



HAL
open science

Les grandes vitesses

Alain L'Hostis, Philippe Mathis, Nadine Polombo

► **To cite this version:**

Alain L'Hostis, Philippe Mathis, Nadine Polombo. Les grandes vitesses. Alain Bonnafous; François Plassard; Bénédicte Vulin. Circuler demain, Datar / éditions de l'aube, 1993, 2-87678-126-3. hal-01376791

HAL Id: hal-01376791

<https://hal.science/hal-01376791v1>

Submitted on 5 Oct 2016

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

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

Les grandes vitesses

Alain L'Hostis, Philippe Mathis, Nadine Polombo ¹

Le transport de personnes en Europe et, plus particulièrement, le transport terrestre à grande vitesse ont donné lieu à l'élaboration d'un modèle prospectif. Afin d'évaluer les projets et comparer les divers scénarios avec des critères relativement objectifs, la méthode prend en compte simultanément plusieurs modes de transport et détermine, dans un ensemble de réseaux et de modes complexes, les chemins de valuations minimales, non seulement en termes de distance kilométrique mais surtout en termes de durée de transport. Le modèle en est actuellement à sa phase d'application, dont nous décrivons les outils : données, premiers tests avec hypothèses TGV, cartographies des temps de transport à partir d'une origine déterminée et, enfin, la chronocarte qui permet de comparer les durées de transport entre modes à partir de toutes les villes.

Le modèle de simulation multimodale

L'analyse structurale des réseaux

L'espace est constitué de réseaux de transports spécifiques, par-courus par des modes différents : voitures, trains, TGV, avions, fer-ries... L'ensemble produit un espace discontinu qui n'est plus une surface de, transport au sens de la théorie spatiale. Pour représenter simultanément ces réseaux et ces modes, nous utilisons les graphes permettent de raisonner sur l'ensemble des moyens de transport actuels et d'utiliser les algorithmes classiques. Le graphe t-modal est défini par t matrices associées, chacune décrivant le graphe spécifique d'un mode donné dans un réseau. En conséquence, deux modes, s'ils utilisent un même réseau, seront décrits chacun par une matrice associée spécifique. '

L'analyse structurale est le complément de la mesure des accessibilités en termes d'intervalles minimum. Elle permet une analyse globale de la structure du réseau en le caractérisant par 7.-

des propriétés simples (Mathis, 1990). Elle a, outre sa propre valeur, des applications directes dans les procédures de vérification et de validation des grands graphes. Parmi ces propriétés, la forte connexité est obligatoire, car elle autorise la jonction de tout point à partir de n'importe quel autre, mais elle n'existe pas forcément au niveau de chaque mode de transport, par exemple dans le cas des réseaux insulaires. Le degré extérieur, pour un mode en site banal, sera égal au nombre de sommets que l'on peut atteindre directement à partir d'un sommet origine et, pour un mode en site propre, le nombre de destinations que l'on peut atteindre sans rupture de charge (changement de mode ou dans le mode).

L'écart de deux sommets est la longueur du plus court chemin allant de x à y exprimé en nombre d'arcs. Si cette longueur présente une boucle, une inégalité triangulaire et une symétrie, elle est alors une distance au sens topologique du terme. Ces relations ne sont pas vérifiées lorsque la valuation est différente du nombre d'arcs empruntés — valeur éventuellement différente de 1 par arc du chemin —, ce qui est le cas notamment pour les valuations en termes de coût et de temps. L'écart peut être immédiatement utilisé pour minimiser le nombre de ruptures de charges. Mais l'écart n'est qu'un cas particulier pour lequel la valuation de chaque arc est égale à 1.

Le degré de contiguïté, généralisation de l'écart, sera le nombre d'arcs du chemin n entre les sommets x et y s'il existe. Il est directement utile dans les problèmes d'affectation avec saturation.

¹ Laboratoire du Centre d'études supérieures d'aménagement. Avec la collaboration de Bernard Bourin, Isabelle Piedallu

La vulnérabilité d'un réseau de transport est importante pour l'analyse structurelle : elle peut prendre la forme d'un point d'articulation, d'un arc ou d'un ensemble de même nature.

On définit le point d'articulation d'un graphe comme étant le sommet qui, par son retrait, supprime la propriété de connexité du graphe en le transformant en deux sous-graphes. L'arc vulnérable est défini de même. La gare de TGV de Massy et le contournement sud sont des exemples de ces propriétés.

L'analyse structurale des graphes de transport décrit leurs points de faiblesse : le graphe TGV est typiquement arborescent avec de nombreux points d'articulations et arcs vulnérables.

L'algorithme du modèle

"Une bonne représentation de la distance observée devrait donc tenir compte des caractéristiques des réseaux ainsi que des difficultés spécifiques des déplacements en termes de temps ou de coût de transport" (Huriet, 1983). Chaque mode doit être décrit séparément, pour pouvoir les combiner entre eux et changer de référentiel. Pour chaque mode, on dispose d'une matrice associée de $n \times n$ cases, n étant le nombre de sommets ou villes retenues. Il est plus simple d'utiliser un tableau de dimension supérieure à deux, la troisième pour les différents modes et la quatrième les valuations. Mais l'utilisation d'une matrice à trois ou quatre dimensions est trop lourde en termes d'espace-mémoire car ces tableaux sont très creux pour certains modes. Il est possible de réduire la matrice de quatre à trois dimensions en sélectionnant une même valuation pour tous les modes, ce qui est nécessaire pour l'évaluation multimodale, et à deux dimensions en ne retenant, lorsqu'il existe plusieurs arcs entre deux sommets, que le plus court. L'utilisation de ces deux caractéristiques permet de retrouver les conditions classiques du problème de la détermination du chemin minimal tel qu'il a été résolu par Ford.

