

# **Programme CartoGram**

## ***Quelle cartographie pour l'aménagement du territoire ?***

Appel d'offres du groupe de prospective 7 de la DATAR « Complexité territoriale, NTIC et sémiologie graphique »

**Eckert Denis**

**CNRS - Centre Interdisciplinaire d'Etudes Urbaines - UMR 5053 (Toulouse)**

**Mangolte Frédéric**

**Université de Savoie - Laboratoire de Mathématiques (Le Bourget du Lac)**

**Rapport de recherche**

29 mars 2002

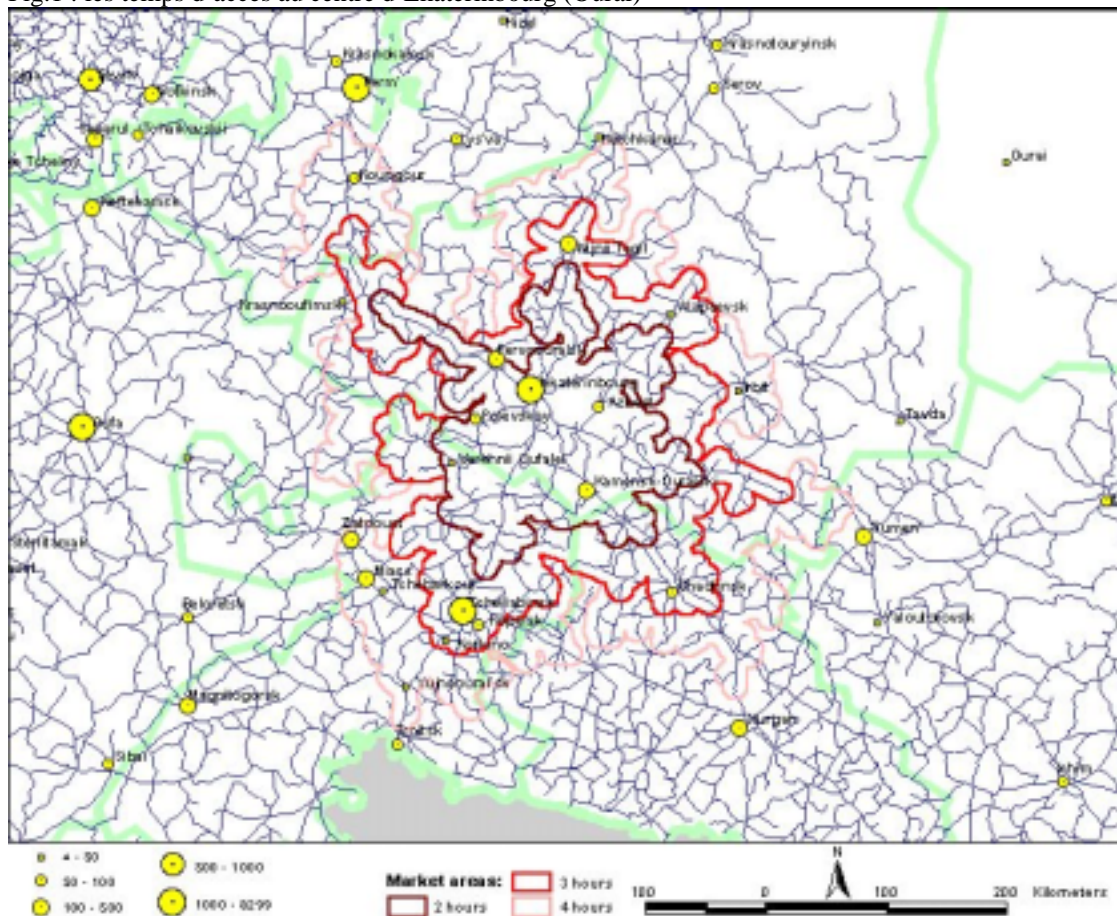
### ***Des métriques pour le Monde :***

#### ***Cartographier les temps de déplacement entre lieux***

#### **1. Un problème général**

L'aboutissement de la représentation scientifique de l'espace géographique est pour l'instant la carte euclidienne en deux dimensions. Or nous aimerions montrer que cette cartographie, si elle est la représentation géographique la plus populaire, la plus répandue et aussi la mieux comprise, est un cas particulier de représentation de l'espace, où les positions relatives des points portent une information restreinte et expriment, aujourd'hui moins qu'autrefois, leur position dans le monde. L'argumentation essentielle est que l'espace géographique est structuré par des nombreuses mesures d'écartement et par quantité de relations entre les lieux, plus peut-être que par les positions relatives des lieux dans l'espace physique. On peut citer les flux monétaires, les temps d'accès entre lieux, jusqu'aux coûts de déplacement. Autant d'éléments pertinents qui concourent à déterminer la position d'un lieu dans l'espace géographique contemporain. Les solutions habituellement retenues permettent en général d'« exprimer » l'effet de ces distances dans l'espace cartographique usuel (carte d'accessibilité par exemple) tout en ne résolvant pas les limitations de ce mode de représentation.

