les frontières physiques, les fleuves, etc.

⁷⁸ L'orientation Nord/Sud, les océans colorés en bleu clair, le relief estompé sont des exemples de conventions cartographiques.

⁷⁹ Ce paragraphe reprend largement les arguments développés dans : Maurice LAVAL-JEANTET, 1990. - « Imagerie médicale ». - in *Encyclopædia Universalis*, Tome corpus 11. - p. 931.

⁸⁰ Le scanner X donne une « carte anatomique avec masque osseux », alors que l'IRM montre le squelette en transparence. D'autre part le scanner X n'autorise pas toutes les coupes possibles, à la différence de l'IRM. Par contre, avec la première technique, le temps d'acquisition est de quelques secondes au lieu de quelques minutes pour l'IRM, ce qui rend le scanner X plus efficace pour la visualisation des organes mobiles (thorax ou abdomen).

avec le scanner X pour certaines indications⁸¹. Ces deux procédés permettent d'établir de véritables cartes de l'intérieur du corps humain, où l'on distingue tissus, organes et autres tumeurs. Simultanément, d'autres techniques de visualisation plus spécifiques – comme la scintigraphie ou la mammographie –, ou moins lourdes à mettre en oeuvre et aussi moins chères – l'échographie par exemple – ont vu le jour.

L'imagerie médicale, malgré le coût très élevé des appareils et des examens⁸², a engendré des économies considérables. Elle est une des causes de la baisse de la durée moyenne d'hospitalisation⁸³. D'autre part, il existait auparavant des interventions chirurgicales dans un unique but d'observation : elles ont totalement disparu⁸⁴. Il est impossible de nier les avantages qu'offre l'imagerie médicale et le progrès qu'elle représente pour la Médecine.

Médecine et chirurgie ont profondément changé sous l'effet de l'apparition de ces nouvelles images⁸⁵. D'abord par l'irruption de la machine dans le diagnostic. Le médecin demeure « lecteur et arbitre, mais c'est l'informatique qui révèle l'anatomie »⁸⁶. Un changement qui est aussi dû au choix, au tri que doit faire le médecin parmi un nombre très important d'images, une masse considérable d'informations.

« Le maître mot de l'imagerie demeure son "interprétation", autour de laquelle gravitent les connaissances du "lecteur" aussi bien que les hypothèses particulières du patient examiné. La réflexion clinique relie les symptômes et doit composer avec une problématique de l'intégral, quitte à gommer parfois abusivement les particularismes. »⁸⁷ Maurice Laval-Jeantet.

L'établissement du diagnostic par imagerie repose sur le principe de "l'extrait interprété". Il y a là une remise en cause du postulat qui veut que soit disponible l'intégralité des informations obtenues.

L'imagerie médicale fait aujourd'hui partie intégrante des outils d'établissement du diagnostic en Médecine.

⁸¹ En particulier pour les indications qui nécessitent un examen du cerveau, de la moelle épinière, ou des os.

⁸² En 1995, un appareil d'IRM coûte une dizaine de millions de francs à l'achat, avec un prix de revient de 3000 francs par examen.

⁸³ Entre 1975 et 1985, la durée moyenne de séjour est passée de près de 20 jours à 5 en partie grâce aux nouveaux moyens de diagnostic.

⁸⁴ La "laparotomie exploratrice" consistait à ouvrir le ventre pour établir le diagnostic d'une lésion abdominale.

⁸⁵ Et notamment la microchirurgie qui n'a pu apparaître qu'avec des moyens de microscopie en temps réel. Le "contact direct" nécessaire à la perception, prend ici un sens assez large. En fait, le microscope ne fait que "prolonger" l'œil du chirurgien.

⁸⁶ Maurice LAVAL-JEANTET, 1990. - *op. cit.* - p. 931.

⁸⁷ *Ibid.*

Le développement de la modélisation et de la simulation doit beaucoup aux technologies, au rang desquelles l'informatique figure à une place éminente. Les images de synthèse qui mêlent modélisation, représentation et informatique peuvent servir à simuler le réel.

C. *Images de synthèse*

« L'expérimentation numérique [...] donne la possibilité non seulement de trouver la solution de certaines équations, de vérifier certaines hypothèses scientifiques, mais aussi d'en proposer une visualisation qui possède l'avantage d'être beaucoup plus vite et plus facilement interprétée par l'observateur qu'une longue suite abstraite de chiffres »⁸⁸. Edmond Couchot.

Par nos capacités sensorielles, nous sommes en mesure de saisir immédiatement et globalement les représentations graphiques, et notamment les représentations de l'espace, et de les interpréter d'emblée. C'est en particulier le cas pour les images calculées par ordinateur qui constituent le prolongement visible des modèles informatiques élaborés depuis plusieurs décennies. On parle alors d'*image de synthèse*.

1. Définition de l'image de synthèse

Selon la définition donnée par Edmond Couchot, « les images de synthèse sont des images entièrement calculées par ordinateur »⁸⁹.

Alors que toutes les méthodes de construction des images classiques utilisent un procédé optique⁹⁰ pour passer d'un objet – dans les domaines artistiques, on emploie plus volontiers le mot “sujet” – à son image⁹¹, l'image de synthèse, elle, est générée par un calcul effectué par un ordinateur.

Il ne faut pas confondre l'image de synthèse avec l'image numérique qui est aussi une image générée par ordinateur, mais issue d'une matrice de nombres. Pour construire les images numériques, il n'y a pas de processus de calcul proprement dit, mais seulement une lecture des données. Les images numériques sont la transcription (on parle de numérisation) sur ordinateur d'images classiques construites par un procédé

⁸⁸ Edmond COUCHOT, 1988. - *op. cit.* - p. 228.

⁸⁹ *Ibid.* - p. 11. - (c'est nous qui soulignons).

⁹⁰ Le procédé optique en question peut être l'œil humain, la lentille de l'appareil photographique, etc.

⁹¹ Dans l'histoire de l'art il est une exception notoire à l'application de ce principe. D'après l'analyse de Pierre Francastel, certaines formes de l'art abstrait existent sans lien avec un quelconque objet ou sujet. (Pierre FANCASTEL, 1964. - *Art et technique*. - Paris : Gonthier (Bibliothèque médiations). - p. 195. - 295 p.)

optique⁹². On retrouve sur la figure 2 le processus de construction des images optiques, des images numériques et des images de synthèse.

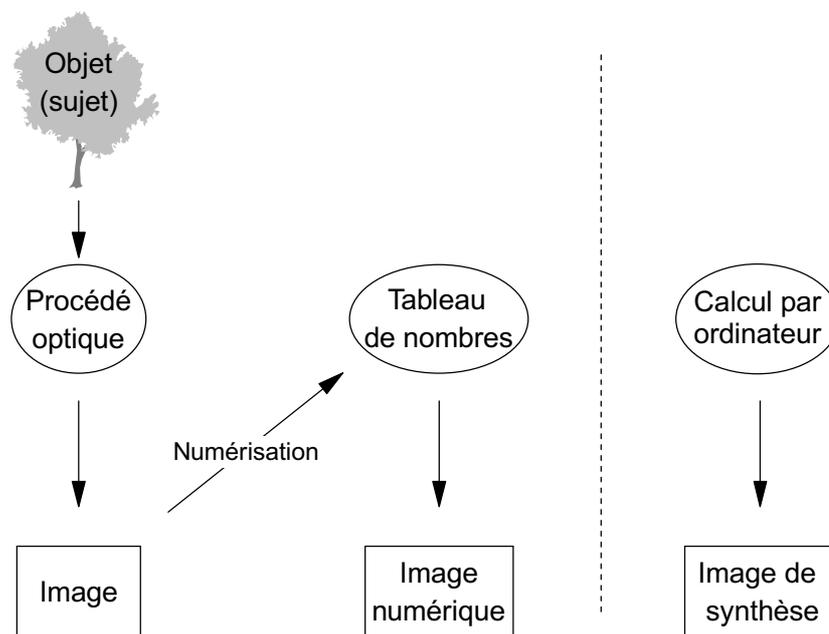


figure 2 : image, image numérique et image de synthèse

« Alors que les techniques précédentes, comme la photographie, le cinéma ou la télévision, consistent à enregistrer la trace lumineuse d'objets existants, la synthèse numérique donne à voir des objets, d'apparence réelle ou imaginaire, qui existent seulement sous forme de nombres »⁹³. Il n'y a ni objet, ni sujet "derrière" l'image de synthèse.

Les images de synthèse donnent à voir des objets qui sont d'apparence réelle, mais qui peuvent ne pas exister. La même technique peut être employée pour reconstruire l'image d'un objet existant. Dans le cadre d'un modèle décisionnel à base d'images de synthèse, on cherche à reproduire l'état réel et actuel d'un système, ainsi qu'un ou des états futurs hypothétiques, selon le principe de la simulation. Cela signifie qu'il existe bien un objet réel "derrière" l'image de synthèse produite. Comme l'écrit Sylvie Rimbert à propos d'une image de synthèse d'un paysage produite à partir d'un modèle numérique de terrain, « certes, on est parti de données observées [...], mais tout le reste de la procédure est artificiel »⁹⁴.

L'intérêt du processus de reconstruction de ces images est qu'il s'effectue entièrement sous le contrôle du modélisateur. Celui-ci peut intervenir à n'importe quelle étape de la construction pour obtenir des images d'un système légèrement

⁹² Les images de l'imagerie médicale ne sont en général pas des images de synthèse, mais des images numériques. Les techniques utilisées se basent le plus souvent sur le procédé optique.

⁹³ Edmond COUCHOT, 1988. - *op. cit.* - p. 11.

⁹⁴ Sylvie RIMBERT, 1992. - *op. cit.* - p. 148.

différent de son état réel. On obtient alors l'image d'une hypothèse faite sur l'évolution du système.

2. Images programmées

Les images de synthèse sont produites à partir d'une série d'instructions écrites dans un langage de programmation qui vont générer un calcul automatisé. Le recours à la programmation informatique est le point principal qui distingue, dans leur morphogenèse, les images de synthèse des autres images. On établit ainsi un lien direct entre un langage et une image.

Il faut remarquer que les dessins et les tableaux basés sur la perspective sont construits à partir des règles de la géométrie classique. En ce sens, il existe bien un lien entre l'image et un langage, en l'occurrence, entre la représentation en perspective et le langage formel de la géométrie. Mais ce lien est de nature différente ; il est plus indirect, moins immédiat, que le lien entre le langage de programmation et l'image de synthèse.

Les principales étapes de la construction des images de synthèse sont la modélisation et la visualisation. La première étape consiste à créer des formes bi ou tridimensionnelles, et la seconde, à traiter ces formes pour les rendre visibles sur l'écran ou sur d'autres dispositifs (sur papier via une imprimante ou un traceur). On peut adjoindre une troisième étape qui a pour but d'affiner la qualité des formes⁹⁵, ou plutôt de leur image, pour la rendre plus conforme à la réalité ou aux exigences de la construction du message. On constate que le but assigné à la modélisation influence fortement la construction de la méthode. La construction des images de synthèse s'inscrit tout à fait dans la logique de la définition du modèle selon Peter Haggett⁹⁶.

3. Images interactives

Du fait de leur caractère programmé et de la relative rapidité de leur réalisation par les moyens techniques⁹⁷, les images de synthèse autorisent un rapport interactif et dynamique avec l'utilisateur. En fonction du résultat proposé à l'écran, le manipulateur peut choisir de modifier un ou plusieurs paramètres d'affichage, transformant ainsi le programme donnant naissance à l'image. Cet échange s'établit sur un mode conversationnel qui s'apparente fortement aux processus de simulation et qui éloigne radicalement le concept de l'image numérique de celui de l'image usuelle.

⁹⁵ Par exemple à l'aide d'algorithmes dits *de lissage*.

⁹⁶ Cf. page 19.

⁹⁷ La réalisation d'images de synthèse sur un ordinateur établit la transformation d'un ensemble de données par un processeur (qui peut être le processeur principal ou un processeur spécifique, par exemple un processeur graphique) en une image qui s'affiche sur l'écran de la machine.

Ainsi, « le domaine des images de synthèse interactives explore le couplage entre l'intuition humaine, aidée par des indications visuelles, et la puissance de calcul des ordinateurs »⁹⁸.

4. « Nouvelle catégorie du réel »

« Certes, on assiste à la naissance d'une nouvelle image, de nouveaux processus de génération et de distribution de l'image rompant radicalement avec les processus précédents ; certes, on remarque que cette façon de faire l'image affecte le statut même de l'auteur et du regardeur du sujet, mais ce qui semble le plus étonnant, c'est l'apparition d'entités hybrides, mi-image mi-objet, c'est-à-dire d'une nouvelle catégorie de Réel, d'une sorte d'univers parallèle entre l'image et l'objet, entre le monde symbolique et le monde physique. »⁹⁹ Edmond Couchot.

L'image de synthèse n'est pas la représentation d'un objet. Elle constitue seulement une "vue" d'un monde formel et immatériel. Il n'existe pas de représentation en tant que telle de cette réalité intermédiaire, mais des perspectives, des points de vue particuliers. Le statut du modèle est difficile à concevoir parce qu'on perçoit les images d'un objet qui n'a pas de réalité concrète. Le monde formel ainsi construit n'étant pas nécessairement statique, les images peuvent retracer son évolution ou ses diverses évolutions hypothétiques.

Dans le domaine de la cartographie, en suivant cette analyse, on est amené à distinguer, comme le fait Sylvie Rimbart, les « cartes réelles »¹⁰⁰ qui sont fixées sur papier, les « cartes virtuelles »¹⁰¹ qui sont contenues dans les données informatiques, et les « cartes temporaires »¹⁰² qui sont visualisées sur l'écran de l'ordinateur.

5. De la représentation au modèle

Jusqu'à présent – si on ne tient pas compte de certains courants de l'art abstrait¹⁰³, ou d'oeuvres d'artistes comme Maurice Cornelis Escher avec ses mondes réels impossibles¹⁰⁴ – l'image était une représentation du monde réel. Les procédés optiques nous retransmettaient un point de vue du monde. Avec les images de synthèse, l'image donne à voir un modèle préconçu. Elle permet de visualiser ce modèle au

⁹⁸ « The field of interactive computer graphics [...] explores the coupling of human intuition, aided by visual clues, with the computational power of computers. » - James W. CLARK, 1977. - « Time-distance transformation of transportation networks. » - *Geographical analysis*, USA, vol. 9. - p. 195.

⁹⁹ Edmond COUCHOT, 1988. - *op. cit.* - p. 228. - (C'est l'auteur qui souligne).

¹⁰⁰ Sylvie RIMBERT, 1992. - *op. cit.* - p. 129.

¹⁰¹ *Ibid.*

¹⁰² *Ibid.*

¹⁰³ Pierre FANCASTEL, 1964. - *op. cit.* - p. 195.

¹⁰⁴ « Maurice Cornelis Escher ». - in *Encyclopædia Universalis*, 1996, Thesaurus Index. - p. 1248.

moyen d'un langage informatique. Le lien de retransmission de l'objet à l'image a disparu. Désormais, on peut synthétiser une image *ex nihilo*.

La distinction entre la représentation et le modèle est d'importance parce que « c'est celle qui sépare le monde de la nature de la langue des hommes »¹⁰⁵.

Pierre Lévy¹⁰⁶ développe la notion d'*idéographie dynamique* qui est en fait une généralisation de la notion d'image de synthèse. Au sein de l'idéographie dynamique, il distingue :

- l'image, qui est ce que l'on voit à l'écran à un moment donné.
- Le modèle qui est un ensemble structuré d'idéogrammes, c'est-à-dire une collection d'objets avec toutes leurs propriétés et les règles qui régissent leurs interactions.

Ce système composé de l'image et du modèle est modifiable de deux façons :

- pour intervenir sur l'image, on peut utiliser divers outils d'interaction (modifier une variable, activer ou désactiver un objet, etc.) ou de mise en scène (combinaison de séquences d'images). Cette intervention sur l'image correspond à l'exploration d'un modèle ; explorer un modèle, c'est décliner les images et les enchaînements d'images qui expriment un répertoire d'idéogrammes ;
- pour intervenir sur le modèle (ajouter, supprimer un objet, ou modifier ses paramètres fondamentaux), on utilise ce que Pierre Lévy appelle le "générateur d'idéogrammes". En d'autres termes, l'intervention sur le modèle passe par une modification du programme qui lui donne corps.

On affirme à travers cette hiérarchie très nette que « le modèle correspond à un niveau plus fondamental, plus structurel, que celui de l'image »¹⁰⁷. Cette analyse rejoint la hiérarchie des représentations – propositions, modèles et images – selon leur degré de spécificité.

Ceci implique que dès que l'on dépasse un certain niveau de complexité, un modèle s'exprime par plusieurs images ou plusieurs séquences d'images.

On constate aussi que les outils servant à passer d'une image à l'autre ne sont pas les mêmes que ceux qui servent à passer d'un modèle à l'autre. On explore les différentes images pour comprendre le modèle, et on modifie le modèle pour explorer et comprendre ses évolutions possibles.

¹⁰⁵ Philippe QUÉAU, 1986. - *Eloge de la simulation*. - Seyssel : Champ Vallon/I.N.A. - p. 186.

¹⁰⁶ Pierre LÉVY, 1991. - *L'Idéographie dynamique*. - p. 79.

¹⁰⁷ *Ibid.*

6. La subjectivité

Nous avons évoqué dans un paragraphe précédent la puissance de l'imagerie médicale. Le médecin doit sélectionner parmi un grand nombre d'images un "extrait interprété". La sélection est alors soumise à des critères médicaux.

Les images de synthèse sont programmées et elles sont interactives : elles sont donc modifiables instantanément. Le programme « contient "en puissance" d'autres images, une infinité générative d'images »¹⁰⁸.

Là aussi, le manipulateur, le créateur est placé face à une production pléthorique et doit réaliser un « échantillon judicieux »¹⁰⁹. Alors que l'imagerie médicale est soumise à des critères médicaux donc relativement objectifs et précis, l'image de synthèse n'est contrôlée que par la volonté du créateur et orientée en fonction de l'image recherchée. C'est bien un caractère éminemment subjectif qui préside à l'élaboration des images de synthèse. C'est la contrepartie de la puissance générative des images de synthèse.

Il faut cependant tempérer le caractère subjectif des images de synthèse. En effet, tous les paramètres de construction des images qui constituent le programme sont compréhensibles pour un lecteur averti. En reproduisant strictement la même série d'instructions, on aboutit à une image rigoureusement identique. En ce sens, on peut parler d'une certaine objectivité, puisque le procédé de construction est lisible. Les images de synthèse obéissent à une construction objectivée, mais elles restent soumises à la volonté du créateur et sont donc éminemment subjectives. Si les images obtenues peuvent donner lieu à interprétations, tel n'est pas le cas du processus de construction.

¹⁰⁸ Philippe QUÉAU, 1986. - *op. cit.* - p. 5.

¹⁰⁹ *Ibid.* - p. 212.

7. Le rôle de l'image de synthèse

Pierre Lévy¹¹⁰ assigne deux fonctions à l'idéographie dynamique¹¹¹ :

premièrement, celle de traduire visuellement et de communiquer des modèles mentaux "préexistants" à son usage (dans l'idéal, les représentations construites au moyen de l'idéographie dynamique seraient homologues – l'identité est impossible à atteindre – de celles des modèles mentaux internes) ;

deuxièmement, celle de servir de point d'appui à de nouveaux types de représentations mentales et de raisonnements sur ces représentations. Il s'agit dans ce cas de fournir de nouveaux signes à l'activité mentale.

Cette analyse met l'accent sur l'aspect novateur des images de synthèse et en particulier sur la relation qui s'établit entre le modélisateur et les représentations qu'il produit. En tant que modèle et en tant qu'outil décisionnel, l'image de synthèse est munie d'autres fonctions spécifiques que nous avons énoncées précédemment.

Après avoir défini les modèles et la simulation, nous nous sommes attachés à présenter la cartographie en tant qu'outil au service de l'aménageur. L'imagerie médicale est un exemple révélateur de l'utilisation de l'image pour l'établissement du diagnostic. Les images de synthèse sont construites à partir de modèles calculés par ordinateur. Elles peuvent servir de base à la création d'outils de simulation pour l'Aménagement, comme nous allons le voir.

Section 3 Problème spécifique de recherche

Le travail de recherche dont l'aboutissement est le présent document a débuté en 1992. Philippe Mathis, professeur au CESA, et directeur du laboratoire de recherche me proposa alors – dans le cadre d'un contrat de recherche passé par la DATAR portant sur les réseaux de transport à grande vitesse de l'arc Atlantique¹¹² – de développer un principe de cartes en relief dont il avait eu l'idée. La création de ce

¹¹⁰ Pierre LÉVY, 1991. - *op. cit.* - p. 83.

¹¹¹ Rappelons que cette expression recouvre, dans les travaux de Pierre Lévy, une généralisation du concept d'image de synthèse.

¹¹² Contrat pour la DATAR intitulé « Transport à grande vitesse et structuration de l'arc atlantique ». La recherche a suivi une approche prospective d'aménagement de l'espace, construite autour d'hypothèses de développement des réseaux de transports à grande vitesse, autoroute et TGV. Outre le rapport final produit en 1993, cette recherche a donné lieu à la publication en 1993 d'un article intitulé « Les grandes vitesses », dans l'ouvrage Circuler demain, sous la direction de Alain Bonnafous, François Plassard et Bénédicte Vulin, puis en 1996 d'un second article, « La Stratégie des réseaux de transport dans le grand Ouest », paru dans un ouvrage publié sous la direction d'Yves Morvan, L'Entreprise Atlantique.

nouveau type de représentation a été motivée par une insatisfaction quant aux cartes existantes en tant qu'outil pour l'Aménagement.

En effet, la plupart des modèles donnent des résultats chiffrés. Les modèles graphiques, qu'il s'agisse des cartes thématiques, des "arbres à boules" utilisés à la SNCF, ou des anamorphoses, sont insuffisants pour décrire tous les phénomènes spatiaux qui apparaissent lors de la création de nouvelles infrastructures de transport. Le premier chapitre de la deuxième partie de la thèse (à partir de la page II-144) traite des principaux types de représentation et démontre la nécessité de produire de nouvelles cartes. Nous ne développons pas ce point maintenant, mais nous présentons dès à présent le problème spécifique de recherche parce qu'il sous-tend tout le développement de la thèse.

A partir de la problématique du développement du réseau des transports à grande vitesse, mon travail a consisté à donner forme à l'idée de départ, en élaborant un logiciel de cartographie en trois dimensions¹¹³. La première phase du travail s'est inscrite dans le cadre d'un DEA¹¹⁴.

L'application à l'arc Atlantique et les suivantes – l'impact de la future ligne à grande vitesse de Tours à Bordeaux¹¹⁵, le développement du réseau TGV en Europe¹¹⁶ – ont été l'occasion de préciser le principe général, d'améliorer le principe de construction, d'explorer les résultats et de les analyser.

Tout le travail est orienté par le problème spécifique de recherche. La rigueur du raisonnement imposerait de ne présenter la question spécifique de recherche qu'après avoir explicité la lacune existant dans la connaissance actuelle. Le plan du corps principal de la thèse est construit en ce sens : l'apport essentiel du travail fait l'objet du dernier chapitre.

¹¹³ Le logiciel MAP, conçu par l'auteur et Philippe Mathis, a été élaboré au laboratoire du CESA avec l'aide de Laurent Chapelon, Sébastien Larribe, Kamal Serrhini et Hervé Baptiste (Cf. en annexe "Présentation du logiciel MAP", page 209).

¹¹⁴ Alain L'HOSTIS, 1993 a. - *Cartes multimodales différentielles*. - mémoire de DEA : Sciences de la Ville, option Aménagement et Urbanisme : Université de Tours. - 85 f. dactyl.

¹¹⁵ En 1993-1994 : contrat pour la Direction Régionale de l'Équipement Poitou-Charentes sur la simulation de l'impact de la réalisation future de la ligne ferroviaire à grande vitesse entre Tours et Bordeaux sur la région Poitou-Charentes. Dans cette étude nous avons évalué un ensemble d'hypothèses de tracés de la ligne ainsi que d'hypothèses de localisation de la future gare-bis de Poitiers. Après le rapport final d'octobre 1994, la méthode mise au point pour ce contrat a été exposée au colloque INRETS-TRACES « Grandes infrastructures de transport et territoires, Lille, 8-9 juin 1995 ». (à paraître).

¹¹⁶ En 1994 : contrat pour la DATAR intitulé « Le transport multimodal terrestre des personnes en Europe » pour simuler des hypothèses de développement des réseaux à grande vitesse en Europe continentale, et mettre au point le modèle de prospective élaboré avec Laurent Chapelon et Philippe Mathis. Le rapport final date de juin 1994. Les résultats ont été présentés au séminaire DATAR « Prospective des transports et des territoires à l'horizon 2015 », séance n° 5, « Accessibilité et desserte du territoire, les transports de personnes », le 19 janvier 1994, à Paris.

Cependant, pour rendre plus lisible le développement du propos, nous avons choisi de présenter dès maintenant le principe des représentations que nous avons construites. C'est une présentation succincte ; elle sera approfondie dans le dernier chapitre de la thèse.

A. Principe de construction

Nous nous situons dans la lignée de la cartographie produite par ordinateur, qui, comme le montre Sylvie Rimbert, sert à « figurer des hypothèses spatiales ; elle permet de montrer les effets bi-dimensionnels de modèles dont on peut faire varier les paramètres, et donc, elle fait entrer l'expérimentation dans certains aspects des sciences sociales »¹¹⁷.

Nous fixons deux contraintes à la représentation :

- par souci de cohérence, nous voulons construire une représentation où la longueur des liaisons entre les villes soit proportionnelle à la durée nécessaire pour les parcourir ;
- nous souhaitons aussi conserver les positions relatives des villes, de manière à préserver la conformation topographique des lieux¹¹⁸ présente dans les cartes conventionnelles, et ainsi réduire les perturbations visuelles existant sur d'autres types de représentations, comme les anamorphoses, lors de la lecture de la carte.

Entre deux points où une liaison existe, nous traçons une ligne. La ligne est droite (rectiligne) si l'arc appartient au mode de transport le plus performant. Dans le cas contraire, la ligne est brisée dans la troisième dimension, de telle sorte que sa longueur dans la représentation soit proportionnelle à la durée effective du trajet.

La structure complexe obtenue est en trois dimensions et est utilisée pour générer une surface en relief. Nous construisons ensuite des "vues" de cette surface complexe.

B. Un exemple

L'espace français a été modélisé sous la forme de 51 noeuds qui correspondent aux villes principales et à celles qui constituent des noeuds importants dans les réseaux de transport.

Les réseaux de transport sont modélisés sous la forme de liaisons entre les 51 noeuds.

¹¹⁷ Sylvie RIMBERT, 1992. - *op. cit.* - p. 154.

¹¹⁸ La position des lieux suit la projection conique de Lambert pour l'application qui est traitée ici.

La **Erreur! Source du renvoi introuvable.**, en page **Erreur! Signet non défini.**, montre l'état actuel (1996) du réseau routier (en vert), du réseau des autoroutes (en bleu) et de celui des lignes à grande vitesse du TGV (en rouge). Nous ne montrons pas le réseau ferroviaire classique car les vitesses moyennes qu'il procure sont trop proches de celles offertes par l'autoroute. Montrer un quatrième réseau risquerait d'alourdir la représentation.

Il faut noter que les teintes de grisé ont seulement pour rôle d'exprimer le relief de la carte. L'intensité du gris ne traduit pas l'intensité des pentes, mais l'ombrage d'une structure à facettes éclairée par une source lumineuse imaginaire.

Tous les commentaires et les explications nécessaires seront apportés dans le dernier chapitre de la thèse (à partir de la page II-181).

C. *Hypothèse*

Nous nous situons dans le cadre de l'Aménagement. Nous étudions les effets des réseaux de transport sur l'espace.

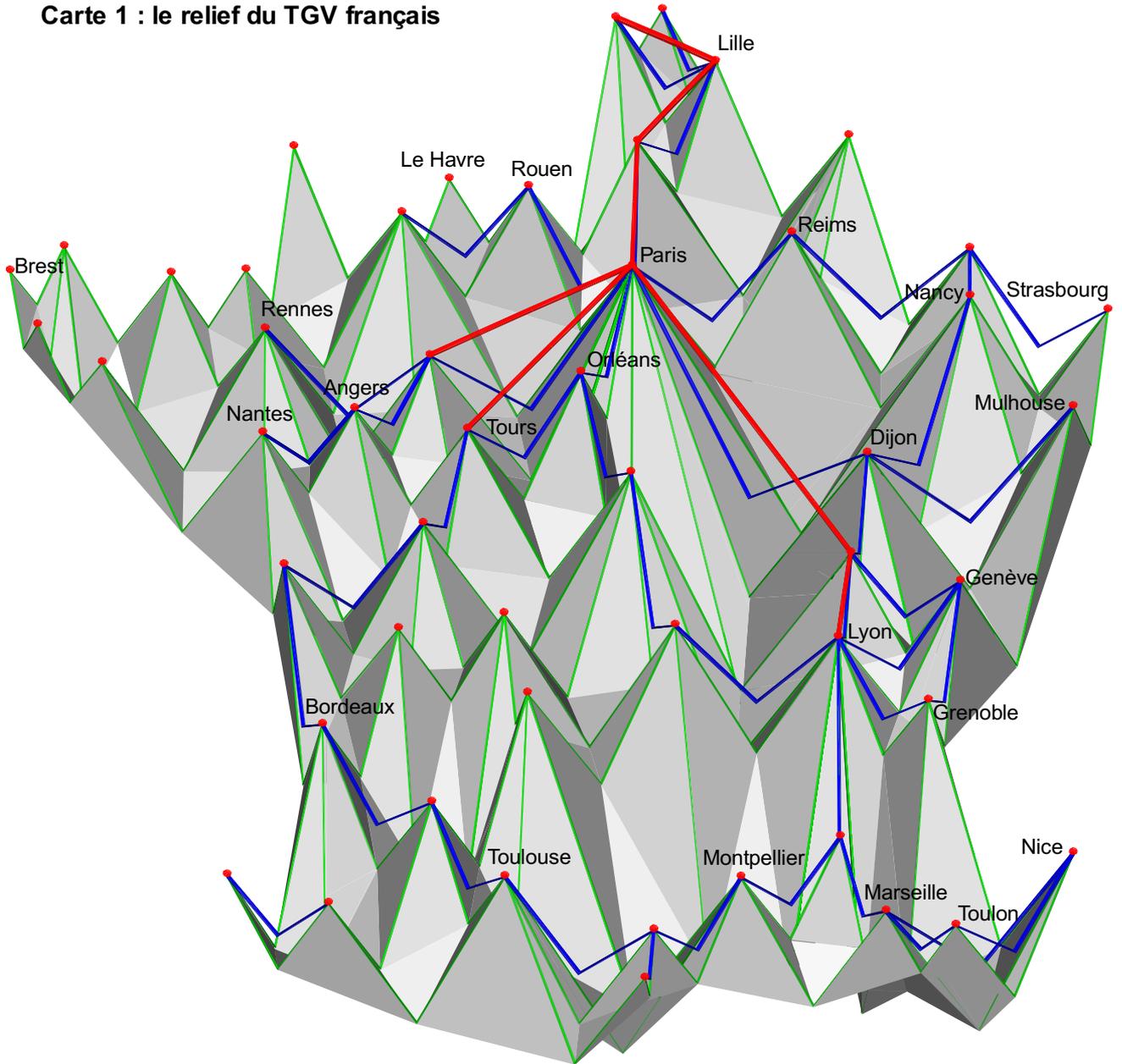
Dans le cadre de cette thèse, nous avons construit un modèle qui apporte des éléments éclairant la décision. Le modèle décisionnel doit répondre à quatre objectifs :

- la recherche. Cet aspect correspond aux "nouveaux types de représentations" qu'évoque Pierre Lévy au sujet des images de synthèse. Le modèle construit doit apporter une connaissance nouvelle sur l'espace de l'Aménagement et les transports. Cet aspect recouvre la dimension heuristique de tout modèle ;
- le diagnostic correspond à la fonction classique des outils décisionnels définie par François Plassard et Jean-Louis Routhier, qui est d'assurer une connaissance du monde réel – une connaissance de l'état actuel –, qui mette en évidence l'insatisfaction à l'origine de la démarche de l'Aménagement ;
- la fonction d'évaluation – toujours dans la lignée des orientations définies par François Plassard et Jean-Louis Routhier – consiste à fournir de l'information concernant des hypothèses établies par ailleurs, ou élaborées à partir du diagnostic ;
- la communication correspond à la dimension didactique des modèles. Dans un processus décisionnel, le critère de lisibilité est essentiel. Les informations apportées par le modèle doivent pouvoir être comprises et analysées par les acteurs qui participent à la prise de décision.

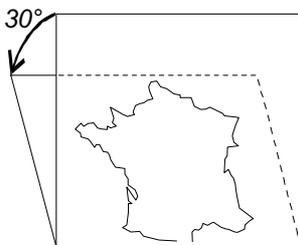
L'objet de cette thèse est de vérifier l'hypothèse selon laquelle les cartes en relief d'espace-temps constituent un outil opératoire d'aide à la décision – un modèle décisionnel – en Aménagement de l'espace. L'hypothèse est validée si les cartes en relief d'espace-temps permettent la fonction de diagnostic, constituent un outil de recherche et d'analyse exploitable dans une démarche prospective, et sont un outil de communication.

La question principale de recherche peut être formulée ainsi : en quoi les représentations en relief constituent-elles un outil décisionnel dans le domaine des transports et dans celui de l'Aménagement de l'espace ?

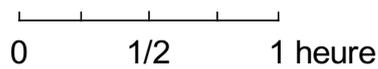
Carte 1 : le relief du TGV français



Angle de vue



Echelle approximative d'espace-temps



Réseau :

- TGV
- Autoroute
- Route

Conclusion : suivi logique du texte

L'Aménagement est une action qui vise à modifier l'état présent de l'espace pour un état futur qui est jugé préférable. Cette action s'inscrit dans de grandes orientations politiques qui peuvent être la recherche de l'équité spatiale, ou d'un développement équilibré.

L'Aménagement, en tant qu'action, commence par une démarche d'analyse pour construire un diagnostic, et se poursuit par une anticipation de l'état futur souhaité. La démarche prospective, qui consiste à élaborer des hypothèses d'actions éventuelles et à évaluer leurs conséquences, est associée à une dimension prescriptive au cours de laquelle l'aménageur émet des propositions d'actions qui doivent être cohérentes avec les orientations politiques fixées.

Le développement des moyens de transport est un élément essentiel de toute politique d'Aménagement du territoire. Or, les réseaux de transport, dont l'existence est due à l'hétérogénéité de l'espace, génèrent des disparités spatiales qui s'opposent à l'objectif de la politique d'Aménagement qu'ils sont censés servir.

En matière d'investissements d'infrastructures de transport, la puissance publique exerce seule la fonction de décideur, dans un contexte marqué par l'importance des coûts engagés, par la très longue durée des conséquences des choix, et par l'étendue spatiale de leurs répercussions.

Dans un tel contexte, il est indispensable de porter une attention particulière aux processus de prise de décision. L'aide à la décision consiste à apporter une information de type prospectif. Les trois grandes fonctions de l'aide à la décision sont le diagnostic, les propositions de projets et leur évaluation.

La question des critères de l'évaluation est cruciale pour les choix d'infrastructures. Le cadre général de l'évaluation est fourni par le calcul socio-économique. La question de la rentabilité économique d'un projet est importante, mais les objectifs d'Aménagement du territoire sont explicites dans les grandes orientations données dans la Loi d'orientation sur les transports intérieurs (LOTI) ou la loi d'orientation pour l'aménagement et le développement du territoire (LOADT).

La première étape de l'action de l'Aménagement est le diagnostic. Pour établir un diagnostic, l'aménageur utilise des représentations de l'espace. Ces représentations lui servent aussi à proposer des solutions et à les simuler. La représentation de l'espace de l'Aménagement est le thème général de la thèse.

Nous voulons construire une représentation de l'espace. Toute représentation procède du modèle. Le modèle, selon Peter Haggett, est une simplification de la réalité, il est aussi une construction intellectuelle, et il est orienté vers un propos déterminé, qu'il

soit heuristique ou didactique. Un modèle utilisé dans un processus d'aide à la décision est un modèle décisionnel.

Le mode d'utilisation des modèles décisionnels est la simulation. On cherche à simuler des hypothèses d'évolution du système, et surtout à évaluer leurs conséquences.

Les principaux modèles utilisés pour représenter l'espace appartiennent au domaine de la cartographie. La carte permet d'analyser, de comprendre, et de simuler les structures spatiales. C'est un véritable modèle décisionnel. L'imagerie médicale offre l'exemple d'une image associée à l'informatique, utilisée dans un processus décisionnel, à savoir le diagnostic médical. L'imagerie médicale est un outil très puissant qui a profondément changé l'exercice de la médecine.

L'image de synthèse répond exactement à la définition des modèles selon Peter Haggett. La notion d'image de synthèse désigne en fait un modèle qui donne naissance à des images. Le modèle est modifiable – on peut simuler un système légèrement différent –, et les images qu'il produit sont multiples – elles peuvent être orientées vers un propos déterminé.

Nous proposons une représentation de l'espace et des réseaux de transport basée sur des images de synthèse. Nous émettons l'hypothèse que cette représentation constitue un modèle décisionnel en Aménagement.

Après avoir posé les grands principes de la méthode, nous sommes en mesure de développer le raisonnement qui aboutit à la vérification de l'hypothèse que nous venons de formuler.

La première partie de la thèse, "Des phénomènes à leur formalisation", progresse de la définition des interactions entre l'espace et les réseaux de transport, vers leur formalisation mathématique ; elle est divisée en deux chapitres.

Le premier chapitre (à partir de la page I-41) a pour objet les interactions entre l'espace de l'Aménagement et les réseaux de transport. Nous commençons par définir l'espace de l'Aménagement, en utilisant des définitions issues de la Géographie et de l'Economie (Section 1^{ère} section, "Espace : définitions et typologies", page I-45). Pour étudier les transports, nous employons les concepts de réseau et de système (Section 2^{ème} section, "Réseaux et systèmes", page I-53). Après une définition générale, nous proposons une modélisation des réseaux de transport. Enfin, nous effectuons un recensement de la littérature produite par les aménageurs, les géographes de l'analyse spatiale, les économistes spatialistes, et les spécialistes des réseaux de transport, sur le sujet des interactions entre les réseaux de transport et l'espace (Section 3^{ème} section, "Interactions entre l'espace et les réseaux", page I-60).

Le deuxième chapitre de la première partie porte sur le corpus mathématique utilisé dans l'analyse spatiale des aménageurs, de géographes et des économistes. Nous abordons ces outils dans le but de formaliser les phénomènes que nous décrivons dans le premier chapitre. Pour commencer (Section 1^{ère} section, "Hiérarchie des espaces mathématiques", page I-80), il est utile de construire une hiérarchie des principales structures mathématiques utilisées pour modéliser l'espace. Ensuite, nous abordons la question des propriétés mathématiques des structures et des transformations géométriques (Section 2^{ème} section, "Propriétés et transformations mathématiques", page I-91). Nous nous intéressons plus précisément à la conservation des propriétés mathématiques par les transformations, de manière à caractériser la transformation que nous construisons. La notion mathématique qui est au centre de ce travail appartient au domaine des structures métriques ; nous les abordons dans la Section 3^{ème} section, "Distance", page I-97. La discussion est ensuite amenée sur le problème de la ligne droite (Section 4^{ème} section, page I-116), notamment sur son origine euclidienne, pour aboutir aux structures non euclidiennes. Enfin, pour formaliser les réseaux nous abordons la notion mathématique de graphe. Nous utilisons les graphes dans un cadre métrique : il nous faut définir le graphe du réseau de transport et ses propriétés (Section 5^{ème} section, page I-125).

La deuxième partie de la thèse (" Représentations", à partir de la page I-139) traite des représentations de l'espace. Plus spécifiquement, nous nous intéressons à la représentation cartographique des interactions entre l'espace et les réseaux de transport, telles que nous les avons définies puis formalisées dans la première partie. Dans un premier chapitre, nous construisons une grille de lecture des types de représentation possibles (Section 1^{ère} section, "Les quatre démarches de la modélisation de l'espace", page II-144), et nous abordons les représentations existantes (Section 2^{ème} section, "Représentations chorotaxiques", page II-152). Nous consacrons entièrement la Section 3^{ème} et dernière section, page II-163, aux anamorphoses. C'est cette revue des représentations existantes qui motive l'introduction et le développement des cartes en relief.

Les cartes en relief sont l'objet du dernier chapitre de la thèse. Nous commençons par l'exposé de la méthode de construction (Section 1^{ère} section, "La construction des cartes en relief", page II-181). Cette section montre quelques applications de la méthode et précise le principe de construction. Dans une autre section (Section 2^{ème} section, "Cartographie d'analyse", page II-197), nous montrons, à partir d'exemples de cartes en relief, le contenu analytique des cartes en relief. Dans cette partie, nous proposons une relecture de trois modèles de représentation proposés pour illustrer des paradoxes de l'espace-temps. Ensuite, la Section 3^{ème} section, "Cartographie prospective", page II-209, montre l'utilisation des cartes en relief dans une problématique d'Aménagement. Des contrats de recherche portant sur les réseaux de transport de l'Arc Atlantique, de l'Europe, de la France, et de la région Poitou-Charentes ont été l'occasion d'utiliser des cartes en relief d'espace-temps pour éclairer des phénomènes dont on n'avait auparavant pas d'image. La dernière section (Section 4^{ème} section, "Développement des cartes en relief", page II-209) présente

trois développements des représentations en relief : l'espace-coût, le relief inversé et la cartographie dynamique.

PARTIE I

DES PHÉNOMÈNES À LEUR

FORMALISATION

INTRODUCTION

Le problème général de la thèse porte sur la représentation des effets des réseaux de transport rapide sur l'espace.

Pour traiter cette question, la construction logique du raisonnement impose de débiter par la définition des concepts qui seront utilisés tout au long du travail. Le concept d'espace a été défini précisément par les géographes et les économistes spatialistes.

Pour décrire le transport des personnes, nous mobilisons les concepts de réseau et de système. Nous construisons alors une modélisation du réseau de transport qui sera formalisée dans le chapitre portant sur les outils mathématiques, puis exploitée dans la deuxième partie de la thèse.

Nous en venons ensuite à préciser les effets que nous voulons représenter. Le fonctionnement des réseaux de transport a une influence profonde sur l'espace. La forme du réseau est importante, mais les contraintes techniques des systèmes de transport le sont aussi.

Toute représentation de l'espace s'appuie, parfois explicitement, mais plus souvent de manière implicite, sur une formalisation mathématique. Le deuxième chapitre porte sur les structures et les problèmes mathématiques que l'on rencontre dans la modélisation de l'espace.

Nous abordons le chapitre mathématique en ayant à l'esprit les phénomènes que nous mettons à jour dans le premier chapitre. Notre but est de trouver une structure mathématique qui puisse restituer les phénomènes d'interaction de manière cohérente.

Les structures mathématiques que nous abordons sont la métrique, la topologie et la théorie des graphes. La première traite des mesures entre les objets et les lieux de l'espace, tandis que la seconde rend compte des proximités qualitatives de l'espace. La troisième structure est étroitement reliée à la théorie des systèmes ; nous la mettons en œuvre pour modéliser les réseaux.

Le thème de la représentation de l'espace n'est cependant pas absent de cette partie. Notre objectif final reste la construction d'une représentation. Tous les

développements introduits dans cette partie sont présentés en concordance avec cet objectif. En conséquence, il ne s'agit pas ici d'établir une exploration exhaustive des phénomènes apparaissant dans l'espace, ou d'approcher toutes les structures mathématiques utilisées en analyse spatiale. Nous veillons à axer la discussion autour des grands thèmes du problème général de recherche, à savoir : l'espace de l'Aménagement, les interactions entre les réseaux et l'espace, la modélisation et la représentation.

CHAPITRE I

L'ESPACE, LES RÉSEAUX ET LES INTERACTIONS ESPACE/RÉSEAUX

Introduction

Le problème général qui est posé est celui des liens unissant l'espace et les systèmes de transport. Pour aborder cette question nous allons commencer par nous donner une définition de l'espace. Après quoi, nous allons étudier les systèmes de transport et les réseaux, pour, à la fin de ce chapitre, explorer la question des interactions entre l'espace et les réseaux.

Pour le géographe J. M. Blaut, « le mot espace est rien moins qu'ambigu, et sa signification est sujette à des controverses fondamentales »¹. Il convient donc de s'entourer d'un grand nombre de précautions pour approcher le concept d'espace.

Le concept d'espace possède des définitions en Géographie, en Economie, en Aménagement. Nous allons explorer ces diverses définitions et les comparer entre elles de manière à construire un cadre conceptuel. Nous pourrions alors définir les espaces que nous voulons étudier.

Nous nous intéressons à l'espace de l'Aménagement. Les processus qui permettent le déplacement des personnes et des objets dans cet espace jouent un rôle essentiel : c'est au travers de l'analyse de ces processus que l'on peut appréhender l'étendue spatiale, et au delà, que l'on peut fonder une description de l'espace de l'Aménagement. Pour étudier les processus de déplacement, nous devons aborder les concepts de système (système de transport) et de réseau (réseau de transport).

¹ « The word space is nothing if not ambiguous, and some very fundamental disputes turn on its meaning. » - J. M. BLAUT, 1961. - « Space and process ». - Professional geographer, USA, vol. 13, n° 4. - p. 2.

Le système de transport et l'espace interagissent fortement. Cette interaction se caractérise par toute une série de phénomènes spatiaux dont le recensement sera l'objet de la dernière partie de ce chapitre.

Nous allons parcourir les définitions de l'espace qui ont cours dans les champs principaux et dans les champs connexes du problème général de recherche. Il est important de noter que se donner une définition de l'espace est une démarche de construction. En ce sens, définir l'espace c'est entrer de plain-pied dans la sphère de la représentation et de la modélisation. Cette démarche de modélisation et de représentation, dont les principes ont été posés dans le chapitre liminaire, transparaîtra tout au long de ce travail.

Section 1 Espace : définitions et typologies

Introduction

*« Quiconque parle de l'espace absolu, emploie un mot vide de sens. »²
Henri Poincaré.*

Dans une démarche progressant du général vers le particulier, nous abordons des définitions ou conceptions philosophiques de l'espace, puis nous présentons les définitions générales que nous offrent les grands champs disciplinaires de l'Economie et de la Géographie.

Deux géographes, Colette Cauvin et Pip Forer, proposent des grilles de lecture qui permettent d'approcher les espaces qui font l'objet de cette recherche. Ces deux approches sont utilisées pour construire un cadre conceptuel adéquat.

A. L'espace en philosophie

L'espace a d'abord été conçu par les philosophes de l'antiquité grecque comme un espace contenant³, un objet neutre englobant. Il faut attendre Descartes pour que se développe la conception d'un espace relié aux objets qu'il contient⁴. Pour lui les objets ne sont plus simplement contenus dans l'espace, ils sont l'espace. Dans le prolongement de la conception cartésienne, Leibniz perçoit l'espace comme un ordre immanent et s'y intéresse en tant que construction de l'esprit⁵. Et pour Kant, l'espace

² Henri POINCARÉ, 1947. - *Science et méthode*. - Paris : Flammarion (Bibliothèque de philosophie scientifique). - p. 96.

³ Denis MARTOUZET, 1993. - *op. cit.* - p. 355.

⁴ *Ibid.*

⁵ *Ibid.*

est une forme *a priori* de la sensibilité, constitutive de notre façon de percevoir⁶. Il lui paraît impossible que l'espace n'existe pas, même s'il peut ne pas exister d'objet dans l'espace. On voit ainsi apparaître l'espace comme objet d'analyse. Mais cet espace est lié de manière indissociable aux systèmes de représentation.

B. *Espace géographique*

L'espace de la Géographie est un espace de proximités, de juxtapositions⁷. En ce sens, on peut établir des relations entre ses éléments. Par exemple, on choisit deux départements français et on compare telle ou telle caractéristique.

L'espace géographique « n'est pas toujours euclidien, et n'implique pas nécessairement une métrique »⁸. Un espace est métrique s'il est possible de définir une fonction de distance. L'espace géographique n'est pas fondé sur le concept de métrique.

C. *Espace économique*

Toutes les définitions de l'espace économique, d'après François Plassard⁹, se situent entre deux pôles extrêmes, entre un espace purement abstrait, sans rapport direct avec la localisation ou la position dans un référentiel à trois coordonnées, un espace de relations entre objets économiques, et un espace concret, à la fois matériel et humain qui serait l'ensemble formé par le produit cartésien de l'ensemble des activités économiques par l'ensemble des lieux géographiques.

En économie régionale, l'espace est souvent un substrat et il est rarement explicité. On constate que ces définitions rejoignent, au mieux, celles de la Géographie. Au pire, et le plus fréquemment, elles font intervenir l'espace comme une variable supplémentaire dans les modèles, variable dont on ne reconnaît pas la spécificité. Ainsi certains auteurs, comme Catherine Maurice-Baumont¹⁰, distinguent un espace physique et un espace économique dans lesquels un problème de localisation admet une ou des solutions simultanées qui coïncident ou non. En réalité, on assimile ici l'espace à un ensemble économique.

⁶ Denis MARTOUZET, 1993. - *op. cit.*

⁷ Cette définition de l'espace géographique ne vaut que pour la Géographie dite "classique". La Géographie théorique et quantitative a permis de renouveler largement cette approche.

⁸ Jean-Claude MÜLLER, 1979. - « La cartographie d'une métrique non euclidienne ». - Espace géographique, France, vol. 8, n° 3. - p. 216.

⁹ François PLASSARD, 1976. - *Les Autoroutes et le développement régional*. - Lyon : Economica/Presses Universitaires de Lyon (Economie publique de l'Aménagement et des transports). - 341 p.

¹⁰ Catherine MAURICE-BAUMONT, 1992. - « L'Adéquation entre l'espace physique et l'espace économique multicentrique dans les problèmes de localisation ». - RERU, France, n° 2.

D. Typologie de Pip Forer : de l'espace absolu aux espaces relatifs

Pour introduire le concept d'espace plastique, le géographe Pip Forer a construit une typologie qui s'avère très opérante pour caractériser les espaces de la recherche. Il oppose les espaces absolus à des espaces relatifs au sein desquels il définit les espaces plastiques.

Pour construire cette typologie, Pip Forer emploie trois critères :

1. la dimension dynamique indique la stabilité de l'espace au cours du temps ;
2. la possibilité d'effectuer des mesures sur l'espace est traduite par la mesurabilité ;
3. l'applicabilité concerne la taille du sous-groupe de la population pour laquelle la représentation peut s'appliquer.

Le graphique suivant montre les trois familles d'espaces positionnés en fonction de la dimension dynamique, de la mesurabilité et de l'applicabilité.

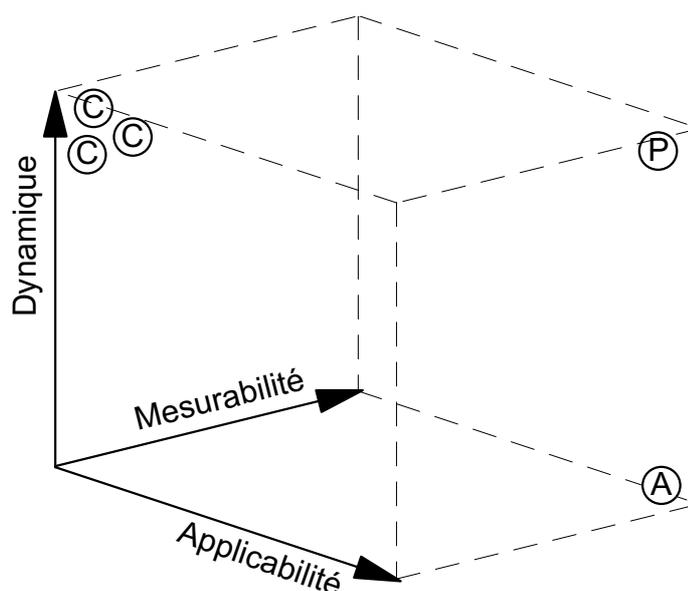


figure 3 : typologie des espaces de Pip Forer¹¹

Nous allons maintenant définir et expliciter les familles d'espaces de la typologie de Pip Forer : l'espace absolu, les espaces comportementaux et les espaces plastiques.

¹¹ Figure reproduite de : Pip FORER, 1978. - « A Place for plastic space ». - *Progress in human geography*, GB, vol. 2, n° 2. - p. 235.

1. L'espace absolu

La conception de l'espace absolu fait référence à une vision platonicienne basée sur un système de coordonnées fixé. Elle est celle d'un espace considéré comme contenant, d'un espace qui constituerait une entité propre.

A l'opposé, le concept d'espace relatif s'articule autour de la notion de relation. Ce sont les objets eux-mêmes ainsi que leurs interrelations qui définissent l'espace.

Comme le montre la figure précédente, l'espace absolu est statique ; il est mesurable, et il est reconnu par quasiment tout le monde au travers des cartes classiques. Celles-ci constituent une véritable « *lingua franca* »¹² pour la description de l'espace.

En première analyse, les cartes confortent la vision de l'espace absolu. En effet, avec la carte, on veut fournir au lecteur une information complète et stable sur les objets, et sur la façon dont ils sont reliés¹³.

Toute carte est la projection plane d'une portion de la surface de la terre. De nombreux types de projection existent ; on en choisit un en fonction de ce que l'on veut montrer. Du fait de la mise à jour de cette distorsion¹⁴ il n'est plus possible d'attribuer un caractère parfaitement absolu aux cartes.

La plaine uniforme des économistes est l'archétype d'une conception absolue de l'espace. La plaine uniforme est statique, définie indépendamment des objets qu'elle contient et indépendante des processus qui y ont lieu¹⁵.

2. Les espaces relatifs : espaces comportementaux et espaces plastiques

La notion d'espace relatif se construit par opposition à l'espace absolu. Il y a deux grandes familles d'espaces relatifs :

dans la première, l'espace est relatif au sens où il se rapporte à la perception d'un individu ou d'un groupe d'individus ;

dans l'autre grande famille d'espaces relatifs, l'analyse porte sur la façon dont les objets dans l'espace sont reliés¹⁶.

Les espaces relatifs de la première grande famille ne sont applicables qu'à des sous-ensembles réduits de la population ; ils sont dynamiques, car objets de phénomènes

¹² Pip FORER, 1978. - *op. cit.* - p. 234.

¹³ *Ibid.* - p. 232.

¹⁴ Waldo R. TOBLER, 1963. - « Geographic area and map projections ». - *Geographical review*, USA, vol. 53.

¹⁵ Pip FORER, 1978. - *op. cit.* - p. 233.

¹⁶ *Ibid.* - p. 234.

d'apprentissage ; enfin, ils sont difficilement mesurables : « de grands efforts sont nécessaires pour extraire des mesures de ces représentations internes de l'espace »¹⁷. Sur le graphique (figure 3 : typologie des espaces de Pip Forer), ils sont situés en haut à gauche, contre l'axe indiquant la dimension dynamique.

L'espace plastique désigne la deuxième grande famille dont il est question au-dessus. Dans ces espaces, on s'intéresse à la façon dont les objets dans l'espace et l'espace lui-même sont reliés au travers des systèmes de transport et de communication. Ils sont construits à partir d'informations sur les distances entre les objets plutôt que sur un quelconque système de coordonnées. L'espace plastique de Pip Forer peut être défini par un espace métrique¹⁸. Dans cette définition, on inclut l'espace-temps, l'espace-coût, l'espace-coût généralisé et aussi l'espace-réseau.

Pip Forer oppose les espaces plastiques aux “espaces comportementaux”. L'argument discriminant entre les deux concepts est celui de l'universalité. Les espaces plastiques sont basés sur des mesures issues de sources publiées (les indicateurs des horaires de chemin fer, etc.). On peut donc appliquer ces mesures à d'importants sous-ensembles de la population, si ce n'est à la population en entier. Au contraire, les espaces comportementaux ne peuvent être reconnus que par un groupe réduit quand ce n'est pas par un individu unique.

Les espaces plastiques sont à la fois dynamiques, car en constante évolution, et applicables à de très larges sous-ensembles de la population, tout en restant mesurables. Ils occupent le point opposé à l'origine dans le cube à trois dimensions de la figure 3.

Dans les espaces plastiques, l'accent est mis sur le processus – de transport ou de communication – que l'on veut approcher. Pip Forer ajoute qu'avec les espaces plastiques il devient très difficile de séparer l'espace du processus¹⁹. C'est un espace finalisé, défini en fonction et par les processus que l'on veut analyser. On voit apparaître ici un effet de rétroaction : on construit un cadre conceptuel pour étudier un phénomène, alors que celui-ci est utilisé pour établir la structure de départ.

E. Typologie de Colette Cauvin

En reprenant la typologie mise en œuvre par Colette Cauvin dans sa thèse, nous allons donner une classification des espaces que l'on peut rencontrer en trois groupes distincts : l'espace physique, les espaces fonctionnels et les espaces cognitifs. Cette classification permet de préciser certains points non explicités dans la typologie de Pip Forer.

¹⁷ Pip FORER, 1978. - *op. cit.* - p. 236.

¹⁸ Métrique au sens mathématique du terme.

¹⁹ Pip FORER, 1978. - *op. cit.* - p. 236.

1. De l'espace physique à l'espace chorotaxique

L'espace physique est l'ensemble des lieux de la surface de la terre, et le support des activités humaines²⁰. Pour Colette Cauvin, l'espace physique est « l'espace concret, celui que l'on peut toujours mesurer d'une manière identique, quel que soit le lieu ou le moment considéré »²¹.

L'espace physique est mesurable et stable dans le temps. Suivant ces deux aspects, il rejoint les espaces absolus définis par Pip Forer.

Pour formaliser de manière plus précise l'idée de l'espace physique, Colette Cauvin introduit le concept d'**espace chorotaxique**. Celui-ci est « l'espace (étendue qui contient l'homme et l'entoure) déterminé par les liens et les arrangements entre les lieux avec des attributs spécifiques²², mesurables universellement »²³. Nous utiliserons abondamment dans ce travail le concept d'espace chorotaxique en tant que modèle de référence pour la représentation de l'espace.

La représentation de l'espace chorotaxique fait appel à la cartographie classique : le plan ou la carte des localisations peuvent être utilisés, mais aussi la carte thématique qui permet d'exprimer toutes les dimensions de l'espace chorotaxique.

2. Espace fonctionnel

L'espace fonctionnel peut être défini comme l'espace que l'homme utilise, l'espace où il vit. Dans cet espace les relations sont exprimées en termes de temps, de coûts, etc. L'espace fonctionnel correspond à un espace physique qui subit des transformations, des déformations en fonction des utilisations qui en sont faites.

L'espace fonctionnel est finalisé : on lui adjoint une fin, une orientation précise.

Dans cette définition, on induit déjà l'idée que des formalisations différentes de l'espace fonctionnel vont correspondre à des comportements différents.

Colette Cauvin nous donne une définition plus formelle, basée sur le concept d'espace chorotaxique :

²⁰ François PLASSARD, 1976. - *op. cit.* - p.57.

²¹ Colette CAUVIN, 1984 b. - *op. cit.* - p. 15.

²² Ces attributs décrivent les caractéristiques physiques et humaines de l'espace : l'altitude, la population, etc.

²³ Colette CAUVIN, 1984 b. - *op. cit.* - p. 40.

« les espaces fonctionnels sont des espaces dérivés de l'espace chorotaxique, modifiés par les caractéristiques possibles retenues pour les lieux et entre les lieux. Ce sont des espaces où peuvent s'effectuer les mouvements, les déplacements, en fonction d'un but donné. Ils peuvent être matérialisés par une carte "de la réalité" aux déformations plus ou moins marquées, irrégulières, mais mesurables. »²⁴

Ainsi, on ne tient plus seulement compte des localisations et de la disposition relative des lieux, c'est-à-dire de la structure physique de l'espace. Avec l'espace fonctionnel, on met l'accent sur les liens qui unissent les lieux. On se soucie de la structure fonctionnelle de l'espace. Dans cette optique, on cherche à « construire des cartes prenant en compte les déformations de l'espace chorotaxique, dues aux fonctions retenues »²⁵. Pour Colette Cauvin cette cartographie est beaucoup plus difficile à réaliser que la cartographie plus classique des espaces chorotaxiques.

Les fonctions des espaces fonctionnels sont les processus que Pip Forer fait intervenir, à savoir le transport et la communication.

Tout comme dans la deuxième famille d'espaces relatifs de Pip Forer, dans les espaces fonctionnels, on met en avant la structure fonctionnelle.

3. Espace cognitif

Les espaces cognitifs suivent une définition très similaire à celle des espaces comportementaux de Pip Forer.

Cette troisième catégorie d'espaces « induit, elle aussi, très fortement les comportements, intégrant, intériorisant, consciemment ou inconsciemment les deux groupes précédents »²⁶. L'adjectif "cognitif" exprime l'aspect "obtenu", "construit", de ces espaces. Les espaces cognitifs sont l'espace physique et les espaces fonctionnels qui subissent des transformations au travers de nos filtres personnels et culturels. Ces espaces ne sont pas homogènes : on ne peut donc pas les mesurer de manière identique selon les lieux et le temps. Avec ce concept, on s'attache à comprendre les relations entre le comportement spatial de l'homme et les environnements dans lesquels ces comportements s'expriment²⁷.

²⁴ Colette CAUVIN, 1984 b. - *op. cit.* - p. 41.

²⁵ *Ibid.*

²⁶ *Ibid.* - p. 16.

²⁷ C'est sur cette troisième série d'espaces que portent les travaux de Colette Cauvin. Les cartes cognitives sont les représentations de ces espaces.

4. Comparaison des deux typologies

On retrouve chez Colette Cauvin²⁸ les trois types d'espaces décrits par Pip Forer : l'espace chorotaxique correspond à l'espace absolu ; l'espace cognitif défini par Colette Cauvin renvoie à l'espace relatif à l'individu ; enfin, la notion d'espace fonctionnel recouvre, en partie, la deuxième famille d'espaces relatifs – les espaces plastiques²⁹.

Typologie de Pip Forer	Typologie de Colette Cauvin
Espace absolu	Espace chorotaxique
Espaces plastiques	Espaces fonctionnels
Espaces comportementaux	Espaces cognitifs

Tableau 1 : comparaison des typologies de Colette Cauvin et Pip Forer

Pip Forer introduit la dimension dynamique pour établir sa typologie des espaces. Pour comprendre l'espace, il est essentiel de porter l'attention sur son évolution. Ce point appelle un développement sur la relation entre l'espace et le temps. C'est l'objet du paragraphe qui suit.

F. L'espace et le temps

Depuis la Théorie de la Relativité, les physiciens considèrent l'espace et le temps comme une entité unique : l'espace-temps.

« L'espace relatif est inséparablement uni au temps relatif, les deux formant ce qu'on appelle l'espace-temps, ou simplement le processus. Rien dans le monde physique n'est purement spatial ou temporel ; tout est processus. Le temps peut être négligé, mais il est toujours implicite »³⁰. J. M. Blaut.

En Géographie et en Aménagement de l'espace, la production de « modèles dynamiques dans lesquels l'espace et le temps sont tous deux à la fois centraux et reliés »³¹ est relativement récente.

²⁸ Cf. au paragraphe intitulé "De l'espace physique à l'espace chorotaxique" en page I-50, et aux suivants.

²⁹ L'espace fonctionnel de Colette Cauvin met en avant le concept de structure fonctionnelle de manière plus explicite, alors que les espaces plastiques mettent l'accent sur les processus et les déformations spatiales.

³⁰ « Relative space is inseparably fused to relative time, the two forming what is called the time-space manifold, or simply *process*. Nothing in the physical world is purely spatial or temporal ; everything is process. The time dimension may be neglected, but it is always implied. » - J. M. BLAUT, 1961. - *op. cit.* - p. 2.

³¹ « [...] producing dynamic models in which space and time are both central and interlinked is in its infancy. » - Pip FORER, 1978. - *op. cit.* - p. 232.

Pour le géographe William Bunge, l'espace et le temps ne sont peut-être pas les concepts primordiaux de la Géographie. Il propose d'adopter le mouvement et l'espace comme concepts essentiels à la construction d'une géographie théorique³². Plus qu'une simple comparaison d'un espace entre deux moments distincts, il s'agit de construire une vision réellement dynamique. L'attention est portée en priorité sur l'évolution de l'espace et non uniquement sur son état à un moment donné.

Conclusion : les espaces de notre recherche

Nous voulons établir un cadre conceptuel qui permette d'étudier l'espace et les transports. En prenant comme point de départ l'espace de l'Aménagement et en intégrant ensuite les transports, la démarche consiste à adjoindre à l'espace une fonction, en l'occurrence la fonction de transport. Cette approche rejoint tout à fait le concept d'espace fonctionnel décrit par Colette Cauvin.

Dans ce travail, nous allons donc nous intéresser aux **espaces fonctionnels**, autrement dit – selon la définition de Pip Forer – aux **espaces plastiques**. La fonction qui nous intéresse est celle des transports.

D'autre part, pour la description de l'espace dans son évolution à long terme, nous devons porter une attention particulière au temps.

Section 2 Réseaux et systèmes

Introduction

Les espaces de la recherche sont maintenant définis. Les espaces plastiques en question sont construits à partir des processus de transport. Cette fonction va être abordée au travers des concepts de système et de réseau.

Hautement polysémique, le mot réseau possède une définition courante que nous fournit le dictionnaire : le réseau est « l'ensemble des lignes, des voies de communication, des conducteurs électriques, des canalisations, etc., qui desservent une même unité géographique, dépendent de la même compagnie »³³.

³² William BUNGE, 1962. - *Theoretical geography*. - Lund : Gleerup (Lund studies in Geography). - p. 248.

³³ *Le Nouveau petit Robert*, 1995. - Paris : Dictionnaires le Robert. - p. 1949.

A. *Le réseau comme système*

Dans les travaux du Groupe d'Etudes et de Mobilisation, créé en 1991 sur le thème Réseaux et territoires, on trouve une définition synthétique et générale des réseaux³⁴. Selon cette analyse, le réseau est un système technique – infrastructures, équipements, matériels – qui écoule des flux physiques – de matières, d'énergie, de personnes, ou d'ondes – et qui offre un service à des utilisateurs, des usagers, des clients ou des consommateurs. L'ensemble met en relation ces utilisateurs au sein d'un territoire. Ce dernier est défini comme étant l'entité géographique desservie par le réseau : « l'aménagement de l'espace par les réseaux fait apparaître la notion de territoire »³⁵. Le réseau technique ainsi défini est organisé par une autorité territoriale et il est géré par un opérateur. Le réseau est « l'inscription d'un système technique dans un territoire »³⁶.

Pour Karl J. Kinsky, théoricien des réseaux de transport, « un réseau est un ensemble de lieux géographiques³⁷ interconnectés dans un système par un certain nombre de liens »³⁸. Le système est ici composé de lieux géographiques et de liaisons. Gabriel Dupuy ajoute à cette définition la nécessité de spécifier une ou plusieurs fonctions à cet ensemble. Pour lui, « au départ, il y a intention, projet de transaction entre les lieux »³⁹. Cet ensemble composé de lieux géographiques, de liaisons et d'un projet, constitue ce qu'il appelle un « réseau virtuel ». Cette notion intègre « l'ensemble des possibilités transactionnelles »⁴⁰ offertes par le réseau ; c'est un réseau maximum. Le réseau réel – c'est un réseau d'infrastructure, appelé aussi réseau technique – qui donne corps au réseau virtuel est soumis à un ensemble de contraintes qui empêchent la réalisation de la complétude maximaliste contenue dans le réseau virtuel. Les contraintes sont souvent de nature économique, les contraintes techniques en faisant partie, mais elles peuvent aussi appartenir au domaine du choix politique. En transformant le réseau virtuel en un réseau réel, on crée le système. Ce système est fonctionnel, c'est-à-dire muni d'une fonctionnalité, que ce soit le transport, la communication, etc. On fait alors apparaître un opérateur qui peut être la compagnie dont il était question dans la définition du dictionnaire. Cet opérateur peut aussi être défini par un ensemble de règles et d'acteurs.

La figure ci-dessous montre les approches de la définition du réseau par Karl J. Kinsky et Gabriel Dupuy.

³⁴ Marie-France de NOÛE, *et al.*, 1993. - *Réseaux et territoires*. - Paris : La documentation française. - p. 19.

³⁵ *Ibid.* - p. 31.

³⁶ *Ibid.* - p. 19.

³⁷ C'est-à-dire des points de l'espace chorotaxique.

³⁸ Karl J. KINSKY, 1989. - « Measures of networks structure ». - *Flux*, n° spécial. - p. 93.

³⁹ Gabriel DUPUY, 1994. - « Réseaux ». - p. 146. - in *Encyclopédie d'économie spatiale*. - sous la dir. de Jean-Paul Auray, Antoine Bailly, Pierre-Henri Derycke, Jean-Marie Huriot. - Paris : Economica (Bibliothèque de Science Régionale).

⁴⁰ Gabriel DUPUY, 1991. - *L'Urbanisme des réseaux*. - Paris : Armand Colin (U Géographie). - p. 109.

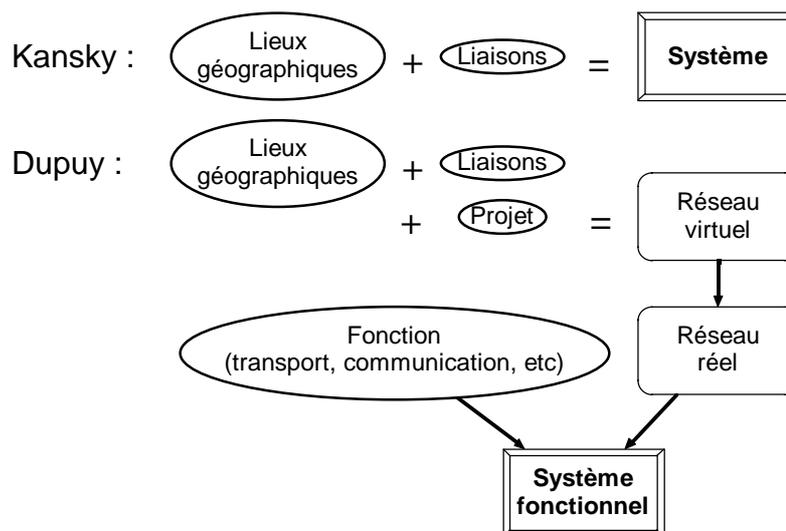


figure 4 : les systèmes de Karl Kansky et Gabriel Dupuy

B. Représentation graphique du système et du réseau

James W. Clark, chercheur américain en Aménagement des transports urbains⁴¹, nous propose d'aborder les systèmes de transport via les réseaux, les graphes et leurs représentations : « dans l'analyse des systèmes de transport, il est pratique de représenter le système au moyen d'un réseau »⁴².

L'intérêt principal est que « la représentation de la carte du réseau peut offrir d'importantes indications visuelles »⁴³.

Dans une démarche inductive, James W. Clark propose une méthode de construction des réseaux : « les réseaux de transport sont obtenus à partir des localisations des rues et des carrefours, et la représentation graphique du réseau ressemble à une carte routière »⁴⁴.

Au delà, pour Pierre-Alain Mercier, « les réseaux sont d'abord et surtout *une image* »⁴⁵. C'est-à-dire qu'ils constituent à la fois un concept opératoire et une représentation, comme l'indique Lucien Sfez : « le réseau, c'est au moins autant une technique qu'une métaphore »⁴⁶. On retrouve ici les trois dimensions – sens commun,

⁴¹ Chercheur en *Urban transportation planning*.

⁴² « In transportation system analysis, it is convenient to represent the transportation system by the means of a network. » - James W. CLARK, 1977. - *op. cit.* - p. 195.

⁴³ « [...] the map image representation of the network may offer important clues. » - James W. CLARK, 1977. - *op. cit.* - p. 195.

⁴⁴ « Transportation networks are abstracted from the locations of streets and intersections, and the graphic representation of the network resembles a road map. » - James W. CLARK, 1977. - *op. cit.* - p. 195.

⁴⁵ Pierre-Alain MERCIER, 1988. - « La Maille et l'interstice ». - *Quaderni*, France, n° 3. - (C'est l'auteur qui souligne).

⁴⁶ Lucien SFEZ, 1994. - *Entretien - Flux*, France, n° 16. - p. 78.

sens conceptuel et sens métaphorique – que possèdent la plupart des mots des sciences humaines et sociales.

Dans son article intitulé *Cities as systems within systems of cities*, Bryan Berry inscrit la ville et l'armature urbaine dans le champ systémique⁴⁷. Pour Philippe Mathis ce système est « un ensemble d'objets (places centrales), d'attributs de ces objets (populations, établissements, types d'activités, trafics engendrés, etc.), d'interrelations parmi ces objets (localisations des centres) et parmi leurs attributs enfin, d'interdépendances entre les objets et les attributs »⁴⁸. Les interactions entre le système de transport et le système urbain constituent un ensemble de liens entre deux systèmes en tant que tels.

Plutôt que de ne s'intéresser qu'aux objets en eux-mêmes, avec l'approche systémique, on porte également l'attention sur les relations existant entre ces objets⁴⁹.

C. *Infrastructures, véhicules et objets/individus*

Au départ de toute tentative de formalisation d'un réseau de transport, on doit tenir compte des infrastructures ; comme le montre Alain Bonnafous, « un réseau de transport est avant tout matérialisé et inscrit dans l'espace par ses infrastructures »⁵⁰. Nous définissons les infrastructures comme l'ensemble des installations réalisées au sol ou en souterrain permettant le transport des personnes et des marchandises. Ces installations sont de deux types :

- les infrastructures **linéaires** correspondent aux lignes et aux liaisons du système de transport, à savoir les voies de chemin de fer, les routes, etc. ;
- les infrastructures **ponctuelles** se rapportent aux installations localisées en un point précis. Il s'agit par exemple des ports, des péages et des échangeurs autoroutiers, des gares, etc.

Les infrastructures servent de support aux activités de transport. La présence de ce support est même indispensable à l'exercice de cette activité.

Gabriel Dupuy, dans son ouvrage *L'Urbanisme des réseaux*, oppose l'infrastructure, fixe, pérenne, assurant la permanence dans le temps, et les services rendus par l'infrastructure qui sont eux « ubiquitaires, instantanés, simultanés, immédiats selon

⁴⁷ « [...] cities and sets of cities are systems susceptible of the same kinds of generalization as other systems and characterized by the same generalizations, constructs and models ». - Brian J. L. BERRY, 1964. - « Cities as systems within systems if cities ». - Papers of the Regional Science Association, USA, vol. 13. - p. 158.

⁴⁸ Philippe MATHIS, 1978. - *op. cit.* - p. 17.

⁴⁹ Bernard MARCHAND, 1973. - « Deformation of a transportation surface ». - Annals of the Association of American Geographers, USA, vol. 63. - p. 517.

⁵⁰ Alain BONNAFOUS, 1994. - *op. cit.* - p. 325.

des architectures évolutives »⁵¹. On distingue ici deux éléments – infrastructure et service – qui permettent de décrire les systèmes de transport.

Pour décrire les phénomènes de transport, nous devons distinguer l'objet (ou l'individu) transporté du véhicule qui permet le transport⁵².

Il faut remarquer que le véhicule est parfois absent du processus : un individu qui marche dans une rue emprunte une infrastructure, mais n'utilise pas de véhicule ; le fluide transporté par un oléoduc ne nécessite pas de véhicule non plus. D'autre part, le véhicule devient lui-même un objet à transporter dans certaines formes de transport combiné comme l'autoroute ferroviaire⁵³.

Par contre, l'objet est toujours présent dans le processus de transport⁵⁴ : il est la raison d'être du système.

D. Les réseaux du système de transport

Le système de transport se décompose en différents réseaux de transport : on peut identifier le réseau routier, le réseau autoroutier, le réseau ferroviaire, etc. Le principe discriminant entre ces réseaux n'est pas totalement fixé : le réseau routier peut dans certains cas contenir le réseau autoroutier. Tout dépend de la logique sous-tendue lors de la définition de l'entité réseau. A ce stade, nous dirons que le réseau définit une entité dont la cohérence peut provenir de critères divers : il peut s'agir de la nature des infrastructures, de la possibilité d'accès pour un véhicule donné, etc.

Au sein d'un même réseau, on trouve des infrastructures linéaires aux caractéristiques disparates. Cependant, il est possible de définir des sous-ensembles homogènes. Dans cet esprit, nous introduisons la notion de réseau partiel infrastructurel, en nous inspirant de la définition du graphe partiel⁵⁵. Le réseau routier – hors autoroutes – peut être décomposé en un réseau partiel de routes à 2x2 voies, un réseau partiel de routes aménagées à 2x1 voies et un réseau partiel de routes non aménagées à 2x1 voies. La distinction entre ces réseaux partiels se fait sur la base des caractéristiques techniques des infrastructures. Un réseau partiel infrastructurel est un ensemble d'infrastructures aux caractéristiques techniques homogènes, ou considérées homogènes à un certain niveau d'analyse. Dans l'exemple de la figure 5, le réseau routier est constitué de trois réseaux partiels infrastructurels.

⁵¹ Gabriel DUPUY, 1991. - *op. cit.* - p. 127.

⁵² Laurent CHAPELON, 1996. - *Aménagement des transports et répercussions spatiales*. - thèse en cours : Tours.

⁵³ Jean-François TROIN, 1995. - *Rail et aménagement du territoire*. - Aix-en-Provence : Edisud. - p. 231.

⁵⁴ On peut imaginer un train circulant sans aucun passager. Néanmoins, sa vocation essentielle est d'en transporter. Un système de transport sans rien à transporter n'a pas de sens.

⁵⁵ Cf. "Graphe partiel", page 209.

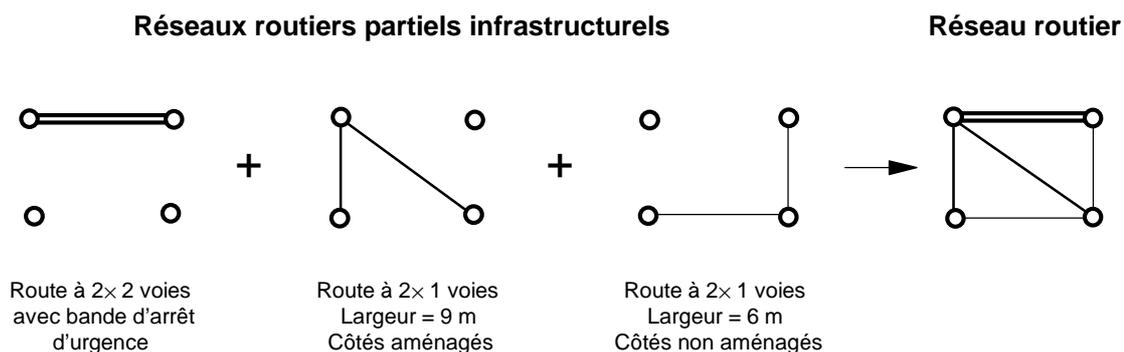


figure 5 : les réseaux partiels infrastructurels du réseau routier⁵⁶

E. Le binôme fonctionnel

Sur une même infrastructure, plusieurs types de véhicules peuvent circuler. Ainsi, les autoroutes peuvent recevoir des véhicules individuels, des autocars ou encore des camions. A chaque couple infrastructure/véhicule on associe une vitesse de circulation spécifique. Cette vitesse est définie par des contraintes réglementaires et techniques.

Pour que le processus de transport de personnes ou de marchandises fonctionne, il faut disposer de ce couple infrastructure/véhicule. Nous appelons **binôme fonctionnel** l'association d'un type de véhicule et d'un réseau partiel infrastructurel. Chaque binôme fonctionnel se caractérise par une vitesse moyenne de circulation.

Le réseau partiel infrastructurel est composé d'infrastructures linéaires ainsi que d'infrastructures ponctuelles. Les infrastructures linéaires sont caractérisées par leur longueur, exprimée en kilomètres. Grâce à la vitesse moyenne associée au binôme fonctionnel, et à la longueur en kilomètres, on peut connaître la longueur effective en termes de durée de parcours de chaque tronçon d'infrastructure linéaire.

⁵⁶ Graphique extrait de : Laurent CHAPELON, 1996. - *Aménagement des transports et répercussions spatiales*. - thèse en cours : Tours.

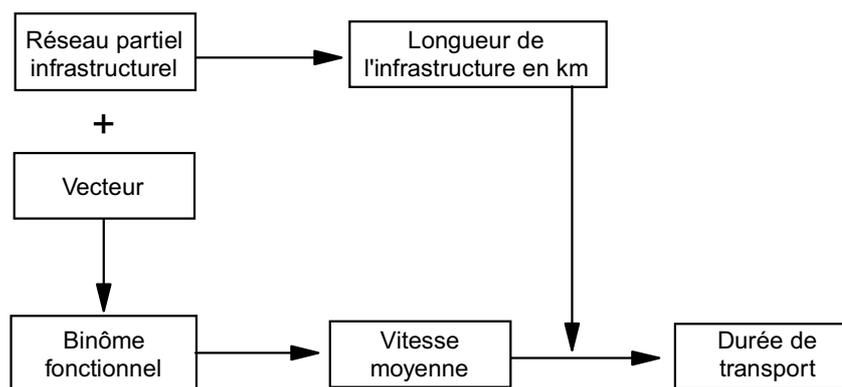


figure 6 : du réseau partiel infrastructurel à la durée de transport⁵⁷

La vitesse moyenne de parcours pour une voiture sur une route aménagée a été fixée à 70 km/h, tandis que sur autoroute le même véhicule atteint la vitesse moyenne de 110 km/h. Ces vitesses moyennes ont été établies en tenant compte du véhicule et des caractéristiques techniques des infrastructures. Pour la construction de la représentation, nous avons tenu compte des réseaux de transport de manière homogène en considérant que la vitesse de parcours au sein d'un même réseau partiel infrastructurel est identique.

En ce qui concerne le TGV, nous avons utilisé les données disponibles pour la France⁵⁸ et les données extraites des principaux projets des premières études de la SNCF⁵⁹. Pour les lignes créées *ex nihilo*, dans les hypothèses de développement des réseaux à grande vitesse, nous avons extrapolé la ligne Paris-Tours en utilisant une vitesse moyenne de 220 km/h. On retrouve une vitesse moyenne du même ordre sur les deux autres lignes à grande vitesse en service en France : la ligne Sud-Est et la ligne Nord⁶⁰. Cette valeur est cependant seulement indicative pour les autres lignes. En effet, certains projets de TGV sont établis en fonction d'une vitesse commerciale de 400 km/h, impliquant des vitesses moyennes de l'ordre de 300 km/h⁶¹.

Conclusion

Le système et le réseau sont à la fois des modèles conceptuels – de la sphère des représentations linguistiques –, des modèles au sens de Peter Haggett⁶² – représentations élaborées en vue d'une démonstration –, et enfin des images.

⁵⁷ Graphique extrait de : Laurent CHAPELON, 1996. - *Aménagement des transports et répercussions spatiales*. - thèse en cours : Tours.

⁵⁸ Indicateurs SNCF, mais aussi : *European timetable*, 1994. - Peterborough : Thomas Cook.

⁵⁹ Par exemple : *Le TGV Aquitaine*, 1990. - SNCF, Premières études.

⁶⁰ Jean-François TROIN, 1995. - *op. cit.* - p. 55.

⁶¹ *Le Transport multimodal terrestre des personnes en Europe*, 1994. - sous la dir. de Philippe Mathis. - Tours : Laboratoire du CESA. - p. 29.

⁶² Cf. page 14, "Les modèles".

Nous nous donnons une définition des réseaux de transport basée sur l'idée du binôme fonctionnel, c'est-à-dire l'association d'un ensemble d'infrastructures avec un type de véhicule. La caractéristique essentielle qui différencie les binômes fonctionnels est la vitesse de déplacement qu'ils permettent. Associée à la longueur des liaisons, elle donne accès à la mesure de l'étendue spatiale parcourue.

Le système et le réseau sont parfois élevés au rang de paradigme pour les "nouvelles sciences" que décrit Jean-Louis Le Moigne⁶³. Aujourd'hui, il est manifeste que les deux concepts ne peuvent être ignorés dès lors qu'on s'intéresse à l'Aménagement de l'espace. Bien plus, quand il est question des rapports entre l'espace et les transports, le système et le réseau sont des outils conceptuels essentiels.

Section 3 Interactions entre l'espace et les réseaux

Introduction

« On ne peut trouver de partie de la surface terrestre qui ne soit pas déformée par les voies de transport et/ou la distribution non uniforme des populations rurales. »⁶⁴ William Bunge.

Toute modification des systèmes de transport, à quelque échelle que ce soit, transforme l'espace-temps. Face à la transformation des réseaux de transport, en tant qu'Aménageur, nous faisons nôtres les préoccupations de Bernard Marchand en « ne nous [intéressant] pas seulement aux changements dans les heures ou les kilomètres des trajets, mais aussi à l'ensemble des relations entre les villes qui [sont] modifiées »⁶⁵. L'amélioration de la performance des réseaux est souvent l'agent de cette transformation ; comme l'affirme James W. Clark : « sous l'effet de l'accroissement des vitesses dans les transports, l'espace se transforme progressivement »⁶⁶. Nous nous intéressons maintenant aux interactions entre les réseaux de transport et l'espace qui leur sert de support.

Nous avons commencé par la définition des espaces de notre recherche : nous nous intéressons aux espaces fonctionnels. Nous avons abordé ensuite les concepts de

⁶³ Jean-Louis LE MOIGNE, 1977. - *op. cit.*

⁶⁴ « [...] we cannot find an area of the earth's surface which is not distorted by transportation routes and/or disuniform rural population. » - William BUNGE, 1962. - *op. cit.* - p. 270.

⁶⁵ « We are concerned not just with changes in hours or miles of travel, but in the set of relationships between cities which has been greatly altered by road improvements. » - Bernard MARCHAND, 1973. - *op. cit.* - p. 517.

⁶⁶ François PLASSARD, 1991. - « La Révolution T.G.V. ». - p. 23. - *in* T.G.V. et aménagement du territoire - Paris : Syros/alternatives (T.E.N.).

système et de réseau qui sont deux modèles qui permettent de décrire les processus de transport de personnes et de marchandises.

Ces systèmes, rendus nécessaires par l'existence même de l'étendue spatiale, par l'existence de l'espace, exercent une influence profonde sur les espaces qu'ils parcourent. L'espace donne naissance aux systèmes de transport, et ces derniers interagissent sur l'espace : ce phénomène de rétroaction est schématisé sur la figure 7 ci-dessous.