L'application : les réseaux de transport en Europe

Le champ d'étude

Les principaux modes de transport retenus sont la voiture parti-culière en site banal et autoroutier, le chemin de fer (avec le TGV), le ferry-boat... Seules les villes principales sont prises en compte. Le champ d'étude inclut les vingt-cinq pays de l'origine, soit l'Albanie, l'Allemagne, l'Autriche, la Belgique, la Bulgarie, le Danemark, l'Espagne, la Finlande, la France, la Grèce, la Hongrie, l'Irlande, l'Italie, le Luxembourg, la Norvège, les Pays-Bas, la Pologne, le Portugal, la Roumanie, le Royaume-Uni, la Suède, la Suisse, la Tchécoslovaquie, la Turquie, la Yougoslavie, et maintenant les Républiques Baltes, la Russie, la Biélorussie, l'Ukraine, soit trente et une nations.

Le graphe multimodal comporte dans ces tests 96, 122 ou 155 sommets ou villes, et jusqu'à 1500 arcs par multigraphe. A cet ensemble s'ajoute le réseau aérien traité à part pour ne pas brouiller les résultats, mais qui est aussi important. Les graphes de chaque mode sont évalués, arc par arc, en fonction des distances et temps. Le coût sera établi à partir de ces données complétées par d'autres, comme les tarifs SNCF, aériens, les coûts moyens au kilo-mètre par catégories d'automobiles, les péages et taxes diverses, gares, aéroports..., ainsi que par l'estimation du coût du temps moyen par catégorie socioprofessionnelle ou par lieu de résidence de population car, bien évidemment, les revenus et les structures de dépenses ne sont pas toujours comparables d'un pays à l'autre...

Le temps est fonction du moyen de transport : la différence entre la route et l'autoroute est importante et celle entre le train et le TGV sur les voies nouvelles encore plus. L'algorithme est prévu pour intégrer des données nodales comme le temps d'attente aux ruptures de charge.

Les graphes utilisés pour la réalisation de la chronocarte sont généralement planaires pour ce qui concerne la route, et dans la mesure du possible pour les autres. Le réseau routier constitue la base à partir de laquelle est calculée la chronocarte. Il permet de déterminer un graphe dual au sens de la théorie et donc de prendre en considération le territoire puisqu'on peut associer à chaque sommet du

primal une face du dual, donc un espace à chaque ville, avec la souplesse de tracé que permet la dualité.

Une des difficultés est la fiabilité et la validation des données car, lors de la saisie, les erreurs sont statistiquement inévitables et certaines difficilement décelables. Des procédures systématiques ont donc été mises au point dont des cartographies. L'ensemble doit permettre d'aboutir, à terme, à la mesure du degré d'erreur des données utilisées.