Fig.1 : les temps d'accès au centre d'Ekaterinbourg (Oural)



© Hy Dao, Université de Genève, 2000, Programme INTAS 96-0069 (coord. D. Eckert)

**Ekaterinbourg : une solution classique de représentation des temps de déplacement** : on mesure les temps de transport par route à partir d'un lieu unique, et on dessine des aires. Le fond cartographique traditionnel est conservé : la *variable visuelle efficace* reste la distance euclidienne.

## 2. Les objectifs du travail

A partir de ce constat général, partagé par de nombreux auteurs et qui est à l'origine du programme CartoGram, (voir Manifeste), on a décidé de travailler spécifiquement sur les durées de déplacement. La question des durées de déplacement de lieu à lieu est en effet perçue comme une question-clé de la recomposition de l'espace géographique, au cœur en particulier des débats d'aménagement sur l'enclavement des territoires. La représentation cartographique de ces phénomènes a été tentée sous divers angles, mais on peine à en trouver une expression adéquate.

L'objectif est ici de proposer une méthode de représentation rigoureuse des temps de déplacement entre lieux, afin de construire des cartes restituant la position des lieux, cartes affranchies de la contrainte de la distance usuelle.

Nous adoptons ici, pour la clarté du propos une **définition restrictive de la carte**. Sera appelée **carte** toute expression géométrique de l'organisation de l'espace géographique où la position relative de tous les lieux est déterminée selon un procédé rigoureux (projections) permettant d'en inférer des mesures (angles, aires, distances). Nous excluons donc de notre propos les **figures géographiques** assimilées comme les cartes mentales, les croquis, les modèles, les anamorphoses. Ces figures, dont la pertinence n'est pas mise en doute ici, relèvent de principes de construction autres et n'ont pas les propriétés essentielles de la carte.

### 3. Méthodes

Ce travail a reposé sur l'association entre un géographe praticien de la cartographie (D. Eckert) et un mathématicien sensible aux problèmes de formalisation géométrique (F. Mangolte). On a donc mobilisé les ressources théoriques des deux disciplines, pour mesurer les problèmes de construction d'une cartographie innovante s'écartant fondamentalement des principes de représentation usuels.

Du côté mathématique, outre les concepts géométriques mobilisés (autour de la notion de distance), on a utilisé les ressources du logiciel de calcul formel *Maple* pour construire des figures cartographiques à partir de données brutes de déplacement.

Les ressources géographiques utilisées sont : les serveurs de temps de transport et de calcul d'itinéraire, en général disponibles sur le Web ([www.mappy.com](http://www.mappy.com), les serveurs d'horaires aériens comme [www.lastminute.com](http://www.lastminute.com), Die Bahn [www.bahn.de](http://www.bahn.de), SNCF [www.sncf.com](http://www.sncf.com)), le SIG *MapInfo* couplé à la base de données cartographiques *Bartholomew* sur l'Europe, le tout permettant de produire des temps de transport et des matrices de distances entre lieux.

### 4. La construction d'une distance mathématique géographiquement pertinente

Nous nous intéressons à la durée de déplacement entre lieux, considérée comme une mesure d'*écartement* (Dumolard 1999) aussi pertinente que la distance kilométrique. Il s'agit de transformer cet écartement en véritable distance mathématique, afin de pouvoir construire à partir de cette variable un espace métrique. La variable choisie doit pouvoir respecter les propriétés classiques de la distance, soit pour trois points a, b et c :

1.  $d(a,b) = d(b,a)$  symétrie
2.  $d(a,b) \geq 0$  non négativité
3.  $d(a,b) \leq d(a,c) + d(b,c)$  inégalité triangulaire
4.  $d(a,b) = 0 \Rightarrow a=b$  identité si distance nulle

La plus difficile à respecter est l'inégalité triangulaire. On peut affirmer ainsi que l'espace des coûts téléphoniques, bien que parfaitement définissable, n'est pas un espace métrique.