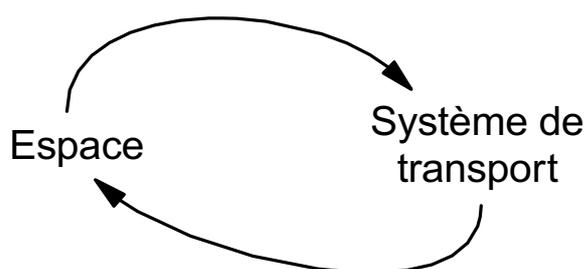


figure 7 : les liens entre l'espace et le système de transport

Ainsi, pour une modélisation correcte de l'espace, le géographe américain Waldo R. Tobler nous indique qu'il est nécessaire « de prendre en compte non seulement la forme de la terre mais aussi la réalité du transport sur sa surface »⁶⁷.

Nous nous intéressons aux effets des systèmes de transport sur l'espace. Ces effets sont caractérisés par un ensemble de phénomènes spatiaux que nous allons recenser maintenant. Ils sont particulièrement manifestes avec les nouveaux moyens de transport, comme l'autoroute, qui provoquent des distorsions de l'espace physique⁶⁸.

On trouve des références à ces phénomènes chez les aménageurs, chez les géographes de l'analyse spatiale, chez les économistes spatialistes, chez les historiens, chez certains sociologues, et bien sûr, chez les spécialistes des réseaux de transport.

⁶⁷ « It is necessary to take into account not only the shape of the earth but also the realities of transportation on its surface. » - Waldo R. TOBLER, 1963. - *op. cit.* - p. 73.

⁶⁸ « [...] important space-distorting effects of transportation systems. » - James W. CLARK, 1977. - *op. cit.* - p. 195.

A. *Le réseau : discontinuité, hétérogénéité et anisotropie*

1. Espace réticulaire

« *Il faut penser aujourd'hui en termes d'espaces troués* »⁶⁹. Michel Bonetti.

L'espace des transports est composé de lieux privilégiés – comme par exemple les gares, les échangeurs autoroutiers, etc. – qui constituent les noeuds du réseau de transport. Entre ces noeuds, on trouve des infrastructures qui dessinent les liaisons du réseau. On parle alors d'espace réticulaire, au sens d'un espace construit par les réseaux.

L'espace réticulaire est très différent du marché de la théorie économique classique⁷⁰. Le concept de marché implique « un accès et une information équivalents pour tous les agents »⁷¹. La plaine uniforme – à la fois homogène et isotrope, où les propriétés sont identiques partout et dans toutes les directions – est la structure spatiale sous-jacente au marché. Au contraire, comme l'affirme Gabriel Dupuy, le système réseau implique « l'inégalité d'accès spatial et informationnel entre les agents »⁷². Il y a là une contradiction entre le concept de plaine uniforme où tout effet se fait ressentir également dans tout l'espace, et le concept de réseau qui s'appuie sur une discrétisation spatiale et qui laisse de côté les espaces interstitiels. Le réseau est donc par excellence « la structure de la différenciation des lieux »⁷³. De nombreux lieux ne sont pas desservis, d'autres sont desservis au passage, d'autres encore constituent des noeuds du réseau⁷⁴.

Les réseaux de transport basés sur la grande vitesse qui se mettent en place « ne sont plus intégrés aux ensembles territoriaux comme pouvaient l'être les modes de transport antérieurs, calés davantage sur les structures de peuplement existantes, même de faible dimension »⁷⁵, selon l'analyse de Jean-François Langumier. Les effets socio-économiques, positifs ou négatifs, de la grande vitesse n'apparaissent qu'en « certains points précis des réseaux »⁷⁶ comme les gares TGV ou les complexes aéroportuaires. En conséquence, « la grande vitesse disloque l'espace en rapprochant

⁶⁹ Michel BONETTI, 1994. - « Réseaux de communication et recomposition de l'espace ». - in Villes et transport - p. 181.

⁷⁰ Hans B. THORELLI, 1986. - « Networks : between markets and hierarchies ». - Strategic management journal, GB, vol. 7.

⁷¹ Gabriel DUPUY, 1994. - *op. cit.* - p. 147.

⁷² *Ibid.* - p. 148.

⁷³ *Ibid.*

⁷⁴ Marie-France de NOÛE, *et al.*, 1993. - *op. cit.* - p. 39.

⁷⁵ Jean-François LANGUMIER, 1993. - « Réseaux de communication et développement ». - p. 167. - in Marie-France de Noüe, *et al.* - *Réseaux et territoires*. - Paris : La documentation française.

⁷⁶ *Ibid.*

considérablement dans le temps certains espaces [...] et en marginalisant certains autres espaces n'accédant pas correctement aux points d'accès à ces réseaux »⁷⁷.

2. Hétérogénéisation

Comme l'affirme Gabriel Dupuy⁷⁸, la notion même de réseau implique non seulement la discontinuité mais aussi l'existence d'une diversité et d'une hétérogénéité fondamentale dans le temps et l'espace.

« Ainsi, le territoire apparaît comme un espace fondamentalement hétérogène, et le réseau comme un opérateur-régulateur de l'hétérogénéité imposée aux déplacements par le territoire »⁷⁹.

Dans la définition que nous avons donnée précédemment du réseau⁸⁰, « l'hétérogénéité tient au fait que les points, les lieux géographiques que le réseau relie ne sont pas, au départ, de pures abstractions géométriques : villages, villes, capitales, métropoles, [...], usines, logements, barrages et centrales électriques, gares, aéroports, stations d'épuration »⁸¹. Tous ces lieux forment un ensemble hétérogène. C'est l'hétérogénéité qui fonde le besoin de relations assurées par le réseau. Sans cette hétérogénéité, les éléments n'auraient rien à s'échanger et « le réseau n'aurait pas de raison d'être »⁸².

S'il est issu de l'hétérogénéité, le réseau en est aussi un producteur. Une « ségrégation spatiale se développe »⁸³ qui favorise les points situés sur le chemin d'une liaison de communication et qui pénalise relativement les autres. On peut donc affirmer que le réseau crée et renforce l'hétérogénéité spatiale.

Cependant, le réseau n'agit pas seulement dans le sens d'une augmentation de l'hétérogénéité. Pour l'historien Marcel Roncayolo, « [l'histoire des réseaux] respecte de deux manières le passé : elle peut aller dans le sens d'un même conservatisme ; elle peut, au contraire, en libérant la circulation, activer la concurrence, briser les rentes de situation, favoriser, somme toute, les forts »⁸⁴. L'effet du réseau est complexe : il induit une modification des positions hiérarchiques qui peut conduire à une certaine

⁷⁷ Jean-François LANGUMIER, 1993. - *op. cit.* - p. 168.

⁷⁸ Gabriel DUPUY, 1987. - « Les Réseaux techniques sont-ils des réseaux territoriaux ? ». - L'Espace géographique, France, n° 3. - p. 176.

⁷⁹ Georges AMAR, Nikolas STATHOPOULOS, 1987. - « Les réseaux à organisation polaire ». - Les cahiers scientifiques du transport, France, n° 15-16. - p. 18.

⁸⁰ Au paragraphe intitulé "Le réseau comme système" en page I-53.

⁸¹ Gabriel DUPUY, 1994. - *op. cit.* - p. 145.

⁸² *Ibid.*

⁸³ Marie-France de NOÛE, *et al.*, 1993. - *op. cit.* - p. 39.

⁸⁴ Marcel RONCAYOLO, 1989. - « France des réseaux, France des inégalités ». - p. 561. - *in Histoire de la France, tome 1 : L'Espace français*. - sous la dir. de André Burguière, Jacques Revel. - Paris : Seuil.

forme d'homogénéisation. Le paragraphe qui suit porte sur cet effet d'homogénéisation du réseau.

3. Homogénéisation

« La mise en place des grands réseaux a pour but d'irriguer le pays tout entier. Elle part donc d'une utopie égalitaire que la libre circulation des hommes et des marchandises doit permettre. » Marcel Roncayolo⁸⁵.

Selon cette interprétation, la mise en place des grands réseaux procède de l'homogénéisation en tant qu'expression d'une volonté politique. Un point que l'on relie au réseau acquiert le statut que possèdent les autres points déjà reliés. L'enjeu de la "connexion au réseau" est une question essentielle pour les villes de province en France situées dans l'aire d'un projet de TGV.

En première approche, on peut affirmer que le groupe des villes connectées connaît une situation homogène, vis-à-vis du réseau. L'intérieur du réseau crée l'homogénéisation.

Il existe une définition de la notion d'homogénéité à l'intérieur des réseaux⁸⁶. Un réseau est homogène si toutes ses liaisons ont des caractéristiques identiques. Les caractéristiques prises en compte conditionnent la propriété d'homogénéité du réseau. A travers cette notion, il n'existe pas de lien direct entre les réseaux et les espaces au sein desquels ils s'inscrivent. Il s'agit d'un indicateur d'évaluation des liaisons des réseaux et non d'un outil de caractérisation de l'espace. Le critère d'homogénéité ne dit rien sur la forme du réseau. Or, celle-ci induit une hiérarchie qui introduit une différenciation à l'intérieur du réseau, c'est-à-dire une forme d'hétérogénéité. Un réseau centré est un réseau centralisateur, donc hétérogène, mais ses liaisons peuvent très bien être homogènes.

Dans le domaine des réseaux de transport, la notion d'homogénéité est ambiguë. Elle correspond plus à l'expression d'une volonté politique à l'origine des projets d'infrastructures qu'à une caractérisation des formes réticulaires. Pour spécifier les réseaux et leurs effets sur l'espace, on emploie de préférence l'idée d'une augmentation de l'hétérogénéité.

4. Discontinuum

Pour Paul Virilio, « nous assistons maintenant avec la fragmentation, la désintégration des dimensions et l'indéterminisme quantique, aux prémices d'une fusion où l'espace-temps relativiste, le **continuum** à quatre dimensions, disparaît devant l'émergence d'un espace vitesse sans dimension, l'apparition d'une sorte de **discontinuum** où la

⁸⁵ Marcel RONCAYOLO, 1989. - *op. cit.* - p. 561.

⁸⁶ Telle qu'elle est définie par : Georges AMAR, Nikolas STATHOPOULOS, 1987. - *op. cit.* - p. 15.

grandeur vitesse surgit comme espace primitif, étalon de tout dimensionnement »⁸⁷. On retrouve ici la proposition de William Bunge d'attribuer à la vitesse le rang de concept essentiel pour la description de l'espace⁸⁸.

Dans les discours sur l'espace, on rencontre parfois des expressions comme « espaces disjoints », « espaces non-contigus »⁸⁹ pour évoquer l'absence de continuité.

Ainsi pour François Plassard, « les moyens de transport rapides ont pour conséquences de rendre l'espace discontinu, de le polariser et de le hiérarchiser davantage »⁹⁰. C'est en particulier vrai pour le réseau ferroviaire et pour le réseau autoroutier qui « tendent à rendre l'espace discontinu du fait du caractère ponctuel des accès, péages ou gares »⁹¹.

Le réseau de transport multimodal terrestre des personnes crée « un espace discontinu qui ne peut pas être, concrètement, considéré comme une simple surface, et encore moins comme une surface de transport au sens de la théorie spatiale »⁹².

Comme l'explique Pierre Merlin, les systèmes de transport se rapprochent plus ou moins de la continuité spatiale. Il définit cette dernière comme la possibilité de réaliser toutes les relations possibles sur un espace. C'est une propriété théorique qui est limitée par des contraintes économiques qui sont le temps, le coût, et l'espace lui-même au travers de la consommation d'espace des infrastructures. Les modes de transport se rapprochent plus ou moins de la continuité spatiale : « les transports individuels en général, l'automobile et le camion en particulier, remplissent plus aisément les conditions (ubiquité, fractionnabilité, instantanéité) propres à se rapprocher de la continuité spatiale, alors que d'autres, nécessitant des infrastructures lourdes, des groupements importants, donc des convois séparés dans le temps (chemin de fer, voie d'eau, navigation maritime et aérienne) s'en écartent »⁹³.

⁸⁷ Paul VIRILIO, 1984. - *L'Espace critique*. - p. 121. - (C'est l'auteur qui souligne).

⁸⁸ Voir "L'espace et le temps", page I-52.

⁸⁹ Michel BONETTI, 1994. - « Réseaux de communication et recomposition de l'espace ». - in Villes et transport - p. 181.

⁹⁰ François PLASSARD, 1991. - *op. cit.* - p. 23.

⁹¹ Philippe MATHIS, 1996. - « La Stratégie des réseaux de transport dans le grand Ouest ». - p. 98. - in L'Entreprise Atlantique. - dirigé par Yves Morvan. - Paris : Editions de l'Aube (Mondes en cours, Cités et territoires, I.A.A.T.). - 115 p.

⁹² *Le Transport multimodal terrestre des personnes en Europe*, 1994. - sous la dir. de Philippe Mathis. - Tours : Laboratoire du CESA. - p. 10.

⁹³ Pierre MERLIN, 1991. - *op. cit.* - p. 43.

5. Anisotropie

Les théories économiques spatiales ont longtemps modélisé l'espace sous la forme d'une plaine uniforme, homogène et isotrope.

Un espace est isotrope, si ses propriétés sont identiques dans toutes les directions. A l'opposé du champ uniforme du marché, le réseau rend compte de directions privilégiées pour les échanges. Le réseau est une structure qui exprime l'aspect anisotrope de l'espace : « la mise en oeuvre d'un réseau engendre des anisotropies spatiales »⁹⁴. Ces directions sont les liaisons, les infrastructures par lesquelles transitent les véhicules, les flux.

Parce que la distribution des activités humaines sur la surface de la terre est tout sauf homogène, comme le mentionne Waldo R. Tobler, « nous devons prendre spécialement en considération les caractéristiques anisotropiques de l'*area geographica* »⁹⁵. Le développement urbain du 19^{ème} siècle en France, le long des faubourgs est une illustration de l'aspect anisotrope de l'espace de l'Aménagement.

Plus récemment, le développement des lignes de train à grande vitesse en France permet-il à des villes de voir leur accessibilité s'améliorer de manière spectaculaire mais « souvent dans une seule direction et non pas sur l'ensemble du réseau »⁹⁶ nous indique François Plassard.

B. *Superposition d'espaces*

« Le maillage⁹⁷ du territoire ne se traduit pas par la multiplication de noeuds de transport équivalents, mais plutôt par la superposition de réseaux aux performances différentes qui accentuent l'hétérogénéité des localisations desservies. »⁹⁸ Jean-Pierre Puig, Jacques-François Thisse et Hubert Jayet.

Pour ces auteurs, le développement des infrastructures de transport crée des entités cohérentes – les réseaux –, mais en même temps, provoque un accroissement de l'hétérogénéité de l'espace. Le principe de différenciation des noeuds de transport se double d'un effet de superposition qui seul peut expliquer la coexistence d'espaces cohérents, mais disjoints.

⁹⁴ Marie-France de NOÛE, *et al.*, 1993. - *op. cit.* - p. 39.

⁹⁵ « That is to say that in practise we have to take into special consideration the anisotropical qualities of the *area geographica*. » - Waldo R. TOBLER, 1963. - *op. cit.* - p. 59.

⁹⁶ François PLASSARD, 1991. - *op. cit.* - p. 20.

⁹⁷ Le maillage est l'action d'organiser, de compléter un réseau pour qu'il ressemble à un filet (Marie-France de NOÛE, *et al.*, 1993. - *op. cit.* - p. 111).

⁹⁸ Jean-Pierre PUIG, Jacques-François THISSE, Hubert JAYET, 1995. - « Enjeux économiques de l'organisation de l'espace français ». - p. 38. - *in* Développements méthodologiques en économie spatiale. - Lille : C.E.S.U.R.E./Plan urbain.

Les réseaux de communication au sens le plus large génèrent des espaces très différents par leurs structures, leurs modes de mise en relation, par leurs limites, etc. Des espaces qui se superposent et se connectent en des endroits et à des moments particuliers, tout en restant autonomes dans leurs logiques. On parle alors d'espace « feuilleté »⁹⁹.

François Plassard décrit l'apparition, dans le sillage des nouveaux réseaux à grande vitesse, d'un « espace dualisé dont les composants obéissent à des logiques de fonctionnement totalement différentes »¹⁰⁰. Il y a d'une part l'espace des grandes villes et métropoles situées sur le réseau à grande vitesse, qui est appelé "espace réseau". D'autre part, il y a l'espace "banal" où « les notions de proximité, de continuité et de contiguïté ont encore un contenu correspondant aux espaces que l'on parcourt »¹⁰¹ qui est l'espace régional environnant les grandes villes précitées. On retrouve les trois notions de proximité, de continuité et de contiguïté qui seront formalisées plus loin¹⁰² par la topologie.

L'espace est parcouru par des réseaux de transport qui renvoient non seulement à des logiques, mais aussi à des échelles différentes. En certains lieux, on peut observer la confrontation de ces réseaux ; c'est le cas des aéroports ou des gares TGV par exemple. Au cours d'un même trajet, on peut être amené à voyager à des vitesses moyennes de l'ordre de 200 kilomètres par heure sur le réseau TGV, puis à avancer, dans des conditions optimales de fluidité du trafic, en empruntant un transport urbain, à une vitesse de l'ordre de la vingtaine de kilomètres par heure. Ces deux espaces de déplacement sont foncièrement différents, et leur bonne interconnexion constitue un enjeu majeur.

C. *Contraction/dilatation*

L'amélioration relative des liaisons interurbaines provoque la contraction des zones rurales, car elles sont beaucoup moins bien desservies.

L'amélioration des réseaux de transport urbains, aussi bien que les transferts modaux des transports en commun vers la voiture particulière, incitent à l'extension spatiale des zones urbaines : c'est le phénomène de périurbanisation. En même temps, la saturation grandissante des réseaux urbains dans les grandes agglomérations provoque la dilatation de l'espace-temps. Une dilatation spatio-temporelle s'ajoute à la dilatation spatiale des aires urbaines et la combinaison de ces deux phénomènes s'oppose à la contraction relative des zones rurales.

⁹⁹ Michel BONETTI, 1994. - « Réseaux de communication et recomposition de l'espace ». - in Villes et transport. - p. 181.

¹⁰⁰ François PLASSARD, 1991. - *op. cit.* - p. 24.

¹⁰¹ *Ibid.*

¹⁰² A la partie "Topologie", page I-85.

Ce double mouvement opère sur les durées et sur les coûts de transport. L'espace physique n'étant pas extensible¹⁰³, la longueur d'une infrastructure est invariable. La longueur en kilomètres d'un itinéraire entre deux points ne peut varier, dans une faible proportion le plus souvent, que lors de l'ouverture d'un nouveau tracé, c'est-à-dire lors de la création d'une nouvelle infrastructure¹⁰⁴.

Les études historiques de la mobilité tendent à montrer que le budget individuel journalier en temps de déplacement est à peu près constant¹⁰⁵. Le temps libre acquis à l'occasion des améliorations des moyens de transport est souvent utilisé pour voyager plus fréquemment et sur de plus longues distances. A budget de temps constant, on peut donc affirmer que l'espace se contracte dans la perception des individus¹⁰⁶.

Le lien entre le temps que l'on met pour accéder à un lieu et la distance à ce lieu introduit une dimension dynamique. On peut observer des phénomènes de rapprochement et d'éloignement qui induisent l'idée d'un « espace élastique »¹⁰⁷.

Les positions relatives des lieux sont sans cesse remises en cause par l'amélioration des moyens de transport dans un mouvement de « convergence de l'espace temps »¹⁰⁸. Ce concept, formalisé par Donald G. Janelle en 1968, explicite une notion plus confuse de « rétrécissement du monde »¹⁰⁹.

Ce mouvement de rétrécissement s'effectue de manière discontinue, par paliers, à chaque introduction d'un nouveau moyen de transport. Cependant, il existe une force antagoniste de dilatation. Elle est due aux encombrements des réseaux et aussi aux « difficultés terminales »¹¹⁰, selon l'expression de Jean-Marie Huriot et Jacky Perreur, qui apparaissent dans tous les phénomènes de connexion.

L'amélioration des moyens de transport procure des gains de temps et/ou de coût qui se traduisent par un rétrécissement de l'espace. Cependant, comme le souligne Pip Forer, « les bénéfices sont loin d'être universels »¹¹¹ : il faut concevoir une contraction

¹⁰³ Au moins à l'échelle historique.

¹⁰⁴ La ligne nouvelle du TGV Sud-Est entre Paris et Lyon est plus courte (425 km) que la ligne classique (512 km) parce qu'elle accepte des pentes plus importantes et qu'elle est moins sinueuse que celle-ci (Pierre MERLIN, 1994. - *op. cit.* - p. 34.).

¹⁰⁵ Klaus SPIEKERMANN, Michael WEGENER, 1993. - *New time-space maps of Europe*. - communication aux « Premières rencontres de Théo Quant », IRADES, Université de Franche-Comté, 7-8 octobre 1993. - p.1.

¹⁰⁶ *Ibid.*

¹⁰⁷ Michel BONETTI, 1994. - « Réseaux de communication et recomposition de l'espace ». - in Villes et transport. - p. 182.

¹⁰⁸ Donald G. JANELLE, 1968. - « Central place development in a time-space framework ». - Professional geographer, USA, n° 20. - p. 5-10.

¹⁰⁹ « shrinking world ». - *ibid.* - p. 7.

¹¹⁰ Jean-Marie HURIOT, Jacky PERREUR, 1990. - « Distances, espaces et représentations ». - RERU, France 1990, n°2. - p. 225.

¹¹¹ Pip FORER, 1978. - *op. cit.* - p. 241.

de l'espace qui ne soit pas homogène et qui intègre des dilatations locales, car la « convergence est loin d'être uniforme, puisque l'implantation et l'amélioration des moyens de transport sont inégalement réparties »¹¹². C'est ce qu'exprime Jean-Pierre Duport en écrivant que, « l'espace, à certains endroits, se resserre tandis qu'à d'autres il est distendu »¹¹³.

D. *Raréfaction des points d'accès*

On peut observer une hiérarchie des réseaux de transport suivant la longueur moyenne en kilomètres des trajets qu'on peut effectuer. Cette longueur moyenne est, pour le transport de passagers, assez directement liée à la vitesse de parcours. Ainsi, à l'échelle d'un continent, « on a un espace presque continu, irrigué par le réseau routier local qui ne permet de franchir que 70 ou 80 kilomètres dans l'heure »¹¹⁴ et à l'autre extrême, on trouve un semis de points dispersés qui constituent les entrées des réseaux de transport rapide. Et ces points sont d'autant plus dispersés que le moyen de transport est rapide. Cet aspect est particulièrement marqué pour « la grande vitesse ferroviaire et l'aérien, caractéristiques des dessertes point à point »¹¹⁵.

La grande vitesse implique des arrêts distants. Pour le TGV, chaque arrêt « coûte presque 10 minutes s'il s'agit d'une simple halte sur la voie rapide, et jusqu'à une demi-heure s'il faut passer par une gare de centre-ville »¹¹⁶.

On se trouve face au dilemme classique de la grande vitesse formulé par Roger Vickermann, Klaus Spiekermann et Michael Wegener : « le besoin de fournir plus d'arrêts pour générer plus de trafic abaisse la vitesse moyenne et augmente les temps de trajet et réduit ainsi l'intérêt pour les voyageurs qui veulent relier les villes principales »¹¹⁷.

Le TGV « doit relier des villes de taille importante pour que les trafics soient suffisants ; il ne doit pas y avoir d'arrêt intermédiaire pour que les gains de temps apportés par la grande vitesse ne disparaissent pas »¹¹⁸. Suivant cette logique, on voit se tracer « une structure théorique du réseau optimal »¹¹⁹ sous la forme d'un semis de

¹¹² Jean-Claude MÜLLER, 1979. - *op. cit.* - p. 223.

¹¹³ Jean-Pierre DUPORT, 1991. - « Un Outil au service de l'aménagement du territoire ». - p. 25. - in T.G.V. et aménagement du territoire - Paris : Syros/alternatives (T.E.N.).

¹¹⁴ Alain BONNAFOUS, 1994. - *op. cit.* - p. 329.

¹¹⁵ Jean-Pierre PUIG, Jacques-François THISSE, Hubert JAYET, 1995. - *op. cit.* - p. 38.

¹¹⁶ François PLASSARD, 1991. - *op. cit.* - p. 19.

¹¹⁷ « The classic dilemma of high-speed rail comes to the fore in here : the need to provide more stops to generate more traffic, which slows down travel times, which lessens the advantage for travellers between major cities ». - Roger VICKERMANN, Klaus SPIEKERMANN, Michael WEGENER, 1995. - « Accessibility and economic development in Europe ». - communication à la conférence « European transport and communication networks », Espinho, Portugal, 17-23 avril 1995. - p. 13.

¹¹⁸ François PLASSARD, 1991. - *op. cit.* - p. 19.

¹¹⁹ *Ibid.*

noeuds situés à des distances variant de 100 à 400 kilomètres. Pour des distances inférieures, on ne peut pas – dans l'état actuel des techniques – parler de grande vitesse ferroviaire.

Il faut noter que la structure spatiale qui se construit est optimale *au sens du réseau*. La construction des réseaux à grande vitesse est soumise à des contraintes sur la localisation des entrées. C'est pour un fonctionnement optimal du réseau que l'on doit créer un tel semis de points d'entrée. Les contraintes d'optimalité de fonctionnement renvoient explicitement à des impératifs de gestion. C'est le réseau qui impose sa loi et non la forme spatiale préexistante. A cet égard, en France, le choix d'un schéma directeur des lignes à grande vitesse qui évite les centres-villes pour permettre la grande vitesse intégrale sur la longue distance apparaît comme un choix stratégique¹²⁰.

Pour comprendre les effets des systèmes de transport sur l'espace, on doit considérer la raréfaction des points d'accès aux réseaux, qui est un phénomène intrinsèquement lié à la grande vitesse.

Dans les liens et les influences mutuelles des transports et de l'espace, il faut tenir compte des apports de la théorie économique du développement. Jean-Pierre Puig, Jacques-François Thisse et Hubert Jayet formulent une des grandes conclusions de cette théorie en disant que « plutôt que de favoriser une plus large dispersion des implantations, les effets d'entraînement créés par la baisse des coûts de transport ont favorisé la formation d'un nombre relativement restreint de pôles de développement »¹²¹.

La polarisation de l'espace est une des tendances lourdes qui caractérise le développement économique actuel.

Il est à noter que le faible nombre de noeuds du réseau des TGV est un facteur qui tend à renforcer la polarisation du territoire autour de quelques villes.

E. Effet tunnel

Le phénomène de raréfaction des points d'accès se traduit par la sélection d'un nombre restreint de villes qui sont ou seront connectées. La réalisation d'un réseau à grande vitesse impose le choix d'un nombre limité d'entrées, donc le choix d'une liste de villes connectées.

¹²⁰ L'interconnexion parisienne, ou le contournement de Lyon par l'aéroport de Satolas procèdent de cette tendance (Jean-François TROIN, 1995. - *op. cit.* - p. 70 et 73.)

¹²¹ Jean-Pierre PUIG, Jacques-François THISSE, Hubert JAYET, 1995. - *op. cit.* - p. 3.

Ainsi, comme l'affirme Pierre-Henri Derycke, « les nouveaux modes de transport rapides : autoroutes, lignes aériennes, TGV, réseaux câblés, [...] n'assurent une bonne connectivité¹²² qu'aux étages supérieurs de l'armature urbaine »¹²³. Entre ces étages supérieurs, les lignes sont inaccessibles, dépourvues d'entrées comme de sorties, à la manière d'un tunnel, les espaces intermédiaires sont effacés¹²⁴. Ce phénomène, que l'on appelle par analogie "effet tunnel", est de plus en plus présent dans les réseaux à grande vitesse et constitue le pendant sur l'espace interstitiel de la raréfaction des points d'accès.

Avec les moyens de transport modernes, la vitesse est une fonction croissante de la distance parcourue¹²⁵. Ceci s'explique par l'existence des contraintes terminales, dont la durée est incompressible, à savoir l'embarquement, le déchargement, les phases d'accélération et de décélération. Le deuxième facteur est dû au choix du mode de transport : quand la distance à parcourir est importante, on choisit un moyen de transport rapide. Par conséquent, les modes de transport rapides ne peuvent relier que des lieux suffisamment "lointains" pour que les phases terminales n'envahissent pas totalement la durée du trajet. La conséquence de ce mode de fonctionnement des réseaux est le renforcement de l'effet tunnel sur l'espace interstitiel.

F. *Non symétrie*

A l'échelle urbaine, « on parle de la distance¹²⁶ à parcourir pour aller d'un endroit à un autre dans une ville ; cependant, avec les sens uniques, le parcours peut être différent de a vers b et de b vers a , et ne pas avoir la même longueur : la propriété de symétrie n'est pas vérifiée »¹²⁷.

La symétrie peut aussi disparaître quand on évalue la longueur du chemin entre points en terme de temps de déplacement : la durée du trajet aller est souvent légèrement différente de celle du trajet retour, à cause, par exemple, des correspondances ferroviaires, des conditions de circulation (fluidité du trafic, conditions

¹²² La connectivité, dans la théorie des graphes, désigne un réseau dont tout point est accessible à partir de n'importe quel autre.

¹²³ Pierre-Henri DERYCKE, 1994. - « Réseaux urbains ». - p. 347. - in *Encyclopédie d'économie spatiale*. - sous la dir. de Jean-Paul Auray, Antoine Bailly, Pierre-Henri Derycke, Jean-Marie Huriot. - Paris : Economica (Bibliothèque de Science Régionale).

¹²⁴ François PLASSARD, 1991. - *op. cit.* - p. 23.

¹²⁵ Jean-Marie HURIOT, Jacky PERREUR, 1990. - *op. cit.* - p. 225.

¹²⁶ Les aspects mathématiques de la distance seront développés plus loin ("Distance" à partir de la page I-97). A ce stade, pour éclairer le propos, on peut préciser que la fonction de distance est construite à partir de propriétés mathématiques qui sont : la non négativité, l'unicité, la symétrie et l'inégalité triangulaire. En termes mathématiques, une fonction de distance est, par définition, symétrique.

¹²⁷ Claude FLAMENT, 1968. - *Théorie des graphes et structures sociales*. - Paris : Gauthier-Villars/Mouton (Mathématiques et sciences de l'homme). - p. 28

météorologiques, etc.) ou de l'évolution du comportement du conducteur. Ainsi, « en général, les distances-temps ne sont pas symétriques »¹²⁸.

G. *La ligne droite*

Depuis Pythagore, Euclide et Archimède, il semble acquis que le chemin le plus court entre deux points est la ligne droite. On vérifie ce principe fondamental dans le tracé des plus anciens chemins connus : « le piéton a toujours apprécié la ligne droite, lorsque le relief le permet »¹²⁹. Or, tous les déplacements que nous effectuons nous font emprunter une infrastructure, qu'elle soit naturelle comme les cours d'eau, ou artificielle comme les routes. Et cette infrastructure décrit rarement une ligne droite entre l'origine et la destination.

Le tracé des routes en particulier dépend fortement des conditions des terrains traversés¹³⁰. Le relief et les obstacles naturels génèrent des détours qui allongent fortement la longueur des itinéraires¹³¹.

Pour éviter une zone de congestion il peut s'avérer plus économique en termes de durée et/ou de coût d'emprunter un itinéraire de contournement.

Les trajets empruntant les infrastructures ont une longueur, en mètre ou en kilomètres, plus importante que le même trajet en ligne droite. Cependant, ce dernier quand il n'est pas rendu impossible par le relief ou à cause de l'utilisation d'un véhicule particulier, occasionne des durées et des coûts bien supérieurs. Le trajet en ligne droite est donc toujours moins efficace – en termes de durée ou de coût. Selon le critère d'efficacité, le trajet qui emprunte les infrastructures sera toujours préféré au trajet en ligne droite.

¹²⁸ Jean-Claude MÜLLER, 1979. - *op. cit.* - p. 215.

¹²⁹ Georges REVERDY, 1995. - *Histoire des routes de France*. - Paris : PUF (Que sais-je ?). - p. 5.

¹³⁰ Christian WERNER, 1968. - « The Law of refraction in transportation geography ». - *Canadian Geographer*, Canada, vol. 12. - p. 28.

¹³¹ Pour une représentation du degré de circuité – la comparaison des détours imposés par les contraintes topographiques et la sinuosité des voies par rapport à des chemins à vol d'oiseau – cf. : Laurent CHAPELON, 1996. - « Contraintes topographiques et réseaux de transport ». - communication au colloque Géopoint « Espace et nature dans la Géographie aujourd'hui », Avignon, Groupe DUPONT, 23-24 mai 1996. - Tours : Laboratoire du CESA, 1996. - 16 p.

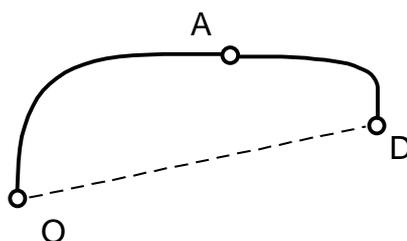


figure 8 : la ligne droite euclidienne et
l'infrastructure

Il existe très souvent un point A situé entre O et D , mais qui n'est pas porté par le segment de droite unissant O et D . Le déplacement passant par A est plus "aisé" que celui empruntant la ligne droite. Ce point A appartient bien sûr à l'infrastructure de transport reliant l'origine et la destination.

Sans poursuivre, pour l'instant, la formalisation mathématique, nous pouvons d'ores et déjà affirmer que pour les phénomènes de déplacement, l'axiome d'Euclide n'est pas respecté.

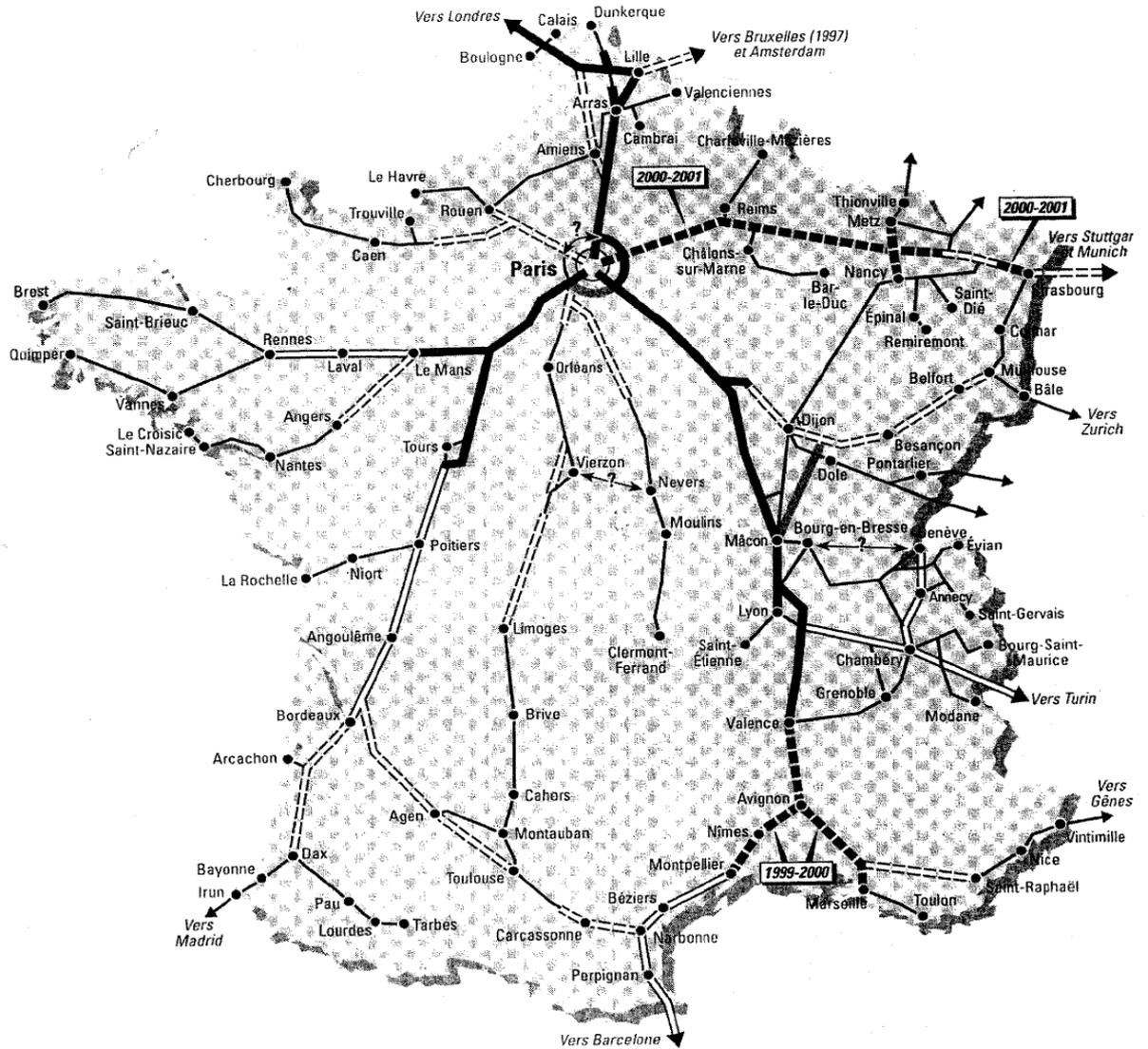
L'axiome d'Euclide pèse pourtant très fortement sur notre conception de l'espace. Consultons la carte du schéma directeur des liaisons ferroviaires à grande vitesse en page suivante¹³². L'apparition de modes de transport terrestres rapides introduit encore plus de perturbations. En effet, la ligne ferroviaire nouvelle tracée entre Paris et Lyon est plus courte en kilomètres que la ligne classique¹³³. En ce sens, elle est plus proche de la ligne droite euclidienne. Cependant, depuis la constitution d'un véritable réseau de TGV en France, on voit apparaître une tendance inverse : le chemin le plus court en temps en train entre Tours et Lyon passe aujourd'hui par la banlieue parisienne. On s'écarte alors complètement de la ligne droite.

Comment restituer dans une représentation de l'espace la déformation infligée par l'éloignement grandissant à la ligne droite euclidienne ?

¹³² Carte reproduite de : Jean-François TROIN, 1995. - *op. cit.* - p. 73.

¹³³ Cf. note de bas de page n° 104, page 68.

carte 2 : le schéma directeur des liaisons ferroviaires à grande vitesse



0 100 200 km

Source : La lettre SNCF, n° 87, 1991. Complété et réactualisé par J.F. Troinen août 1994

- Lignes nouvelles en service en 1994
- - - - -** Lignes nouvelles décidées (avec les dates d'achèvement prévues)
- ====** Lignes nouvelles ultérieures (projets avancés)
-** Lignes nouvelles ultérieures (projets à l'étude)
- Ligne nouvelle dont l'itinéraire n'est pas arrêté
- Lignes aménagées pour la grande vitesse et lignes classiques parcourues par des TGV
- ← ? →** Tronçons non officiellement retenus

On peut formuler le problème de la ligne droite d'une manière plus mathématique au travers de l'axiome de l'inégalité triangulaire¹³⁴.

Une application très claire en est faite dans le domaine du transport de marchandises et aussi dans le transport aérien de passagers où l'on voit apparaître une logique de "*hub and spokes*"¹³⁵. Cela signifie que les grandes entreprises de transport, pour rationaliser la gestion du réseau, placent de grands pôles d'où partent des liaisons radiales irriguant l'espace. Ce système permet un meilleur remplissage des relations tout en permettant de conserver des cadences de desserte élevées. Cette logique implique que le trajet optimal unissant deux extrémités de "rayons" *A* et *B* passe nécessairement par le "moyeu" central *M*, même si la distance en kilomètres séparant les deux extrémités est faible. Il est clair, en termes de temps et de coûts de transport, que le chemin direct entre *A* et *B* est moins performant que le chemin passant par le moyeu¹³⁶.

H. L'aspect dynamique

Tous les phénomènes que nous venons de décrire s'inscrivent dans des évolutions temporelles qui correspondent aux améliorations techniques et/ou technologiques des réseaux de transport¹³⁷. L'évolution des réseaux de transport peut parfois correspondre non pas à une amélioration, mais à une dégradation des conditions de déplacement. La croissance de la saturation des grands axes des mégapoles qui entraîne une augmentation des temps de trajet, en est un exemple manifeste. Le principe de l'évolution suppose le mouvement, c'est-à-dire un aspect dynamique, qui entraîne le système vers un changement, qui peut être jugé positif ou négatif.

*« Les structures du monde réel ne sont que des lents processus qui s'inscrivent dans la longue durée, les éléments à l'évolution la plus lente dans toute portion de l'espace-temps, par exemple les formes spatiales en contraste avec les hommes qui les traversent »*¹³⁸. J. M. Blaut.

C'est un point important pour l'étude générale des distorsions de l'espace. Il s'agit de s'intéresser non seulement à l'état final des systèmes spatiaux, mais aussi et surtout au passage d'un état à l'autre.

¹³⁴ Cf. dans la partie traitant de la métrique : "Définition mathématique", page I-97.

¹³⁵ "*Hub and spokes*" : le moyeu et les rayons (d'une roue).

¹³⁶ Alain BONNAFOUS, 1990. - « Mutation des systèmes de transport et radialisation de l'espace ». - RERU, France, n°2. p. 313.

¹³⁷ Ces améliorations entraînent des gains de temps. Il y a donc ici deux inscriptions temporelles des phénomènes : un "temps court" qui est dû aux améliorations des moyens de transport et un "temps long" qui correspond à la durée nécessaire à l'évolution technique.

¹³⁸ « [...] structures of the real world are simply slow processes of long duration, the more slowly changing elements in any spatio-temporal segment, e. g., landforms as contrasted with the men traversing them. » - J. M. BLAUT, 1961. - *op. cit.* - p. 4.

Conclusion

Nous avons établi le cadre conceptuel pour les espaces de notre recherche : nous étudions l'espace de l'Aménagement auquel nous adjoignons la fonction de transport. Nous nous positionnons dans le cadre défini par Pip Forer des espaces plastiques, qui est l'équivalent de celui proposé par Colette Cauvin avec les espaces fonctionnels.

Notons que le thème des transports apparaît dès la construction du cadre conceptuel spatial. Est-ce à dire que les deux concepts – espace et transport – recouvrent un objet unique ? En tout état de cause, nous pouvons affirmer que les transports constituent une porte d'entrée privilégiée pour comprendre l'espace.

Nous nous intéressons aux transports : pour cela nous avons défini les concepts de système et de réseau. Nous sommes ainsi en mesure de construire une modélisation du système de transport sous la forme d'un réseau. Celui-ci est constitué de binômes fonctionnels ; cette notion recouvre l'association d'un véhicule et d'un ensemble d'infrastructures linéaires et ponctuelles.

Après avoir défini l'espace qui nous intéresse et les réseaux de transport qui le parcourent, nous abordons la question des interactions entre ces deux éléments. Pour ce faire nous avons établi une revue de la littérature géographique, économique, historique, sociologique, en incluant les écrits des aménageurs et des spécialistes des réseaux de transport.

Les grands thèmes qui se dégagent de cette revue forment les titres des paragraphes de la Section 3^{ème} section intitulée "Interactions entre l'espace et les réseaux", et qui débute page I-60. L'espace réticulaire est le corrélat spatial du développement des réseaux : c'est une forme fortement hétérogène, discontinue et anisotrope. Quant à l'effet d'homogénéisation du réseau, il n'existe qu'à l'état de volonté politique ou de critère de gestion interne du réseau.

La thématique de la superposition des espaces provient de la variété des utilisations possibles d'un même réseau et de la variété des réseaux empruntés lors d'un même trajet. L'effet des réseaux de transport sur l'espace-temps consiste en un double mouvement de contraction et de dilatation. La contraction opère sur les liaisons bien dotées en infrastructures performantes, tandis que la dilatation apparaît dans les zones urbaines à cause des encombrements, mais aussi à cause des difficultés terminales dans les connexions.

Une des conséquences la plus brutale du développement des systèmes de transport à grande vitesse est la raréfaction des points d'entrées. Ce phénomène est couplé avec l'effet tunnel des infrastructures.

Les déplacements établissent des mesures de temps ou de longueur de trajets, qui ne sont que très rarement égales dans chaque sens.

Les infrastructures de transport permettent d'établir des chemins qui minimisent le coût de déplacement. Cette assertion quasiment tautologique a d'importantes répercussions sur nos conceptions de l'espace : nous faisons pour l'instant le constat que nos déplacements ne s'effectuent pratiquement jamais en ligne droite, alors que ce principe est à la base de toutes nos représentations de l'espace.

Enfin, nous devons nous situer dans une conception dynamique de l'espace : pas tant parce que le déplacement implique la vitesse, qu'à cause du rythme rapide de l'évolution des techniques et des modes de déplacement.

Les interactions entre les réseaux de transport et l'espace apparaissent comme des effets spatio-temporels : c'est le cas de la contraction/dilatation, de l'imbrication des échelles et la superposition des espaces, de la non symétrie des déplacements, et de l'aspect dynamique. La forme spatiale des réseaux engage une autre famille d'interactions : l'hétérogénéité, les discontinuités, l'anisotropie, la raréfaction des points d'accès et l'effet tunnel, et l'écart à la ligne droite.

Nous voyons apparaître des formes spatiales spécifiques à l'organisation réticulaire, ainsi que des effets sur l'espace-temps.

La question essentielle que pose la représentation des interactions entre les réseaux de transport et l'espace est celle de la représentation de l'espace-temps.

Sur la base de cette revue des interactions entre réseaux de transport et espace, nous abordons maintenant les outils mathématiques de l'analyse spatiale.

CHAPITRE II

LES OUTILS MATHÉMATIQUES DE L'ANALYSE SPATIALE

Introduction

Nous cherchons à rendre compte des phénomènes spatiaux que nous avons évoqués à la fin du chapitre précédent.

Dans ce but, nous souhaitons construire des outils formels qui puissent être utilisés de façon explicative et heuristique.

Nous consacrons ce chapitre aux outils mathématiques qui sont utilisés en analyse spatiale. Parmi ces outils formels, on trouve des objets et des concepts mathématiques fondamentaux – les espaces mathématiques, les graphes – mais aussi des notions plus développées comme la distance-réseau ou la distance de graphe.

Toutes ces notions évoluent autour du concept de topologie. Il est donc essentiel de préciser les relations qu'entretiennent ces concepts mathématiques fondamentaux entre eux.

Il faut pouvoir identifier les propriétés des structures mathématiques que l'on met en œuvre. Mais il est aussi très important d'évaluer la conservation – ou la non conservation – de ces propriétés quand on transforme les espaces mathématiques.

Pour Jean-Paul Auray, Gérard Duru, Michel Lamure¹³⁹, lorsque les économistes cherchent à rendre compte de l'aspect spatial des phénomènes, ils se tournent vers le plan réel¹⁴⁰. Or, ils évaluent parfois mal la richesse de l'ensemble \mathbb{R}^2 et ils utilisent un

¹³⁹ Jean-Paul AURAY, Gérard DURU, Michel LAMURE, 1994. - « Formes spatiales et espaces discrets ». - p 73. - in *Encyclopédie d'économie spatiale*. - sous la dir. de Jean-Paul Auray, Antoine Bailly, Pierre-Henri Derycke, Jean-Marie Huriot. - Paris : Economica (Bibliothèque de Science Régionale).

¹⁴⁰ L'ensemble des nombres réels est noté \mathbb{R} . Le plan réel est symbolisé par \mathbb{R}^2 , c'est à dire l'ensemble des couples de réels. Les éléments de \mathbb{R}^2 peuvent être représentés sur un plan à deux dimensions.

support mathématique surdimensionné, au risque d'exploiter des propriétés sans les identifier clairement. De même, en Physique, le terme d'espace sans aucun adjectif associé désigne implicitement les trois dimensions de l'espace réel, R^3 . Dès qu'il s'agit d'exploiter telle ou telle propriété particulière d'un espace, le mathématicien restreint son domaine d'étude, le dimensionne au minimum, pour ne pas risquer d'utiliser de propriété implicite.

Beaucoup d'auteurs des sciences régionales, à l'instar de François Plassard, se méfient des notions mathématiques et craignent de se laisser "enfermer" dans leurs concepts trop étroits¹⁴¹.

Pourtant, les définitions les plus précises se trouvent dans le champ mathématique. Elles sont certes étroites et peu nuancées, mais c'est l'interprétation qu'on peut en faire au travers de l'application aux champs des sciences humaines qui peut, elle, se nuancer, se relativiser, s'humaniser.

En analyse spatiale, affirme Bernard Rouget, « à un corps d'hypothèses relatives à l'espace est irrémédiablement attachée une représentation mathématique de cet espace »¹⁴². On en revient au fait que le choix d'une formalisation adéquate est particulièrement important. Dans le domaine de l'analyse spatiale, comme l'affirme Jean-Marc Besse, les mathématiques « jouent le rôle d'un véritable outil de construction de concepts »¹⁴³.

L'analyse méthodologique doit être conçue à partir de la recherche des caractères essentiels et spécifiques de l'espace sur lequel on travaille. Intervient ensuite le choix du corps d'hypothèses mathématiques. Celui-ci doit à la fois rendre compte fidèlement des caractères spécifiques de l'espace et permettre la représentation.

Ces arguments militent en faveur d'un retour aux définitions issues des mathématiques, pour ensuite construire le raisonnement en enrichissant les notions simples par des éclairages multiples.

¹⁴¹ François PLASSARD, 1976. - *op. cit.* - p. 69.

¹⁴² Bernard ROUGET, 1975. - *op. cit.* - p. 170.

¹⁴³ Jean-Marc BESSE, 1994. - « L'Analyse spatiale et le concept d'espace ». - p. 8 - in Encyclopédie d'économie spatiale. - sous la dir. de Jean-Paul Auray, Antoine Bailly, Pierre-Henri Derycke, Jean-Marie Huriot. - Paris : Economica (Bibliothèque de Science Régionale).

Section 1 Hiérarchie des espaces mathématiques

Pour établir le cadre formel de notre recherche, nous allons mettre en rapport dialectique les notions mathématiques élémentaires et les utiliser comme des “briques” du raisonnement.

Nous explicitons les structures mathématiques de l’analyse spatiale en prenant comme porte d’entrée la théorie des ensembles. Les définitions mathématiques des notions abordées dans ce chapitre sont reprises en annexe¹⁴⁴.

En mathématiques l’espace est un ensemble muni d’une structure.

Un espace quelconque est caractérisé par une série de propriétés. On peut expliciter un espace en précisant sa structure ou bien en donnant la liste des propriétés qu’il vérifie ; les deux démarches sont équivalentes.

Notre objectif, dans cette première partie du chapitre consacré aux outils formels est d’établir les relations existant entre les principales structures mathématiques qui sont utilisées pour modéliser l’espace.

En premier lieu, il faut définir le concept fondamental – les mathématiciens parlent de concept primitif¹⁴⁵ – qui est celui d’ensemble.

A. Ensemble

Les notions “d’ensemble”, “d’élément” et “d’appartenance” sont des notions primitives des mathématiques. On définit les trois concepts en même temps.

Les ensembles sont caractérisés par la nature des éléments dont ils sont composés. La dimension d’un ensemble est une information importante, mais complémentaire. Elle sert surtout en topologie. Un ensemble à une dimension correspond à une droite, un ensemble à deux dimensions à une surface, un ensemble à trois dimensions à un volume ; au-delà, il n’y a plus d’analogie possible avec l’espace concret.

Sauf mention explicite, dans les développements mathématiques qui suivent, on considère des ensembles possédant un nombre quelconque de dimensions, c’est-à-dire aussi les ensembles de dimension infinie. Cependant, la très grande majorité des applications en analyse spatiale fait appel à des ensembles de dimension inférieure ou égale à 3.

¹⁴⁴ Cf. “De l’espace affine à la métrique”, page 209.

¹⁴⁵ Stella BARUK, 1992. - *Dictionnaire de mathématiques élémentaires*. - Paris : Seuil. - p. 410.

Les éléments de ces ensembles sont quelconques. Ils peuvent être en nombre fini ou non. Quand ce sont des nombres, ils peuvent appartenir à l'ensemble des entiers, des réels et peuvent aussi être des nombres imaginaires. En ce qui concerne les développements mathématiques qu'on trouvera dans ce travail, le point de la nature des éléments de l'ensemble de départ est finalement relégué à une place relativement subalterne. La notion de structure est bien plus importante.

Pour construire la structure usuelle de l'espace euclidien, il nous faut expliciter les espaces affines et les espaces vectoriels ; ces deux derniers font l'objet des deux paragraphes suivants. Ensuite, de l'espace vectoriel euclidien, on passe à l'espace vectoriel normé, puis à la métrique. Cette dernière est finalement mise en relation avec la topologie.

B. Espace vectoriel et espace affine

Un espace vectoriel sur \mathbb{R} est un triplet $(E, +, \cdot)$ où $+$ et \cdot sont des lois de composition interne et externe respectivement, et qui vérifient les axiomes¹⁴⁶ :

- $(E, +)$ est un groupe commutatif.
- quel que soit a appartenant à E , $1 \cdot a = a$ (1 est l'élément unité) ;
- quels que soient a, b éléments de E et α un nombre réel, encore appelé scalaire :

$$\alpha \cdot (a + b) = \alpha \cdot a + \alpha \cdot b$$

- quels que soient les scalaires α et β et l'élément a de E :

$$(\alpha + \beta) \cdot a = \alpha \cdot a + \beta \cdot a$$

$$(\alpha \cdot \beta) \cdot a = \alpha \cdot (\beta \cdot a)$$

Tout élément de E , muni d'une structure d'espace vectoriel est appelé vecteur¹⁴⁷.

L'espace affine fait apparaître le concept de "point". On peut y définir des droites et des segments.

On appelle **espace affine** un couple (A, E) si :

¹⁴⁶ Jean-Paul AURAY, M. BRISSAUD, Gérard DURU, Michel LAMURE, 1990. - « Prétopologie, prémétrie et connexité ». - RERU, France, 1990 n°2. - p. 184.

¹⁴⁷ Il est possible de définir l'espace vectoriel non sur \mathbb{R} , mais plus généralement sur un corps (\mathbb{R} est un corps), notion que nous ne développerons pas ici.

- A est un ensemble non vide, dont les éléments s'appellent des points ;
- E est un espace vectoriel sur \mathbb{R} , muni d'une loi de $A \times E \rightarrow A$, notée $+$, vérifiant :
 1. pour tout $a \in A$, $\bar{x} \in E$, l'application $\bar{x} \rightarrow a + \bar{x}$ est une bijection de E sur A ;
 2. pour tout $a \in A$, et $(\bar{x}, \bar{y}) \in E^2$:

$$(a + \bar{x}) + \bar{y} = a + (\bar{x} + \bar{y})$$

De la même manière que pour l'espace affine, on construit l'espace vectoriel en munissant E d'une structure vectorielle. Celle-ci consiste en deux lois de composition interne “+” et “ \times ”. Par loi de composition interne, on exprime le fait que l'addition de deux éléments de E donne un élément de E , et que le produit d'un élément de E par un scalaire donne un élément de E . Le résultat de ces opérations appartient à l'ensemble de départ.

Dans les espaces vectoriels, on peut définir des vecteurs à partir de l'origine et d'un point. On peut additionner des vecteurs et on peut multiplier un vecteur par un scalaire.

Par contre, avec la structure d'espace vectoriel, on ne dispose ni de fonction de distance, ni d'aucune application qui, à un couple d'éléments de E , associerait une mesure.

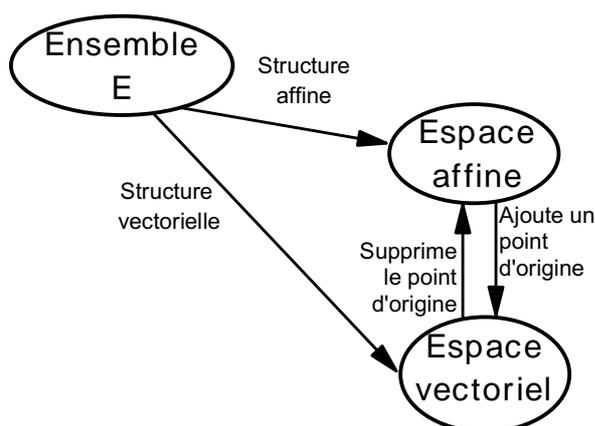


figure 9 : espace vectoriel et espace affine

Il faut remarquer que les deux concepts d'espace affine et d'espace vectoriel sont extrêmement proches. En munissant un espace affine d'un point origine, on construit un espace vectoriel. Réciproquement, on obtient un espace affine en supprimant le point origine d'un espace vectoriel. Les relations qui unissent ces deux structures sont explicitées sur la figure 9, ci-dessus.

C. Espace vectoriel euclidien

L'espace euclidien constitue une référence pour la géométrie classique.

On construit l'espace vectoriel euclidien à partir d'un espace vectoriel de dimension finie sur \mathbb{R} muni d'un produit scalaire¹⁴⁸. Le produit scalaire est une application de E à valeur dans \mathbb{R} . Autrement dit, il s'agit d'une loi externe par opposition aux lois internes de l'espace vectoriel. On accède ici à un nombre, appelé scalaire, issu du produit du même nom entre deux éléments de l'ensemble de départ, en l'occurrence entre deux vecteurs.

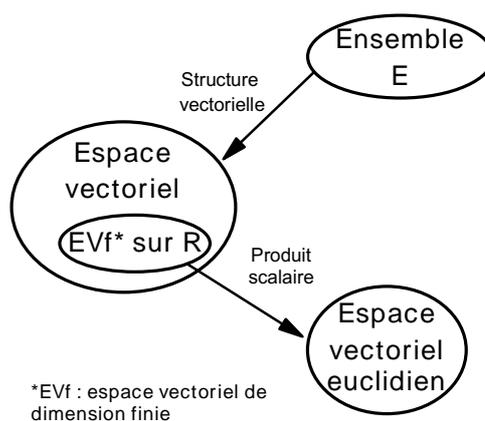


figure 10 : espace vectoriel euclidien

D. Espace vectoriel normé

Extrêmement proche de l'espace vectoriel euclidien, l'espace vectoriel normé marque un pas vers la construction de la structure métrique.

Soit $(E, +, \cdot)$ un espace vectoriel sur \mathbb{R} , et N une application de E dans \mathbb{R}^+ , ensemble des réels positifs ou nuls. On appelle espace vectoriel normé le couple (E, N) dans lequel l'application N vérifie :

- quel que soit a dans E , $N(a) = 0 \Leftrightarrow a = 0$
- quels que soient le scalaire λ et le vecteur a de E ,

$$N(\lambda \cdot a) = |\lambda| \cdot N(a)$$

- quels que soient les vecteurs a et b de E , on a :

$$N(a + b) \leq N(a) + N(b)$$

¹⁴⁸ Définition mathématique en annexe. Cf. "Produit scalaire", page 209.

Le scalaire $N(a)$ est appelé **norme** du vecteur a , ou **longueur** de a .

D'une manière similaire à la construction de l'espace vectoriel euclidien, on peut munir un espace vectoriel d'une norme pour obtenir un espace vectoriel normé. La norme s'appelle aussi longueur. Tout comme le produit scalaire, c'est une application à valeur dans \mathbb{R} .

A partir du produit scalaire, on construit très facilement une norme. Le produit scalaire vérifie les propriétés des normes ; c'est un cas particulier des normes. Autrement dit, la norme est une notion plus générale que celle du produit scalaire.

Un espace vectoriel euclidien possède toutes les propriétés d'un espace vectoriel normé. Ainsi, les espaces vectoriels euclidiens constituent un sous-ensemble de l'ensemble des espaces vectoriels normés.

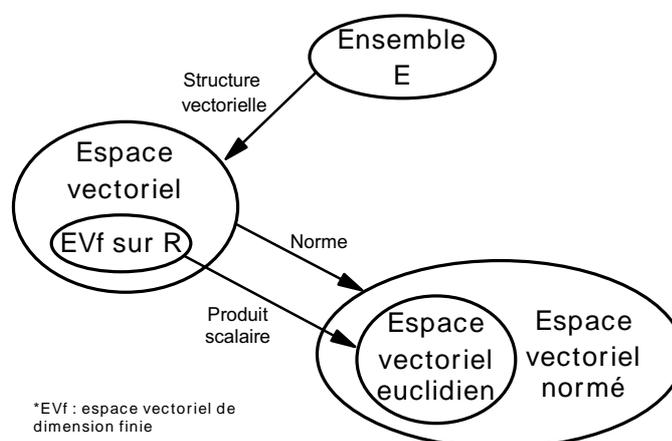


figure 11 : espace vectoriel euclidien et espace vectoriel normé

E. Espace métrique

Soit E un ensemble. On appelle **distance** sur E toute application $d : E \times E \rightarrow \mathbb{R}$ vérifiant les propriétés suivantes quels que soient a, b et c éléments de $E \times E$:

$$d(a, b) \geq 0 \quad (\text{non négativité})$$

$$d(a, b) = d(b, a) \quad (\text{symétrie})$$

$$d(a, c) \leq d(a, b) + d(b, c) \quad (\text{inégalité du triangle})$$

$$d(a, b) = 0 \Leftrightarrow a = b \quad (\text{axiome de séparation})$$

L'espace métrique est l'association d'un ensemble et d'une distance. On doit considérer ici le terme "distance" sous son aspect mathématique, c'est-à-dire sous la

forme d'une application vérifiant les propriétés de positivité, de nullité si elle est mesurée d'un élément à lui-même, de symétrie, et de l'inégalité triangulaire. Réciproquement, on peut affirmer que toute application vérifiant ces propriétés sur un ensemble E est une distance et génère donc un espace métrique.

A partir d'une norme, on peut construire une distance. Donc toute norme vérifie les propriétés métriques. Dans l'autre sens, il faut remarquer que la notion de distance, qui est en fait une application, n'implique pas nécessairement celle de norme.

Pour définir une norme, on l'a vu, il est obligatoire de disposer de propriétés vectorielles. Il n'est par contre pas nécessaire de vérifier ces propriétés pour définir un espace métrique. Il existe des espaces métriques qui ne sont pas des espaces vectoriels, donc sur lesquels il est impossible de définir une norme. C'est la preuve qu'il existe des espaces métriques qui ne vérifient pas les propriétés de la norme. Ceci montre que le concept de distance est moins contraignant, autrement dit plus englobant, que celui de norme.

On traduit ces liens sur la figure 12 par l'inclusion de l'ensemble des espaces vectoriels dans celui des espaces métriques.

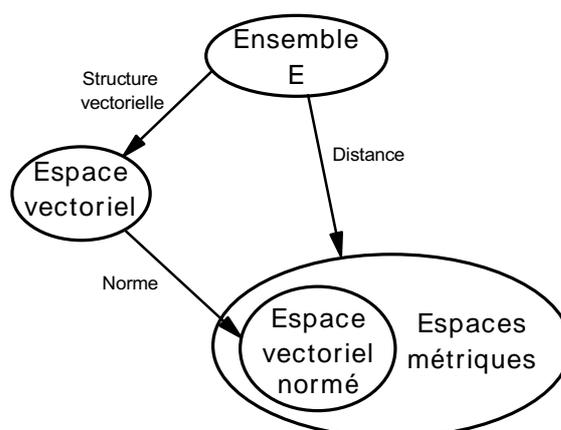


figure 12 : espace vectoriel normé et espaces métriques

Les fonctions distances, qui peuvent être utilisées pour créer des espaces métriques, sont décrites plus loin¹⁴⁹.

¹⁴⁹ Voir page I-99, "Les formes de la distance".

F. Topologie

A l'aide de la métrique on peut déterminer si des éléments d'un espace sont proches l'un de l'autre, et on peut quantifier cette relation grâce à la fonction de distance. Avec la topologie, on cherche à construire une structure au sein de laquelle on puisse exprimer cette idée de proximité mais sans faire appel à une fonction de distance¹⁵⁰.

Selon les mots d'Henri Poincaré, la topologie « est une géométrie d'où la quantité est complètement bannie et qui est purement qualitative »¹⁵¹.

« Mais il ne faut pas que l'artiste inexpérimenté représente une courbe fermée par une courbe ouverte, trois lignes qui se coupent en un même point par trois lignes qui n'auraient aucun point commun, une surface trouée par une surface sans trou. Alors on ne pourrait plus se servir de sa figure et le raisonnement deviendrait impossible. L'intuition n'aurait pas été gênée par les défauts du dessin qui n'intéresseraient que la géométrie métrique et projective ; elle deviendra impossible dès que ces défauts se rapporteront à l'Analysis situs¹⁵² ». Henri Poincaré.¹⁵³

Une topologie se construit par l'association d'une structure topologique et d'un ensemble E . On parle alors d'espace topologique. La structure topologique consiste en une série de propriétés sur les parties de E .

Une **topologie** sur X est la donnée d'un sous-ensemble τ de $P(X)$ tel que :

- (a) $(\emptyset \in \tau)$ et $(X \in \tau)$;
- (b) τ est stable pour les intersections finies ;
- (c) τ est stable pour les unions quelconques.

Un **espace topologique** est une paire (X, τ) où τ est une topologie sur X .

Etant donné un espace topologique (X, τ) , on appelle **voisinage** de $a \in X$ une partie de X contenant un ouvert contenant a .

¹⁵⁰ Michel PREVOT, 1975. - *Espaces topologiques et métriques en analyse économique spatiale*. - p. 22. - thèse : Dijon.

¹⁵¹ Henri POINCARÉ, 1913. - *Dernières pensées*. - Paris : Flammarion. Cité par : André DELACHET, 1950. - *La Géométrie contemporaine*. - Paris : PUF (Que sais-je ?). - p. 60. (c'est l'auteur qui souligne).

¹⁵² *L'Analysis situs* est le nom que l'on donnait à l'époque de Poincaré (fin XIX^{ème} - début XX^{ème}) à ce qui allait devenir la topologie.

¹⁵³ Henri POINCARÉ, 1913. - *op. cit.* Cité par : André DELACHET, 1950. - *op. cit.* - p. 61.

Un voisinage d'un élément a est un sous ensemble de E qui vérifie les propriétés suivantes :

- tout voisinage de a contient a ;
- tout sous ensemble de l'espace E qui contient un voisinage de a est un voisinage de a ;
- l'intersection d'un nombre fini de voisinages de a est un voisinage de a ;
- pour tout voisinage V de a , il existe un voisinage W de a tel que V soit voisinage de chacun des points de W .

Se donner une topologie sur X , c'est se donner un système de voisinages pour chacun de ses points.

La première propriété des voisinages est assez évidente intuitivement : a est voisin de lui-même et ainsi appartient à l'ensemble de ses voisinages. La troisième propriété est, elle aussi, évidente, car les éléments communs à des voisinages de a sont eux aussi voisins de a .

La deuxième propriété est par contre plus trompeuse, car il est d'autant plus facile à un ensemble d'être un voisinage de a qu'il est plus grand¹⁵⁴. Le voisinage au sens mathématique n'a pas la même signification qu'au sens usuel.

Au sein des espaces topologiques se développe la notion de proximité. Alors que c'est la distance qui permet d'aborder ce concept dans les espaces métriques, ici c'est par l'intermédiaire des voisinages, concept plus général, que l'on peut construire la notion de proximité.

Le concept de voisinage est plus général que celui de distance. Les espaces métriques induisent des topologies, alors que certaines topologies ne sont pas métrisables.

Plusieurs métriques différentes peuvent définir une même topologie. Ainsi, la distance euclidienne, la distance rectilinéaire et la distance de dominance¹⁵⁵ induisent la même topologie. On dit alors en langage mathématique que ces métriques sont "équivalentes". **Un espace, au sens d'étendue physique des activités humaines, peut changer de forme et de dimension et ainsi changer de fonction de distance associée sans que ses propriétés topologiques, c'est-à-dire ses propriétés fondamentales de nature qualitative, soient modifiées.**

¹⁵⁴ Michel PREVOT, 1975. - *op. cit.* - p. 24.

¹⁵⁵ Toutes ces métriques sont définies plus loin (Cf. "Les formes de la distance", page I-99).

Un même élément peut posséder plusieurs voisinages qui se distinguent par leurs différents degrés de proximité à cet élément. Cet aspect a été utilisé pour exprimer les relations unissant les “points de repères” des cartes mentales¹⁵⁶.

D'une manière générale, on peut associer au concept de topologie l'idée d'une description qualitative et au concept de métrique le principe d'une description quantitative¹⁵⁷. La métrique traite des relations entre points ou zones de l'espace. La topologie, elle, permet d'aborder l'espace dans son étendue.

On peut traduire le fait que les espaces métriques définissent systématiquement une topologie en disant que quantifier les interrelations entre points de l'espace, c'est du même coup représenter l'espace dans ses relations de proximité.

Ainsi, les deux concepts de topologie et de métrique renvoient à des idées différentes de l'espace. L'ordonnement des lieux, les proximités¹⁵⁸ traduisent plutôt la topologie de l'espace, alors que les liaisons, les distances permettent de mesurer les relations et de définir une métrique¹⁵⁹.

Nous venons de voir qu'un espace peut changer de forme, tout en conservant ses propriétés topologiques, en restant identique du point de vue topologique.

On peut illustrer ce propos en évoquant une surface élastique. Il est possible de la déformer par étirement et compression, sans déchirure, ni pliage, ni collage, sans modifier sa structure. Mais, si cette surface est coupée, alors la structure est différente et la topologie n'est plus la même¹⁶⁰. Considérons une transformation d'un espace de départ contenant deux points quelconques A et B , en un espace d'arrivée où l'on trouve les points correspondants, A' et B' . Déplaçons A de telle manière qu'il se rapproche infiniment près de B . Si, dans l'espace d'arrivée, le point A' transformé de A se rapproche de B' de la même manière, alors la transformation est topologique, c'est-à-dire qu'elle conserve la topologie de l'espace de départ.

La conservation de la topologie garantit la cohérence de la modélisation spatiale. Pour cette raison, la structure topologique est « adaptée à l'étude structurelle de certains espaces fonctionnels, comme les espaces de transport où ce sont les liens et les proximités entre les lieux qui comptent principalement »¹⁶¹.

¹⁵⁶ Bernard ROUGET, 1975. - *op. cit.* - p. 309.

¹⁵⁷ *Ibid.* - p. 307.

¹⁵⁸ La proximité doit être considérée au sens qualitatif : on dira que tel point est proche de tel autre, sans évoquer de mesure.

¹⁵⁹ Colette CAUVIN, 1984 b. - *op. cit.* - p. 90.

¹⁶⁰ G. CHOQUET, 1972. - *Cours de topologie.* - Paris : Masson (2^{ème} édition). - p. 21.

¹⁶¹ Colette CAUVIN, 1984 b. - *op. cit.* - p. 57.

G. Synthèse

Nous avons construit la figure 13 : les approches mathématiques de l'espace pour représenter les relations existantes entre les différents types de structures la manière dont utilisées pour modéliser l'espace.

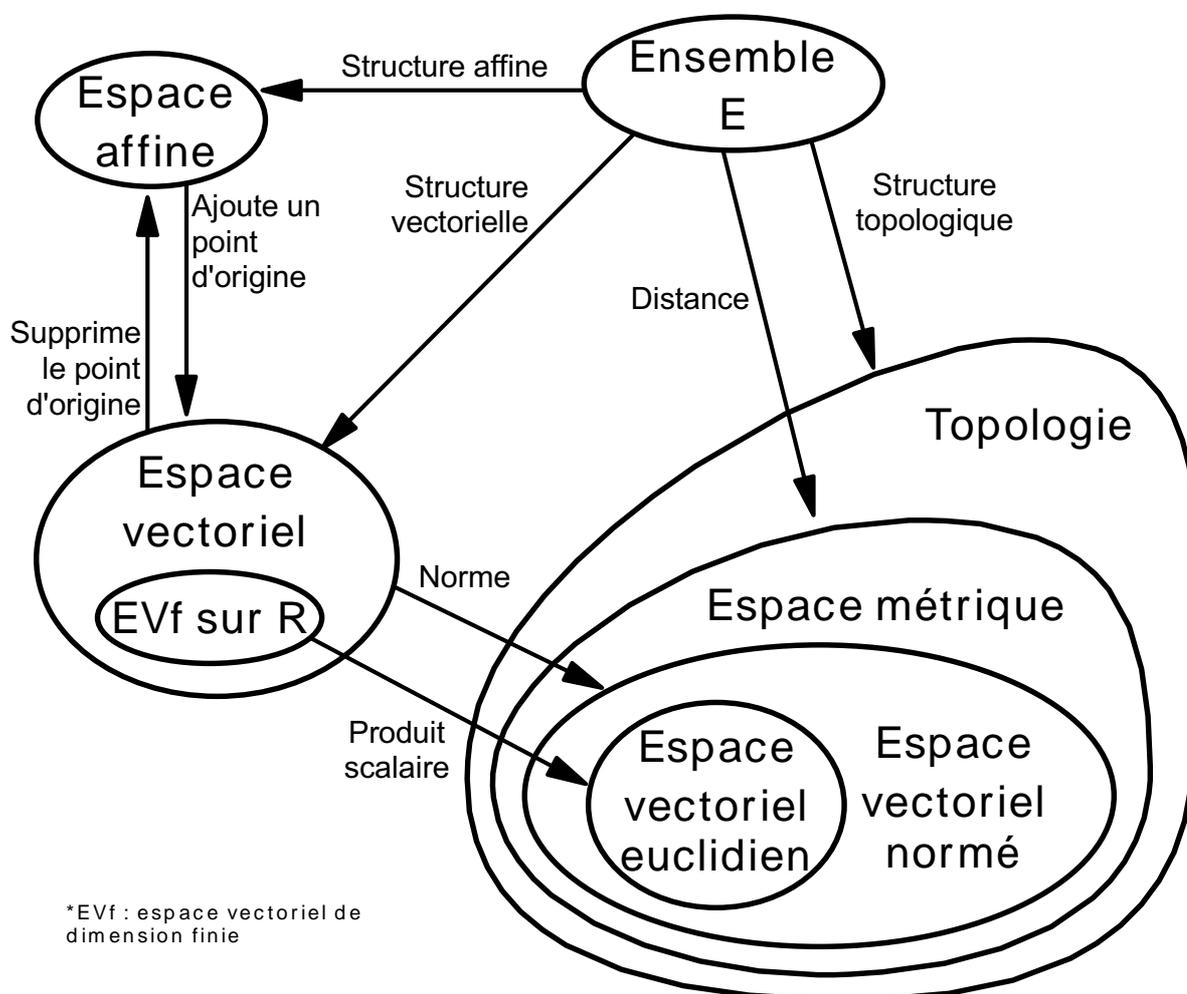


figure 13 : les approches mathématiques de l'espace¹⁶²

Sur ce schéma, on trouve l'espace affine et l'espace vectoriel. Un espace vectoriel de dimension finie sur \mathbb{R} muni d'un produit scalaire est appelé espace euclidien. C'est un cas particulier d'espace vectoriel normé. De même, un espace vectoriel normé est naturellement un espace métrique. Enfin, les espaces métriques permettent d'induire un espace topologique.

Remarquons que l'espace vectoriel euclidien n'est pas explicitement un espace métrique, mais qu'il permet de construire une métrique sans conditions supplémentaires : l'espace vectoriel euclidien permet de construire un espace

¹⁶² Schéma établi avec l'aide de M. Polombo, chercheur au Département de Mathématiques de l'université François Rabelais (Tours).

vectorel normé qui, lui-même, peut être vu comme un espace métrique. C'est le sens de l'inclusion des ensembles qu'on peut observer sur la figure 13.

La structure la plus spécifique de toutes est celle de l'espace vectoriel euclidien. Celui-ci possède toutes les propriétés que nous avons abordées depuis le début de ce chapitre.

Quand on se reporte à la figure 13, on constate que la structure topologique est celle qui est la plus englobante, au sens où toutes les autres structures évoquées donnent naissance à des topologies. Il y a deux manières de reconstruire et d'éclairer les espaces mathématiques et leurs propriétés.

La première passe par la description et l'explicitation de l'espace le plus familier et le plus intuitif que représente l'espace euclidien. Ensuite, en éliminant certaines propriétés, on reconstitue l'imbrication de la figure 13 qui aboutit à la description de l'espace topologique.

La deuxième méthode consiste à partir des propriétés qui constituent le "plus petit dénominateur commun" de toutes ces notions, à savoir les propriétés topologiques. Ensuite, on construit les autres espaces en enrichissant les propriétés mathématiques, en complétant la base minimale des espaces topologiques.

Conclusion

Nous avons établi une hiérarchie des principales structures mathématiques que l'on rencontre dans les champs de l'analyse spatiale – Economie, Géographie et Aménagement. Il s'avère que la structure euclidienne est, de tous les espaces mathématiques abordés ici, la forme la plus riche en propriétés. Sa position au centre de la figure 13 lui confère les propriétés vectorielles, métriques et topologiques. Tout travail en analyse spatiale emploie une structure mathématique pour représenter ou modéliser l'espace – qu'elle soit explicite ou implicite. L'intérêt de la synthèse produite est de pouvoir identifier simplement les propriétés mathématiques générales qui découlent du choix d'une structure particulière. Ces propriétés – notamment la métrique et la topologie – constituent en quelque sorte un héritage qu'il est important de préciser. L'emploi d'une norme, par exemple, entraîne la satisfaction des propriétés métriques et permet de construire une topologie dite "induite".

Pour les géographes R. G. Golledge et L. J. Hubert¹⁶³ l'espace est un ensemble abstrait possédant une topologie. Ceci signifie que, pour eux, les notions de continuité et de proximité, qui caractérisent la topologie, sont essentielles à la construction de l'outil formel. La topologie apparaît comme la structure fondamentale qu'il est important de

¹⁶³ R. G. GOLLEDGE, L. J. HUBERT, 1982. - « Some comments on non-Euclidean mental maps ». - *Environment and planning A*, GB, n° 14. - p. 108.

vérifier dans une modélisation de l'espace. La proximité et la continuité sont, du point de vue mathématique, les notions les plus fondamentales pour la description de l'espace : elles permettent de décrire de façon qualitative l'ordonnement des lieux.

Section 2 Propriétés et transformations mathématiques

Introduction

Certaines caractéristiques de l'espace de l'Aménagement peuvent s'exprimer par des propriétés mathématiques. Dans cet esprit, nous abordons maintenant les propriétés de continuité, d'homogénéité et d'isotropie. Cette démarche nous amène à caractériser la structure mathématique la mieux adaptée à notre objet.

Nous voulons construire une représentation de l'espace qui dépasse le cadre de la carte classique. Nous nous intéressons aux déformations qu'elle subit : c'est pourquoi nous nous attachons à étudier quelques transformations mathématiques, ainsi qu'à la conservation des propriétés mathématiques.

A. Propriétés des espaces

Lorsque les propriétés sont vérifiables sur l'espace tout entier, on dit qu'elles sont vérifiées globalement.

Quand elles sont conservées sur une partie de l'espace seulement¹⁶⁴, on dit qu'elles sont vérifiées localement. On parlera dans ce cas « d'espace localement euclidien, localement minkowskien »¹⁶⁵.

1. Continuité

a) Définition

La notion de continuité diffère selon qu'elle définit le couple continu/discontinu ou le couple continu/discret¹⁶⁶.

Une fonction est discontinue s'il existe des points très proches pour lesquels la valeur retournée est très différente. De manière intuitive, si on peut dessiner le graphe de la fonction d'un seul trait, sans relever le crayon de la feuille, alors celle-ci est continue.

¹⁶⁴ Par exemple, dans un espace topologique, la "partie" sur laquelle les propriétés sont conservées sera un voisinage.

¹⁶⁵ Colette CAUVIN, 1984 b. - *op. cit.* - p. 65.

¹⁶⁶ Jean-Michel SALANSKIS, 1990. - « Continu et discret ». - in *Encyclopædia Universalis*. - Paris : Encyclopædia Universalis (Tome corpus 6).

Dans cette acception, la continuité désigne « un caractère de régularité »¹⁶⁷. Cette définition permet de construire le couple antagoniste continu/discontinu.

D'une manière générale, « le mot continu désigne [...] ce qui est d'un seul tenant, ce qui se module avec tous les degrés intermédiaires »¹⁶⁸. Si l'espace est discontinu, alors il ne peut être caractérisé que "par morceaux". On exprime ainsi l'idée selon laquelle « l'espace est perçu comme étant d'un seul tenant »¹⁶⁹.

Un espace est continu si tout déplacement d'un point quelconque vers un autre est contenu dans l'espace considéré¹⁷⁰. Dans cette acception de la notion de continuité, l'espace dessiné par les réseaux de transport est nécessairement continu. En effet, le propre d'un réseau de transport est de rendre possible tout déplacement d'un point à un autre de l'espace considéré. Si l'on estime que l'espace du réseau fait partie de l'espace de l'Aménagement, alors tout déplacement est entièrement contenu dans ce dernier. L'existence de discontinuités traduit l'impossibilité de voyager d'un point à un autre. Ainsi, dans l'espace-temps, même en incluant tous les modes de locomotion, y compris la marche à pied, certains points sont et restent inaccessibles, à cause du relief par exemple. Si on restreint l'ensemble des moyens de transport qu'on emprunte lors d'un cheminement, des pans entiers de l'espace deviennent inaccessibles. L'exemple le plus simple nous est donné par une île : en l'absence de tunnel ou de pont, on ne peut y accéder que par la mer ou par les airs ; le réseau des routes est alors discontinu.

Un autre exemple nous est donné par les cartes mentales de Kevin Lynch¹⁷¹ qui révèlent l'existence de "discontinuités" dans certains domaines de l'espace mental, de coupures dans l'image que les habitants se font de leur ville.

Dans une acception différente, la notion de continuité s'oppose au caractère discret pour former le couple continu/discret. L'opposition entre l'ensemble des entiers et l'ensemble des réels permet d'illustrer l'antagonisme des notions. L'ensemble des entiers relatifs – Z – est infini mais il est dénombrable : il « s'ordonne en liste selon un principe permettant d'épuiser la totalité »¹⁷². L'ensemble des réels – R – est continu, car il est impossible d'énumérer ses éléments de la même manière. R , continu, contient Z , sous-ensemble discret. La traduction topologique de cette opposition est la connexité. R est un espace topologique connexe, c'est-à-dire une entité qu'on ne peut pas séparer en deux ouverts non vides. Au contraire, Z , comme tout espace discret peut être décomposé en une infinité d'éléments isolés.

¹⁶⁷ Jean-Michel SALANSKIS, 1990. - *op. cit.* - p. 459.

¹⁶⁸ *Ibid.* - p. 458.

¹⁶⁹ Bernard ROUGET, 1975. - *op. cit.* - p. 312.

¹⁷⁰ Jacky PERREUR, 1989. - « L'Évolution des représentations de la distance et l'aménagement du territoire ». - RERU, France, 1989 n° 1. - p.116.

¹⁷¹ Kevin LYNCH, 1971. - *L'Image de la cité.* - Paris : Dunod.

¹⁷² Jean-Michel SALANSKIS, 1990. - *op. cit.* - p. 459.

La notion de continuité est à la base de la définition des structures topologiques. S'il est possible de passer d'un espace topologique à un autre par une série de transformations de manière continue, de façon analogue à la transformation d'une surface élastique, alors les deux espaces possèdent la même topologie.

Dans le paragraphe consacré aux non continuités dues aux interactions des réseaux et de l'espace¹⁷³, on voit apparaître en fait un amalgame des deux notions mathématiques de la continuité. L'espace desservi par le réseau TGV est fondamentalement discret : seuls certains points sont accessibles. On a aussi l'idée d'une absence de continuité, de rupture dans le continuum de l'espace situé hors du réseau. Il y a là un amalgame des deux sens de la non continuité : **l'espace est discret et il est discontinu.**

b) Observations discrètes et espaces continus

La modélisation de l'espace est basée, le plus souvent, sur un ensemble de données, une matrice, qui fournit les longueurs des chemins entre les points. Ces données ne sont observables que de manière discrète. Dans la pratique, on ne peut pas connaître la longueur – ou la durée, ou une autre mesure – de la totalité des chemins possibles : on ne dispose que d'un nombre fini de mesures.

Pour Pip Forer les modélisations qui se basent sur un ensemble discret de points ont un intérêt pratique bien plus important que celles qui utilisent des espaces continus¹⁷⁴.

En effet, les systèmes de transport opèrent le plus souvent dans une logique de réseau. Les réseaux ont généralement un nombre fini d'entrées¹⁷⁵. Les mesures qui sont vraies en ces points peuvent perdre tout sens si on les interpole. De plus, les mesures sont presque toujours collectées entre paires de points, ce qui rend le traitement discret plus approprié.

Les observations ne composent pas, en elles-mêmes, un espace continu. L'espace continu est nécessairement un espace induit¹⁷⁶, interpolé à partir de données discrètes.

Il semble donc préférable de construire les modélisations sur le principe d'un espace discret. D'autre part, le traitement informatique des données est nécessairement discret au départ : la continuité ici aussi ne peut être qu'interpolée à partir des mesures.

¹⁷³ Cf. "Discontinuum", page I-64.

¹⁷⁴ « Far more practical are studies which deal with discrete set of points rather than continuous spaces. ». - Pip FORER, 1978. - *op. cit.* - p. 243.

¹⁷⁵ Le nombre fini d'entrées provoque une distorsion particulière que nous avons abordée au paragraphe intitulé "Raréfaction des points d'accès" à la page I-69.

¹⁷⁶ Jean-Claude MÜLLER, 1979. - *op. cit.* - p. 224.

2. Homogénéité

Au sens de la physique, un corps est homogène si ses propriétés scalaires, vectorielles et tensorielles¹⁷⁷ sont les mêmes en tout point. Dans les milieux cristallisés, l'homogénéité consiste en ce qu'à tout point P , correspond une infinité de points autour desquels la disposition des atomes est la même qu'autour de P . On peut généraliser l'idée en affirmant qu'un espace est homogène, s'il possède les mêmes propriétés en tout point¹⁷⁸.

Plus généralement, en parlant d'un ensemble, l'homogénéité correspond à un caractère de structure uniforme, le fait que les éléments constitutifs, les parties, soient de même nature et/ou répartis de façon uniforme¹⁷⁹.

Nous avons vu¹⁸⁰ que les réseaux de transports sont une des causes de l'hétérogénéité de l'espace. On ne peut donc pas exprimer la complexité de l'espace de l'Aménagement avec un espace homogène, même si, par certains aspects, les réseaux exercent une forme d'homogénéisation¹⁸¹.

3. Isotropie

L'isotropie est, au départ, une propriété locale de l'espace.

En un point a de l'espace il y a isotropie pour une propriété P si et seulement si P est vraie dans toutes les directions à partir de a ¹⁸². Dans ce cas l'isotropie est locale.