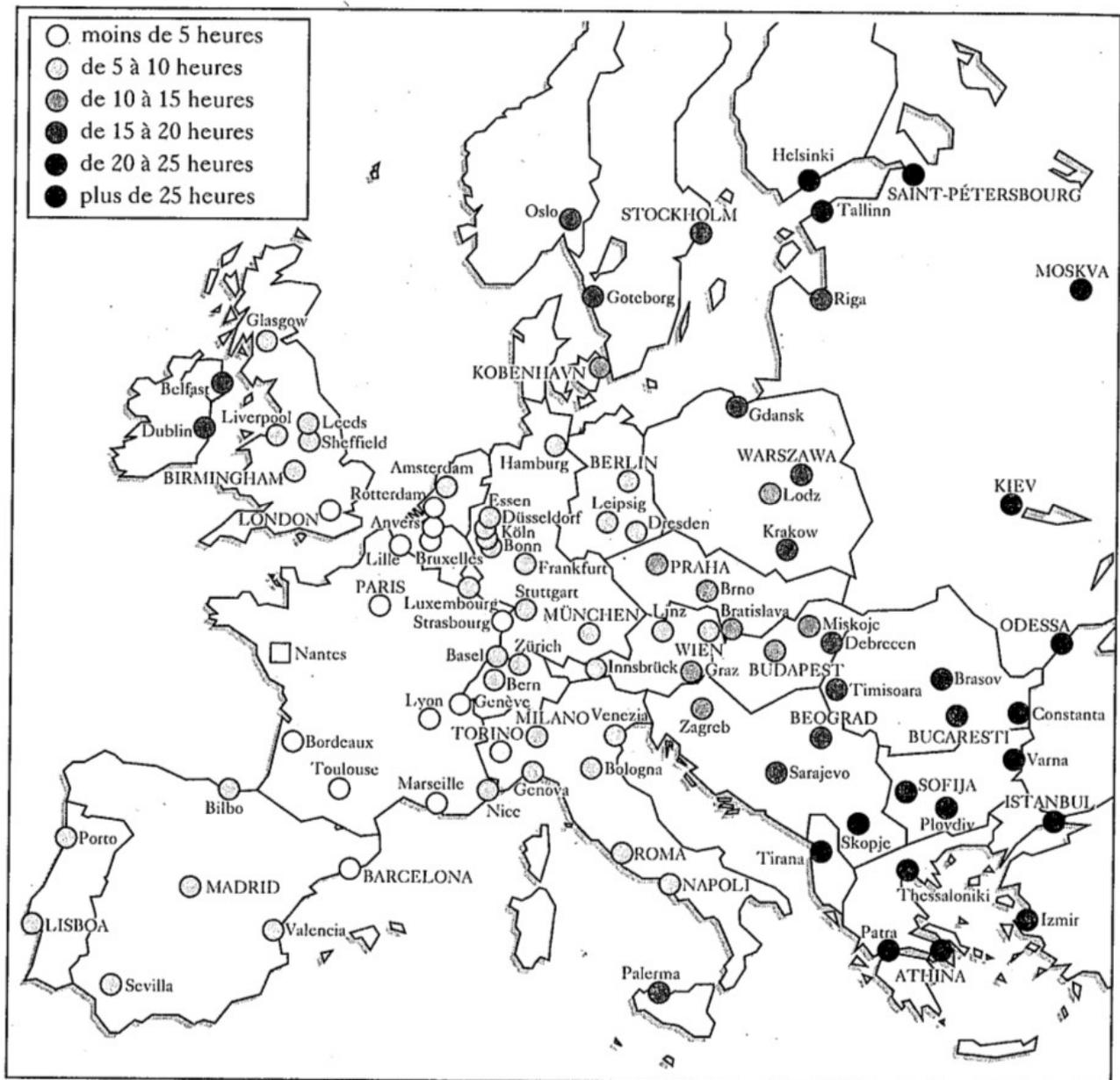
Les hypothèses de la prospective

La situation de base retenue correspond à la situation actuelle, le TGV étant déjà réalisé. À partir de cette situation de base, nous avons intégré les projets déjà programmés en France, auxquels nous avons ajouté une estimation des projets en péninsules ibérique et italienne, le lien Transmanche jusqu'à Londres, puis nous avons élaboré des hypothèses sur l'ensemble de l'Europe. Plus précisément, nous avons considéré un TGV "arc méditerranéen" jusqu'à Athènes, un TGV "arc nord-Baltique" de Londres à Saint-Petersbourg par Rotterdam, Hambourg, Gdansk, Riga, une auto-route est Gdansk-Bucarest et, enfin, un TGV centre-Europe : Nantes, Paris, Bâle, Munich, Prague, Varsovie, Moscou et une branche Munich, Vienne, Budapest, Kiev dont les tracés figurent sur la chronocarte. Ces hypothèses ne sont que des tests indicatifs que le modèle permet de modifier. Elles doivent être interprétées avec précautions au cours de cette première étape de l'étude, mais elles permettent cependant d'illustrer des prospectives et d'en mesurer certaines conséquences.

Le premier exemple est fourni par la carte des accessibilités en temps à partir de la ville de Nantes avec le TGV programmé sur l'ouest (fig. 1). On peut y constater que l'ensemble de la Communauté européenne est à moins de 10 heures de Nantes, ce qui correspond, dans la stratégie actuelle de la SNCF, à une nuit de transport au maximum. Les pays de l'Europe centrale sont dans la zone des 10 à 25 heures sauf la Grèce. L'évaluation est évidemment multimodale et le moyen le plus rapide est souvent le TGV ou le train international. La seconde carte (fig. 2) montre les gains de temps que permettrait la réalisation de la seconde hypothèse à partir de l'autre extrémité de l'Europe, c'est-à-dire de Saint-Pétersbourg. Évidemment, les résultats reflètent en partie l'arbitraire de l'hypothèse. Par exemple, les gains le long du trajet du TGV sur Riga et sur Gdansk sont respectivement estimés à 405 et 415 minutes, soit presque 7 heures par rapport au temps actuel estimé à une vitesse moyenne de 60 kilo-mètres par heure sur route pour l'est, 70 à l'ouest et en fonction du meilleur horaire annoncé des chemins de fer ! On peut constater des gains de temps de 10 à 15 heures en centre-Europe et de 16 à 20 sur l'ouest. Dans cette hypothèse, Saint-Pétersbourg-Séville se fait presque en 50 % du temps de l'hypothèse précédente.

Nous avons ainsi multiplié les points de vue tout autour de l'Europe pour en tirer les premières conclusions, en estimer les limites et les erreurs. Il est difficile de conclure sur ce qui n'est qu'un début. On peut cependant émettre quelques idées provisoires.

Tout d'abord, la seule réalisation d'un réseau TGV centré sur la France renforce la dissymétrie entre l'ouest et l'est de l'Europe. En second lieu, la réalisation de ce réseau avantage actuellement fortement Paris dont les accessibilités dans les 3 et 6 heures sont plus fortes que celles de Vienne, dont la situation est pourtant centrale. Enfin, des lignes TGV schématiquement projetées modifient ces résultats en rendant l'espace plus homogène, et surtout en rapprochant les villes qui sont presque toutes à moins de 24 heures de trajet.