Nous définissons à la suite notamment de Muller (1979, 1982) une distance particulière fondée sur la prise en compte des meilleurs temps de trajet entre lieux, :

**Définition :** *La Distance-Durée (DD) correspond à la durée d'un aller-retour « moyen » (divisée par deux) entre deux points par le moyen raisonnable le plus rapide*

Exemple : la moyenne des temps de parcours AR sur l'ensemble des lundis ouvrables d'une année.

Nous savons :

- qu'elle est pertinente dans la pratique géographique
- qu'elle est toujours définie, où que l'on soit à la surface du globe
- qu'elle respecte, par construction, les propriétés d'une distance mathématique<sup>1</sup>

Cette distance est tributaire des conditions économiques et techniques d'une époque donnée –l'accessibilité d'un lieu est évidemment variable dans le temps-, contrairement à la distance usuelle entre les lieux, qui elle est invariante.

---

<sup>1</sup> Muller (1979) : « Certaines surfaces « invisibles », telle que la surface-temps, pourront se « métriser », ou devenir semi-métriques, selon les modifications introduites dans la définition de distance. Par exemple, pour métriser l'espace-temps il suffit de symétriser pq tel que  $pq = (pq + qp) / 2$ , et de réduire l'inégalité triangulaire  $pq + qr < pr$  en redéfinissant la distance  $pr = pq + qr$  (le temps de parcours entre pa et r est égal au temps requis minimum pour aller de p à r, quitte à emprunter le détour  $pq + qr$ ) »

## 5. L'espace des Distances-Durées (DD)

L'espace-durée ainsi défini mathématiquement est un espace métrique, mais on ne sait pas à quoi il ressemble.

Dans les cartes usuelles (où dans les systèmes d'information géographique de toutes échelles), les lieux sont représentés à partir de leur position sur le globe, puis on utilise une formule de calcul (sphérique dans le cas des SIG, euclidienne pour la plupart des cartes d'échelle réduite) pour en inférer les distances. Mais la sphère – ou sa projection, le plan – est donnée *a priori*.

Le cas de l'espace-durée est assez différent : on ne connaît pas *a priori* la position d'un lieu, ses coordonnées ne sont pas connues. Il faut calculer une à une les distances-durées par rapport aux autres lieux pour voir émerger progressivement sa position. Et ceci est à répéter pour chaque point pris en compte. La forme globale de la Terre dans l'espace-durée n'est pas donnée. On en est à fabriquer –*métaphoriquement*- de la géodésie sur un objet inconnu. Cela revient à mobiliser les ressources d'une énorme matrice de données qui décrit la Terre, sans qu'on ait accès à la première idée de sa forme. On peut produire des données de DD sans avoir a priori d'idée des configurations réelles qui se déploient dans cet espace.

## 6. Quelques caractéristiques des données de DD

- l'étendue des valeurs : acceptons l'hypothèse que l'on peut aller presque partout dans le Monde en 48 heures maximum. On voit vite que l'étendue des valeurs de DD possibles, dans l'espace géographique réel est relativement restreinte, ce qui correspond à l'idée d'un maillage de plus en plus serré du globe par des réseaux de transport (et notamment par l'accès rapide à des aéroports internationaux). Si l'on accepte l'idée qu'un déplacement minimal pouvant être pris en considération est d'un quart d'heure, on voit que l'étendue des valeurs possibles jusqu'à une DD de 48 h (supposée maximale) varie de 1 à 200, ce qui est peu comparé à l'étendue des trajets kilométriques correspondants (jusqu'à 20 000 km)

- la dimension : la dimension de l'espace construit est une fonction linéaire du nombre de lieux pris en compte. « On aura besoin d'un espace à trois dimensions pour représenter, à l'échelle, les distances entre quatre points (le quatrième point se situant à l'intersection des sphères concentrées sur trois points). En général, n-1 dimensions sont nécessaires pour représenter les distances entre n points » (Muller 1979, voir fig. 2). Ceci évidemment est lourd de conséquences pour la représentation graphique et cartographique, puisqu'à partir d'un nombre de lieux très faible on bascule dans l'irreprésentable. La richesse des données de DD, relativement faciles à mobiliser aujourd'hui du fait de l'apparition des applications de calcul d'itinéraire et de temps de trajet, permet de construire des matrices étoffées de temps de trajets entre lieux. Mais il n'y a pas d'écho de ce progrès dans l'accès aux données du côté de la représentation.