L'espace peut être dit isotrope pour la propriété P si et seulement s'il possède la propriété d'isotropie en tout point. Dans cette deuxième hypothèse, l'isotropie est globale.

Il faut remarquer que pour toute propriété (sauf celle de non isotropie), l'homogénéité implique l'isotropie¹⁸³.

Nous avons vu combien l'espace de l'Aménagement est anisotrope¹⁸⁴. La représentation de cet espace se doit de restituer cette propriété mathématique.

¹⁷⁷ En Physique, les tenseurs servent à décrire l'état, le mouvement et les accélérations subies par les milieux.

¹⁷⁸ Michel PREVOT, 1975. - *op. cit.* - p. 5.

¹⁷⁹ Georges AMAR, Nikolas STATHOPOULOS, 1987. - *op. cit.* - p. 15.

¹⁸⁰ Cf. "Hétérogénéisation", page I-63.

¹⁸¹ Cf. "Homogénéisation", page I-64.

¹⁸² Jean-Marie HURIOT, Jacky PERREUR, 1990. - *op. cit.* - p. 204.

¹⁸³ *Ibid.* - p. 205.

¹⁸⁴ Cf. "Anisotropie", page I-66.

Conclusion

En termes de propriétés mathématiques, la modélisation que nous construisons doit restituer l'idée d'une absence de continuité selon les deux acceptions que nous avons données – le couple continu/discontinu et le couple continu/discret : basée sur un modèle discret, elle doit aussi exprimer les discontinuités de l'espace.

La représentation doit aussi exprimer l'hétérogénéité et l'anisotropie de l'espace de l'Aménagement.

Nous examinons maintenant la conservation ou la non conservation des propriétés et de la nature des espaces par les transformations mathématiques.

B. *Les transformations mathématiques*

Les transformations mathématiques élémentaires sont la translation et la rotation. La symétrie, quelle soit axiale ou centrale, fait partie des transformations complexes, au sens où on peut la reconstruire à partir d'une composition de transformations élémentaires.

Une transformation qui conserve les distances est une isométrie. Nous voulons trouver une forme appropriée à la distance qui est produite par les réseaux de transport modernes. Cette métrique n'est pas la ligne droite¹⁸⁵ du plan euclidien – nous développons plus loin cette idée¹⁸⁶. Nous voulons déformer le plan de la carte classique pour le rendre plus conforme à la métrique réelle de l'espace. En ce sens, la transformation que nous voulons construire est résolument non isométrique.

Nous voulons construire une transformation de l'espace qui ne respecte pas la métrique usuelle basée sur la ligne droite. Nous abordons maintenant la question de la préservation de la topologie dans la transformation.

1. **L'importance de l'homéomorphisme**

Le concept d'homéomorphisme¹⁸⁷ est très intéressant pour caractériser les transformations de la surface chorotaxique parce qu'il implique l'idée de continuité – ce qui signifie que la surface n'est ni "déchirée" ni "découpée en morceaux" – et celle de bijectivité – qui exclut un quelconque "chevauchement" de deux parties de l'espace et qui élimine les étirements infinis. D'autre part, la bijectivité interdit la disparition d'éléments de l'espace de départ, de même que l'apparition d'éléments nouveaux dans l'espace d'arrivée. On peut donc considérer ce type de transformation comme étant relativement peu brutal pour la surface de départ, ce qui constitue un élément

¹⁸⁵ Nous l'avons vu au paragraphe "La ligne droite", page I-72.

¹⁸⁶ Cf. la section "La question de la ligne droite", page I-116.

¹⁸⁷ L'homéomorphisme est une transformation bijective et bicontinue. Cf. "Homéomorphisme" page 209.

de garantie d'une bonne lisibilité. Deux espaces entre lesquels on peut établir un homéomorphisme sont très proches l'un de l'autre et ont des propriétés identiques¹⁸⁸.

Dans les transformations cartographiques de la surface chorotaxique, comme l'avance Waldo R. Tobler « la préservation de la topologie interne est une condition qui semble souhaitable ; il s'agit en fait d'une exigence que la carte soit continue »¹⁸⁹. Cette exigence se traduit par la construction d'un homéomorphisme.

L'homéomorphisme permet de conserver la topologie. Dans le cas de non conservation des propriétés topologiques, on pourrait observer le phénomène suivant : deux routes séparées dans l'espace physique et qui se coupent dans l'espace transformé. Comme l'affirme Eihan Shimizu¹⁹⁰, dans ce cas, il y a ici un risque que la destruction de la topologie ne provoque des confusions chez l'utilisateur de la carte. On peut admettre qu'une « transformation qui détruit la correspondance continue d'élément à élément »¹⁹¹ induit des confusions visuelles. Quand on cherche à représenter l'espace des transports avec ses multiples réseaux et ses non moins multiples liaisons, on conçoit que cette propriété puisse être recherchée, voire élevée au rang d'indispensable.

Comme l'a écrit Henri Poincaré, « dans cette discipline [la topologie], deux figures sont équivalentes toutes les fois que l'on peut passer de l'une à l'autre par une déformation continue »¹⁹².

Pour Jean-Claude Müller, modifier la topologie d'un espace c'est « rendre incompréhensibles les relations d'ordre et de voisinage qui nous sont familières »¹⁹³.

2. La rupture de l'homéomorphisme

L'homéomorphisme peut être mis à mal par l'existence de phénomènes particuliers à l'espace-temps.

Ainsi, une « île » disjointe sur une carte isochrone est une zone de meilleure (ou de moins bonne) accessibilité que les zones immédiatement environnantes. Avec les

¹⁸⁸ Michel PREVOT, 1975. - *op. cit.* - p. 41.

¹⁸⁹ « Preservation of the internal topology is one condition that seems desirable ; this is in fact a requirement that the map (not the distribution) be continuous (a homeomorphism - neighbourhoods are preserved under the mapping). » - Waldo R. TOBLER, 1963. - *op. cit.* - p. 70.

¹⁹⁰ Eihan SHIMIZU, 1992. - « Time-space mapping based on topological transformation of physical map ». - *in* W.C.T.R., « Sixième conférence mondiale sur la recherche dans les transports », 1992. - Lyon : W.C.T.R. - pagination multiple. - p 5.

¹⁹¹ « [...] a transformation which destroys a continuous one-to-one correspondence between the elements of R^2 and their representation is visually confusing. » - Jean-Claude MÜLLER, 1982. - « Non Euclidean geographical spaces ». - p. 193.

¹⁹² Henri POINCARÉ, 1913. - *op. cit.* Cité par : André DELACHET, 1950. - *op. cit.* - p. 60.

¹⁹³ Jean-Claude MÜLLER, 1979. - *op. cit.* - p. 223.

anamorphoses, on restitue la position de l'île dans l'espace-temps, sur un plan. C'est-à-dire que l'île devrait être détachée de son environnement et accolée à une zone de même accessibilité. Cela implique un "déchirement" de la surface et ainsi une rupture de l'homéomorphisme. Il faut remarquer que, dans cette hypothèse, il devient extrêmement difficile de représenter les réseaux de transport de manière cohérente.

Ainsi, nous voulons que notre transformation de l'espace soit un homéomorphisme, car nous voulons conserver la topologie de l'espace chorotaxique.

Conclusion

La métrique du plan euclidien ne nous satisfait pas pour décrire les distances entre les lieux de l'espace parcouru par les réseaux de transport. D'autre part, nous ne voulons pas perturber la topologie de l'espace chorotaxique, pour ne pas introduire d'incohérence dans les propriétés qualitatives de proximité et de continuité.

Nous voulons donc établir une transformation de l'espace chorotaxique qui soit délibérément non isométrique, mais qui respecte la topologie de départ. La transformation doit donc être un **homéomorphisme non isométrique**.

Nous avons établi la hiérarchie des espaces mathématiques et souligné l'importance des notions de métrique et de topologie. Nous portons maintenant une attention plus précise sur la structure métrique.

Section 3 Distance

Introduction

La distance est un concept usuel auquel on donne un sens intuitif d'écartement entre les objets. La définition en analyse spatiale est plus fine et repose d'abord sur le concept mathématique. Malgré son caractère intuitif, la distance est difficile à saisir et à représenter : elle mérite un traitement tout particulier. C'est l'objet de cette partie.

A partir de la définition nous allons expliciter les propriétés qui la caractérisent. Ensuite, nous allons aborder les formes particulières, classiques et moins classiques, qui sont utilisées en analyse spatiale.

L'extension à la distance-réseau permet de construire une structure métrique pertinente pour décrire les réseaux de transport.

Enfin, l'étude des fausses distances aboutit à identifier les propriétés essentielles qui demandent à être absolument conservées pour une modélisation cohérente de l'espace.

A. Définition mathématique

En mathématiques la distance est un nombre associé à un élément d'un ensemble à deux dimensions, autrement dit, un nombre associé à un couple d'éléments. Plus formellement, nous donnons maintenant la définition mathématique de la distance.

Soit E un ensemble. On appelle **distance** sur E toute application $d : E \times E \rightarrow \mathbb{R}$ vérifiant les propriétés suivantes quels que soient a, b et c éléments de $E \times E$:

$$\begin{array}{ll}
 d(a, b) \geq 0 & \text{(non négativité)} \\
 d(a, b) = d(b, a) & \text{(symétrie)} \\
 d(a, c) \leq d(a, b) + d(b, c) & \text{(inégalité du triangle)} \\
 d(a, b) = 0 \Leftrightarrow a = b & \text{(axiome de séparation)}
 \end{array}$$

Rappelons que cette fonction distance, associée à un ensemble, constitue un espace métrique.

B. Propriétés

1. Non négativité

La distance est une fonction qui prend ses valeurs dans \mathbb{R}^+ . Donc, la distance entre deux éléments ne peut pas être négative.

2. Séparation

L'axiome de séparation s'écrit mathématiquement avec le symbole "si et seulement si" (\Leftrightarrow) entre les deux termes. On peut donc le formuler par deux propositions :

1. si deux points sont confondus **alors** ils sont séparés par une distance nulle.
2. Si une distance est nulle **alors** elle est mesurée d'un point à lui-même.

La propriété de séparation est appelée aussi propriété de "non dégénérescence" ou encore "régularité".

3. Symétrie

La distance est toujours symétrique. Cette propriété signifie que la distance ne dépend pas de l'ordre des points. Mesurer la distance entre a et b , en partant de a ou de b , ne donnera pas deux résultats différents.

4. Inégalité triangulaire

Le rôle de l'inégalité triangulaire est de « garantir une interdépendance entre les distances qui permet une cohérence spatiale et la représentation cartographique sur un plan »¹⁹⁴.

Pour satisfaire la propriété de l'inégalité triangulaire, il faut que la distance d'un élément à un autre soit le plus petit nombre qu'on puisse trouver. **Cette propriété induit l'idée d'un minimum dans la mesure de la distance.**

Ce minimum n'est pas forcément la ligne droite¹⁹⁵. Il dépend de la formalisation de la distance qu'on utilise.

C. *Les formes de la distance*

La métrique a été définie et explicitée par ses propriétés dans les paragraphes précédents. Nous allons maintenant étudier le concept de métrique par des exemples.

La distance peut revêtir de multiples formes ; leur description est l'objet des paragraphes qui suivent.

Définir l'espace métrique par ses propriétés, c'est se donner un cadre général : rien n'est dit sur la fonction de distance qui, à un couple d'éléments, associe une mesure. Quand on pose en premier lieu la forme de la fonction distance, il faut s'assurer si celle-ci vérifie les propriétés métriques. La structure mathématique découle de la forme de la fonction en question.

1. Formes classiques

a) *Métrique euclidienne*

La forme la plus commune est celle de la distance à vol d'oiseaux, issue du théorème de Pythagore, appelée métrique euclidienne.

Dans un ensemble à deux dimensions, la fonction de distance de la métrique euclidienne est donnée par la relation suivante :

¹⁹⁴ Jean-Marie HURIOT, Jacky PERREUR, 1990. - *op. cit.* - p. 200.

¹⁹⁵ Le minimum, c'est à dire la distance, est une ligne droite dans le cas d'une métrique euclidienne comme nous le verrons plus bas.

soient A_1 et A_2 deux éléments de E^2 , on a alors $A_1(x_1, y_1)$ et $A_2(x_2, y_2)$ et :

$$d(A_1, A_2) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$$

On peut vérifier que la métrique euclidienne vérifie les quatre propriétés des métriques.

L'espace euclidien est isotrope, c'est-à-dire que les relations sont les mêmes en tout point de l'espace, dans toutes les directions.

La métrique euclidienne est invariante par translation et par rotation¹⁹⁶. Elle possède en outre la propriété mathématique d'homogénéité¹⁹⁷.

On constate que la métrique euclidienne donne naissance à un espace très riche en propriétés mathématiques. Nous avons déjà vérifié ce point en établissant la hiérarchie des espaces mathématiques (page I-88) : l'espace vectoriel euclidien est la structure la moins englobante, ou, si l'on préfère, la structure la plus contrainte par des propriétés mathématiques.

b) Métrique rectilinéaire

Il faut remarquer que la métrique rectilinéaire et toutes les formes de métriques qui suivent définissent des espaces non-euclidiens.

La métrique rectilinéaire est définie, dans un système d'axes orthonormés, comme suit :

$$d(A_1, A_2) = |x_1 - x_2| + |y_1 - y_2|$$

La mesure de la distance entre deux points s'effectue le long de segments de droites parallèles aux axes de coordonnées. Cette mesure n'est pas unique ; il existe plusieurs plus courts chemins d'un point à l'autre de l'espace.

La métrique rectilinéaire porte parfois le nom de métrique de Manhattan, de distance rectangulaire, de distance à angles droits ou encore de distance hippodaméenne en référence à Hippodamos de Millet, l'inventeur du plan en damier¹⁹⁸.

Nous avons placé la définition de la fonction de la métrique rectilinéaire dans le cadre d'un système d'axes orthonormés. Il est tout à fait possible de définir une telle métrique sur un autre système d'axes : on peut utiliser par exemple des axes non

¹⁹⁶ Colette CAUVIN, 1984 b. - *op. cit.* - p. 71.

¹⁹⁷ *Ibid.* - p. 72.

¹⁹⁸ Michel RAGON, 1995. - *L'Homme et les villes.* - Paris : Albin Michel. - p. 65.

orthogonaux, ou des axes non normés, de manière à rendre compte des particularités de l'espace qu'on veut décrire.

Il faut remarquer que l'espace rectilinéaire n'est pas invariant par rotation¹⁹⁹. En effet la distance dépend de l'orientation angulaire. Cette remarque en appelle une autre : en montrant la dépendance de la distance à l'orientation, nous venons de prouver que cet espace n'est pas isotrope.

c) Le cas général : la fonction de Minkowski

La fonction de Minkowski est une généralisation de la métrique euclidienne. La distance entre deux éléments a et b d'un ensemble à n dimensions est donnée par la formule :

$$d(a,b) = \left[\sum_{k=1}^n (|x_{a,k} - x_{b,k}|)^r \right]^{1/r}$$

où $x_{a,k}$ est la coordonnée du point a dans la $k^{\text{ième}}$ dimension. C'est l'exposant r qui détermine la forme de la métrique de Minkowski. Quand $r = 2$ on retrouve la distance euclidienne ; quand $r = 1$ on obtient la métrique rectilinéaire abordée au paragraphe précédent et quand r est infini il s'agit de la sup-métrique que nous exposons en dessous.

Il est à noter que pour un exposant r inférieur à 1 on obtient des espaces qui ne vérifient pas la propriété de l'inégalité triangulaire²⁰⁰. Pour un $r = 1/2$ et dans un espace à deux dimensions la métrique de Minkowski s'écrit :

$$d(a,b) = \left(\sqrt{|x_a - x_b|} + \sqrt{|y_a - y_b|} \right)^2$$

Dans ce type d'espace, on privilégie des directions particulières dans le calcul de la fonction de distance. Ce sont les directions parallèles aux axes de coordonnées.

La métrique de dominance est le cas particulier de la métrique de Minkowski où l'exposant r est infini.

Elle admet une formulation analytique dans un espace à n dimensions :

avec $A_1 (x_{1,1}; x_{1,2}; \dots; x_{1,n})$ et $A_2 (x_{2,1}; x_{2,2}; \dots; x_{2,n})$

$$d_{\infty}(A_1, A_2) = \max_{k=1..n} |x_{1,k} - x_{2,k}|$$

¹⁹⁹ Colette CAUVIN, 1984 b. - *op. cit.* - p. 74.

²⁰⁰ *Ibid.* - p. 75.

Cette formulation appliquée à un espace à deux dimensions devient :

avec $A_1 (x_1, y_1)$ et $A_2 (x_2, y_2)$

$$d_{\infty} (A_1, A_2) = \max [|x_1 - x_2|, |y_1 - y_2|]$$

Cette mesure renvoie le plus grand écart entre les composantes sur chaque dimension. Dans un espace à deux dimensions, la métrique de dominance correspond à la longueur du plus grand côté du triangle rectangle parallèle aux axes, construit sur les points A_1 et A_2 . La métrique de dominance donne une mesure inférieure ou égale à la métrique euclidienne.

2. Formulation analytique ou non

Les distances mathématiques peuvent être de deux formes. Quand on dispose d'une expression générale donnant la mesure de la distance entre deux éléments quelconques de l'ensemble de départ, on parle de **métrique à formulation analytique**. Dans le cas contraire, c'est-à-dire lorsque l'on ne dispose pas d'expression générale, on parle de **métrique sans formulation analytique**.

Quand l'espace est homogène, isotrope et continu, ou, quand le réseau est régulier – soit concentrique, soit orthogonal, soit à maille régulière – on peut donner une formulation analytique à la fonction de distance. Dans tous les autres cas, il n'existe pas, en général, de formulation explicite.

Les formes de métriques que nous avons vues jusqu'à présent – la métrique euclidienne, la métrique rectilinéaire et la métrique de Minkowski – ont une formulation analytique. Les métriques qui suivent n'ont, en général, plus de formulation analytique. Elles sont soit plus abstraites, soit impossibles à formuler dans une équation.

3. La contiguïté

On définit un ensemble, E , composé de zones géographiques. Deux zones sont dites "contiguës"²⁰¹ si elles partagent une frontière commune. Elles sont "contiguës à l'ordre n " quand il faut traverser au moins n frontières pour passer de l'une à l'autre. Cette application qui, à partir d'un couple d'éléments de E , prend ses valeurs dans l'ensemble des entiers, vérifie la propriété de symétrie, la positivité, la nullité d'une zone à elle-même et l'inégalité triangulaire. La notion de minimum, qui est nécessaire à l'obtention de l'inégalité triangulaire, est contenue dans la définition de la contiguïté d'ordre n : il faut traverser **au moins** n frontières. Elle constitue donc bien une distance au sens mathématique. La contiguïté définit une métrique sur l'ensemble des zones géographiques. Cette métrique est donc définie sur un ensemble discret.

²⁰¹ Définition donnée par : Hubert JAYET, 1993. - *Analyse spatiale quantitative*. - Paris : Economica (Bibliothèque de Science Régionale). - p. 9-10.

On doit remarquer que cette métrique est relativement abstraite. Elle n'est pas définie sur un ensemble continu de points munis de coordonnées, mais sur un ensemble de zones qui ne possèdent pas nécessairement de coordonnées. Dans l'hypothèse où on travaille sur un ensemble fini de zones, la fonction de distance opère sur un ensemble fini de relations. Les aspects de continuité et d'étendue de la topologie prennent ici un sens plus abstrait que sur \mathbb{R}^2 .

4. La distance réseau

a) Première définition

La "distance réseau" a été définie par Jean-Marie Huriot et Jacques-François Thisse²⁰². On commence par se donner un ensemble S continu de lieux s muni d'une norme euclidienne classique appelée d_a . On a alors construit un espace métrique.

Un "itinéraire" est défini comme l'ensemble ordonné des lieux s_i de S empruntés lors d'un mouvement. L'ensemble de tous les itinéraires possibles forme ce que l'on appelle le "réseau". Ce réseau correspond au réseau de transport dont on dispose sur l'ensemble S .

Jean-Marie Huriot et Jacques-François Thisse définissent la distance-réseau comme étant la longueur de l'itinéraire minimal entre deux points. Le terme de "distance" ne doit pour l'instant pas être considéré au sens mathématique. En effet rien ne nous indique que la propriété de symétrie est respectée. Un itinéraire minimal de i à j n'est pas nécessairement de même longueur que de j à i .

On peut "forcer" l'espace à devenir métrique par un ensemble d'axiomes permettant de vérifier les propriétés des distances.

b) Deuxième définition

Jean-Marie Huriot et Jacky Perreur nous fournissent une définition plus récente et plus générale de la distance réseau.

Il faut d'abord expliciter le réseau. Le réseau est un « ensemble du plan qui est d'un seul tenant et qui est formé par la réunion d'un nombre fini de courbes simples qui ne peuvent s'intersecter qu'en leurs extrémités »²⁰³. On construit alors la distance-réseau à partir « d'itinéraires entièrement compris dans un réseau et exprimés en unité de longueur »²⁰⁴. Chaque courbe simple est un continuum à une dimension²⁰⁵.

²⁰² Jean-Marie HURIOT, Jacques-François THISSE, 1987. - *op. cit.*

²⁰³ Jean-Marie HURIOT, Jacky PERREUR, 1990. - *op. cit.* - p. 208.

²⁰⁴ *Ibid.* - p. 208.

²⁰⁵ *Ibid.* - p. 201.

La structure de distance-réseau se construit par la donnée du réseau, qui est un dessin composé de courbes simples sur un plan. La distance donne des mesures pour tout couple de points appartenant au réseau ; on ne dispose pas de mesures pour des points du plan situés hors du réseau. On comprend que l'espace sur lequel on définit cette métrique particulière est l'espace du réseau. Il n'y a pas, pas plus que dans la définition précédente, de correspondance directe entre cette distance et une quelconque mesure définie sur le plan dont il est question dans la définition du réseau.

Il faut également remarquer que la distance-réseau définie par Jean-Marie Huriot et Jacky Perreur est, *a priori*, une métrique non-symétrique et qu'elle n'a pas d'expression analytique générale.

La distance-réseau sur un réseau non régulier est l'exemple d'une métrique sans formulation analytique.

La distance-réseau n'est définie que pour des couples de points entre lesquels il existe au moins un itinéraire. Elle est donc définie pour tout couple de points appartenant au réseau. Dans cet ensemble, on trouve tous les noeuds du réseau mais aussi tous les points appartenant aux "courbes simples" qui dessinent le réseau. Ce n'est donc par une métrique définie sur un ensemble discret.

c) L'intérêt de la distance-réseau

En modélisant l'espace sous la forme d'une plaine uniforme²⁰⁶, on fait l'hypothèse que les déplacements nécessitent un effort égal, quelles que soient l'origine et la destination et ce, pour n'importe quel mode de transport. Cette hypothèse lourde est invalidée par l'existence même des infrastructures et des réseaux²⁰⁷.

La structure de la distance-réseau permet d'éliminer ces biais. En effet, pour Bernard Rouget, « l'intérêt d'une telle formulation réside dans son aptitude à rendre compte de tout réseau réel, et donc dans la variété des formes urbaines qu'elle permet d'exprimer : elle démontre clairement qu'à tout réseau réel de transport est associée une structure mathématique particulière »²⁰⁸. C'est le réseau qui donne corps à la distance-réseau. Cette métrique n'a pas de formulation analytique : elle ne fait que structurer des données disponibles sur le réseau. L'absence de formulation analytique fait que « cette structure est [...] plus souple que celle de l'espace métrique [classique] »²⁰⁹, mais elle rend difficile la représentation : non seulement la distance-

²⁰⁶ Dans ce cas il est toujours possible de trouver une formulation analytique de la métrique.

²⁰⁷ C. C. KISSLING, 1969. - « Linkage importance in a regional highway network ». - *Canadian Geographer*, Canada, 13. - p. 114.

²⁰⁸ Bernard ROUGET, 1975. - *op. cit.* - p. 148.

²⁰⁹ *Ibid.*

réseau est particulière à chaque réseau, mais en plus elle donne des résultats spécifiques pour chaque paire de points.

d) Opposition entre distance et distance réseau

Dans la première définition de la distance réseau, Jean-Marie Huriot et Jacques-François Thisse introduisent un espace euclidien sur lequel on définit une distance d_a . Or, la distance-réseau d_r qu'ils proposent n'est pas totalement cohérente avec la distance d_a . En effet, si d_a existe dans l'espace du réseau, alors elle élimine la distance-réseau, car elle donnera toujours une mesure inférieure ou égale. Donc l'espace réseau, sur lequel Jean-Marie Huriot et Jacques-François Thisse ont défini la distance réseau et l'espace euclidien, sur lequel le réseau est tracé, sont deux espaces clairement distincts.

La distance d_a a pour rôle de donner la mesure de petites portions des arcs du réseau qui, à une échelle suffisamment fine, sont assimilées à des segments. La cohérence entre le plan et le réseau n'apparaît que localement.

e) L'articulation entre espace et réseau

La géométrie euclidienne à deux dimensions traite des plans, car c'est là seulement que l'on peut tracer des lignes droites. Quand on se place sur une surface non plane, il n'est pas possible de définir une distance euclidienne ; la métrique prend alors une autre forme.

Dans un réseau sur lequel on dispose d'une métrique réseau, le plus court chemin suit le tracé des arcs du réseau. Ce n'est pas une métrique euclidienne, car entre deux points quelconques du réseau, le chemin a très peu de chance d'être rectiligne.

Sur la surface sur laquelle est représenté le réseau, il peut très bien exister une distance euclidienne. Cependant, cette dernière n'aura pas, comme nous venons de le voir, une cohérence parfaite avec la distance réseau. C'est ici précisément qu'interviennent les distorsions que nous évoquions à la fin du chapitre précédent à propos de l'inégalité triangulaire²¹⁰. Notre conception euclidienne de l'espace nous pousse à considérer la ligne droite comme le plus court chemin. Cependant, la distance correspondant aux trajets effectués par les moyens de transport se rapproche d'une distance-réseau qui n'obéit pas à l'axiome fondamental.

Considérons l'espace comme une surface plane et continue. Si on utilise un moyen de transport qui fonctionne en tout point de cette surface, on peut affirmer que la ligne droite décrit la liaison de plus courte longueur.

Si, maintenant, on introduit le relief, on obtient une surface continue mais qui n'est plus plane. Dans cet espace la ligne directe à vol d'oiseaux peut s'avérer plus longue

²¹⁰ Cf. au paragraphe "La ligne droite" à la page I-72.

(en unité de longueur) qu'un chemin contournant l'obstacle : on quitte l'espace euclidien.

Si on oblige le moyen de transport à n'emprunter que certaines portions de l'espace – une automobile ne circulant que sur la route par exemple – alors, le chemin le plus court, qui emprunte les infrastructures, ne peut plus être la ligne droite.

5. Les unités de la distance

Nous avons défini la métrique et proposé une série de formes possibles. Nous allons nous attacher à préciser les unités que peuvent prendre les valeurs numériques issues des fonctions de distance. L'unité de mesure est essentielle pour pouvoir donner une interprétation dans les champs de l'Aménagement du territoire, de l'Economie Spatiale et de la Géographie, à la structure mathématique qu'est la métrique.

« Les espaces économiques, énergétiques, sociaux ou culturels suggèrent de nouvelles unités de mesure telles que le franc (distance-coût dans l'envoi d'un colis par exemple), le litre d'essence (énergie consommée pour atteindre un point donné), la minute (distance-temps), les échanges téléphoniques ou la fréquence du courrier entre deux points géographiques (distance culturelle) »²¹¹. Jean-Claude Müller.

a) Le temps (la durée)

L'expression la plus usuelle de la distance est donnée par « l'unité traditionnelle des géographes [qui] se réfère à l'espace terrestre et s'exprime en mètres ou kilomètres »²¹². Mais celle-ci n'est pas suffisante pour décrire complètement l'espace.

« Jusqu'ici j'ai considéré l'espace comme un invariant. Or, il varie évidemment, la véritable mesure de la distance étant la vitesse de déplacement des hommes. »²¹³ Fernand Braudel.

Pour comprendre l'espace, le temps est essentiel, à la fois conceptuellement comme nous l'avons vu²¹⁴, mais aussi pratiquement. Son influence est grandissante, car « l'évolution actuelle des transports vers une *vitesse croissante* constitue une donnée fondamentale »²¹⁵.

²¹¹ Jean-Claude MÜLLER, 1979. - *op. cit.* - p. 217.

²¹² *Ibid.* - p. 216.

²¹³ Fernand BRAUDEL, 1986. - *L'Identité de la France : espace et histoire.* - Paris : Flammarion (éd. 1990). - p. 105.

²¹⁴ Cf. page I-52, "L'espace et le temps".

²¹⁵ Jean-Jacques BAVOUX, Jean-Bernard CHARRIER, 1994. - *Transport et structuration de l'espace européen.* - Paris : Masson (Géographie). - p. 48. - (c'est l'auteur qui souligne).

Le géographe Waldo R. Tobler explique que « les voitures, les trains, les avions, et les autres moyens de transport peuvent être considérés comme ayant pour effet de modifier les relations en distance – mesurées en unités temporelles ou monétaires – d’une manière compliquée »²¹⁶. Loin de constituer une solution définitive à la question de la distance, ce constat nous oblige à **imaginer des formulations qui puissent restituer cet effet “compliqué” des moyens de transport sur l’espace.**

Le problème est que sur les cartes classiques « la profondeur temporelle est représentée seulement (dans la plupart des cas) par inférence »²¹⁷. Certes, la vitesse permet le passage d’une longueur à une durée. Mais, la conversion des échelles kilométriques en échelles temporelles n’est pas un problème simple.

Cependant, avant d’aborder les problèmes de représentation²¹⁸, il est important de comprendre le rôle du temps dans les processus de transport.

b) L’importance du temps dans les transports

Les transports de produits pondéreux n’occupent plus qu’une place restreinte dans l’ensemble des déplacements interurbains, qui sont essentiellement des transports de personnes²¹⁹. Comme le font remarquer Jérôme Monod et Philippe de Castelbajac, « de même qu’autrefois la prééminence du secteur secondaire exigeait une circulation rapide des marchandises, la progression des fonctions tertiaires entraîne une mobilité accrue des hommes »²²⁰. En conséquence, l’importance des coûts monétaires du transport tend à diminuer. Le facteur qui devient prépondérant est le coût du temps de déplacement. Bernard Rouget dans sa thèse intitulée *L’Analyse spatiale en Economie urbaine* avance trois arguments qui expliquent en partie cette tendance.

La faible taille relative de l’espace urbain qui rend les distances physiques moins significatives.

L’importance des déplacements effectués à pied qui dégagent des temps de trajet conséquents.

Enfin, les encombrements qui voient des déplacements physiques quasi nuls²²¹ correspondre à des durées parfois considérables.

²¹⁶ « Automobiles, trains, airplanes, and other media of transport can be considered to have the effect of modifying distance relation - measured in temporal or monetary units - in a complicated manner. » - Waldo R. TOBLER, 1963. - *op. cit.* - p. 73.

²¹⁷ « [...] time-depth is represented only (in most cases) by inference. » - J. M. BLAUT, 1961. - *op. cit.* - p. 3.

²¹⁸ C’est l’objet de la deuxième partie de la thèse.

²¹⁹ Comme l’affirme Bernard Rouget en page 152 de sa thèse (*op. cit.*).

²²⁰ Jérôme MONOD, Philippe de CASTELBAJAC, 1991. - *op. cit.* - p. 92.

²²¹ Tout dépend bien sûr de l’échelle de l’observation.

Le dernier point de l'analyse de Bernard Rouget se traduit dans la fonction qui, à une longueur de déplacement, associe une durée de transport, par une forte dépendance aux conditions de circulation. Toutefois, comme le pose Bernard Marchand, « les distances-temps (le nombre d'heures pour aller d'un point à un autre) sont des fonctions continues de la distance topographique »²²².

Il faut cependant tempérer cette dernière assertion. D'abord, tous les points de l'espace ne sont pas accessibles, à cause du relief par exemple. Ensuite, de grandes parties de l'espace ne sont accessibles qu'à l'aide de certains moyens de transport : l'espace interurbain ne peut être atteint qu'en voiture, le TGV ne le dessert pas. Cela signifie que la distance-temps n'est continue que si on utilise un mode – ou une combinaison de modes – de transport qui permet d'atteindre tout l'espace.

Comme nous allons le voir au paragraphe suivant, l'importance du temps dans les déplacements s'exprime, dans les conceptions économiques de la distance, sous la forme d'un coût.

c) Distances économiques

Selon Bernard Rouget, « l'espace physique ne joue qu'un rôle mineur dans l'organisation interne des villes du fait de la faiblesse des distances impliquées ; par contre, les propriétés économiques de l'espace – le coût temporel des déplacements par exemple – deviennent primordiales pour une explication des villes ; ces propriétés économiques sont sans liaison évidente avec les distances physiques parcourues »²²³. Ce qui est vrai pour les villes l'est aussi pour l'espace interurbain au sens où les déplacements des personnes ne peuvent pas être expliqués si on ne tient pas compte des aspects économiques. Mais, si la liaison entre les propriétés économiques de l'espace – telles que Bernard Rouget les définit ici – et les distances physiques n'est pas évidente, il peut sembler intéressant de trouver une distance particulière qui rende compte à la fois de la distance économique et de l'écartement des objets.

D'autant plus que le contexte actuel est marqué par la construction de réseaux à grande vitesse qui, pour Jean-François Langumier « modifient une variable clé de toute économie : la distance-temps, c'est-à-dire le positionnement d'un espace donné par rapport à d'autres pôles concurrents ou complémentaires »²²⁴.

²²² « [...] time-distances (the number of hours to go from one point to another) are continuous functions of the topographic distance, measured in mile or in kilometres. » - Bernard MARCHAND, 1973. - *op. cit.* - p. 507.

²²³ Bernard ROUGET, 1975. - *op. cit.* - p. 7.

²²⁴ Jean-François LANGUMIER, 1993. - *op. cit.* - p. 169.

Conclusion : les distances de notre recherche

Nous avons défini mathématiquement la notion de distance et explicité ses propriétés.

Nous avons abordé les formes classiques analytiques – métrique euclidienne, métrique rectilinéaire et métrique de Minkowski – puis non analytiques – contiguïté et distance réseau.

Pour modéliser les réseaux de transport, la dernière expression s'avère la plus pertinente.

Enfin, pour pouvoir donner une interprétation de ces structures, nous avons porté l'attention sur les unités puis sur les formes économiques de la distance. Il apparaît que la distance doit intégrer à la fois les distances physiques parcourues et le coût temporel.

Le temps est un facteur essentiel à la description de l'espace. Les physiciens l'ont bien compris

Pour relier tous ces aspects, nous allons nous appuyer sur la typologie construite par Jean-Marie Huriot et Jacky Perreur²²⁵. Celle-ci intègre les propriétés mathématique et les unités employées dans la distance. Les auteurs introduisent la notion de "**distance générale**"²²⁶ pour désigner des fonctions qui s'apparentent à des distances, mais qui n'en possèdent pas toutes les propriétés mathématiques. Il s'agit d'une généralisation de la notion de métrique appauvrie²²⁷. Cette définition permet de distinguer deux types de fonctions. Quand l'application renvoie des longueurs²²⁸ (en mètres, kilomètres, etc.), on a affaire à une **distance itinéraire**. Quand l'application exprime des efforts exercés, c'est-à-dire qu'elle retourne le temps, la dépense monétaire ou l'énergie par exemple, on parlera de **distance fonctionnelle**.

On trouve par ailleurs²²⁹ des définitions similaires qui établissent une distinction entre des distances physiques ou géographiques et des distances correspondant à des processus (communication, transport). Le premier groupe correspond aux distances globales et peut être rapproché du concept de distance générale, alors que le second groupe renvoie à des distances fonctionnelles. Les distances fonctionnelles – qui rendent compte elles aussi des distances physiques, mais de la manière "compliquée"

²²⁵ Jean-Marie HURIOT, Jacky PERREUR, 1990. - *op. cit.* - p. 202.

²²⁶ *Ibid.*

²²⁷ Cf. plus loin "Formes appauvries (fausses distances)", page I-109.

²²⁸ Le terme de "longueur" apparaît ici sous son sens usuel et non selon le sens du concept mathématique.

²²⁹ Jean-Claude MÜLLER, 1982. - *op. cit.* - p. 190.

qu'évoque Waldo R Tobler²³⁰ – sont la caractérisation métrique de la structure d'espace plastique définie par Pip Forer.

Les distances de notre recherche – qui doivent intégrer les distances chorotaxiques et les contraintes des réseaux de transport – appartiennent donc au groupe des distances fonctionnelles.

D. *Formes appauvries (fausses distances)*

Après avoir défini les métriques qui nous intéressent, leurs propriétés, et leurs unités, il semble utile d'explorer le champ des métriques appauvries. Les métriques appauvries sont des structures qui ne vérifient que certaines des propriétés métriques. Nous nous intéressons aussi à la topologie des espaces ainsi construits, à l'instar de William Bunge qui préconise une lecture des différentes métriques à l'aune de leurs propriétés topologiques²³¹. L'intérêt d'une telle exploration est de mesurer le rôle respectif de chacune des quatre propriétés fondamentales.

1. Métrique non-symétrique

Il est possible de définir des distances qui ne vérifient pas nécessairement la propriété de symétrie. Eugene Zautinsky²³² a montré que ces structures vérifient l'essentiel des théorèmes de la géométrie des espaces localement métriques. La question de la nature topologique de ce type d'espace est, à notre connaissance, non résolue.

La métrique non-symétrique est parfois appelée "quasi métrique"²³³. Le non respect de la symétrie impose une modification de la formulation de la propriété de l'inégalité triangulaire car $d(a, b)$ est différent de $d(b, a)$. On peut écrire :

$$d(a, c) \leq d(a, b) + d(b, c)$$

ou bien :

$$d(a, c) \leq d(a, b) + d(c, b)$$

D'autres formulations sont possibles. La vérification de la symétrie n'est donc pas indifférente quant à la formulation de l'inégalité triangulaire²³⁴.

²³⁰ Cf. "Le temps (la durée)", page I-106.

²³¹ « [the metrics] are fundamentally distinguished on the basis of topological [...] considerations ». - William BUNGE, 1962. - *op. cit.* - p. 187.

²³² Eugene M. ZAUTINSKY, 1959. - « Spaces with non-symmetric distance ». - Memoirs of the American Mathematical Society, USA, n° 34. - p. 1-91.

²³³ Jean-Marie HURIOT, Jacky PERREUR, 1990. - *op. cit.* - p. 200.

²³⁴ Ces éléments proviennent d'une discussion avec Jean-Paul Auray.

2. Métrique dégénérée

Dans une métrique dégénérée²³⁵, on construit une fonction associée à un couple d'éléments de l'ensemble de départ qui vérifie toutes les propriétés métriques sauf la séparation. Cela signifie que la fonction de distance dégénérée peut associer un nombre non nul à un couple composé de deux fois le même élément :

$$d(a, a) > 0$$

La réciproque de la non vérification de la propriété de séparation entraîne qu'il peut exister une distance nulle entre deux éléments distincts :

$$d(a, b) = 0 \text{ avec } a \neq b$$

La modélisation d'un espace-coût de transport où l'on tient compte des coûts de chargement et de déchargement, ou la modélisation d'une fonction de coût de transport forfaitaire qui soit telle qu'à partir d'une certaine distance le coût total est fixe, sont des exemples d'une telle fonction. Dans cet espace, il existe des points auxquels on associe un coût de transfert.

Une autre forme d'application de ce type de métrique utilise la réciproque de la propriété métrique manquante. Il traite l'hypothèse où on assimile une région à un point unique²³⁶ en supposant le coût de transport entre deux points de la même région comme nul²³⁷. A l'inverse, dans un espace agrégé en plusieurs zones, on peut considérer des trajets d'un point d'une zone vers un autre point de la même zone. Cette distance est non nulle, bien qu'elle soit considérée d'un élément à lui-même²³⁸.

Là aussi, comme pour les métriques non symétriques, la construction d'un espace topologique à partir d'une fonction de distance privée de la séparation semble être une question mathématique ouverte.

²³⁵ Jean-Claude MÜLLER, 1982. - *op. cit.* - p. 192.

²³⁶ C'est une forme d'agrégation spatiale.

²³⁷ Michel PREVOT, 1975. - *op. cit.* - p. 207.

²³⁸ C'est en particulier l'hypothèse que nous avons émise lors d'un contrat pour la DATAR sur le thème « Environnement et étalement des densités ». Le travail a consisté en une évaluation quantitative et spatialisée des consommations d'énergie et des pollutions liées aux mouvements pendulaires à l'échelle d'un département. Le modèle a ensuite été testé sur plusieurs hypothèses de densités d'activités et de peuplements. L'évaluation des flux au sein des noeuds de la modélisation nous a obligé à considérer l'existence de déplacements entre un point et lui-même. Dans ce cadre précis, nous avons fait l'hypothèse que les flux internes étaient fonctions de la population du noeud considéré. (Cf. : Philippe Mathis, s/dir, 1996. - « Consommations d'énergie et pollutions liées à l'étalement des densités ». - p. 95-106. - in Environnement et aménagement du territoire. - sous la dir. de Jean-Paul de Gaudemar. - Paris : La documentation française/DATAR (Recherches). - 213 p.)

3. Métrique pauvre

Pour Bernard Rouget²³⁹ l'expression de "métrique pauvre" désigne des applications possédant les propriétés des distances à l'exception de la symétrie et de l'inverse de la séparation²⁴⁰. Cette dernière caractéristique implique que deux points distincts peuvent être séparés par une longueur nulle.

Cela permet de rendre compte des sens uniques et aussi du fait que deux points distincts peuvent être séparés par une longueur nulle, car dotés d'une excellente accessibilité mutuelle²⁴¹.

Ces métriques pauvres génèrent des topologies particulières – « à tout espace muni d'une métrique pauvre est associée une topologie directement liée à la métrique pauvre »²⁴² – qui n'ont été étudiées jusqu'à présent que sur un plan théorique²⁴³.

4. Espace prémétrique

Le concept d'espace prémétrique, appelé aussi quasipseudométrique²⁴⁴, reprend les propriétés des espaces métriques à l'exception de la symétrie et de l'inégalité triangulaire²⁴⁵. Cette structure permet de construire une "prétopologie"²⁴⁶. Ce dernier concept est une structure plus faible, avec moins de contraintes que la topologie. La méthode de construction des prétopologies s'inspire de celle de construction de la topologie à partir d'une "vraie" métrique.

On constate, dans l'état m des connaissances, que la perte de la propriété de l'inégalité triangulaire entraîne la disparition des propriétés topologiques.

5. Espace semi-métrique

Un espace vérifiant les propriétés des métriques à l'exception de la propriété de l'inégalité triangulaire est appelé espace **semi-métrique**²⁴⁷.

Les espaces de Minkowski avec un exposant r inférieur à 1, parce qu'ils ne vérifient pas l'inégalité triangulaire²⁴⁸, font partie des espaces semi-métriques.

²³⁹ Bernard ROUGET, 1975. - *op. cit.* - p. 206.

²⁴⁰ Cette propriété correspond à la deuxième proposition au paragraphe "Séparation", page I-98.

²⁴¹ Dans cette hypothèse, on considère comme quantité négligeable la durée ou le coût du déplacement.

²⁴² Bernard ROUGET, 1975. - *op. cit.* - p. 207.

²⁴³ Il s'agit des espaces de KURATOWSKI qu'évoque Bernard Rouget (Cf. : Bernard ROUGET, 1975. - *op. cit.* - p. 207-208).

²⁴⁴ Michel LAMURE, 1987. - *Espaces abstraits et reconnaissance des formes application au traitement des images digitales*. - thèse d'Etat : Sciences : Lyon I.- p. 157.

²⁴⁵ Jean-Paul AURAY, Gérard DURU, Michel LAMURE, 1994. - *op. cit.* - p. 30.

²⁴⁶ Cf. : Z. BELMANDT, 1993. - *Manuel de prétopologie*. - Paris : Hermès (Interdisciplinarité et nouveaux outils).

²⁴⁷ On peut aussi trouver le terme de "pseudo-métrique".

Une des particularités de cette famille d'espaces, pour R. G. Golledge et L. J. Hubert, est que la fonction distance est non continue²⁴⁹. Il est important de noter que pour pouvoir parler de continuité, il faut disposer d'une structure – topologie ou prétopologie – dans laquelle cette propriété ait un sens. Avec une telle fonction distance on ne peut pas établir de topologie²⁵⁰, mais seulement une prétopologie²⁵¹.

La continuité de la fonction de distance n'est vérifiée que si on impose le respect de l'inégalité triangulaire²⁵²; ce qui revient à établir une métrique non symétrique. A cause de ces problèmes de continuité, les espaces semi-métriques sont « d'une utilisation malaisée »²⁵³ au plan mathématique, et donc *a fortiori* dans d'éventuelles applications aux domaines de l'analyse spatiale. L'espace semi-métrique ne recèle pas de système de coordonnées implicite²⁵⁴.

Comme pour la structure de prémétrique, on voit que la disparition de la propriété de l'inégalité triangulaire entraîne la disparition des propriétés topologiques.

L'axiome de l'inégalité triangulaire est donc bien essentiel pour la description des propriétés spatiales des espaces.

La structure d'espace mental développée par Isabelle Derognat²⁵⁵ est l'exemple d'une semi-métrique. Elle introduit la longueur subjective d'un itinéraire comme une fonction de la longueur de l'itinéraire et de l'attraction perçue de chacune des extrémités du chemin. Cette fonction n'est pas additive à cause de la variation de l'attraction perçue des lieux. Le non respect de l'inégalité triangulaire exprime ici le fait que pour un individu, faire un détour par un lieu mentalement plus attractif pour se rendre vers un lieu qui l'est moins est perçu comme plus court que de se rendre directement à celui-ci. Cette caractéristique entraîne la perte de la propriété topologique. C'est une des rares applications concrètes en analyse spatiale de la disparition de l'inégalité triangulaire.

C'est ainsi, comme l'écrit Jean-Claude Müller, qu'on peut très bien « imaginer une dissociation mentale entre la topologie visuelle de la carte et la distribution spatiale

²⁴⁸ Voir au paragraphe "Le cas général : la fonction de Minkowski" à la page I-100.

²⁴⁹ R. G. GOLLEDGE, L. J. HUBERT, 1982. - *op. cit.* - p. 108.

²⁵⁰ *Ibid.*

²⁵¹ Z. BELMANDT, 1993. - *op. cit.*

²⁵² « One common way [to avoid the problem of the discontinuity of the distance function] is to impose the triangle inequality in addition to the assumption of identity and symmetry ». - R. G. GOLLEDGE, L. J. HUBERT, 1982. - *op. cit.* - p. 109.

²⁵³ Colette CAUVIN, 1984 b. - *op. cit.* - p. 70.

²⁵⁴ R. G. GOLLEDGE, L. J. HUBERT, 1982. - *op. cit.* - p. 115.

²⁵⁵ Isabelle DEROGNAT, 1990. - « Vers une axiomatique de la distance mentale ». - RERU p 252.

effectivement perçue »²⁵⁶. Dans ce cas de figure, la transformation entre l'espace chorotaxique et l'espace mental est telle que les propriétés topologiques sont altérées.

6. Tableau récapitulatif des formes appauvries

Espace →	Métrique				Topologique
Propriété →	Positivité	Séparation	Symétrie	Inégalité triangulaire	Topologie
Métrique non-symétrique	Oui	Oui	Non	Oui	<i>Question non résolue</i>
Métrique dégénérée	Oui	Non	Oui	Oui	<i>Idem</i>
Métrique pauvre	Oui	Non	Non	Oui	Oui
Semi-métrique	Oui	Oui	Oui	Non	Non
Prémétrique	Oui	Oui	Non	Non	Non

tableau 2 : les propriétés des métriques pauvres

Le tableau 2 montre la situation des métriques appauvries vis-à-vis des quatre propriétés métriques ainsi que de la topologie.

On constate que la question des propriétés topologiques des deux premières structures – la métrique non-symétrique et la métrique dégénérée – n'a pas été totalement traitée par les mathématiciens. Seule la métrique pauvre vérifie les propriétés topologiques. Ce n'est pas le cas des deux dernières, à savoir la semi-métrique et la prémétrique.

En tout état de cause, nous pouvons affirmer que la propriété de l'inégalité triangulaire est essentielle à la construction d'une topologie.

7. La hiérarchie de Shepard

La figure suivante (**Erreur! Source du renvoi introuvable.**) inspirée d'une figure proposée par Roger N. Shepard montre la relation hiérarchique entre les espaces semi-métriques et les principales familles d'espaces métriques.

²⁵⁶ Jean-Claude MÜLLER, 1979. - *op. cit.* - p. 227.

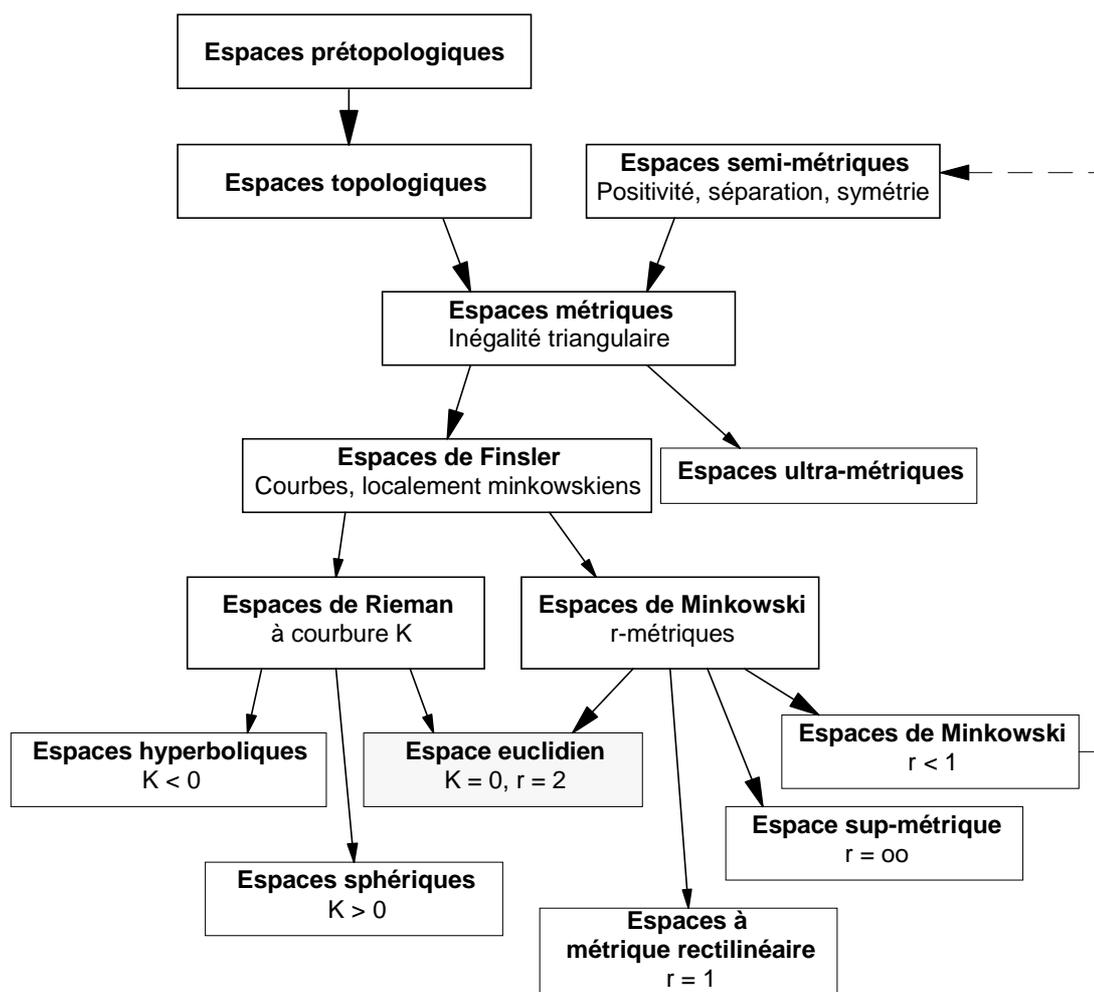


figure 14 : la hiérarchie des espaces topologiques, des espaces à métrique pauvre et des principaux espaces métriques

Une grande partie des espaces cités sur le graphique ont déjà été explicités précédemment. Nous ne développerons pas dans ce travail tous les autres espaces apparaissant ici, à l'exception des espaces de Riemann. Ceux-ci sont appelés aussi espaces à courbure (K) variable ; ils comportent des extensions et des rétrécissements dans certaines zones. Ils vérifient les propriétés topologiques.

Dans les espaces de Riemann, les surfaces sont étirées ou compressées comme si elles étaient élastiques en certains points.

Remarquons le statut de l'espace euclidien vis-à-vis des structures métriques classiques : il constitue un cas particulier des espaces de Riemann (espace de Riemann à courbure nulle) et il constitue aussi un cas particulier des espaces de Minkowski (espace de Minkowski avec l'exposant égal à 2).

On peut constater que les espaces semi-métriques occupent sur ce schéma la position la plus élevée. Mathématiquement, cela se traduit par le fait que ces espaces possèdent le dénominateur commun à toutes les autres familles, à savoir les propriétés de positivité, de séparation et de symétrie. Cela signifie aussi que tous les développements dans les espaces métriques, appauvris ou non, ont été faits sur la base d'une vérification de l'inégalité triangulaire.

Conclusion : une propriété essentielle

Nous nous situons dans le cadre des structures métriques. Nous avons étudié un ensemble de structures métriques appauvries, c'est-à-dire des espaces qui ne vérifient pas une ou plusieurs des propriétés métriques. En particulier, l'attention a été portée sur la nature topologique des espaces mathématiques ainsi construits. En effet, nous avons montré l'importance des propriétés topologiques et de leur conservation, pour la formalisation des espaces qui nous intéressent. Le caractère topologique de l'espace est pour nous essentiel.

Une structure métrique appauvrie qui ne vérifie pas la propriété de l'inégalité triangulaire est une structure non topologique. Le respect ou le non respect de l'inégalité triangulaire conditionne la nature topologique de la structure.

D'autre part, la hiérarchie construite par Roger N. Shepard situe les espaces semi-métriques en tant que dénominateur commun des autres structures. Tous les développements suivants ont été faits sur la base de la vérification de l'inégalité triangulaire, qui coïncide sur le graphique avec l'apparition de la topologie.

Nous concluons donc sur le caractère essentiel, parmi les propriétés métriques, de la vérification de l'inégalité triangulaire quand on veut construire une structure topologique.

Section 4 La question de la ligne droite

Dans l'établissement d'une "Géographie Théorique", William Bunge²⁵⁷ présente l'idée que **la distance la plus courte entre deux points est la ligne droite comme le concept spatial le plus fondamental**. Sur la base des développements mathématiques qui précèdent, et en référence aux phénomènes identifiés par les économistes, les géographes et les aménageurs, nous discutons maintenant des implications de cette idée formalisée par Archimède.

A. *L'héritage euclidien*

Toutes nos conceptions de l'espace font référence, le plus souvent de manière implicite, aux principes euclidiens. L'héritage euclidien comprend les espaces euclidiens et la géométrie euclidienne. Ces deux ensembles constituent deux angles de perception différents du même objet conceptuel.

1. L'espace euclidien

Nous avons fait état, dans la partie intitulée "Hiérarchie des espaces" à partir de la page I-80, de la richesse cachée dans la structure de l'espace vectoriel euclidien. L'espace euclidien, tel qu'il est défini dans le glossaire²⁵⁸, est une forme particulière et plus précise de cette structure usuelle.

En plus de ses propriétés métriques et topologiques, l'espace euclidien est continu, isotrope et homogène.

2. La géométrie euclidienne

La géométrie euclidienne, qui est une autre formulation de la représentation euclidienne, est fondée sur les trois axiomes qui suivent.

1. Par deux points passe une droite et une seule.
2. La ligne droite est le plus court chemin d'un point à un autre.
3. Par un point on peut faire passer une parallèle et une seule à une droite donnée.

La remise en cause du troisième axiome, à savoir que par un point il soit possible de faire passer plusieurs droites parallèles ou pas une seule, a amené l'apparition de la théorie des espaces de Riemann.

²⁵⁷ « Perhaps the most basic spatial concept is that the shortest distance between two points is the straight line. » - William BUNGE, 1962. - *op. cit.* - p. 177.

²⁵⁸ A la page 209.

Le deuxième axiome est beaucoup plus intuitif. C'est lui qui donne sa forme explicite à la distance euclidienne telle qu'elle a été définie au paragraphe "Métrique euclidienne", à la page I-99. La formulation de cet axiome de la géométrie euclidienne (Euclide est un grec d'Alexandrie du III^{ème} siècle avant notre ère) est en fait due à Archimède (syracusain du III^{ème} siècle avant notre ère) sur la base du théorème de Pythagore (grec de Samos du IV^{ème} siècle avant notre ère)²⁵⁹.

3. L'espace théorique

L'espace support de la théorie des places centrales de Walter Christaller, est habité par une population continûment répartie. Les places centrales sont des lieux dont la fonction est de fournir des biens à la population appartenant à la zone environnante. En conséquence, tout point de l'espace doit pouvoir être atteint²⁶⁰, à partir et à destination de la place centrale. Dans la théorie développée par August Lösch, les habitants sont regroupés dans des unités de consommation qui sont réparties régulièrement dans l'espace.

Pour Jean-Claude Müller, « les modèles de Von Thünen, Christaller et Lösch simplifient à outrance l'espace économique, en imaginant un plan euclidien où les densités géographiques (population, etc.) sont uniformes »²⁶¹. En fait, les espaces théoriques des auteurs classiques de l'analyse spatiale sont basés sur trois assertions essentielles :

l'espace est un plan euclidien ;

les populations sont régulièrement réparties, que ce soit continûment ou de place en place ;

les coûts de transport sont uniformes²⁶².

En fait, les hypothèses d'homogénéité spatiale et d'isotropie, qui sont les corrélats de l'emploi de la structure euclidienne, jouent un rôle analogue à celui de l'hypothèse classique du raisonnement théorique qui considère "toutes choses égales par ailleurs"²⁶³.

²⁵⁹ J. ITARD, 1996. - « Archimède ». - in *Encyclopædia Universalis*, tome 2. - p. 839.

²⁶⁰ Philippe MATHIS, 1973. - *Introduction à une théorie unitaire des implantations commerciales*. - Thèse de troisième cycle : Paris I. - p. 223.

²⁶¹ Jean-Claude MÜLLER, 1979. - *op. cit.* - p. 216.

²⁶² Shlomo ANGEL, Geoffrey M. HYMAN, 1972. - « Transformations and geographic theory ». - *Geographical Analysis*, USA, vol. 4. - p. 352.

²⁶³ Jean-Marie HURIOT, Jacky PERREUR, Isabelle DEROGNAT, 1994. - « Espace et distance ». - p. 39. - in *Encyclopédie d'économie spatiale*. - sous la dir. de Jean-Paul Auray, Antoine Bailly, Pierre-Henri Derycke, Jean-Marie Huriot. - Paris : Economica (Bibliothèque de Science Régionale).

4. L'espace de référence

Les concepts relativement intuitifs qui sont à la base des représentations euclidiennes mettent à jour une structure qui est mathématiquement surdimensionnée pour l'analyse spatiale.

Ces raisons nous incitent à abandonner les principes de la géométrie euclidienne pour en adopter d'autres. Cependant, il convient d'y faire référence très précisément de manière à éclairer les particularismes de ces nouveaux espaces, particularismes qui bien souvent s'opposent à notre intuition première. Le problème est justement que ces intuitions obéissent très souvent aux axiomes euclidiens : définir une distance sur un ensemble où la ligne droite n'est pas le chemin le plus court rend nécessaire le choix d'une structure non-euclidienne.

Dans notre travail, et en cela nous suivons les indications de Colette Cauvin²⁶⁴, le rôle que nous assignons à la représentation euclidienne est celui d'**espace de référence**.

5. Limites de la structure euclidienne

L'ensemble constitué par les distances en kilomètres parcourus par la route entre des couples de localisations, ne permet pas de construire une structure euclidienne²⁶⁵.

D'autre part, il est généralement admis que l'espace perceptif n'est pas euclidien²⁶⁶ : « les psychologues ont démontré que notre espace visuel est de nature non euclidienne, tandis que l'espace perçu est lui-même localement euclidien »²⁶⁷.

La géométrie euclidienne « ne permet pas toujours de représenter avec précision les propriétés des réseaux qui sont intéressantes pour l'étude des phénomènes de transport »²⁶⁸. En effet, les durées et les vitesses de parcours varient selon les liaisons, et ces variations génèrent un espace qui est non euclidien.

Conclusion : vers des structures non euclidiennes

Comme le montre C. C. Kissling dans une modélisation d'une partie du réseau autoroutier canadien, « une distance temps non euclidienne peut être substituée [à la distance euclidienne] dans une tentative de tenir compte de déplacements effectués

²⁶⁴ Colette CAUVIN, 1984 b. - *op. cit.* - p. 72.

²⁶⁵ Jean-Claude MÜLLER, 1982. - *op. cit.* - p. 201.

²⁶⁶ R. G. GOLLEDGE, L. J. HUBERT, 1982. - *op. cit.*

²⁶⁷ Jean-Claude MÜLLER, 1979. - *op. cit.* - p. 227.

²⁶⁸ « The choice of Euclidean geometry has obvious advantages in the study of many physical phenomena, but it does not always represent accurately the properties of networks that are of interest in the study of transportation phenomena. » - James W. CLARK, 1977. - *op. cit.* - p. 195.

via des moyens de transport différents traversant des terrains aux conditions variables »²⁶⁹.

Pour Shlomo Angel et Geoffrey M. Hyman, « si l'on souhaite étudier les transports dans un cadre géométrique, on doit développer des théories géographiques non euclidiennes »²⁷⁰.

L'espace est caractérisé par des propriétés qui échappent au domaine euclidien. La difficulté consiste maintenant à représenter graphiquement ces propriétés non euclidiennes²⁷¹.

Pour d'Alembert, la notion d'espace ne nécessitait pas de définition, car elle correspondait à une idée simple et intuitive, celle de l'espace réduit et idéalisé dans lequel nous nous mouvons²⁷². A l'époque des encyclopédistes, la perception de l'espace se confondait avec la conceptualisation mathématique, c'est-à-dire avec la représentation. La remise en cause du fondement euclidien fut aussi la remise en cause de cette conceptualisation de l'espace. L'apparition de constructions mathématiques comme les espaces non euclidiens a ouvert la voie à de nouvelles perceptions de l'espace. On a pu prendre conscience alors de la prégnance du modèle euclidien dans la perception de l'espace. Ceci met à jour la dialectique de la relation entre la représentation et le réel, qui se caractérise par des phénomènes de rétroaction et d'enrichissement mutuel.

Adopter une fonction distance qui s'écarte de la conception euclidienne implique une nouvelle interprétation de l'espace qui se caractérisera par un nouveau type de carte. « La cartographie des distances est seulement une tentative pour révéler les liens potentiels existant entre les processus géographiques et une géométrie particulière »²⁷³.

²⁶⁹ « Non Euclidean time distances may be substituted in an attempt to make allowance for movement by different transport media over variable terrain conditions. » - C. C. KISSLING, 1969. - *op. cit.* - p. 114.

²⁷⁰ « If we wish to study transportation in a geometrical framework, we must develop non-Euclidean theories of geography. » - Shlomo ANGEL, Geoffrey M. HYMAN, 1972. - *op. cit.* - p. 366.

²⁷¹ James W. CLARK, 1977. - *op. cit.* - p. 195.

²⁷² Analyse de d'Alembert rapportée dans : Stella BARUK, 1992. - *op. cit.* - p. 453.

²⁷³ *Ibid.* - p. 190.

B. Hors de la ligne droite

Nous avons évoqué au début de ce travail²⁷⁴ l'existence de distorsions de l'espace dues à l'écart au plus court chemin euclidien.

Comme le montre Karl J. Kansky²⁷⁵, la ligne droite correspond à la "ligne de désir" du chemin le plus court possible. Cette ligne de transport idéale rappelle la notion du réseau maximum défini par Gabriel Dupuy²⁷⁶, qui permet de relier tout point à tout autre par une ligne droite. La ligne de transport réelle est très différente de cette ligne droite idéale. La question de la ligne droite est d'une importance cruciale pour la compréhension du fonctionnement du réseau.

1. Ecart au chemin euclidien par la loi de réfraction

Cet écart au chemin euclidien est illustré, sur la figure 14, selon une analogie avec la loi de réfraction en optique²⁷⁷. L'espace est constitué de deux zones où des tarifs de transport différents, t_1 et t_2 , sont appliqués. L'itinéraire retenu s'écarte de la ligne droite : il est allongé dans la zone au tarif le plus faible et raccourci là où le tarif est le plus fort.

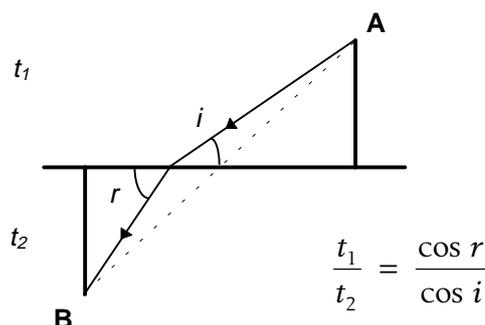


figure 14 : le chemin minimal selon la loi de réfraction

On rencontre de nombreuses applications de ce principe. Un automobiliste pressé cherchera à rejoindre au plus vite un point d'accès à l'autoroute, même si cela l'entraîne loin de l'itinéraire rectiligne. De cette manière, il cherche à réduire la longueur de son itinéraire sur la zone où les vitesses sont faibles. L'allongement de son parcours ne touchera que la zone à vitesse importante.

²⁷⁴ Au paragraphe intitulé "La ligne droite" à la page I-72.

²⁷⁵ Karl J. KANSKY, 1989. - *op. cit.* - p. 118.

²⁷⁶ Cf. "Le réseau comme système", page I-53.

²⁷⁷ Christian WERNER, 1968. - *op. cit.*

Ainsi, « il est possible qu'un itinéraire indirect entre deux points soit plus rapide que le chemin le plus court »²⁷⁸ en kilomètres.

2. Une mauvaise interprétation de l'inégalité triangulaire

Certains auteurs manquent de clarté, et parfois se trompent dans l'interprétation économique ou géographique de la propriété de l'inégalité triangulaire.

Bernard Rouget, économiste, dans sa thèse²⁷⁹ soutenue en 1975, note une violation de l'inégalité triangulaire pour les temps de transports à petite échelle, mais il ne donne pas d'explication claire.

Un autre auteur, Jean-Claude Müller, en 1982, présente l'exemple d'un automobiliste effectuant un détour pour éviter un embouteillage comme une violation de l'inégalité triangulaire²⁸⁰. Or, le conducteur cherche à minimiser son temps de trajet : il choisit l'itinéraire de durée minimale. Dans une logique de rationalité économique, la distance est définie comme le chemin minimal. Donc, ici, la distance est mesurée le long d'un itinéraire de contournement, et l'inégalité triangulaire est respectée. C'est en fait la loi fondamentale d'Archimède – la ligne droite est le plus court chemin entre deux points – qui est violée dans cet exemple, mais en aucun cas l'inégalité triangulaire.

Cette mauvaise interprétation est reprise par Colette Cauvin dans sa thèse en 1984²⁸¹, à partir d'une comparaison entre des temps de parcours sur une route vicinale en ligne droite et le détour par une autoroute selon un principe similaire à l'exemple traité sur la figure 15, ci-dessous. Pour Colette Cauvin, « l'automobiliste mettra moins de temps pour parcourir la distance $[pq + qr]$ que la distance $[pr]$, surtout s'il dispose d'une voiture puissante »²⁸². Elle en induit que, « en unités de temps, l'inégalité triangulaire est [...] violée »²⁸³. Ici aussi, comme dans l'exemple donné par Jean-Claude Müller, la ligne droite n'est plus le chemin le plus court, mais l'inégalité triangulaire est respectée. Il y a en fait une confusion entre la métrique euclidienne et la métrique économique du chemin minimum en coût.

La même interprétation est établie par Jacky Perreur en 1989 à propos du chemin minimum par la loi de réfraction²⁸⁴, mais elle disparaît de l'article qu'il écrit en 1990

²⁷⁸ « It is feasible for an indirect routeway between two points to be a faster one than the shortest path. » - C. C. KISSLING, 1969. - *op. cit.* - p. 114.

²⁷⁹ Bernard ROUGET, 1975. - *op. cit.* - p. 203.

²⁸⁰ « A motorist taking a detour to avoid traffic is evidence of a situation where the triangle inequality rule is no longer applicable. » - Jean-Claude MÜLLER, 1982. - *op. cit.* - p. 191.

²⁸¹ Colette CAUVIN. - *op. cit.* - p. 62.

²⁸² *Ibid.*

²⁸³ *Ibid.*

²⁸⁴ Jacky PERREUR, 1989. - *op. cit.* - p. 133.

avec Jean-Marie Huriot²⁸⁵. Il est alors fait référence à la nature non-euclidienne du déplacement : « l'itinéraire retenu s'écarte de la ligne droite »²⁸⁶. Cette dernière affirmation amène le débat sur la forme de la distance et il n'est plus question d'une violation de l'inégalité triangulaire.

Cette revue critique de la littérature économique et géographique illustre la difficulté à interpréter l'axiome de l'inégalité triangulaire, ainsi que la prégnance du modèle de la distance euclidienne.

3. Comment représenter les plus courts chemins ?

Sur la figure 15, on a disposé trois villes notées p , q et r . Il existe une autoroute reliant les villes q et r , et une autre entre q et p , tandis que r et p sont reliées par une petite route. Le chemin le plus court en durée entre ces deux dernières villes passe par la ville q et s'effectue en autoroute. La question que pose Jean-Claude Müller est la suivante : « comment déterminer, sur une carte à l'échelle du temps, la position des points p , q et r tandis que le plus court chemin d'un point à un autre n'est plus la ligne droite ? »²⁸⁷

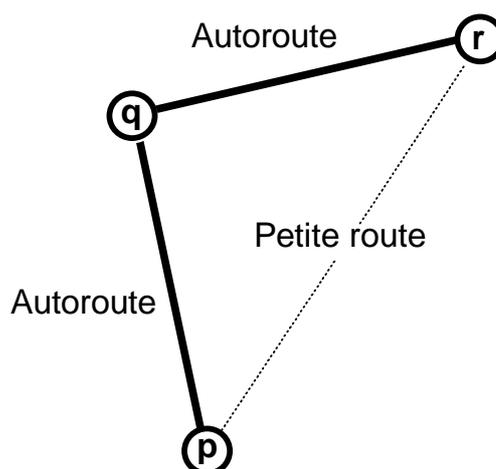


figure 15 : représentation des plus courts chemins²⁸⁸

A partir d'une deuxième illustration comportant quatre villes, Jean-Claude Müller affirme qu'il est « impossible de représenter ces points de manière à ce que les longueurs entre les points correspondent aux distances-temps »²⁸⁹. Cela est effectivement impossible sur un plan. Il n'en va plus de même si on se place sur une surface non plane.

²⁸⁵ Jean-Marie HURIOT, Jacky PERREUR, 1990. - *op. cit.* - p. 227.

²⁸⁶ *Ibid.*

²⁸⁷ Jean-Claude MÜLLER, 1979. - *op. cit.* - p. 215. (C'est nous qui soulignons)

²⁸⁸ Figure provenant de : Jean-Claude MÜLLER, 1979. - *op. cit.* - p. 216.

²⁸⁹ *Ibid.*

4. Transformation du réseau

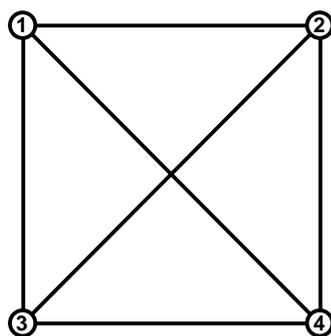


figure 16 : un réseau à quatre noeuds²⁹⁰

Considérons un réseau composé de quatre noeuds et de six liaisons. La figure 16 montre les noeuds du réseau selon leurs localisations dans l'espace. Les liaisons sont représentées par des segments de droites reliant les noeuds. Supposons que les deux liaisons diagonales sont de meilleure qualité que les quatre liaisons périphériques, et que de ce fait, les durées de parcours sont identiques pour toutes les liaisons. C'est-à-dire par exemple, que le temps de trajet du noeud 1 au noeud 4 est identique au temps de trajet du noeud 1 au noeud 3.

Nous voulons représenter ce système de telle façon que les longueurs des arcs soient proportionnelles à la durée nécessaire à leur parcours. Pour cela, on considère d'abord que les deux liaisons diagonales sont à la bonne échelle d'espace-temps. Pour la cohérence de la figure, les liaisons périphériques doivent avoir une longueur égale, ce qui signifie qu'on ne peut plus les dessiner sous la forme de segments simples. Une solution consiste à les tracer comme des courbes.

Les arcs de la **Erreur! Source du renvoi introuvable.** ont tous la même longueur. Remarquons que les arcs périphériques ne sont plus cohérents avec la distance euclidienne : le chemin pour aller du sommet 1 au sommet 3 n'est pas une ligne droite.

²⁹⁰ Cette figure et la suivante proviennent de : James W. CLARK, 1977. - *op. cit.* - p. 197.

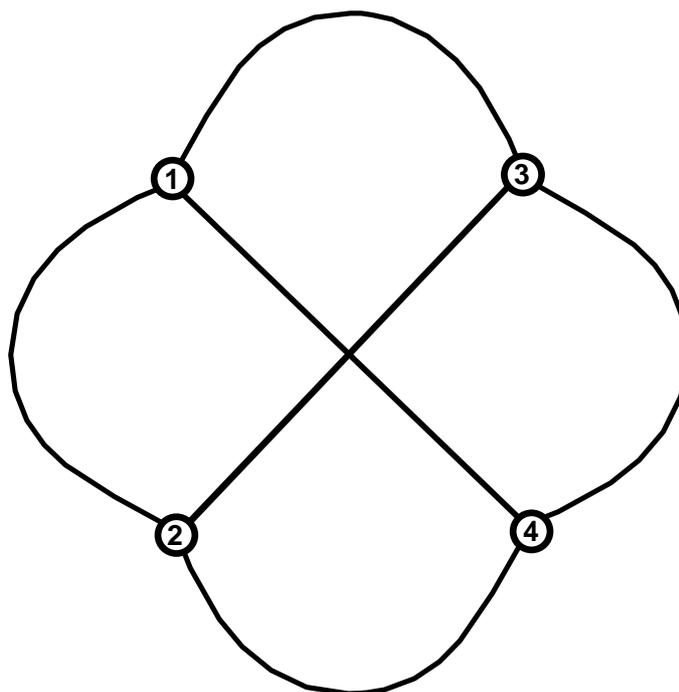


figure 18 : une représentation cohérente du réseau

5. Proposition : de la “distance graphique” à la “longueur visuelle”

Jean-Claude Müller²⁹¹ introduit la notion de “**distance graphique**” pour désigner la fonction de distance dont on peut disposer sur une carte. Il définit la distance graphique sous une forme euclidienne : la longueur d’un segment tracé entre deux points de la carte est directement proportionnelle à la longueur du chemin qui les relie.

Or, « l’utilisateur de cartes doit transformer mentalement la distance physique pour obtenir une mesure utile »²⁹². C’est le cas lors de la lecture d’une carte routière : la sinuosité de la route et l’importance des détours du trajet permettent de corriger, à la hausse, la longueur euclidienne d’un itinéraire. La distance euclidienne offre une première approche de la mesure. Ensuite, celle-ci est ajustée par des informations sur les infrastructures empruntées. En fait le concept de la distance “à vol d’oiseaux”, sur lequel est basée la distance graphique, risque de violer la logique de l’utilisation des cartes²⁹³. C’est pourquoi nous introduisons une notion différente.

Nous définissons la “**longueur visuelle**” en nous inspirant de la distance graphique de Jean-Claude Müller. **La longueur visuelle d’une liaison entre deux points est égale à la longueur de l’arc correspondant.** Si, par exemple, l’arc prend la forme de plusieurs

²⁹¹ Jean-Claude MÜLLER, 1979. - *op. cit.* - p. 224.

²⁹² « The map user must mentally transform the physical distance in order to find a way to move around ». - Jean-Claude MÜLLER, 1982. - *op. cit.* - p. 189.

²⁹³ *Ibid.* - p. 189.

segments mis bout à bout, la longueur visuelle correspond à la somme des longueurs des segments. La longueur visuelle n'est donc pas une notion euclidienne. Il faut remarquer que la longueur visuelle n'est disponible entre deux points que s'il existe un chemin.

Consultons les différentes représentations graphiques fournies dans cette section en comparant la mesure donnée par la distance graphique et celle de la longueur visuelle. Le principe de diffraction (figure 14, page I-120) montre un chemin minimal composé de deux segments : la distance graphique de renvoie le chemin direct euclidien, alors que la longueur visuelle restitue la longueur du chemin effectif qui est composé de deux segments mis bout à bout. Sur les deux figures suivantes (figure 15, page I-122, et figure 16, page I-122), les deux mesures correspondent à la distance euclidienne et ne restituent pas la distance-temps. Par contre, les deux longueurs renvoient des mesures divergentes à partir de la **Erreur! Source du renvoi introuvable.** : la distance graphique sous-évalue la longueur des arcs des liaisons périphériques, alors que la longueur visuelle nous fournit une mesure exacte.

Nous avons conclu la première partie de la présente section en affirmant la nécessité de se tourner vers des représentations non-euclidiennes. La mesure habituelle dont on dispose sur les cartes – la distance graphique – est une conception euclidienne. Elle n'est pas adaptée à la lecture des représentations que nous voulons construire. C'est pourquoi nous introduisons une nouvelle mesure, la longueur visuelle. Celle-ci est nécessaire pour la compréhension des représentations non-euclidiennes de l'espace.

Section 5 Du réseau au graphe

*« Il est largement admis que les caractéristiques topologiques de tout réseau peuvent être représentées sous la forme d'un graphe planaire ou non-planaire, et que les indices de mesure de la structure de tels réseaux ont souvent été utilisés dans l'analyse des réseaux de transport »²⁹⁴.
Thomas R. Leinbach et Peter O. Muller.*

Pour étudier les réseaux de transport, il nous faut absolument nous positionner dans la théorie des graphes.

On peut trouver de nombreux exemples d'utilisation de la théorie des graphes pour la modélisation des réseaux de transport. Il peut s'agir de la modélisation d'un réseau autoroutier²⁹⁵, d'un réseau de lignes de train à grande vitesse²⁹⁶, etc.

Ensuite seulement, on s'attachera à étudier les réalisations de ces graphes sur des surfaces particulières, ce qui constituera la liaison entre théorie des graphes et prise en compte spatiale.

A. Définitions élémentaires

1. Graphe

Un **graphe** est un schéma constitué par un ensemble de points et de flèches. Les points sont appelés **sommets** et les flèches, **arcs**.

Un graphe $G = (S, U)$ est le couple constitué par :

- un ensemble $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ (les sommets) ;
- une famille $U = (u_1, u_2, \dots, u_m)$ d'éléments du produit cartésien $S \times S = \{(a, b) / a \in S, b \in S\}$ (les arcs).

Dans la définition formelle, on reconnaît en S l'ensemble des sommets et en U l'ensemble des arcs du graphe.

La plupart des graphes sont **orientés**, c'est-à-dire que les arcs sont fléchés, exprimant alors le fait que le flux ne passe que dans un seul sens. Le graphe du réseau de

²⁹⁴ « It is widely accepted that the topological characteristics of any network can be represented as a planar or non-planar graph, and that indices measuring the structure of such networks have often been used in the analysis of transport networks. » - Thomas R. LEINBACH, Peter O. MULLER, 1975. - « Transportation geography ». - *Progress in geography*, GB, vol. 8. - p. 180.

²⁹⁵ C. C. KISSLING, 1969. - *op. cit.*

²⁹⁶ Klaus SPIEKERMANN, Michael WEGENER, 1993. - *op. cit.*

transport est le plus souvent un graphe de type orienté si on pense aux nombreux sens uniques des villes. Cette caractéristique devient intéressante à partir d'une certaine finesse dans la description. Pour les liaisons interurbaines, on peut considérer les graphes des réseaux de transport comme étant non orientés. On formalise alors les réseaux sous forme de multigraphes, c'est-à-dire des graphes donnés sans orientation.

Les graphes se décomposent en graphes partiels et en sous-graphes. Considérons le graphe G correspondant à l'ensemble des routes de France. Les routes de l'Indre-et-Loire vont constituer un sous graphe de G , et l'ensemble des routes nationales est un graphe partiel de G . Les routes nationales de l'Indre-et-Loire constituent un sous-graphe partiel du graphe des routes françaises.

2. Le p -graphe

L'épaisseur d'un graphe correspond à l'existence de plusieurs arcs entre un même couple de sommets. Le traitement de l'épaisseur des graphes varie selon les auteurs et dépend de la nature des problèmes que l'on souhaite résoudre.

Pour André Kaufman, quand, dans un graphe, plusieurs arcs dans un même sens peuvent joindre un couple de sommets s_i et s_j , si le plus grand nombre d'arcs existant dans un même couple et dans un même sens est p , on aura formé un **graphe p -appliqué**²⁹⁷ ($p \geq 1$).

En reprenant la terminologie de Claude Berge, un élément (a, b) de $S \times S$ ne peut pas apparaître plus de p fois dans la famille U , si le graphe est un **p -graphe** ($p \geq 1$)²⁹⁸.

Notons qu'André Kaufman réserve le terme de p -graphe (ou multigraphe) aux graphes non-orientés. Claude Berge utilise quant à lui la seule notion de multigraphe $G = (S, E)$ (E étant la famille (e_1, e_2, \dots, e_m) des m arêtes du graphe G) et associe le terme "d'ordre" au nombre de sommets du graphe.

3. Graphe valué

Le graphe valué est un développement de la théorie des graphes. Tous les résultats classiques de la théorie des graphes sont construits à partir de graphes, c'est-à-dire à partir de graphes non valués.

Dans ce travail, nous utilisons essentiellement la notion de graphe valué parce qu'elle permet de caractériser chaque liaison du réseau par sa vitesse, sa longueur son coût, etc. Cependant, nous devons vérifier, à chaque fois que nous exploitons une propriété des graphes, si elle s'applique également à un graphe valué.

²⁹⁷ André KAUFMAN, 1968. - *Des Points et des flèches*. - Paris : Dunod. - p. 120.

²⁹⁸ Claude BERGE, 1983. - *Graphes*. - Paris : Gauthier-Villars (3^{ème} éd.). - p 16.

On passe ainsi du concept purement booléen de graphe (dont les matrices associées sont remplies de 1 et de 0), à une conception valuée, qui tout en restant discrète, est plus proche de la réalité de l'espace des transports.

Dans la suite du travail, à l'inverse de la plupart des auteurs de la théorie des graphes²⁹⁹, quand nous écrivons graphe, nous évoquons un graphe valué. Dans le cas contraire, nous précisons en écrivant "graphe non valué".

B. Du réseau de transport au graphe de transport

1. Du binôme fonctionnel au graphe

Nous avons construit un objet "réseau de transport" à partir de considérations générales sur les réseaux³⁰⁰. L'intérêt d'une telle formalisation est de servir de point de départ pour construire un graphe qui modélise le réseau.

Nous établissons un graphe valué qui modélise les réseaux de transport. Chaque binôme fonctionnel est directement modélisable sous la forme d'un graphe partiel. Les arcs représentent les infrastructures linéaires, et les noeuds représentent les infrastructures ponctuelles. Le graphe est donc composé de graphes partiels qui caractérisent chacun un binôme fonctionnel muni d'une vitesse moyenne spécifique. La valuation des arcs indique la longueur de la liaison en kilomètres.

Le graphe du réseau de transport est un p -graphe. Il comporte plusieurs épaisseurs qui correspondent aux différents réseaux partiels infrastructurels. Cela signifie qu'entre deux sommets du graphe, il peut exister p arcs appartenant chacun à un graphe partiel.

2. Graphe du réseau de transport

On décompose le réseau de transport en réseaux partiels correspondant chacun à un véhicule et son infrastructure. Nous avons appelé binôme fonctionnel cette association entre le véhicule et son infrastructure propre. La voiture en site banal, la voiture en site autoroutier, le TGV en voie à grande vitesse etc., constituent des binômes fonctionnels.

Soient G_1, G_2, \dots, G_t des p -graphes correspondant chacun à un mode unique. On définit le graphe du réseau de transport $G = (S, U)$ comme la réunion de ces t p -graphes :

$$S = \bigcup_{i=1 \dots t} S_i$$

²⁹⁹ Par exemple : Claude BERGE, 1983. - *op. cit.*

³⁰⁰ Cf. "Infrastructures, véhicules et objets/individus", page I-56, et paragraphes suivants.

$$U = \bigcup_{i=1 \dots t} U_i$$

$$G = (S , U)$$

$$G = \left(\bigcup_{i=1 \dots t} S_i , \bigcup_{i=1 \dots t} U_i \right)$$

Le graphe constitué de p -graphes ne formera qu'au maximum un $(p-t)$ - graphe. Les graphes l -modal G_i seront le plus souvent des l -graphes à condition de ne considérer que des multigraphes.

On peut remarquer que plusieurs binômes fonctionnels coexistent sur le même support, sur la même infrastructure. Il en va ainsi par exemple pour la voiture et le véhicule collectif sur la route ou l'autoroute, pour le TGV et le train en site classique.

Dans de tels cas, on obtient des graphes identiques, possédant la même "structure" c'est-à-dire un même ensemble S et une même famille U , mais ils correspondent à des binômes fonctionnels différents.

Remarquons que le terme de "mode" (au sens classique) ne peut être employé ici pour caractériser à lui seul un réseau, car la distinction doit également être faite selon les infrastructures sur lesquelles ces modes circulent (voiture sur la route, voiture sur une autoroute par exemple), ce qui correspond à des graphes de "structure" différente.

Il est à noter enfin que dans certains cas, binôme fonctionnel et infrastructure se superposent exactement. Ainsi, les "transports en site propre" sont caractérisés par un véhicule spécifique circulant sur une voie réservée à lui seul. Un réseau de transports en site propre comportera donc autant de "binômes fonctionnels" que "d'infrastructures".

C. *Propriétés*

Nous étudions des graphes de réseaux de transport, c'est-à-dire de la modélisation d'un réseau de transport sous la forme d'un graphe. Les arcs correspondent aux liaisons du réseau et les sommets sont les lieux géographiques desservis.