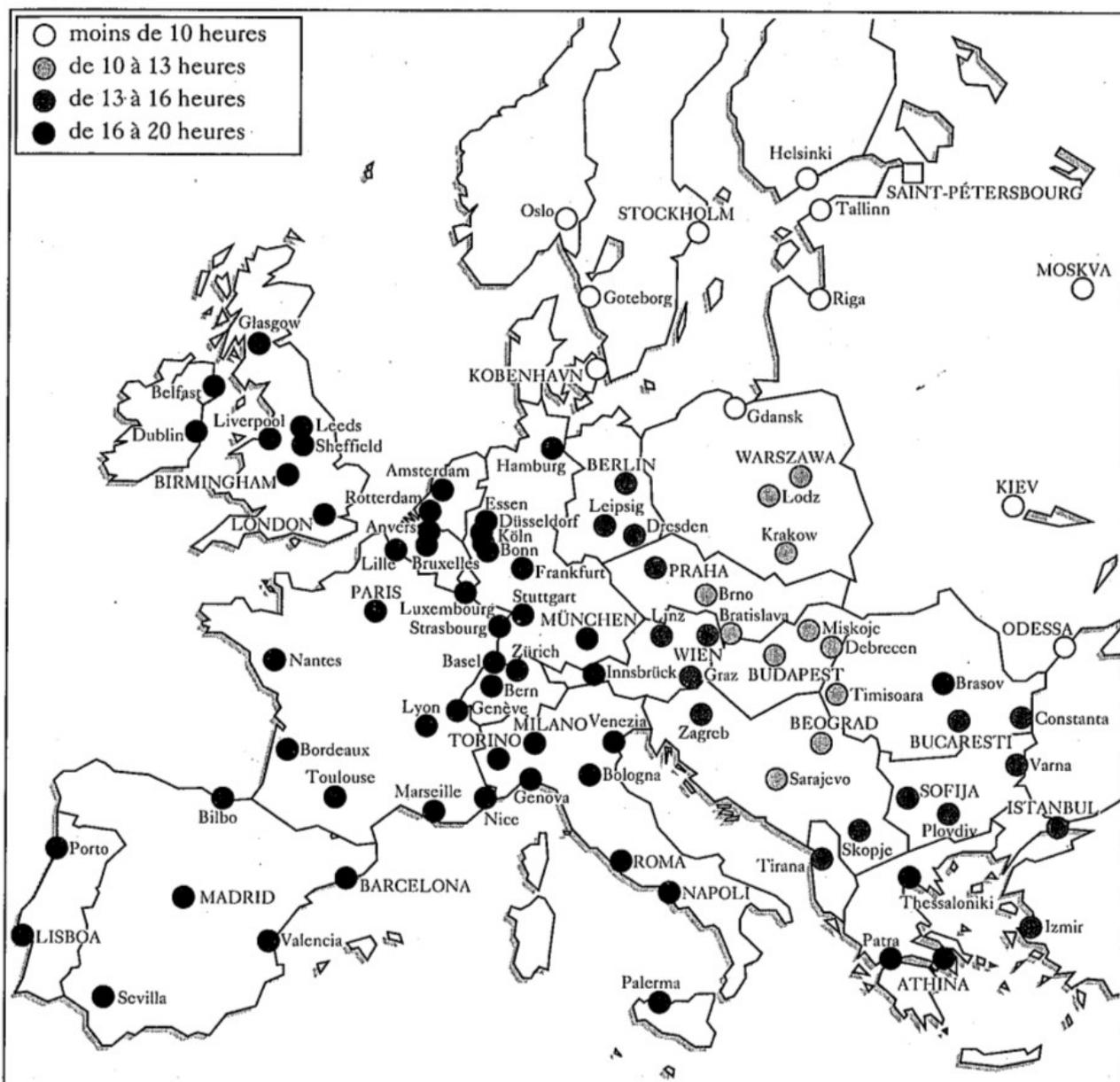


Multimode route, fer, autoroute, TGV, avec extensions jusqu'en Russie. Source : P. Mathis, N. Polombo, LAD-CESA, 1992.

Fig. 1— Accessibilités en Europe : temps minimal de Nantes à...

Cette offre de transport ainsi développée va donc influencer sur les localisations avec les paradoxes que nous avons vus : rapprochements avec des effets centralisateurs, révision de la demande de transport. Ces modifications sont parfois plus complexes qu'il ne semble et peuvent renforcer des polarisations, modifiant l'organisation des réseaux urbains, comme le montre l'exemple de l'Ouest français.

Les résultats présentés concernent les temps de parcours, en négligeant le facteur coût. Cependant, la minimisation de la durée de transport, dans les hypothèses retenues qui négligent les temps de rupture de charge, correspond aussi à une minimisation du coût (coût ferroviaire inférieur à celui de la route), bien que l'utilisation



Source : P. Mathis, N. Polombo, LAD-CESA, 1992.

Fig. 2 — Accessibilités en Europe : gain de temps à partir de Saint-Pétersbourg

du TGV introduit un surcoût. Le temps perdu est moindre et, dans ce cas, le temps de transport n'est pas nécessairement perdu, notamment dans les trains rapides et les TGV.

La déformation de l'espace : la chronocarte

Le problème représenté par la détermination d'un ou de l'ensemble des chemins les plus courts pour une valuation déterminée est strictement identique. A partir de la matrice des chemins les plus courts pour tous les couples d'origine/destination, la détermination de l'ensemble des gains, pondérés ou non par la population des villes ou zones concernées, est méthodologiquement triviale, même si elle est intéressante pour mesurer l'efficacité des projets de modification ou de création de réseaux. La représentation des temps de trajet et de la transformation de l'espace liée à la réalisation d'un projet d'aménagement n'est pas totalement résolue par les techniques de cartes anisotropes. En effet, ces cartes ont, en contrepartie de leurs avantages, deux défauts essentiels : d'une part, la configuration géographique est modifiée, parfois au point de ne pas être reconnaissable, d'autant plus que les transports sont rapides ; d'autre part, ces représentations ne permettent pas de superposer deux modes de transport différents. Nous avons donc élaboré une représentation

chronique permet-tant de visualiser simultanément les temps de déplacement liés à des modes différents, sans déformation différentielle du réseau considéré.