Fig. 2 : lieux, dimensions, DD

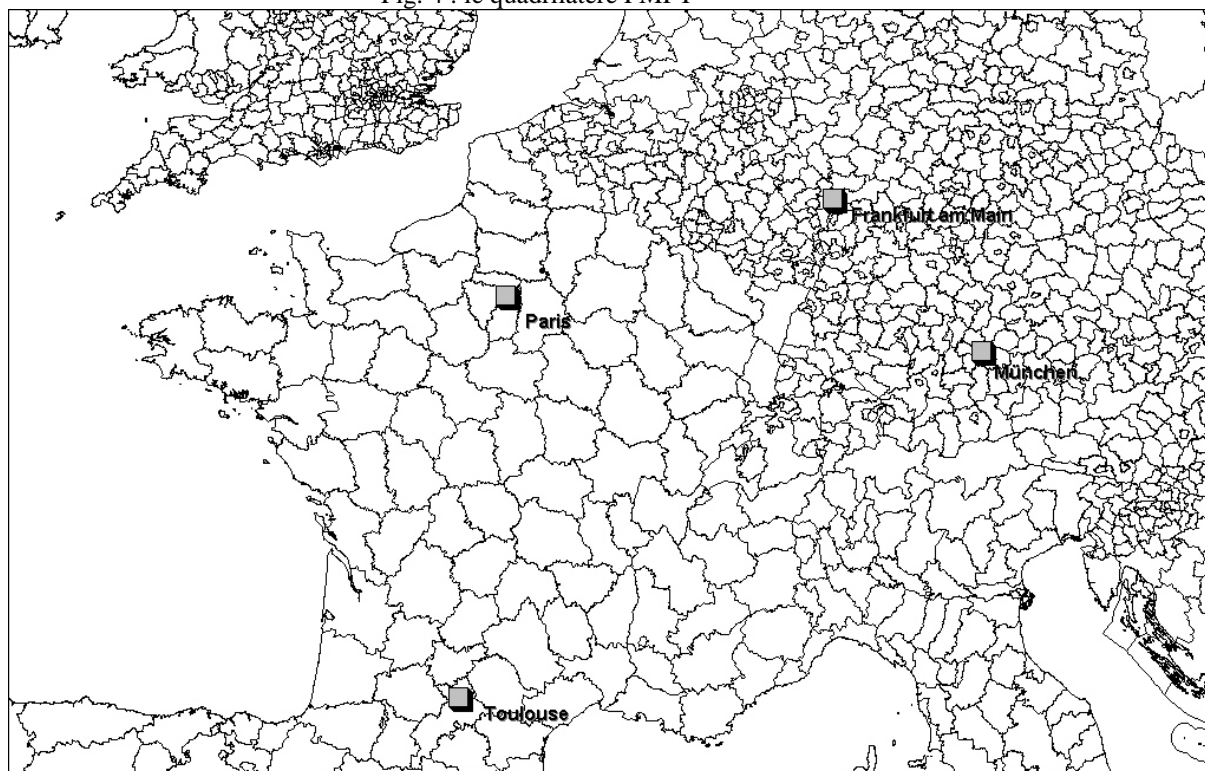
Nombre de lieux	Dimension	Nombre de DD à calculer
1	0	0
2	1	1
3	2	3
4	3	6
5	4	10
6	5	15
7	6	21
8	7	28
9	8	36
10	9	45
...	...	...
20	19	190
...	...	...
1000	999	499500
1001	1000	500500

- Le calcul pratique des DD : pour calculer dans la pratique des Distances-Durées, on doit combiner les différents modes de déplacement. Comme la définition des DD fait uniquement appel au meilleur temps de déplacement possible, tous modes confondus, il faut donc accepter l'idée de combinaisons de modes de transport, et fouiller dans les sources pour trouver la solution la plus courte (voiture plus avion, train plus avion, etc.). Dans le cas de villes éloignées dont les DD sont calculées sur la base des trajets aériens, le calcul est relativement rapide (Fig. 3)

Fig. 3 ; données FMPT

durée (mn), avion=+80mn		München	Frankfurt	Paris	Toulouse
München	aéroport	0	145	175	195
Frankfurt	aéroport		0	150	205
Paris	aéroport			0	160
Toulouse	aéroport				0