Chaque graphe est la transcription d'un réseau de transport qui se définit par un ensemble d'infrastructures et un type de véhicule associé. Chaque binôme fonctionnel correspond à un type donné de véhicule circulant sur un type donné d'infrastructure (par exemple la voiture en site autoroutier).

Prenons par exemple un réseau de transport composé des modes suivants : voiture en site banal, voiture en site autoroutier, bus en site banal, train en site classique et TGV en site classique. Ce réseau comprend 5 binômes fonctionnels, mais seulement 3 infrastructures distinctes.

Philippe Mathis nous indique que « l'analyse structurale du graphe permet une analyse globale de la structure du réseau en le caractérisant par des propriétés simples »³⁰¹.

Nous avons défini nos graphes ; nous allons maintenant recenser leurs principales caractéristiques.

1. Connexité

Un graphe est connexe si et seulement si toute paire de sommets distincts est reliée par une chaîne. Un graphe est fortement connexe si et seulement s'il existe au moins un chemin entre tout couple de sommets distincts du graphe. Cette deuxième définition est utile pour caractériser les graphes orientés, alors que la première est plus souple, notamment dans le cas des graphes non orientés.

La connexité traduit simplement le fait que les points sont reliés par le réseau³⁰².

La propriété de forte connexité est nécessaire pour pouvoir relier tous les points de l'espace considéré, ce qui constitue, on le verra, une condition d'existence pour les graphes de réseaux de transport.

On peut remarquer la similitude de la définition de la connexité dans les graphes avec la définition de la continuité associée au couple continu/discontinu³⁰³. En fait, la continuité de l'espace et la connexité dans les graphes sont des propriétés équivalentes³⁰⁴. Dans les deux cas, le chemin est inclus dans l'espace considéré.

Pour les transports terrestres, la connexité ne peut exister que sur le "continent" ou sur une "île". Au volant d'une voiture et en restant sur les routes, on ne peut actuellement quitter la Grande-Bretagne. Par contre, sur une zone géographique d'un seul tenant, on a bien la connexité en ce qui concerne la route. La connexité n'est pas vérifiée pour les autoroutes à cause de l'existence de tronçons isolés. Pour le TGV français et le train classique la propriété de connexité existe sur l'ensemble des sommets desservis.

³⁰¹ Philippe MATHIS, 1990. - *Accessibilités multimodales des communes de Poitou-Charentes*. - Tours : D.R.E. Poitou-Charentes Ministère de l'Équipement.

³⁰² Gabriel DUPUY, 1987. - *op. cit.* - p. 181.

³⁰³ Cf. page I-91 au paragraphe "Continuité".

³⁰⁴ Michel PREVOT, 1975. - *op. cit.* - p. 293.

Dans le cas de graphes orientés, on a besoin de la forte connexité en plus de la connexité, car il est indispensable de pouvoir non seulement atteindre n'importe quel point du réseau, mais encore d'être en mesure de revenir à son point de départ, quel qu'il soit.

Tous nos graphes correspondent à des modes de transport, ce qui implique qu'entre deux points on doit toujours pouvoir effectuer le trajet aller et le trajet retour. Les graphes qui les décrivent doivent donc nécessairement posséder la propriété de forte connexité.

Au delà de la connexité simple ou forte, il peut être utile de caractériser un réseau qui permet des liaisons directes entre les noeuds, mais aussi des liaisons alternatives. L'existence de liaisons alternatives correspond à la notion de connectivité³⁰⁵.

2. Réseau routier : l'universalité

Le réseau routier est composé de sous-réseaux aux propriétés très différentes. Il possède cependant, pris dans sa globalité, une propriété très intéressante qui provient de son caractère fortement maillé.

De tous les réseaux modernes, c'est celui qui donne la meilleure accessibilité à tous les points du territoire, celui qui est le plus en adéquation, en symbiose avec l'espace géographique. Il y a une correspondance quasi systématique, en Europe tout du moins, entre existence de terres émergées et desserte par le réseau routier. Ceci signifie que dessiner les routes revient à dessiner le fond de carte. Cet argument a été formulé au travers du concept « d'universalité »³⁰⁶. Pour certains réseaux, l'ensemble des lieux connectés représente une telle proportion par rapport à un ensemble de référence qu'on peut définir un effet d'universalité. En France, le réseau routier³⁰⁷ qui permet « une accessibilité à la totalité du territoire »³⁰⁸, de même que le réseau téléphonique, est devenu "universel".

A partir d'un certain niveau de description, on peut considérer que de tout point de l'espace il est possible d'accéder au réseau, et *vice versa*, que le réseau permet l'accès à tous les points de l'espace. Cette propriété du réseau se traduit par la connexité du graphe.

Sur la majeure partie du réseau routier, on observe même la propriété de connectivité.

³⁰⁵ Gabriel DUPUY, 1987. - *op. cit.* - p. 181.

³⁰⁶ Gabriel DUPUY, 1994. - *op. cit.* - p. 146.

³⁰⁷ C'est le 19^{ème} siècle qui, en France, a vu l'achèvement d'un réseau routier permettant la desserte du moindre hameau (Georges REVERDY, 1995. - *Histoire des routes de France.* - Paris : PUF (Que sais-je ?). - p. 67).

³⁰⁸ Pierre MERLIN, 1994. - *op. cit.* - p. 11.

3. Isotropie et homogénéité de réseau

Dans les réseaux, l'isotropie et l'homogénéité sont des propriétés spatio-temporelles³⁰⁹. Elles ne recouvrent pas exactement les mêmes caractéristiques que l'isotropie et l'homogénéité des espaces mathématiques³¹⁰. Dans les réseaux, ces propriétés rendent compte de la vitesse de parcours sur les liaisons.

Si toutes les liaisons du réseau sont parcourues à la même vitesse, celui-ci est homogène. Dans le cas contraire, il existe des liaisons plus rapides que d'autres ce qui entraîne la perte de l'homogénéité du réseau. En conséquence, certaines liaisons, certaines "directions", sont privilégiées parce que plus aisées à parcourir : le réseau n'est alors plus isotrope.

Si le réseau est isotrope, il est homogène, et s'il est homogène, il est aussi isotrope : les deux notions sont équivalentes.

4. La réalisation des graphes

Le graphe est une structure mathématique au même titre que les espaces que nous avons étudiés au-dessus³¹¹. Les propriétés mathématiques de cet objet en font un outil formel pertinent pour la description des réseaux de transport.

Structure mathématique, le graphe est aussi une représentation graphique. Comme l'expose Roland Lantner, « tout graphe peut être considéré soit en tant que schéma, soit en tant que représentation d'une relation binaire ou d'une application multivoque »³¹². C'est autant pour leurs propriétés mathématiques que pour leurs représentations graphiques que les graphes sont utilisés en Aménagement de l'espace.

La représentation d'un graphe sur une surface s'appelle la réalisation du graphe. L'étude des réalisations des graphes et de leurs propriétés est d'un grand intérêt pour la compréhension des réseaux. De la même manière qu'il existe, comme nous l'avons vu, une infinité d'images d'un modèle unique, il existe une infinité de réalisations d'un même graphe.

5. Planarité

Considérons la réalisation d'un graphe sur une surface. Si les arcs ne se coupent qu'en leurs extrémités, le graphe est dit planaire.

³⁰⁹ Gabriel DUPUY, 1987. - *op. cit.* - p. 182.

³¹⁰ Cf. page I-93 ("Homogénéité") et page I-94 ("Isotropie").

³¹¹ Au début de ce chapitre..

³¹² Roland LANTNER, 1974. - *Théorie de la dominance économique.* - Paris : Dunod (Cournot). - p. 35.

La planarité s'avère indispensable pour pouvoir représenter les graphes sans intersections intempestives des arcs entre eux sur un plan et ce, dans le but d'établir une carte des réseaux de transport claire et lisible.

Nous recherchons la propriété de planarité pour le graphe routier. Pour ce faire, nous procédons en éliminant une grande partie des liaisons, de manière à ce qu'elles n'intersectent pas en dehors des sommets. Tout en cherchant à se conformer le plus possible à la réalité du réseau routier, nous choisissons le graphe planaire possédant le plus grand nombre d'arcs. Nous appelons graphe planaire saturé le *I*-graphe planaire qui, pour un nombre fixé de noeuds, possède le plus grand nombre possible d'arcs. Le graphe routier que nous construisons va donc se rapprocher d'un graphe planaire saturé.

D. Une distance sur les graphes

1. L'écart

On dispose, dans la théorie des graphes, d'une application particulière qui associe une valeur au plus court chemin :

Si a et b sont deux sommets d'un graphe G , l'écart $e(a, b)$ est donné par la longueur du plus court chemin entre a et b .

Avec l'écart, on construit une application qui, à un couple d'éléments de l'ensemble S , associe une valeur dans R . Il faut remarquer que dans cette définition il n'y a aucune précision sur les propriétés mathématiques de l'application. On ne précise pas si l'écart est métrique.

Dans un graphe valué, la longueur d'un chemin correspond à la somme des valeurs associées aux arcs qui le composent.

Dans le cas général, le graphe est non valué. L'écart renvoie donc le nombre d'arcs du plus court chemin. On peut établir un parallèle entre cette définition et celle de la contiguïté donnée précédemment³¹³.

2. De l'écart à la distance de graphe

Toujours dans le cas général d'un graphe non valué, Claude Flament nous indique la construction d'une métrique à partir de l'écart³¹⁴. La seule condition sur le graphe est que sur une liaison d'un sommet à un autre, la valeur associée soit identique dans chaque sens. Le graphe doit être symétrique. D'autre part, s'il n'existe aucun chemin de a vers b , on pose conventionnellement $e(a, b) = \infty$. L'écart d'un point à un autre

³¹³ Cf. page I-102, "La contiguïté".

³¹⁴ Claude FLAMENT, 1968. - *op. cit.* - p 39.

est considéré nul. L'écart, défini sur un graphe non valué symétrique, avec les conventions pour les chemins infinis et nuls, est une distance.

Sur un graphe valué, pour que l'écart soit une distance au sens mathématique, on doit vérifier une à une les propriétés métriques³¹⁵, pour tout couple de sommets :

1. pour satisfaire la propriété de positivité, les valeurs des arcs doivent être toutes positives ou nulles de manière à ce que l'écart soit toujours positif ou nul ;
2. la symétrie de l'écart demande que le graphe soit symétrique. Un multigraphe valué remplit par définition cette condition ;
3. pour avoir la séparation, il faut vérifier les deux sens de la propriété. Si la valeur de tout arc reliant deux sommets distincts est nulle, alors l'écart entre deux sommets distincts quelconques sera nul (si $e(a, b) = 0 \Rightarrow a = b$). Quand cette condition est vérifiée, si l'écart est nul, alors il est mesuré entre deux sommets identiques ;
4. la réciproque de la propriété de séparation (si l'écart est mesuré entre deux sommets identiques, alors il est nul ; si $a = b \Rightarrow e(a, b) = 0$), est vérifiée automatiquement du fait de la définition de l'écart : en effet, l'écart implique une idée de minimum, car il correspond à la longueur du plus court chemin. Ainsi l'écart d'un point à lui-même sera toujours égal à zéro ;
5. l'inégalité triangulaire est vérifiée dans tous les cas pour la même raison que la vérification de la réciproque de la séparation : le fait que l'écart corresponde au plus court chemin implique qu'il soit minimal. On a vu³¹⁶ que la propriété de l'inégalité triangulaire est associée à l'idée d'un minimum dans la mesure de la distance. Or, l'écart correspond au plus court chemin (chemin minimal) entre deux sommets ; donc l'inégalité triangulaire ne peut jamais être remise en cause ;
6. enfin, pour que l'écart soit métrique, il faut qu'il puisse être défini pour tout couple de sommets. Il y a deux manières de traduire cette contrainte. On peut poser la condition qu'entre deux sommets quelconques, il existe au moins un chemin. Cette condition se traduit par la nécessité de la propriété de forte connexité sur le graphe. Une autre façon consiste, comme dans le cas du graphe non valué, à poser égal à l'infini l'écart entre deux sommets si le chemin n'existe pas.

La deuxième condition se traduit directement par la symétrie du graphe. La première est que la valeur des arcs soit positive ou nulle ; la troisième condition veut que la valeur obtenue soit strictement positive. Pour construire une métrique on doit réunir

³¹⁵ Cf. page I-98 pour les "Propriétés métriques".

³¹⁶ Au paragraphe "Inégalité triangulaire", page I-98.

toutes les conditions simultanément : la plus restrictive va donc l'emporter. D'autre part, la sixième condition doit, elle aussi, être vérifiée : nous posons égal à l'infini l'écart entre deux points qui ne sont reliés par aucun chemin.

Finalement, pour que l'écart sur un graphe soit métrique, il faut que celui-ci vérifie deux conditions :

- le graphe doit être symétrique ;
- pour un graphe valué, les valeurs associées aux arcs doivent être strictement positives.

Nous appellerons **distance de graphe** la structure ainsi construite.

Remarquons que le critère de calcul des chemins minimaux peut intégrer la durée de transport, le coût, la longueur des trajets, mais aussi les différents modes de transport, ou encore la nature de ce qui est transporté. Cette variété entraîne le fait que « les itinéraires entre points qui, tour à tour, minimisent ces fonctions peuvent varier dans le temps et l'espace, tout comme peut varier la méthode de transport »³¹⁷.

Dans le cas où le graphe considéré n'est pas symétrique, on ne peut construire qu'une métrique non-symétrique³¹⁸.

E. Graphe et système de transport : terminologie

Au sein de la théorie des graphes, on emploie les termes de "*sommet*" et "*arc*" pour désigner les éléments constitutifs des graphes. Le concept de graphe et celui de réseau de transport sont deux outils méthodologiques que nous utilisons pour appréhender le même objet.

Dans un souci de lisibilité du propos, quand il sera question du réseau de transport, on utilisera les mots "*noeud*" et "*liaison*" pour désigner les équivalents du *sommet* et de l'*arc* de la théorie des graphes.

³¹⁷ « Indeed, the routeways between pairs of points which in turn minimise these functions may vary considerably in time and space as may vary the method of transport. » - C. C. KISSLING, 1969. - *op. cit.* - p. 114.

³¹⁸ Pour les propriétés des métriques non-symétriques voir page I-110 ("Métrique non-symétrique").

Réseau de transport	Noeud	Liaison
Graphe	Sommet	Arc

tableau 3 : la terminologie des graphes et des réseaux

Pour Karl J. Kansky, les graphes sont aux structures et aux réseaux de transport ce que les cartes sont à la Géographie : un outil de représentation, de description et d'analyse³¹⁹.

F. Graphes et systémique

« La combinaison de l'approche systémique et de la théorie des graphes permet de décrire convenablement les réseaux »³²⁰. Gabriel Dupuy.

Historiquement, pour Ludwig von Bertalanffy³²¹, la théorie des graphes est liée à la théorie des systèmes via la théorie des compartiments³²². Dans la théorie des compartiments, le système est formé de sous-unités entre lesquelles ont lieu des processus de transport. Ces systèmes à compartiments peuvent avoir une structure "caténaire" ou "mamillaire" (une chaîne de cases ou bien une case centrale en communication avec un certain nombre de relations périphériques). Ces systèmes sont extrêmement complexes : les difficultés mathématiques de résolution deviennent considérables à partir de trois sous-unités. C'est la théorie des graphes qui a rendu possible l'analyse des systèmes de la théorie des compartiments.

Les liens entre la systémique et la théorie des graphes sont extrêmement étroits. La puissance graphique de la deuxième a permis d'importantes avancées dans la première, comme le posent Georges Amar et Nikolas Stathopoulos, « parmi les représentations graphiques possibles des systèmes, celle qui, d'un avis général, présente le plus d'intérêt pour sa clarté, comparabilité et facilité d'apprentissage est due à la théorie des graphes »³²³.

Conclusion

Nous voulons construire une représentation basée sur un espace discret. Le graphe défini sur un ensemble de sommets est une structure discrète. La structure que nous voulons établir doit être hétérogène et anisotrope ; le graphe l'est également.

³¹⁹ Karl. J. KANSKY, 1989. - *op. cit.* - p. 94.

³²⁰ Gabriel DUPUY, 1994. - *op. cit.* - p. 149.

³²¹ Ludwig von BERTALANFFY, 1973. - *Théorie générale des systèmes.* - Paris : Dunod. - p. 20.

³²² La théorie des compartiments a constitué un sous-domaine important de la théorie des systèmes.

³²³ Georges AMAR, Nikolas STATHOPOULOS, 1987. - *op. cit.* - p. 21.

Nous voulons modéliser l'espace-temps modifié par les systèmes de transport. Cet espace est hétérogène et anisotrope. Nous avons évoqué la nature "compliquée" des effets des systèmes de transport, et la nature complexe de la contraction/dilatation de l'espace-temps. Dans ce contexte, nous ne voulons pas adopter la démarche qui consiste en l'identification d'une fonction analytique qui restituerait les distances entre les points de l'espace-temps via les réseaux de transport.

De très nombreux auteurs ont travaillé sur la construction de formulations analytiques non euclidiennes de la distance³²⁴. Après un exposé de formes analytiques de distances appauvries, Jacky Perreur³²⁵ présente la notion de graphe comme une solution séduisante pour modéliser les relations spatiales : « il est tentant d'associer aux lieux élémentaires de l'espace, ou à certains d'entre eux, les sommets d'un graphe, les arcs "représentant" les liaisons entre ces sommets, la valuation de ceux-ci se faisant librement sans contraintes d'axiomes »³²⁶. Cependant, pour Jacky Perreur, la structure de graphe souffre de l'impossibilité d'extraire une formulation analytique qui permettrait une généralisation, c'est-à-dire l'élaboration d'une loi générale de nature théorique. Nous voyons apparaître une divergence d'approche : les théoriciens de l'Economie Spatiale recherchent des lois générales – analytiques –, tandis que les aménageurs se tournent de préférence vers des formulations plus spécifiques, mais aussi plus opératoires.

Dans le cadre d'une recherche en Aménagement, nous jetons notre dévolu sur une modélisation par des graphes. Cependant, nous voulons établir une métrique sur ce graphe : nous nuancions donc l'approche préconisée par Jacky Perreur en développant des contraintes métriques sur une structure non analytique.

Conclusion du chapitre II

Nous avons défini et caractérisé les principales structures mathématiques utilisées en analyse spatiale. L'analyse de la hiérarchie des espaces mathématiques révèle la nature de la structure de la géométrie usuelle, à savoir l'espace vectoriel euclidien. Cette structure vérifie toutes les propriétés que nous avons abordées : l'espace euclidien possède les propriétés vectorielles, il est métrique, et il permet de construire une topologie. La hiérarchie des espaces nous montre également le statut de la topologie vis-à-vis des autres structures. La topologie apparaît comme la structure minimale et fondamentale, qu'il est essentiel de vérifier dans une modélisation de l'espace. Dans la topologie, les relations entre les éléments se réduisent à des notions qualitatives de continuité et de proximité. Ceci signifie que la proximité et la continuité sont, du

³²⁴ Des économistes : Bernard ROUGET, 1975. - *op. cit.*, Jacky PERREUR, 1989. - *op. cit.* Mais aussi des géographes : William BUNGE, 1962. - *op. cit.*, Jean-Claude MÜLLER, 1982. - *op. cit.*

³²⁵ Jacky PERREUR, 1989. - *op. cit.* - p. 128-129.

³²⁶ *Ibid.*

point de vue mathématique, les notions les plus fondamentales pour la description de l'espace : elles permettent de décrire de façon qualitative l'ordonnement des lieux.

L'étude des propriétés des espaces mathématiques est l'occasion d'approfondir la notion de continuité. Il s'avère que la continuité recouvre deux idées très voisines. L'absence de continuité peut signifier qu'il existe une discontinuité, mais peut aussi exprimer que l'espace est discret. La traduction de cette notion dans le domaine des interactions entre les réseaux de transport et l'espace mêle ces deux aspects. L'espace desservi par le TGV est discret, car il est composé de points. Si on ne considère que les points accessibles en TGV, l'espace est continu, car tous les points peuvent être atteints. Par contre, si on intègre l'espace interstitiel du réseau à la modélisation, il existe des zones non accessibles, ce qui signifie que l'espace est discontinu.

Les données de distances sur l'espace ne sont disponibles que sur un ensemble discret de points. Pour cette raison, la modélisation d'un espace continu procède nécessairement par interpolation. Une modélisation exacte devra absolument être construite sur le principe d'un espace discret.

La modélisation de l'espace de l'Aménagement doit également exprimer les notions d'hétérogénéité et d'anisotropie, générées par les réseaux de transport.

Une des voies possibles de la modélisation de l'espace consiste à établir une transformation mathématique de la surface chorotaxique. Les transformations qui conservent les distances sont des isométries ; celles qui préservent la topologie sont des homéomorphismes. Nous voulons construire une représentation où les distances entre les lieux sont cohérentes avec des mesures qui s'écartent très souvent de la ligne droite. En conséquence, nous voulons construire une métrique différente de la métrique euclidienne du plan. La transformation mathématique correspondante est nécessairement non isométrique. Par contre, nous ne voulons pas perturber la topologie de l'espace chorotaxique pour ne pas introduire d'incohérence dans les propriétés qualitatives de proximité et de continuité. Nous voulons donc construire un homéomorphisme.

Parmi les multiples formes possibles des distances, certaines s'expriment par une formule générale. On les appelle métriques à formulation analytique. Les distances classiques utilisées en analyse spatiale – métrique euclidienne, métrique rectilinéaire, métrique de Minkowski – sont toutes à formulation analytique.

Comme nous l'avons déterminé au chapitre précédent, nous travaillons sur des espaces fonctionnels, munis de la fonction de transport. Il semble essentiel d'intégrer la mesure du temps dans la formule de la distance. Le temps joue un rôle central dans l'établissement des distances entre les lieux. Le temps est essentiel pour pouvoir donner une interprétation de la structure mathématique qu'est la métrique.

Jean-Marie Huriot et Jacky Perreur ont introduit la notion de distance fonctionnelle pour désigner des distances qui expriment des efforts exercés. Les distances fonctionnelles rendent compte des distances chorotaxiques et des contraintes des réseaux de transport : elles correspondent aux espaces fonctionnels qui sont les espaces de notre recherche.

L'étude des formes appauvries des distances révèle l'importance de la propriété de l'inégalité triangulaire. Une métrique appauvrie privée de cette propriété ne permet pas d'induire une topologie. La propriété de l'inégalité triangulaire implique la notion de minimum dans le calcul de la distance. Pour la modélisation de l'espace, on peut imaginer une distance appauvrie – privée de la symétrie par exemple. Cependant, nous voulons conserver la topologie de l'espace chorotaxique. Dans ces conditions, l'inégalité triangulaire ne peut être abandonnée.

Dans un travail sur les structures mathématiques utilisées pour modéliser l'espace, la référence à la métrique euclidienne ne peut pas être évitée. Nous avons montré que les déplacements que nous effectuons avec les systèmes de transport sont tous de nature non euclidienne. Les plus courts chemins ne prennent que très rarement la forme d'une ligne droite. Le non respect de la ligne droite pour établir le chemin le plus court est souvent confondu avec la violation de l'inégalité triangulaire. Il est difficile d'interpréter correctement l'axiome de l'inégalité triangulaire à cause de la prégnance du modèle euclidien.

Pour interpréter en Aménagement une métrique non euclidienne, la question principale qui se pose est celle de la représentation. Cette question est ainsi formulée par Jean-Claude Müller : comment déterminer, sur une carte à l'échelle du temps, la position des points p , q et r , tandis que le plus court chemin d'un point à un autre n'est plus la ligne droite ?

Pour élaborer une réponse à cette question, nous introduisons, en nous inspirant de la distance graphique introduite par Jean-Claude Müller, la notion de distance visuelle. La distance visuelle entre deux points correspond à la longueur du chemin qui les relie. En utilisant la distance visuelle, il est possible de lire des données non euclidiennes reportées sur un plan. La distance visuelle, notion non euclidienne, est adaptée à l'analyse des représentations non euclidiennes de la distance.

La question des réseaux et des systèmes de transport sous-tend tout le travail, mais n'apparaît pas également dans toutes les sections de la première partie de la thèse. Dans la deuxième section du premier chapitre, les concepts de base sont définis, et ils aboutissent à une définition des réseaux par la notion de binôme fonctionnel, c'est-à-dire un couple formé d'un type d'infrastructures et d'un type de véhicules. La seconde section du même chapitre, qui traite des interactions entre les systèmes de transport et l'espace, apporte une caractérisation de la forme d'organisation en réseau et de ses effets. Dans le chapitre mathématique, ce n'est que dans la troisième section, où l'on définit la distance-réseau, qu'une première formalisation

mathématique des distances obtenues par le réseau est établie. Dans la section qui traite de la question de la ligne droite, on trouve des préoccupations liées à l'existence d'infrastructures, c'est-à-dire à la partie fixe du réseau, tel que nous l'avons défini. Mais c'est surtout dans la section consacrée aux graphes que nous obtenons une structure réellement adaptée à notre objet. La métrique de graphe est une structure métrique non analytique.

Nous terminons cette revue des structures mathématiques par les graphes. Les graphes constituent la structure mathématique la mieux adaptée pour la description des réseaux. La notion de graphe valué permet d'intégrer des mesures de longueur, de temps, de coût, etc. On peut traduire immédiatement en graphe le binôme fonctionnel que nous avons utilisé pour modéliser les réseaux de transport. La théorie des graphes fournit une définition de la connexité qui est proche de la notion de continuité des espaces mathématiques. D'autre part, structure mathématique, le graphe est aussi une représentation graphique. La représentation d'un graphe sur une surface s'appelle la réalisation du graphe.

Enfin, à partir de la notion d'écart, qui correspond à la longueur du chemin optimal, il est possible de construire une métrique sur le graphe. Pour cela, il suffit que les valuations du graphe soient strictement positives, et que le graphe soit symétrique.

Le graphe est une structure plus souple d'utilisation que le réseau de la distance-réseau. La modélisation par des graphes se prête très aisément à un traitement informatique. Etablir une hypothèse de développement d'un réseau de transport consiste à ajouter un arc sur le graphe, c'est-à-dire fournir la donnée d'un couple de sommets et d'une valuation.

CONCLUSION DE LA PARTIE I

Notre démarche, dans cette première partie a suivi une progression, de la définition des concepts, à leur formalisation mathématique.

L'espace est pour nous un espace fonctionnel. La fonction que nous voulons approcher est celle du transport.

Nous construisons une modélisation du réseau basée sur l'idée du binôme fonctionnel.

Les interactions entre les réseaux de transport et l'espace sont de deux grands ordres. Les effets spatio-temporels regroupent la contraction/dilatation, l'imbrication des échelles et la superposition des espaces, la non symétrie des déplacements, et l'aspect dynamique. La forme spatiale des réseaux est la cause principale de l'hétérogénéité, des discontinuités, de l'anisotropie, de la raréfaction des points d'accès et de l'effet tunnel, ainsi que de l'écart à la ligne droite

Notre objectif, dans le second chapitre de la première partie, est de proposer une structure mathématique qui convienne à notre objet. Nous aboutissons à des spécifications précises concernant la forme de la structure mathématique que nous construisons.

L'espace doit posséder la topologie du plan chorotaxique. Nous voulons établir une modélisation sur la base d'un espace discret, de manière à pouvoir exprimer l'absence de continuité de l'espace de l'Aménagement. La modélisation doit également montrer l'hétérogénéité et l'anisotropie de l'espace. Elle s'inscrit parmi les structures non euclidiennes.

Nous voulons établir une transformation de l'espace chorotaxique qui soit délibérément non isométrique, mais qui respecte la topologie de départ. La transformation doit donc être un **homéomorphisme non isométrique**.

La modélisation de la distance peut être non analytique, donc abandonner la voie de la généralisation, si elle permet de bien décrire la réalité des déplacements.

La structure de graphe munie d'une distance vérifie les spécifications que nous avons édictées au cours du second chapitre.

Nous avons introduit la notion de distance visuelle, qui est la longueur du chemin entre deux points, pour analyser les représentations non euclidiennes de l'espace. La seconde partie de la thèse leur est consacrée.

PARTIE II

REPRÉSENTATIONS

INTRODUCTION

Notre objet est la construction d'une représentation de l'espace qui montre les effets des systèmes de transport. Les espaces qui nous intéressent sont les espaces fonctionnels munis de la fonction de transport. Le temps est un facteur essentiel pour la compréhension de l'espace ; il est même l'enjeu des principales distorsions que nous avons identifiées à la fin du premier chapitre de la première partie. Comme nous l'avons exprimé, une compréhension correcte des interactions entre l'espace et les systèmes de transport appelle une représentation de l'espace-temps.

La question des représentations, qui est l'objet de la deuxième partie, va s'appuyer à plusieurs titres sur les développements de l'objet "réseau de transport" établis dans la première partie. D'abord, nous voulons représenter les distorsions de l'espace par les réseaux de transport rapide : toutes les représentations que nous abordons maintenant sont évaluées à l'aune de leur mode de restitution et de description de ces distorsions. Une représentation satisfaisante de l'espace montrera l'étendue spatiale, exprimera l'existence de réseaux de transport, et illustrera les effets de ceux-ci sur celui-là.

Les représentations de l'espace doivent aussi obéir aux spécifications mathématiques que nous avons formulées dans le chapitre précédent.

Dans cette seconde partie, nous présentons un ensemble de représentations connues, puis nous introduisons les cartes en relief, qui constituent l'apport essentiel de la thèse.

CHAPITRE I

LES REPRÉSENTATIONS DE L'ESPACE

Introduction

Même si, comme on l'a évoqué au paragraphe intitulé "Espace géographique"³²⁷, l'espace de la Géographie n'est pas nécessairement fondé sur la métrique, « du point de vue du cartographe, la représentation graphique d'une surface géographique se déduit des règles adoptées pour mesurer la "distance" »³²⁸. Lors du passage d'un espace abstrait – l'espace des relations de la Géographie – à une carte, on introduit la dimension métrique. Il y a là une évidente contradiction. Dans le prolongement des travaux de Waldo R. Tobler³²⁹, cette question continue aujourd'hui de susciter de nouvelles représentations ; nous en faisons état dans ce chapitre. La remise en cause des préceptes métriques pour la création des cartes a motivé l'invention de nouvelles représentations dont les anamorphoses constituent le meilleur exemple.

Pour Pierre Lévy³³⁰, une carte n'est pas une image réaliste, mais un modèle analogique d'un territoire, souvent combiné avec des signes qui renvoient à la graphique en tant que corpus³³¹. Elle en rassemble certains traits pertinents pour des fins particulières, de l'établissement d'un trajet en voiture pour les cartes routières, à l'étude du sous-sol pour les cartes géologiques.

L'objet fondamental de ce travail est de proposer des représentations de l'espace qui dépassent le cadre de la carte chorotaxique. Censée représenter les distances entre les lieux, « la carte géographique traditionnelle ne risque-t-elle pas », s'interroge Jacky Perreur, « de faire apparaître de fausses proximités et d'en dissimuler des réelles ? »³³².

³²⁷ Cf. la page I-46.

³²⁸ Jean-Claude MÜLLER, 1979. - *op. cit.* - p. 215.

³²⁹ Waldo R. TOBLER, 1963. - *op. cit.*

³³⁰ Pierre LÉVY, 1991. - *op. cit.* - p. 82.

³³¹ Telle qu'elle est définie chez : Jacques BERTIN, 1977. - *La Graphique et le traitement graphique de l'information*. - Paris : Flammarion (Nouvelle bibliothèque scientifique). - 277 p.

³³² Jacky PERREUR, 1989. - *op. cit.* - p. 130.

Section 1 Les quatre démarches de la modélisation de l'espace

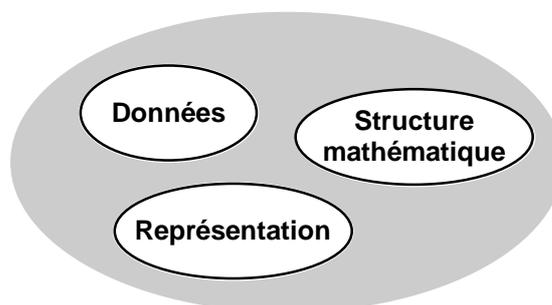


figure 17 : les trois composantes de la modélisation de l'espace

D'une manière générale, en analyse spatiale, on peut distinguer plusieurs démarches très différentes lors de la construction d'une représentation de l'espace.

Ces démarches se basent sur des données, elles permettent de créer un objet mathématique qui restitue ces données et enfin, elles ouvrent la voie, plus ou moins aisément, à une représentation.

Les données qui sont utilisées pour construire la représentation spatiale peuvent être de quatre types :

1. les données de localisations associent des coordonnées à un objet. Quand ces coordonnées sont en trois dimensions, des systèmes de projection permettent de les transformer en coordonnées à deux dimensions qui sont directement représentables sur un plan.
2. L'éloignement existant entre les objets spatiaux est donné par l'association d'une mesure à chaque couple d'éléments. Cette mesure peut prendre des formes très diverses ; nous l'avons souligné au-dessus³³³.
3. La donnée des chemins utilisés pour joindre les éléments peut être fournie de deux manières. Dans une logique de réseau, au sens de Jean-Marie Huriot et Jacky Perreur³³⁴, il faut fournir le dessin des courbes simples qui le composent. Dans une logique de graphe, il est nécessaire de disposer d'une description du graphe, qui permet de connaître les chemins minimaux. Cette description prendra une forme graphique – la réalisation du graphe –, ou bien une forme numérique – la liste des noeuds et des arcs ou encore une matrice.

³³³ Cf. page I-99, "Les formes de la distance".

³³⁴ Cf. page I-102, "La distance réseau".

4. L'accessibilité peut prendre la forme d'une donnée associée aux points de l'espace. Elle est fonction de la localisation, de l'éloignement des éléments entre eux, et parfois des attributs des lieux considérés³³⁵ ; cet éloignement peut dépendre de la forme des chemins minimaux.

La modélisation spatiale consiste à représenter sur une carte, c'est-à-dire sur une surface plane euclidienne, des données structurées bien souvent autour d'une structure mathématique qui est non euclidienne³³⁶.

A. *La surface parfaite*

On peut postuler l'existence d'une surface (ou d'un volume) qui représente l'espace avec suffisamment de finesse pour le but recherché. Cette surface possède de préférence tout un ensemble de propriétés qui garantissent sa régularité : homogénéité, continuité, isotropie, etc. Il est alors aisé de définir une fonction distance qui possède toutes les propriétés métriques.

La surface offre une représentation explicite de l'espace. Le postulat de départ règle donc la question de la représentation.

On retrouve dans ce schéma le concept de la plaine uniforme des économistes et des théoriciens de l'analyse spatiale.

B. *La cartographie thématique*

La cartographie thématique utilise un fond chorotaxique sur lequel sont disposés des symboles graphiques qui expriment une ou plusieurs variables. C'est la voie classique de la représentation de l'espace. La structure mathématique mise en œuvre a été formalisée au travers de l'axiomatique de l'espace pré-géographique de Hubert Beguin et Jacques-François Thisse³³⁷ : l'espace est un ensemble de lieux munis de coordonnées qui sont mis en relation par des distances ; aux lieux sont associés des surfaces et des vecteurs de caractéristiques.

La représentation est évidemment celle de la carte chorotaxique, munie d'attributs graphiques. Les données sont extraites de la matrice des mesures associées aux

³³⁵ Une fonction d'accessibilité généralisée intègre une composante gravitaire, et donc dépend des populations des lieux de l'espace. (Cf. : *Impact de la réalisation du TGV Aquitaine : détermination des accessibilités routières régionales et locales par simulation multimodale des réseaux de transport*. - 1994. - sous la dir. de Philippe Mathis. - rapport final Direction Régionale de l'Équipement Poitou-Charentes. - Tours : Laboratoire du CESA. - 50 f. dactyl.)

³³⁶ Jean-Marie HURIOT, Jacky PERREUR, Isabelle DEROGNAT, 1994. - *op. cit.* - p. 39.

³³⁷ Hubert BEGUIN, Jacques-François THISSE, 1979. - « An Axiomatic approach to geographical space ». - *Geographical Analysis*, USA, vol. 11 n° 4. - p. 325-341.

relations entre les points considérés ; elles peuvent faire l'objet d'un traitement statistique.

C. *Les configurations (anamorphoses)*

Les configurations sont des transformations des coordonnées chorotaxiques de l'espace. Nous donnons une définition mathématique de la configuration :

soit un ensemble E . Quand on attribue aux éléments de E des coordonnées dans un espace à n dimensions, on construit une **configuration**. Il s'agit d'une forme d'application³³⁸.

Selon cette définition, un espace dont les lieux sont munis de coordonnées chorotaxiques – la carte classique – appartient à la famille des configurations. Un pan important de la recherche en analyse spatiale porte sur les configurations dont les coordonnées diffèrent des coordonnées chorotaxiques. Ces configurations particulières donnent naissance à de nouvelles cartes appelées **anamorphoses**³³⁹ pour les distinguer des cartes classiques. Cette dénomination se justifie dans la mesure où les formes spatiales – les frontières par exemple – présentes sur la carte classique se retrouvent déformées sur l'anamorphose.

La troisième famille de démarches – les configurations – recouvre un ensemble de techniques assez différentes. Dans un article³⁴⁰ et au cours d'une intervention³⁴¹, Colette Cauvin expose une typologie de ce qu'elle appelle les "transformations cartographiques de position" que nous désignons sous le terme de configurations.

³³⁸ Les anglo-saxons utilisent le mot *mapping* pour désigner une application (Cf. annexe mathématique : "Application", page 209).

³³⁹ Colette CAUVIN, Henri REYMOND, 1994. - *Pour une approche multiple de l'accessibilité*. - Communication au séminaire DATAR « Prospective des transports et des territoires à l'horizon 2015 », séance n° 5, « Accessibilité et desserte du territoire, les transports de personnes », 19 janvier 1994, Paris. - p. 4.

³⁴⁰ Colette CAUVIN, 1996 a. - « Cartographie théorique et anamorphoses ». - Bulletin du Comité Français de Cartographie, France, n° 146-147. - p. 82-88.

³⁴¹ Colette CAUVIN, 1996 b. - « Sortir les anamorphoses de la cartographie de recherche. » - Communication orale à la journée « Les 60 ans de l'Association des Cartographes Géographes », Paris (Institut de Géographie), 19 octobre 1996. (actes à paraître).

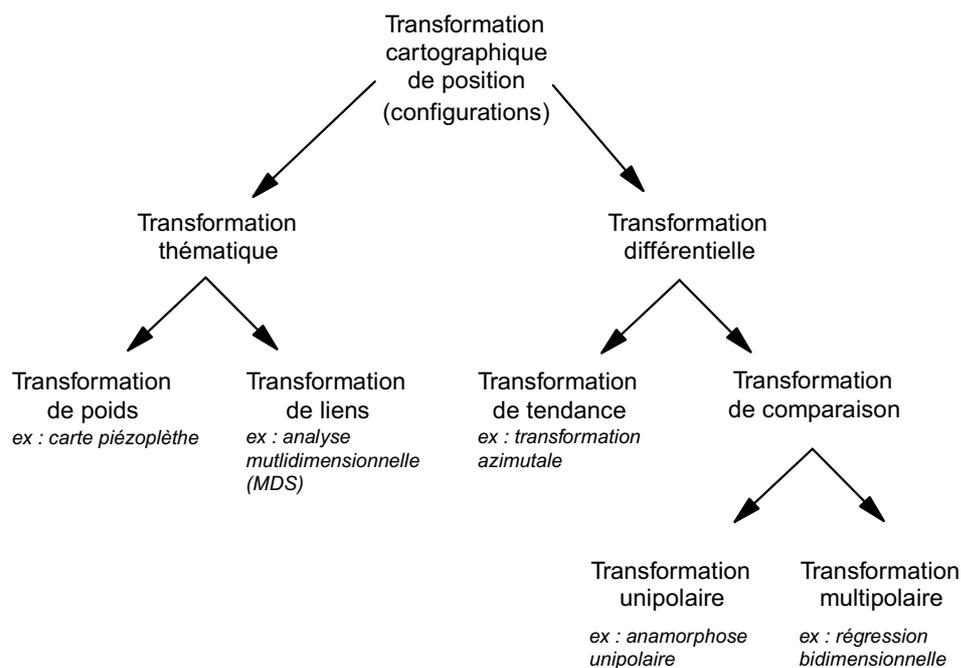


figure 18 : les grands types de transformations cartographiques de position³⁴²

On distingue, sur la figure 18, deux grands types de configurations : des transformations basées sur des données thématiques, et des transformations basées sur la comparaison de deux espaces et où ce sont « les contours apparents de la forme spatiale qui subissent des modifications »³⁴³.

Remarquons que la surface qui porte la configuration peut être de nature relativement complexe : ainsi les “champs de vitesse”³⁴⁴ de Shlomo Angel et Geoffrey M. Hyman sont des surfaces courbes à deux dimensions inscrites dans un espace euclidien à trois dimensions³⁴⁵.

1. Les transformations thématiques

Les transformations thématiques sont de deux ordres ; les cartes piézoplèthes sont construites par la déformation d’une surface maillée en fonction du poids associé à chaque maille. Les cartes piézoplèthes sont proches des cartogrammes qui sont des cartes thématiques où les surfaces des entités géographiques sont modifiées en fonction de la donnée représentée.

L’analyse multidimensionnelle utilise des données associées à des liaisons (un tableau de données). Nous approchons plus loin cette technique au travers d’une

³⁴² Figure établie à partir de : Colette CAUVIN, 1996 b. - *op. cit.*

³⁴³ Colette CAUVIN, 1996 a. - *op. cit.* - p. 82.

³⁴⁴ “Velocity fields”.

³⁴⁵ Shlomo ANGEL, Geoffrey M. HYMAN, 1972. - *op. cit.*

application³⁴⁶ ; la méthode sera développée à ce moment. Posons pour l'instant que le principe de ces méthodes « est de trouver les coordonnées des lieux, connaissant les distances qui séparent chaque paire de lieux »³⁴⁷.

2. La transformation de tendance

Les transformations différentielles comprennent les transformations de tendance qui sont construites à partir de la recherche des paramètres d'une fonction qui permet de calculer les coordonnées des points à partir d'un point d'origine. Ce sont des représentations unipolaires. Le principe est basé sur la comparaison des distances euclidiennes et des distances contenues dans les données pour déformer les entités spatiales selon une fonction d'ajustement. Comme son nom l'indique, la transformation de tendance exprime la tendance de la déformation de l'espace autour d'un point.

3. Les transformations de comparaison

Les transformations différentielles comprennent aussi les transformations de comparaison. Dans cette approche, on cherche « à souligner les écarts, non les tendances »³⁴⁸ entre deux espaces homologues. La méthode se décompose en deux étapes : d'abord on cherche les nouvelles coordonnées des lieux par la transformation – on cherche la nouvelle configuration –, puis on déforme par interpolation la zone toute entière pour exprimer les distorsions. Cette dernière catégorie se subdivise entre les transformations multipolaires de type régression bidimensionnelle, et les anamorphoses unipolaires.

La régression bidimensionnelle consiste à rechercher une transformation de l'espace géographique (chorotaxique), ou de certains points du plan³⁴⁹, en une configuration particulière³⁵⁰ qui possède des propriétés connues³⁵¹. La régression bidimensionnelle est un problème de régression : on cherche les paramètres d'une fonction dont la forme générale est définie au départ. Ainsi, Eihan Shimizu propose des formes polynomiales diverses pour transformer l'espace³⁵². Dans cette démarche, on construit à la fois la structure mathématique et la représentation.

Dans ce cas, on construit une formulation de la fonction qui retourne les nouvelles coordonnées des points d'origine. Le traitement consiste à trouver la fonction distance qui restitue le mieux les données. "Trouver la fonction distance" signifie qu'on recherche une formulation analytique.

³⁴⁶ Cf. "Analyse multidimensionnelle", page II-163.

³⁴⁷ Colette CAUVIN, 1996 a. - *op. cit.* - p. 84.

³⁴⁸ *Ibid.*

³⁴⁹ Ces points sont obtenus par un processus de discrétisation.

³⁵⁰ Le plus souvent on recherche une configuration sur un plan euclidien.

³⁵¹ Bernard MARCHAND, 1973. - *op. cit.* - p. 517.

³⁵² Eihan SHIMIZU, 1992. - *op. cit.* p. 8.

Il faut remarquer que la fonction est obtenue à partir de données discrètes. Elle n'est donc valable que sur cet ensemble discret. On peut, dans certains cas extrapoler le résultat obtenu, à l'espace continu qui sert de substrat à l'espace de départ. Par exemple, on peut décider que la métrique rectilinéaire des villes américaines, validée à partir des voies de communication (les rues perpendiculaires) donne une mesure valable pour tous les points interstitiels. Dans ce cas, la modélisation spatiale, de discrète est devenue continue.

Nous venons de voir que l'espace construit par la fonction distance peut être continu ou discret. Cependant, la fonction elle-même peut être non continue.

D. *La distance-réseau et la distance de graphe*

Pour construire le réseau, il faut disposer du tracé des courbes sur le plan.

Dans le cas le plus général d'un réseau irrégulier, la métrique n'aura pas de formulation analytique. Le réseau, composé d'un ensemble de courbes simples sur un plan, offre une représentation immédiate. William Bunge qualifie de « systématiques »³⁵³ les représentations de la distance construites à partir d'une formulation analytique. Suivant cette définition, nous dirons du réseau qu'il constitue une représentation **non-systématique** de la distance-réseau.

La donnée des chemins, c'est-à-dire la succession des arcs empruntés peut être employée pour la construction d'un graphe. On obtient alors, selon une démarche analogue à la construction de la distance-réseau, un graphe et une métrique de graphe.

Si le graphe est valué, on doit disposer des valuations de chaque arc. Il est aussi possible de construire une métrique de graphe directement à partir du tableau de données.

Dans le cas d'un réseau ou d'un graphe irrégulier, la métrique n'aura pas de formulation analytique.

Les données conditionnent la nature métrique ou non-métrique de la structure mathématique. Ainsi, si les données présentent des dissymétries, on ne peut construire qu'une métrique non-symétrique. Ou encore, s'il existe des mesures nulles pour deux éléments distincts, la distance sera une métrique pauvre, ou une métrique dégénérée. Représenter le graphe demande une opération spécifique appelée réalisation. Dans le cas général d'un graphe non régulier, la réalisation constitue une représentation non-systématique de la métrique de graphe.

³⁵³ William BUNGE, 1962. - *op. cit.* - p. 54.

E. *La représentation des espaces fonctionnels*

Examinons les démarches de modélisation à l'aune de l'opposition continu/discret. La surface parfaite construit un espace continu. Les configurations sont construites à partir de données discrètes, la structure mathématique elle aussi est discrète, mais la représentation est continue, comme nous le verrons par la suite³⁵⁴. La distance-réseau est une structure composée de continus à une dimension. Par contre la distance de graphe est intrinsèquement discrète.

Comme le pose William Bunge, « sur une carte, toutes les connections de paires de points possibles sont montrées en même temps »³⁵⁵.

En reprenant³⁵⁶ la typologie des espaces établie par Colette Cauvin qui distingue l'espace chorotaxique, l'espace fonctionnel et l'espace cognitif, on associe le concept de carte aux deux premiers termes seulement. Les cartes sont des « instruments d'étude associés aux espaces chorotaxiques et aux espaces fonctionnels »³⁵⁷. Ainsi, « toute carte préserve un isomorphisme entre ce qui existe et ce qui est décrit par l'intermédiaire du système de projection, de l'échelle. »³⁵⁸.

Pour Colette Cauvin³⁵⁹, on ne peut plus parler de carte quand on rend compte de la représentation cognitive des individus. On construit alors des figures³⁶⁰ qui ne sont pas forcément homéomorphes de l'espace chorotaxique et qui sont différentes pour des individus différents.

La question essentielle que pose la représentation des espaces fonctionnels est de trouver une forme qui soit cohérente avec les mesures disponibles entre couples d'éléments. L'ensemble des données, qui peut être constitué, par exemple, par les longueurs en kilomètres entre couples d'éléments, recèle une géométrie³⁶¹ qu'il faut mettre à jour. Cette géométrie correspond à la structure mathématique que nous avons définie au-dessus.

³⁵⁴ Voir à partir de la page II-163, "Les anamorphoses".

³⁵⁵ « In one map, all possible pairs of points connections are shown at once. » - William BUNGE, 1962. - *op. cit.* - p. 51.

³⁵⁶ Confère à la partie intitulée "Typologie de Colette Cauvin" à partir de la page I-49.

³⁵⁷ Colette CAUVIN, 1984 b. - *op. cit.* - p. 85.

³⁵⁸ *Ibid.* - p. 85.

³⁵⁹ *Ibid.* - p. 17.

³⁶⁰ Que Colette Cauvin désigne sous le terme de "configuration". Dans ce travail nous utilisons le mot "configuration" dans une acception plus mathématique (voir au paragraphe intitulé "Les configurations (anamorphoses)" en page II-146).

³⁶¹ Jean-Claude MÜLLER, 1982. - *op. cit.* - p. 193.

La cartographie des espaces fonctionnels se heurte à la difficulté de garantir l'inégalité triangulaire ; d'autre part, l'accès ponctuel à de nombreux moyens de transport rend difficile l'appréhension d'un espace continu³⁶².

Mettre en cartes les espaces plastiques s'apparente à la résolution du problème classique des cartographes³⁶³ : comment représenter une portion du globe sur une feuille plate ? Les cartographes ont élaboré des systèmes de projection qui effectuent cette transformation. Pour la cartographie des espaces fonctionnels, il faut construire des procédés qui modifient les formes, les localisations et les distances.

F. *La carte : un problème de dimensions*

Le plan permet de réaliser la carte exacte des distances euclidiennes entre trois points³⁶⁴. Pour être plus précis, il faut *au moins* un plan – il faut *au moins* deux dimensions – pour représenter de manière exacte un ensemble de trois points.

En généralisant, « $(n - 1)$ dimensions sont nécessaires pour représenter les distances entre n points »³⁶⁵.

Comme l'a formulé Pip Forer, « la production d'une transformation qui restitue une carte³⁶⁶ de vraies distances, où toutes les distances sont montrées correctement (de tout point à tout autre) a rapidement été considérée comme étant un problème mathématiquement intraitable »³⁶⁷. Un espace réel qui comporterait plus de trois points ne peut pas être représenté de manière exacte sur une carte à deux dimensions.

Sur une carte, le nombre de dimensions possible est limité par un critère visuel. En théorie, il est tout à fait possible de construire un espace euclidien à plus de trois dimensions. Un ensemble de n localisations peut être représenté de manière exacte dans un tel espace, à condition de le munir de $(n - 1)$ dimensions. Il est possible de réduire le nombre de dimensions à $(n - 2)$ en établissant $(n - 1)$ représentations exactes. On s'aperçoit de la gageure que constitue la construction de pas moins de $((n - 1) ! / 2 (n - 3))$ représentations à deux dimensions, c'est-à-dire autant de cartes, pour obtenir une représentation exacte et cohérente des n localisations.

³⁶² Pip FORER, 1978. - *op. cit.* - p. 243.

³⁶³ *Ibid.* - p. 243.

³⁶⁴ Jean-Claude MÜLLER, 1979. - *op. cit.* - p. 225.

³⁶⁵ *Ibid.*

³⁶⁶ C'est-à-dire une surface à deux dimensions.

³⁶⁷ « The more general one of producing a transformation to yield true equidistant maps, where all distances are correctly shown (all point to all point), was rapidly seen to be mathematically intractable. » - Pip FORER, 1978. - *op. cit.* - p. 242.

Une solution à ce problème consiste à introduire explicitement une erreur. La configuration la plus satisfaisante est celle dont l'erreur associée est la plus faible. Dans ces conditions, il est possible de positionner un nombre de points supérieur à trois sur une carte à deux dimensions.

Sur une carte à deux dimensions³⁶⁸, il est impossible de représenter un espace muni d'une fonction de distance qui soit non euclidienne, sans introduire d'erreur³⁶⁹. Une carte dépourvue d'erreur est possible, à condition que les distances sur la carte correspondent aux distances disponibles dans les données³⁷⁰.

Dans ce cas, et dans ce cas seulement, la géométrie de la carte et la géométrie de l'espace coïncident³⁷¹. C'est ce type de représentation que nous voulons construire.

Conclusion : une première sélection

Nous avons classifié les démarches de modélisation de l'espace en distinguant trois pôles : la structure mathématique, les données et la représentation. Nous distinguons cinq approches : la surface parfaite, la carte thématique, les configurations et l'espace-réseau. Les configurations se subdivisent en deux grandes familles de méthodes : les transformations thématiques et les transformations différentielles. Certaines méthodes de construction des configurations utilisent des formulations analytiques de la distance.

Nous sommes en mesure d'établir une première sélection. L'espace de l'Aménagement n'est ni homogène, ni isotrope. On ne peut donc proposer le modèle de la plaine parfaite – par définition isotrope et homogène – pour décrire l'espace de l'Aménagement de manière satisfaisante.

³⁶⁸ C'est-à-dire une "feuille plane".

³⁶⁹ Jean-Claude MÜLLER, 1982. - *op. cit.* - p. 193.

³⁷⁰ *Ibid.*

³⁷¹ *Ibid.*

Section 2 Représentations chorotaxiques

Introduction

Les représentations cartographiques de l'espace occupent une position clé parmi les outils nécessaires à la prise de décision dans le domaine de l'Aménagement de l'espace et des transports. Le cas le plus simple est celui des cartes des temps d'accès d'un point vers tous les autres, où l'information est ponctuelle³⁷². Ces mesures ponctuelles, reportées sur le réseau, fournissent une information de nature linéique. Ces cartes peuvent alors être généralisées avec des isochrones qui proposent une information zonale. Un indicateur plus complexe, comme l'accessibilité généralisée, qui rend compte non seulement des temps d'accès, mais aussi de l'attraction gravitaire émise par les villes, peut constituer un apport capital dans l'aide à la décision. D'autre part, la recherche en analyse spatiale a produit des représentations qui cherchent à dépasser la carte conventionnelle et ses limites. Colette Cauvin³⁷³ nous propose des anamorphoses, c'est-à-dire des configurations spatiales où les points représentés sont positionnés suivant des critères non topographiques, qui restituent des modèles cognitifs spatiaux.

Nous présentons plusieurs représentations ; nous précisons à chaque fois les données qu'elles expriment, la structure mathématique qui les sous-tend, et les informations qu'elles apportent.

A. Cartes unipolaires des temps d'accès

Sur une carte unipolaire des temps d'accès, on cherche à représenter les temps de parcours d'un point vers tous les autres. On compare la durée de transport réelle avec la durée de transport théorique à vol d'oiseaux pour une échelle donnée d'espace-temps. On peut tracer sur la carte le vecteur de déplacement de la ville par rapport à sa localisation chorotaxique.

Une illustration de ce type de carte nous est donnée par Colette Cauvin et Henri Reymond³⁷⁴ avec une représentation des meilleurs temps d'accès entre Paris et 35 villes françaises équipées d'un aéroport. Sur cette carte apparaît la convergence de la majorité des villes vers Paris. Seules les villes proches s'éloignent. Ce phénomène est dû aux difficultés terminales³⁷⁵ incompressibles qui sont inhérentes au transport

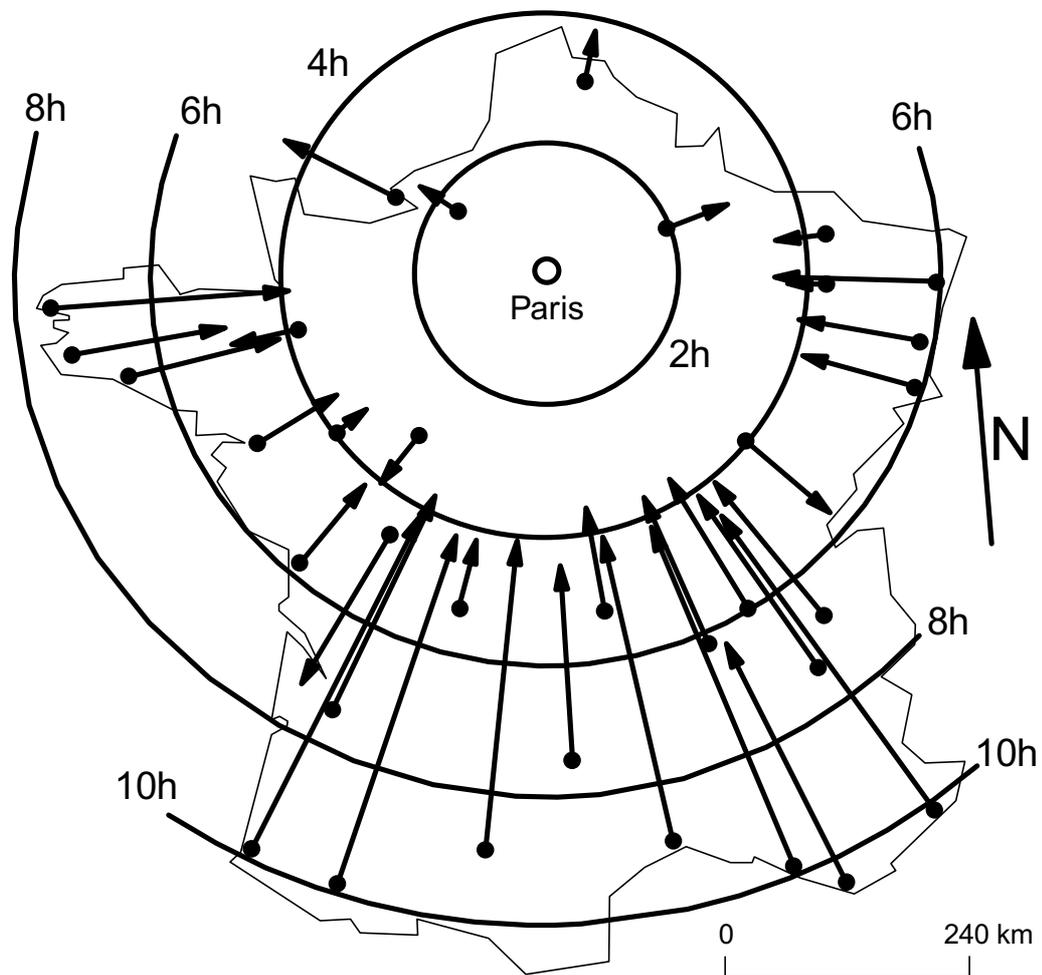
³⁷² Un des avatars de ce type de représentation est "l'arbre à boules", utilisé à la SNCF, qui montre, sur les noeuds du réseau ferré, les temps d'accès avant et après réalisation de l'infrastructure.

³⁷³ Colette CAUVIN, 1984 b. - *op. cit.*

³⁷⁴ Colette CAUVIN, Henri REYMOND, 1986. - *Nouvelles méthodes en cartographie*. - Paris : GIP RECLUS (Modes d'emploi). - p. 30.

³⁷⁵ Les difficultés terminales ont été évoquées au paragraphe "Contraction/dilatation", page I-67.

aérien. Plus les trajets sont longs et moins les difficultés terminales sont importantes par rapport à la durée totale du trajet.



- Localisation géographique
- ➔ Vecteur de déplacement
- ▼ Localisation selon les temps moyens d'accès
- Ligne d'égal temps moyen d'accès

Source : Mémoire N. STAELING Strasbourg 1977
Auteurs : C. CAUVIN - H. REYMOND - A. SERRADJ - S. VETTER-GUYON

carte 3 : représentation unipolaire des temps moyens d'accès

Apparaît ainsi une contraction sélective qui est d'autant plus intense que le point relié est lointain. On construit alors une image cartographique de la convergence d'espace-temps mise à jour par Donald G. Janelle³⁷⁶.

³⁷⁶ Cf. en annexe "La convergence de l'espace temps", page 209.

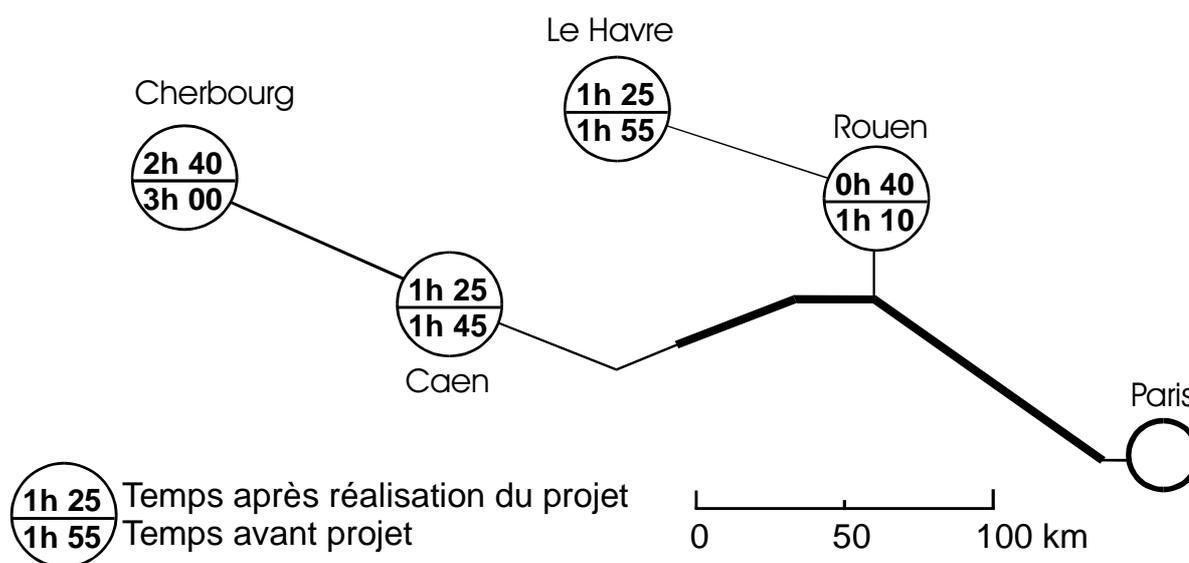
Il faut remarquer que l'échelle est exacte si, et seulement si, l'on mesure les distances à partir du point central³⁷⁷. La représentation est directionnelle dans la mesure où le centre peut être point de départ, ou point d'arrivée. Toute mesure de distance effectuée le long d'un segment limité, sans que l'une des limites ne coïncide avec le point central, est sans signification.

La carte unipolaire des temps d'accès appartient à la famille des cartes thématiques ; la variable localisée qui est montrée sous la forme d'une flèche est le vecteur de déplacement d'une ville dans l'espace-temps.

Ce type de carte ne montre qu'une seule ligne ou une seule colonne du tableau de données de départ³⁷⁸.

B. "L'arbre à boules"

Dans l'étude des projets de lignes à grande vitesse, on rencontre fréquemment des représentations du réseau munies d'indications sur les gains de temps procurés d'un point vers tous les autres.



carte 2 : les gains de temps du TGV Normandie, arbre à boules³⁷⁹

La carte 2 montre les gains de temps du projet de TGV Normandie, inscrit au schéma directeur national. Sur chaque nœud du réseau TGV figurent le temps d'accès à Paris avant et après la réalisation de la nouvelle infrastructure.

³⁷⁷ Jean-Claude MÜLLER, 1979. - *op. cit.* - p. 225.

³⁷⁸ Ce tableau de données est celui qui est évoqué au paragraphe intitulé "Les quatre démarches de la modélisation de l'espace" en page II-144.

³⁷⁹ Représentation extraite de : *T.G.V. et Aménagement du territoire*. - Paris : Syros/alternatives (T.E.N.), actes du colloque du Creusot du 11 et 12 oct. 90 « T.G.V. et Aménagement du territoire ». - p. 49.

Ces représentations peuvent être vues comme des réalisations du graphe du réseau de transport (en l'occurrence le réseau ferroviaire). La représentation du graphe se base sur les localisations chorotaxiques des villes desservies, et le tracé des liaisons reprend le tracé géographique simplifié de l'infrastructure. On peut aussi considérer que "l'arbre à boules" est une carte thématique qui figure les temps de parcours d'un point vers un ensemble fini de destinations, munie d'une représentation du réseau.

Il faut remarquer que les longueurs des liaisons ne sont pas en cohérence avec les durées de transport correspondantes. La ligne à grande vitesse, dessinée en trait plus épais sur la figure, ne se distingue pas de la ligne classique vis-à-vis de sa longueur en espace-temps. Cette représentation est en fait un schéma spatial – l'échelle est en kilomètres – muni d'indications sur les durées de transport d'un point vers tous les autres.

C. *Les cartes en isolignes*

Les lignes qui, sur une carte, relient les points de même valeur sont appelées isolignes. Le principe des cartes d'isochrones est de reporter sur une carte unipolaire des temps d'accès, des lignes de même durée à partir du point central. Le principe de lecture repose sur l'écart aux cercles parfaits qui seraient produits sur une plaine uniforme et isotrope. La construction est donc établie en référence directe au modèle abstrait de la plaine isotrope. C'est une référence à la fois au formalisme mathématique, au modèle économique et à la représentation euclidienne usuelle. Ainsi pour François Plassard et Jean-Louis Routhier, « la technique des isolignes semble particulièrement bien adaptée pour apprécier toutes les déformations dans un espace considéré *a priori* comme uniforme. »³⁸⁰

Les cartes d'isochrones sont des représentations unipolaires, au sens où elles expriment les temps de trajet d'un point unique vers tous les autres³⁸¹.

D. *Les temps d'accès sur le réseau*

A partir des valeurs des temps d'accès à chaque noeud, on peut, sans aller jusqu'à tracer les isolignes, reporter sur chaque portion d'arc le temps nécessaire pour l'atteindre.

On obtient une représentation plus spatialisée que la carte unipolaire des temps d'accès, mais qui ne va pas jusqu'à attribuer les temps d'accès qu'on peut observer dans les noeuds des réseaux de transport, à tout l'espace intermédiaire.

³⁸⁰ François PLASSARD, Jean-Louis ROUTHIER, 1987. - *op. cit.* - p. 13.

³⁸¹ On rencontre aussi parfois l'adjectif "azimutal". L'azimut est l'angle formé par deux plans perpendiculaires à une surface.

L'application que nous montrons ici (carte 3 : les temps d'accès à Paris sur le réseau multimodal français en 1995) a été réalisée à partir de trajets multimodaux empruntant les réseaux TGV, l'autoroute et la route. Nous avons représenté uniquement le réseau routier, car c'est le réseau le plus proche du continuum spatial³⁸². Cela signifie que le temps de parcours permis par la route est directement convertible en un temps de parcours vers l'espace environnant l'infrastructure, ce qui est totalement erroné pour les lignes TGV. Cependant, à la différence de la représentation en isolignes, c'est au lecteur de la carte d'inférer les temps d'accès à partir des temps d'accès sur le réseau. Le parti pris est de représenter des mesures exactes qui sont interpolées lors de la lecture, plutôt que de montrer des résultats interpolés mais entachés d'erreur.

Nous avons construit des classes avec des valeurs simples du temps, pour identifier les noeuds du réseau qui sont accessibles en moins de n heures à partir de Paris. On peut aussi connaître le point précis sur le réseau où s'effectue le changement.

On observe distinctement l'effet des trois lignes du TGV. La ligne Sud-Est fait largement ressentir ses effets avec des temps d'accès inférieurs à trois heures dans le couloir rhodanien et sur une partie des alpes. Le temps d'accès à Lyon est exactement de 2 heures en TGV : tous les lieux de l'espace environnant qui sont correctement reliés par les réseaux de transport régionaux tirent bénéfice de cette excellente accessibilité.

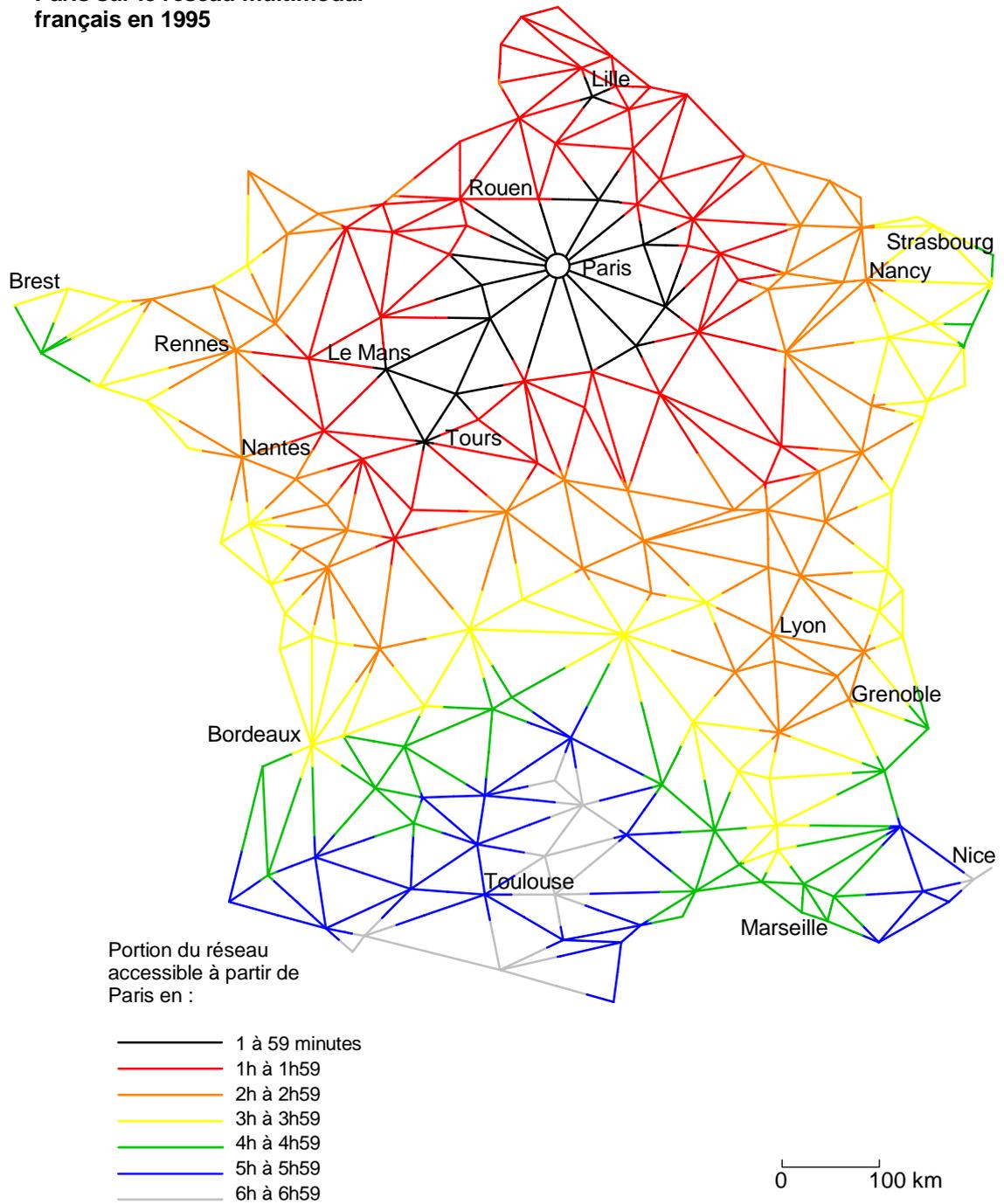
La ligne du TGV Nord a un impact très localisé sur Lille où apparaît un "îlot" d'accessibilité : nous constatons ici l'effet d'un moyen de transport qui ne permet que de rares accès le long de l'infrastructure. L'espace desservi en une heure à partir de Paris n'est pas continu, au sens où il existe deux zones disjointes. Autrement dit, l'ensemble des lieux accessibles en moins d'une heure à partir de Paris se décompose en deux morceaux de graphe non connexes.

Le même effet n'est pas présent sur la ligne Atlantique du fait de l'existence d'une gare à Vendôme qui permet de combler la discontinuité spatiale de la desserte.

³⁸² Cf. "Discontinuum", page I-64.

carte 3 : les temps d'accès à Paris sur le réseau multimodal français en 1995

Carte 5 : les temps d'accès à Paris sur le réseau multimodal français en 1995



E. *Des représentations unipolaires aux multipolaires*

Toutes les cartes que nous venons d'aborder jusqu'ici, sont des représentations unipolaires, au sens où elles montrent l'espace considéré à partir ou à destination d'un point unique. Les représentations que nous exposons maintenant, modélisent les distances de tous les points vers tous les autres. Nous les appelons **cartes multipolaires**. Il est important de remarquer que la distinction unipolaire/multipolaire oppose l'unicité à la pluralité des distances : quand l'espace modélisé est continu, la multiplicité désigne l'infinité des points du continuum ; quand l'espace est discret, les distances ne sont vraies que pour les points de l'ensemble discret.

Pour décrire complètement un espace continu, il faut une infinité de cartes unipolaires, une pour chaque point³⁸³. Par contre, une unique représentation multipolaire suffit à décrire totalement l'espace.

Il existe des cartes multipolaires des aires d'influence. Dans l'application qui est donnée dans la thèse de Philippe Mathis³⁸⁴, un modèle gravitaire d'attraction des pôles s'exprime sur un espace de la taille d'un département parcouru par des réseaux de transport hiérarchisés. L'attraction émise par un pôle est fonction de la distance à ce pôle. Les courbes d'égaux attractions autour des villes principales sont déformées par les axes importants. Le principe de représentation autorise la superposition des courbes d'égaux attractions de plusieurs pôles (avec une couleur différente pour chaque pôle) et ainsi, la détermination de zones d'indifférence, de frontières épaisses dans lesquelles les attractions exercées ne permettent pas un choix clair.

F. *Le graphique "en ressort"*

Des représentations des réseaux de transport ont été développées au Laboratoire d'Economie des Transports (LET) à Lyon. Elles ont été conçues en tant qu'outils d'aide à la décision et utilisées pour des besoins de diagnostic, à des fins d'évaluation et pour établir des propositions d'action³⁸⁵.

Parmi ces représentations, on trouve les graphiques "en ressort". Le principe de ces graphiques est de dessiner la liaison existant entre deux points de l'espace sous la forme d'un ressort dont la longueur est proportionnelle à la pénibilité de parcours. La pénibilité est un indicateur qui renseigne sur la qualité d'une liaison. Il peut intégrer par exemple la longueur en kilomètres, la durée de parcours, la congestion, le nombre de liaisons par jour pour les transports en commun, ainsi que d'autres mesures.

³⁸³ S'agissant des espaces discrets finis, il faut autant de cartes unipolaires qu'il y a de points.

³⁸⁴ Philippe MATHIS, 1973. - *op. cit.* - p. 295.

³⁸⁵ François PLASSARD, Jean-Louis ROUTHIER, 1987. - *op. cit.* - p. 5.

Le graphique en ressort peut être vu comme la réalisation d'un graphe. Le graphe est celui du réseau de transport considéré. Il est valué par des mesures effectuées sur le réseau ou par des indicateurs calculés. La réalisation du graphe obéit à deux contraintes :

- les sommets du graphe sont placés à la position chorotaxique des noeuds qu'ils modélisent.
- Les arcs du graphe sont dessinés sous la forme de ressorts dont la longueur visuelle³⁸⁶ est proportionnelle à la valeur associée.

Ce principe est extrêmement proche de celui des représentations en relief. La principale différence réside dans la façon de dessiner les arcs. Cette différence entraîne d'autres, comme l'impossibilité de représenter plusieurs modes de transport sur un même graphique.

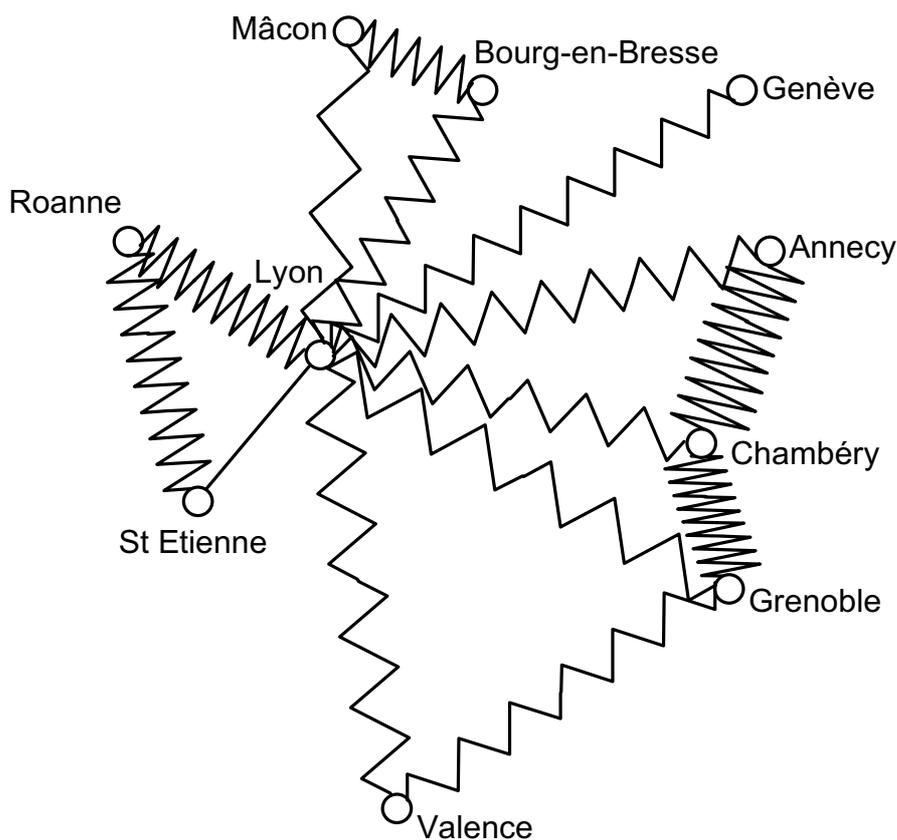
On peut aussi concevoir le principe des graphiques en ressort selon l'angle mathématique. Considérons que les données de départ permettent de construire une distance de graphe³⁸⁷. La représentation graphique est cohérente avec les données de départ ainsi qu'avec la structure mathématique.

Enfin, parce qu'il est basé sur la configuration chorotaxique des lieux, le graphique en ressort est une carte.

L'application que nous proposons (Carte 4 ci-dessous) montre la qualité de service du réseau ferroviaire de la région lyonnaise. La valeur des arcs du graphe indique la qualité de service qui est elle-même construite à partir de la qualité de desserte ligne par ligne.

³⁸⁶ Cf. paragraphe "Proposition : de la "distance graphique" à la "longueur visuelle" en page I-123.

³⁸⁷ Cette distance de graphe peut être une métrique appauvrie. Cf. la partie intitulée "Formes appauvries (fausses distances)", page I-109 et suivantes.



Carte 4 : graphique "en ressort" de la région lyonnaise³⁸⁸

Visuellement, sur les cartes en ressort, on ne perçoit pas directement la longueur exacte des arcs. On perçoit l'aspect plus ou moins "comprimé" du ressort qui nous donne une indication sur la longueur de celui-ci. La notion de longueur visuelle, qui est donnée, ainsi que nous l'avons définie, par la longueur totale du ressort ne résulte pas ici d'une perception visuelle directe. Dans le cas du graphique en ressort, on est plus proche de l'idée d'une transformation mentale effectuée par le lecteur de la carte, que d'une perception visuelle directe et proportionnelle.

Pour William Bunge, il y a deux manières de représenter les distances : on peut montrer les chemins parfois tortueux sur une carte classique (chorotaxique), ou bien représenter les distances sous une forme rectiligne mais sur une carte déformée³⁸⁹. Les représentations exposées jusqu'à maintenant procédaient toutes de la première démarche. Toutes les cartes que nous abordons à présent appartiennent à la deuxième méthode de représentation.

³⁸⁸ Graphique extrait de : François PLASSARD, Jean-Louis ROUTHIER, 1987. - *op. cit.* - p. 12.

³⁸⁹ « Essentially, we can map crooked "real" distances on a straight earth map, or we can produce straight "real" distance on a crooked earth map ». - William BUNGE, 1962. - *op. cit.* - p. 60.

Conclusion

Les représentations chorotaxiques de l'espace apportent des informations essentielles à la compréhension, à l'analyse et à la simulation des réseaux de transport.

Les cartes unipolaires des temps d'accès offrent une information d'un point vers tous les autres, et vice versa, de tous les lieux vers un lieu unique. Certaines cartes montrent un vecteur de déplacement des lieux en fonction soit de l'évolution des distances-temps, soit de la comparaison avec la distance euclidienne. Un autre type de cartes unipolaires, l'arbre à boules, montre le réseau et les durées minimales des trajets possibles. Utilisée comme outil d'aide à la décision des projets d'infrastructure à la SNCF, elle peut figurer les meilleurs temps de trajet avant et après la réalisation. D'autres renseignements, comme le nombre d'allers retours dans la journée, peuvent être représentés. L'information porte alors sur la qualité de la desserte, donc sur la qualité de l'offre de transport.

La carte des temps d'accès et l'arbre à boules montrent une information ponctuelle. Ils infèrent donc l'idée d'un espace discret, non continu.

A partir de cette information ponctuelle on peut interpoler les mesures pour les appliquer à l'espace interstitiel : on construit alors des isolignes. La représentation des isolignes fait l'hypothèse d'un espace continu, où tous les points sont accessibles. Nous avons vu combien l'espace décrit par les moyens de transport est discontinu. Ces représentations comportent en plus le défaut de montrer des valeurs interpolées et entachées d'erreur, du fait qu'on ne dispose pas d'information sur les réseaux de transport qui desservent les interstices.

Une autre forme de représentation des temps d'accès est basée sur la réalisation du graphe du réseau de transport dont les arcs routiers sont colorés en fonction de la durée du trajet. Cette représentation établit un compromis entre l'espace totalement discret des premières représentations et l'espace continu des isolignes. Les arcs sont des continuums à une dimension, dessinés sur le plan de la feuille ; ils expriment l'idée d'un espace qui est continu, mais qui comporte des zones moins accessibles. L'erreur présente sur les cartes en isolignes n'est pas représentée ; cela n'empêche pas le lecteur de la carte d'inférer des mesures – par interpolation visuelle – pour les espaces non directement desservis.

Le graphique en ressort est une représentation de la qualité de service offerte par le réseau de transport. Il peut être vu comme une réalisation d'un graphe selon un principe très proche des cartes en relief. Il représente de manière cohérente une métrique de graphe ; nous avons montré dans le chapitre sur les outils mathématiques l'intérêt d'une telle structure pour la modélisation des réseaux de transport dans l'espace.

Les cartes en ressort apparaissent donc très intéressantes, par la richesse de l'information qu'elles proposent, mais aussi par la cohérence de la structure mathématique qui les sous-tend.

Nous avons commencé par représenter un espace totalement discret qui figure les durées de transport d'un point vers un ensemble fini de lieux. Ensuite, nous avons construit des isolignes qui proposent une information zonale qui ne nous satisfait pas. Enfin, nous aboutissons à des réalisations du graphe du réseau de transport. Les images produites représentent les propriétés de l'espace-temps avec une meilleure exactitude que les isolignes et de façon plus riche que les simples indications aux noeuds.

Section 3 Les anamorphoses

Avant 1962³⁹⁰, William Bunge tenait pour acquis qu'il était impossible de représenter sur une carte les distorsions spatiales dues aux terminaux des systèmes de transport. Grâce à l'apport majeur que constitue l'analyse multidimensionnelle, Waldo R. Tobler a rendu caduque l'assertion précédente. Nous abordons ici le principe de cette méthode cartographique. Rappelons que l'analyse multidimensionnelle est une famille de méthodes qui appartient à un ensemble plus vaste : les configurations.

Waldo R. Tobler³⁹¹ considère que les "distorsions" de l'espace causées par les moyens de transport peuvent être vues comme des transformations des coordonnées des points. Par exemple, sur une carte unipolaire, on peut transformer les courbes isochrones en cercles concentriques sur lesquels on place les points situés à une durée de déplacement égale³⁹².

Nous allons développer maintenant le principe de construction de l'analyse multidimensionnelle qui illustre un des modes de construction des anamorphoses.

A. *Analyse multidimensionnelle*

1. L'espace de départ

L'ensemble de départ est constitué par les points importants de l'espace chorotaxique. Le plus souvent il s'agit des villes de l'armature urbaine de l'espace considéré. Mathématiquement cet ensemble est donc composé d'un nombre fini

³⁹⁰ William BUNGE, 1962. - *op. cit.* - p. 60.

³⁹¹ Waldo R. TOBLER, 1963. - *op. cit.* - p. 271.

³⁹² Cf. paragraphe "Les cartes en isolignes", page II-156.

d'éléments, et ces éléments sont distincts³⁹³. C'est un ensemble discret où chaque ville est représentée par un point séparé.

Sur cet ensemble, on dispose d'une collection de mesures de la durée de transport³⁹⁴ de point à point.

2. L'espace d'arrivée

Dans la théorie générale de l'analyse multidimensionnelle ("*Multidimensional scaling*", MDS), l'ensemble d'arrivée est un espace euclidien à n dimensions³⁹⁵. Le nombre de dimensions est nécessaire pour obtenir une restitution exacte des distances contenues dans les données³⁹⁶.

La configuration obtenue n'est pas toujours immédiatement représentable. Or, la représentation est indispensable pour pouvoir interpréter les résultats³⁹⁷. Pour ce faire, il faut construire une configuration en un nombre limité de dimensions : trois dimensions constituent le maximum pour une représentation, la surface (à deux dimensions) étant le plus souvent choisie.

La réduction du nombre de dimensions de l'espace de la configuration engendre l'introduction d'une erreur systématique³⁹⁸.

3. La dimension réelle de l'espace

Il est possible de créer une infinité de configurations qui sont toutes différentes, mais qui restent équivalentes vis-à-vis des données de base.

On peut reporter sur un "diagramme de Shepard" l'erreur (*stress*) en fonction du nombre de dimensions de la configuration. Les courbes obtenues comportent à un endroit un "coude" caractéristique qui indique une très forte baisse de l'erreur en passant d'une unité dans le nombre de dimensions. Le nombre de dimensions correspondant à la valeur basse du stress, indique la nature de la configuration spatiale. Cette valeur indique « la dimension réelle de l'espace »³⁹⁹.

³⁹³ Bernard MARCHAND, 1973. - *op. cit.* - p. 517.

³⁹⁴ La durée de transport peut être remplacée par le coût, le coût généralisé, la distance perçue, etc.

³⁹⁵ Bernard MARCHAND, 1973. - *op. cit.* - p. 518.

³⁹⁶ Cf. la partie intitulée "Les quatre démarches de la modélisation de l'espace" qui commence à la page II-144.

³⁹⁷ Roger N. SHEPARD, 1974. - *op. cit.* - p. 382.

³⁹⁸ Les anglo-saxons désignent cette erreur par le mot "*stress*".