Les principes de réalisation de la chronocarte

Notre propre représentation a été construite pour palier ces deux inconvénients : la chronocarte avait pour contraintes de ne pas déformer la représentation et de représenter simultanément plusieurs modes de transport. La carte géographique représentant l'espace a pendant longtemps permis la représentation, l'anticipation de comportements spatiaux. Napoléon ne considérait-il pas que la carte était un instrument militaire et que celui qui avait les meilleures cartes avait aussi les meilleures chances de gagner ? Cette relation entre carte spatiale et carte représentative d'un comportement n'est restée valable que tant que les vitesses de déplacement sont demeurées limitées, ce qui n'est plus le cas. En effet, aller de Roissy-Charles-de-Gaulle à Orly, de Paris-Mont-parnasse à Tours où de Paris-Roissy à Londres-Heathrow demande quasiment le même temps de trajet alors que les distances parcourues sont sans aucun rapport.

Il s'agit donc de créer un mode de représentation basé sur les temps de parcours utilisant des modes de transport différents, et les matérialisant. De même, pour les problèmes d'optimisation de trajets, de localisation, etc., c'est une représentation en termes de durée ou de coût qui est nécessaire : une fois la première réalisée, la seconde s'en déduit en grande partie.

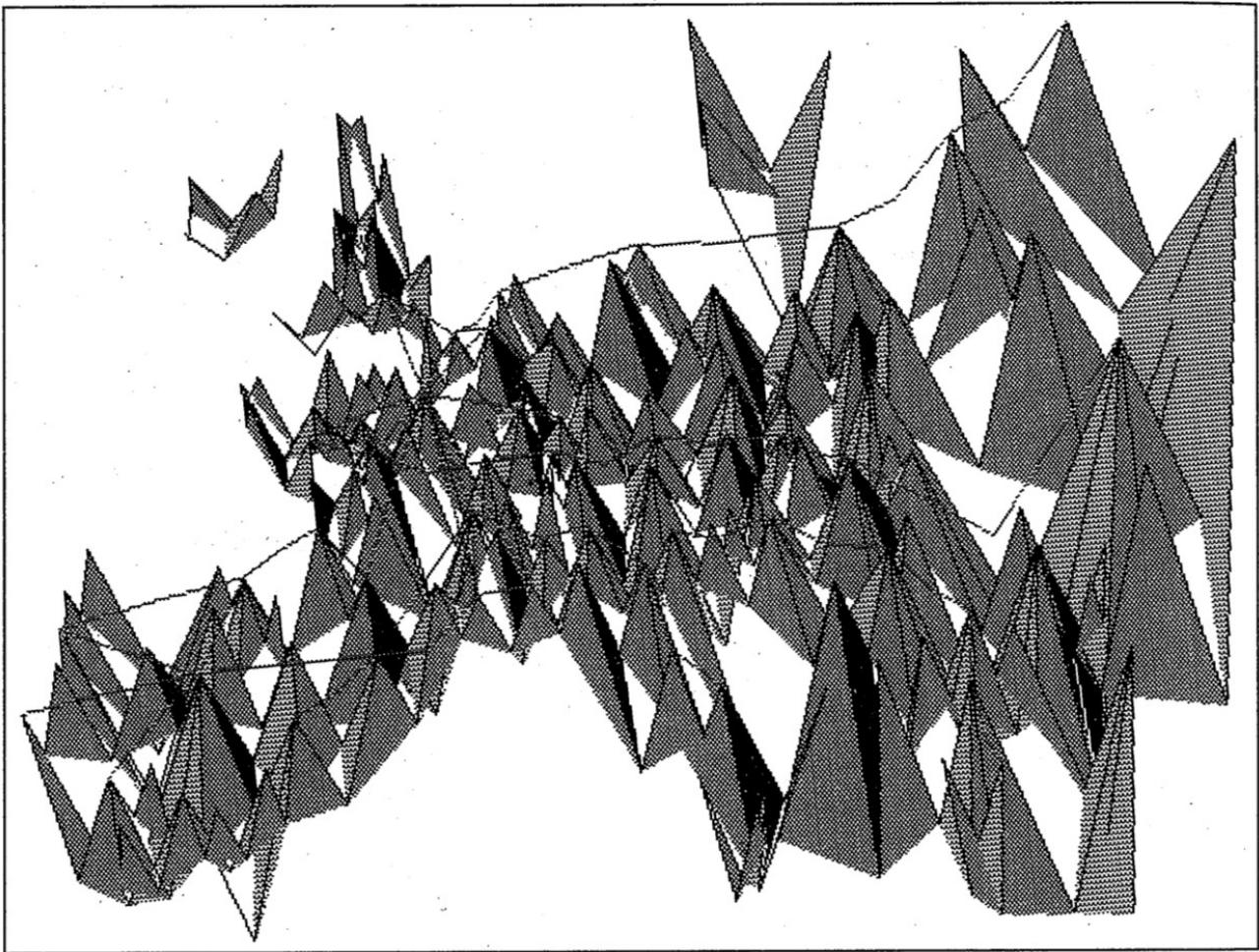
La chronocarte est constituée d'un ou de plusieurs graphes représentant des réseaux de transport différents ou des modes différents dans un même réseau, le réseau de base étant constitué par le graphe viaire que nous avons rendu planaire. Nous disposons donc d'une surface que nous pouvons déformer. Ensuite, outre la "planarité" du réseau viaire, la localisation des sommets du graphe planaire doit être rigoureusement isomorphe de celle d'une carte géographique classique (une spatio-carte) pour pouvoir être lue immédiatement : il ne doit pas y avoir de déformation dans la position relative et la "distance euclidienne des projections droites des sommets". Entre la chronocarte et la carte géographique, il y a seulement un coefficient d'échelle. La seule déformation possible réside alors dans la troisième dimension et cela oblige à créer un "chronoespace" à trois dimensions.