Fig. 4 : le quadrilatère FMPT



© D. Eckert, F. Mangolte, 2002

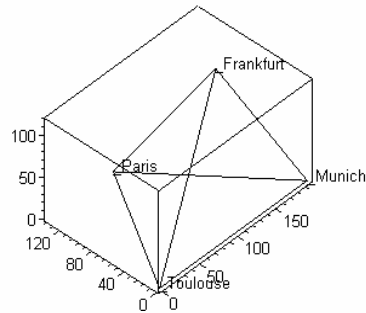
### Le traitement usuel de la question

Une des approches pourrait être la tentative de déformer l'espace cartographique usuel pour mieux restituer les proximités en durée des quatre villes, cet espace usuel restant le référentiel implicite : d'où les différents essais qui se sont succédés au fil du temps (C. Cauvin, J.-C. Muller). D'ailleurs, la plupart du temps, les anamorphoses sont centrées en un lieu, et représentent les temps d'accès à ce lieu « central ».

### Le parti-pris présent

Cherchant à construire une carte à partir de la distance-durée à l'aide d'un programme de calcul, on crée des tétraèdres à partir des matrices de DD entre nos quatre villes.

Fig. 5 : la carte des DD entre Frankfurt am Main, München, Paris, Toulouse  
Durées (en mn) de transport le plus court (non symétrisés) par Air France (horaires été 2001) ou Lufthansa (horaires hiver 2000-2001).



© D. Eckert, F. Mangolte, 2002

On affirme, d'après les contraintes que nous nous sommes données, que la représentation ci-dessus est une carte au plein sens du terme. Sous *Maple*, la figure peut être orientée à volonté, permettant de multiplier les points de vue.

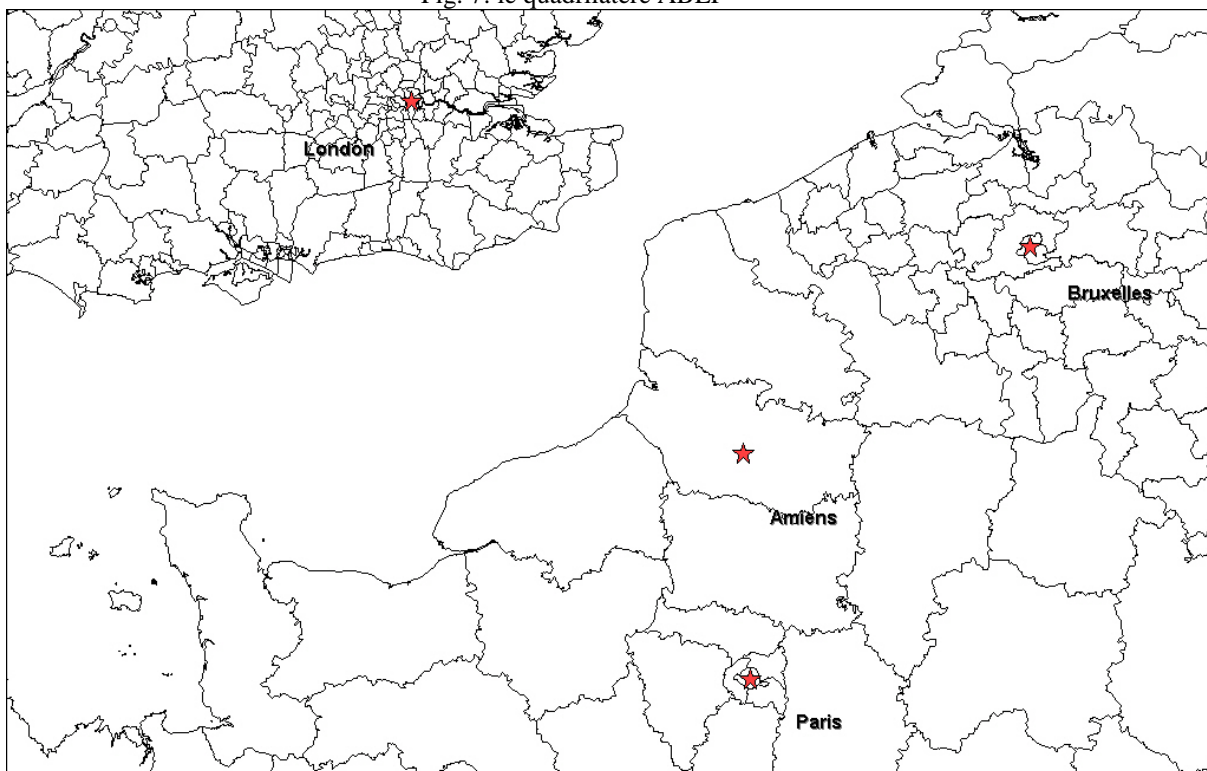
## 7. Quelques autres résultats et leur expression cartographique