³⁹⁹ « A rapid decrease in stress (an "elbow" of the curve) indicates that we have recovered the true dimension of the system. » - Bernard MARCHAND, 1973. - *op. cit.* - p. 517.

Diagramme de Shepard

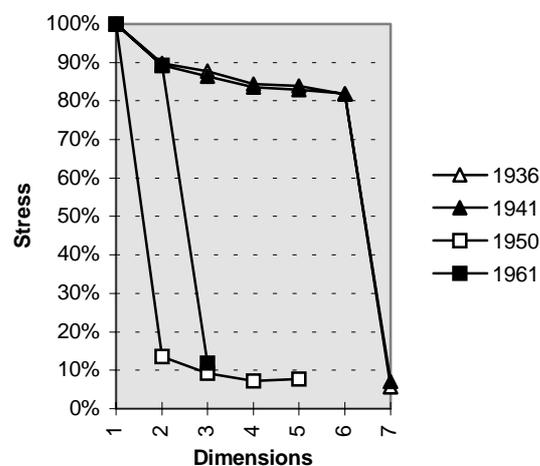


figure 19 la dimension du réseau, diagramme de Shepard

Le diagramme de Shepard ci-dessus provient de recherches menées par Bernard Marchand sur le réseau routier vénézuélien considéré de 1936 à 1961⁴⁰⁰. Les courbes expriment l'évolution structurelle du réseau au travers de l'amélioration et de la construction des liaisons du réseau, ou de la jonction de sous-réseaux auparavant déconnectés.

Le "coude" caractéristique apparaît pour les réseaux de 1936 et 1941 au passage à une configuration dans un espace à sept dimensions. Le réseau routier de 1950 possède une structure réelle de dimension 2, et le réseau de 1961 s'inscrit dans un espace à 3 dimensions. Cela signifie que seul le réseau de l'année 1950 peut être représenté par analyse multidimensionnelle sans trop de distorsion, c'est-à-dire qu'il est possible de construire une configuration sur un espace à deux dimensions, autrement dit un plan. Pour tous les autres réseaux, la configuration sur un plan serait entachée d'un *stress*, d'une erreur de plus de 80 % comme on peut le constater sur la figure 19.

⁴⁰⁰ Bernard MARCHAND, 1973. - *op. cit.*

4. L'algorithme d'analyse multidimensionnelle classique

On considère n points identifiables sur la surface de la terre, reliés par un ensemble de $n(n - 1)$ distances⁴⁰¹. Le problème posé est de trouver la configuration de tous ces points, c'est-à-dire la carte, qui minimise l'erreur :

$$(d_{ij}^* - d_{ij})^2 / d_{ij}^2 \text{ pour } i, j = 1, \dots, n$$

Dans cette formule, les d_{ij} sont les distances d'origine, et les d_{ij}^* sont les distances sur la carte. Minimiser l'erreur signifie rechercher les configurations telles que les distances calculées approchent au mieux les distances de départ⁴⁰². Ainsi posée, cette question constitue un problème d'analyse multidimensionnelle.

L'algorithme général utilisé dans l'analyse multidimensionnelle est le suivant⁴⁰³ :

1. on dessine la configuration géographique d'origine ;
2. on déplace les points de la configuration selon la résultante des déviations entre les distances géographiques euclidiennes et les distances provenant du tableau de données ;
3. on dessine la nouvelle configuration, et on calcule la résultante des déviations entre les distances entre points de cette configuration, et les distances du tableau de données ;
4. on déplace à nouveau les points selon cette nouvelle résultante ;
5. on répète les opérations 3 et 4 jusqu'à obtenir une solution satisfaisante.

Il faut noter que les multiples recherches menées depuis les années soixante ont été l'occasion de développer de nombreuses méthodes qui obéissent au principe général de l'analyse multidimensionnelle⁴⁰⁴.

⁴⁰¹ Ces distances sont les éléments du tableau de données. Dans certaines méthodes on utilise n^2 distances, c'est-à-dire la totalité de la matrice des distances, au risque de perdre la propriété de symétrie. (cf. Colette CAUVIN, 1984 a. - « Une méthode de comparaison de données localisées ». - L'Espace géographique, France, n° 2. - p. 96.)

⁴⁰² Colette CAUVIN, 1984 a. - *op. cit.* - p. 96.

⁴⁰³ Jean-Claude MÜLLER, 1979. - *op. cit.* - p. 226.

⁴⁰⁴ On trouve chez Eihan SHIMIZU, 1992 (*op. cit.*) une comparaison de plusieurs méthodes de construction des configurations sous l'angle de leurs propriétés topologiques.

B. Quelques types d'anamorphoses

1. Anamorphoses unipolaires

On a montré la représentation unipolaire des temps d'accès entre Paris et 35 villes françaises. Sur cette carte, les vecteurs de déplacement dans l'espace temps des villes montrent le sens et l'intensité de la déformation. Ces vecteurs peuvent servir à déplacer les points des villes et donner naissance à une configuration particulière. La configuration ainsi obtenue est une anamorphose de l'espace chorotaxique. Les distances qu'elle représente sont calculées d'un point unique vers tous les autres : il s'agit toujours d'une carte unipolaire.

Sur la figure 18, page II-147 ce type de représentation est une transformation différentielle de comparaison unipolaire (ce n'est pas une configuration construite par analyse multidimensionnelle).

2. L'espace-temps français

Dans un article récent⁴⁰⁵ Klaus Spiekermann et Michael Wegener nous proposent une anamorphose de l'espace-temps français. L'anamorphose a été construite selon une adaptation particulière d'analyse multidimensionnelle. La carte 5 et la carte 6, ci-dessous, montrent la transformation de l'espace due à la réalisation de la ligne de TGV entre Paris et Lyon.

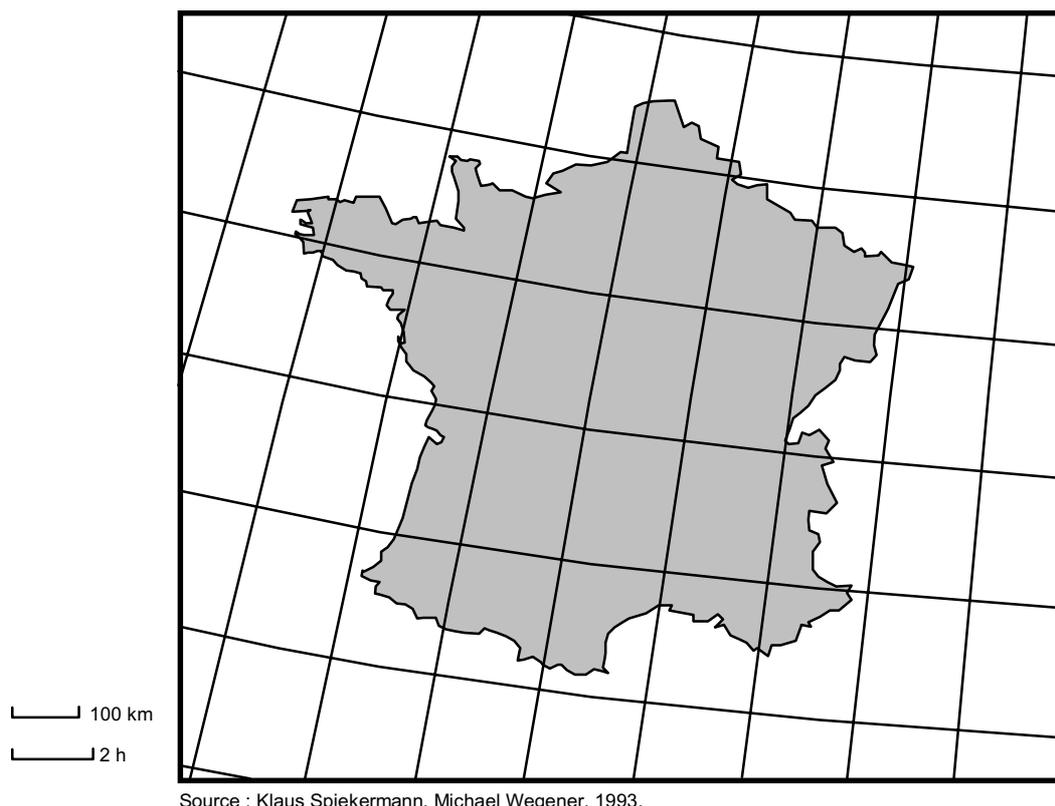
Le point de départ est la construction d'un graphe du réseau de transport valué en temps avec les mesures disponibles. La méthode employée consiste en un « *multidimensional scaling* par étapes, couplé avec une interpolation par triangulation »⁴⁰⁶. On fixe un sommet au centre du graphe, puis on calcule la localisation des sommets contigus d'ordre 1 au sommet central. Ensuite, étape par étape, on calcule la localisation des sommets contigus d'ordre 1 du ou des sommets déjà localisés. Cette démarche permet de créer des cartes où le *stress* est limité et d'où les distorsions topologiques sont absentes⁴⁰⁷.

La carte de base (carte 5) prend comme référence une vitesse moyenne de 60 km/h sur le réseau ferroviaire. Sur cette carte figurent le contour, ainsi que les méridiens et les parallèles. Elle est identique à la carte chorotaxique.

⁴⁰⁵ Klaus SPIEKERMANN, Michael WEGENER, 1993. - *op. cit.*

⁴⁰⁶ « stepwise multidimensional scaling and interpolation with triangulation ». - Klaus SPIEKERMANN, Michael WEGENER, 1993. - *op. cit.* - p. 22.

⁴⁰⁷ *Ibid.*



carte 5 : carte de base de l'espace-temps français

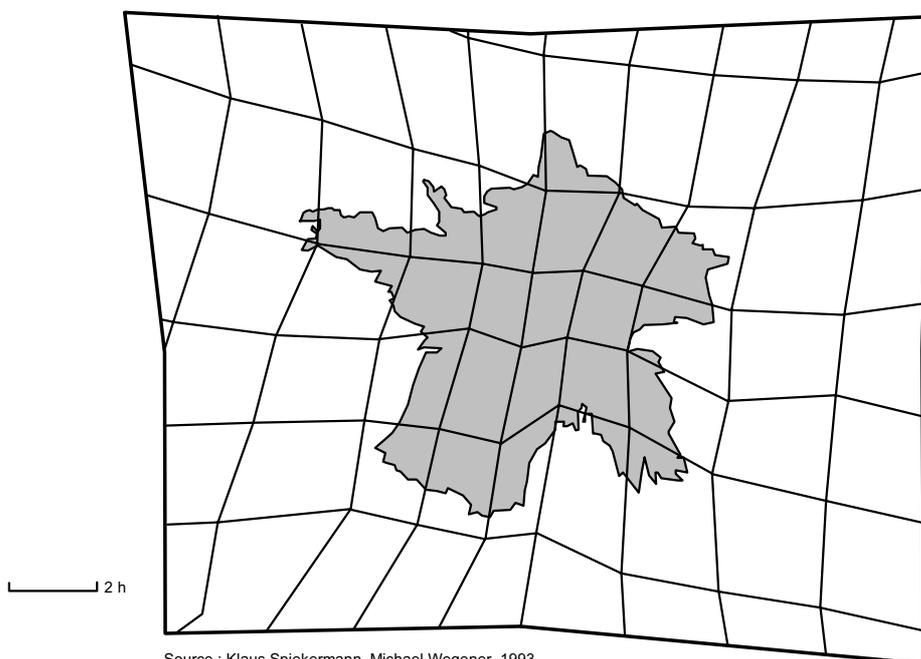
L'analyse multidimensionnelle produit une cartographie des effets des réseaux de transport sur l'espace. Pour étudier les transformations, dans une approche dynamique, il faut partir d'une représentation supposée non encore modifiée. Dans l'exemple que nous montrons, les auteurs ont choisi de partir d'une carte chorotaxique non déformée pour pouvoir montrer l'effet du seul TGV. La carte 5 montre un espace qui ressemble à la plaine uniforme des économistes, à la fois isotrope et homogène.

Il est important de signaler que l'espace d'avant la construction de la ligne à grande vitesse a déjà été modifié par les réseaux existants comme le réseau ferroviaire classique ou l'autoroute. En toute rigueur, il aurait fallu prendre comme référence cet espace déjà déformé. Dans une approche dynamique, il importe de montrer et d'identifier, au sein d'un processus global, les contributions de telle ou telle composante, en l'occurrence ici, la construction de la ligne à grande vitesse entre Paris et Lyon.

La carte suivante (carte 6) est l'anamorphose de l'espace-temps français, basée sur les temps de trajet entre 70 villes et Paris. On peut y voir la contraction de l'hexagone due à la construction de la ligne du TGV entre Paris et Lyon.

En comparant les deux cartes, on observe une contraction globale de l'espace. Il faut remarquer que la différence de taille entre les deux cartes n'est pas uniquement due

au TGV. En effet, la vitesse moyenne de circulation des trains classiques est supérieure à 60 km/h.



Source : Klaus Spiekermann, Michael Wegener, 1993.

carte 6 : anamorphose unipolaire de l'espace temps français, déplacements à destination de Paris en 1988/1989

La contraction imputable au TGV est visible dans la déformation du contour géographique et dans la déformation des parallèles et des méridiens. Les anamorphoses permettent de construire une contraction sélective de l'espace. Les grandes zones affectées par l'amélioration du système de transport apparaissent nettement : « la visualisation des effets des nouvelles liaisons à grande vitesse montre le rétrécissement du continent européen ou de pays comme la France »⁴⁰⁸. Dans cet exemple, le couloir rhodanien tout entier bénéficie des effets du TGV. Les cartes par anamorphose donnent l'image d'un espace élastique.

Cependant, comme le précisent Klaus Spiekermann et Michael Wegener, « les infrastructures à grande vitesse ne connectent que les villes importantes et pas l'espace intermédiaire »⁴⁰⁹. Ce dernier est toujours desservi, mais par des moyens de transport moins rapides.

On voit apparaître l'idée d'une séparation des réseaux de transport suivant une hiérarchie qui exprime les différences de vitesse de parcours.

⁴⁰⁸ « The visualisation of the effects of new high-speed links in time-space demonstrates the shrinking of the European continent or of countries like France. » - Klaus SPIEKERMANN, Michael WEGENER, 1993. - *op. cit.* - p. 22.

⁴⁰⁹ « However, high-speed infrastructure connects only important cities, but not the space in between. » - Klaus SPIEKERMANN, Michael WEGENER, 1994. - *op. cit.* - p. 22.

L'anamorphose est construite à partir des durées de transport provenant de sources publiées⁴¹⁰. Cette représentation s'inscrit donc tout à fait dans le concept d'espace plastique développé par Pip Forer⁴¹¹.

C. *Les contraintes des anamorphoses*

Après l'apparition de l'analyse multidimensionnelle dans les années 1960, les nombreux développements qui ont suivi ont permis d'explorer les anamorphoses et de mettre à jour les contraintes auxquelles elles sont soumises.

1. Questions de topologie

L'analyse multidimensionnelle ne crée pas une structure métrique là où il n'y en a pas à l'origine. Si la matrice des données n'est pas métrique, l'espace transformé n'a pas de raison de l'être⁴¹². Il s'agit cependant là d'une assertion mathématique. On peut très bien considérer que l'erreur (*stress*) générée au cours de la méthode permet de gommer les écarts à la structure métrique. Dans ce cas, l'analyse multidimensionnelle rend métrique un ensemble de données qui était "presque" métrique⁴¹³. Par exemple, les données peuvent comporter des liaisons légèrement dissymétriques – un aller un peu plus long que le retour –, que l'erreur de l'analyse multidimensionnelle va masquer. Dans ce cas, l'erreur statistique générée par l'analyse multidimensionnelle inclut l'écart à la structure métrique.

Par contre, appliquée sur un espace métrique, l'analyse multidimensionnelle permet de mettre à jour une fonction de distance. On peut alors expliciter la fonction distance d'un espace réel.

Les transformations par analyse multidimensionnelle peuvent provoquer des distorsions topologiques⁴¹⁴. Ces distorsions sont provoquées par une dégénérescence⁴¹⁵ dans la configuration. Roger N. Shepard a établi un tableau des dégénérescences possibles sur deux dimensions, d'un ensemble de quatre points reliés par six mesures de distance. Il y a, pour cet espace, 8 configurations dégénérées différentes possibles. Nous avons représenté sur la figure 20 l'espace de départ et les huit configurations dégénérées. Les traits plus épais figurent à chaque fois les distances les plus courtes.

⁴¹⁰ Par exemple dans le rapport : Christian REYNAUD, Marianne OLLIVIER-TRIGALO, 1993. - *Tendances du transport européen et besoins en infrastructures*. - Arcueil : INRETS/C.E.M.T.

⁴¹¹ Cf. page I-48, le paragraphe intitulé "Les espaces relatifs : espaces comportementaux et espaces plastiques".

⁴¹² Bernard MARCHAND, 1973. - *op. cit.* - p. 518.

⁴¹³ *Ibid.*

⁴¹⁴ Klaus SPIEKERMANN, Michael WEGENER, 1993. - *op. cit.* - p. 7.

⁴¹⁵ « Degeneracy ». - Roger N. SHEPARD, 1974. - *op. cit.* - p. 392.

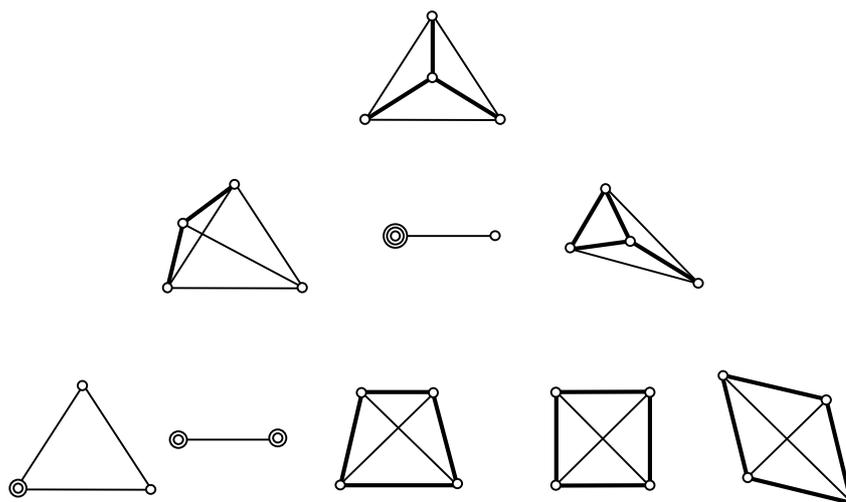


figure 20 : les 8 configurations dégénérées pour 4 points et 6 distances⁴¹⁶

Il peut arriver que deux routes parallèles dans la réalité se croisent sur la représentation ou que certaines zones entières soient séparées en deux parties distinctes⁴¹⁷. Il y a un risque de « “casser” les relations spatiales »⁴¹⁸. Cette configuration apparaît lorsque des réseaux aux performances par trop disparates coexistent sur un espace. G. O. Ewing et R. Wolfe⁴¹⁹ mentionnent cette cause de distorsion lorsqu’une voie rapide, munie d’entrées distantes les unes des autres, dessert un tissu urbain dense. On observe ainsi parfois des discontinuités dans les représentations.

On a vu⁴²⁰ que ces distorsions sont caractérisées par le respect ou le non respect de l’homéomorphisme dans la transformation.

Sur les cartes produites par analyse multidimensionnelle, Klaus Spiekermann et Michael Wegener⁴²¹ distinguent deux types de distorsions topologiques, les vraies et les fausses :

- les “fausses” distorsions sont des artefacts de la méthode d’analyse multidimensionnelle et sont liées aux interpolations. Elles sont dues à la dispersion des vitesses de modes de transport et à leur confrontation. Ce genre de distorsion intervient quand la vitesse moyenne du train est comparée, par exemple, à la vitesse du ferry ;

⁴¹⁶ Figure extraite de : Roger N. SHEPARD, 1974. - *op. cit.* - p. 392.

⁴¹⁷ *Ibid.* - p. 7.

⁴¹⁸ « [...] “break” the spatial relationship [...] ». - Bernard MARCHAND, 1973. - *op. cit.* - p. 517.

⁴¹⁹ G. O. EWING, R. WOLFE, 1977. - « Surface feature interpolation on two-dimensional time-space maps ». - *Environment and Planning A*, GB, vol. 9. - p. 436.

⁴²⁰ Cf. paragraphe “L’importance de l’homéomorphisme”, page I-95.

⁴²¹ Klaus SPIEKERMANN, Michael WEGENER, 1993. - *op. cit.* - p. 12.

- de “vraies” distorsions topologiques apparaissent sous l’effet de fortes variations de vitesse. C’est le cas lors de l’introduction du train à grande vitesse sur un espace : des villes lointaines semblent être plus proches que des villes situées à de courtes distances mais reliées par des liaisons plus lentes.

Les “vraies” distorsions sont *a priori* d’un plus grand intérêt que les “fausses”. Il est possible d’éviter les premières en supprimant les chemins les plus lents dans le réseau. Les secondes sont plus délicates à manier : elles dépendent du type de traitement choisi. Des recherches récentes⁴²² portent sur les techniques complémentaires et les adaptations de l’analyse multidimensionnelle qui permettent d’atténuer ces distorsions. Le principe général consiste à introduire une contrainte de conservation de la topologie. L’application que nous avons exposée s’inscrit dans cette démarche générale de la recherche sur l’analyse multidimensionnelle.

L’adaptation de la méthode d’analyse multidimensionnelle établie par Klaus Spiekermann et Michael Wegener, permet « une bonne correspondance entre la carte des distances et les temps de trajet, sans distorsions topologiques indésirables »⁴²³. « Un des avantages de la méthode est que par la sélection du noeud d’origine, on peut influencer la direction de la distorsion de la carte »⁴²⁴. Cela signifie cependant que « parce qu’il n’existe pas une unique solution optimale pour une carte d’espace-temps, l’apparence et la plausibilité de la carte dépendent de la compétence du créateur de la carte qui, en ajoutant ou en supprimant des liaisons du réseau de base ou par le choix du noeud d’origine, influence ou même manipule les données »⁴²⁵.

A condition d’être utilisées à bon escient, comme l’expliquent Klaus Spiekermann et Michael Wegener, ces « cartes d’espace-temps, appliquées avec bon sens et responsabilité, sont un média intéressant pour la visualisation du changement spatial »⁴²⁶. Dans le contexte actuel de développement des réseaux de transport, elles apportent une information précieuse : « dans une période où des nouveaux modes de transport rapides modifient fondamentalement les relations entre l’espace et le temps, les cartes d’espace-temps peuvent être utilisées pour établir une meilleure

⁴²² Celles d’Eihan Shimizu, 1992 (*op. cit.*) ou celles de Klaus Spiekermann et Michael Wegener, 1993 (*op. cit.*) notamment.

⁴²³ « It was shown that using this method time-space maps with a high correspondence between map distances and travel times yet without undesirable distortions of topology can be created. » - Klaus SPIEKERMANN, Michael WEGENER, 1993. - *op. cit.* - p. 22.

⁴²⁴ « An advantage of the method is that by the selection of the origin node, the direction of the map distortion can be influenced. » - Klaus SPIEKERMANN, Michael WEGENER, 1993. - *op. cit.* - p. 22.

⁴²⁵ « However, because there is no single best solution for a time-space map, the appearance and plausibility of the map depends on the skills of the map editor, who, by adding or deleting links of the calibration network and by selecting the origin node, can influence or even manipulate the results. » - Klaus SPIEKERMANN, Michael WEGENER, 1993. - *op. cit.* - p. 22.

⁴²⁶ « Time-space maps, applied with judiciousness and responsibility, are an interesting medium for the visualisation of spatial change. » - Klaus SPIEKERMANN, Michael WEGENER, 1993. - *op. cit.* - p. 25.

compréhension des évolutions en cours et de la destruction de l'espace par la mobilité croissante et de ses coûts sociaux et écologiques »⁴²⁷.

2. La question de l'échelle

Bon nombre de problèmes soulevés par la représentation de l'espace-temps sont mis en évidence quand on analyse le rôle de l'échelle. Comme l'affirme Jean-Claude Müller, « la notion traditionnelle d'échelle spatiale est une aberration dans la cartographie de l'espace-temps, puisque cette échelle n'est vraie qu'entre certains points, selon des directions limitées, et ne s'applique jamais à un espace bi-dimensionnel »⁴²⁸. Nous avons vu⁴²⁹ que les données qui décrivent l'espace sont de nature discrète. D'autre part, on doit tenir compte de l'anisotropie de l'espace des déplacements qui est due à la présence d'infrastructures aux performances diverses. Dans ces conditions, l'échelle des cartes possède seulement un caractère indicatif : elle est exacte pour des couples de points qui appartiennent à l'ensemble discret sur lequel les mesures ont été prises, mais elle est fautive dès qu'un des deux points n'appartient plus à cet ensemble. Sur les cartes construites par analyse multidimensionnelle, et plus généralement sur les configurations, l'échelle n'a de sens que considérée pour certains couples de points. La distance graphique qui sépare Paris de Lyon sur la carte 6, page II-169, donne, après conversion via l'échelle fournie, la mesure de la durée nécessaire au parcours. Pour un couple quelconque de points – différent du couple Paris-Lyon – choisi sur l'anamorphose, la mesure sera erronée.

3. Anamorphose et espace chorotaxique

Pour une bonne compréhension de l'anamorphose, on peut lui adjoindre une carte chorotaxique. L'interprétation s'effectue alors par comparaison des deux représentations : on peut évaluer visuellement l'écart induit par la représentation en anamorphose sur l'espace réel.

Il est aussi possible de tracer sur l'anamorphose des repères reconnaissables qui permettent d'illustrer les distorsions. Ces repères peuvent être par exemple les contours, les frontières, les voies de communication ou les méridiens et les parallèles. On réintroduit ainsi des éléments conventionnels qui sont utiles à la reconnaissance et à la compréhension de la carte.

4. L'espace interstitiel oublié

D'après l'analyse proposée par Roger Vickermann, Klaus Spiekermann et Michael Wegener, les anamorphoses « ne montrent les réductions des temps de trajet que des

⁴²⁷ « In a period in which new and faster transport modes fundamentally change the relationship between space and time, time-space maps can be used to gain a better understanding of the change processes at work and of the destruction of space by increasing spatial mobility and of its social and ecological costs. » - Klaus SPIEKERMANN, Michael WEGENER, 1993. - *op. cit.* - p. 25.

⁴²⁸ Jean-Claude MÜLLER, 1979. - *op. cit.* - p. 224.

⁴²⁹ Cf. page I-93, "Observations discrètes".

noeuds les plus accessibles [...] des réseaux »⁴³⁰. Les espaces interstitiels sont absents : « ce qu'elles ne montrent pas, ou même qu'elles cachent, c'est la bien moindre réduction des temps de trajet dans les zones situées entre les noeuds des réseaux »⁴³¹. Nous nous faisons très nettement l'écho de cette critique fondamentale des anamorphoses.

Les anamorphoses montrent l'effet des réseaux de transport sur les noeuds importants. Les gains obtenus sont reportés directement sur les espaces qui les entourent, alors que les points intermédiaires ne sont pas connectés. Parce que les résultats qu'elles présentent ne sont valables que dans un ensemble d'endroits précis, les cartes en anamorphoses doivent être lues avec discernement.

Ce point met en évidence l'opposition entre la nature discrète des données de départ et l'aspect implicitement continu de la représentation.

D. *Exploitation des anamorphoses*

1. **Un apport capital**

Même s'il est impossible d'obtenir une restitution parfaite en deux ou trois dimensions seulement, les anamorphoses apportent un point de vue précieux⁴³². Dans ces cartes, on voit apparaître une image des interrelations qui est distordue sous l'effet des moyens de transport et de communication, mais qui est en général reconnaissable.

Pip Forer exprime l'apport que constituent les anamorphoses ainsi : « bien que la perte d'information sur ces cartes leur confère une faible valeur analytique, leur rôle en tant qu'image équivalant à un millier de mots (ou plutôt équivalant à un millier de cases d'une matrice des chemins minimaux) est inestimable »⁴³³. Une représentation, même entachée d'erreur, peut être lue globalement et fournir une information synthétique ; ce n'est pas le cas d'un tableau de nombres.

⁴³⁰ « [...] they only show the travel time reductions for the most accessible nodes of [...] the networks ». - Roger VICKERMANN, Klaus SPIEKERMANN, Michael WEGENER, 1995. - *op. cit.* - p. 18.

⁴³¹ « What they do not show, or even hide, are the much smaller travel time reductions in the areas between the nodes of the networks ». - Roger VICKERMANN, Klaus SPIEKERMANN, Michael WEGENER, 1995. - *op. cit.* - p. 18. (c'est nous qui soulignons)

⁴³² Pip FORER, 1978. - *op. cit.* - p. 245.

⁴³³ « While the information loss in all such maps often makes them of little analytic worth, their role as pictures in being worth a thousand words (or, in this case, a thousand elements of a minimum path matrix) is invaluable ». - Pip FORER, 1978. - *op. cit.* - p. 245.

2. Rétrécissement global et déplacements relatifs

Comme le fait remarquer Bernard Marchand dans une modélisation de l'espace du Venezuela entre 1936 et 1961⁴³⁴, le processus de rétrécissement de l'espace se décompose en deux mouvements distincts.

D'abord un mouvement global de contraction qui exprime l'amélioration générale du réseau. Mais, simultanément, un déplacement des positions relatives des villes, c'est-à-dire une modification des proximités relatives. Ainsi, l'ensemble des relations entre villes est transformé.

C'est ce que nous avons pu vérifier sur les anamorphoses de l'espace-temps français.

Conclusion

Les moyens techniques des décennies 1960 et 1970, notamment l'informatique graphique, ne permettaient pas de réaliser aisément de telles représentations. D'autre part, la méthode des anamorphoses a connu un relatif déclin à partir du milieu des années 1980. Il semble cependant qu'un regain d'intérêt se dessine depuis quelques années : on peut citer les travaux d'Eihan Shimizu (1992), ceux de Klaus Spiekermann et Michael Wegener (1993) et ceux du laboratoire M.T.G. de l'Université de Rouen, avec les recherches effectuées par Patrice Langlois et Jean-Charles Denain (1995).

Une des grandes orientations de la recherche sur les anamorphoses porte sur l'élimination des distorsions topologiques intempestives, considérées comme des artefacts de la méthode. Nous avons montré, dans les développements mathématiques de la thèse⁴³⁵, l'importance du respect de la topologie pour les représentations spatiales. De ce point de vue, les représentations que nous construisons s'inscrivent dans la même logique que les développements actuels des anamorphoses.

⁴³⁴ Bernard MARCHAND, 1973. - *op. cit.*

⁴³⁵ Cf. "L'importance de l'homéomorphisme", page I-95.

E. *Représentation en trois dimensions*

Plusieurs chercheurs ont, au cours des décennies 1960 et 1970, esquissé le principe de représentations en trois dimensions des systèmes de transport. William Bunge⁴³⁶ en 1962, dans son ouvrage *Theoretical Geography*, émet l'idée d'une représentation sur la surface d'un hyperspace pour résoudre le problème des distorsions de l'espace sous l'effet des réseaux de transport.

Shlomo Angel et Geoffrey M. Hyman⁴³⁷ proposent une représentation de l'espace urbain où la vitesse de déplacement croît du centre vers la périphérie. On obtient alors un hémisphère. Un des partis pris de cette représentation est de considérer le réseau dense des rues de la ville comme un champ continu. Le point de départ est la construction de la fonction mathématique qui explicite le principe général.

En 1977, les mêmes auteurs, Shlomo Angel et Geoffrey M. Hyman, avancent l'idée d'une surface à trois dimensions qui « pourrait aider à représenter l'importante différence d'accessibilité entre un point situé sur une voie rapide et d'autres points proches, mais hors de la voie rapide et éloigné d'une entrée ou d'une sortie de la voie rapide. »⁴³⁸

Une idée sensiblement différente a été concrétisée par Klaus Spiekermann et Michael Wegener en 1996. Il s'agit d'une carte thématique (carte 7) en trois dimensions qui représente l'accessibilité de l'espace européen dans l'hypothèse de la réalisation du schéma directeur de la grande vitesse.

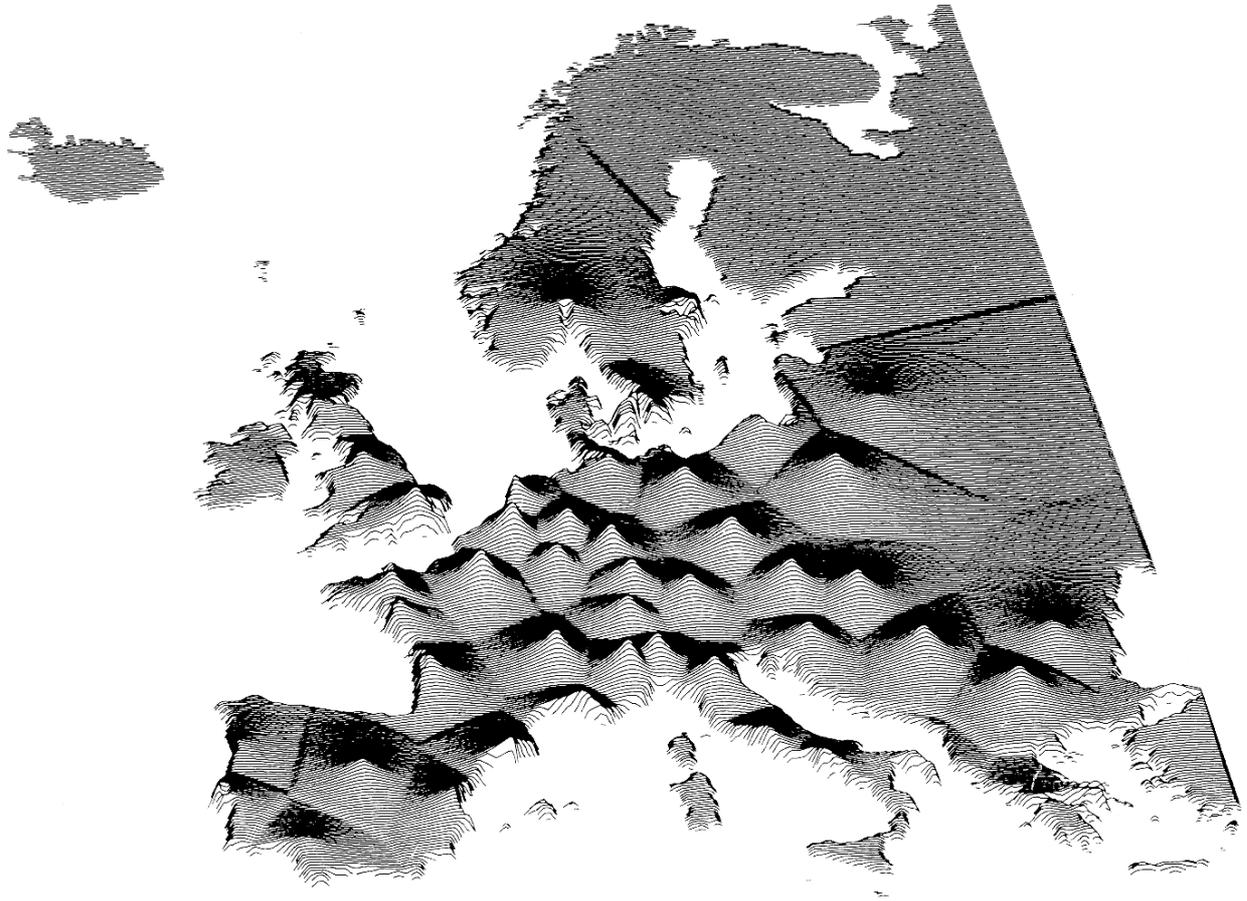
L'accessibilité est construite comme une variable spatialisée dont la valeur varie de manière continue. Elle atteint des maxima locaux pour les noeuds les mieux connectés du réseau et décroît avec l'éloignement à ceux-ci. Le résultat obtenu est un relief composé de "montagnes", de forme à peu près conique, qui portent en leur sommet les grandes villes européennes.

⁴³⁶ « Since it has been proven that the traditional map cannot hold the solution to our space straightening problem, what will? It seems to me that the mapping will have to be on the surface of some object in hyper-space. » - William BUNGE, 1962. - *op. cit.* - p. 60.

⁴³⁷ Shlomo ANGEL, Geoffrey M. HYMAN, 1972. - *op. cit.*

⁴³⁸ « [...] a three dimensional surface would help depict the marked difference in accessibility of a point on an expressway as compared to points close to it but off the expressway and not close to an entrance or exit of the expressway. » - G. O. EWING, R. WOLFE, 1977. - *op. cit.* - p. 436.

carte 7 : l'accessibilité de l'espace européen après réalisation du schéma directeur de la grande vitesse



Source : K. Spiekermann, M. Wegener, IRPUD

Conclusion

Nous avons classifié les démarches adoptées pour modéliser l'espace. Les surfaces parfaites font l'hypothèse de l'homogénéité et de l'isotropie de l'espace. Nous avons vu que l'espace-temps est profondément anisotrope et hétérogène, ce qui condamne les surfaces parfaites pour la modélisation de l'espace-temps.

Parce que l'espace de l'Aménagement est hétérogène, le réseau n'est, en général, pas régulier, ce qui rend improbable la possibilité de construire une formulation analytique de la distance qui puisse être utile à l'aménageur. Les modélisations et représentations basées sur cette approche doivent être écartées.

La cartographie de l'espace-temps susceptible d'apporter une information qui soit d'intérêt pour l'aménageur se restreint alors à trois domaines : la cartographie thématique, les configurations, qui redistribuent les localisations des points en fonction des temps d'accès, et les représentations du réseau ou du graphe associées à des structures métriques.

Les cartes en isolignes, ainsi que les anamorphoses, reposent sur le postulat d'un espace continu. Or, on a vu combien l'espace des transports est discontinu. En effet, si l'on considère par exemple le transport de personnes par TGV, il est évident que les gains de temps procurés n'affectent réellement que les points de connexion (c'est-à-dire les gares) ainsi que l'espace immédiatement environnant. En conséquence, il est abusif de relier les gares TGV par des isochrones, ce qui impliquerait que l'espace intermédiaire bénéficierait des mêmes avantages. La même critique vaut pour les anamorphoses.

Par contre, les cartes unipolaires des temps d'accès et, plus généralement, les cartes montrant des indications nodales, comme l'arbre à boules, échappent à cette critique : les informations que montrent ces cartes ne valent que pour un ensemble déterminé de lieux.

Le graphique en ressort du Laboratoire d'Economie des Transports montre un espace réticulaire. Il fait clairement apparaître les liaisons entre les noeuds du réseau et exprime donc bien l'aspect discret de l'espace.

Cette analyse vaut aussi pour la représentation en temps d'accès sur le réseau, à la nuance que l'on connaît exactement l'endroit sur l'arc qui correspond à un changement de classe. Tout point du réseau, y compris les points qui constituent les liaisons, peut constituer la destination d'un trajet. L'espace du réseau, qui est un sous-ensemble de l'espace chorotaxique, est continu, comme est continu le réseau sur

lequel on définit la distance-réseau. Il n'y a aucune information directe concernant les interstices du réseau.

Les anamorphoses sont d'une richesse considérable pour la description de l'espace-temps. L'effet de contraction/dilatation sélective, à la fois global et localisé, montre de manière lisible une déformation pourtant très complexe : les anamorphoses permettent d'approcher l'idée d'une déformation compliquée – selon l'expression de Waldo R. Tobler – de l'espace-temps sous l'effet des transports rapides.

Cependant, la critique fondamentale des anamorphoses, établie par Roger Vickermann, Klaus Spiekermann et Michael Wegener, met en lumière le traitement des espaces interstitiels : **ceux-ci semblent bénéficier des améliorations apportées aux grands noeuds des réseaux de transport**. Ni la raréfaction des points d'entrées, ni l'effet tunnel ne sont réellement montrés.

La carte thématique de l'accessibilité est intéressante pour montrer la différenciation très forte des lieux de l'espace. Elle représente en trois dimensions les niveaux d'accessibilité et les aires d'attraction des grands pôles. Elle montre un effet des réseaux de transport rapide sur l'espace, mais elle ne montre pas les distances entre les lieux. Il n'y a pas réellement de déformation de l'espace.

A ce stade, nous sommes en mesure d'identifier une lacune quant à la représentation de l'espace modifié par les réseaux de transport rapide. Nous n'avons pas trouvé de représentation satisfaisante pour décrire complètement les distorsions qui apparaissent lors de l'interaction entre les réseaux de transport et l'espace.

En conséquence, nous proposons une représentation basée sur des principes différents, qui obéit aux orientations méthodologiques que nous avons déterminées dans le chapitre sur les outils mathématiques, et qui a pour vocation d'illustrer les effets spatiaux que nous avons décrits dans la Section 3^{ème} section – intitulée “ Interactions entre l'espace et les réseaux ” – du premier chapitre de la première partie.

CHAPITRE II

LES CARTES EN RELIEF

Introduction

« Les voies de chemin de fer, les pipelines, les autoroutes et autres infrastructures de transport provoquent un plissement de l'espace le long des voies »⁴³⁹. William Bunge.

Pour modéliser l'espace-temps et les interactions entre l'espace et les réseaux de transport, nous avons – en conclusion du chapitre précédent – considéré les représentations existantes insuffisantes. En conséquence, nous proposons un nouveau type de cartes de l'espace-temps.

Dans ce chapitre, nous nous proposons d'exposer le principe de construction des cartes en relief. Nous explicitons également les propriétés mathématiques de la modélisation.

Ensuite, nous présentons plusieurs applications de la méthode. Ces applications sont l'occasion de développer la fonction analytique des représentations en relief puis de les confronter à des questions d'Aménagement. Plus loin, nous présentons plusieurs développements des cartes en relief, pour finalement préciser la nature des apports des représentations en relief, mais aussi leurs limites.

Au delà des aspects purement analytiques des représentations, nous voulons apporter une information prospective pour l'Aménagement. L'objectif de ce chapitre est la vérification de l'hypothèse que nous avons posée à la fin du chapitre liminaire et que nous rappelons ici : **l'hypothèse est validée si les cartes en relief d'espace-temps permettent la fonction de diagnostic, constituent un outil de recherche et d'analyse exploitable dans une démarche prospective, et sont un outil de communication.**

⁴³⁹ « Railroads, pipelines, highways and other routed movements cause the space to pucker along the route ». - William BUNGE, 1962. - *op. cit.* - p. 270-271.

Dans le chapitre traitant des outils mathématiques de l'analyse spatiale, nous avons établi l'intérêt des structures métriques pour la description spatiale. Pour modéliser les réseaux de transport, les graphes sont une des structures les mieux adaptées. La théorie des graphes doit une bonne part de son succès aux représentations graphiques qu'elle permet. C'est pourquoi nous avons choisi une description sous la forme de la réalisation d'un graphe muni d'une structure métrique.

Comme le pose Sylvie Rimbert, l'irruption de l'informatique dans le domaine de la cartographie a permis de faire apparaître des aspects nouveaux de la surface terrestre qui, tout en restant "objectifs", sont, cependant, de moins en moins neutres⁴⁴⁰.

Section 1 La construction des cartes en relief

A. La modélisation des réseaux

Nous voulons décrire l'effet des réseaux de transport sur l'espace. Nous avons construit un p -graphe qui décrit le réseau de transport. La surface de réalisation du graphe représentera l'espace.

La représentation du réseau de transport que nous construisons, place les réseaux en superposition dans la troisième dimension, du moins rapide au plus rapide. L'idée est de comparer les performances spatio-temporelles des réseaux de transport.

1. L'articulation entre le réseau et l'espace

Nous avons montré que le réseau est rendu nécessaire par l'existence de l'espace⁴⁴¹. Nous voulons représenter les effets des réseaux de transport sur l'espace. Dans ce but, nous construisons l'image d'un graphe – qui figure le réseau –, et d'une surface – qui représente l'espace. Le schéma du graphe, c'est-à-dire l'image du réseau, n'est composé que de points et de lignes. Sa surface est donc nulle. L'étendue spatiale est, elle, représentée par le support qui est utilisé pour la réalisation du graphe.

Nous modélisons le réseau de transport sous la forme d'un p -graphe, où chaque épaisseur correspond à un binôme fonctionnel. Nous avons montré⁴⁴² que, de tous les modes de transport, le mode routier – hors autoroute – est le plus proche de l'espace.

⁴⁴⁰ Sylvie RIMBERT, 1992. - *op. cit.* - p. 129.

⁴⁴¹ Cf. page I-53.

⁴⁴² Cf. "Réseau routier : l'universalité", page I-130.

C'est donc le graphe du réseau routier⁴⁴³ qui est utilisé comme support pour construire la surface qui représente l'espace.

Il est nécessaire, à ce stade, de préciser certaines notions. On appelle faces du graphe les régions de la surface de réalisation qui sont limitées par des arcs⁴⁴⁴. La surface qui est utilisée pour dessiner le graphe peut être entièrement décrite à l'aide des faces. Pour cela, on utilise toutes les faces du graphe, y compris la face extérieure, appelée "face infinie" chez Claude Berge⁴⁴⁵. Mathématiquement, on dira que les faces forment une partition de la surface de réalisation.

Suivant cette définition, les faces du graphe routier représentent l'espace que le réseau dessert. L'étendue spatiale, qu'elle soit urbaine ou interurbaine est contenue dans ces faces. Ainsi, alors que le graphe modélise le réseau, les faces du graphe routier décrivent l'espace.

Notre objectif est de construire une représentation cohérente du réseau de transport. La cohérence se traduit par l'exigence que la longueur visuelle des liaisons soit proportionnelle à la durée de parcours. Pour satisfaire cette exigence nous positionnons les arcs dans la troisième dimension. Même si les sommets du graphe restent dans le plan chorotaxique, la représentation obtenue est en trois dimensions. On ne peut pas réellement la qualifier de réalisation du graphe, puisqu'il n'existe pas de surface sur laquelle la dessiner.

En effet, le réseau est composé de plusieurs modes de transport. Entre deux noeuds, il peut exister des liaisons correspondant à des modes différents, qui sont caractérisés par des vitesses moyennes de circulation différentes. En conséquence, les arcs s'étagent dans la troisième dimension pour satisfaire la contrainte de représentation. La surface qui pourrait supporter le graphe devrait comprendre plusieurs couches, une par réseau. Nous choisissons de ne représenter qu'une seule surface – une seule couche –, et nous l'associons au graphe routier. Plus formellement, nous représentons la surface de réalisation du graphe routier.

Ce choix a une conséquence importante pour la constitution du graphe routier. Celui-ci doit être planaire. Sachant que le graphe routier peut être décomposé en graphes partiels, il faut que l'union des graphes partiels routiers soit planaire.

Nous pouvons maintenant poser le problème d'une autre façon : nous voulons trouver une surface qui soit telle que la réalisation du graphe routier obéisse à la contrainte de

⁴⁴³ On construit le graphe routier par l'association de plusieurs graphes partiels quand il y a plusieurs types d'infrastructures routières de caractéristiques différentes. Dans le cas contraire, le graphe routier correspond à un graphe partiel unique, c'est-à-dire à un unique binôme fonctionnel.

⁴⁴⁴ Claude BERGE, 1983. - *op. cit.* - p. 17.

⁴⁴⁵ *Ibid.*

proportionnalité des longueurs des arcs, en tenant compte du réseau le plus rapide qui s'inscrit dans le plan.

La solution de ce problème est en fait assez simple : dans la structure en trois dimensions, on peut très bien construire les faces du graphe. Ce sont des éléments surfaciques dont les bords sont formés par le tracé des arcs. Comme les arcs routiers sont, le plus souvent, tracés dans la troisième dimension, les faces sont des surfaces complexes, non planes. Nous avons vu que les faces du graphe décrivent complètement la surface de réalisation du graphe. Donc, ici, la réunion des faces nous donne la surface que nous cherchons.

Une contrainte s'ajoute à la planarité du graphe. Les faces du graphe sont des surfaces complexes, non planes, disposées dans la troisième dimension. Pour la lisibilité de la représentation, nous voulons que les faces soient les plus simples possibles. Les faces les plus simples sont celles que l'on construit avec le plus petit nombre d'arcs. Or, il faut au moins trois arcs pour construire une face. Nous imposons donc au graphe que ses faces soient toutes – à l'exception de la face infinie – bordées par trois arcs. Cette condition est satisfaite si le graphe est planaire saturé. En plus, toujours pour une question de simplification visuelle et de cohérence globale, tous les arcs sont dessinés comme des segments rectilignes. Sous cette dernière condition, les faces du graphe dessinent des triangles.

Toujours dans un souci de lisibilité, nous voulons que la forme des arcs soit le plus simple possible, de manière à ce que les faces ne soient pas trop compliquées. Pour cette raison, nous avons choisi de tracer les arcs sous la forme de **deux segments qui appartiennent au plan de coupe** (perpendiculaire à la surface chorotaxique) de la liaison qu'il décrivent, et qui sont **situés en dessous** du plan chorotaxique. On peut très bien imaginer d'autres options dans la façon de tracer les arcs. Nous montrons plus loin une variante simple, qui consiste à tracer les deux segments **au-dessus** du plan chorotaxique⁴⁴⁶.

Nous avons construit la surface de réalisation du graphe routier. Or, la surface représente l'espace. La déformation du réseau routier par les réseaux de transport rapide provoque la déformation de la surface de réalisation. Nous posons donc que **la déformation de la surface nous indique la déformation de l'espace sous l'effet des réseaux de transport rapide**.

Il faut remarquer que, si la structure en trois dimensions du graphe ne possède pas de surface de réalisation, il n'en va pas de même de l'image finale. Cette dernière est construite par projection sur un support plan. On y distingue les sommets et les arcs du graphe. L'image est donc bien celle d'une réalisation du graphe de transport.

⁴⁴⁶ Cf. "Le relief "inversé"", page II-209.

2. Récapitulatif des contraintes

Les contraintes qui concernent les graphes utilisés pour la construction des représentations en relief sont les suivantes :

1. le réseau routier doit être modélisé sous la forme d'un *1*-graphe ;
2. le *1*-graphe routier doit être planaire ;
3. les faces du *1*-graphe routier doivent être des formes géométriques simples : les plus simples possibles sont des triangles (le graphe doit être planaire saturé) ;
4. les arcs doivent être dessinés de manière simple : deux segments tracés dans le plan de coupe de la liaison, et en-dessous de la surface chorotaxique.

Les deux premières contraintes doivent être respectées strictement. Les deux dernières contraintes doivent, elles aussi, être respectées, mais elles laissent une certaine marge de manoeuvre dans leur application. Ainsi, on peut imaginer un graphe dont certaines faces soient des polygones à plus de trois côtés. De même, la condition de simplicité de la quatrième contrainte est interprétable suivant des modalités diverses. Ce sont toutes les deux des recommandations dans le but de construire une représentation qui soit la plus lisible possible.

3. Choix du réseau routier comme fond de carte

La représentation que nous construisons associe l'espace au réseau routier. La raison principale en est la nature universelle de la route, c'est-à-dire le fait que le réseau routier desserve intégralement tous les points des espaces qui nous intéressent.

Deux autres arguments – l'un technique, l'autre issu de considérations sur les distances cognitives – viennent renforcer ce choix.

De tous les réseaux terrestres interurbains étudiés dans le cadre de la thèse, le réseau routier est le moins performant en terme de temps de trajet. C'est donc celui qui est le plus déformé et, la déformation s'opérant en rejetant le réseau vers le bas, celui qui constitue la couche la plus profonde. Comme la représentation est vue à partir du dessus, le réseau routier se retrouve "derrière" tous les autres. Ainsi, la surface associée au réseau routier n'occulte pas les autres réseaux et constitue l'équivalent d'un "fond de carte" pour la visualisation de l'espace-temps.

Les travaux d'Isabelle Derognat sur les distances cognitives montrent que la perception des distances dépend de la manière dont on parcourt l'espace⁴⁴⁷. Plus le

⁴⁴⁷ Isabelle DEROGNAT, 1990. - « Vers une axiomatique de la distance cognitive ». - RERU, France, 1990 n°2. - p. 244.

mode de locomotion est rapide, plus les distances parcourues sont sous-estimées. La vision procurée par le déplacement influence aussi la perception. Les automobilistes et les piétons ont la vision d'un espace continu, qui leur permet une estimation assez fidèle des distances, alors que les passagers des transports en commun voient un espace composé de points – les stations – et tendent à sous-estimer les distances. Ainsi, à une échelle interurbaine, le réseau routier classique est le réseau le plus relié au continuum spatial, et aussi celui qui forme la conception la plus usuelle de l'espace. Il subit par conséquent en premier chef les distorsions provoquées par les autres moyens de transport.

4. La nature mathématique de la surface en trois dimensions

Nous pouvons caractériser la transformation de l'espace d'un point de vue mathématique, en nous appuyant sur le chapitre CHAPITRE II de la première partie.

Nous nous intéressons ici à la nature mathématique de la surface en trois dimensions.

Considérons la réalisation du graphe routier sur une surface plane, avec les arcs dessinés sous la forme de segments rectilignes entre les sommets. C'est une représentation chorotaxique du réseau comme celles que nous avons vues précédemment. L'espace est constitué par les faces du graphe planaire routier. Les faces triangulaires sont séparées en quatre triangles, comme on le voit sur la figure 21. Les triangles de type 1 ont un sommet qui correspond à un sommet du graphe, et les deux autres qui sont les milieux des arcs. Le triangle de type 2 a pour sommets les milieux des arcs qui constituent la face.

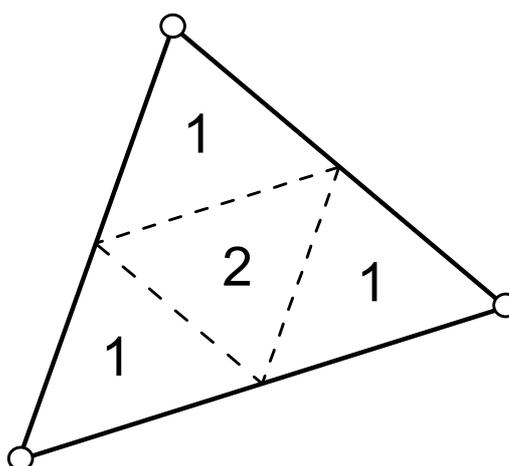


figure 21 : une face du graphe séparée en quatre triangles

Les quatre triangles sont projetés chacun sur un plan différent, comme le montre la figure 22. Les triangles de type 1 sont projetés sur des plans portés par les segments des demi-arcs ; les triangles de type 2 sont projetés sur le plan qui s'appuie sur les milieux des arcs qui bordent la face. Chaque côté des triangles de type 2 est commun avec un côté d'un triangle de type 1.

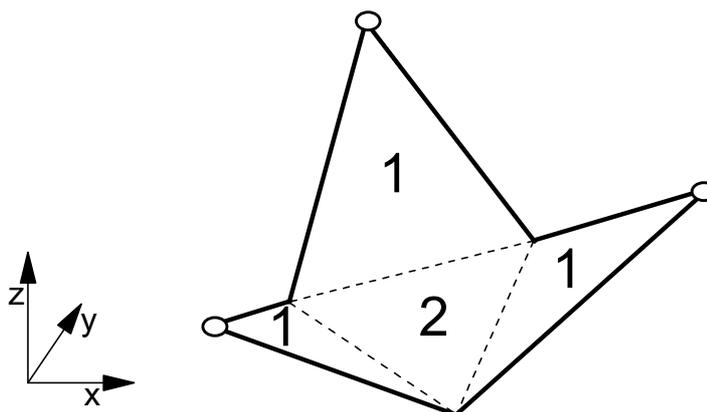


figure 22 : la face du graphe projetée

Les triangles sont bien sûr continus, et ils ont des arêtes communes. Par construction, la surface construite est continue. Le passage de la surface de départ à la surface du relief consiste en un ensemble de projections. La transformation peut être vue comme une projection sur une surface en trois dimensions.

Considérons la feuille de caoutchouc qui illustre les transformations topologiques⁴⁴⁸. La structure froissée des cartes en relief s'inscrit dans ce schéma : il n'y a ni déchirement, ni superposition par rapport à la surface de départ. **La transformation de la surface chorotaxique en une surface en trois dimensions conserve la topologie de l'espace chorotaxique.** Cela signifie que la topologie de la surface en trois dimensions est celle de la surface chorotaxique.

B. Principe général

1. Réseau hétérogène

Le principe de réalisation des représentations en relief suppose une dispersion dans les vitesses (ou les coûts) permises sur le réseau. Cette dispersion est à l'origine du "froissement" qui s'opère. Quand le réseau est homogène au sens des vitesses moyennes, c'est-à-dire que les vitesses sont identiques sur toutes les liaisons du réseau, la représentation est totalement "plate" : le relief est inexistant.

Cela signifie que les cartes en relief caractérisent l'hétérogénéité du réseau. Bien plus, on peut affirmer que le principe même des cartes en relief repose sur cette hétérogénéité.

⁴⁴⁸ Cf. à la fin du paragraphe "Topologie" qui commence page I-86.

2. Trois contraintes

Reprenons de manière plus formelle le principe de construction des représentations en relief énoncé en introduction⁴⁴⁹. Il s'exprime selon trois contraintes :

- la longueur des arcs du graphe doit être proportionnelle à leur longueur effective (que ce soit des kilomètres, des heures, etc.) ;
- pour permettre la proportionnalité des longueurs, les arcs s'inscrivent dans la troisième dimension ;
- la position des noeuds du graphe correspond à leur position chorotaxique.

La première contrainte autorise une assez grande liberté d'expression. La condition porte sur la longueur de l'arc, et non sur le tracé précis de celui-ci. D'autre part la "longueur effective" peut être la longueur en kilomètres, la durée de transport ou une fonction plus complexe de coût de transport généralisé.

La deuxième contrainte indique la façon dont on doit tracer les arcs. Là aussi, la liberté est assez importante. Dans toutes les cartes proposées dans ce travail, les arcs sont représentés sous la forme de deux segments. Il est tout à fait possible d'imaginer d'autres procédés : par exemple, le remplacement des segments par une courbe arrondie permettrait de construire une représentation moins anguleuse ; il s'agit d'une des voies de développement possible des cartes en relief.

La troisième contrainte est relativement restrictive. Seules quelques transformations élémentaires⁴⁵⁰ sont permises.

3. Les densités et le maillage du réseau

Il faut distinguer deux densités :

1. le nombre de kilomètres de lignes par unité de surface (km^2) correspond à une densité de lignes, à une densité du réseau dans l'espace ;
2. le nombre d'accès à l'infrastructure par kilomètre de ligne se rapporte à la densité de points d'accès au réseau.

Cette deuxième densité dépend évidemment de la première, mais il existe de grandes disparités suivant les réseaux considérés. La densité d'accès à l'infrastructure est en grande partie fonction de la vitesse de parcours sur le réseau : plus le moyen de transport est rapide et plus la densité de points d'accès est faible. Comme l'affirment Jean-Jacques Bavoux et Jean-Bernard Charrier, « le réseau à grande vitesse sera

⁴⁴⁹ Cf. au paragraphe "Principe de construction", page 34.

⁴⁵⁰ "Transformations élémentaires" doit être compris au sens mathématique. Cf. paragraphe "Les transformations mathématiques", page I-95.

infiniment moins dense que le réseau ferroviaire traditionnel »⁴⁵¹. La grande vitesse impose une densité précise. Cette densité commande une desserte spatiale, un maillage particulier du réseau. Le maillage du réseau des lignes à grande vitesse sera nécessairement plus lâche que le maillage du réseau ferroviaire classique.

Les deux définitions de la densité du réseau se traduisent directement dans la théorie des graphes. Sur une aire délimitée, le graphe qui modélise le réseau de transport possède la même que celui-ci. Cette assertion vaut pour les deux définitions susdites ; cependant, dans ce travail, nous emploierons essentiellement la deuxième notion. Nous définissons donc la **densité d'un graphe** comme le **nombre de sommets par unité de surface**. Pour utiliser cette définition, il nous faut disposer d'informations sur la surface de réalisation du graphe ; dans le cas des réseaux de transport, la surface en question correspond à la surface chorotaxique.

4. Omnibus, express et TGV

Sur une même ligne ferroviaire classique deux (voire trois) types de services peuvent cohabiter : des trains "omnibus", qui desservent presque chaque gare, mais qui progressent lentement, au rythme des accélérations et décélérations successives, et des trains "express", qui relient à haute vitesse les villes importantes. Sur les lignes à grande vitesse, on ne retrouve que quelques accès (gares) pour les raisons que nous avons explicitées au-dessus. Il n'y a plus qu'un seul type de service qui consiste à relier ces gares, à grande vitesse. On retrouve ici le phénomène de raréfaction des points d'accès et son corollaire, l'effet tunnel, que nous avons abordé précédemment dans ce travail⁴⁵².

C'est la logique de la grande vitesse qui est décrite, schématiquement, ici. Il s'agit d'une tendance qui est due aux propriétés techniques du mode de transport que constitue la grande vitesse sur rail. Cela n'empêche pas que les réalisations sur le terrain tentent de s'affranchir de ce phénomène, en proposant des services vers des villes appartenant à l'espace interstitiel. C'est le sens, par exemple, de l'hypothèse d'un raccordement de la ville d'Angoulême émise dans le projet de TGV Aquitaine⁴⁵³. La ville, bien que non directement reliée au réseau à grande vitesse, pourra bénéficier des effets de celui-ci. Cependant, la fréquence des dessertes ne pourra rivaliser avec les villes plus importantes comme Paris ou Bordeaux.

Le même souci de tempérer l'effet tunnel se retrouve dans les propositions faites par Claude Quin pour le TGV Méditerranée d'une « réduction [...] des temps de

⁴⁵¹ Jean-Jacques BAVOUX, Jean-Bernard CHARRIER, 1994. - *op. cit.* - p. 63.

⁴⁵² Cf. "Raréfaction des points d'accès", page I-69, et "Effet tunnel", page I-70.

⁴⁵³ *Le TGV Aquitaine*, 1990. - SNCF, Premières études.

parcours d'une multitude de centres urbains intermédiaires »⁴⁵⁴, pour ne pas réserver à Paris et Marseille l'exclusivité des avantages offerts.

5. Une variante : le graphe des arcs minimaux

Selon le principe de construction que nous avons exposé, les graphes de la modélisation conservent l'intégralité de leurs arcs lors de la réalisation en trois dimensions. Nous avons construit une variante de ce modèle général en ne conservant dans le graphe que l'arc le plus performant – l'arc minimal – entre chaque couple de sommets. Rappelons que l'idée générale des cartes en relief est la comparaison des réseaux de transport entre eux. Pour pouvoir comparer sur une même liaison différents réseaux, il faut que les arcs du graphe aient même origine et même destination. Or, nous avons vu que la densité des entrées varie selon les réseaux⁴⁵⁵. Les entrées, qui sont aussi des noeuds permettant l'interconnexion, sont modélisées par des sommets. La densité du graphe global doit être celle du réseau le plus rapide qui est le réseau à la plus faible densité d'entrées. Avec le graphe des arcs minimaux, pour pouvoir comparer les réseaux de transport, on doit vérifier une contrainte supplémentaire qui porte sur la densité du graphe. La règle est que chaque arc performant supplante un arc du réseau moins performant, ou plusieurs arcs s'il y a plusieurs réseaux moins performants (par exemple, le TGV peut supplanter l'autoroute et la route).

Sur une représentation en durée de transports, le TGV l'emportera partout où il existe. Là où l'on supprime l'arc routier, la question du sort des facettes attenantes se pose. Nous choisissons d'attacher les facettes de l'arc routier disparu à l'arc le plus performant restant, que ce soit l'autoroute, le TGV ou tout autre binôme fonctionnel. Cette option est difficile à justifier conceptuellement, dans la mesure où elle induit la perspective d'un contact entre les infrastructures et l'espace parcouru. Nous avons suggéré à plusieurs reprises l'idée contraire⁴⁵⁶, que ce soit en évoquant l'effet tunnel ou encore au sujet de la raréfaction des points d'arrêt, caractères spécifiques des réseaux de transport rapide.

Cependant, la réalisation du graphe des arcs minimaux produit un relief beaucoup plus riche que la représentation de départ. Sur cette dernière, deux sommets reliés par une infrastructure performante sont situés sur deux pics isolés, ainsi que tous les autres sommets du graphe. Dans la nouvelle représentation, la ligne rapide forme une crête qui relie les deux sommets connectés, tandis que les sommets n'appartenant pas au réseau rapide restent positionnés au sommet d'un pic de forme pyramidale.

⁴⁵⁴ Claude QUIN, 1994. - Intervention au séminaire DATAR « Prospective des transports et des territoires à l'horizon 2015 », séance n° 5, « Accessibilité et desserte du territoire, les transports de personnes », 19 janvier 1994, Paris.

⁴⁵⁵ Cf. « Les densités et le maillage du réseau », page II-187.

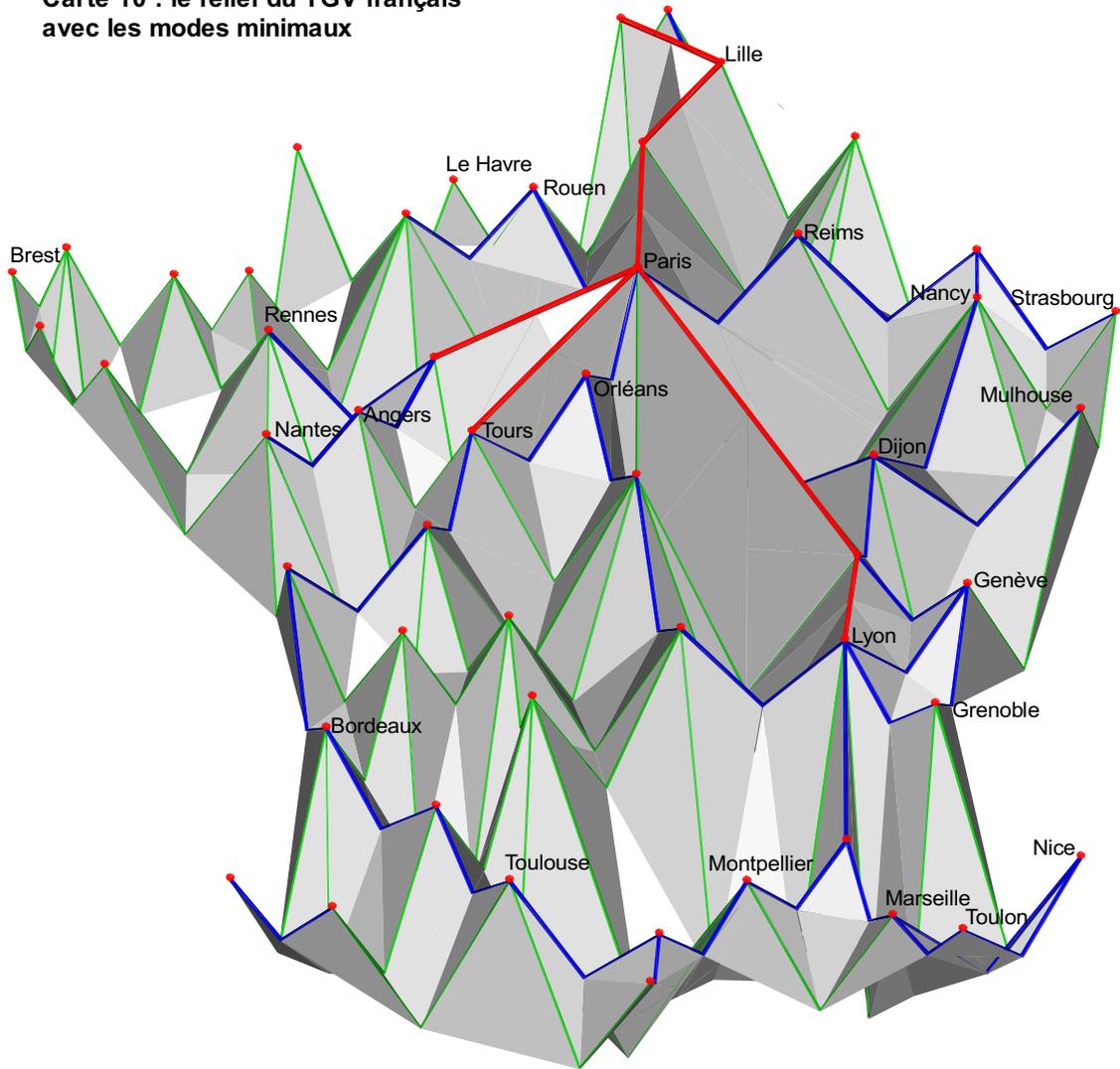
⁴⁵⁶ Cf. page I-69, « Raréfaction des points d'accès » et page I-70 « Effet tunnel ».

On peut alors filer la métaphore du relief et mettre en œuvre le vocabulaire de la géomorphologie : les portions connexes des réseaux de transport rapide composent des chaînes de montagnes d'espace-temps ; l'espace est rythmé par des vallées temporelles ; les villes voient se creuser des gouffres d'espace-temps lors de la connexion des réseaux de transport rapide interurbains aux réseaux urbains ; les zones interstitielles s'articulent autour des talwegs – lignes unissant les points bas d'une vallée – créés par les lignes de transport à grande vitesse ; etc.

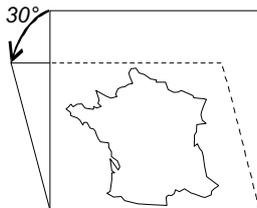
Les cartes en relief basées sur le graphe des arcs minimaux autorisent trois niveaux de lecture :

1. l'analyse de la structure et de la forme spatiale d'un réseau de transport unique, c'est-à-dire la topologie d'un binôme fonctionnel ;
2. l'analyse du système de transport global qui inclut les différents binômes fonctionnels est rendue possible par la lecture de la réalisation du graphe ;
3. on visualise enfin les interactions entre l'espace et le système de transport en analysant la forme du relief d'espace-temps.

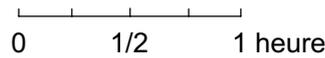
Carte 10 : le relief du TGV français avec les modes minimaux



Angle de vue



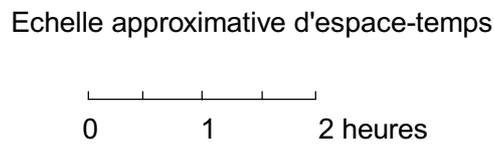
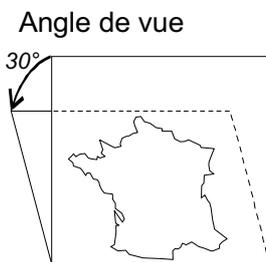
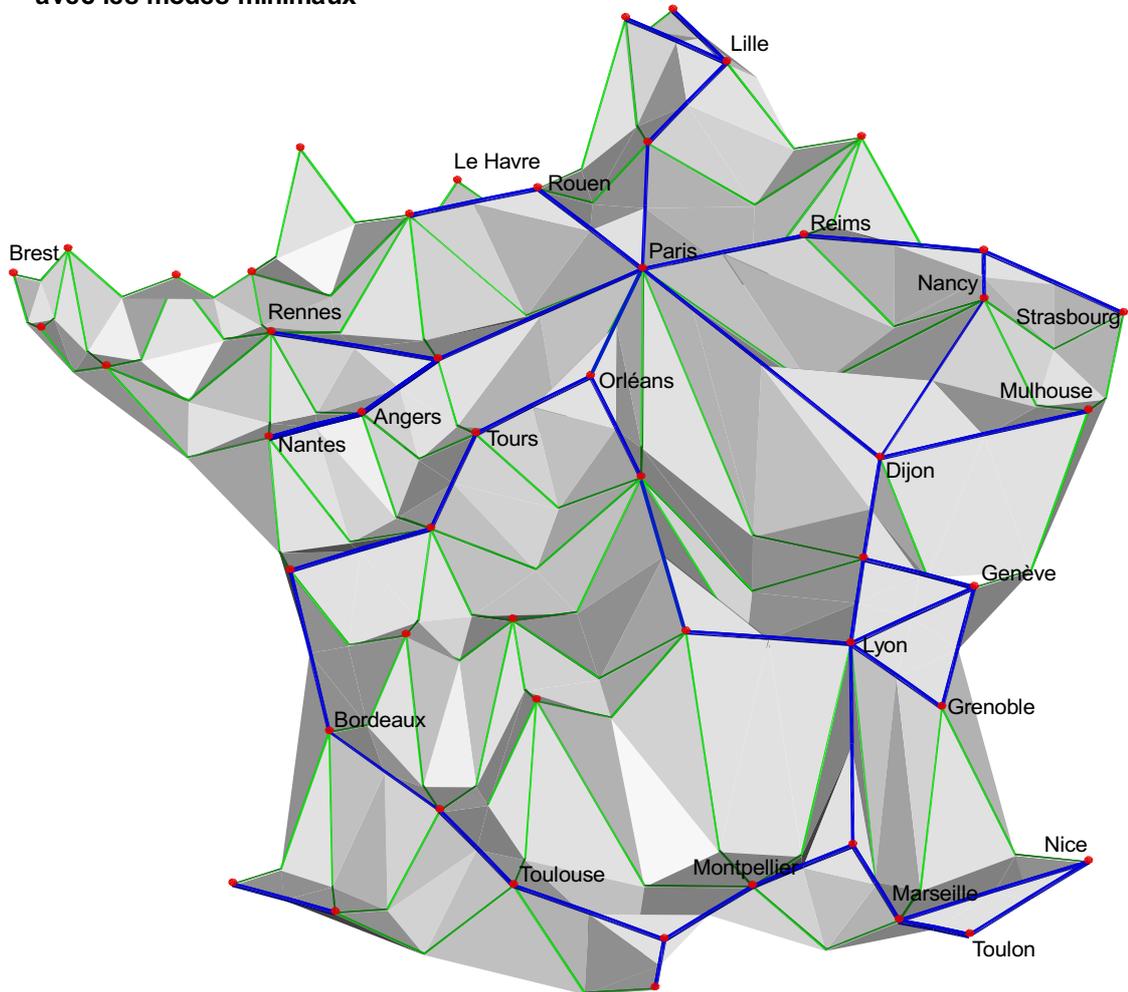
Echelle approximative d'espace-temps



Réseau :

- TGV
- Autoroute
- Route

Carte 11 : le relief des autoroutes avec les modes minimaux



Réseau :

- Autoroute
- Route

Copyrights 1996, Laboratoire du Centre d'Etudes des Supérieures d'Aménagement, Université de Tours. Conception : H. Baptiste, L. Chapelon, S. Laribe, A. L'Hostis, Ph. Mathis, K. Serrhini, avec M. Mayaud, cartographe. Le logiciel MAP ainsi que le principe des cartes en relief sont déposés.

Le modèle et les images

Les cartes en relief sont construites à partir d'un modèle de comparaison de performance des réseaux de transport entre eux. Choisir les réseaux à représenter et l'unité de mesure de la comparaison (la distance, le temps, etc.) relève de la définition du modèle pour reprendre la distinction établie par Pierre Lévy⁴⁵⁷.

Ces choix dans le paramétrage du modèle peuvent être vus comme les outils de l'exploration d'un modèle plus général qui serait celui des représentations en relief ; chaque modalité particulière de ces paramètres donne lieu à un modèle spécifique, ou application spécifique du modèle général.

Tous les choix des angles de vue, de la coloration des facettes, du niveau de zoom et des autres aspects graphiques correspondent, eux, à la définition de l'image, toujours selon la distinction de Pierre Lévy. Rappelons qu'un modèle peut être représenté par une multitude d'images.

L'activité qui consiste à modifier ces paramètres pour obtenir des images différentes correspond en fait à une exploration du modèle fixé.

Si le système est composé de noeuds et de liaisons du réseau de transport, alors l'apparition d'une nouvelle liaison constitue une modification⁴⁵⁸ de ce système. Si cette modification du système consiste en un changement de la vitesse maximum possible sur les liaisons, alors on peut observer une modification du modèle selon un processus qui a été décrit précédemment – une intensification ou une diminution du froissement. De la même manière, la suppression d'une liaison qui modifierait la vitesse maximum possible générerait un nouveau modèle qui permettrait la visualisation de nouvelles images.

Dans le domaine de la synthèse d'images, on distingue **l'espace de modélisation** de **l'espace de représentation**. Le premier contient les formes en trois dimensions, et le second correspond à la description des formes en machine par des « assemblages syntaxiquement corrects »⁴⁵⁹. C'est à partir de la description des formes dans l'espace de représentation que l'on construit la **visualisation**. Dans nos développements, le modèle relève de l'espace de modélisation en tant que structure en trois dimensions, et aussi de l'espace de représentation pour sa description en machine, tandis que les images correspondent à la visualisation.

⁴⁵⁷ Cf. paragraphe intitulé "De la représentation au modèle" à la page 30.

⁴⁵⁸ En termes systémiques l'ajout de liaisons correspond à une complication et/ou une complexification du système.

⁴⁵⁹ Bernard PEROCHÉ, Jacqueline ARGENCE, Djamchid GHAZANFARPOUR, Dominique MICHELUCCI, 1992. - *La Synthèse d'images*. - Paris : Hermès (Traité des nouvelles technologies, série Assistance par ordinateur). - p. 112.

7. Longueur et longueur visuelle

Dans la formalisation du principe de construction des cartes en relief, la première contrainte porte sur la *longueur* des arcs sans qu'il soit question de leur *longueur visuelle*⁴⁶⁰. En cela, on peut constater une différence avec le principe de construction des "cartes en ressort"⁴⁶¹. Sur les cartes en ressort, la longueur visuelle est directement proportionnelle à la longueur effective des arcs, même si, nous l'avons remarqué, la longueur visuelle des ressorts est plus inférée, que lue directement.

Nous avons vu que le principe de construction des cartes en relief peut être assimilé à un modèle général. Les cartes en relief proprement dites sont des vues particulières de ce modèle général. Le modèle général est en trois dimensions. La *longueur* est une contrainte sur ce modèle général. Les images, qu'elles soient réalisées à l'écran ou sur une feuille de papier, sont en deux dimensions. C'est sur les images seulement que l'on peut utiliser la notion de *longueur visuelle*. Notons que, dans le principe général de construction, il n'y a pas de contrainte sur les images.

L'image est créée par la transformation d'une structure en trois dimensions – le modèle – en une forme en deux dimensions – la carte. Le jeu complexe des projections de la structure en trois dimensions sur le plan de la carte, provoque des perturbations dans les longueurs des arcs. Ces perturbations justifient le fait qu'on ait seulement une "échelle approximative" d'espace-temps sur les cartes en relief.

Il s'agit là d'une des limites de la représentation. La longueur visuelle dont on dispose sur les images n'est pas exactement proportionnelle à la longueur effective présente dans les données. Cela se traduit mathématiquement par le fait que la surface en trois dimensions et l'image finale ne sont pas isométriques⁴⁶² : il existe une distorsion due à la projection sur le plan.

De plus, pour les arcs s'inscrivant dans la troisième dimension, la distorsion entre les longueurs visuelles et les longueurs effectives n'est pas homogène. Elle est donc difficile à évaluer visuellement : il faut retrouver la position des segments en trois dimensions. C'est le rôle des grisés que d'aider à reconstruire mentalement le relief pour rendre compréhensible la distorsion induite par la représentation.

8. Angle de vue

Le passage de la structure en trois dimensions de l'espace de modélisation vers l'image en deux dimensions s'effectue par une projection parallèle. Le point de projection est à l'infini, et le plan de l'image n'est pas perpendiculaire à la direction de projection.

⁴⁶⁰ Que nous avons définie au paragraphe "Proposition : de la "distance graphique" à la "longueur visuelle" en page I-123.

⁴⁶¹ Cf. paragraphe "Le graphique "en ressort", page II-159.

⁴⁶² Cf. "Les transformations mathématiques", page I-95.

Le processus de projection s'apparente à la vue cavalière⁴⁶³, à la différence que l'angle de vue n'est pas toujours de 45°.

Sauf mention contraire, toutes les cartes sont inclinées selon un angle de 30° qui permet de visualiser le relief. Cette valeur de l'angle autorise une bonne lisibilité de la forme du relief tout en limitant l'aplatissement horizontal de la configuration. De ce fait, les figures géographiques gardent la même largeur, mais voient leur hauteur amputée d'un facteur $(1 - \cos 30^\circ)$, ce qui la ramène à 86 % de la hauteur de départ. Cette valeur de l'angle permet de visualiser tout aussi bien des reliefs presque plats que d'autres beaucoup plus tourmentés.

Nous avons vu combien la distorsion entre la longueur visuelle et la longueur effective est complexe pour les arcs qui s'inscrivent dans la troisième dimension. Les arcs des liaisons les plus rapides sont dessinés dans le plan. Ils ne sont donc pas projetés et ne subissent pas les distorsions que nous venons d'évoquer. Cependant, du fait de l'angle de vue, la composante verticale des arcs du plan est réduite à 86 % de leur longueur effective. Cela signifie qu'un arc horizontal reste intact, tandis qu'un arc vertical voit sa longueur réduite de 14 %.

9. La topologie de l'image

Nous avons vu que la surface en trois dimensions possède la même topologie que la surface chorotaxique. Cette surface correspond au modèle général, tandis que les images sont des vues de ce modèle, conformément au principe général de construction des images de synthèse. Les images du modèle sont construites par une projection de la structure en trois dimensions sur un plan. Nous avons relevé les distorsions que la projection introduit dans la mesure des longueurs visuelles des arcs⁴⁶⁴.

Intéressons-nous maintenant à la topologie de l'image. La projection agit de différentes manières sur la topologie de la surface. Cela est particulièrement manifeste si l'on se reporte aux représentations de la zone de Poitiers, qui sont présentées plus loin, page II-201. Sur la carte 8, on perçoit toute la surface et tous les triangles des faces du graphe sont visibles. Ce n'est pas le cas sur la carte 10 : les pics d'espace-temps causés par la déformation du TGV sont tellement pointus qu'ils ne présentent plus qu'une seule face. L'image comporte des faces cachées.

On traduit mathématiquement cette assertion, en posant qu'il existe des points de la surface en trois dimensions qui n'ont pas d'image sur la visualisation en deux dimensions. Cela signifie que la projection en deux dimensions ne permet pas d'établir une bijection⁴⁶⁵. Si la transformation n'est pas bijective, alors elle ne peut pas

⁴⁶³ Bernard PEROUCHE, Jacqueline ARGENCE, Djamchid GHAZANFARPOUR, Dominique MICHELUCCI, 1992. - *op. cit.* - p. 42.

⁴⁶⁴ Cf. "Longueur et longueur visuelle", page II-194.

⁴⁶⁵ Cf. annexe mathématique, "Bijection", page 209.

être un homéomorphisme qui est une application bijective et bicontinue. En conséquence, la projection de la surface en trois dimensions sur un plan risque d'introduire des distorsions topologiques.

On vérifie ce point sur la carte 10 : les noeuds du réseau sont situés aux sommets des "pics" d'espace-temps. Dans l'arrière plan des noeuds – nous mêlons le vocabulaire de description des formes tridimensionnelles et celui des formes planes – on trouve le flanc d'un autre pic d'espace-temps. Sur l'image en deux dimensions, les noeuds semblent entrer en contact avec une portion d'espace située en réalité plus loin. On construit alors de "fausses" proximités. La perturbation des proximités sur un espace correspond à une modification de sa topologie.

Si l'on se réfère à la déformation d'une feuille de caoutchouc, la projection de la surface du relief sur la carte 10 est produite par pliage et superposition ; nous avons exprimé le fait que de telles opérations équivalent à une rupture dans la topologie⁴⁶⁶.

Conclusion

On construit les représentations en relief en réalisant le graphe du système de transport sur une surface complexe. Nous avons attaché la surface de l'espace au graphe routier parce que celui-ci est, de tous les réseaux modernes, le plus proche du continuum spatial : c'est un réseau de transport universel.

Les cartes en relief naissent de la comparaison des réseaux de transport entre eux. Les réseaux de transport rapide qui apparaissent n'éliminent pas totalement les systèmes antérieurs de déplacement. Ceux-ci sont déclassés par les performances meilleures des nouveaux réseaux, mais néanmoins ils perdurent. Nous construisons une représentation cohérente du réseau de transport en déformant les arcs moins performants dans la troisième dimension de la représentation.

La structure obtenue est complexe : elle peut être vue comme une superposition de surfaces non planes. Nous représentons uniquement la surface de réalisation du graphe routier. Pour établir cette surface nous imposons de nouvelles contraintes au graphe : les arcs doivent être des segments rectilignes, et les faces doivent être toutes triangulaires. Ainsi, la surface en trois dimensions s'appuie sur des arcs représentés par deux segments brisés dans le plan de coupe de la liaison, et en dessous du pan chorotaxique.

La déformation de la surface de réalisation du graphe routier due à la comparaison avec les modes rapides nous indique la déformation de l'espace.

⁴⁶⁶ Cf. "Topologie", page I-86.

Les cartes en relief substituent une métrique de graphe à la métrique euclidienne du plan chorotaxique. En ce sens, la transformation de l'espace est non isométrique. Cependant, **la transformation de la surface chorotaxique en cette surface complexe conserve la topologie de celui-ci.**

Les cartes en relief sont basées sur l'hétérogénéité du réseau de transport ; on peut même affirmer qu'elles caractérisent cette hétérogénéité.

Les contraintes de construction des cartes en relief autorisent une assez grande liberté dans la forme du tracé des arcs ; par contre, la position chorotaxique des noeuds du réseau doit être maintenue.

Nous introduisons une variante du principe général, en appuyant la surface de l'espace sur les arcs minimaux du graphe. Cette nouvelle forme de représentation demande une vigilance plus grande lors de la modélisation du réseau. Pour obtenir un relief "intéressant", il faut établir un graphe dont la densité de sommets par unité de surface est égale à la densité du réseau le moins dense de tous les réseaux considérés. Une représentation en relief basée sur les arcs minimaux de l'espace français aura une densité de sommets équivalente à la densité de points d'entrées du réseau TGV.

En respectant cette contrainte supplémentaire on obtient des images très riches. Le relief a une forme plus complexe que sur les cartes basées sur le modèle général. On voit apparaître des vallées qui figurent les espaces interstitiels et des lignes de crêtes pour les liaisons à grande vitesse.

Les représentations en relief qui sont présentées dans ce travail apparaissent sous la forme de cartes figurées sur une feuille de papier. Ce sont des images construites à partir d'un modèle en trois dimensions. Pour un modèle – un graphe de réseau de transport –, il existe une infinité d'images possibles, conformément aux propriétés des images de synthèse. Les angles de vue sont des paramètres sur lesquels on agit pour explorer l'infinité des images du modèle. Couplés avec l'estompement des facettes du relief ils confèrent au modélisateur une très grande latitude pour élaborer une "représentation de la réalité créée pour un propos déterminé" dans l'esprit de la définition du modèle selon Peter Haggett.