L'échelle de la représentation est donnée par la distance parcourue en une unité de temps par le mode le plus rapide retenu : dans le cas présent, l'unité est constituée par la durée du trajet Paris-Tours en TGV qui déterminera l'échelle des durées les plus courtes entre chaque couple de villes et donc l'échelle totale du réseau planaire.

Le reste est évident : connaissant la durée du trajet le plus rapide entre deux points et donc la vitesse et la durée, des trajets dans les autres modes ou la vitesse moyenne de ces modes, il est alors aisé de calculer la longueur représentative de cette durée de trajet, et de la représenter dans la troisième dimension. Comme dans une carte géographique classique sur laquelle on mesure la distance entre deux points en suivant le tracé de la route ou du chemin plus ou moins simplifié, on mesure la durée de trajet par la "longueur" de l'arc du mode de transport choisi, lorsqu'il existe.

L'exemple de l'Europe

Nous avons choisi de représenter la troisième dimension par projection sur écran en utilisant les possibilités offertes par la variation des angles du plan. La figure 4 représente une vue de dessus de l'Europe, sur laquelle nous n'avons retenu que 155 villes pour définir l'ensemble des graphes — route, autoroute, fer, TGV, ferry —, avec un grisé qui résulte de l'effet d'ombre comme on le constate sur les autres cartes. La chronocarte (fig. 3) montre le même espace sous un angle de 45°. Chaque ville occupe le sommet d'une sorte de pyramide définie par la prise en compte du temps dans la troisième dimension. On distingue que les durées de trajet en TGV sont les plus courtes (la ligne droite, le chronoespace est euclidien !) alors que la durée de trajet par la route est



Durées de trajet entre 155 villes. Ces durées sont proportionnelles aux longueurs des segments considérés.

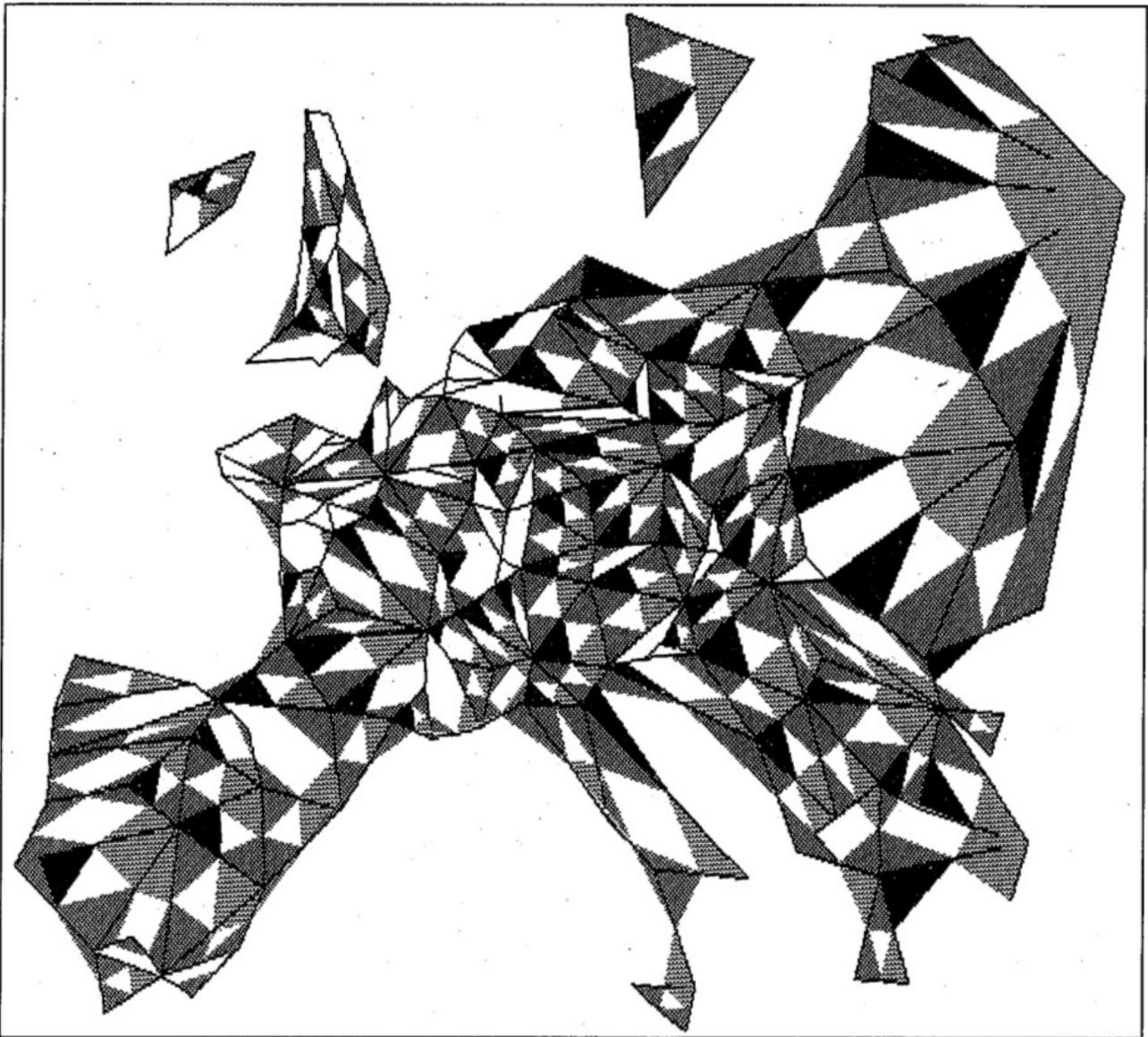
Source : Ph. Mathis, A. L'Hostis, CESA, 1992.

Fig. 3 — L'Europe des temps vue à 45°

quasiment trois fois plus longue : elle est matérialisée par les deux segments reliant deux sommets, c'est-à-dire deux villes.

Une des originalités de cette représentation est de se situer et d'avoir été élaborée dans un chrono-espace euclidien à trois dimensions explicites qui permet de mettre en évidence le froissement de l'espace, le rétrécissement des zones rurales consécutif au développement des TGV reliant les villes.

La prise en compte du phénomène d'encombrement, la dilatation urbaine Si la chronocarte permet de représenter les durées de transport et de mettre en évidence la contraction de l'espace due aux transports rapides, de la même manière elle montre la dilatation temporelle de la ville due aux phénomènes d'encombrement. En effet,



Les trames sont dues aux effets d'ombre de la carte en relief. Seules sont schématisées les routes entre deux sommets successifs.

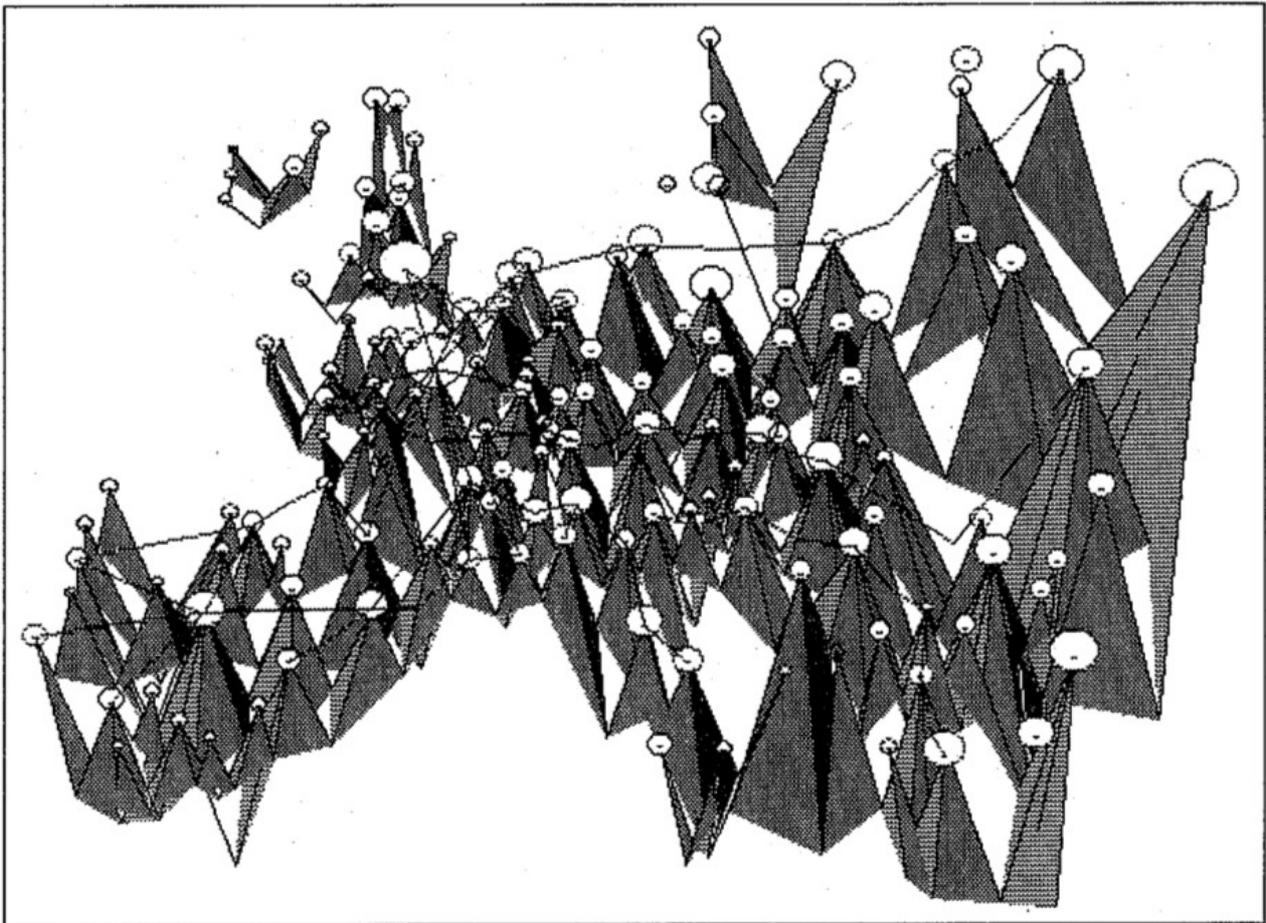
Source : Ph. Mathis, A. L'Hostis, CESA, 1992.