Nous avons introduit la notion de longueur visuelle dans le but de produire des représentations de métriques non-euclidiennes. La longueur visuelle nous permet d'explicitier les mesures de la distance de graphe des cartes en relief. Moyennant quelques distorsions dues au système de projection d'une structure en trois dimensions sur un plan, nous construisons ainsi une échelle approximative d'espace-temps. Celle-ci est fournie avec les cartes en relief.

Ainsi, l'image sur le plan ne possède pas toujours la même topologie que la surface en trois dimensions. Nous avons vu également que l'image n'est pas non plus isométrique par rapport à la surface. Est-ce à dire que nous n'avons pas atteint l'objectif énoncé en

conclusion de la première partie de la thèse⁴⁶⁷ qui était de construire une représentation non isométrique, mais conservant la topologie de la surface chorotaxique ?

Le modèle en trois dimensions est conforme aux orientations que nous nous sommes fixées : il n'est pas isométrique par rapport au plan chorotaxique, car il est basé sur la distance de graphe, mais il conserve la topologie de celui-ci. Par contre l'image finale introduit des distorsions. Il faut insister sur le fait que les écarts à la topologie et à la métrique de la surface en trois dimensions sont entièrement imputables au fait que l'on projette la structure complexe sur un plan.

L'œil humain perçoit les volumes par stéréoscopie : les deux images – en deux dimensions qui se forment sur la rétine – sont traitées par le cerveau qui reconstruit ainsi les trois dimensions⁴⁶⁸. Cependant, la perception du relief peut être simulée par une technique de représentation particulière : la perspective.

Nous introduisons des grisés sur les triangles pour simuler la forme du relief. Ainsi, le lecteur reconstruit mentalement la forme en trois dimensions. L'angle de vue, les grisés et la projection permettent de construire une vue en perspective du relief. La perspective a pour rôle de faire correspondre l'image en deux dimensions à la vision dans l'espace. De cette façon, le lecteur reconstruit le relief. Ce faisant, il reconstruit également la topologie de la structure en relief. En effet, la lecture de la carte 10, on reconstruit le relief et l'on comprend que le noeud situé au sommet d'un pic d'espace-temps n'est pas en contact direct avec la base du pic situé derrière. La lecture du relief permet de reconstituer la topologie de la structure en trois dimensions, malgré les distorsions introduites par la projection.

Finalement, l'objectif de conservation de la topologie est atteint. Par la compréhension du relief, le lecteur peut comprendre la topologie de la surface complexe, mais aussi comprendre la métrique du graphe.

Les cartes en relief établissent donc bien une transformation homéomorphique du plan chorotaxique, et offrent une image cohérente de la métrique de graphe, en d'autres termes elles réalisent une transformation non isométrique du plan euclidien.

⁴⁶⁷ Cf. page I-139.

⁴⁶⁸ P. FLEURY, 1968. - « Vision ». - in *Encyclopædia Universalis*, Tome corpus 16. - p. 883.

Section 2 Cartographie d'analyse

Nous avons exposé dans la section précédente le principe de la méthode, et nous avons illustré le propos par deux cartes en relief basées sur les arcs minimaux du graphe.

Maintenant, nous allons expliciter et commenter les représentations en relief, sur la base d'une analyse des effets des réseaux de transport sur l'espace. Pour cela nous utilisons deux applications de la méthode : une modélisation de la région Poitou-Charentes dans le cadre du développement du réseau TGV entre Tours et Bordeaux, avec un zoom sur la zone de Poitiers⁴⁶⁹, et une modélisation des réseaux de transport rapide français dans l'état actuel.

A. *La zone de Poitiers (présentation de la carte)*

La carte 8, la carte 9 et la carte 10⁴⁷⁰, page II-201, nous montrent le processus de contraction de l'espace sous l'effet des moyens de transport rapides. La première carte est celle de l'espace routier de la zone de Poitiers. La surface n'est pas tout à fait plane, car, on a décomposé le réseau routier en réseaux partiels se distinguant par des vitesses moyennes. Dans les représentations en relief de temps, on représente la liaison la plus rapide par un arc inscrit dans le plan, un arc "plat". Pour la carte 8, il s'agit des arcs du réseau partiel des routes à 2x2 voies admettant des automobiles roulant à 90 km/h de moyenne. La comparaison entre ce réseau partiel et les autres réseaux routiers partiels à 50, 60 et 70 km/h donne l'intensité de la contraction. Le différentiel de vitesse est ici de $90 / 50 = 1,8$. Ce différentiel donne naissance à une surface faiblement froissée, peu éloignée du plan de la carte géographique.

La carte 9 montre l'apparition de l'autoroute sur l'espace poitevin. La contraction se fait plus intense, le "froissement" de l'espace aussi. Sur la carte en relief, Lusignan semble se rapprocher de Poitiers : en fait, les localisations spatio-temporelles des deux points se rapprochent, mais la distance qui les sépare n'est pas modifiée. Il s'agit là de l'une des propriétés les plus intéressantes des cartes en relief. **Ce type de transformation permet de conserver les longueurs en durée (valeurs données par la distance de graphe) des arcs du graphe du réseau de transport.**

Le relief du TGV apparaît sur la carte 10. Ce relief est beaucoup plus accentué. En effet, le différentiel de vitesse atteint ici la valeur de **4,4**, ce qui signifie qu'un arc routier à 50 km/h aura une longueur **4,4** fois plus importante que la distance à vol d'oiseaux entre les deux sommets du graphe. Lusignan est maintenant très proche de

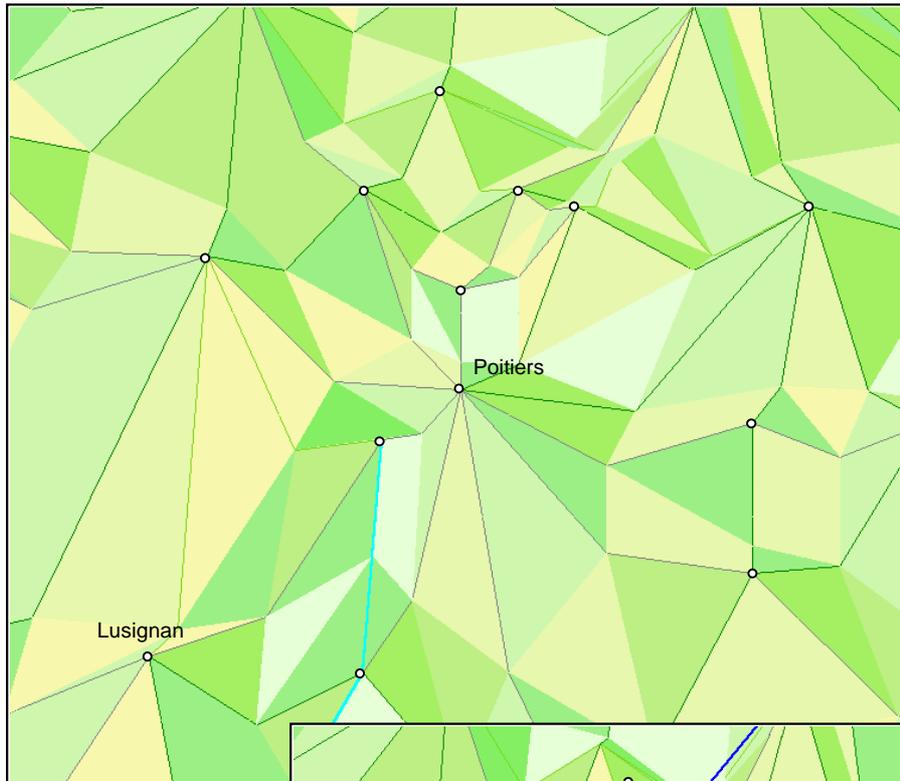
⁴⁶⁹ Cf. note de bas de page n° 115, page 34.

⁴⁷⁰ Ces trois cartes apparaissent dans une publication : Laurent CHAPELON, Alain L'HOSTIS, Philippe MATHIS, 1995. - *Modélisation nodale du transport de personnes : fondements théoriques et imagerie*. - communication au colloque INRETS-TRACES « Grandes infrastructures de transport et territoires, Lille, 8-9 juin 1995 ». - 24 f. dactyl. - (publication en cours).

Poitiers en distance “à vol d'oiseaux”, mais, on voit parallèlement se former des vallées profondes, des fractures spatiales, qui expriment la rencontre entre deux réseaux aux logiques contraires : les liaisons à grande vitesse unissant les “villes TGV” et l'ensemble des liens de desserte de l'espace régional. Au travers de l'émergence de “pics” élevés, aux sommets desquels on retrouve les sommets du graphe du réseau de transport, on assiste à une sorte “d'atomisation” de l'espace. L'espace n'est plus ni homogène ni isotrope, il subit des déformations orientées selon un processus qu'on peut assimiler à un “chiffonnement”.

Il est important de noter que l'angle de vue est indispensable pour mesurer l'effet visuel de la déformation de l'espace : il sert à mettre en perspective le relief d'espace-temps.

carte 8 : la zone de Poitiers, la route seule
 carte 9 : la zone de Poitiers, la route et l'autoroute
 carte 10 : la zone de Poitiers, la route et le TGV



Les trois images sont à la même échelle d'espace-temps.

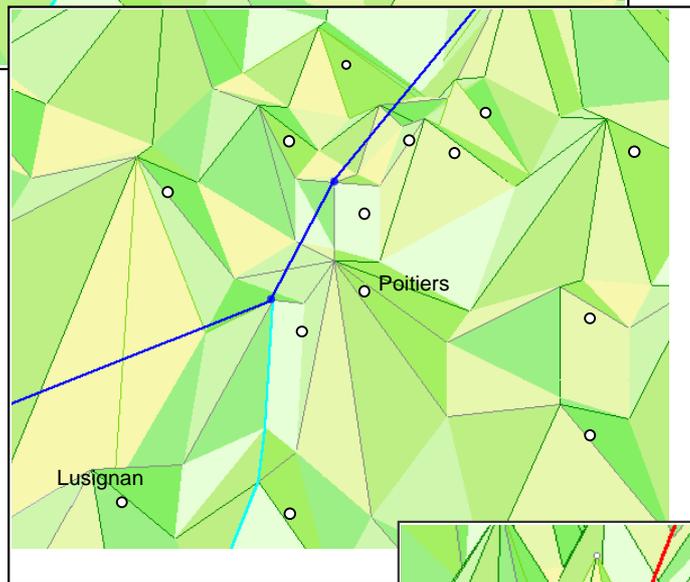
Angle de vue :

30°



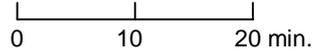
Carte 12 : La route seule

L'angle adopté (30°) ainsi que les nuances de gris facilitent la perception des différences entre les modes de transport.



Carte 13 : La route et l'autoroute

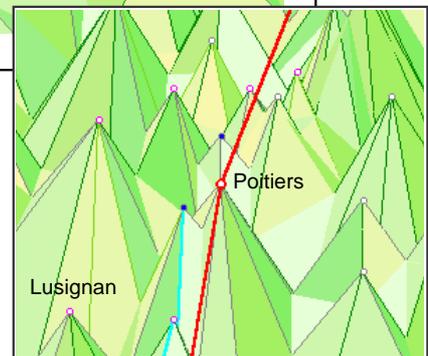
Echelle approximative d'espace-temps (commune aux 3 cartes) :



Conception et réalisation :
 L. Chapelon, A. L'Hostis,
 Ph. Mathis,
 avec la collaboration de :
 M. Mayaud - Cartographe

© Laboratoire du Centre
 d'Etudes Supérieures
 d'Aménagement, Tours,
 1996.

Liaison en (vitesses moyennes) :
 — T.G.V. (220 km/h)
 — autoroute (110 km/h)
 — route (70 km/h)



Carte 14 : La route et T.G.V.

1. Hiérarchie des réseaux

François Plassard⁴⁷¹ propose une typologie des réseaux de transport en quatre groupes :

les réseaux de proximité sont destinés à irriguer un territoire de petite taille (le réseau urbain dans la ville, les routes départementales) : la maille en est très petite, de l'ordre de quelques kilomètres. C'est, selon les lieux, le monopole de la marche à pied, des transports urbains ou de l'automobile ;

les réseaux intermédiaires, à l'échelle d'une région (le réseau autoroutier, le réseau ferroviaire régional, etc.), concernent toutes les villes moyennes ; la maille est de l'ordre de 50 à 100 kilomètres. C'est la dimension des relations régionales, la concurrence y est forte entre autoroutes et relations ferroviaires ;

les réseaux longs concernent les étapes, nationales ou internationales, de plusieurs centaines de kilomètres : on y trouvait jusqu'à présent surtout l'avion, et pour une faible part l'autoroute. C'est sur ce créneau qu'est venu prendre place le TGV. Les temps de parcours qu'il autorise entre deux villes le placent en concurrence directe avec l'avion pour des distances inférieurs à 1000 km ;

les réseaux intercontinentaux, aériens ou maritimes, n'ont besoin que de quelques points d'entrée à l'échelle d'un continent.

Les quatre réseaux que nous venons d'évoquer s'établissent en une hiérarchie qui répond à celle des centres urbains⁴⁷². Quand on observe un réseau de transport au cours de l'histoire, après la création d'un ensemble de tronçons isolés, on passe à une structure arborescente, fortement hiérarchisée, puis, peu à peu, à une structure plus maillée. Le développement du réseau des chemins de fer, du 19^{ème} au 20^{ème} siècle, a suivi ce type d'évolution⁴⁷³. C'est vrai aussi de la constitution d'un réseau de lignes de trains à grande vitesse sur le territoire français. Après la période de création de tronçons isolés – la ligne Paris-Lyon, les lignes du TGV Atlantique et du TGV Nord – le temps est à la réalisation de l'interconnexion, qui consiste en de courts tronçons de liaison en région parisienne. Le résultat en est la constitution d'un véritable réseau, qui possède la propriété de forte connexité, mais qui est totalement arborescent et centré sur Paris. La phase ultime de maillage n'est présente qu'à l'état de projet, dans les schémas directeurs français et européen.

⁴⁷¹ François PLASSARD, 1991. - *op. cit.* - p. 22.

⁴⁷² François PLASSARD, 1995. - « Les Régulations, les nouveaux équilibres : la régulation économique ». - p. 192. - in Se déplacer au quotidien dans trente ans. - Actes du colloque de Paris du 22 et 23 mars 1994. - Paris : La documentation française.

⁴⁷³ Cf. une étude du réseau ferré hollandais : Piet RIETVELD, 1995. - *Urban growth and the development of transport networks*. - Communication à la « Rencontre européenne sur l'interconnexion », N.E.C.T.A.R./INRETS-TRACES/GDR Réseaux CNRS, Lille, 29 janvier 1995.

Le réseau routier a eu pour effet une certaine homogénéisation spatiale, quand la propriété d'universalité⁴⁷⁴ a été atteinte. Progressivement, avec l'apparition du réseau routier à grande vitesse (les autoroutes), une hiérarchie est réapparue où l'on distingue les liaisons rapides et les liaisons classiques. C'est dans cette logique de déploiement hiérarchisé que s'inscrit le développement de la grande vitesse ferroviaire.

2. Sur les cartes en relief

Chacune des trois représentations en relief (Poitiers et sa région) compose un espace dont l'intensité de la contraction est donnée par le différentiel entre la vitesse de parcours sur route, et la vitesse de l'arc le plus rapide du mode de transport le plus rapide sur tout l'espace. On considère à chaque fois la même portion d'espace-temps, mais avec une mesure de contraction différente.

Il est possible de s'intéresser à l'évolution de l'espace après la construction du TGV. On peut aussi considérer chaque espace sous l'aspect qu'il offre relativement à l'échelle et surtout à la vitesse du déplacement qu'on effectue. La théorie de la Relativité nous explique qu'à chaque référentiel spatial est associé un temps propre, reliant ainsi indissociablement l'espace et le temps. Par analogie, les représentations en relief de temps font référence à la liaison la plus rapide et dessinent ainsi des espaces relatifs : l'espace des déplacements internes à la région dont la référence est la route à 2x2 voies, l'espace des déplacements interurbains associé à l'autoroute et enfin l'espace de la grande vitesse qui se forme lors de la prise en compte du TGV.

On est donc fondé à dresser une typologie de la mobilité définie par l'échelle spatiale des déplacements. Une telle typologie, en trois classes, est proposée par Pierre Merlin⁴⁷⁵ :

l'échelle locale des migrations alternantes⁴⁷⁶, des achats et des déplacements quotidiens ;

l'échelle régionale correspond à des déplacements très divers, notamment certains déplacements professionnels et les migrations hebdomadaires vers les résidences secondaires et autres lieux de séjour ;

l'échelle inter-régionale et au delà internationale, est celle de nombreux déplacements à but professionnel et de déplacements de vacances.

Pour François Plassard, « il serait simpliste de croire qu'un seul réseau, même s'il est dominant, est capable à lui seul de structurer l'espace »⁴⁷⁷. Et il ajoute : « le système de

⁴⁷⁴ Cf. paragraphe "Réseau routier : l'universalité", page I-130.

⁴⁷⁵ Pierre MERLIN, 1994. - *op. cit.* - p. 74.

⁴⁷⁶ Les migration alternantes, appelées parfois migrations pendulaires, désignent les déplacements du domicile vers le lieu de travail et les retours, du lieu de travail vers le domicile.

transport est en effet composé d'une multitude de réseaux qui s'enchevêtrent dans des relations de concurrence ou de complémentarité, voire d'indépendance totale »⁴⁷⁸. Avec les cartes en relief, on construit une image de cette confrontation de réseaux.

B. La France à 189 sommets

La France continentale a été modélisée sous la forme d'un graphe composé de 189 sommets qui correspondent aux principales agglomérations ainsi qu'aux noeuds importants des réseaux de transport. Entre ces noeuds, les arcs routiers et les arcs de l'autoroute et du TGV composent un graphe qui modélise le réseau de transport.

Les trois cartes en relief qui suivent (la carte 11 : le relief de l'autoroute pour la France à 189 points, la carte 12 : le relief du TGV pour la France à 189 points, et la carte 13 : le relief du TGV pour la France à 189 points) sont en cours de publication dans la revue *Mappemonde*⁴⁷⁹.

Sur ces cartes, la description de l'espace est suffisamment fine pour restituer la forme générale des frontières physiques et politiques. Le lecteur de la carte peut reconnaître le contour et ainsi relier la représentation à la forme générale du territoire français. Quand on construit des cartes déformées de l'espace, il est important de faire référence explicitement à des conventions graphiques de lecture telles que le contour des frontières.

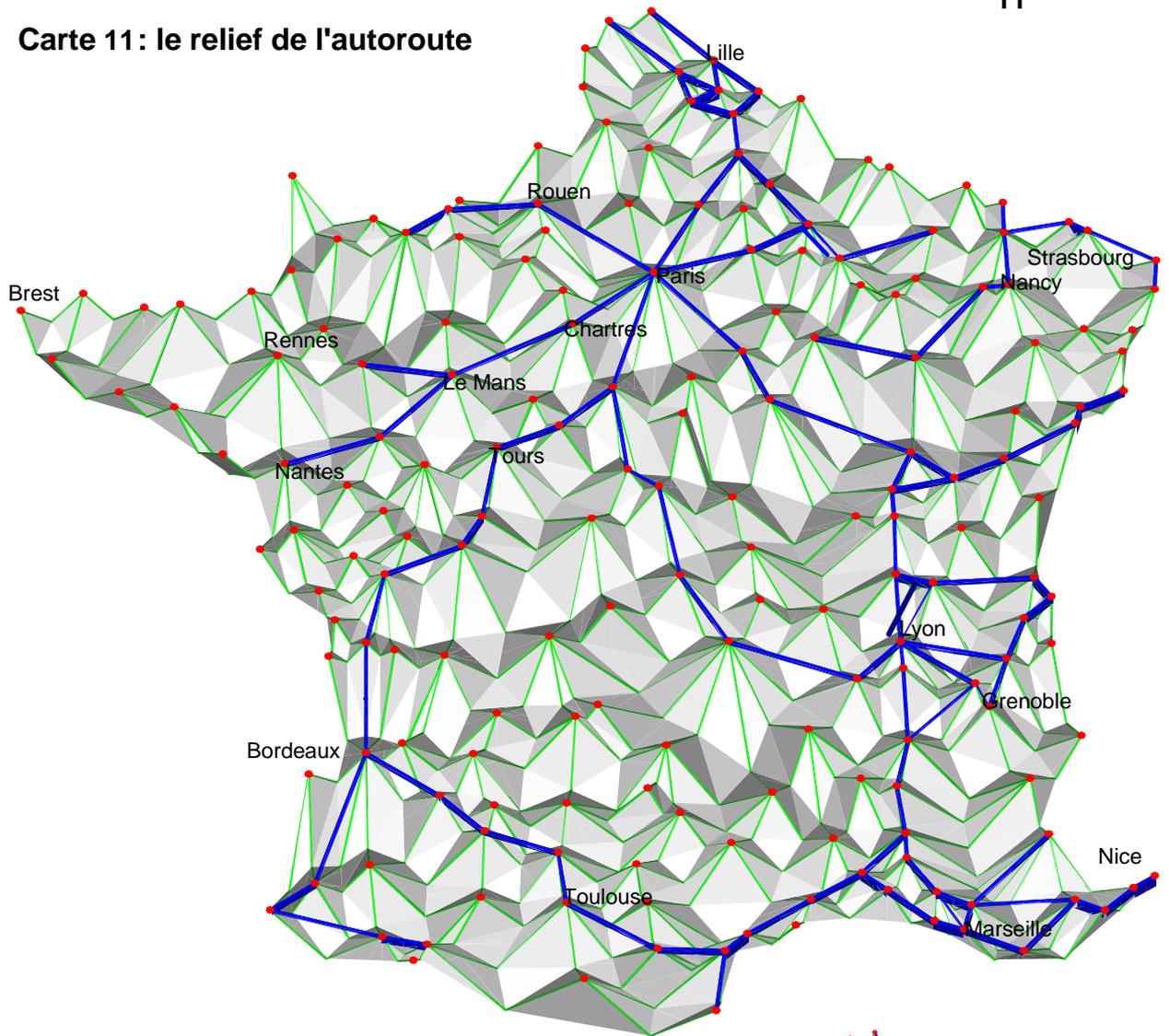
En comparant attentivement les deux représentations, on peut constater une accentuation des "pentes" du relief et par conséquent de la "profondeur" des "vallées". Cela est dû au fait que le mode le plus rapide, qui donne la mesure du "froissement" de l'espace, a changé : le TGV supplante l'autoroute.

⁴⁷⁷ François PLASSARD, 1991. - *op. cit.* - p. 22.

⁴⁷⁸ *Ibid.*

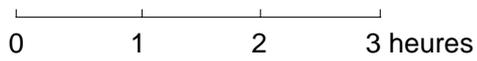
⁴⁷⁹ Alain L'HOSTIS, 1996. - « Transports et Aménagement du territoire : cartographie par images de synthèse d'une métrique réseau ». - *Mappemonde*, France, n° 3.

Carte 11: le relief de l'autoroute

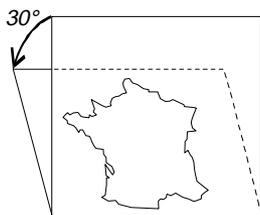


Légende commune aux deux cartes :

Echelle approximative d'espace-temps

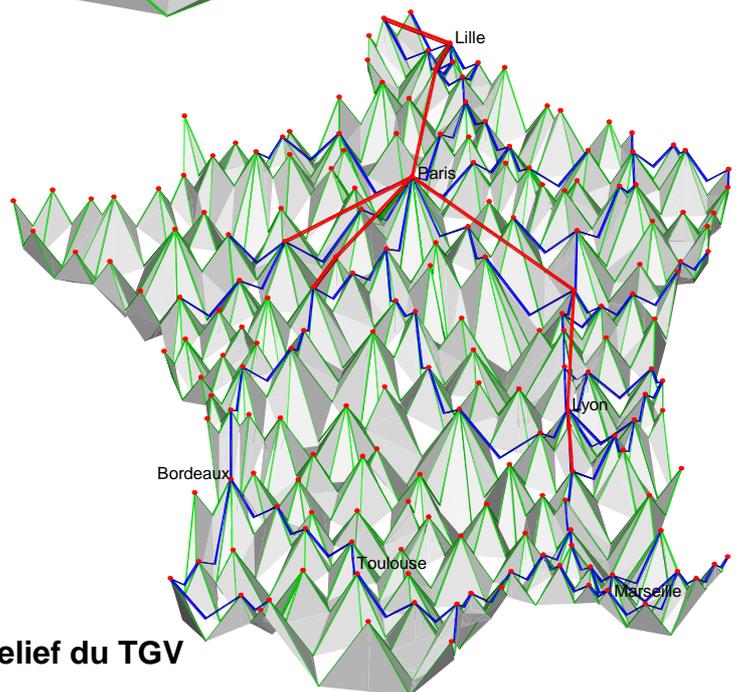


Angle de vue



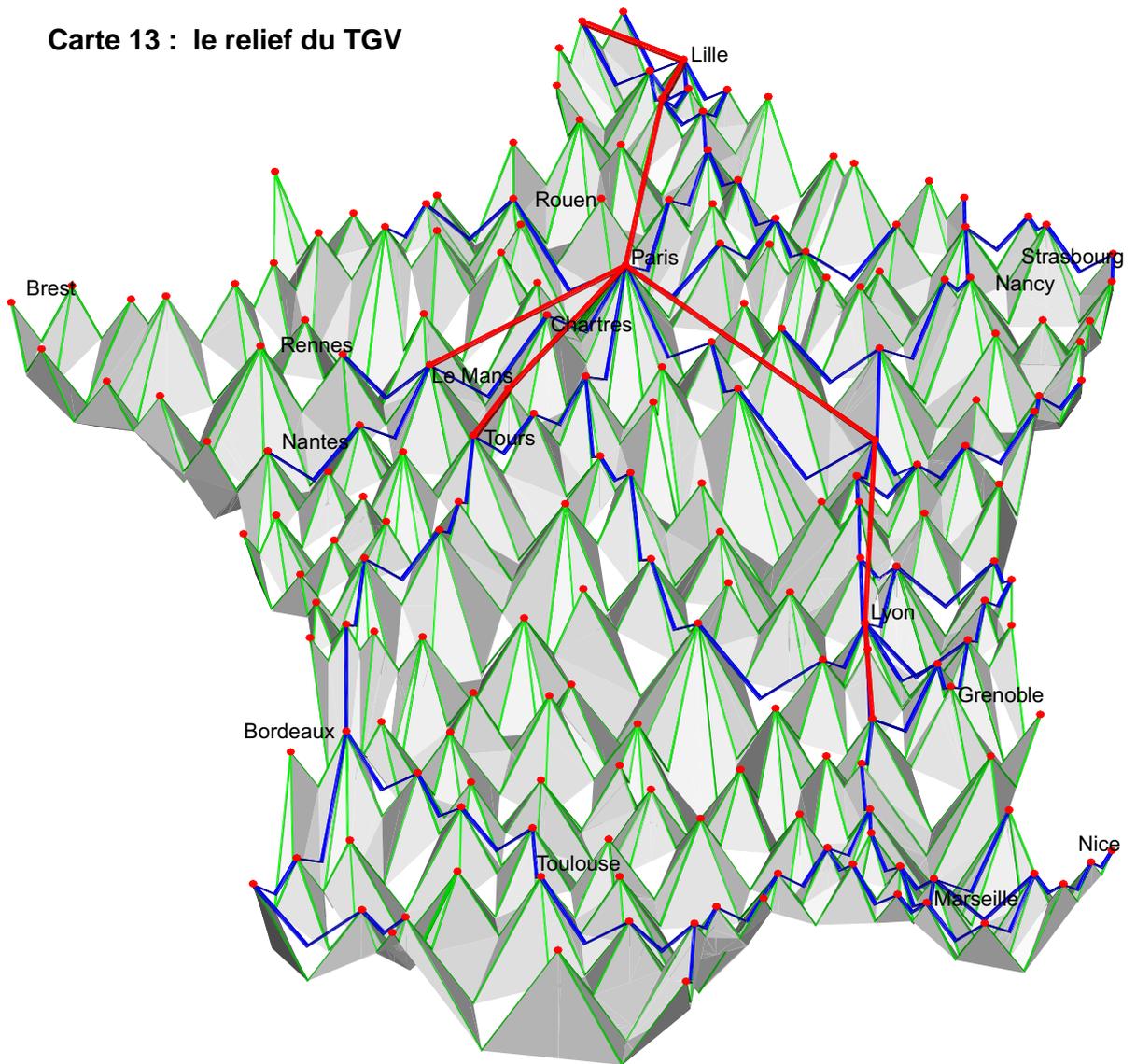
Réseau :

- TGV
- Autoroute
- Route

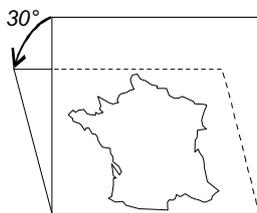


Carte12: le relief du TGV

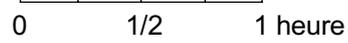
Carte 13 : le relief du TGV



Angle de vue



Echelle approximative d'espace-temps



Réseau :

- TGV
- Autoroute
- Route

Copyrights 1996, Laboratoire du Centre d' Etudes des Supérieures d'Aménagement, Université de Tours. Conception : H. Baptiste, L. Chapelon, S. Larribe, A. L'Hostis, Ph. Mathis, K. Serrhini, avec M. Mayaud, cartographe.

De l'anamorphose à la carte en relief

La carte en anamorphose montre un espace français rétréci, un espace dont l'étendue spatiale a été réduite. Sur la carte en relief, on constate aussi un rétrécissement global, mais l'espace est toujours présent. Le froissement repousse l'étendue spatiale au fond des vallées, mais ne la supprime pas.

Les deux images montrent chacune un aspect de la réalité. On commence par lire l'anamorphose qui montre un rétrécissement global ainsi que des rétrécissements selon des directions privilégiées. Ensuite, on consulte la carte en relief qui nous montre le sort réservé aux espaces interstitiels. On retrouve l'idée d'un effet tunnel, d'une amélioration qui opère "de point à point" et non de manière continue sur l'espace.

2. L'effet tunnel du TGV

Sur la carte 13, on peut voir le réseau TGV qui surplombe l'espace interstitiel. On a ainsi l'image d'un réseau qui ne dessert que quelques grandes destinations du fait même que son mode de parcours est la grande vitesse. Et l'on observe, avec François Plassard, que « des transports somme toute rentables accouchent de régions-villes, avec ici ou là des espaces creux »⁴⁸⁰. D'autres analogies permettent de décrire ces phénomènes : « à des axes et surtout, à vrai dire, des îlots – [...] les "TGVilles" – bien connectés, de moins en moins nombreux et de plus en plus puissants, s'opposeraient des aires interstitielles peu accessibles »⁴⁸¹. Les axes du TGV relient des pôles distants en ignorant les "creux" peu accessibles des espaces traversés. Comme l'indique Pierre-Henri Derycke, « les nouveaux modes de transport rapides : autoroutes, lignes aériennes, TGV, réseaux câblés, etc. n'assurent une bonne connexité qu'aux étages supérieurs de l'armature urbaine »⁴⁸². Entre ces étages supérieurs, les lignes sont inaccessibles, dépourvues d'entrées comme de sorties, à la manière d'un tunnel, les espaces intermédiaires sont effacés⁴⁸³. La carte du réseau TGV ainsi réalisée montre de façon flagrante la rareté des points d'accès, condition *sine qua non* de sa performance.

3. Un espace virtuel

Une personne empruntant une liaison à grande vitesse perçoit l'espace selon l'étalon de mesure d'espace-temps donné par la vitesse de déplacement (220 km/h). Cet espace est contracté, à la manière des cartes par anamorphose. Cette contraction s'accompagne, dans les cartes en relief, d'un froissement qui permet de conserver les longueurs réelles des liaisons entre les noeuds. Le plan des villes est affecté d'une contraction globale, mais les liaisons entre les villes gardent leur longueur d'espace-

⁴⁸⁰ François PLASSARD, 1995. - *op. cit.* - p. 193.

⁴⁸¹ Jean-Jacques BAVOUX, Jean-Bernard CHARRIER, 1994. - *op. cit.* - p. 64.

⁴⁸² Pierre-Henri DERYCKE, 1994. - *op. cit.* - p. 347.

⁴⁸³ François PLASSARD, 1991. - *op. cit.* - p. 23.

temps. Les noeuds non accessibles par liaison à grande vitesse sont ainsi rapprochés, mais de manière virtuelle, car les temps d'accès restent constants.

Les cartes en relief montrent un espace tel qu'il est virtuellement perçu par un passager du TGV. La distance à vol d'oiseaux séparant les villes diminue : elle correspond à la distance-temps qui existerait si une ligne à grande vitesse était construite.

C. *Propriétés des cartes en relief*

1. **La ligne droite euclidienne n'est pas le plus court chemin**

On peut constater visuellement sur la **Erreur! Source du renvoi introuvable.**, page II-191, que la longueur de la liaison en TGV entre Tours et Paris additionnée de la longueur de la liaison entre Paris et Lyon est plus courte que la somme des longueurs des segments brisés composant le chemin "direct" par la route Tours-Bourges-Lyon.

Nous avons obtenu une représentation du graphe du réseau de transport qui est cohérente en terme de durée, avec des modes caractérisés par des vitesses différentes, et ce, bien que les positions relatives géographiques des lieux aient été conservées.

A partir des durées de transport par différents modes, une distance de graphe a été construite. Cette distance possède les propriétés d'unicité, de positivité, de symétrie, ainsi que la propriété de l'inégalité triangulaire. **Les cartes en relief sont une représentation graphiquement cohérente de cette distance de graphe**, car elles en vérifient les propriétés.

2. **L'ubiquité**

On peut pousser le raisonnement aux limites et imaginer la création d'un moyen de transport immédiat, caractérisé par une vitesse infinie. La contraction de l'espace serait telle que tous les lieux seraient confondus en un seul. Cependant, les autres moyens de transport existants seraient représentés par des vallées de profondeur infinie. C'est-à-dire que l'espace interstitiel lui aussi serait rejeté dans des vallées infiniment profondes donc inaccessibles. On obtiendrait alors un espace réduit à un seul point, mais un espace inaccessible.

Or, nous pouvons affirmer sans trop de risques, comme Donald G. Janelle⁴⁸⁴, qu'il existera toujours une certaine distance (une "friction") entre les lieux, une distance que les moyens techniques futurs n'effaceront jamais complètement.

Comme l'affirme J. M. Blaut, « la simultanéité implique le chevauchement de l'espace-temps »⁴⁸⁵, c'est-à-dire la superposition en une même localisation de deux

⁴⁸⁴ Donald G. JANELLE, 1968. - *op. cit.* - p. 8.

points distincts de l'espace-temps. On a vu⁴⁸⁶ que le chevauchement caractérise la perte de la topologie, c'est-à-dire la rupture de la structure profonde de l'espace.

3. Un espace de synthèse

Dans le domaine de la cartographie, l'espace et l'ensemble des objets que l'on peut y distinguer peuvent « se représenter par des assemblages, des combinaisons de trois types d'unités : points, lignes et aires »⁴⁸⁷.

Ces unités forment une représentation « constructiviste »⁴⁸⁸ de l'espace : avec deux points, on construit un segment droit ; plusieurs segments forment soit un morceau de réseau, soit un polygone, c'est-à-dire une surface.

Sur les cartes en relief, on retrouve ces trois types d'éléments :

les villes, les noeuds du réseau sont des points ;

les liaisons entre les noeuds sont des lignes, simples ou composées (les lignes brisées) ;

les triangles qui composent le relief sont des polygones élémentaires (surfaces).

Les cartes en relief se construisent à partir d'un ensemble de données (les localisations, les distances en kilomètres et les vitesses moyennes) qui sont traitées automatiquement par un procédé informatique générant une juxtaposition de formes graphiques élémentaires. Tout ce processus génère une image de synthèse. Celle-ci nous propose une nouvelle vision de l'espace qui modifie la perception que nous en avons. Les représentations en relief sont synthétisées à partir d'un savoir et nous donnent accès à un nouveau savoir.

Les cartes en relief constituent un outil de recherche qui apporte une connaissance nouvelle sur l'espace de l'Aménagement et les transports. Nous vérifions ainsi l'hypothèse que nous avons formulée à la fin du chapitre liminaire : **les cartes en relief sont un modèle décisionnel comportant une dimension heuristique qui permet la fonction de recherche.**

⁴⁸⁵ « Simultaneity implies space-time overlap. » - J. M. BLAUT, 1961. - *op. cit.* - p. 2.

⁴⁸⁶ Cf. page I-95, "L'importance de l'homéomorphisme".

⁴⁸⁷ *Chiffres et cartes.* - *op. cit.* - p. 44.

⁴⁸⁸ *Ibid.*

D. Une relecture de trois modèles d'analyse spatiale

1. L'inversion de l'espace

Pour décrire les effets des moyens de transport rapides, William Bunge introduit l'idée d'une inversion de l'espace⁴⁸⁹. Pour effectuer un chemin minimal en durée, il est parfois nécessaire de rebrousser chemin.

La figure 23, reproduite à partir de l'ouvrage de William Bunge, nous donne une illustration de ce phénomène. Les villes de Seattle, Butte (Montana) et Chicago sont positionnées sur une ligne, et dans cet ordre. Cependant, à partir de Seattle, du fait de la localisation des aéroports, Chicago est plus proche en distance-temps que Butte. L'ordre géographique des proximités est inversé. Les terminaux des réseaux de transport rapide ont la propriété d'inverser l'espace.

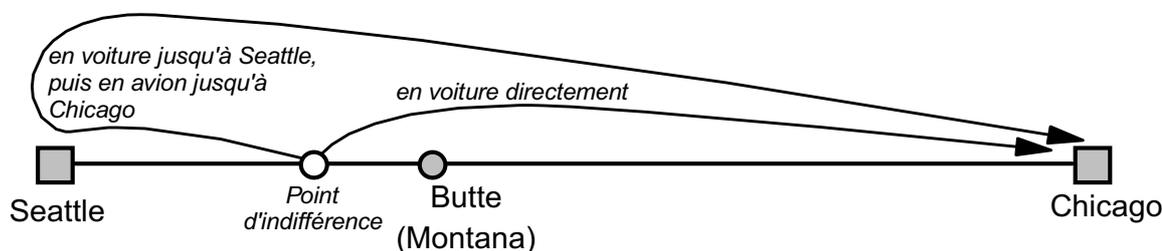


figure 23 : l'inversion de l'espace⁴⁹⁰

Les cartes en relief montrent clairement cet effet d'inversion. Sur la **Erreur! Source du renvoi introuvable.**, présentée au début de ce travail à la page **Erreur! Signet non défini.**, à partir d'un point situé à proximité de Paris, par exemple Rambouillet, il est préférable, pour atteindre une ville proche, comme Tours ou Le Mans, de rejoindre par la route un moyen de transport rapide – le TGV – plutôt que d'effectuer le voyage intégralement en voiture. Nous présentons, ci-dessous, une vue en coupe de la **Erreur! Source du renvoi introuvable.** qui montre les villes en question ainsi que les arcs du réseau TGV et de la route. Ce schéma s'inspire de celui de William Bunge. Remarquons que sur la vue en coupe, les longueurs visuelles correspondent exactement aux longueurs effectives. En effet, pour construire la coupe, aucune projection complexe n'est nécessaire. Sur la carte en relief, l'échelle est approximative ; sur la coupe, elle est exacte.

Sur la carte en relief, Rambouillet est positionné sur le flanc du pic d'espace-temps parisien ; pour établir le chemin le plus rapide il faut remonter la pente, puis emprunter l'arc du TGV. La première partie du chemin s'effectue en sens inverse, comme on le constate sur le schéma.

⁴⁸⁹ William BUNGE, 1962. - *op. cit.* - p. 172.

⁴⁹⁰ Figure extraite de : William BUNGE, 1962. - *op. cit.* - p. 172.

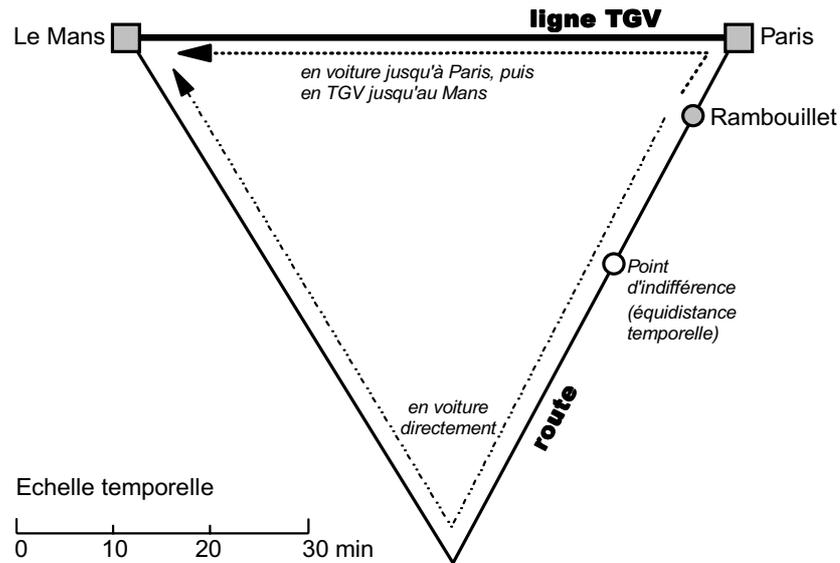


figure 24 : vue en coupe de la carte d'espace-temps

Le chemin routier direct descend au fond de la vallée puis remonte : sur la représentation en relief d'espace-temps, il est plus long que le premier. Les cartes en relief fournissent une représentation où l'effet d'inversion spatiale apparaît à la fois clairement et de manière cohérente. On dispose ainsi d'une illustration et d'une explication de ce « mouvement dans le mauvais sens »⁴⁹¹ qu'évoque William Bunge.

2. La sphère de Marchand

Bernard Marchand propose une représentation d'une ville sous la forme d'une sphère afin de restituer les distances-temps et les distances en kilomètres de manière cohérente⁴⁹².

⁴⁹¹ William BUNGE, 1962. - *op. cit.* - p. 172.

⁴⁹² Bernard MARCHAND, 1973. - *op. cit.* - p. 520-521.

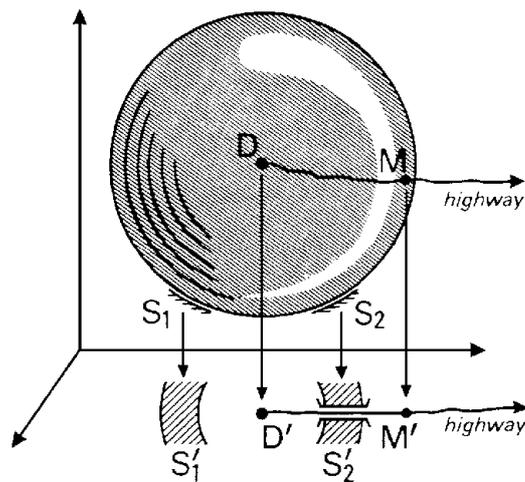


figure 25 : la sphère de Marchand⁴⁹³

La figure 25 représente la ville constituée d'un centre D (*downtown*), de deux banlieues S_1 et S_2 (*suburbs*) reliées au centre par des routes, ainsi qu'un grand supermarché M situé hors de la ville, mais relié par une autoroute. En termes de durée de transport, M est plus proche du centre que les deux banlieues S_1 et S_2 . La topologie des relations dans l'espace-temps est complètement différente, comme on peut le voir, toujours sur la figure 25, sur la projection de la sphère en un cercle : M' est plus loin de D' que S_1' et S_2' .

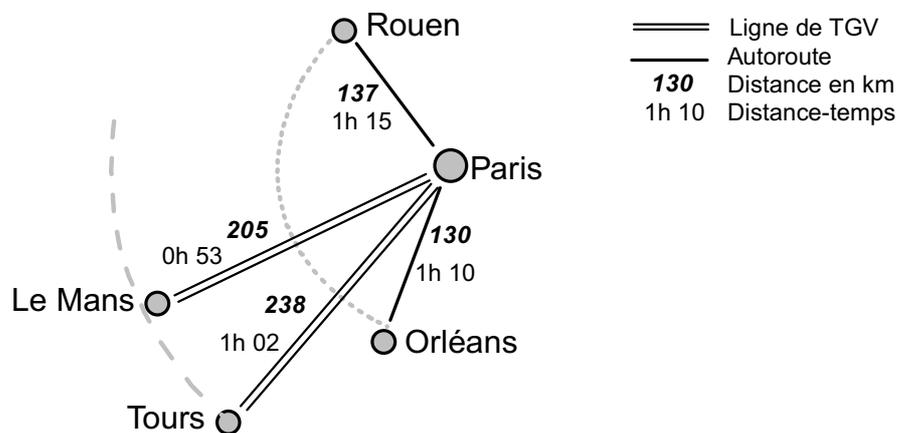


figure 26 : distances kilométriques et distances temps

Un exemple similaire traité sur une carte en relief apparaît sans distorsions topologiques. La figure 26 montre les liaisons en distance kilométrique et en distance-temps qui séparent Paris de Rouen, Le Mans, Tours et Orléans, en empruntant à chaque fois le mode de transport terrestre le plus rapide, TGV ou autoroute. Les liaisons par autoroute, vers Rouen et Orléans avoisinent les 130 km et s'effectuent

⁴⁹³ Figure reproduite de : Bernard MARCHAND, 1973. - *op. cit.* - p. 520.

respectivement en 1h 15 et 1h 10. Les trajets à destination du Mans et de Tours qui utilisent la ligne à grande vitesse Atlantique totalisent tous deux plus de 200 km, mais s'effectuent en moins de temps que les précédentes.

Les deux premières villes appartiennent à la même périphérie (figurée en pointillés sur la figure 26) et connaissent, en comparaison de Tours et Le Mans mieux reliées, une situation analogue à celle des banlieues de la ville sphérique vis-à-vis du supermarché : tous ces éléments s'étagent dans l'espace chorotaxique, mais l'ordre des proximités est inversé dans l'espace-temps.

Sur la **Erreur! Source du renvoi introuvable.**, page II-192, qui montre le relief de l'autoroute sur l'espace français, les villes sont placées à leurs positions géographiques, et les distances par le réseau sont cohérentes avec les distances en kilomètres qui ont cours dans l'espace chorotaxique. Sur la **Erreur! Source du renvoi introuvable.**, les positions des noeuds n'ont pas changé, mais les distances qui les séparent ont deux formes distinctes : les liaisons ferroviaires à grande vitesse sont rectilignes, tandis que les arcs de l'autoroute sont brisés pour respecter la valuation temporelle du graphe. Rouen et Orléans sont plus proches géographiquement de Paris que Tours et Le Mans, mais les proximités sont inversées en distances-temps : ces deux informations sont représentées sur la carte en relief. Le paradoxe de la ville sphérique décrit par Bernard Marchand est ici explicité.

3. Espaces superposés

Bernard Marchand suggère une représentation en trois dimensions du réseau routier américain⁴⁹⁴. Pour éclairer le propos, nous proposons en dessous, sur la figure 27, une interprétation graphique de la description écrite de Bernard Marchand.

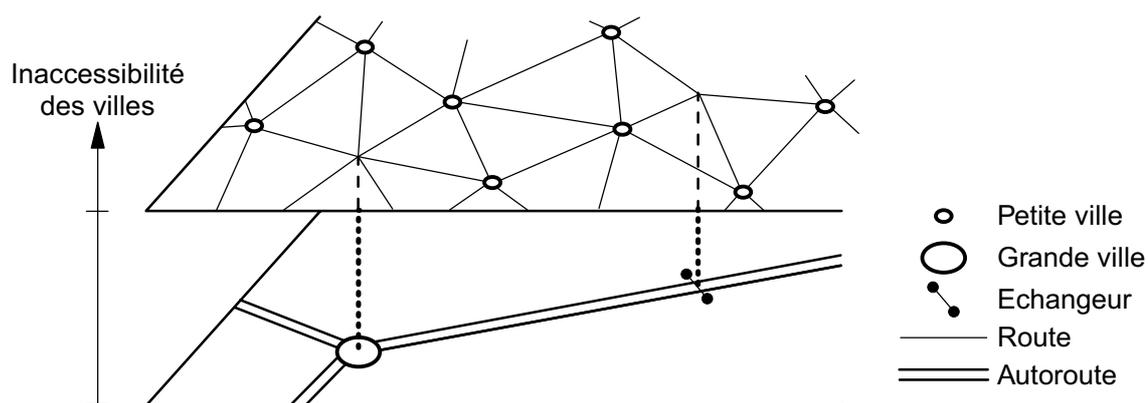


figure 27 : le réseau routier américain, deux couches superposées⁴⁹⁵

⁴⁹⁴ « An interesting case is presented by the American road network : it may consist of two homogeneous two-dimensional networks (the Interstate Highway System and other roads) which are linked in three dimensions. » - Bernard MARCHAND, 1973. - *op. cit.* - p. 519.

⁴⁹⁵ Figure réalisée à partir de la description écrite de Bernard Marchand (Cf. : Bernard MARCHAND, 1973. - *op. cit.* - p. 519).

Le plan de base est formé par la latitude et la longitude de la zone géographique. La troisième dimension indique “l’inaccessibilité” des villes : plus les villes sont en hauteur, moins elles sont accessibles. Le plan de base porte les grandes villes et les autoroutes qui les relient ; le plan supérieur contient les petites villes et le réseau routier d’importance locale. Sur cette représentation, on constitue deux espaces distincts, qui sont l’un et l’autre homogènes et à deux dimensions : l’espace du système de transport entre les États, et l’espace des routes de moindre importance. Les deux espaces sont reliés en trois dimensions – les liaisons sont figurées en pointillés sur la figure –, via les échangeurs autoroutiers. Les grandes villes et les échangeurs appartiennent à la fois à l’espace de base et à l’espace supérieur. Ils jouent un rôle d’interface et de communication entre les échelles spatiales. La ligne en pointillés exprime la double appartenance de ces points privilégiés de l’espace.

Nous avons approché, au début de ce travail, l’idée d’une superposition d’espaces⁴⁹⁶. La représentation de Bernard Marchand nous donne exactement l’image de l’espace dualisé que décrit François Plassard : l’espace-réseau s’oppose à l’espace banal⁴⁹⁷. Les deux plans sont la représentation d’un espace “feuilleté” selon l’expression de Michel Bonetti⁴⁹⁸. Par contre, la question de la connexion des espaces entre eux n’est pas totalement résolue dans la représentation. D’autre part, l’idée de Bernard Marchand semble difficilement applicable sous cette forme sur un cas réel : le plan supérieur risque d’occulter le plan de base.

Les cartes en relief montrent l’espace sous la forme, non de couches planes, mais de surfaces complexes superposées. L’image de la carte 13, page II-206, montre trois réseaux de transport qui s’étagent en couches superposées dans la troisième dimension et qui n’entrent en contact qu’aux principaux pôles de l’armature urbaine.

Chacun des espaces s’inscrit suivant un relief propre : le TGV est dans le plan des villes, là où la ligne droite dessine le chemin le plus rapide mais où l’espace se réduit à un ensemble de points (l’espace-réseau), tandis que les autres réseaux épousent un relief qui est d’autant plus prononcé qu’ils sont peu accessibles (espace banal). L’espace de la route est une surface continue mais tourmentée, moins accessible, mais où le concept de proximité existe toujours.

La différence essentielle entre les deux représentations est la nature des surfaces mises en œuvre : des plans pour Bernard Marchand, une surface froissée sur les cartes en relief. Cette dernière solution permet de dualiser les espaces tout en ménageant des contacts qui représentent les interconnexions des systèmes de transport.

⁴⁹⁶ Au paragraphe “Superposition d’espaces”, page I-66.

⁴⁹⁷ François PLASSARD, 1991. - *op. cit.* - p. 24.

⁴⁹⁸ Michel BONETTI, 1994. - *op. cit.* - p. 181.

La dualité et la superposition des espaces, ainsi que les interconnexions – les trois idées développées ici par Bernard Marchand – sont clairement exprimées sur les cartes en relief.

E. Les limites des cartes en relief

Nous abordons maintenant quelques limites avérées des cartes en relief. Ces limites correspondent à des difficultés que nous avons rencontrées dans la modélisation des espaces que nous montrons dans la thèse.

1. Froissement uniforme

Le principe de construction des cartes en relief de temps implique que la réalisation d'une unique infrastructure à grande vitesse provoque la contraction de l'espace tout entier. La contraction est uniforme sur tout l'espace considéré pour les cartes où on ne sélectionne pas les modes minimaux sur chaque liaison. La localisation de la ligne nouvelle n'a aucune influence sur la forme du relief.

C'est moins vrai pour les cartes basées sur les arcs minimaux comme celles de l'arc atlantique (la **Erreur! Source du renvoi introuvable.**, page II-209, la **Erreur! Source du renvoi introuvable.**, page II-209, et la **Erreur! Source du renvoi introuvable.**, page II-209) qui montrent un relief dessiné par la grande vitesse jusque dans la forme même des aspérités : l'apparition de vallées temporelles en éventail autour de Paris est l'image d'un relief spécifique à la forme du réseau de l'Ouest français. Cette limite profonde des cartes en relief est plus modérée lorsque l'on passe aux représentations montrant les modes minimaux. On passe d'un froissement global à une déformation conditionnée par le dessin des réseaux.

2. Les transports collectifs : desserte et correspondances

Pour pouvoir tracer un arc de graphe correspondant à une liaison ferroviaire entre deux lieux il est nécessaire de s'assurer que la desserte est réelle. Il est utile de fixer un seuil – par exemple deux ou quatre arrêts quotidiens – au delà duquel on peut considérer que la gare en question est réellement desservie.

Pour que la carte en relief soit cohérente il est important de vérifier ce point.

Les cartes en relief ne montrent pas les temps de correspondance qui apparaissent dans tous les moyens de transport collectif.

Comme nous le montrons à propos du zoom nodal de Poitiers, les représentations simplifiées par des graphes font l'hypothèse d'une jonction parfaite. Les arcs incidents à un sommet sont instantanément reliés aux arcs sortants : on nie totalement les ruptures de charge, les trajets pédestres sur les quais et trottoirs, et les temps de correspondance entre deux trains.

Cette critique vaut pour toutes les représentations classiques par des graphes. Nous voyons, par la méthode des zooms nodaux, comment il est possible de montrer les difficultés terminales spatio-temporelles. La représentation des difficultés terminales purement temporelles, telles que les temps de correspondance, n'est pour l'instant pas résolue dans les cartes en relief.

Nous avons évoqué l'absence de symétrie de l'espace parcouru par les réseaux de transport. Le problème des correspondances rejoint la question plus générale de la représentation de la non symétrie des déplacements. Les cartes en relief ne montrent pas cet aspect bien réel de l'espace de l'Aménagement.

3. Représenter les transports aériens

Nous avons construit une représentation basée sur les vitesses moyennes des moyens de transport. Or, la détermination d'une vitesse moyenne pour les liaisons aériennes est pratiquement irréalisable sans commettre d'erreur flagrante. En effet, il existe, à l'embarquement et au débarquement un temps incompressible qui est utilisé entre autres pour l'enregistrement des bagages. Plus la liaison est longue, en kilomètres, et plus le poids relatif de ces contraintes diminue. Cela signifie que pour un même type d'appareil et pour deux liaisons de longueur très différente, la vitesse moyenne calculée (le nombre de kilomètres divisé par la durée du trajet en heures) est très différente.

D'autre part, la comparaison des modes de transport sur un espace régional ou national implique la comparaison de trajets de type équivalent. On ne peut pas comparer les temps de trajet d'aéroport à aéroport avec des temps de trajet de gare à gare. Il faut tenir compte du fait que ces dernières sont le plus souvent situées en centre-ville, alors que les aérogares sont localisées en banlieue parfois lointaine. Ainsi, il faudrait introduire un temps de rabattement vers le centre ville qui irait renforcer le phénomène dû aux difficultés terminales spécifiques au transport aérien.

Enfin, si malgré toutes ces difficultés, on pouvait construire une vitesse moyenne à peu près fiable, l'introduction dans la modélisation du réseau des lignes aériennes générerait un différentiel de l'ordre de 10 en vitesse pure par rapport à la route. Nous avons vu que ce type de différentiel engendre un froissement très intense et donc très difficile à représenter et à percevoir.

Pour toutes ces raisons, nous n'avons appliqué les représentations en relief qu'aux transports terrestres. L'intégration dans la modélisation du transport aérien demande des développements supplémentaires. Malgré la nécessité de tout un ensemble de précautions d'ordre méthodologique, il s'agit là d'une des voies de développement possibles pour les cartes en relief.

Conclusion

Les cartes en relief montrent la contraction de l'espace lors de la création d'une infrastructure de transport à grande vitesse. Plus le mode de transport introduit est rapide, plus la contraction est intense. L'avantage de la méthode de construction est que les longueurs des liaisons non modifiées restent constantes malgré le rapprochement de la localisation des sommets.

Les réseaux de transport s'étagent selon une hiérarchie qui a été décrite par Pierre Merlin et François Plassard. L'espace des transports a toujours été hiérarchisé, mais cette tendance s'accroît avec l'apparition de réseaux à grande vitesse. Les représentations en relief d'espace-temps permettent de visualiser des espaces relatifs, au sens où leur forme dépend du type de déplacement qu'ils permettent : l'espace des déplacements internes à la région, dont la référence est la route à 2x2 voies se retrouve froissé et rejeté au "fond" de l'espace-temps ; l'espace des déplacements interurbains associé à l'autoroute s'inscrit dans un espace intermédiaire connecté de place en place ; enfin l'espace de la grande vitesse qui se forme lors de la prise en compte du TGV appartient à un plan parfait où l'on trouve les rares villes connectées.

Les cartes en relief fournissent une information complémentaire de celle procurée par les anamorphoses. Celles-ci montrent le rétrécissement global et les directions privilégiées de contraction de l'espace-temps, tandis que les premières montrent le sort qui est fait aux espaces interstitiels non connectés aux réseaux de transport rapide. La contraction globale qui apparaît également sur les représentations en relief évoque l'idée d'un espace virtuel : les points se rapprochent les uns des autres, mais les distances-temps qui les séparent perdurent.

Les lignes du TGV sont découplées de l'espace. Elles n'entrent en contact avec l'espace qu'aux entrées du réseau. **Le relief d'espace-temps montre l'effet tunnel, si souvent décrit, de la grande vitesse.**

Un aspect remarquable de la carte en relief est que la longueur visuelle des arcs du graphe est proportionnelle à la durée nécessaire à leur parcours. Nous avons modélisé le système de transport sous la forme d'un graphe auquel nous avons imposé des propriétés métriques. Le fait que la longueur visuelle des arcs soit proportionnelle à leur valuation signifie que nous avons établi une représentation cohérente de la métrique de graphe ; **les quatre propriétés métriques sont vérifiées sur la représentation obtenue.**

Les cartes en relief composent un espace de synthèse qui donne accès à une connaissance nouvelle de l'espace de l'Aménagement. Nous vérifions ainsi l'hypothèse formulée à la fin du chapitre liminaire sur le caractère heuristique du modèle. Les cartes en relief permettent la fonction de recherche.

Les représentations en relief permettent d'imager de manière cohérente trois paradoxes historiques de la modélisation de l'espace.

L'inversion de l'espace de William Bunge, exprime le fait que pour effectuer un chemin minimal en durée, il est parfois nécessaire de rebrousser chemin. Si l'on pense à la conception usuelle euclidienne de l'espace, il s'agit là d'un effet contre intuitif. Sur une carte en relief, le point d'inversion spatiale, c'est-à-dire le point pour lequel le trajet débutant par un rebroussement équivaut au trajet direct, est situé sur le flanc du pic d'espace-temps : il est préférable de remonter à contre sens pour rejoindre l'infrastructure rapide que d'emprunter un "chemin direct" qui passe par le fond de la vallée. La carte en relief est cohérente avec le phénomène décrit par William Bunge ; elle permet de l'illustrer et donc de l'expliquer.

Bernard Marchand propose la représentation d'une ville sous la forme d'une sphère pour expliquer le paradoxe de l'inversion des proximités temporelles et spatiales par l'existence de réseaux aux performances disparates. Ici aussi, les cartes en relief proposent une représentation cohérente de ce phénomène : nous montrons ce phénomène en comparant des liaisons par autoroute et par TGV dont les proximités kilométriques sont inversées par rapport aux proximités dans l'espace-temps. Il est remarquable de voir que l'inversion des proximités engendre une rupture dans la topologie de la représentation de Bernard Marchand, alors que la carte en relief conserve la topologie de l'espace chorotaxique.

Enfin, Bernard Marchand, en 1973, suggère une représentation en trois dimensions du réseau routier américain qui rejoint l'analyse des espaces "feuilletés" de Michel Bonetti ou celle de l'espace "dualisé" de François Plassard . C'est l'idée d'une superposition d'espaces qui n'entrent en contact qu'aux noeuds des réseaux et qui s'étagent dans la troisième dimension. Les cartes en relief peuvent être vues comme une superposition de plusieurs surfaces complexes – une par réseau – qui interprètent et précisent la suggestion de Bernard Marchand.

Les cartes en relief montrent et expliquent ces trois paradoxes de l'espace-temps. C'est l'aspect didactique du modèle qui apparaît ici. Voici montrée la dimension didactique des cartes en relief telle que l'hypothèse en est posée au chapitre liminaire.

Nous terminons l'analyse des cartes en relief en relevant des limites dans la représentation de l'espace-temps. Le principe de construction des cartes implique que l'introduction d'une unique ligne de transport rapide provoque le froissement de tout l'espace. Les transports collectifs sont cadencés. Pour construire l'arc du graphe il est nécessaire de fixer un seuil de fréquence en dessous duquel on considère que la liaison n'existe pas. Ni les temps de correspondances, ni la non symétrie des liaisons ne sont montrées sur les cartes en relief. La comparaison de la vitesse du mode aérien avec les modes terrestres pose deux problèmes. Il faut pouvoir comparer des trajets similaires, et, si on y parvenait, le froissement de l'espace serait tel que l'image serait difficilement lisible.

Section 3 Cartographie prospective

Si, comme nous venons de le voir dans la section précédente, les cartes en relief sont d'un grand intérêt pour l'analyse des effets des réseaux de transport rapide, nous devons aussi, conformément à l'hypothèse que nous nous proposons de vérifier, montrer en quoi ces représentations peuvent être un outil d'aide à la décision en Aménagement. Dans la présente section, nous utilisons quatre exemples d'application de la méthode qui illustrent les utilisations possibles des cartes en relief dans un but d'Aménagement.

Nous commençons par montrer l'établissement d'un diagnostic de l'état actuel d'un système de transport ; le diagnostic met en évidence des insuffisances qui suscitent la création de scénarios ; ces scénarios et leurs effets sont simulés. De cette manière, il est possible de proposer des informations utiles pour le processus décisionnel.

Michel Godet, spécialiste de prospective, définit un scénario comme un « ensemble formé par la description d'une situation future et du cheminement des événements futurs qui permettent de passer de la situation origine à la situation future »⁴⁹⁹.

« La caractéristique essentielle du réseau à grande vitesse est l'impact qu'il aura sur les temps de transit par rail dans le cœur de l'Europe, amenant les villes majeures du cœur, Londres, Paris, Francfort, Cologne, Amsterdam et Bruxelles à quatre heures les unes des autres »⁵⁰⁰. Un temps de trajet de quatre heures constitue un seuil critique à partir duquel un aller retour de travail dans la journée est possible.

A. *Images d'une perte d'accessibilité*

De la carte 11 à la carte 12, les villes se rapprochent en position relative, mais restent à la même distance-temps les unes des autres sur tout l'espace, sauf pour les villes desservies par le TGV. Cependant, si le froissement de l'espace est global, les répercussions positives de la grande vitesse ne le sont pas.

Nous constatons que, « de fait, tout se passe comme si les déplacements autres que ceux qui empruntent les axes à grande vitesse se trouvaient relativement déclassés par l'apparition des TGV, voire pénalisés par des diminutions de fréquence ou des fermetures de lignes locales de rabattement »⁵⁰¹.

⁴⁹⁹ Michel GODET, 1991. - *Problèmes et méthodes de prospective*. - Paris : Futuribles G.E.R.P.A. - p. 9.

⁵⁰⁰ « The key feature of the high-speed network is the impact it will have on rail transit times in the European core, bringing the key cities of the core, London, Paris, Frankfurt, Köln, Amsterdam and Brussels within four hours of each others ». - Roger VICKERMANN, Klaus SPIEKERMANN, Michael WEGENER, 1995. - *op. cit.* - p. 13.

⁵⁰¹ Philippe MATHIS, 1996. - *op. cit.* - p. 103.

Le sort réservé à la ville de Chartres est symptomatique. Autrefois située sur une “Grande Ligne” du réseau SNCF, la ville de Chartres est devenue une gare de banlieue ignorée par le TGV. Son accessibilité en a été réduite comparativement à d'autres villes plus lointaines comme Le Mans, Vendôme ou Tours qui se sont rapprochées spectaculairement de la capitale. Sur la carte en relief, Chartres se retrouve sur un “pic” d'espace-temps qui figure une “mise à l'écart” dans un interstice du réseau. On peut ainsi vérifier la perte d'accessibilité de Chartres, alors que sur une carte en anamorphose cette ville voit sa position s'améliorer. En effet, le principe général des anamorphoses fait que la plupart des points de l'espace interstitiel bénéficient automatiquement des gains d'accessibilité des pôles principaux. On peut le vérifier en consultant la carte 6, page II-169.

La carte 13 montre le creusement du différentiel d'accessibilité entre les villes lors de l'introduction d'un moyen de transport rapide. Le phénomène que nous observons intervient en parallèle avec la convergence de l'espace-temps décrite par Donald D. Janelle⁵⁰² qui voit les grandes villes éloignées bénéficier d'avantages plus importants que les petites villes proches. Les deux phénomènes agissent dans le même sens, celui d'une plus grande polarisation de l'espace.

La carte en relief d'espace-temps montre le risque, décrit par Klaus Spiekermann et Michael Wegener, de voir « les régions intermédiaires [devenir] de nouvelles zones périphériques, dans lesquelles l'accessibilité décroît en termes relatifs ou même en termes absolus au travers de l'élimination des arrêts intermédiaires quand les trains à grande vitesse sont introduits »⁵⁰³. Les évolutions divergentes de l'accessibilité des zones a des effets sur l'équilibre des espaces, comme le montrent Jean-Jacques Bavoux et Jean-Bernard Charrier : « le TGV, paradoxalement, peut, si l'on n'y prend garde, devenir instrument d'enclavement par accentuation poussée de contrastes interrégionaux ou intrarégionaux »⁵⁰⁴.

Nous avons obtenu l'image d'un phénomène maintes fois décrit mais difficile à représenter. Comme l'écrit Jean-François Troin, « la crainte se répand d'un effet sélectif puissant des villes-TGV favorisées outrancièrément par rapport aux “laissées pour compte”. Des relations directes de métropole à métropole vont s'établir niant tout le tissu interstitiel à l'échelle européenne »⁵⁰⁵.

La réalisation d'une ligne nouvelle de TGV entraîne une redistribution profonde de l'offre de transport : on constate une amélioration spectaculaire des temps de parcours pour les grandes villes reliées, un effet plus faible pour un certain nombre de

⁵⁰² Cf. en annexe “La convergence de l'espace temps”, page 209.

⁵⁰³ « [...] the regions in between might become new peripheralised zones, in which accessibility is decreasing in relative or even in absolute terms through the elimination of interim stops, when high-speed trains are introduced. » - Klaus SPIEKERMANN, Michael WEGENER, 1993. - *op. cit.* - p. 22.

⁵⁰⁴ Jean-Jacques BAVOUX, Jean-Bernard CHARRIER, 1994. - *op. cit.* - p. 64.

⁵⁰⁵ Jean-François TROIN, 1995. - *op. cit.* - p. 80.

villes intermédiaires, mais aussi une régression nette en termes d'accessibilité pour les autres.

B. *Plusieurs reliefs pour un même espace*

Les cartes en relief sont la représentation d'un graphe. Ce graphe modélise plus ou moins finement la surface de l'espace considéré, en fonction du choix des noeuds du réseau. Les réseaux à grande vitesse ont de moins en moins d'entrées, nous l'avons souligné⁵⁰⁶. En fonction de la densité du graphe, le relief n'a pas du tout la même forme. Il n'est que de comparer la **Erreur! Source du renvoi introuvable.**, page **Erreur! Signet non défini.**, et la carte 13, page II-206 : aux amples montagnes de la première correspondent les multiples sommets de la seconde. Il est vrai que la première compte 55 sommets quand la seconde en montre 189. Tous les noeuds supplémentaires qui apparaissent sur la carte 13 appartiennent à l'espace interstitiel du réseau TGV. Cela signifie que les 55 noeuds de la première carte suffisent à décrire la trame des villes TGV que dessine le réseau des lignes à grande vitesse.

Il faut aussi noter que le message contenu dans ces deux représentations est très différent. La perte en accessibilité de la ville de Chartres apparaît nettement sur la carte 13, mais n'est pas visible sur la première carte. A l'inverse, la carte à 55 sommets est beaucoup plus sévère que la carte 13 parce qu'elle décrit un espace discrétisé avec une maille très lâche qui plonge dans l'espace interstitiel des pans entiers de la hiérarchie des villes.

C. *Zoom nodal de Poitiers*

Le parti pris des représentations en relief est celui d'une connexion optimale entre les réseaux. La **Erreur! Source du renvoi introuvable.** nous montre un exemple évident de cette conception. La connexion du réseau TGV avec le réseau routier régional y semble parfaite. En fait, elle est totalement ignorée. Si l'image exprime le fait que Poitiers est desservi par le réseau TGV, elle ne montre pas de quelle façon cette connexion s'établit localement pour la ville et son hinterland.

Dans nos représentations, les faces du graphe du réseau routier servent à reconstituer la surface qui représente l'espace. C'est au travers de la description du réseau routier par un graphe que l'essentiel du travail de modélisation intervient. Du bon choix des sommets et des arcs dépend, non seulement le degré de précision du modèle, mais aussi la viabilité tout entière de la modélisation. C'est dans cet esprit que la méthode des zooms nodaux a été élaborée⁵⁰⁷.

⁵⁰⁶ Cf. "Raréfaction des points d'accès", page I-69.

⁵⁰⁷ Laurent CHAPELON, 1996. - thèse en cours : Tours.

De la **Erreur! Source du renvoi introuvable.** à la **Erreur! Source du renvoi introuvable.**, on observe la substitution du noeud Poitiers en un graphe composé de noeuds et d'arcs urbains d'un niveau directement inférieur. L'espace urbain admet des vitesses moyennes beaucoup plus faibles que l'espace régional, qui est lui-même supplanté par l'espace des "villes TGV". Le différentiel atteint est de l'ordre de dix. Dès lors, on conçoit que la transformation en relief de temps puisse être aussi brutale. Les pentes sont plus aiguës et on a du mal à apercevoir le fond des vallées apparaissant au coeur même du tissu urbain. L'image obtenue évoque celle d'un **gouffre temporel**.

La carte en relief du zoom nodal de Poitiers induit l'idée d'un effet extrêmement localisé dans l'espace-temps de la création d'une ligne et d'une gare de TGV ; un effet qui se limiterait à l'environnement immédiat de l'infrastructure ponctuelle d'accès au réseau. Cette idée semble se vérifier dans certains cas, comme l'énonce Jean-François Troin : « fonctionnant comme un métro, avec de nombreuses dessertes entre Paris et Lyon, le TGV aspire ou déverse des voyageurs qui ne touchent qu'une zone étroite autour de la gare et qui n'ont pas forcément de relations avec la Part-Dieu »⁵⁰⁸.

Le développement des réseaux ferroviaires à grande vitesse accompagne la tendance lourde à la polarisation des activités et des établissements humains. L'effet de la grande vitesse sur l'espace-temps, par son mode d'inscription, semble être un facteur qui renforce les tendances à la polarisation et la métropolisation.

L'image du gouffre temporel qui se creuse dans le tissu urbain de Poitiers montre l'importance de la bonne connexion de la gare TGV au centre-ville par une ligne de transports en commun efficace. La localisation de la gare-bis poitevine constitue l'un des enjeux majeurs liés à la réalisation du futur TGV Aquitaine. La carte en relief traduit le poids considérable des déplacements internes à la ville de Poitiers.

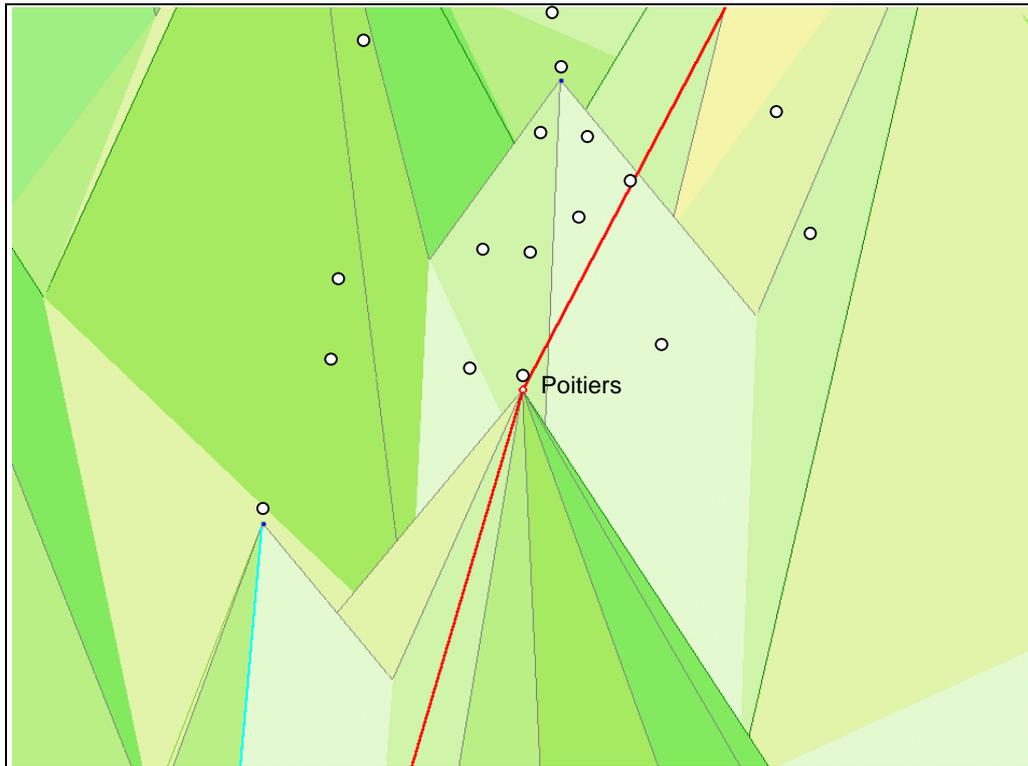
La localisation de la gare-bis devra s'appuyer sur une modélisation précise pour évaluer les conditions de l'interconnexion aux réseaux ferrés à vocation de desserte régionale. Le choix doit s'effectuer entre une localisation éloignée du centre ville mais présentant une connexion ferroviaire immédiate, et une localisation plus proche du centre mais touchée par les pertes de temps liées aux nécessaires trajets routiers urbains de la gare-bis TGV à la gare centrale.

Il faut remarquer que notre propos est de produire des représentations du graphe. Cependant, le même graphe peut être utilisé pour calculer des chemins minimaux, des indicateurs nodaux et des mesures d'accessibilité⁵⁰⁹ : le graphe est autant une structure mathématique qu'un outil de représentation.

⁵⁰⁸ Jean-François TROIN, 1995. - *op. cit.* - p. 99.

⁵⁰⁹ Pour les développements concernant les mesures sur ces graphes cf. : Laurent CHAPELON, 1996. - thèse en cours : Tours.

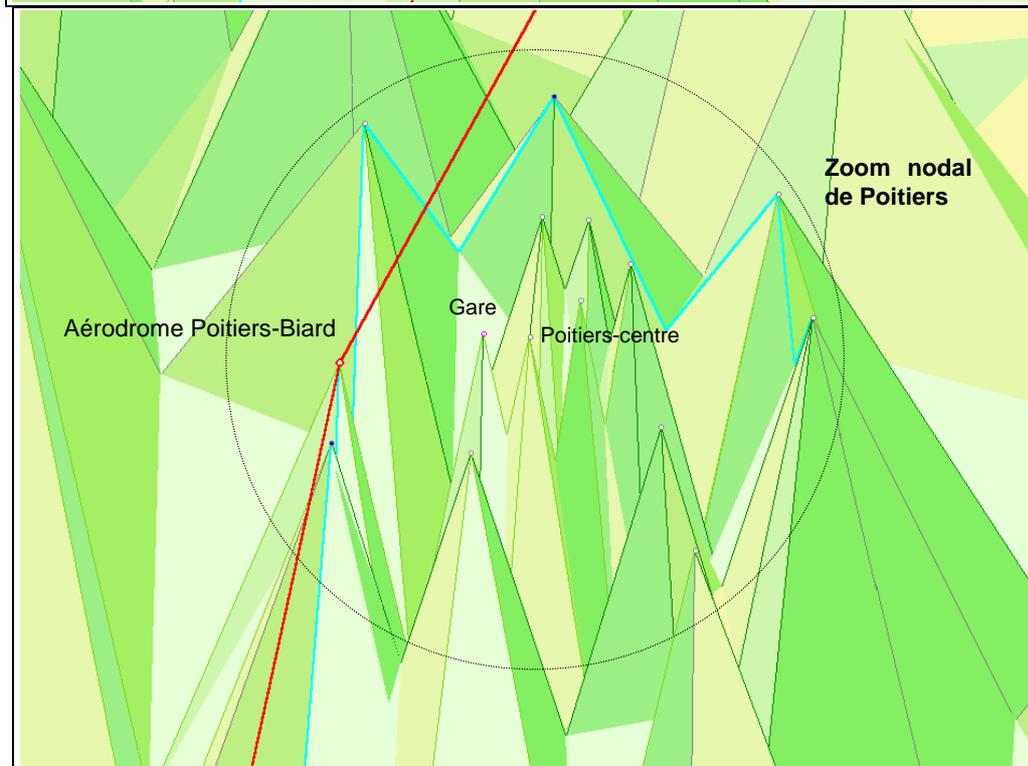
ZOOM NODAL, LE "GOUFFRE TEMPOREL"



Carte 18 : le relief du T.G.V. sur la zone de Poitiers

Les deux cartes sont à la même échelle d'espace-temps.

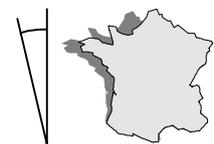
Liaison en :
 — réseau routier
 — T.G.V.



Carte 19 : le relief du T.G.V. avec le zoom nodal de Poitiers, dans l'hypothèse d'une gare-bis en regard de l'aéroport de Poitiers-Biard

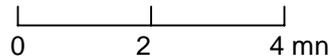
Angle de vue :

30°

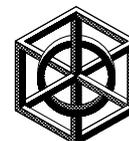


L'angle adopté (30°) ainsi que les nuances de gris facilitent la perception des différences entre les modes de transport.

Echelle approximative d'espace-temps (commune aux 2 cartes) :



Conception et réalisation :
 L. Chapelon, A. L'Hostis,
 Ph. Mathis.
 avec la collaboration de :
 M. Mayaud - Cartographe



© Laboratoire du Centre
 d'Etudes Supérieures
 d'Aménagement, Tours,
 1996.

D. *Deux image de Paris*

Les deux cartes suivantes (la **Erreur! Source du renvoi introuvable.** et la **Erreur! Source du renvoi introuvable.**, page **Erreur! Signet non défini.**) montrent la modélisation de Paris par un graphe nodal à 13 sommets. Les sommets représentent les principales gares parisiennes (Montparnasse, la gare d'Austerlitz, la gare de Lyon, la gare de l'est, la gare du Nord et la gare St Lazare), ainsi que les quelques échangeurs autoroutiers majeurs de la banlieue parisienne.

Le graphe routier se décompose en un graphe partiel constitué de rocade urbaines à 70 km/h (autoroutes urbaines) et un graphe partiel composé de boulevards urbains à 35 km/h.

Les lignes TGV Sud-Est, Atlantique et Nord apparaissent dans le plan de la représentation. Le dédoublement de la ligne unique du TGV Atlantique est un artefact dû à la modélisation par le graphe : tout se passe comme si les liaisons Paris-Montparnasse-Vendôme, et Paris-Montparnasse-Le Mans étaient séparées. Le point de séparation de la ligne en deux tronçons distincts, aux alentours de la ville de Courtaulin, ne constitue pas un noeud au sens des réseaux de transport. Il est impossible de s'arrêter et de changer de train ou de mode de transport.

Autre remarque, le graphe a été établi en 1993, avant la réalisation de l'interconnexion SNCF⁵¹⁰ de contournement de Paris qui permet la jonction directe des branches Nord et Sud-Est du TGV français. Cela signifie que, dans cette modélisation, les trajets par TGV entre Lyon et Lille nécessitent un transfert de gare à gare dans Paris.

Les deux cartes montrent le même graphe. La seule différence réside dans l'angle de vue de la représentation. Comme nous l'avons déjà exposé⁵¹¹, le graphe de départ est le modèle général et les images sont des vues de ce modèle. Les deux images sont très différentes, et pourtant, elles montrent la même structure.

La première carte (**Erreur! Source du renvoi introuvable.**), qui est une vue à 10 degrés, montre un espace froissé, dans lequel la qualité des liaisons intra-urbaines semble, contrairement aux deux cartes précédentes, tout à fait comparable à celle du TGV. L'angle de vue de la **Erreur! Source du renvoi introuvable.**, 45 °, creuse les vallées temporelles entre les gares parisiennes et montre la nécessité impérieuse d'une jonction de bonne qualité entre les branches du TGV, aménagement réalisé depuis.

⁵¹⁰ Le TGV Nord est mis en service courant 1993, tandis que le contournement Est de Paris est ouvert en 1994. (Jean-François TROIN, 1995. - *op. cit.* - p. 69.)

⁵¹¹ Cf. page II-193, "Le modèle et les images".

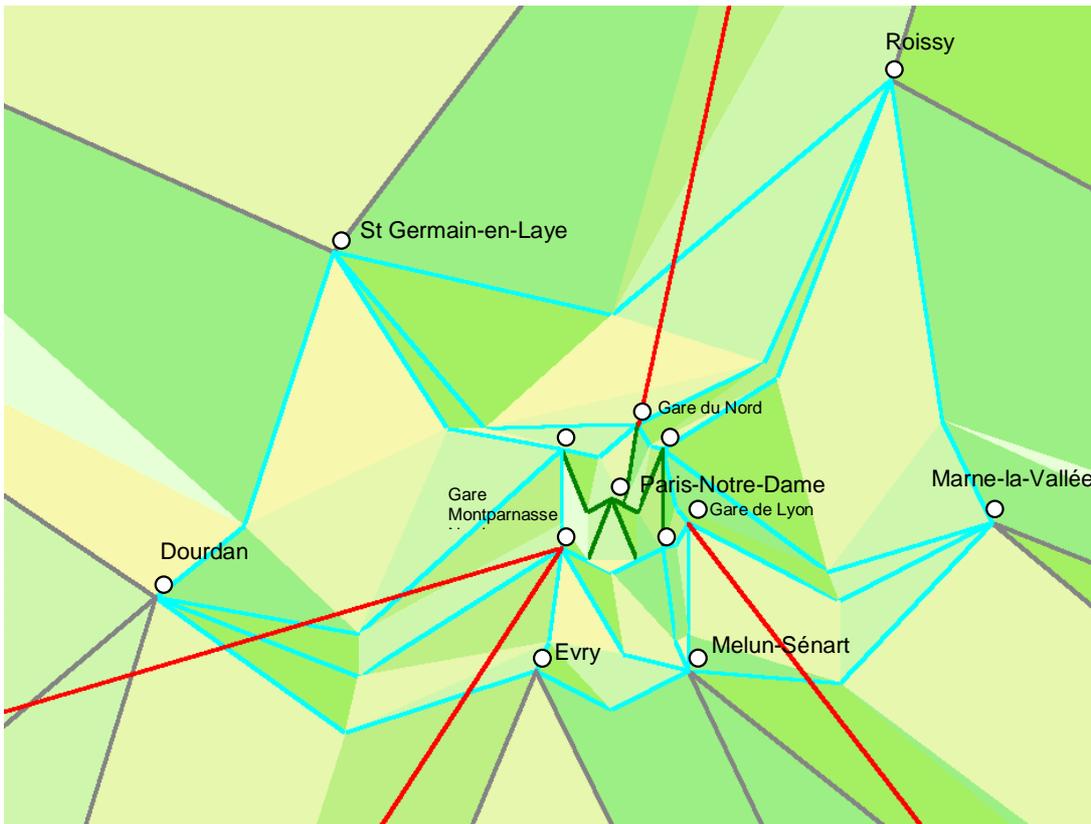
Il faut remarquer que toutes les cartes présentées ici, qui montrent le noeud Paris sans zoom nodal, font l'hypothèse d'une jonction parfaite des différents réseaux de transport, d'une manière exactement analogue à ce qu'exprime la première carte de Poitiers (la **Erreur! Source du renvoi introuvable.**, page **Erreur! Signet non défini.**).

La carte en relief nous donne une image du coût temporel d'une mauvaise connexion dans la ville. Bien plus, nous avons obtenu la représentation visuelle de la concomitance de la dilatation de l'aire urbaine et de la contraction des zones intermédiaires que nous évoquions au début de ce travail⁵¹². La contraction de l'espace intermédiaire est figurée par la présence de l'arc du TGV en surplomb d'une grande zone interurbaine froissée ; tandis que la dilatation urbaine est mise en évidence par l'apparition du gouffre temporel.

Enfin, ces deux images d'un même modèle, si différentes, fournissent la preuve de la très grande subjectivité des cartes en relief. Il suffit en effet de modifier un unique paramètre de visualisation – l'angle de vue – pour induire deux analyses opposées lors de l'interprétation des cartes. La subjectivité est, nous l'avons vu⁵¹³, un caractère essentiel des images de synthèse. Toutefois, le caractère subjectif de ces images, s'il est clairement le fait du modélisateur, est lisible et compréhensible par un lecteur averti. Une analyse du processus et des paramètres de construction permet de comprendre la carte et, éventuellement, de la reconstruire à l'identique. Paradoxalement, parce qu'il ne prête pas à interprétation, le mode de construction des cartes en relief est caractérisé par une certaine objectivité.

⁵¹² Dans le paragraphe "Contraction/dilatation", page I-67.

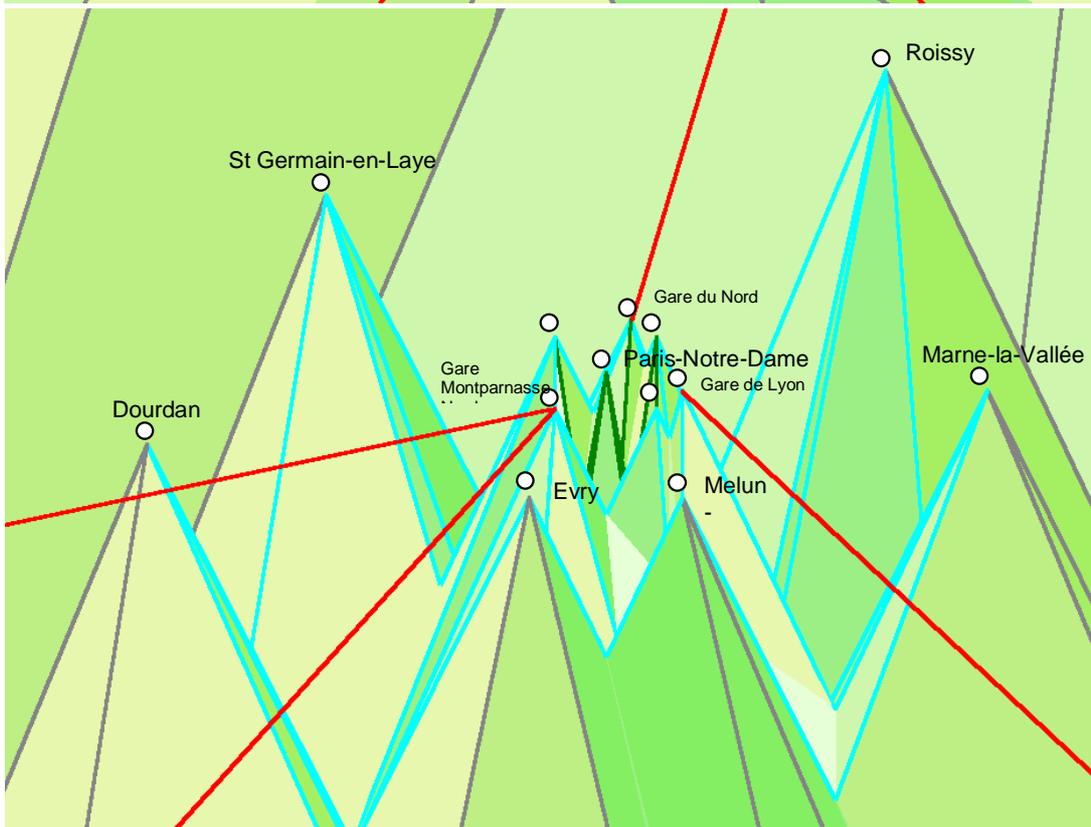
⁵¹³ Cf. le paragraphe intitulé "La subjectivité", page 31.



Carte 20 :
Le relief du
T.G.V. sur la
région
parisienne
vu à 10° :
un espace
"chiffonné"

Angle de vue :

10°



Carte 21 : Le
relief du
T.G.V. sur la
région
parisienne vu
à 45° :
apparition du
"gouffre
temporel"

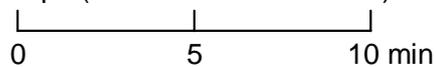
Angle de vue :

45°



Liaison en :
rocade urbaine
boulevard urbain
T.G.V.

Echelle approximative d'espace-temps (commune aux 2 cartes) :



Les nuances de gris facilitent la perception des différences entre les réseaux de transport.

Conception et réalisation :
L. Chapelon, A. L'Hostis,
Ph. Mathis.
avec la collaboration de :
H. Baptiste, S. Larribe,
M. Mayaud, K. Serrhini.

© Laboratoire du Centre
d'Etudes Supérieures
d'Aménagement
Tours, 1996.

Les vallées du TGV

Les cartes qui suivent ont fait l'objet d'une publication en 1996⁵¹⁴. Les arguments développés ici s'inspirent pour l'essentiel de l'article en question.

Pour construire ces cartes, nous avons utilisé un sous-graphe du graphe du réseau de transport des pays européens de la façade Atlantique. Ce dernier a été élaboré dans le cadre d'un contrat de recherche portant sur le développement des réseaux de l'Arc Atlantique⁵¹⁵.

Nous avons établi les hypothèses de développement sur la base du schéma directeur national de la grande vitesse⁵¹⁶ et du schéma directeur européen de la grande vitesse⁵¹⁷. Le graphe du réseau de transport inclut la route (70 km/h), l'autoroute (110 km/h) et le TGV (220 km/h). Nous n'avons pas intégré les lignes du schéma directeur autoroutier national dans le but de montrer uniquement l'effet spatio-temporel du TGV. On peut consulter, page I-74, la carte du schéma directeur national de la grande vitesse adopté en 1991 : le réseau TGV réalisé (en noir) et les projets de ligne nouvelles (en blanc) forment une structure totalement arborescente dans la moitié Ouest du territoire.

La Erreur! Source du renvoi introuvable., page II-209, montre l'Ouest français sous une orientation inhabituelle. Il s'agit d'une vue à partir de l'Atlantique : on trouve au premier plan les principales villes du littoral atlantique. Paris est situé au fond de l'espace.

Les cartes en relief de temps sont basées sur le graphe des arcs minimaux qui montrent la forme très particulière du réseau arborescent de l'Ouest français. Les effets de cette forme du réseau, sur l'espace-temps de la carte en relief, sont très particuliers : ils montrent que l'amélioration « des réseaux va [...] rapprocher les différentes villes de Paris, mais les éloigner les unes des autres »⁵¹⁸. L'espace se contracte, mais selon une unique direction, celle du sens province-Paris.

Le relief prend la forme d'un ensemble de vallées dont les axes sont parallèles aux branches du réseau TGV. **Ces vallées d'espace-temps figurent l'effet du réseau rapide sur l'espace interstitiel.** Celui-ci est comme déclassé ; il ne bénéficie pas automatiquement de l'amélioration du réseau.

⁵¹⁴ Philippe MATHIS, 1996. - « La Stratégie des réseaux de transport dans le grand Ouest ». - p. 103. - *in* L'Entreprise Atlantique. - dirigé par Yves Morvan. - Paris : Editions de l'Aube (Mondes en cours, Cités et territoires, I.A.A.T.).

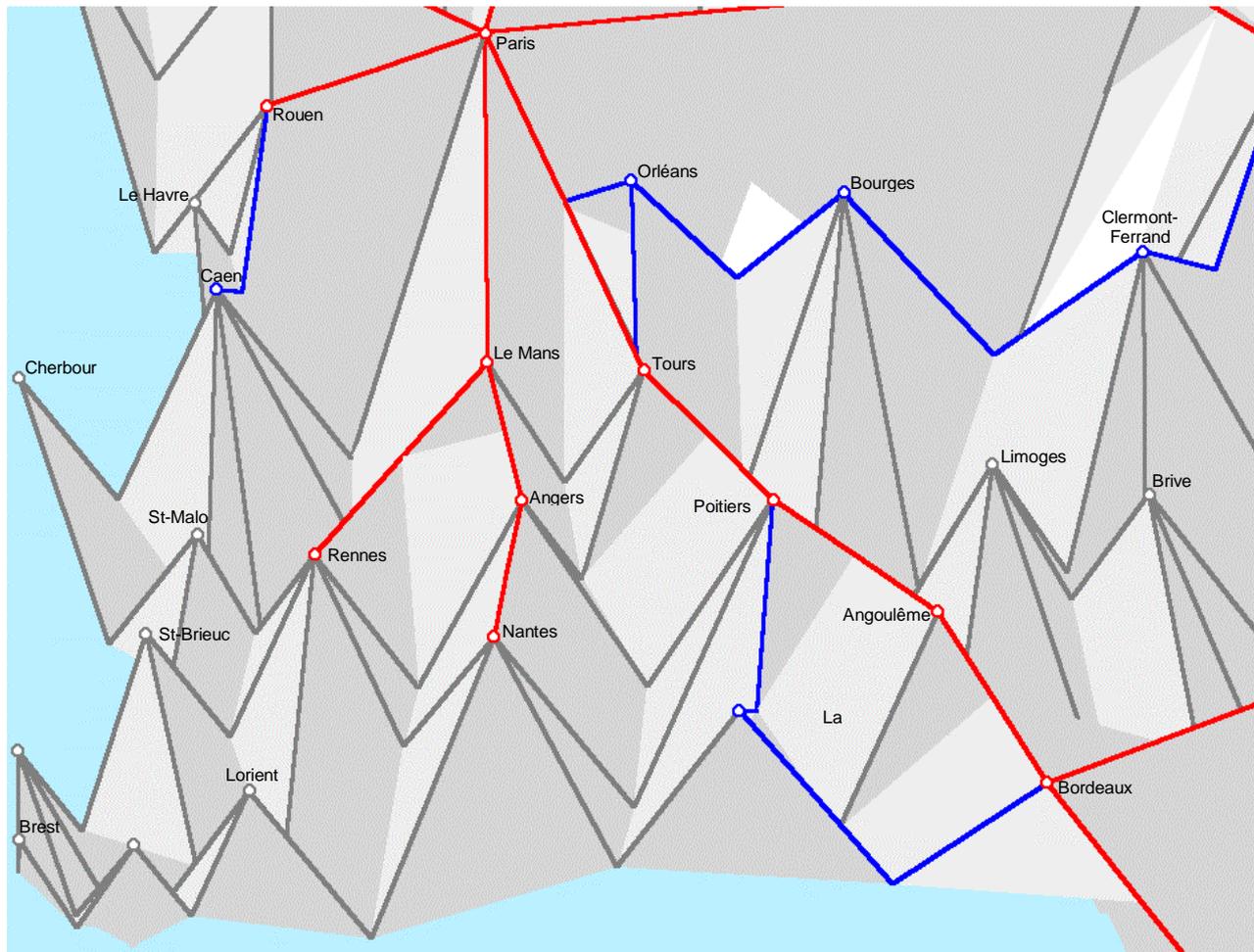
⁵¹⁵ Cf. note de bas de page numéro 112, page 33.

⁵¹⁶ Christian REYNAUD, Marianne OLLIVIER-TRIGALO, 1993. - *op. cit.* - p. 203.

⁵¹⁷ *Ibid.* - chap. 7, p. 6.

⁵¹⁸ Philippe MATHIS, 1996. - *op. cit.* - p. 98.

LES "VALLEES" DU T.G.V.



Les nuances de gris et les facettes facilitent la perception des différences entre les modes de transport.

Carte 22 : les vallées temporelles du TGV vues de l'Atlantique

Le relief du T.G.V. sur l'Ouest français, avec les modes minimaux (T.G.V. autoroute et route) : un relief de "crêtes" et de "vallées"

Liaison en (vit. moyenne) :

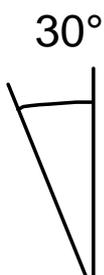
- T.G.V. (220 km/h)
- autoroute (110 km/h)
- route (70 km/h)

Ville reliée au réseau :

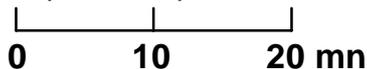
- T.G.V.
- autoroute
- route

(seul le mode le plus rapide est pris en compte)

Angle de vue :

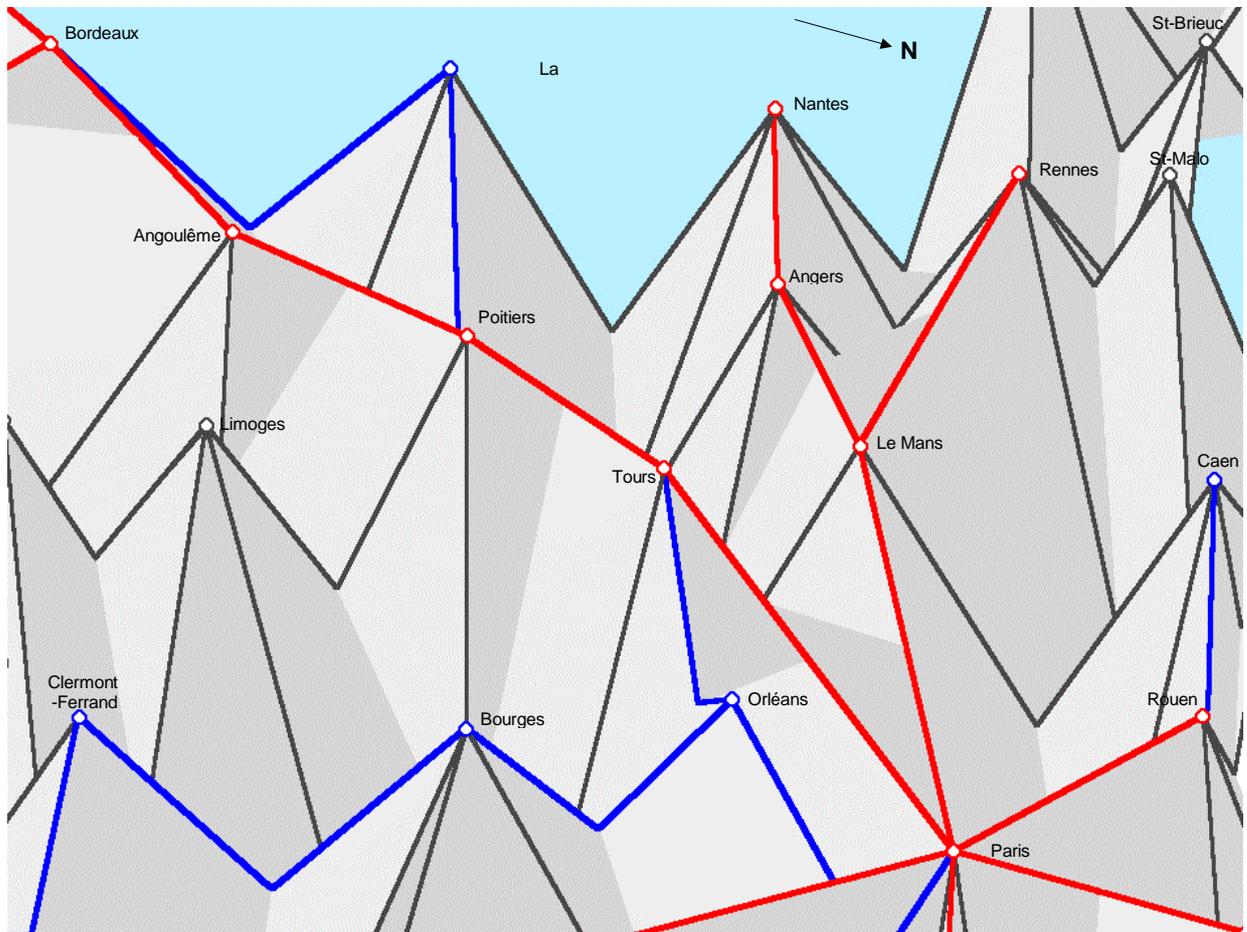


Echelle approximative d'espace-temps :



Conception et réalisation :
 L. Chapelon, A. L'Hostis, Ph. Mathis
 avec l'aide de :
 M. Mayaud - Cartographe
 © Laboratoire du Centre d'Etudes Supérieures
 d'Aménagement, Tours, 1996.

LES "VALLEES" DU T.G.V



Les nuances de gris et les facettes facilitent la perception des différences entre les modes de transport.

Liaison en (vit. moyenne) :

- T.G.V. (220 km/h)
- autoroute (110 km/h)
- route (70 km/h)

Echelle approximative d'espace-temps :

0 10 20 m n

Angle de vue :



Ville reliée au réseau :

- T.G.V.
- autoroute
- route

(seul le mode le plus rapide est pris en compte)

Carte 23 : les vallées du TGV vues de Paris

Le relief du T.G.V. sur l'Ouest français, avec les modes minimaux (T.G.V. autoroute et route) : des "vallées temporelles" qui composent un relief en "éventail"

Conception et réalisation :
L. Chapelon, A. L'Hostis, Ph. Mathis
avec l'aide de :
M. Mayaud - Cartographe
© Laboratoire du Centre d'Etudes Supérieures d'Aménagement, Tours, 1996.

La métaphore du relief est ici particulièrement riche : « pour [prendre] l'image de l'effet éventail, c'est comme si les branches de l'éventail se raccourcissaient et s'écartaient de manière à conserver au minimum la distance existant entre les branches »⁵¹⁹.

La **Erreur! Source du renvoi introuvable.**, page II-209, est une vue du relief du TGV à partir d'un point situé à l'Est de Paris : on voit les crêtes du réseau s'écarter progressivement quand on avance vers les côtes. Cette image est foncièrement différente de la précédente. Nous avons une illustration supplémentaire du principe de multiplicité des images pour un même modèle. Le seul paramètre qui a changé est la position du point de vue, suivant une rotation d'environ 180° par rapport à la **Erreur! Source du renvoi introuvable.**.

Au bout de chaque crête d'espace-temps, on remarque les fins de lignes en cul-de-sac. Nantes et Rennes sont situées aux extrémités des branches du réseau. Pour ces deux villes, le réseau TGV les rapproche spectaculairement de Paris, mais leurs interrelations n'évoluent pas : la carte en relief montre le creusement des vallées qui séparent toujours les pôles de l'Ouest. Paradoxalement, les vallées se creusent à cause de l'amélioration des liaisons axiales.

Cette analyse est à nuancer pour le Sud-Ouest. En effet, à partir de Bordeaux, la ligne se scinde en deux, un tronçon vers la frontière espagnole, un autre vers Toulouse. Par ailleurs, le réseau, qui est perpendiculaire à la côte dans l'Ouest, devient parallèle à celle-ci, légèrement avant Bordeaux.

« La réalisation de réseaux à grande vitesse a [...] comme premier effet de faciliter considérablement les relations entre les villes situées sur le réseau au bénéfice des plus grandes d'entre elles »⁵²⁰. La conséquence indirecte de cette réalisation est la pénalisation relative des liaisons transversales. Dans ce schéma, toutes les liaisons à longue distance passent par Paris qui devient l'interface presque obligatoire pour les relations lointaines, nationales et surtout internationales.

L'insuffisance la plus manifeste qui apparaît sur la **Erreur! Source du renvoi introuvable.** concerne les liens entre les pôles régionaux. L'affaiblissement relatif des liaisons interrégionales s'opère simultanément à l'amélioration des liaisons centre-périphérie. On constate sur la **Erreur! Source du renvoi introuvable.** que « le différentiel [d'espace-temps] n'est que partiellement comblé par l'autoroute »⁵²¹. La cohésion de l'Ouest français demandera à l'avenir un développement des relations transversales.

⁵¹⁹ Philippe MATHIS, 1996. - *op. cit.* - p. 103.

⁵²⁰ *Ibid.* - p. 104.

⁵²¹ *Ibid.* - p. 106.

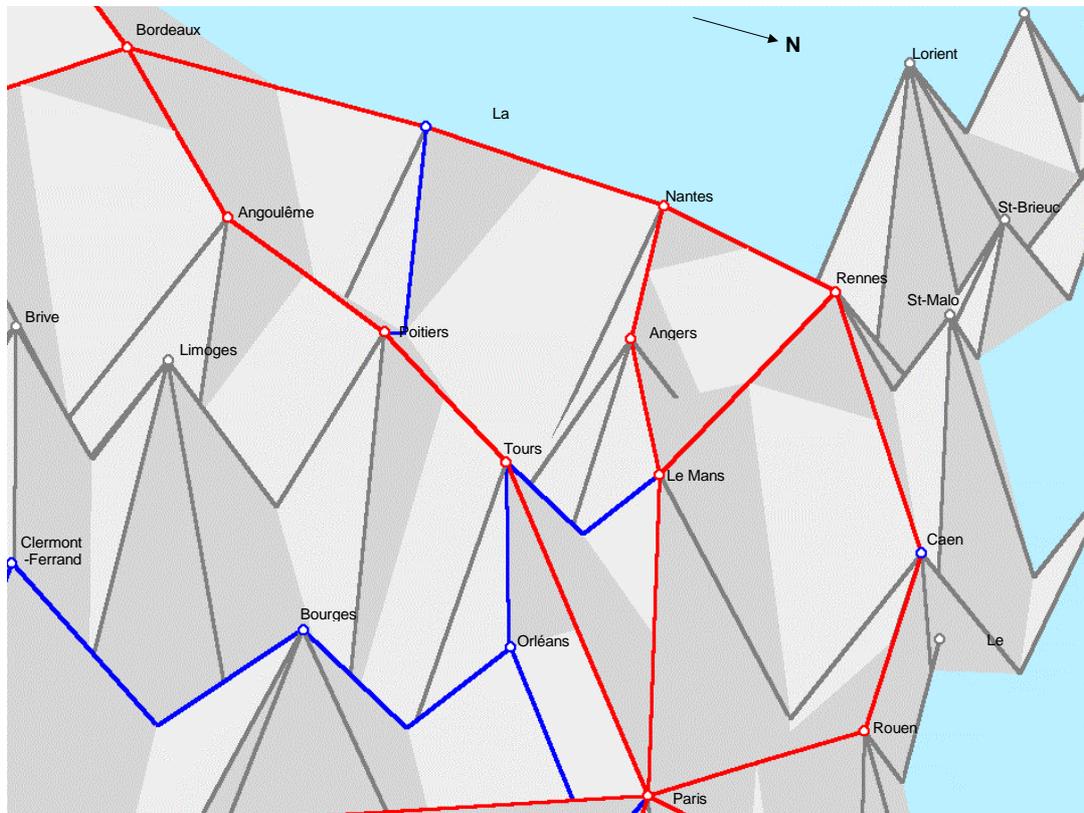
Dans une analyse prospective des effets sur l'espace-temps de la réalisation du schéma directeur national de la grande vitesse ferroviaire, nous aboutissons à identifier clairement une insuffisance dans les liaisons interrégionales de l'Ouest français. Sur la base d'une évaluation des effets d'une évolution simulée du réseau, nous pouvons proposer une adaptation du schéma directeur dans un but de rééquilibrage territorial.

Cette proposition, développée par Philippe Mathis⁵²², consiste à créer une nouvelle ligne ferroviaire à grande vitesse qui relierait les pôles de l'Ouest. Cette ligne radiale est simulée sur la **Erreur! Source du renvoi introuvable.** en page II-209. La ligne comble les vallées d'espace-temps séparant les pôles régionaux en reliant les extrémités des lignes arborescentes du réseau proposé dans le schéma directeur.

Le "TGV des estuaires" permettrait un rééquilibrage de l'Ouest français par la création d'un axe radial évitant Paris, ce qui est conforme aux objectifs édictés par la DATAR de favoriser l'émergence d'un arrière-pays dynamique.

⁵²² Philippe MATHIS, 1996. - *op. cit.* - p. 110.

Les nuances de gris et les facettes facilitent la perception des différences entre les modes de transport.



Carte 24 : les vallées fermées du TGV

Le relief du T.G.V. sur l'Ouest français vu de Paris, avec les modes minimaux : le T.G.V. des estuaires ferme les "vallées temporelles"

Liaison en (vit. Moyenne) :

- T.G.V. (220 km/h)
- autoroute (110 km/h)
- route (70 km/h)

Ville reliée au réseau :

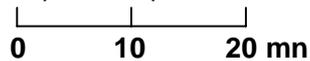
- T.G.V.
- autoroute
- route

(seul le mode le plus rapide est pris en compte)

Angle de vue :



Echelle approximative d'espace-temps :



Conception et réalisation :
L. Chapelon, A. L'Hostis, Ph. Mathis
avec l'aide de :
M. Mayaud - Cartographe
© Laboratoire du Centre d'Etudes Supérieures d'Aménagement, Tours, 1996.

Conclusion

Les cartes en relief proposent une représentation de l'espace-temps dont nous avons établi – dans la section précédente – le caractère analytique.

La fonction de diagnostic est la première démarche de l'action de l'Aménagement. Le modèle que constitue la carte en relief permet d'établir un diagnostic de la situation des lieux dans l'espace-temps déformé par les réseaux de transport rapide. La situation de la ville de Chartres, située à proximité d'une ligne à grande vitesse, mais victime de l'effet tunnel du TGV est clairement visible sur la représentation en relief. Chartres est positionnée sur un pic d'espace temps qui figure une "mise à l'écart" dans un interstice du réseau. La perte d'accessibilité relative est visible, alors que sur une carte par anamorphoses, la ville semble bénéficier des améliorations de l'accessibilité des grands pôles de l'espace.

La modélisation de la connexion du réseau à grande vitesse et des réseaux de transport urbains provoque une contraction très forte et forme un relief que nous avons appelé "le gouffre temporel". La carte en relief propose une image du coût temporel d'une mauvaise connexion dans la ville. L'image de cette contraction/dilatation brutale du tissu urbain attire l'attention sur les risques encourus lors du choix de la localisation d'une gare-bis à proximité d'un centre urbain.

L'image du gouffre temporel de Paris montre, en 1993, l'impérieuse nécessité de la réalisation d'une interconnexion rapide des lignes à grande vitesse Sud-Est, Nord et Atlantique, partiellement réalisée depuis.

Nous établissons le diagnostic d'un état actuel de l'espace-temps, en modélisant un système existant. Une fois le modèle réalisé, la variation des paramètres de construction de l'image permet d'établir des représentations subjectives, au sens où elles sont susceptibles d'être orientées par le modélisateur. La multiplicité des images, qui est une caractéristique de l'image de synthèse, est au service du modélisateur qui peut orienter le message en fonction du propos choisi. On retrouve ici une des caractéristiques des modèles selon Haggett, qui sont **créés pour un propos déterminé**.

Une fois le modèle établi, la voie de la simulation est ouverte. La représentation en relief, en tant que modèle, autorise la simulation d'hypothèses de développement des réseaux. Nous avons construit des hypothèses de développement des réseaux à grande vitesse en région Poitou-Charentes et sur l'Ouest français.

Ces hypothèses, modélisées et simulées, permettent de construire la représentation des déformations de l'espace-temps qu'elles occasionneraient si elles étaient réalisées. **Les cartes en relief permettent d'établir une démarche prospective en simulant des évolutions hypothétiques du système de transport.** Les cartes en relief relèvent du

modèle décisionnel, car elle permettent d'apporter des informations qui éclairent la décision de modifier ou de ne pas modifier le système.

Sur la base de l'analyse des conséquences des évolutions hypothétiques du système, nous élaborons de nouvelles hypothèses qui visent à corriger un effet considéré indésirable. La modélisation des réseaux de transport à grande vitesse de l'Ouest français nous a permis de construire une proposition d'action à but de rééquilibrage territorial qui s'inscrit dans les orientations définies par la DATAR.

Ainsi, les représentations en relief sont utilisées pour établir une proposition. Cette proposition est simulée et ses effets sont évalués, de telle sorte que nous disposons d'une information utile pour éclairer la décision dans un contexte d'Aménagement du territoire. Cette démarche démontre la dimension prescriptive d'une utilisation des cartes en relief d'espace-temps par simulation d'hypothèses de développement des réseaux de transport. L'hypothèse posée à la fin du chapitre liminaire qui stipule que les cartes en relief sont un modèle décisionnel utilisable en Aménagement, est ici validée.

Section 4 Développement des cartes en relief

Le principe général des cartes en relief est posé. Dans le cadre de la thèse, nous avons exploré des représentations qui se basent sur le principe général et sur des variantes de ce principe. Nous avons déjà abordé les représentations en relief basées sur le graphe des arcs minimaux.

Nous abordons maintenant d'autres développements des cartes en relief. Le principe du relief de coût est d'introduire une fonction économique dans la valuation des arcs du graphe. La cartographie dynamique met l'accent sur la nature "temporaire" et "virtuelle"⁵²³ de la représentation. Enfin, le relief inversé reprend le principe général de construction mais place les arcs brisés au-dessus du plan chorotaxique et non plus en dessous.

Comme l'écrit Sylvie Rimbart, « c'est sans doute dans la représentation de surfaces abstraites, difficiles à imaginer, que la synthèse d'images terrestres a le plus d'avenir »⁵²⁴.

⁵²³ Cf. au paragraphe « Nouvelle catégorie du réel », page 30.

⁵²⁴ Sylvie RIMBERT, 1992. - *op. cit.* - p. 149.

A. *Le relief de coût*

Avec les représentations en coût, on veut représenter les différents modes de transport en comparant les coûts des trajets. On substitue au paramètre de durée de transport celui de coût, qu'il soit simple ou généralisé.

Les hypothèses de calcul du coût du temps dans les déplacements, sont similaires à celles qu'on peut trouver dans une étude interministérielle portant sur la coordination des infrastructures de transport⁵²⁵.

1. Les trois degrés de liberté du modèle

Entre un couple de points, on établit la coexistence de plusieurs modes : route, autoroute, TGV et train classique. Cette différenciation intervient sur une dimension unique, l'arc. Elle constitue donc un degré de liberté du modèle. Cependant, du fait de la représentation en trois dimensions du modèle, les arcs s'inscrivent dans un plan perpendiculaire au plan géographique. On réalise donc une différenciation visuelle des modes, **une différenciation modale**.

Selon les pays de l'espace considéré, les coûts peuvent être différents dans chaque mode. Ces différences proviennent de particularismes nationaux. Un exemple en est la gratuité des autoroutes allemandes qui implique un calcul différencié du coût au kilomètre quand on veut figurer ensemble l'Allemagne et la France. Cette différenciation établit un autre degré de liberté pour le modèle. Cette latitude intègre le niveau de péage, la vitesse maximale autorisée et les prix des carburants pour les véhicules personnels. On réalise ainsi une **différenciation spatiale**.

Les pôles de l'espace sont ou ne sont pas reliés aux modes rapides que sont le TGV et l'autoroute. Ceci provient du fait que les graphes modaux ne se recoupent pas exactement. Une autre formulation consiste à dire que tel mode ne dessert que certaines villes. Par la possibilité offerte d'ajouter ou de supprimer des arcs, on obtient un nouveau degré de liberté, qui consiste en une **différenciation modale spatiale**.

2. Description du modèle de calcul

Dans notre modèle de calcul, les coûts de transport dépendent du passager, du véhicule et du type de trajet effectué.

⁵²⁵ Emile QUINET, 1980. - *La Coordination des infrastructures de transport en France*. - Paris : la documentation française. - p. 119.

The screenshot shows a window titled "Coûts" with the following settings:

- Passager:**
 - Nationalité: Français Allemand
 - Niveau de revenu en nombre de SMIC: 1
 - Nombre de passagers (conducteur compris): 1 2 3 4 5
- Véhicule:**
 - Puissance de la voiture en chevaux fiscaux: 6
 - Classe du mode ferroviaire équivalent (1ère si voiture > 10 ch): 2ème 1ère
- Déplacement:**
 - Longueur du déplacement en Km: 250
 - Coût direct:
 - Coût généralisé (temps):
 - Coût généralisé pro. (temps+taxes):

Buttons at the bottom: "Coûts au km" and "Quitter".

figure 28 : les options de calcul des coûts

Le premier paramètre est la nationalité de la personne que l'on considère, étant entendu que l'espace des coûts correspond à la vision d'un individu identifié. Cette option conditionne le niveau de salaire moyen. C'est un indicateur similaire au SMIC français que l'on calcule par rapport à ce dernier, en fonction d'une estimation des salaires moyens européens⁵²⁶. Ce choix influe sur le montant des coûts de manière homogène ; il ne modifie pas la hiérarchie modale et spatiale.

En nombre de SMIC⁵²⁷, le niveau de revenu indique la position salariale de l'individu, de l'employé au cadre supérieur. Ce niveau sert à calculer le coût du temps perdu pour l'employeur lorsque le trajet est à but professionnel et qu'il s'effectue durant le temps de travail.

Les coûts inhérents à la voiture sont partagés par le nombre de passagers. Ces coûts proviennent de la consommation en carburant et du péage sur autoroute.

La puissance du véhicule conditionne sa consommation en carburant. Ce paramètre n'est pas indépendant du niveau de salaire ; il correspond aussi à un niveau de confort pour le ou les voyageurs.

Le niveau de classe ferroviaire agit de la même manière que la puissance du véhicule. Dès que la puissance de la voiture dépasse 10 chevaux, on considère que le passager voyage en première classe.

Enfin, nous avons considéré que la longueur du déplacement conditionne le coût kilométrique pour le transport ferroviaire en France. Même si la tarification réelle est beaucoup plus complexe, ce principe de calcul produit une mesure indicative du coût supporté par l'utilisateur.

⁵²⁶ Source : *Quid*, 1993. - Paris : Robert Laffon. - p. 1730.

⁵²⁷ Pour autant que l'acronyme ait un sens pour une personne non française (cf. supra).

Les options de calcul des coûts correspondent à trois façons de prendre en compte le temps perdu en heures payées lors du déplacement. Avec l'option "coût direct", on calcule le coût kilométrique sans tenir compte de ce temps perdu. Avec les deux autres options, le coût du temps intervient affecté d'un coefficient différent suivant que l'on considère ou non les charges patronales. On peut dire que la première option correspond au coût d'un voyage non professionnel, de type départ en vacances, et que les deux autres entrent dans le cadre des déplacements effectués dans un but professionnel.

3. Une application à l'espace européen

La première représentation en relief de coût, que l'on peut voir en page suivante, est celle de l'Ouest européen pour une personne effectuant des déplacements non professionnels. Selon le calcul effectué en machine des coûts kilométriques, on obtient les chiffres suivants en Francs français :

	Train	TGV	Route	Autoroute
France	0,72	0,83	2,00	2,30
Allemagne	0,72	0,83	1,42	1,42
Espagne	0,72	0,83	1,58	1,88

tableau 4 : comparatif des coûts de transport par mode dans trois pays pour un déplacement personnel

La différenciation spatiale intervient sur les modes routiers du fait des prix des carburants et de la gratuité ou non des autoroutes. Cependant cette différenciation ne suffit pas à modifier la hiérarchie modale. Le train classique est partout le moins cher suivi du TGV. Le mode routier puis l'autoroute suivent, entre 2 et plus de 3 fois plus cher que le train. On doit seulement noter une égalité pour les deux modes routiers en Allemagne du fait de l'absence de péage.

L'espace des coûts est donc ici homogène, que ce soit selon l'aspect modal ou suivant le critère spatial. Les différences de coût pour la route et l'autoroute s'expriment par la différence de pente du relief. Or, ces nuances sont difficilement perceptibles pour des valeurs éloignées de la valeur minimale. C'est un aspect des représentations différentielles en relief : on perçoit aisément des différentiels peu importants de 0 à 100 %, mais on distingue très mal deux différentiels qui atteignent 200 ou 300 %. Or, le rapport entre le mode le plus cher et le mode le moins coûteux est supérieur à 3, rapport qui est de l'ordre de celui existant entre le coût de la route et celui du fer. Il est donc très difficile de distinguer et de différencier les arcs de la route et de l'autoroute dans cette représentation spatialisée des coûts de transport.

On modélise ici l'espace européen pour une personne qui effectue des déplacements professionnels. Suivant les options définies sur la représentation, on obtient les coûts suivants (en Francs français) :

	Train	TGV	Route	Autoroute
France	1,16	1,06	2,73	2,76
Allemagne	1,16	1,06	2,15	1,81
Espagne	1,16	1,06	2,31	2,35

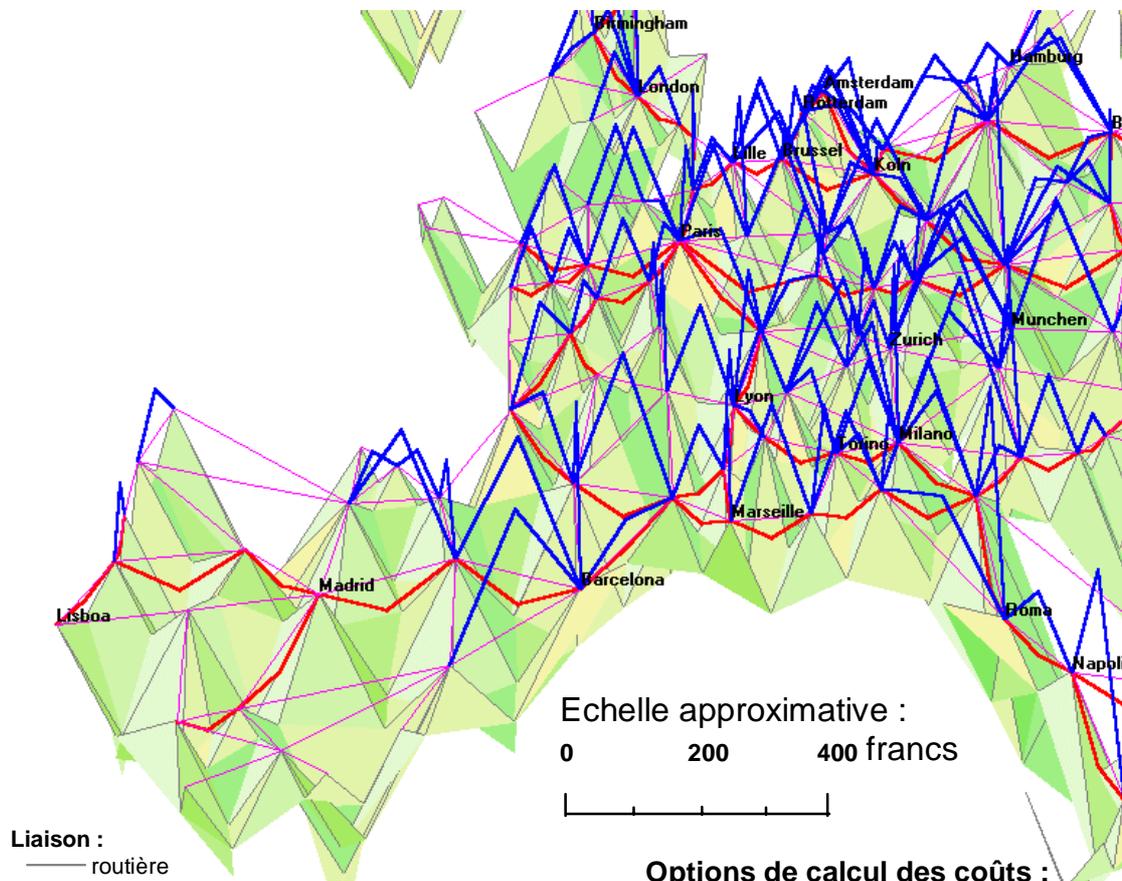
Tableau 5 : comparatif des coûts de transport par mode pour un déplacement professionnel

Dans cette configuration, on constate une augmentation de tous les coûts, pour tous les modes et dans chaque pays. Ceci est normalement dû au fait que le temps est un terme ajouté au coût kilométrique et directement proportionnel à la vitesse de déplacement dans le mode. Ce qui signifie que l'augmentation du coût est d'autant plus grande que la vitesse est faible et donc que la hiérarchie modale est modifiée. Ainsi, la première place revient au TGV, et ce partout sur cet espace, ceci dans les hypothèses que nous avons faites d'un coût du fer et du TGV identique sur toute la zone.

La principale modification de l'espace est le passage de l'autoroute allemande en troisième position alors que partout ailleurs, du fait du péage, l'autoroute reste le mode le plus coûteux. On assiste donc bien ici à une différenciation spatiale de la hiérarchie des modes de transport en Europe occidentale.

Il est à noter que le rapport des coûts des modes les plus chers sur les modes les moins onéreux a tendance à chuter (sauf en Allemagne où il reste stable), mais que la différence entre ces coûts s'accroît en valeur absolue. L'espace du déplacement professionnel fait ressortir les particularismes nationaux et accentue les différences entre les modes rapides, mais chers (le TGV et l'autoroute), et les autres.

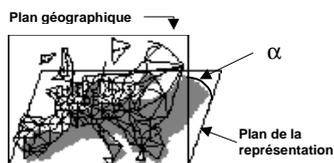
CARTE EN RELIEF DE COÛT



Liaison :
 — routière
 — autoroutière
 — T.G.V.
 — ferroviaire classique

Ville reliée au réseau :
 ○ T.G.V.
 ○ ferroviaire classique
 ● autoroutier

Angle de vue :
 $\alpha = 30^\circ$



L'angle de vue adopté (30°) ainsi que les nuances de vert facilitent la perception des différences entre les modes de transport

Options de calcul des coûts :

nationalité	français
niveau de salaire	1 x SMIC
nb de passagers	1
puissance	5 ch
classe ferroviaire	2 ^{ème}
distance parcourue	300 km
coût généralisé	non

Conception et réalisation :

Ph. Mathis, A. L'Hostis.

avec la collaboration de :

M. Mayaud - Cartographie

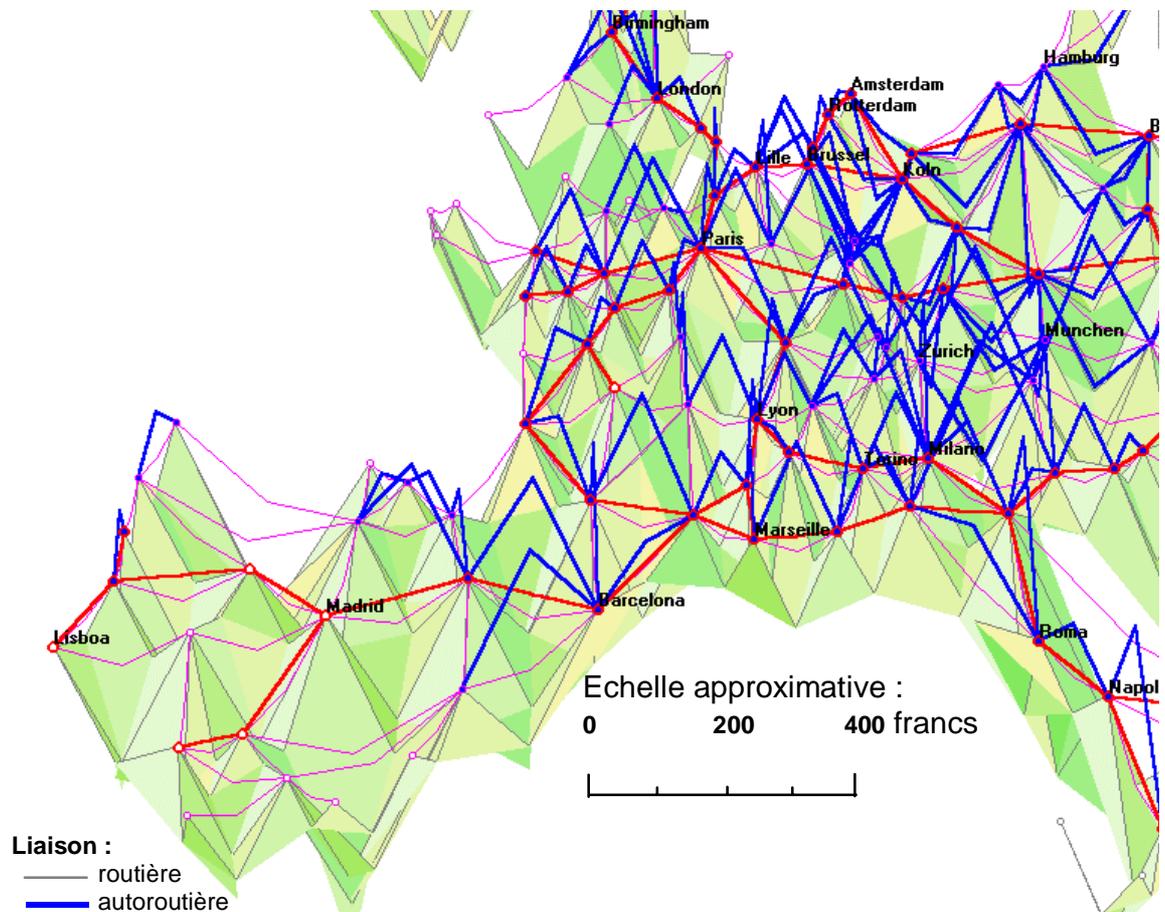
H. Baptiste, E. Baussier,

B. Bourin, L. Chapelon -

Fichiers.

© Laboratoire du Centre d'Etudes Supérieures d'Aménagement, Tours, 1996.

CARTE EN RELIEF DE COÛT



Liaison :

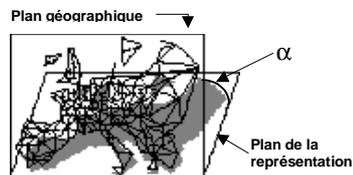
- routière
- autoroutière
- T.G.V.
- ferroviaire classique

Ville reliée au réseau :

- T.G.V.
- ferroviaire classique
- autoroutier

Angle de vue :

$$\alpha = 30^\circ$$



L'angle de vue adopté (30°) ainsi que les nuances de vert facilitent la perception des différences entre les modes de transport

Options de calcul des coûts :

nationalité	français
niveau de salaire	3 x SMIC
nb de passagers	1
puissance	5 ch
classe ferroviaire	2 ^{ème}
distance parcourue	300 km
coût généralisé	professionnel

Conception et réalisation :

Ph. Mathis, A. L'Hostis.
avec la collaboration de :
M. Mayaud - Cartographie
H. Baptiste, E. Baussier,
B. Bourin, L. Chapelon -
Fichiers.

© Laboratoire du Centre d'Etudes
Supérieures d'Aménagement,
Tours, 1996.

B. *Le relief “inversé”*

Jusqu'à présent, les liaisons des réseaux s'inscrivent en négatif dans la troisième dimension. C'est-à-dire que les liaisons peu performantes s'étagent **sous** le plan des villes. On construit alors des “vallées” et les villes sont situées au sommet de “pics”.

A partir du graphe des arcs minimaux, nous inscrivons les liaisons au-dessus du plan des villes, de manière à créer non plus des “vallées” mais des “montagnes”. Il s'agit uniquement d'inverser la troisième coordonnée (le “z”) des points médians des liaisons.

Nous montrons ici deux cartes : l'une en relief basé sur les arcs minimaux, et la même en relief inversé. La **Erreur! Source du renvoi introuvable.**, page II-209, est une image des réseaux à grande vitesse européens selon les schémas directeurs du TGV et de l'autoroute. C'est une vue de l'océan qui montre les réseaux de l'arc Atlantique. Nous avons figuré les arcs du ferry des lignes régulières de 1994⁵²⁸. La **Erreur! Source du renvoi introuvable.** en page II-209, montre le relief inversé de l'arc Atlantique vu à partir d'une position située à l'Ouest.

Le message véhiculé par la représentation est très différent de celui des cartes basées sur le principe général en relief négatif. La première carte fait ressortir le réseau TGV qui est posé sur la cime des crêtes d'espace-temps. L'espace interstitiel est rejeté au fond des interstices du réseau. Tout au contraire, sur la carte en relief inversé, le réseau TGV s'inscrit au fond des vallées d'espace-temps, tandis que l'espace banal prend la forme de massifs montagneux. Plus la montagne est élevée, et plus les liaisons sont lentes.

La première carte souligne les liaisons TGV entre les grands pôles, tandis que la seconde met l'accent sur les obstacles temporels qui sont la conséquence de l'absence de liaisons performantes.

La carte en relief inversé est vue sous un angle (15°) inférieur à l'angle de vue de la **Erreur! Source du renvoi introuvable.** (30°), pour que l'on puisse distinguer le réseau TGV plus clairement. En effet, avec un angle de 30°, les montagnes du relief inversé cachent presque totalement le réseau rapide, ce qui rend la compréhension du relief très difficile.

En regardant attentivement la **Erreur! Source du renvoi introuvable.** on se rend compte de la richesse de la représentation : les montagnes d'espace-temps y jouent, dans l'accessibilité aux lieux, exactement le même rôle que le relief physique. Pour aller de Bordeaux à Lyon, il est préférable d'emprunter le TGV de fond de vallée passant par Toulouse et Montpellier, que de traverser les chaînes de montagnes

⁵²⁸ *European timetable*, 1994. - Peterborough : Thomas Cook.

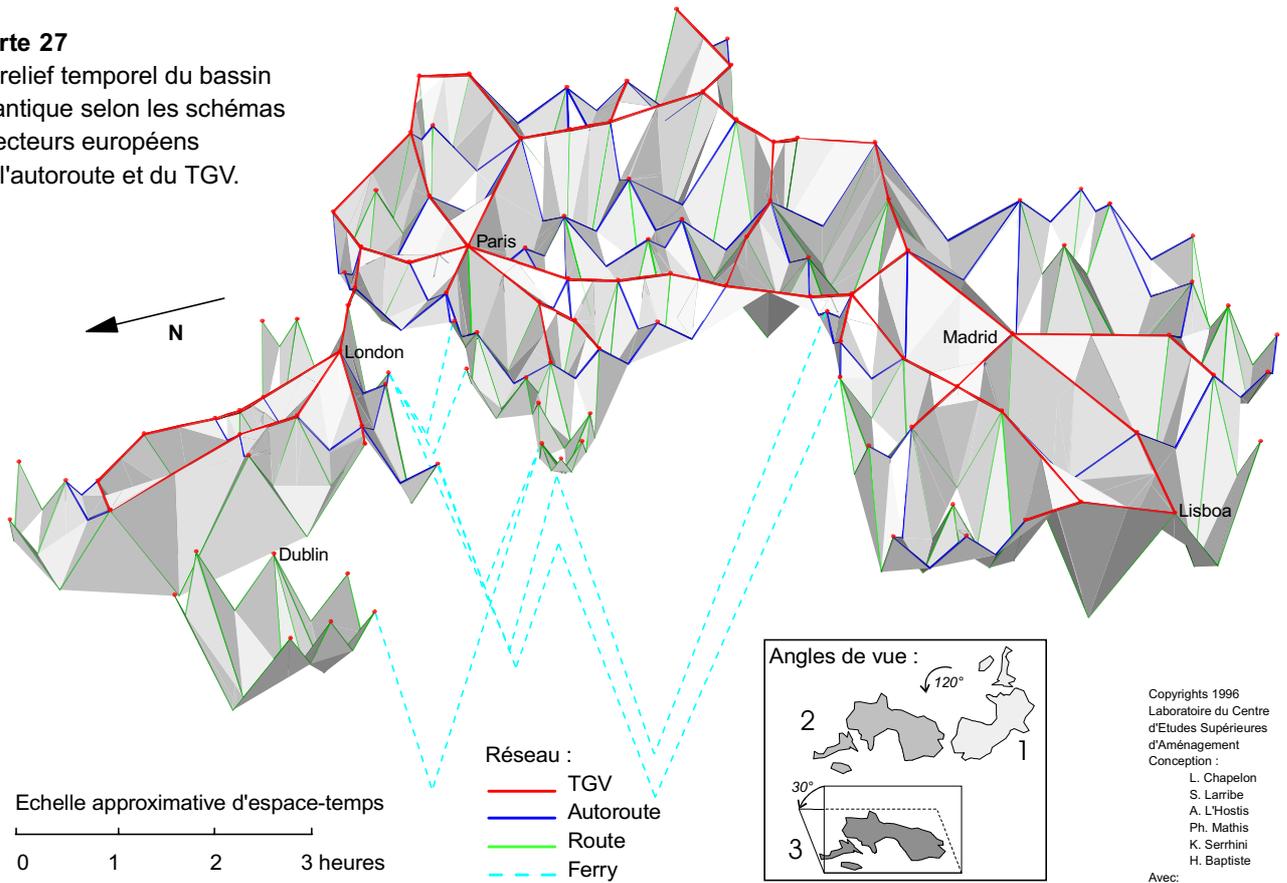
d'espace-temps escarpées. Les montagnes d'espace-temps de la carte cachent les villes difficiles d'accès.

La plus grande richesse des cartes en relief inversé génère une contrepartie. Ces représentations sont beaucoup plus sensibles au point de vue adopté que les cartes en relief négatif. Il est plus difficile d'avoir une vision globale du réseau, car le relief cache les réseaux et les villes, alors que sur les cartes en relief négatif les villes et le réseau sont mis en évidence. Ces cartes sont très nettement dépendantes du choix du point de vue, donc aussi éminemment soumises aux choix et à la subjectivité du modélisateur.

La métaphore du relief prend ici un sens beaucoup plus concret que sur les cartes basées sur les modes minimaux. Le problème est que les montagnes occultent en partie les villes et les réseaux, ce qui rend la représentation plus difficile à comprendre. Sur une carte statique il est difficile de comprendre la topologie de l'espace.

Carte 27

Le relief temporel du bassin atlantique selon les schémas directeurs européens de l'autoroute et du TGV.

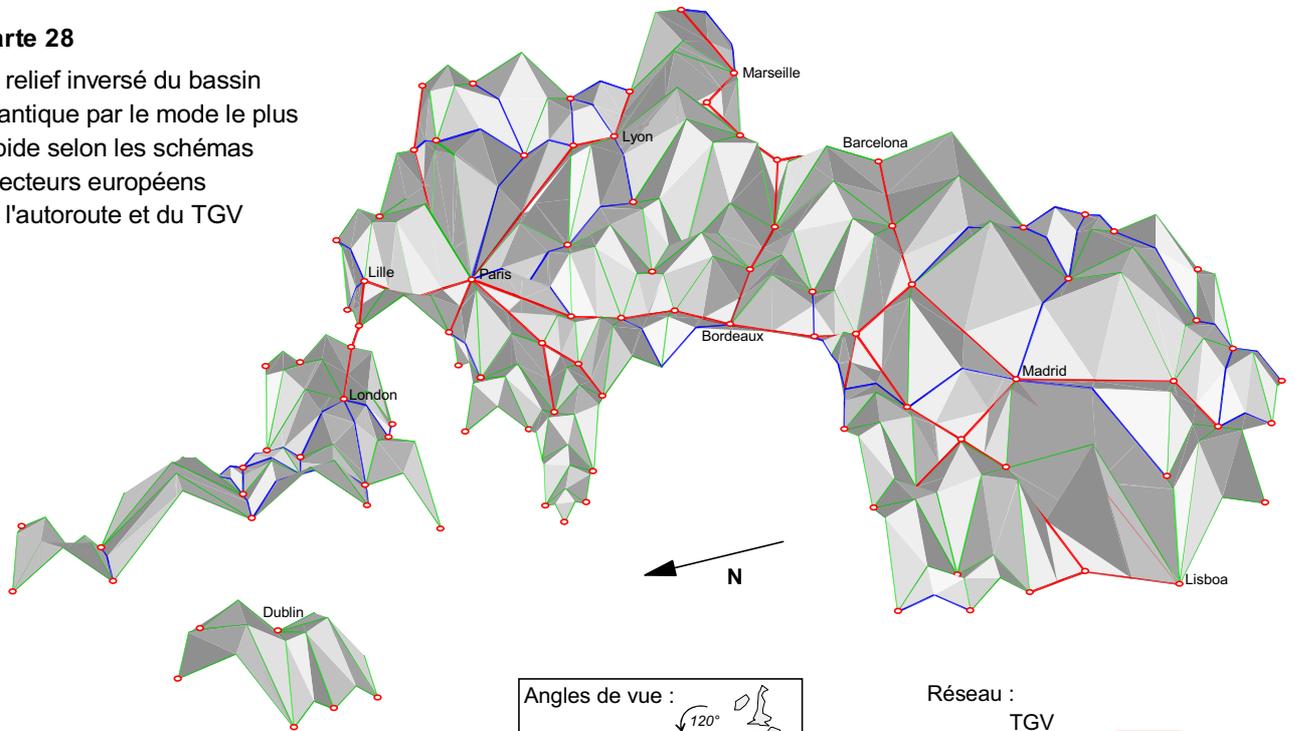


Copyrights 1996
Laboratoire du Centre
d'Etudes Supérieures
d'Aménagement
Conception :
L. Chapelon
S. Larribe
A. L'Hostis
Ph. Mathis
K. Serrhini
H. Baptiste
Avec:
M. Mayaud, cartographe

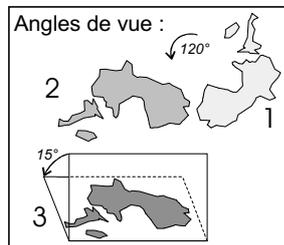
C.

Carte 28

Le relief inversé du bassin atlantique par le mode le plus rapide selon les schémas directeurs européens de l'autoroute et du TGV



Copyrights 1996
 Laboratoire du Centre
 d'Etudes Supérieures
 d'Aménagement
 Conception :
 L. Chapelon, S. Larribe, A.
 L'Hostis, H. Baptiste,
 Ph. Mathis, K. Serrhini
 Avec : M. Mayaud, cartographe



Réseau :
 TGV ——— (red line)
 Autoroute ——— (blue line)
 Route ——— (green line)

Echelle approximative d'espace-temps
 0 1 2 3 heures

Cartographie dynamique

Les images de synthèse constituent les vues particulières d'un modèle général. L'aspect interactif du processus permet d'établir une véritable **cartographie dynamique**. L'analyse s'établit en visualisant toutes les facettes de la structure. Au cours de la manipulation on fixe – on enregistre – des vues jugées intéressantes. On retrouve le principe de l'extrait interprété qui est le mode d'exploitation de l'imagerie médicale⁵²⁹.

Une animation, avec la possibilité d'effectuer des "arrêts sur image", autorise une bonne lecture de la représentation et permet une exploration systématique du modèle. Cette méthode, parce qu'elle aide à mieux comprendre le relief, permet une plus grande lisibilité, et, en conséquence, une plus grande objectivation. La subjectivité inhérente aux images de synthèse et aux modèles est ici considérablement réduite : toute la séquence dont est extraite l'image utilisée pour construire le diagnostic est disponible. La raison du choix d'une image parmi une multitude d'autres possibles est expliquée.

La cartographie dynamique offre une réponse aux problèmes de distorsions topologiques et métriques de la projection de la surface en trois dimensions. Elle permet de dévoiler les faces cachées – au sens propre – de la représentation. Tout élément qui aide à comprendre la forme du relief d'espace-temps aide aussi à analyser les proximités – la topologie – et les cheminements minimaux – la métrique – de l'espace.

Nous pouvons produire une séquence d'images de la structure en relief où l'on fait varier l'angle de vue de degré en degré. On réalise ainsi une animation qui montre l'évolution progressive du message véhiculé par la représentation⁵³⁰.

Il s'agit cependant d'une technique peu utilisée en Aménagement et qui demande un important travail de développement, aussi bien pour la mise au point technique – les techniques et les logiciels de visualisation et d'animation en trois dimensions sont très récents⁵³¹ – que pour la construction d'un cadre méthodologique. Le graphe en trois dimensions devient alors, selon l'expression de Sylvie Rimbart, un « modèle qui fait bouger les cartes »⁵³².

⁵²⁹ Cf. "L'exemple de l'imagerie médicale", page 25.

⁵³⁰ Nous fournissons en annexe du document écrit un exemple d'application de la cartographie dynamique sur un support informatique.

⁵³¹ Sylvie RIMBERT, 1992. - *op. cit.* - p. 147.

⁵³² *Ibid.* - p. 133.

Conclusion du chapitre II

Les représentations en relief sont basées sur le graphe du système de transport. La surface chorotaxique est attachée aux faces du graphe routier. La surface obtenue est complexe. Elle réalise un espace froissé qui s'appuie sur les arcs brisés pour garder une longueur cohérente. Le principe des cartes en relief repose sur la déformation de la surface attachée au graphe routier. Cette déformation nous indique la déformation de l'espace sous l'effet des réseaux de transport rapide.

Paradoxalement, si le principe de construction des cartes en relief est extrêmement simple, la construction n'est possible qu'à l'aide de l'ordinateur qui exécute un processus complexe.

La carte en relief, conformément aux spécifications mathématiques que nous avons fixées dans la première partie de la thèse, est une transformation homéomorphique mais non isométrique du plan chorotaxique.

Nous présentons une variante du principe de construction en appuyant la surface chorotaxique sur les arcs minimaux du graphe. La forme du relief est alors beaucoup plus riche. Aux pics d'espace-temps se substituent des crêtes pour les liaisons rapides, et des vallées qui figurent l'espace interstitiel.

Les paramètres de construction de l'image sont nombreux ; ils doivent être orientés par le modélisateur en fonction du propos recherché.

Le passage d'une structure en trois dimensions au plan de l'image introduit des distorsions dans la métrique mais aussi dans la topologie de l'espace. Tout doit être mis en œuvre pour exprimer l'idée d'une structure en trois dimensions. De cette manière, le lecteur reconstruit la structure en trois dimensions à partir de l'image plane et il peut retrouver la topologie et la métrique originelles.

Les longueurs des arcs sont proportionnelles à la durée nécessaire à leur parcours. Les cartes en relief offrent une image cohérente de la métrique de graphe. En particulier, les cartes en relief établissent une représentation cohérente de l'inégalité triangulaire si difficile à appréhender sur un espace non euclidien.

Les cartes en relief offrent une image de la superposition des espaces et de l'effet tunnel, phénomènes que nous avons décrits dans la première partie de la thèse. Elles proposent une relecture de trois paradoxes de la représentation de l'espace et des réseaux de transport. Le rebroussement ou inversion spatiale, la ville sphérique et l'inversion des proximités, ainsi que les espaces dualisés qui n'entrent en contact qu'aux noeuds, sont comparés avec la représentation en relief. Celle-ci permet de les analyser et de mieux les comprendre. Les cartes en relief font progresser la compréhension des distorsions spatiales.

L'hypothèse de la nature heuristique et didactique des cartes en relief est ainsi vérifiée. Les cartes en relief permettent la fonction de recherche et de communication.

Enfin, les cartes en relief sont un outil décisionnel en Aménagement. Elles permettent d'établir un diagnostic de l'espace et des réseaux de transport. Le modèle qui leur donne forme est modifié pour construire des hypothèses de développement des réseaux, qui visent à corriger une situation jugée insatisfaisante. La simulation de ces hypothèses, et surtout de leurs effets éventuels, permet d'apporter des éléments qui sont de nature à éclairer la décision.

L'hypothèse que nous avons posée à la fin du chapitre liminaire se trouve donc vérifiée.

Le principe général des cartes en relief se prête à de multiples développements. Nous abordons des représentations en relief de coût. Elles montrent des différenciations modales et spatiales selon la nature des coûts de transport dans chaque pays.

Le relief inversé consiste à placer les arcs peu performants au-dessus du plan chorotaxique et non plus en dessous comme dans le principe général. L'image est profondément transformée, elle est moins lisible, mais elle recèle une information très riche. La métaphore du relief y prend un sens plus concret, car les relations difficiles sont figurées par des montagnes escarpées, et non par des vallées.

La cartographie dynamique développe l'idée d'une animation des cartes en relief dans le but de rendre la forme de la surface en trois dimensions plus compréhensible. On retrouve ici l'idée de l'extrait interprété qui est le mode d'utilisation de l'imagerie médicale.

CONCLUSION DE LA PARTIE II

Nous voulons représenter les interactions entre l'espace et les réseaux de transport.

Les représentations de l'espace, de la surface parfaite des théoriciens de l'économie spatiale aux anamorphoses d'espace-temps, appartiennent toutes au domaine de la cartographie. Les représentations théoriques sont écartées d'emblée pour leur faible portée opératoire. La cartographie thématique permet de visualiser un phénomène spatialisé, mais elle n'exprime pas correctement les distances fonctionnelles. Les représentations du réseau sont d'un plus grand intérêt. Les données ponctuelles peuvent devenir zonales par la construction des isochrones. Un bon compromis entre l'erreur systématique d'interpolation des isochrones et les simples indications aux noeuds consiste à reporter les temps d'accès par classes sur les arcs du réseau le plus proche du continuum spatial. L'idée de l'espace réticulaire est bien montrée et la distance visuelle produit des mesures cohérentes. Cependant, ces cartes ne peuvent être qu'unipolaires.

Montrer les distances globalement est l'apanage des représentations multipolaires. Les anamorphoses transforment l'espace chorotaxique sous l'effet des moyens de transport rapides. Ces représentations correspondent exactement à notre problème général de recherche. Nous nous faisons cependant l'écho de la critique fondamentale des anamorphoses : les points des espaces interstitiels semblent bénéficier des améliorations apportées aux noeuds.

Sur la base de cette revue critique, nous introduisons les cartes en relief. Elles répondent à l'essentiel de nos préoccupations. Elles montrent un espace réseau modélisé par un graphe. La métrique de graphe fournit des mesures cohérentes lors de la lecture. Le traitement des espaces interstitiels montre, à l'inverse des anamorphoses, la perte relative d'accessibilité pour les zones mal reliées.

Les cartes en relief constituent un modèle qui fournit des éléments susceptibles d'éclairer la décision. Le modèle est utilisé pour l'élaboration de diagnostics et pour la simulation d'hypothèses de développement des réseaux.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Il convient ici de rappeler les principaux éléments abordés au cours du raisonnement.

Les choix en matière d'infrastructures de transport ont des répercussions profondes sur l'Aménagement de l'espace. Les objectifs de l'Aménagement doivent être pris en compte dans la décision. Nous voulons construire un modèle dont la vocation est d'apporter des éléments qui permettent d'éclairer la décision à la lumière des objectifs de l'Aménagement du territoire.

Comme nous l'avons montré dans le premier chapitre de la deuxième partie de la thèse, les cartes existantes ne sont pas totalement satisfaisantes pour décrire les interactions entre l'espace et les réseaux. Les représentations en anamorphoses montrent les effets de contraction sélective de l'espace, mais ne différencient pas le sort réservé aux espaces interstitiels de celui des noeuds des réseaux à grande vitesse. Comme l'exprime Jacky Perreur, ces cartes montrent de fausses proximités et en dissimulent de réelles.

Nous proposons un type de représentation différent dans le but de pallier les défauts des représentations existantes et d'améliorer la compréhension des effets complexes des réseaux sur l'espace. Notre objectif est de construire une représentation qui exprime les interactions entre l'espace et les réseaux, qui prenne en compte les différents modes de transport, et qui intègre les durées des déplacements. Nous proposons une représentation basée sur le graphe du réseau de transport, où la longueur des arcs est proportionnelle aux durées nécessaires à leur parcours. La surface de l'espace est déformée : le plan chorotaxique devient une surface complexe en trois dimensions.

On trouve dans les discours sur l'espace des aménageurs, des géographes de l'analyse spatiale, des économistes spatialistes, des historiens, de certains sociologues, et bien sûr, des spécialistes des réseaux de transport, un grand nombre de métaphores qui sont utilisées pour évoquer les perturbations de l'espace-temps. Les représentations en relief d'espace-temps construisent une image qui permet d'élaborer un discours descriptif dont les termes font écho à ces métaphores.

Le principe des cartes exprime la transformation de l'espace sous l'effet des réseaux de transport rapide. C'est un espace hiérarchisé et hétérogène qui est fortement influencé par la forme spatiale de l'organisation réticulaire. Les contractions sélectives sont exprimées, mais également la dilatation relative des zones interstitielles qui n'est pas visible sur les cartes en anamorphose. La carte en relief montre l'effet tunnel des liaisons rapides ainsi que la superposition des espaces-réseaux.

Les cartes en relief sont un outil d'analyse et de lecture des effets spatiaux des infrastructures de transport. Elles offrent une solution à trois paradoxes de la représentation de l'espace-temps. Le phénomène de l'inversion spatiale décrit par William Bunge, le paradoxe de la ville sphérique, et le réseau comme superposition d'espaces de Bernard Marchand, sont tous trois représentés de manière cohérente. Le caractère heuristique des cartes en relief est ainsi vérifié.

Le modèle qui génère la représentation permet de simuler des états hypothétiques futurs des réseaux de transport, et ensuite d'analyser les effets de ces hypothèses selon une démarche prospective. Les cartes en relief permettent la fonction de diagnostic, à l'instar de l'imagerie médicale. Cependant, le modèle permet de dépasser la fonction de diagnostic pour entrer dans le domaine de la simulation.

La représentation produit des éléments qui peuvent éclairer sous un jour nouveau certaines conséquences de la modification des réseaux de transport. Il est possible d'évaluer de manière prospective les effets des projets de modification de l'offre de transport. En ce sens, les représentations en relief constituent un outil s'insérant dans un processus de décision dans le domaine des transports et de l'Aménagement de l'espace.

Pour fonder les bases théoriques des cartes en relief nous avons porté l'attention sur les structures mathématiques sous-tendues dans les représentations spatiales. Le second chapitre de la première partie de la thèse a été l'occasion de développer les aspects mathématiques, et de mettre à jour les spécifications d'une représentation pertinente de l'espace.

Deux grands aspects mathématiques sont à souligner. La métrique exprime les relations entre les lieux, tandis que la topologie garantit l'étendue spatiale. Du point de vue métrique d'abord, les cartes en relief proposent une représentation cohérente et lisible de la distance-temps sur le graphe d'un réseau aux performances disparates. Sous l'angle topologique, les cartes en relief montrent un espace dont la structure est respectée. La topologie de l'espace froissé est conforme à celle de l'espace chorotaxique. Ces deux questions – la métrique et la topologie – sont essentielles pour la compréhension de l'espace. Nous avons établi une transformation homéomorphe mais non isométrique du plan chorotaxique.

La représentation est basée sur un graphe. Dans une démarche d'Aménagement, nous avons établi une modélisation opératoire, au prix de la perte de la formulation

analytique. De ce point de vue, nous nous distinguons d'une approche à vocation de généralisation qui peut être celle des théoriciens de l'Economie Spatiale, ou de la Géographie, qui recherchent des lois générales, donc analytiques. Les représentations basées sur une formulation analytique sont appelées systématiques : nous avons donc construit une représentation non systématique des distances.

Les cartes en relief expriment un espace résolument non-euclidien. L'écart au chemin euclidien est montré sous la forme d'arcs brisés dans la troisième dimension. L'inégalité triangulaire, si difficile à concevoir sur une géométrie non-euclidienne, est clairement représentée sur les cartes en relief. La carte froissée apporte une meilleure compréhension de la métrique des réseaux de transport, et elle illustre la déformation de l'espace tout en maintenant la structure topologique.

La remise en cause de la structure euclidienne a permis de produire des structures mathématiques et des représentations différentes qui ont modifié la perception du monde réel. Les cartes en relief, comme les anamorphoses, proposent une nouvelle image de l'espace. Les différences visibles entre ces représentations et les cartes classiques relativisent celles-ci, donnent la mesure de leur prégnance, et permettent d'enrichir la perception de l'espace réel.

Nous avons construit la justification théorique et conceptuelle du modèle. L'analyse formelle des cartes en relief nous permet d'apporter une validation théorique. Elle autorise également une meilleure compréhension de la représentation. La dimension analytique s'appuie maintenant sur une base théorique solide. Les bases étant à présent établies, les représentations en relief peuvent être utilisées dans un cadre opératoire en Aménagement du territoire, comme nous l'avons montré sur les réseaux à grande vitesse de l'Ouest français.

Le modèle produit des images très éloignées de la carte conventionnelle qui, à l'instar de l'imagerie médicale, nécessitent un apprentissage pour pouvoir être lues, mais qui permettent d'alimenter le processus décisionnel.

Nous avons montré que la carte en relief est un instrument de communication, un outil de diagnostic et d'évaluation prospective des projets, en d'autres termes qu'elle est un modèle décisionnel pour l'Aménagement du territoire. Les cartes en relief proposent une information nouvelle : on visualise des effets de contraction/dilatation sélective de l'espace-temps – comme le montre la perte relative d'accessibilité de Chartres – dont on n'avait auparavant pas d'image. Les représentations en relief remplissent la fonction d'analyse et de recherche qui correspond à la dimension heuristique du modèle. L'hypothèse que nous avons posée à la fin du chapitre liminaire est entièrement vérifiée.

Au delà de la cartographie de l'espace-temps, les cartes en relief autorisent la représentation de fonctions de coût de transport complexes. Les cartes en relief inversé – qui montrent ce qui sépare et non plus ce qui relie – appellent une

dynamisation de la représentation dans le but de faciliter la lecture et la compréhension. La cartographie dynamique ouvre une perspective intéressante de développement : cette technique améliore la lisibilité de la représentation, et réduit la subjectivité issue du choix de l'extrait effectué par le modélisateur, en tendant vers une description exhaustive de la forme du relief. Ces deux axes de recherche montrent que le travail dépasse les termes de l'hypothèse de départ.

Le champ d'application des représentations en relief est susceptible d'être élargi. Le modèle décisionnel de représentation de l'espace-temps pour l'Aménagement du territoire devient un instrument d'analyse du coût généralisé de déplacement, et introduit une dimension dynamique.

ANNEXES

LA CONVERGENCE DE L'ESPACE TEMPS

Le modèle de convergence de l'espace-temps repose sur une analyse au cours du temps historique des durées des trajets entre les villes. Ce modèle, développé par Donald G. Janelle, nous donne l'évolution de la distance-temps suivant l'amélioration des infrastructures et des moyens de transport.

On considère une ligne de transport homogène, au sens où on peut circuler à une vitesse donnée sur la totalité du tracé. On calcule sur cinq destinations, à partir d'une origine, les durées de transport en 1950 avec une vitesse de 40 kilomètres à l'heure et 1970 avec une vitesse double. Le taux de convergence est le gain de temps sur le trajet, divisé par le nombre d'années séparant les deux mesures.

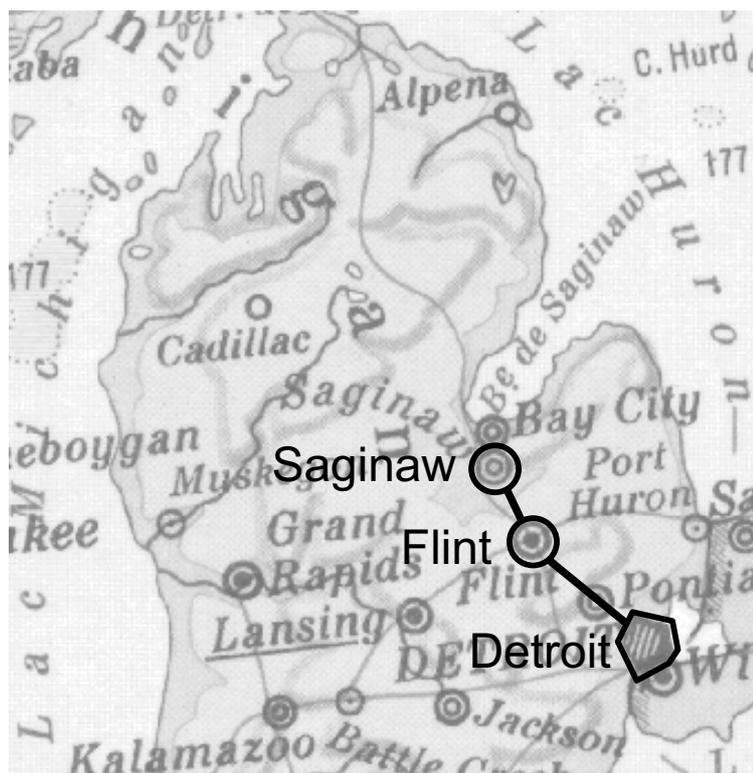
	A	B	C	D	E	F
Distance de A vers...	0	10	20	30	40	50
Durée du trajet à 40 km/h en 1950	0	24	48	72	96	120
Durée du trajet à 80 km/h en 1970	0	12	24	36	48	60
Différence entre 1970 et 1950	0	12	24	36	48	60
Taux de convergence (mn/an)		0,6	1,2	1,8	2,4	3,0

tableau 6 : l'accroissement du taux de convergence d'espace-temps avec l'éloignement¹

Les durées de transport ont toutes été divisées par deux entre 1970 et 1950. Cependant, et malgré l'hypothèse faite sur l'homogénéité des lignes de transport, le taux de convergence n'est pas constant.

On constate sur la dernière ligne du tableau que le taux de convergence augmente avec l'éloignement des destinations. Ceci signifie que B s'est rapproché de A au rythme **0,6** minutes par an, pendant que F et A convergeaient au taux de **3** minutes par an. Ainsi, des points situés à 80 kilomètres l'un de l'autre convergent 5 fois plus vite que des points espacés de 16 kilomètres.

¹ Tableau extrait de Donald D. JANELLE, 1968. - *op. cit.* - p. 9.



carte 14 : la région de Detroit (USA)

Ainsi, on prouve que l'amélioration du système de transport reliant plusieurs villes entraîne un taux de convergence plus élevé pour les villes éloignées que pour les villes intermédiaires. Or, au regard de la théorie des places centrales, la distance entre une ville importante et sa plus proche voisine, est plus grande que la distance séparant une petite ville et son homologue la plus proche. Ainsi Donald D. Janelle affirme que la diminution globale des distances-temps bénéficie plus aux grandes villes qu'aux petites².

L'exemple de trois villes de l'état du Michigan, qu'on peut voir sur la carte 14, illustre parfaitement cette assertion. Entre Detroit, Flint et Saginaw la ligne de diligences de 1840 a laissé la place à une autoroute selon un tracé presque identique. La réduction des temps de trajet ne permet pas seulement à des gens habitant entre Saginaw et Flint de se rendre plus efficacement à Flint. Moyennant un léger surcoût temporel, elle leur permet d'accéder directement à Detroit, où le choix de services et de fonctions est plus élevé. Ainsi, on peut affirmer que toute amélioration des réseaux de transport procure un avantage plus grand aux centres de plus haut niveau (au sens de la théorie des places centrales) qui sont connectés, qu'aux centres de niveau inférieur.

² Donald D. JANELLE, 1968. - *op. cit.* - p. 9.

ANNEXES MATHÉMATIQUES

Cette partie a été élaborée avec l'aide de Laurent Chapelon (laboratoire du CESA), Karim Hamza (Maîtrise de Mathématiques, Université de Tours) et M. Dampousse (département de Mathématiques, Université de Tours).

Notations et symboles mathématiques

E, F désignent des ensembles ; A, B des sous ensembles.

a, b, c, \dots désignent des éléments d'un ensemble.

N Ensemble des entiers positifs ou nuls.

Z Ensemble des entiers, positifs, négatifs ou nuls.

R Ensemble des nombres réels.

R⁺ Ensemble des nombres réels positifs.

• Ensemble vide.

$a \in E$ a est un élément de l'ensemble E .

$a \notin E$ a n'est pas un élément de l'ensemble E .

$A \cup B$ Réunion de A et de B .

$A \cap B$ Intersection de A et de B .

$A \subset B$ L'ensemble A est une partie de l'ensemble B , (et éventuellement $A=B$).

$A \times B$ Produit Cartésien de A par B , (ensemble des couples (a, b) avec $a \in A$ et $b \in B$). On trouve la notation $E \times E = E^2$.

$d(a, b)$ distance du point a au point b .

$P(X)$ l'ensemble des parties de X .

Pour un graphe G :

$$G = (S, A)$$

S : Ensemble des sommets de G .

A : Ensemble des arcs de G .

Notions élémentaires

Les mots suivis d'un astérisque (*) possèdent une définition située à leur position alphabétique dans le glossaire.

Ensemble

Un **ensemble** est une collection d'objets de nature quelconque, qui sont appelés ses éléments.

Partition

On réalise une **partition** d'un ensemble E en deux lorsque l'on obtient deux ensembles disjoints, c'est-à-dire sans aucun élément commun, et dont l'union est égale à E .

Singleton

Un **singleton** est un ensemble composé d'un seul élément. Par exemple, les ensembles $E = \{a\}$, $F = \{\emptyset\}$ sont des singletons.

Point

Un **point** est un élément d'un espace affine. On emploie ce terme, par extension, pour désigner « un élément de ».

Application (application multivoque)³

Une **application multivoque** Γ de E dans F est une loi qui fait correspondre à tout élément a de E un sous-ensemble bien défini de F noté $\Gamma(a)$; on peut avoir $\Gamma(a) = \emptyset$.

Le mot **application** sera utilisé ici dans le sens d'application multivoque.

Fonction (Application univoque)⁴

E et F étant deux ensembles donnés, une loi Γ qui fait correspondre à tout élément a de E , un élément bien défini de F noté $\Gamma(a)$, s'appelle **application univoque** de E dans F ou **fonction** définie sur E à valeurs dans F .

³ Claude BERGE, 1958. - *Théorie des graphes et ses applications*. Paris : Dunod. - p. 4.

⁴ *Ibid.*

Application continue sur un ensemble

Une application f de E dans F est **continue** si pour tout x_0 de E , $f(x)$ tend vers $f(x_0)$ lorsque x tend vers x_0 .

Injection (application injective)

Une **injection** d'un ensemble E dans un ensemble F est une application telle que tout élément de F est l'image *d'au plus un* élément de E .

Pour un telle application il est impossible que deux éléments de l'ensemble de départ (E) aient la même image dans l'ensemble d'arrivée (F).

Surjection (application surjective)

Une **surjection** d'un ensemble E dans un ensemble F est une application telle que tout élément de F est l'image *d'au moins un* élément de E .

Bijection (application bijective)

On appelle **bijection** une application qui est à la fois injective* et surjective* .

Configuration

Soit un ensemble E . Quand on attribue des coordonnées, dans un espace à n dimensions, aux éléments de E , on construit une **configuration**.

De l'espace affine à la métrique

Espace affine

On appelle **espace affine** un couple (A, E) si :

- A est un ensemble non vide, dont les éléments s'appellent des points.
- E est un espace vectoriel sur \mathbb{R} , muni d'une loi de $A \times E \rightarrow A$, notée $+$, vérifiant :
 1. pour tout $a \in A$, $\bar{x} \in E$, l'application $\bar{x} \rightarrow a + \bar{x}$ est une bijection de E sur A .

2. pour tout $a \in A$, et $(\vec{x}, \vec{y}) \in E^2$:

$$(a + \vec{x}) + \vec{y} = a + (\vec{x} + \vec{y})$$

Espace vectoriel

Un **espace vectoriel** sur \mathbb{R} est un triplet $(E, +, \cdot)$ où $+$ et \cdot sont des lois de composition interne et externe respectivement, et qui vérifient les propriétés :

- $(E, +)$ est un groupe commutatif
- Quel que soit a appartenant à E , $1 \cdot a = a$ (1 est l'élément unité)
- Quels que soient a, b éléments de E et α un nombre réel, encore appelé scalaire :

$$\alpha \cdot (a + b) = \alpha \cdot a + \alpha \cdot b$$

- Quels que soient les scalaires α et β et l'élément a de E :

$$(\alpha + \beta) \cdot a = \alpha \cdot a + \beta \cdot a$$

$$(\alpha \cdot \beta) \cdot a = \alpha \cdot (\beta \cdot a)$$

Tout élément de E , muni d'une structure d'espace vectoriel est appelé vecteur. Il est possible de définir l'espace vectoriel non sur \mathbb{R} , mais plus généralement sur un corps, notion que nous ne développerons pas ici.

Produit scalaire

Soit E un espace vectoriel sur un corps. On considère une application notée (\mid) de $E \times E$ dans \mathbb{R} . Cette application est appelée **produit scalaire** sur E si pour tout a, b et c dans E et λ dans \mathbb{R} on a :

- $(a \mid b) = (b \mid a)$
- $(\lambda a \mid b) = \lambda (a \mid b)$; $(a \mid \lambda b) = \lambda (a \mid b)$
- $(a + b \mid c) = (a \mid c) + (b \mid c)$
- $(a \mid b + c) = (a \mid b) + (a \mid c)$
- $(a \mid a) \geq 0$

Espace euclidien

L'espace euclidien est un espace vectoriel de dimension finie, muni d'un produit scalaire sur le corps \mathbb{R} .

Espace vectoriel normé

Soit $(E, +, \cdot)$ un espace vectoriel* sur \mathbb{R} et N une application de E dans \mathbb{R}^+ , ensemble des réels positifs ou nuls. On appelle **espace vectoriel normé** le couple (E, N) dans l'application N vérifie :

- Quel que soit a dans E , $N(a) \geq 0$
- Quel que soit a dans E , $N(a) = 0 \Leftrightarrow a = 0$
- Quels que soient le scalaire λ et le vecteur a de E ,

$$N(\lambda \cdot a) = |\lambda| \cdot N(a)$$

- Quels que soient les vecteurs a et b de E , on a :

$$N(a + b) \leq N(a) + N(b)$$

Le scalaire $N(a)$ est appelé norme du vecteur a , ou longueur de a .

Distance

Soit E un ensemble. On appelle **distance** sur E toute fonction $d : E \times E \rightarrow \mathbb{R}$ vérifiant les propriétés suivantes quels que soient a, b et c éléments de E :

$$d(a, b) \geq 0 \quad (\text{non négativité})$$

$$d(a, b) = d(b, a) \quad (\text{symétrie})$$

$$d(a, c) \leq d(a, b) + d(b, c) \quad (\text{inégalité du triangle})$$

$$d(a, b) = 0 \Leftrightarrow a = b \quad (\text{axiome de séparation})$$

Espace métrique

On appelle **espace métrique** tout couple (E, d) , où E est un ensemble et où d est une distance sur E .

Topologie

Une topologie sur X est la donnée d'un sous-ensemble τ de $P(X)$ tel que :

- (a) $(\emptyset \in \tau)$ et $(X \in \tau)$
- (b) τ est stable pour les intersections finies
- (c) τ est stable pour les unions quelconques

Un espace topologique est une paire (X, τ) où τ est une topologie sur X .

Etant donné un espace topologique (X, τ) , on appelle voisinage de $a \in X$ une partie de X contenant un ouvert contenant a .

Propriétés immédiates des voisinages :

- (i) tout voisinage de a contient a .
- (ii) Tout sous ensemble de l'espace E qui contient un voisinage de a est un voisinage de a .
- (iii) L'intersection d'un nombre fini de voisinages de a est un voisinage de a .
- (iv) Pour tout voisinage V de a , il existe un voisinage W de a tel que V soit voisinage de chacun des points de W .

Remarque :

Si, étant donné un ensemble X , on se donne pour chaque a de X , une famille V_a de parties de X contenant a et satisfaisant (a), (b), et (c), et si on appelle "ouverts" les parties qui sont voisinages de chacun de leurs points, on se donne alors une topologie sur X . En fait, c'est l'unique topologie dont le système de voisinages des a de X soit les V_a . Cela signifie que la donnée des voisinages d'une topologie la caractérise. Donc, "moralement", se donner une topologie sur X , c'est se donner un système de voisinages pour chacun de ses points.

Topologie discrète

On construit une topologie discrète quand tout sous-ensemble qui contient a est un voisinage de a . Autrement dit, toute partie est ouverte.

Espace topologique discontinu

Un **espace topologique discontinu** un espace topologique* dont les composantes connexes* sont des singletons* .

Exemples : les espaces discrets, le corps des rationnels (\mathbb{Q}) sont des espaces topologiques discontinus.

Connexité (d'un espace topologique)

Un espace topologique* est dit **connexe** s'il n'existe aucune partition* de cet espace en deux ouverts non vides.