Fig. 4 — Localisation des 155 villes (vue de dessus)

nous avons noté ci-dessus que le trajet Paris-Tours était devenu équivalent à la traversée de Paris. Il fallait donc représenter le phénomène sur la chronocarte : la durée est figurée par une longueur et, plus précisément, l'allongement des temps de transport, consécutif à la densification et au phénomène d'encombrement, est représenté par une dilatation de la ville qui passe ainsi d'un point à une sphère dont le demi-périmètre sera égal à la durée de traversée. Chaque ville peut être affectée de sa propre durée mais, en l'état actuel des données, nous n'avons pu que figurer le phénomène en fonction de la population, comme le montre la carte de traversée des agglomérations (fig. 5).

Les principales propriétés de la chronocarte

L'analyse des principales propriétés du chronoespace sont en cours d'exploration. La représentation actuelle conserve les durées, mais compte tenu de la multimodalité et surtout de l'existence de la dilatation temporelle des transports urbains, elles ne constituent pas des distances au sens mathématique car la condition $d(x_i, x_i) = 0$



Source : Ph. Mathis, A. L'Hostis, CESA, 1992.

Fig. 5 — Routes et TGV, durée de traversée des agglomérations (vue à 45°)

n'est plus réalisée, alors que l'inégalité triangulaire l'est par définition ; ce n'est pas le cas dans la projection plane de la chronocarte, laquelle est isomorphe d'une carte géographique. Les surfaces sont conservées dans la projection plane mais elles sont affectées sur la chronocarte (pour celles qui ne sont pas horizontales) d'un coefficient de dilatation fonction du rapport des vitesses entre le système viarie et le mode le plus rapide envisagé. De même, il est possible d'associer à chaque sommet une surface car le système viarie interurbain est planaire et supporte un graphe dual. Vu la simplicité actuelle de la chronocarte, elle n'est précise et valide que lorsque l'arc existe entre deux sommets, mais ceci est aussi vrai pour la carte classique.

Le développement de la chronocarte se fait par la multiplication des sommets intermédiaires, selon un processus qui n'est pas fractal mais seulement "quasi fractal" : il n'y a pas de loi de composition interne de type homothétie interne même statistique car les propriétés en chaque point sont différentes, ce que nous avons démontré par l'analyse structurale du graphe : les degrés intra et intermodaux sont évidemment différents pour chaque sommet.

Le modèle de simulation prospective présenté ici permet d'évaluer certaines conséquences de créations ou de modifications de réseaux de transport de personnes. D'une part il détermine, à partir d'un multigraphe, certaines caractéristiques structurelles et fonctionnelles des réseaux de transport de personnes existants ou projetés, d'autre part il transcrit les résultats sous forme quasi cartographique, permettant ainsi une visualisation et une interprétation directes.

Un objectif était d'anticiper certaines conséquences de la création de moyens de transport rapide sur l'espace européen. Le modèle montre les gains de temps et les propriétés structurelles de ces projets, mais surtout, avec les chronocartes, il met en évidence et en rapport la contraction relative de l'espace rural et la dilatation de l'urbain. L'utilisation des coûts, actuellement plus complexe du fait

de la non linéarité des tarifs ferroviaires, risque selon toute vraisemblance d'accentuer ces transformations différentielles de l'espace.

Ces visualisations des espaces de temps ou de coût sont à développer car il est paradoxal de ne pouvoir visualiser que partiellement ce qui fonde le plus généralement les choix en matière de déplacement et de localisation.

BIBLIOGRAPHIE

BERGE, C., Graphe, troisième édition, Gauthiers-Villars, 1983.

FAURE, R., Éléments de la recherche opérationnelle, Gauthier-Villars, 1975.

FLAMENT, C., Théorie des graphes et structures sociales, Gauthiers-Villars, 1968.

HURIOT, J.-M., "Espace et méthode en économie", l'Économie du Centre-Est, n° 4, 1983.

KAUFMANN, A., PIGHAT, E., Méthodes mathématiques non numériques et leurs algorithmes, tome 1 : "Algorithmes de recherche des éléments maximaux" tome 2 : "Algorithmes de recherche des chemins et problèmes associés", Masson, 1977.

MATHIS, Ph., Développement du modèle GAST par utilisation des points neutres et des graphes planaires, ébauches du GAST, université de Tours, 1980.

MATHIS, Ph., "Morphologie urbaine et Conséquences économiques, le modèle Gasturba", l'Économie du Centre-Est, n° 1, 1981.

MATHIS, Ph., Accessibilités multimodales des communes de la région Poitou-Géarenæs, Direction régionale de l'équipement Poitou-Charentes, ministère de l'Équipement, 1990.

MATHIS, Ph., Économie urbaine et théorie des systèmes, thèse de doctorat d'État, Tours, 1978.

MATHIS, Ph., POLOMBO, N., BOURIN, B., LEGRAND, N., l'intégration des modes de transport pour une renaissance de la façade atlantique : simulation et prospective, rapport intermédiaire, DATAR, 1991.

MATHIS, Ph., POLOMBO, N., BOURIN, B., LEGRAND, N., le Transport multimodal de personnes en Europe, rapport intermédiaire, DATAR, 1992.

COOK, Th., European Time Table, Londres, 1991.

Atlas routier de l'Europe, Michelin, 1990.

"SNCF, Indicateur officiel relations internationales, Paris, 1990.

REED TRAVEL GROUP, ABC World Airways Guide, Dunstable, Beds, 1990.