Homéomorphisme

Soient E, F deux espaces topologiques. Un **homéomorphisme** (ou bijection bicontinue) de E sur F est une bijection continue de E sur F , dont la réciproque est continue. Si une telle fonction existe, on dit que E et F sont homéomorphes.

De la métrique à la topologie

A partir d'une structure métrique sur E on peut induire une topologie. Le processus de construction est le suivant. Si, pour tout x de E et tout réel strictement positif r on désigne par $B(x, r)$ l'ensemble des y tels que $d(x, y) < r$ (ensemble appelé "boule ouverte de centre x et de rayon r pour la métrique d ") et si l'on considère la famille $V(x)$ de parties de E définie par :

$$\forall V, V \subseteq E, V \in V(x) \text{ si et seulement si } r > 0 \text{ tel que } B(x, r) \subseteq V$$

Alors, on définit une structure topologique sur E pour laquelle $V(x)$ est la famille des voisinages de x .

Graphes

Un **graphe** $G = (S, A)$ est le couple constitué par :

- un ensemble $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ (les sommets)
- une famille $A = (a_1, a_2, \dots, a_m)$ composée d'éléments du produit cartésien $S \times S = \{(b, c) / b \in S, c \in S\}$ (les arcs)

Arête

Dans un graphe* , un arc donné sans orientation est appelé **arête**.

Mutligraphe

Un graphe composé uniquement d'arêtes* , sachant que plusieurs arêtes distinctes peuvent relier le même couple de sommets, est appelé **multigraphe**. Un multigraphe est un graphe donné sans orientation.

Graphe simple

Un multigraphe* sera dit **graphe simple** si :

- on n'a pas de boucle (arc d'un sommet à lui même)
- entre deux sommets il n'y a jamais plus d'une arête* pour les relier

p-graphe

Si p est un entier, on dira qu'un multigraphe* $G = (S, A)$ est un ***p*-graphe** s'il peut y avoir au plus p arcs distincts de A reliant le même couple de sommets (dans la même direction).

Graphe valué

Un **graphe valué**⁵ est un graphe $G = (S, A)$ auquel on adjoint une application v de l'ensemble A des arcs dans l'ensemble des nombres réels ; le nombre attaché à l'arc (a, b) est $v(a, b)$ et s'appelle la valeur de l'arc ; l'application v est la valuation du graphe.

Chaîne

On appelle **chaîne** une séquence d'arcs d'un graphe G telle que chaque arc de la séquence ait une extrémité en commun avec l'arc précédent et l'autre extrémité en commun avec l'arc suivant.

Chemin

On appelle **chemin** une séquence non vide d'arcs deux à deux adjacents (*i. e.* une chaîne*) et tous orientés dans le même sens.

⁵ Claude FLAMENT, 1968. - *op. cit.* - p.62-63

Longueur d'un arc

Dans un graphe valué* , la **longueur d'un arc** est donnée par la valeur associée à cet arc.

Longueur d'un chemin

Dans un graphe valué* , la **longueur d'un chemin** est donnée par la somme des valeurs associées aux arcs du chemin. Dans un graphe non valué la longueur du chemin correspond au nombre d'arcs qui le constituent.

Graphe connexe

On appelle **graphe connexe** un graphe tel que pour toute paire de sommets distincts il existe une *chaîne** reliant ces deux points.

Graphe fortement connexe

Un graphe est dit **fortement connexe** si pour toute paire de sommets distincts il existe un *chemin** reliant ces deux points.

Graphe partiel

Un **graphe partiel** G' de G est engendré par B inclus dans A l'ensemble des arcs et par les sommets de G . Le graphe partiel d'un graphe G est obtenu en supprimant des arcs mais en conservant les sommets de S .

$$G' = (S, B)$$

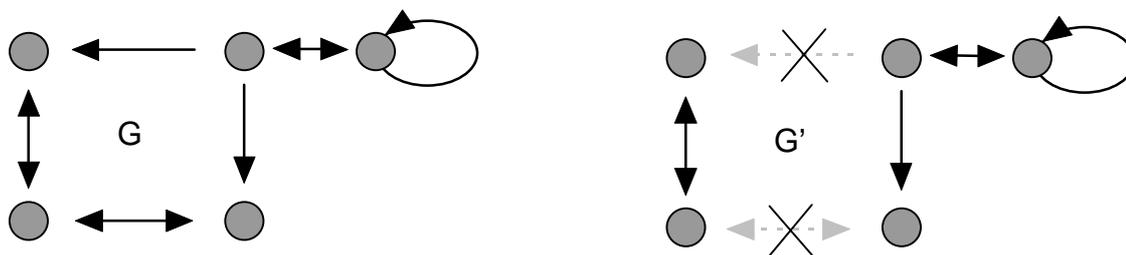


figure 29 : G' graphe partiel de G

Sous-graphe

Un **sous-graphe** de G est engendré par B inclus dans S l'ensemble des sommets et par les arcs de G ayant deux extrémités dans A . Cela signifie qu'on obtient le sous-graphe d'un graphe en supprimant des sommets et leurs arcs correspondants.

$$G' = (B, A)$$

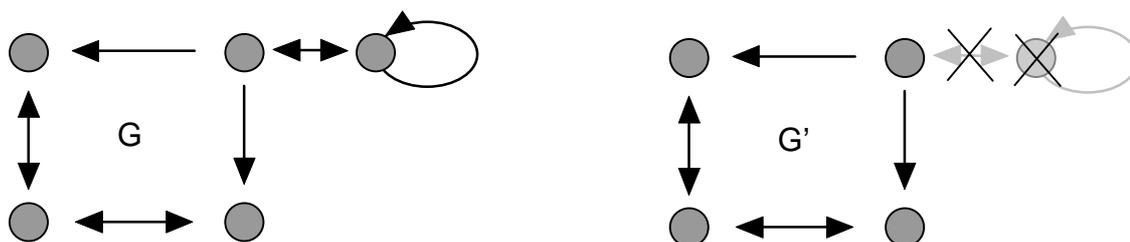


figure 30 : G' sous-graphe de G

Sous-graphe partiel

Un **sous-graphe partiel** de G est engendré par V inclus dans A l'ensemble des arcs et par A inclus dans S l'ensemble des sommets. C'est-à-dire qu'on obtient le sous-graphe partiel en supprimant des points de S et leurs arcs associés, ainsi qu'une série d'arcs supplémentaires.

$$G' = (A, V)$$

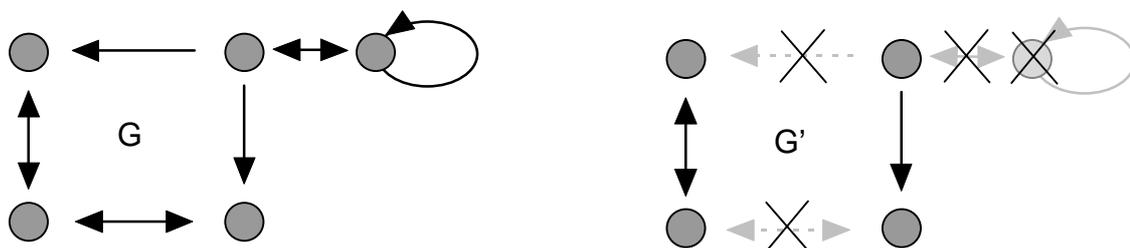


figure 31 : G' sous-graphe partiel de G

Graphe planaire⁶

Un graphe G est dit **planaire** s'il est possible de le représenter sur un plan de sorte que les sommets soient des points distincts, les arêtes des courbes simples et que deux arêtes ne se rencontrent pas en dehors de leurs extrémités.

La représentation de G sur un plan s'appelle un **graphe planaire topologique**.

⁶ Claude BERGE, 1983. - *op. cit.* - p. 16.

Face (d'un graphe planaire topologique)⁷

Soit G un graphe planaire topologique ; une face de G est par définition une région de plan limitée par des arêtes et telle que deux points arbitraires dans cette région peuvent toujours être reliés par un trait continu ne rencontrant ni sommet ni arête.

Graphe symétrique

Un graphe valué* est **symétrique** si pour tout arc de a vers b , il existe un arc de b vers a de même valeur.

Un graphe non valué est **symétrique** si pour tout arc de a vers b , il existe un arc de b vers a .

Ecart

Si a et b sont deux sommets d'un graphe G , l'écart $e(a, b)$ est donné par la longueur du plus court chemin* entre a et b .

Réseau

Le **réseau** est un ensemble du plan qui est d'un seul tenant et qui est formé par la réunion d'un nombre fini de courbes simples qui ne peuvent entrer en intersection qu'en leurs extrémités.

Itinéraire

Soit un ensemble S continu de lieux et une norme* euclidienne de distance* (étalon de mesure). Un **itinéraire** est défini comme l'ensemble ordonné des lieux de S successivement occupés lors d'un mouvement réalisable d'un lieu d'origine a vers un lieu destination b . (Un itinéraire est réalisable lorsqu'il est rendu possible par la structure géographique des supports de transport).

Distance réseau

La **distance-réseau** d_r , d'un lieu d'origine a vers un lieu destination b est définie comme la longueur minimum d'un itinéraire* (voir la définition de l'espace vectoriel normé*) de a vers b ⁸.

⁷ Claude BERGE, 1983. - *op. cit.* - p. 17.

⁸ Bernard GUESNIER, J.-H.-P. PAELINCK, 1987. - *Modélisation spatiale, Théorie et applications.* - Dijon : Série d'Econométrie appliquée N° 33, Collection de l'Institut de Mathématiques Economiques, Diffuseur Librairie de l'Université, Editeurs Bernard Guesnier, J.-H.-P. Paelinck - p. 1.

Distance de graphe

Pour que l'écart sur un graphe soit métrique il faut celui-ci vérifie deux conditions :

- le graphe doit être symétrique.
- Pour un graphe valué, les valeurs associées aux arcs doivent être strictement positives.

Nous appelons **distance de graphe** la structure ainsi construite.

PRÉSENTATION DU LOGICIEL MAP

La construction des cartes en relief a donné lieu à l'élaboration d'un logiciel. Celui-ci permet la construction et l'édition des graphes, ainsi que leur représentation. Le logiciel MAP conçu par l'auteur et Philippe Mathis, a été élaboré et programmé en totalité au laboratoire du CESA, de 1991 à 1996, avec l'aide de Laurent Chapelon, Sébastien Larribe, Kamal Serrhini et Hervé Baptiste.

MAP a été développé en parallèle avec le modèle D-LOCAT de Philippe Mathis pour la simulation dynamique des réseaux de transport par génération et affectation de flux, et le modèle NOD élaboré par Laurent Chapelon dont l'objet est la modélisation et les mesures des graphes de réseaux de transport. MAP permet la visualisation des résultats calculés avec D-LOCAT et NOD. Les trois logiciels sont déposés au titre de la propriété littéraire et artistique.

Le logiciel MAP comporte un module de création des noeuds du graphe. On procède en affichant en fond, dans la fenêtre principale, une image scannée d'une carte. On peut ensuite créer des noeuds d'un clic de souris sur la localisation. Un clic sur un noeud existant permet d'éditer ses caractéristiques – coordonnées, intitulé du lieu, population, etc. – et de les modifier à volonté.

Pour construire les arcs du graphe on procède en choisissant le type de liaison que l'on veut créer – autoroute, TGV, etc. – puis, on sélectionne les noeuds que l'on veut relier d'un clic de la souris sur leur image.

Le module de création d'arcs, intégré au logiciel de visualisation, permet de modéliser très rapidement des hypothèses de développement des réseaux. Il a été conçu dès l'origine comme un outil de modélisation pour la simulation.

Les arcs sont munis d'une valuation qui est leur longueur en kilomètres. Cette valeur est soit proposée par défaut (la distance euclidienne calculée entre les deux sommets multipliée par un coefficient correctif), soit entrée précisément quand on a le moyen de la déterminer. Le logiciel comporte un outil de vérification des données. Arc par arc on compare la longueur euclidienne et la longueur associée à l'arc. On fixe des pourcentages inférieurs et supérieurs de tolérance ; le modèle informe des dépassements et propose une valeur plus cohérente.

On peut représenter les noeuds et les arcs du graphe ; les arcs ont une couleur associée au mode de transport qu'ils représentent. On peut afficher tout ou partie du graphe, et les arcs peuvent être munis d'une flèche s'ils sont orientés.

Il est possible d'exploiter des fichiers de données associées aux noeuds (données de type "noeud-valeur") et des fichiers de données associées aux arcs (données de type "arc-valeur"). Un module de statistiques élémentaires (élaboration de classes et de codification par des couleurs) permet de traiter les données. Ensuite, elles peuvent être affichées : disques proportionnels et/ou dans la couleur de la classe, arcs d'épaisseur proportionnelle et/ou dans la couleur de la classe ou du mode de transport.

Les développements les plus importants du logiciel touchent à la partie graphique du rendu en trois dimensions. Les noeuds sont munis de trois coordonnées d'un repère cartésien. On peut modifier ces noeuds par rotation selon deux angles : en site et en azimut autour d'un noeud qu'on doit sélectionner.

Par la comparaison des vitesses permises sur chaque arc avec la vitesse du binôme fonctionnel (mode de transport) le plus rapide, on calcule les coordonnées en trois dimensions du milieu de l'arc. Plus le différentiel est important et plus le milieu est positionné profondément, en coordonnée z négative.

Ensuite, le modèle établit des facettes triangulaires (4 triangles pour chaque face du graphe) qui s'appuient sur les arcs. Ces facettes sont, elles aussi, munies de coordonnées en trois dimensions : elles décrivent la surface froissée.

La procédure de dessin des facettes débute par un tri de celles-ci, de l'arrière-plan vers l'avant-plan. Selon cet ordre, elles sont alors dessinées dans une teinte qui varie avec l'angle que fait le vecteur normal à la facette avec un vecteur qui simule la direction des rayons lumineux qui éclairent la scène. Le "vecteur de lumière" est orientable en trois dimensions.

Les sorties finales produites par le logiciel sont des fichiers d'images au format Bitmap.

Ce logiciel a été programmé en VisualBasic (actuellement en VisualBasic version 4), sous environnement Windows.

Les cartes présentées dans la thèse sont de deux types. Les cartes créées entièrement avec le logiciel MAP sont les suivantes :

- carte 8 : la zone de Poitiers, la route seule
- carte 9 : la zone de Poitiers, la route et l'autoroute
- carte 10 : la zone de Poitiers, la route et le TGV

- Erreur! Source du renvoi introuvable.

Toutes les autres cartes en relief de la thèse ont été élaborées avec MAP avant d'être converties au format AutoCAD (format DXF). L'image finale a été produite à l'aide du module de rendu d'AutoCAD.

SIGLES

Les sigles les plus usuels et les sigles qui reviennent fréquemment dans le texte ont été considérés comme des mots, et non comme des abréviations.

A.R.T.U.R.	Association Recherche Transports et Urbanisme (Lyon)
C.E.M.T.	Conférence Européenne des Ministres des Transports
CESA	Centre d'Etudes Supérieures d'Aménagement (Université de Tours)
C.E.S.U.R.E.	Centre d'Etudes Spatiales Urbaines et Régionales en Economie (Université des Sciences et Technologies de Lille)
C.E.T.U.R.	Centre d'Etudes Techniques Urbaines (Ministère de l'Équipement, du Logement et des Transports)
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
DATAR	Délégation à l'Aménagement du Territoire et à l'Action Régionale
D.D.R.	Deutsche Demokratische Republik
D.R.E.	Direction Régionale de l'Équipement
D.E.A.	Diplôme d'Etudes Approfondies
E.A.T.C.S.	European Association for Theoretical Computer Science
ENPC	Ecole Nationale des Ponts et Chaussées
GB	Great-Britain
GDR	Groupement De Recherche
GIP	Groupement d'Intérêt Public
G.I.S.	Geographic Information System
I.A.A.T.	Institut Atlantique d'Aménagement des Territoires (Poitiers)
IFU	Institut Français d'Urbanisme
I.N.A.	Institut National de l'Audiovisuel
INED	Institut National d'Etudes Démographiques
INRETS	Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité
LET	Laboratoire d'Economie des Transports (Lyon)
LOTI	Loi d'Orientation sur les Transports Intérieurs
MDS	<i>Multi Dimensional Scaling</i>
M.E.L.T.T.	Ministère de l'Équipement, du Logement, des Transports et du Tourisme
M.T.G.	Modélisation et Traitement Graphiques (Rouen)
O.E.S.T.	Observatoire Economique et Statistique des Transports (M.E.L.T.T.)

PUF	Presses Universitaires de France
RATP	Régie Autonome des Transports Parisiens
RECLUS	Réseau d'Etude des Changements dans les Localisations et les Unités Spatiales (Montpellier)
RERU	Revue d'Economie Régionale et Urbaine
SNCF	Société Nationale des Chemins de Fer
SMIC	Salaire Minimum Interprofessionnel de Croissance
S.T.U.	Service Technique de l'Urbanisme (M.E.L.T.T.)
TGV	Train à Grande Vitesse
TRACES	Centre de Recherche en Socio-Economie des Transports et de l'Aménagement (INRETS, Villeneuve d'Ascq)
USA	United States of America
W.C.T.R	World Conference on Transport Research

TABLES

BIBLIOGRAPHIE

Mise en forme inspirée de la norme AFNOR Z 44050 de 1983. Les prénoms des auteurs sont précisés autant que possible.

Cette liste d'ouvrages comprend les références bibliographiques (liste des documents cités dans le texte) et la bibliographie proprement dite (ouvrages non cités dans le texte). Quand nous avons emprunté une citation ou une référence à un ouvrage, sans que, pour l'essentiel, il ait à voir avec le propos de la thèse, nous ne reprenons pas ici la notice bibliographique.

Analyse de système en Géographie. - textes réunis par Yves Guermond, 1984. - Lyon : Presses Universitaires de Lyon (Science des Systèmes). - 324 p.

AMAR Georges, STATHOPOULOS Nikolas, 1987. - « Les réseaux à organisation polaire : approche théorique et méthodologique de l'évaluation des performances ». - Les cahiers scientifiques du transport, France, n° 15-16. - p. 13-40.

Aménagement des transports et développement durable : simulation prospective et norme éthique : rapport final. - 1995. - sous la direction de Philippe Mathis. - pour le Ministère du Logement, des Transports et du Tourisme. - Tours : Laboratoire du CESA. - 80 f. dactyl.

ANDRÉ Yves, BAILLY André, CLARY Maryse, FERRAS Robert, GUÉRIN Jean-Paul, 1990. - *Modèles graphiques et représentations spatiales.* - Paris : Anthropos/RECLUS (Géographie). - 218 p.

ANGEL Shlomo, HYMAN Geoffrey M., 1972 a. - « Transformations and geographic theory ». - Geographical Analysis, USA, vol. 4. - p. 350-367.

ANGEL Shlomo, HYMAN Geoffrey M., 1972 b. - « Urban spatial interaction ». - Environment and planning, GB, vol. 4. - p. 99-118.

ARNAUDIES J. M., FRAYSSE H., 1988. - *Cours de mathématiques 2 : analyse.* - Paris : Dunod (Université). - 680 p.

ARTIN E., 1978. - *Algèbre géométrique.* - Paris : Gauthier-Villars (µB). - 212 p.

AUGER Jacques, MATHIS Philippe, 1994. - « Pollutions et migrations alternantes ». - p. 308-313. - in Transport et pollution de l'air, 3^{ème} colloque international Avignon, 6-10 juin 1994, actes INRETS n° 37, actes de posters. - Arcueil : INRETS. - 315 p.

- AUGER Marc, 1992. - *Non-lieux, introduction à une anthropologie de la surmodernité*. - Paris : Seuil (La librairie du XX^{ème} siècle). - 158 p.
- AURAY Jean-Paul, DURU Gérard, LAMURE Michel, 1994. - « Les Outils mathématiques de l'analyse spatiale ». - p. 25-32. - in Encyclopédie d'économie spatiale : concepts - comportements - organisations. - sous la dir. de Jean-Paul Auray, Antoine Bailly, Pierre-Henri Derycke, Jean-Marie Huriot. - Paris : Economica (Bibliothèque de science régionale). - 427 p.
- AURAY Jean-Paul, DURU Gérard, LAMURE Michel, 1994. - « Formes spatiales et espaces discrets ». - p. 73-80. - in Encyclopédie d'économie spatiale : concepts - comportements - organisations. - sous la dir. de Jean-Paul Auray, Antoine Bailly, Pierre-Henri Derycke, Jean-Marie Huriot. - Paris : Economica (Bibliothèque de science régionale). - 427 p.
- AURAY Jean-Paul, BRISSAUD M., DURU Gérard, LAMURE Michel, 1990. - « Prétopologie, prémétrie et connexité ». - RERU, France, 1990 n°2. - p. 183-195.
- BACHELARD Gaston, 1972. - *La Poétique de l'espace*. - Paris : Presses Universitaires de France (Bibliothèque de philosophie contemporaine). - 214 p.
- BAILLY Antoine, 1990. - « Les Représentations de la distance et de l'espace : mythes et constructions mentales ». - RERU, France, n° 2. - p 265-270.
- BAKER Hope M., FRANZ Lori S., SWEIGART James R., 1993. - « Co-ordinated transportation systems : an alternative approach to traditional independent systems ». - European Journal of Operational Research, Holland, n° 66. - p. 341-352.
- BARUK Stella, 1992. - *Dictionnaire de mathématiques élémentaires*. - Paris : Seuil. - 1324 p.
- BAVOUX Jean-Jacques, CHARRIER Jean-Bernard, 1994. - *Transport et structuration de l'espace européen*. - Paris : Masson (Géographie). - 222 p.
- BEGUIN Hubert, THISSE Jacques-François, 1979. - « An Axiomatic approach to geographical space ». - Geographical Analysis, USA, vol. 11 n° 4. - p. 325-341.
- BELLANGER Frédéric, 1991. - *Le TGV Atlantique au Mans, à Saint-Pierre-des-Corps, Tours et Vendôme : opportunités, acteurs, enjeux*. - Tours : Maison des Sciences de la Ville (coll. Sciences de la Ville, vol. 1). - 198 p.
- BELMANDT Z., 1993. - *Manuel de prétopologie*. - Paris : Hermès (Interdisciplinarité et nouveaux outils). - 318 p.
- BERGE Claude, 1958. - *Théorie des graphes et ses applications*. - Paris : Dunod. - 278 p.

- BERGE Claude, 1983. - *Graphes*. - Paris : Gauthier-Villars (μ B, 3^{ème} éd.). - 400 p.
- BERNARD-WEIL B., 1988. - *Précis de systématique ago-antagoniste : introduction aux stratégies bilatérales*. - Limonest : L'Interdisciplinaire (Système (s)). - 230 p.
- BERTALANFFY Ludwig von, 1973- *Théorie générale des systèmes*. - Paris : Dunod. - 296 p.
- BERRY Brian J. L., 1964. - « Cities as systems within systems of cities ». - Papers of the Regional Science Association, USA, vol. 13. - p. 147-164.
- BERRY Brian J. L., 1971. - *Géographie des marchés et du commerce de détail*. - Paris : Armand Colin (Collection U). - 254 p.
- BESSE Jean-Marc, 1994. - « L'Analyse spatiale et le concept d'espace ». - p. 3-11. - in Encyclopédie d'économie spatiale : concepts - comportements - organisations. - sous la dir. de Jean-Paul Auray, Antoine Bailly, Pierre-Henri Derycke, Jean-Marie Huriot. - Paris : Economica (Bibliothèque de science régionale). - 427 p.
- BIEBER Alain, 1990. - « L'Avenir des transports à grande vitesse ». - Futuribles, France, n° 145, juillet-août 1990. - p. 85-96.
- BLAUT J. M., 1961. - « Space and process ». - Professional geographer, USA, vol. 13, n° 4. - p. 1-7.
- BOISDRON O., BOISSEAU C., DIALLO L., GUERINEAU J.-P., 1990. - *FLORE, Tome 1 : document de présentation*. - Centre National d'Etudes des Télécommunications, Issy-les-Moulineaux. - 51 p.
- BONIN Serge, BONIN M., 1985. - « Cartographie et micro-ordinateurs ». - Travaux, France, n° 596. - p. 18-20.
- BONNAFOUS Alain, 1990. - « Mutation des systèmes de transport et radialisation de l'espace ». - RERU, France, n° 2. - p. 307-315.
- BONNAFOUS Alain, 1994. - « Réseaux de transport ». - p. 325-332. - in Encyclopédie d'économie spatiale : concepts - comportements - organisations. - sous la dir. de Jean-Paul Auray, Antoine Bailly, Pierre-Henri Derycke, Jean-Marie Huriot. - Paris : Economica (Bibliothèque de science régionale). - 427 p.
- BONETTI Michel, 1985. - « Communiquer tout en restant chez soi ». - Diagonal, France, n° 57. - p. 27-29.
- BONETTI Michel, 1994. - « Réseaux de communication et recomposition de l'espace ». - p. 175-188. - in Séminaire « Villes et Transport » du Plan Urbain, Paris, mai 1991-juin 1994. - Villes et transport, tome 1, séances 1 à 5. - Paris : Plan Urbain. - 442 p.
- BONETTI Michel, SIMON Jean-Paul, 1986. - *Communication et dynamique urbaine*. - Rapport pour le Plan Urbain, 123 f. dactyl. - Paris.

- BOORSTIN Daniel, 1986. - *Les Découvreurs*. - Paris : Seghers. - 719 p.
- BOUBET L., 1985. - « Cartes isochrones et variation de l'espace-temps en Géographie des transports ». - Cahiers Nantais, France, vol. 25. - p. 53-58.
- BRAUDEL Fernand, 1986. - *L'Identité de la France : espace et histoire*. - Paris : Flammarion (éd. 1990). - 367 p.
- BRUNET Roger, 1974. - « Espace, perception et comportement ». - Espace Géographique, France, n° 3. - p.189-204.
- BRUNET Roger, 1987. - *La Carte mode d'emploi*. - Paris : Fayard/RECLUS. - 270 p.
- BUNGE William, 1962. - *Theoretical geography*. - seconde éd. augmentée 1966. - Lund : Gleerup (Lund studies in Geography). - 289 p.
- CALINI Patrice, REYNAUD Christian, GAC Georges, 1989. - « Réseaux de transport à grande vitesse : quelles évolutions ? ». - Transport, France, n° 335, mai-juin 1989. - p. 158-166.
- Cartographie (La) des transports urbains*. - C.E.T.U.R./ GIP RECLUS, 1992. - Bagneux : C.E.T.U.R./ GIP RECLUS. - 47 p.
- CATTAN Nicole, 1991. - « Une Image du réseau des métropoles européennes par le trafic aérien ». - L'Espace géographique, France, vol. 19-20, n° 2. - p. 105-115.
- CAUVIN Colette, 1984 a. - « Une méthode de comparaison de données localisées : la régression bidimensionnelle ». - L'Espace géographique, France, n° 2. - p. 94-109.
- CAUVIN Colette, 1984 b. - *Espaces cognitifs et transformations cartographiques*. - 304 f. dactyl. - Thèse de doctorat d'état : Lettres et Sciences Humaines : Strasbourg : [?] novembre 1984.
- CAUVIN Colette, 1996 a. - « Cartographie théorique et anamorphoses ». - Bulletin du Comité Français de Cartographie, France, n° 146-147. - p. 82-88.
- CAUVIN Colette, 1996 b. - « Sortir les anamorphoses de la cartographie de recherche. » - Communication orale à la journée « Les 60 ans de l'Association des Cartographes Géographes », Paris (Institut de Géographie), 19 octobre 1996.
- CAUVIN Colette, REYMOND Henri, 1986. - *Nouvelles méthodes en cartographie*. - Paris : GIP RECLUS (Modes d'emploi). - 54 p.
- CAUVIN Colette, REYMOND Henri, 1994. - *Pour une approche multiple de l'accessibilité, propositions méthodologique : Résumé*. - Communication au séminaire DATAR « Prospective des transports et des territoires à l'horizon 2015 », séance n° 5, « Accessibilité et desserte du territoire, les transports de personnes », 19 janvier 1994, Paris. - 7 f. dactyl.

- CAUVIN Colette, MARTIN Jean-Paul, REYMOND Henri, 1993. - « Une Accessibilité retrouvée ». - p. 93-127. - in *Circuler demain*, dirigé par Alain Bonnafous, François Plassard, Bénédicte Vulin. - La Tour d'Aigues : DATAR/Editions de l'Aube (Monde en cours, Prospective et territoires). - 191 p.
- CHAMBADAL Lucien, 1981. - *Dictionnaire de mathématiques*. - Paris : Hachette. - 302 p.
- CHAPELON Laurent, 1993 a. - *La Problématique transport dans la vallée de la Thur : analyse et éléments de résolution*. - 41 f. dactyl. - mémoire : Magistère d'Aménagement : CESA, Université de Tours.
- CHAPELON Laurent, 1993 b. - *Des Réseaux de transport à la modélisation des connexions intranodales*. - 35 f. dactyl. - Dossier de Magistère III, Université de Tours, CESA, mars 1993.
- CHAPELON Laurent, L'HOSTIS Alain, MATHIS Philippe, 1995. - *Modélisation nodale du transport de personnes : fondements théoriques et imagerie*. - communication au colloque INRETS-TRACES « Grandes infrastructures de transport et territoires, Lille, 8-9 juin 1995 ». - 24 f. dactyl. - (publication en cours).
- CHAPELON Laurent, L'HOSTIS Alain, MATHIS Philippe, 1996. - *Transport et espace : l'interaction des échelles spatiales et temporelles*. - poster pour les journées du programme Environnement, Vie et Société du CNRS : « Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement », Paris, 15-17 janvier 1996. - 13 f. dactyl.
- CHERWONY Walter, POLIN Lewis, 1975. - « Evaluation of long-range transit alternatives ». - *Transportation Engineering Journal*, USA, Vol. 101, n° 2. - p. 199-210.
- Chiffres et cartes : une union réfléchie*. - S.T.U./GIP RECLUS, 1989. - Paris : S.T.U. - 56 p.
- CICÉRY Marie-France, MARCHAND Bernard, RIMBERT Sylvie, 1977. - *Introduction à l'analyse de l'espace*. - Paris, Masson (Collection de Géographie applicable). - 173 p.
- CLARK James W., 1977. - « Time-distance transformation of transportation networks ». - *Geographical analysis*, USA, vol. 9. - p. 195-205.
- COHEN Simon, 1986. - *Cartographie automatique et indices de congestion des autoroutes et des voies rapides urbaines : application au boulevard périphérique*. - Arcueil : INRETS - 19 p.
- COMMISSARIAT GÉNÉRAL DU PLAN, 1992. - *Transports 2010 : rapport du groupe présidé par le commissaire au plan*. - Paris : La documentation française. - 516 p.

- COMMISSARIAT GÉNÉRAL DU PLAN, 1994. - *Transports : pour un meilleur choix des investissements*. - Paris : La documentation française. - 131 p.
- COMMISSARIAT GÉNÉRAL DU PLAN, CNRS, 1987. - *Prospectives 2005 : explorations de l'avenir*. - Paris : Economica. - 487 p.
- Conseil International de Langue Française, 1979. - *Vocabulaire de la géomorphologie*. - Paris : Hachette. - 218 p.
- COUCHOT Edmond, 1988. - *Images : de l'optique au numérique*. - Paris : Hermès. - 242 p.
- CRÉCY Renaud de, 1979. - « Quelques réflexions sur l'accessibilité ». - Les Cahiers Scientifiques de la revue Transports, France, vol. 1, fasc.1. - p. 33-41.
- D'ARCY THOMPSON, 1994. - *Forme et croissance*. - Paris : Seuil (Source du savoir). - 334 p.
- DATAR, 1994. - *Prospective et territoire*. - Paris : DATAR. - 163 p. + classeur non paginé.
- « Décret d'application n° 84-617 du 17 juillet 1984 ». - Journal Officiel, France, 18 juillet 1984.
- DENT Borden D, 1972. - « Visual organisation and thematic map communication ». - Annals of the Association of American Geographers, USA, vol. 62. - p. 79-93.
- DEROGNAT Isabelle, 1990. - « Vers une approche axiomatique de la distance cognitive ». - RERU, France, n° 2. - p. 239-264.
- DERRUAU Max, 1989. - *Les Formes du relief terrestre : notions de géomorphologie*. - Paris : Masson (Initiation aux études de Géographie). - 115 p.
- DERYCKE Pierre-Henri, 1994. - « Réseaux urbains ». - p. 344-351 - in Encyclopédie d'économie spatiale : concepts - comportements - organisations. - sous la dir. de Jean-Paul Auray, Antoine Bailly, Pierre-Henri Derycke, Jean-Marie Huriot. - Paris : Economica (Bibliothèque de science régionale). - 427 p.
- Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement*, 1988. - sous la dir. de Pierre Merlin, Françoise Choay. - Paris : PUF. - 723 p.
- DOBSON Michael W., 1980. - « Benchmarking the human perceptual mechanism for map-reading tasks ». - Cartographica, Canada, vol. 17, n° 1. - p. 88-100.
- DOWNS Roger M., STEA David, 1973. - *Image and environment : cognitive mapping and spatial behaviour*. - Chicago : Aldine Publishing co. - 439 p.
- DROESBEKE F., HALLIN M., LEFEVRE Cl., 1987. - *Les Graphes par l'exemple*. - Paris : Ellipses. - 288 p.

- DUHEM Bernard, 1994. - « Régulation des flux : la congestion en question : introduction ». - p. 267-272. - in Séminaire « Villes et Transport » du Plan Urbain, Paris, mai 1991-juin 1994. - Villes et transport, tome 1, séances 1 à 5. - Paris : Plan Urbain. - 442 p.
- DUPUY Gabriel, 1985. - *Systèmes, réseaux et territoires : principes de réseautique territoriale*. - Paris : Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées. - 168 p.
- DUPUY Gabriel, 1987. - « Les Réseaux techniques sont-ils des réseaux territoriaux ? ». - L'Espace géographique, France, n° 3. - p. 175-184.
- DUPUY Gabriel, 1991. - *L'Urbanisme des réseaux*. - Paris : Armand Colin (U Géographie). - 198 p.
- DUPUY Gabriel, 1993. - « Géographie et économie des transports ». - L'Espace Géographique, n° 3. - p. 193-209.
- DUPUY Gabriel, 1994. - « Réseaux ». - p. 145-151. - in Encyclopédie d'économie spatiale : concepts - comportements - organisations. - sous la dir. de Jean-Paul Auray, Antoine Bailly, Pierre-Henri Derycke, Jean-Marie Huriot. - Paris : Economica (Bibliothèque de science régionale). - 427 p.
- EASTMAN J. Ronald, 1985. - « Graphic organisation and memory structures for map learning ». - Cartographica, Canada, vol. 22, n° 1. - p. 1-20.
- Encyclopédie d'économie spatiale : concepts - comportements - organisations*, 1994. - sous la dir. de Jean-Paul Auray, Antoine Bailly, Pierre-Henri Derycke, Jean-Marie Huriot. - Paris : Economica (Bibliothèque de science régionale). - 427 p.
- Encyclopédie de Géographie*, 1992. - sous la dir. de Antoine Bailly, Robert Ferras, Denise Pumain. - Paris : Economica. - 1132 p.
- Encyclopædia Universalis*, 1990. - Paris : Encyclopædia Universalis France. - 12 volumes, pagination multiple.
- Espace et représentation : sémiotique de l'architecture*, 1982. - Paris : Les Editions de La Villette. - actes du colloque d'Albi du 20 au 24 juillet 1981 « Espace et représentation ». - 350 p.
- European timetable*, 1990. - Peterborough : Thomas Cook. - 496 p.
- Evaluation quantitative des consommations d'énergie et des pollutions liées à l'étalement des densités*. - 1995. - sous la direction de Philippe Mathis. - pour la DATAR. - Tours : Laboratoire du CESA. - 99 f. dactyl.
- EWING G. O., 1974. - « Multidimensional scaling and time-space maps ». - Cartographica, Canada, vol. 18, n° 2. - p. 161-167.

- EWING G. O., WOLFE R., 1977. - « Surface feature interpolation on two-dimensional time-space maps ». - Environment and Planning A, GB, vol. 9. - p. 419-437.
- FLAMENT Claude, 1968. - *Théorie des graphes et structures sociales*. - Paris : Gauthier-Villars/Mouton (Mathématiques et sciences de l'homme). - 166 p.
- FIK T. J., MULLIGAN G. F., 1990. - « Spatial flows and competing central places : towards a general theory of hierarchical interaction ». - Environment and Planning A, GB, vol. 22, n°4. - p. 527-549.
- FORER Pip, 1978. - « A Place for plastic space. » - Progress in human geography, GB, vol. 2, n° 2. - p. 230-267.
- FORRESTER Jay W., 1979. - *Dynamique urbaine*. - Paris : Economica (économie publique de l'aménagement et des transports). - 329 p.
- FRYBOURG Michel, 1990. - « L'Innovation dans les transports ». - Futuribles, France, n° 145, juillet-août 1990. - p. 59-80.
- GANGNET Michel, 1985. - *Architecture, urbanisme et images de synthèse*. - Paris : Tangram. - 62 p.
- GARBAY Catherine, 1986. - *Images, stratégies perceptives et stratégies cognitives d'analyse*. - 325 f. dactyl. - Thèse : Sciences Appliquées : Grenoble 1.
- GODET Michel, 1991. - *Problèmes et méthodes de prospective : boîte à outils*. - Paris : Futuribles G.E.R.P.A. - 73.
- GOLLEDGE R. G., HUBERT L. J., 1982. - « Some comments on non-Euclidean mental maps ». - Environment and planning A, GB, n° 14. - p. 107-118.
- GOULD Peter, WHITE Rodney, 1984. - *Cartes mentales*. - traduit par Anne Perrouf et Michel Roten. - Fribourg : Editions Universitaires. - 186 p.
- GOURDON Jean-Louis, 1994. - « Déplacements et inégalités : introduction ». - p. 361-369. - in Séminaire « Villes et Transport » du Plan Urbain, Paris, mai 1991-juin 1994. - Villes et transport, tome 1, séances 1 à 5. - Paris : Plan Urbain. - 442 p.
- Grands (Les) projets de transport : langages de l'évaluation, discours de la décision*. - 1987. - Arcueil : INRETS. - 152 p.
- GUESNIER Bernard, PAELINCK Jean H. P., 1987. - *Modélisation spatiale : théorie et applications*. - Dijon : Bernard Guesnier, Jean H. P. Paelinck, diffuseur Librairie de l'Université (série d'Econométrie appliquée n° 33, collection de l'Institut de Mathématiques Economiques). - 521 p.

- GUSEIN-ZADE Sabir M., 1982. - « Bunge's problem central places theory and its generalisations ». - Geographical Analysis, USA, vol. 14, n° 3. - p. 246-252.
- HAGGETT Peter, CLIFF Andrew S., FREY Allan, 1965. - *Locational models*. - London : Arnold.- 605 p.
- HILDEBRANDT Stefan, TROMBA Anthony, 1991. - *Mathématiques et formes optimales : l'explication des structures naturelles*. - traduit par Guigonis J. - Paris : Pour la science, diffusion Belin. - 180 p.
- Histoire de la France, tome 1 : L'Espace français*. - sous la direction de André Burguière, Jacques Revel. - Paris : Seuil. - 672 p.
- HODGE D., GATRELL A., 1976. - « Spatial constraint and the location of urban public facilities ». - Environment and Planning A, GB, vol. 8. - p. 215-230.
- HOFMAN Gerhard, PROFELD Rainer, 1979. - « Der Bewertete Teilgraph - Ein Verfahren zur Ermittlung von Verkehrswert und Verkehrswertveränderung von ÖPNV-Teilnetzen ». - [Le graphe partiel chiffré - Un procédé de détermination du trafic et de ses variations dans des réseaux partiels de transport public de voyageurs à courte distance], Strasse, D.D.R., vol. 19, n°12. - p. 380-382.
- HÖLLHUBER Dietrich, 1974. - « Die Perception der Distanz im städtischen Verkehrsliniennetz - das Beispiel Karlsruhe-Rintheim » [La perception de la distance dans le réseau du trafic urbain - l'exemple Karlsruhe-Rintheim]. - Geoforum, GB, vol. 17. - p. 43-59.
- HURIOT Jean-Marie, 1993. - « Espace et méthodes en économie ». - L'Economie du Centre-Est, n° 4. - p. 223-238.
- HURIOT Jean-Marie, PERREUR Jacky, 1990. - « Distances, espaces et représentations ». - RERU, France, 1990, n°2. - p. 225.
- HURIOT Jean-Marie, PERREUR Jacky, DEROGNAT Isabelle, 1994. - « Espace et distance ». - p. 35-46. - in Encyclopédie d'économie spatiale : concepts - comportements - organisations. - sous la dir. de Jean-Paul Auray, Antoine Bailly, Pierre-Henri Derycke, Jean-Marie Huriot. - Paris : Economica (Bibliothèque de science régionale). - 427 p.
- HURIOT Jean-Marie, THISSE Jacques-François, 1987. - « Distances économiques et métriques : éléments d'axiomatique ». - p. 1-17. - in Bernard Guesnier, Jean H. P. Paelinck. - *Modélisation spatiale : théorie et applications*. - Dijon : Bernard Guesnier, Jean H. P. Paelinck, diffuseur Librairie de l'Université (série d'Econométrie appliquée n° 33, collection de l'Institut de Mathématiques Economiques). - 521 p.

- Impact de la réalisation de l'autoroute A 10 : détermination des accessibilités routières régionales et locales par simulation multimodale des réseaux de transport.* - 1994. - sous la direction de Philippe Mathis. - pour la Direction Régionale de l'Équipement Poitou-Charentes. - Tours : Laboratoire du CESA. - 30 f. dactyl.
- Impact de la réalisation du TGV Aquitaine : détermination des accessibilités routières régionales et locales par simulation multimodale des réseaux de transport.* - 1994. - sous la direction de Philippe Mathis. - pour la Direction Régionale de l'Équipement Poitou-Charentes. - Tours : Laboratoire du CESA. - 50 f. dactyl.
- L'Interconnexion sud*, 1990. - SNCF, Premières études. - 6 f. dactyl., 6 annexes.
- JANELLE Donald G., 1968. - « Central place development in a time-space framework ». - Professional geographer, USA, n° 20. - p. 5-10.
- JAYET Hubert, 1993. - *Analyse spatiale quantitative*. - Paris : Economica (Bibliothèque de science régionale). - 202 p.
- JOHNSON-LAIRD Philip N., 1980. - « Mental models in cognitive science ». - Cognitive science, USA, n° 4. - p. 71-115.
- JOHNSON-LAIRD Philip N., 1983. - *Mental models : towards a cognitive science of language, inference and consciousness*. - Cambridge : Cambridge University Press. - 513 p.
- JULIEN Hubert, MORELLET Olivier, 1990. - *MATISSE : un modèle intégrant étroitement induction et partage modal fin du trafic*. - Arcueil : INRETS - 139 p.
- KAUFMANN Arnold, FUSTIER Michel, DREVET Annick, 1971. - *L'Inventique : nouvelles méthodes de créativité*, 2^{ème} édition. - Paris : Entreprise moderne d'édition. - 279 p.
- KISSLING C. C., 1969. - « Linkage importance in a regional highway network ». - Canadian Geographer, Canada, 13. - p. 113-127.
- KOENIG Gérard, DELIGNY Jean-Louis, 1977. - « Les Indicateurs d'accessibilité dans les études urbaines : de la théorie à la pratique ». - Revue Générale des Routes et Aérodrômes, France, n° 533. - p. 5-24.
- KOENIG Gérard, 1979. - « A propos de : Quelques réflexions sur l'accessibilité ». - Les Cahiers Scientifiques de la revue Transports, France, vol. 1, fasc.1. - p. 18-32.
- KOSHKARYOV Alexander, ZINCHUK Ludmilla, 1993. - « An Analysis of computer map-making and graphic design ». - INSPEL, USA, vol. 27, n° 2. - p. 87-97.
- KRUSKAL Joe B., 1964. - « Non metric multidimensional scaling : a numerical method ». - Psychometrika, USA, vol. 29. - p. 115-129.

- KRUSKAL Joe B., WISH M., 1978. - *Multidimensional scaling*. - Beverly Hills/London : Sage Publications (Quantitative applications in the social sciences, Sage University Paper N° 07-011), 1978. - 93 p.
- KUNTZMANN J., 1972. - *Théorie des réseaux : graphes*. - Paris : Dunod. - 288 p.
- LAFFAYE C., CAUVIN Colette, 1992. - « Les TGV du fossé rhénan : un enjeu européen ? » - La lettre d'Odile, France, n° 9. - p. 9-11.
- LAJUGIE Joseph, DELFAUD P., LACOUR Claude, 1985. - *Espace régional et Aménagement du territoire*. - Paris : Dalloz (3^{ème} éd.). - 987 p.
- LAMURE Michel, 1987. - *Espaces abstraits et reconnaissance des formes application au traitement des images digitales*. - thèse d'Etat : Sciences : Lyon I.
- LANGUMIER Jean-François, 1993. - « Réseaux de communication et développement ». - p. 161-171. - in Marie-France de Noüe, *et al.* - *Réseaux et territoires : rapport du groupe d'étude et de mobilisation*. - Paris : La documentation française. - 175 p.
- LANTNER Roland, 1974. - *Théorie de la dominance économique*. - Paris : Dunod (Cournot). - 325 p.
- LAVAL-JEANTET Maurice, 1990. - « Imagerie médicale ». - in Encyclopædia Universalis. - Paris : Encyclopædia Universalis (Tome corpus 11). - 931 p.
- LAWRENCE G. R. P., 1971. - *Cartographic methods*. - London : Methuen & Co. (The Field of Geography). - 162 p.
- LEFEBVRE Henri, 1974. - *La Production de l'espace*. - Paris : Anthropos. - 485 p.
- LEINBACH Thomas R., MULLER Peter O., 1975. - « Transportation geography ». - Progress in geography, GB, vol. 8. - p. 179-231.
- LELONG-FERRAND Jacqueline, 1985. - *Les Fondements de la géométrie*. - Paris : PUF (Mathématiques). - 287 p.
- LE MOIGNE Jean-Louis, 1977. - *La Théorie du système général, théorie de la modélisation*. - Paris : PUF. - 338 p.
- LEPETIT Bernard, 1980. - « Histoire urbaine et espace ». - L'Espace géographique, France, vol. 9, n°1. - p. 43-54.
- LEVY Pierre, 1991. - *L'Idéographie dynamique : vers une imagination dynamique ?* - Paris : La découverte/Textes à l'appui (Série sciences cognitives). - 167 p.
- LEYMARIE Danièle, 1980. - « Transports collectifs et urbanisation : la recherche d'une logique ». - Revue Economique du Centre-Ouest, France, n°1. - p. 83-99.
- L'HOSTIS Alain, 1993 a. - *Cartes multimodales différentielles*. - mémoire de DEA : Sciences de la Ville, option Aménagement et Urbanisme : Université de Tours. - 85 f. dactyl.

- L'HOSTIS Alain, 1993 b. - *Grappe nodal*. - mémoire de tronc commun de DEA : Sciences de la Ville, option Aménagement et Urbanisme : Université de Tours. - 16 f. dactyl.
- L'HOSTIS Alain, 1994. - *Représentation multimodale des réseaux de transport et de leurs effets sur l'espace*. - communication au séminaire du GDR 903 Réseaux sur les effets de réseau du 23 mars 1994. - 6 f. dactyl.
- L'HOSTIS Alain, 1995. - *Synthetic images in transport planning*. - communication à l'AESOP Ph. D. workshop, Glasgow, 12-15 août 1995. - 9 f. dactyl.
- L'HOSTIS Alain, 1996 a. - *Représentation des réseaux de transport et images de synthèse*. - p. 118-120. - in Actes de l'école thématique CNRS-MRE-GIP RECLUS, « Démarches et pratiques en Analyse Spatiale », Montpellier, 18-21 septembre 1995. - Avignon : Laboratoire Structures et Dynamiques Spatiales. - 144 p.
- L'HOSTIS Alain, 1996 b. - « Transports et Aménagement du territoire : cartographie par images de synthèse d'une métrique réseau ». - Mappemonde, n° 3. - p. 37-43.
- « Loi n° 82-1153 du 30 décembre 1982 d'orientation des transports intérieurs ». - Journal Officiel, France, 31 décembre 1982.
- « Loi n° 95-115 du 4 février 1995 d'orientation pour l'aménagement et le développement du territoire ». - Journal Officiel, France, 5 février 1995.
- LYNCH Kevin, 1971. - *L'Image de la cité*. - Paris : Dunod. - 222 p.
- LYNCH Kevin, 1982. - *Voir et planifier : l'aménagement qualitatif de l'espace*. - Paris : Dunod (Aspects de l'Urbanisme). - 215 p.
- MACE Gordon, 1991. - *Guide de l'élaboration d'un projet de recherche*. - Bruxelles : De Boeck Université, Editions Universitaires. - 119 p.
- MACKETT Roger L., 1993. - « Structure of linkage between transport and land use ». - Transport Research, GB, vol. 27 B, n° 3. - p. 189-206.
- MANDELBROT Benoît, 1989. - *Les Objets fractals*. - Paris : Flammarion (Nouvelle bibliothèque scientifique). - 268 p.
- MARCHAND Bernard, 1973. - « Deformation of a transportation surface ». - Annals of the Association of American Geographers, USA, vol. 63. - p. 507-521.
- MARTOUZET Denis, 1993. - *Recherche du fondement de l'éthique de l'aménagement*. - 449 f. dactyl. - thèse : Aménagement de l'Espace et Urbanisme : Tours.
- MASPERO François, 1990. - *Les Passagers du Roissy-Express*. - Paris : Seuil. - 328 p.

- MATHIS Philippe, 1973. - *Introduction à une théorie unitaire des implantations commerciales*. - 341 f. dactyl. - Thèse de troisième cycle : Sciences Economiques : Paris I : 1973.
- MATHIS Philippe, 1978. - *Economie urbaine et théorie des systèmes*. - 548 f. dactyl. - Thèse : Sciences Economiques : Tours : janvier 1978.
- MATHIS Philippe, 1990. - *Accessibilités multimodales des communes de Poitou-Charentes*. - 23 f. dactyl. - Tours : Direction Régionale de l'Équipement Poitou-Charentes/Ministère de l'Équipement.
- MATHIS Philippe, 1996. - « La Stratégie des réseaux de transport dans le grand Ouest ». - p. 97-111. - in L'Entreprise Atlantique. - dirigé par Yves Morvan. - Paris : Editions de l'Aube (Mondes en cours, Cités et territoires, I.A.A.T.). - 115 p.
- MATHIS Philippe, (sous la direction de), 1996. - « Consommations d'énergie et pollutions liées à l'étalement des densités ». - p. 95-106. - in Environnement et Aménagement du territoire. - sous la direction de Jean-Paul de Gaudemar. - Paris : La documentation française/DATAR (Recherches). - 213 p.
- MATHIS Philippe, CHAPELON Laurent, L'HOSTIS Alain, COUTARD Olivier, 1995. - *Modélisation des effets de réseau dans les transports, Séminaire du GDR Réseaux (Paris 1994-1995), Rapport final de synthèse*. - Noisy-le-Grand : GDR Réseaux CNRS. - 22 f. dactyl.
- MATHIS Philippe, POLOMBO Nadine, L'HOSTIS Alain, 1993. - « Les Grandes vitesses ». - p. 129-142 - in Circuler demain. - sous la direction de Alain Bonnafous, François Plassard, Bénédicte Vulin. - La Tour d'Aigues : DATAR/Editions de l'Aube (Monde en cours, Prospective et territoire). - 191 p.
- MAURICE-BAUMONT Catherine, 1992. - « L'Adéquation entre l'espace physique et l'espace économique multicentrique dans les problèmes de localisation ». - RERU, France, n° 2. - p. 175-195.
- MAYHEW Leslie D., 1981. - « Automated isochrones and the locations of emergency medical services cities ». - Professional Geographer, USA, vol. 33, n° 4. - p. 423-428.
- MERCIER Pierre-Alain, 1988. - « La Maille et l'interstice ». - Quaderni, France, n° 3. - p. 41-49.
- MERLIN Pierre, 1984. - *La Planification dans les transports : enjeux et méthodes*. - Paris : Masson. - 220 p.
- MERLIN Pierre, 1991. - *Géographie, économie et planification des transports*. - Paris : PUF (Fondamental). - 472 p.

- MERLIN Pierre, 1994. - *Les Transports en France*. - Paris : La documentation française (Economie). - 176 p.
- Modèles mentaux (Les) : approche cognitive des représentations*. - coordonné par Marie-France Ehrlich, Hubert Tardieu, Marc Cavazza, 1993. - Paris : Masson (Sciences cognitives). - 183 p.
- MONOD Jérôme, CASTELBAJAC Philippe de, 1991. - *L'Aménagement du territoire*. - Paris : PUF (Que sais-je ?). - 125 p.
- MORELLET Olivier, 1984. - « Le Comportement de l'usager du système de transport interrégional : choix d'un mode de transport ou plutôt d'un certain type de mobilité ? ». - Cahiers scientifiques de la revue Transports, France, n° 9. - p. 57-70.
- MÜLLER Jean-Claude, 1979. - « La cartographie d'une métrique non euclidienne : les distances-temps ». - Espace géographique, France, vol. 8, n° 3. - p. 215-227.
- MÜLLER Jean-Claude, 1982. - « Non-Euclidean geographic spaces : mapping functional distances ». - Geographical analysis, USA, vol. 14. - p. 189-203.
- NIEMEIER Debbie A., BEARD A. Kate, 1993. - « G.I.S. and transportation planning : a case study » . - Computers, Environment and Urban Systems, USA, vol. 17, n°1. - p. 31-43.
- NOEL Emile, 1983. - *L'Espace et le temps aujourd'hui*. - Paris : Seuil (Points Sciences). - 303 p.
- NOÛE Marie-France de, *et al.*, 1993. - *Réseaux et territoires : rapport du groupe d'étude et de mobilisation*. - Paris : La documentation française. - 175 p.
- OKSMAN Jacques, BUISSON Jean-Luc, 1989. - « Le Traitement d'images, une technique en développement ». - Revue des Laboratoires d'Essais, France, n° 18. - p. 7-40.
- OBSERVATOIRE ECONOMIQUE ET STATISTIQUE DES TRANSPORTS, 1990. - *Enjeu des réseaux à grande vitesse*. - Paris : O.E.S.T. (Les rencontres transport de l'observatoire). - 48 p.
- OFFNER Jean-Marc, 1993. - « Les Effets structurants du transport : mythe politique, mystification scientifique ». - L'Espace géographique, France, n° 3. - p. 233-242.
- ORMELING F., 1980.. - *Cartes et figures de la terre*. - Paris : Centre Georges Pompidou - 478 p.
- PAELINCK Jean H. P., 1994. - « Axiomatique de l'organisation territoriale ». - p. 271-274. - *in* Encyclopédie d'économie spatiale : concepts - comportements - organisations. - sous la dir. de Jean-Paul Auray,

- Antoine Bailly, Pierre-Henri Derycke, Jean-Marie Huriot. - Paris : Economica (Bibliothèque de science régionale). - 427 p.
- PENFENTENYO DE KERVEREGUIN Hedwige de, 1978. - *La Notion de distance : son traitement et son abandon en économie spatiale*. - 153 f. dactyl. - Thèse : Urbanisme et Aménagement : Créteil.
- PEROCHE Bernard, ARGENCE Jacqueline, GHAZANFARPOUR Djamchid, MICHELUCCI Dominique, 1992. - *La Synthèse d'images*. - Paris : Hermès (Traité des nouvelles technologies, série Assistance par ordinateur). - 295 p.
- PERREUR Jacky, 1989. - « L'Évolution des représentations de la distance et l'Aménagement du territoire ». - RERU, France, 1989 n° 1. - p. 115-141.
- PLASSARD François, 1976. - *Les Autoroutes et le développement régional*. - Lyon : Economica/Presses Universitaires de Lyon (Economie publique de l'aménagement et des transports). - 341 p.
- PLASSARD François, 1993. - « Les Enjeux territoriaux des transports ». - p. 49-58. - in Circuler demain, dirigé par Alain Bonnafous, François Plassard, Bénédicte Vulin. - La Tour d'Aigues : DATAR/Editions de l'Aube (Monde en cours, Prospective et territoires). - 191 p.
- PLASSARD Henri, ROUTHIER Jean-Louis, 1987. - *Sémiologie graphique et évaluation*. - Lyon : A.R.T.U.R. - 72 p.
- POINCARÉ Henri, 1947. - *Science et méthode*. - Paris : Flammarion (Bibliothèque de philosophie scientifique). - 314 p.
- PORNON Henri, 1989. - *La Cartographie assistée par ordinateur*. - Paris : Hermès (Technologie de pointe). - 62 p.
- POSTAIRE Jack-Gérard, 1987. - *De l'Image à la décision : analyse des images numériques et théorie de la décision*. - Paris : Dunod (Informatique). - 186 p.
- PREVOT Michel, 1975. - *Espaces topologiques et métriques en analyse économique spatiale*. - 330 f. dactyl. - Thèse : Sciences Économiques : Dijon.
- PUIG Jean-Pierre, THISSE Jacques-François, JAYET Hubert, 1995. - « Enjeux économiques de l'organisation de l'espace français : 1. Polarisation et concentration, 2. L'Aménagement du territoire. » - p. 3-49. - in Développements méthodologiques en économie spatiale. - Lille : C.E.S.U.R.E./Plan urbain. - 272 p.
- PUMAIN Denise, 1992. - « Les Systèmes de villes ». - p. 645-663. - in Encyclopédie de Géographie. - sous la dir. de Antoine Bailly, Robert Ferras, Denise Pumain. - Paris : Economica. - 1132 p.

- PUMAIN Denise, SANDERS Léna, SAINT-JULIEN Thérèse, 1989. - *Villes et auto-organisation*. - Paris : Economica. - 191 p.
- QUÉAU Philippe, 1986. - *Eloge de la simulation*. - Seyssel : Champ Vallon/I.N.A. - 271 p.
- QUÉAU Philippe, BEAUNE Jean-Claude, 1987. - *Des Vies de forme : une raison artificielle*. - Milieux, France, n° 30. - p. 5-11.
- QUINET Emile, 1980. - *La Coordination des infrastructures de transport en France*. - Paris : la documentation française. - 146 p.
- QUINET Emile, 1990. - « Les Flux de transport en Europe : Continuités et mutations ». - Futuribles, France, n° 145, juillet-août 1990. - p. 25-49.
- RAGON Michel, 1995. - *L'Homme et les villes*. - Paris : Albin Michel. - 212 p.
- REVERDY Georges, 1995. - *Histoire des routes de France*. - Paris : PUF (Que sais-je ?). - 127 p.
- REYNAUD Christian, OLLIVIER-TRIGALO Marianne, 1993. - *Tendances du transport européen et besoins en infrastructures*. - Arcueil : INRETS/C.E.M.T. - 314 p. (plus annexes à paginations multiples).
- RIETVELD Piet, 1995. - *Urban growth and the development of transport networks : the case of the Dutch railways in the nineteenth century*. - Communication à la « Rencontre européenne sur l'interconnexion », N.E.C.T.A.R./INRETS-TRACES/GDR Réseaux CNRS, Lille, 29 janvier 1995. - 19 p.
- RIMBERT Sylvie, 1990. - *Carto-graphies*. - Paris : Hermès (série Géographie assistée par ordinateur, Traité des nouvelles technologies). - 176 p.
- RIMBERT Sylvie, 1992. - « Géographie et cartographie ». - p. 129-158. - in Encyclopédie de Géographie. - sous la dir. de Antoine Bailly, Robert Ferras, Denise Pumain. - Paris : Economica. - 1132 p.
- Robert (le nouveau petit) : dictionnaire alphabétique et analogique de la langue française*, 1995. - Paris : Dictionnaires le Robert. - 2467 p.
- ROQUE J.-L., LEOEUF C., CHASSARD G., GUEGUAND J., 1987. - *Cours d'algèbre*. - Paris : Marketing Ellipses. - 320 p.
- ROUGET Bernard, 1975. - *L'Analyse spatiale en économie urbaine : essai méthodologique*. - 387 f. dactyl. - Thèse de doctorat d'état : Sciences Economiques : Dijon : [?] 1975.
- ROUGET Bernard, 1976. - « La Ville dans l'analyse économique spatiale ». - p. 169-178. - in Actes du 4^{ème} colloque sur l'analyse des données en Géographie, Besançon, octobre 1975.
- ROY Bernard, 1985. - *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. - Paris : Economica. - 423 p.

- ROY Bernard, BOUYSSOU Denis, 1985. - *Aide multicritère à la décision : méthodes et cas*. - Paris : Economica (Gestion, Production et techniques quantitatives appliquées à la gestion). - 695 p.
- SALANSKIS Jean-Michel, 1990. - « Continu et discret ». - p. 458-462. - in *Encyclopædia Universalis*. - Paris : Encyclopædia Universalis (Tome corpus 6). - 1048 p.
- SAMUEL P., 1986. - *Géométrie projective*. - Paris : PUF (Mathématiques). - 176 p.
- SARTRE Jean-Paul, 1940. - *L'Imaginaire*. - Paris : Gallimard. - 246 p.
- SCHÄRLIG Alain, 1985. - *Décider sur plusieurs critères*. - Lausanne : Presses Polytechniques Romandes. - 179 p.
- SCHMIDT Gunther, STROHLEIN Thomas, 1993. - *Relations and graphs : discrete mathematics for computer scientists*. - Berlin : Springer-Verlag (E.A.T.C.S. Monographs on Theoretical Computer Science). - 301 p.
- Se Déplacer au quotidien dans trente ans*, 1995. - Actes du colloque de Paris du 22 et 23 mars 1994. - Paris : La documentation française. - 234 p.
- SFEZ Lucien, 1994. - Entretien - *Flux*, France, n° 16. - p. 77-79.
- SHEPARD Roger N., 1962. - « The Analysis of proximities : multidimensional scaling with an unknown distance function ». - *Psychometrika*, USA, vol. 27, n° 2. - p. 125-140.
- SHEPARD Roger N., 1974. - « Representation of structure in similarity data : problems and prospects ». - *Psychometrika*, USA, vol. 39, fasc. 4. - p. 373-422.
- SHEPARD Roger N., 1992. - *L'Oeil qui pense : visions, illusions, perceptions*. - Paris : Seuil. - 234 p.
- SHIMIZU Eihan, 1992. - « Time-space mapping based on topological transformation of physical map ». - in *W.C.T.R.*, « Sixième conférence mondiale sur la recherche dans les transports », 1992. - Lyon : W.C.T.R. - pagination multiple.
- SIU-NGAN LAM Nina, 1983. - « Spatial interpolation methods : a review ». - *The American cartographer*, USA, vol. 10, n° 2. - p. 129-149.
- Socio-economic models in Geography*, 1968. - éd. par Richard J. Chorley et Peter Haggett. - London : Methuen (University paperbacks). - 468 p.
- SORTAIS Yvonne, SORTAIS R., 1988. - *Géométrie du plan et de l'espace*. - Paris : Hermann (Formation des enseignants et formation continue). - 394 p.
- SPIEGEL Murray R., 1973. - *Analyse vectorielle*. - New York : McGraw-Hill (série Schaum). - 224 p.

- SPIEKERMANN Klaus, WEGENER Michael, 1993. - *New time-space maps of Europe*. - papier présenté aux « Premières rencontres de Théo Quant », IRADES, Université de Franche-Comté, 7-8 octobre 1993. - 25 f. dactyl.
- SPIEKERMANN Klaus, WEGENER Michael, 1994. - « The Shrinking continent : new time-space maps of Europe ». - Environment and planning B. : planning and design, GB, vol. 21. - p. 653-673.
- TARDIVEL Eric, 1986. - *Réseaux et modèles*. - Paris : RATP - 32 p.
- TGV *Aquitaine (Le)*, 1990. - SNCF, Premières études. - 6 f. dactyl., 6 annexes.
- TGV *Auvergne (Le)*, 1990. - SNCF, Premières études. - 5 f. dactyl., 3 annexes.
- TGV et aménagement du territoire : un enjeu majeur pour le développement local*, 1991. - Paris : Syros/alternatives (T.E.N.), actes du colloque du Creusot du 11 et 12 oct. 1990 « TGV et aménagement du territoire ». - 153 p.
- TGV Limousin (Le)*, 1990. - SNCF, Premières études. - 6 f. dactyl., 3 annexes.
- THORELLI Hans B., 1986. - « Networks : between markets and hierarchies ». - Strategic management journal, GB, vol. 7. - p. 37-51.
- TINKLER Keith J., 1979. - « Graph theory ». - Progress in human geography, GB, vol. 3. - p. 85-116.
- TOBLER Waldo R., 1963. - « Geographic area and map projections ». - Geographical review, USA, vol. 53. - p. 59-78.
- TOBLER Waldo R., 1978. - « Comparison of plane forms ». - Geographical Analysis, USA, vol. 10. - p. 154-162.
- TORGASON Warren S., 1952. - « Multidimensional scaling : theory and method ». - Psychometrika, USA, vol. 17. - p. 401-419.
- Transport à grande vitesse et structuration de l'arc atlantique : rapport final*. - 1993. - sous la direction de Philippe Mathis. - pour la DATAR. - Tours : Laboratoire du CESA. - 67 f. dactyl.
- Transport (le) multimodal terrestre des personnes en Europe : approche prospective par modélisation et images de synthèse*. - 1994. - sous la direction de Philippe Mathis. - pour la DATAR. - Tours : Laboratoire du CESA. - 134 f. dactyl.
- Transport (le) multimodal terrestre des personnes en Europe : approche prospective par modélisation et images de synthèse*. - sous la direction de Philippe Mathis. - 1994. - communication au séminaire DATAR « Prospective des transports et des territoires à l'horizon 2015 », séance n° 5, « Accessibilité et desserte du territoire, les transports de personnes », 19 janvier 1994, Paris. - 12 f. dactyl.

- TROIN Jean-François, 1995. - *Rail et aménagement du territoire, des héritages aux nouveaux défis*. - Aix-en-Provence : Edisud. - 261 p.
- Union Internationale des Chemins de fer, Communauté des Chemins de Fer Européens, 1992. - *Grande vitesse, un réseau pour l'Europe*. - Paris : Union Internationale des Chemins de fer, Communauté des Chemins de Fer Européens. - 40 p.
- VARLET Jean, 1987. - *Géographie des relations ferroviaires en France*. - 219 f. dactyl. - Thèse : Géographie : Clermont-Ferrand 2.
- VARLET Jean, 1992. - « L'Intégration des réseaux de transports rapides en Europe ». - Lettre d'Odile, France, n° 9, avril 1992. - p. 7-8.
- VARLET Jean, 1992. - *L'Interconnexion des réseaux de transport en Europe : éléments de Géographie prospective*. - Paris : I.T.A. (Etudes et documents). - 198 p.
- VICKERMANN Roger, SPIEKERMANN Klaus, WEGENER Michael, 1995. - « Accessibility and economic development in Europe ». - papier présenté à la conférence « European transport and communication networks : policies on European networks », Espinho, Portugal, 17-23 avril 1995. - 30 f. dactyl.
- VICKERMANN Roger, 1996. - « Restructuring of transport networks ». - EUREG, France, n° 3. - p. 16-26.
- VIGNAUX Georges, 1987. - *Le Réseau des transports parisiens : territoires et cartographies mentales*. - Paris : RATP. - 96 p.
- VIGNAUX Georges, 1992. - *Les Sciences cognitives, une introduction*. - Paris : La Découverte/Textes à l'Appui (série Sciences Cognitives). - 359 p.
- VIRILIO Paul, 1984. - *L'Espace critique*. - Paris : Christian Bourgois. - 187 p.
- VIRILIO Paul, 1992. - « Citoyens de la ville-monde ». - Le Monde Diplomatique, France, juin 1992. - p. 6.
- VIRILIO Paul, 1994. - « Territoire, flux et inertie ». - p. 219-234. - in Séminaire « Villes et transport » du Plan Urbain, Paris, mai 1991-juin 1994. - Villes et transport, tome 1, séances 1 à 5. - Paris : Plan Urbain. - 442 p.
- WALLISER Bernard, 1977. - *Systèmes et modèles : introduction critique à l'analyse de systèmes*. - Paris : Seuil. - 247 p.
- WERNER Christian, 1968. - « The Law of refraction in transportation geography : its multivariate extension ». - Canadian Geographer, Canada, vol. 12. - p. 28-40.
- WOLKOWITSCH Maurice, 1992. - *Géographie des transports*. - Paris : Armand Colin (Cursus Géographie). - 191 p.

- ZAUTINSKY Eugene M., 1959. - « Spaces with non-symmetric distance ». - Memoirs of the American Mathematical Society, USA, n° 34. - p. 1-91.
- ZOLLER Henry G., BEGUIN Hubert, 1992. - *Aide à la décision : l'évaluation des projets d'aménagement*. - Paris : Economica (Bibliothèque de science régionale). - 301 p.

TABLE DES FIGURES

<i>figure 1 : l'action de l'Aménagement</i>	10
<i>figure 2 : image, image numérique et image de synthèse</i>	28
<i>figure 3 : typologie des espaces de Pip Forer</i>	I-47
<i>figure 4 : les systèmes de Karl Kansky et Gabriel Dupuy</i>	I-55
<i>figure 5 : les réseaux partiels infrastructurels du réseau routier</i>	I-58
<i>figure 6 : du réseau partiel infrastructurel à la durée de transport</i>	I-59
<i>figure 7 : les liens entre l'espace et le système de transport</i>	I-61
<i>figure 8 : la ligne droite euclidienne et l'infrastructure</i>	I-72
<i>figure 9 : espace vectoriel et espace affine</i>	I-82
<i>figure 10 : espace vectoriel euclidien</i>	I-83
<i>figure 11 : espace vectoriel euclidien et espace vectoriel normé</i>	I-84
<i>figure 12 : espace vectoriel normé et espaces métriques</i>	I-85
<i>figure 13 : les approches mathématiques de l'espace</i>	I-89
<i>figure 14 : la hiérarchie des espaces topologiques, des espaces à métrique pauvre et des principaux espaces métriques</i>	Erreur! Signet non défini.
<i>figure 15 : le chemin minimal selon la loi de réfraction</i>	I-120
<i>figure 16 : représentation des plus courts chemins</i>	I-122
<i>figure 17 : un réseau à quatre noeuds</i>	I-122
<i>figure 18 : une représentation cohérente du réseau</i>	Erreur! Signet non défini.
<i>figure 19 : les trois composantes de la modélisation de l'espace</i>	II-144
<i>figure 20 : les grands types de transformations cartographiques de position</i> II-	147
<i>figure 21 la dimension du réseau, diagramme de Shepard</i>	II-165
<i>figure 22 : les 8 configurations dégénérées pour 4 points et 6 distances</i>	II-171
<i>figure 23 : une face du graphe séparée en quatre triangles</i>	II-185
<i>figure 24 : la face du graphe projetée</i>	II-186
<i>figure 25 : l'inversion de l'espace</i>	II-209
<i>figure 26 : vue en coupe de la carte d'espace-temps</i>	II-209
<i>figure 27 : la sphère de Marchand</i>	II-209
<i>figure 28 : distances kilométriques et distances temps</i>	II-209
<i>figure 29 : le réseau routier américain, deux couches superposées</i>	II-209
<i>figure 30 : les options de calcul des coûts</i>	II-209
<i>figure 31 : G' graphe partiel de G</i>	209
<i>figure 32 : G' sous-graphe de G</i>	209
<i>figure 33 : G' sous-graphe partiel de G</i>	209

TABLE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1 : comparaison des typologies de Colette Cauvin et Pip Forer</i>	<i>I-52</i>
<i>tableau 2 : les propriétés des métriques pauvres</i>	<i>I-113</i>
<i>tableau 3 : la terminologie des graphes et des réseaux.....</i>	<i>I-134</i>
<i>tableau 4 : comparatif des coûts de transport par mode dans trois pays pour un déplacement personnel.....</i>	<i>II-209</i>
<i>Tableau 5 : comparatif des coûts de transport par mode pour un déplacement professionnel.....</i>	<i>II-209</i>
<i>tableau 6 : l'accroissement du taux de convergence d'espace-temps avec l'éloignement</i>	<i>209</i>

TABLE DES CARTES

<i>carte 1 : le relief du TGV français.....</i>	<i>Erreur! Signet non défini.</i>
<i>carte 2 : le schéma directeur des liaisons ferroviaires à grande vitesse</i>	<i>I-74</i>
<i>carte 3 : représentation unipolaire des temps moyens d'accès.....</i>	<i>Erreur! Signet non défini.</i>
<i>carte 4 : les gains de temps du TGV Normandie, arbre à boules.....</i>	<i>II-155</i>
<i>carte 5 : les temps d'accès à Paris sur le réseau multimodal français en 1995.....</i>	<i>II-158</i>
<i>Carte 6 : graphique "en ressort" de la région lyonnaise.....</i>	<i>II-161</i>
<i>carte 7 : carte de base de l'espace-temps français.....</i>	<i>II-168</i>
<i>carte 8 : anamorphose unipolaire de l'espace temps français, déplacements à destination de Paris en 1988/1989.....</i>	<i>II-169</i>
<i>carte 9 : l'accessibilité de l'espace européen après réalisation du schéma directeur de la grande vitesse</i>	<i>II-177</i>
<i>carte 10 : le relief du TGV français avec les modes minimaux</i>	<i>II-191</i>
<i>carte 11 : le relief des autoroutes avec les modes minimaux.....</i>	<i>II-192</i>
<i>carte 12 : la zone de Poitiers, la route seule</i>	<i>II-201</i>
<i>carte 13 : la zone de Poitiers, la route et l'autoroute</i>	<i>II-201</i>
<i>carte 14 : la zone de Poitiers, la route et le TGV.....</i>	<i>II-201</i>
<i>carte 15 : le relief de l'autoroute pour la France à 189 points</i>	<i>II-205</i>
<i>carte 16 : le relief du TGV pour la France à 189 points.....</i>	<i>II-205</i>
<i>carte 17 : le relief du TGV pour la France à 189 points.....</i>	<i>II-206</i>
<i>carte 18 : le relief du TGV sur la zone de Poitiers</i>	<i>Erreur! Signet non défini.</i>
<i>carte 19 : le relief du TGV avec le zoom nodal de Poitiers, dans l'hypothèse d'une gare-bis à l'aérodrome de Poitiers-Biard.....</i>	<i>Erreur! Signet non défini.</i>
<i>carte 20 : le relief du TGV sur la région parisienne vu à 10° :un espace "chiffonné"</i>	<i>Erreur! Signet non défini.</i>
<i>carte 21 : le relief du TGV sur la région parisienne vu à 45° : apparition du "gouffre temporel"</i>	<i>Erreur! Signet non défini.</i>
<i>carte 22 : les vallées temporelles du TGV vues de l'atlantique.....</i>	<i>II-209</i>
<i>carte 23 : les vallées du TGV vues de Paris.....</i>	<i>II-209</i>
<i>carte 24 : les vallées fermées du TGV</i>	<i>II-209</i>
<i>carte 25 : le relief de coût européen pour un SMIC.....</i>	<i>II-209</i>
<i>carte 26 : le relief de coût européen pour trois SMIC</i>	<i>II-209</i>
<i>carte 27 : le bassin atlantique selon les schémas directeurs européens de l'autoroute et du TGV</i>	<i>II-209</i>
<i>carte 28 : le relief inversé du bassin atlantique</i>	<i>II-209</i>
<i>carte 29 : la région de Detroit (USA)</i>	<i>209</i>

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE.....	5
INTRODUCTION.....	6
CHAPITRE LIMINAIRE : METHODE	8
Section 1 De l'Aménagement au modèle décisionnel.....	9
A. L'Aménagement et les transports.....	9
B. Aménagement, accessibilité et équité spatiale	12
C. Infrastructures lourdes, temps long.....	13
D. L'aide à la décision	14
E. L'évaluation des projets d'infrastructures	16
F. Les critères de l'évaluation	16
G. Enoncé du problème général	18
H. Les modèles	19
I. La simulation	20
Section 2 Les représentations de l'espace.....	22
A. La carte	23
1. Cartes d'étude, cartes de communication.....	23
2. La carte, outil d'aide à la décision.....	24
3. Exploitation des cartes.....	24
B. L'exemple de l'imagerie médicale.....	25
C. Images de synthèse	27
1. Définition de l'image de synthèse	27
2. Images programmées	28
3. Images interactives.....	29
4. « Nouvelle catégorie du réel »	30
5. De la représentation au modèle.....	30
6. La subjectivité.....	31
7. Le rôle de l'image de synthèse.....	32
Section 3 Problème spécifique de recherche	33
A. Principe de construction	34
B. Un exemple	35
C. Hypothèse.....	36
PARTIE I DES PHENOMENES A LEUR FORMALISATION.....	I-41
INTRODUCTION	I-42
CHAPITRE I L'ESPACE, LES RESEAUX ET LES INTERACTIONS ESPACE/RESEAUX....	I-44
Section 1 Espace : définitions et typologies.....	I-45
A. L'espace en philosophie	I-45
B. Espace géographique	I-46
C. Espace économique	I-46
D. Typologie de Pip Forer : de l'espace absolu aux espaces relatifs.....	I-47
1. L'espace absolu	I-48
2. Les espaces relatifs : espaces comportementaux et espaces plastiques.....	I-48
E. Typologie de Colette Cauvin.....	I-49
1. De l'espace physique à l'espace chorotaxique.....	I-50
2. Espace fonctionnel.....	I-50
3. Espace cognitif.....	I-51

4. Comparaison des deux typologies	I-51
F. L'espace et le temps	I-52
Section 2 Réseaux et systèmes	I-53
A. Le réseau comme système	I-53
B. Représentation graphique du système et du réseau	I-55
C. Infrastructures, véhicules et objets/individus	I-56
D. Les réseaux du système de transport	I-57
E. Le binôme fonctionnel	I-58
Section 3 Interactions entre l'espace et les réseaux	I-60
A. Le réseau : discontinuité, hétérogénéité et anisotropie	I-62
1. Espace réticulaire	I-62
2. Hétérogénéisation	I-63
3. Homogénéisation	I-64
4. Discontinuum	I-64
5. Anisotropie	I-66
B. Superposition d'espaces	I-66
C. Contraction/dilatation	I-67
D. Raréfaction des points d'accès	I-69
E. Effet tunnel	I-70
F. Non symétrie	I-71
G. La ligne droite	I-72
H. L'aspect dynamique	I-75
CHAPITRE II LES OUTILS MATHÉMATIQUES DE L'ANALYSE SPATIALE	I-78
Section 1 Hiérarchie des espaces mathématiques	I-80
A. Ensemble	I-80
B. Espace vectoriel et espace affine	I-81
C. Espace vectoriel euclidien	I-82
D. Espace vectoriel normé	I-83
E. Espace métrique	I-84
F. Topologie	I-86
G. Synthèse	I-89
Section 2 Propriétés et transformations mathématiques	I-91
A. Propriétés des espaces	I-91
1. Continuité	I-91
a) Définition	I-91
b) Observations discrètes et espaces continus	I-93
2. Homogénéité	I-93
3. Isotropie	I-94
B. Les transformations mathématiques	I-95
1. L'importance de l'homéomorphisme	I-95
2. La rupture de l'homéomorphisme	I-96
Section 3 Distance	I-97
A. Définition mathématique	I-97
B. Propriétés	I-98
1. Non négativité	I-98
2. Séparation	I-98
3. Symétrie	I-98
4. Inégalité triangulaire	I-98
C. Les formes de la distance	I-99
1. Formes classiques	I-99
a) Métrique euclidienne	I-99
b) Métrique rectilinéaire	I-100
c) Le cas général : la fonction de Minkowski	I-100
2. Formulation analytique ou non	I-101
3. La contiguïté	I-102
4. La distance réseau	I-102
a) Première définition	I-102
b) Deuxième définition	I-103
c) L'intérêt de la distance-réseau	I-104

d) Opposition entre distance et distance réseau.....	I-104
e) L'articulation entre espace et réseau.....	I-105
5. Les unités de la distance	I-105
a) Le temps (la durée).....	I-106
b) L'importance du temps dans les transports.....	I-107
c) Distances économiques	I-108
D. Formes appauvries (fausses distances)	I-109
1. Métrique non-symétrique	I-110
2. Métrique dégénérée	I-110
3. Métrique pauvre	I-111
4. Espace prémétrique	I-111
5. Espace semi-métrique.....	I-112
6. Tableau récapitulatif des formes appauvries	I-113
7. La hiérarchie de Shepard	I-114
Section 4 La question de la ligne droite	I-116
A. L'héritage euclidien.....	I-116
1. L'espace euclidien.....	I-116
2. La géométrie euclidienne	I-116
3. L'espace théorique	I-117
4. L'espace de référence	I-117
5. Limites de la structure euclidienne.....	I-118
B. Hors de la ligne droite.....	I-119
1. Ecart au chemin euclidien par la loi de réfraction	I-119
2. Une mauvaise interprétation de l'inégalité triangulaire	I-120
3. Comment représenter les plus courts chemins ?.....	I-121
4. Transformation du réseau	I-122
5. Proposition : de la "distance graphique" à la "longueur visuelle"	I-123
Section 5 Du réseau au graphe.....	I-125
A. Définitions élémentaires	I-125
1. Graphe	I-125
2. Le p -graphe.....	I-126
3. Graphe valué	I-126
B. Du réseau de transport au graphe de transport	I-127
1. Du binôme fonctionnel au graphe	I-127
2. Graphe du réseau de transport.....	I-127
C. Propriétés.....	I-128
1. Connexité.....	I-129
2. Réseau routier : l'universalité	I-130
3. Isotropie et homogénéité de réseau.....	I-130
4. La réalisation des graphes.....	I-131
5. Planarité	I-131
D. Une distance sur les graphes.....	I-132
1. L'écart	I-132
2. De l'écart à la distance de graphe.....	I-132
E. Graphe et système de transport : terminologie.....	I-134
F. Graphes et systémique.....	I-134
CONCLUSION DE LA PARTIE I.....	I-139

PARTIE II REPRESENTATIONSII-141

INTRODUCTION	II-142
CHAPITRE I LES REPRESENTATIONS DE L'ESPACE	II-143
Section 1 Les quatre démarches de la modélisation de l'espace	II-144
A. La surface parfaite	II-145
B. La cartographie thématique.....	II-145
C. Les configurations (anamorphoses)	II-146
1. Les transformations thématiques.....	II-147
2. La transformation de tendance.....	II-148
3. Les transformations de comparaison	II-148
D. La distance-réseau et la distance de graphe	II-149

E. La représentation des espaces fonctionnels.....	II-150
F. La carte : un problème de dimensions.....	II-151
Section 2 Représentations chorotaxiques	II-153
A. Cartes unipolaires des temps d'accès	II-153
B. "L'arbre à boules".....	II-155
C. Les cartes en isolignes.....	II-156
D. Les temps d'accès sur le réseau	II-156
E. Des représentations unipolaires aux multipolaires	II-159
F. Le graphique "en ressort"	II-159
Section 3 Les anamorphoses	II-163
A. Analyse multidimensionnelle.....	II-163
1. L'espace de départ.....	II-163
2. L'espace d'arrivée	II-164
3. La dimension réelle de l'espace	II-164
4. L'algorithme d'analyse multidimensionnelle classique.....	II-166
B. Quelques types d'anamorphoses.....	II-166
1. Anamorphoses unipolaires.....	II-166
2. L'espace-temps français	II-167
C. Les contraintes des anamorphoses	II-170
1. Questions de topologie	II-170
2. La question de l'échelle.....	II-173
3. Anamorphose et espace chorotaxique	II-173
4. L'espace interstitiel oublié	II-173
D. Exploitation des anamorphoses.....	II-174
1. Un apport capital.....	II-174
2. Rétrécissement global et déplacements relatifs.....	II-174
E. Représentation en trois dimensions	II-175
CHAPITRE II LES CARTES EN RELIEF	II-180
Section 1 La construction des cartes en relief.....	II-181
A. La modélisation des réseaux.....	II-181
1. L'articulation entre le réseau et l'espace	II-181
2. Récapitulatif des contraintes	II-183
3. Choix du réseau routier comme fond de carte	II-184
4. La nature mathématique de la surface en trois dimensions	II-185
B. Principe général.....	II-186
1. Réseau hétérogène	II-186
2. Trois contraintes	II-187
3. Les densités et le maillage du réseau	II-187
4. Omnibus, express et TGV.....	II-188
5. Une variante : le graphe des arcs minimaux.....	II-189
6. Le modèle et les images	II-193
7. Longueur et longueur visuelle.....	II-194
8. Angle de vue	II-194
9. La topologie de l'image	II-195
Section 2 Cartographie d'analyse	II-198
A. La zone de Poitiers (présentation de la carte).....	II-199
1. Hiérarchie des réseaux.....	II-202
2. Sur les cartes en relief.....	II-203
B. La France à 189 sommets.....	II-204
1. De l'anamorphose à la carte en relief	II-207
2. L'effet tunnel du TGV.....	II-207
3. Un espace virtuel.....	II-207
C. Propriétés des cartes en relief	II-208
1. La ligne droite euclidienne n'est pas le plus court chemin.....	II-208
2. L'ubiquité	II-208
3. Un espace de synthèse	II-209
D. Une relecture de trois modèles d'analyse spatiale	II-209
1. L'inversion de l'espace	II-209
2. La sphère de Marchand.....	II-209

3. Espaces superposés	II-209
E. Les limites des cartes en relief	II-209
1. Froissement uniforme	II-209
2. Les transports collectifs : desserte et correspondances	II-209
3. Représenter les transports aériens	II-209
Section 3 Cartographie prospective	II-209
A. Images d'une perte d'accessibilité	II-209
B. Plusieurs reliefs pour un même espace	II-209
C. Zoom nodal de Poitiers.....	II-209
D. Deux image de Paris.....	II-209
E. Les vallées du TGV.....	II-209
Section 4 Développement des cartes en relief	II-209
A. Le relief de coût	II-209
1. Les trois degrés de liberté du modèle	II-209
2. Description du modèle de calcul	II-209
3. Une application à l'espace européen	II-209
B. Le relief "inversé"	II-209
C. Cartographie dynamique.....	II-209
CONCLUSION DE LA PARTIE II	II-209

CONCLUSION GENERALE.....209

ANNEXES209

LA CONVERGENCE DE L'ESPACE TEMPS	209
ANNEXES MATHÉMATIQUES.....	209
PRESENTATION DU LOGICIEL MAP	209
SIGLES	209

TABLES.....209

BIBLIOGRAPHIE.....	209
TABLE DES FIGURES.....	209
TABLE DES TABLEAUX.....	209
TABLE DES CARTES	209
TABLE DES MATIERES	209