### 7.1 Amiens, Bruxelles, Londres, Paris

Fig. 6 : Données ABLP

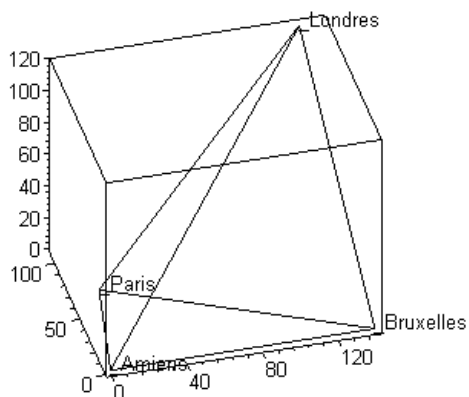
	Amiens	Bruxelles	Londres	Paris
Amiens	0	230	270	134
Bruxelles		0	313	305
Londres			0	170
Paris				0

Fig. 7: le quadrilatère ABLP



© D. Eckert, F. Mangolte, 2002

Fig. 8 : la carte des DD entre Amiens, Bruxelles, Londres, Paris  
Durées (en mn) de transport le plus court (non symétrisés) par Air France et SNCF et route (lundi 4 février 2002).



© D. Eckert, F. Mangolte, 2002

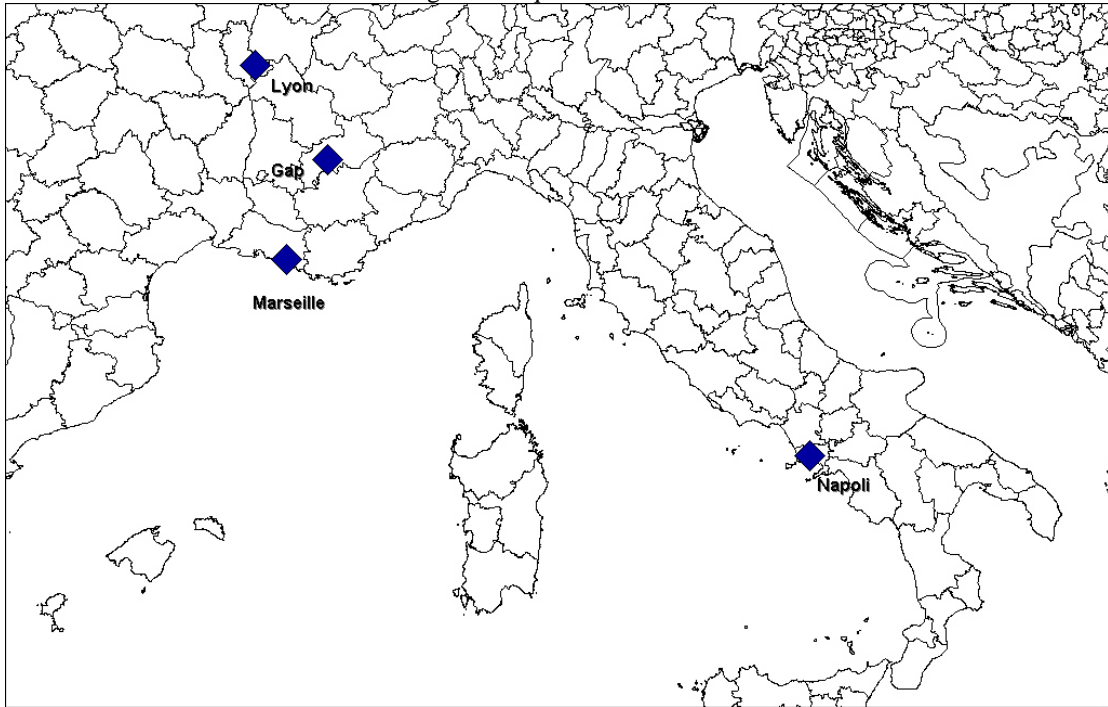
## 7.2. Gap, Lyon, Marseille, Napoli

fig. 9 : données GLMN

distance durée (mn), avion=+80mn

Lieu		Gap	Lyon	Marseille	Napoli
Gap		0	185	110	285
Lyon			0	105	200
Marseille				0	175
Napoli					0

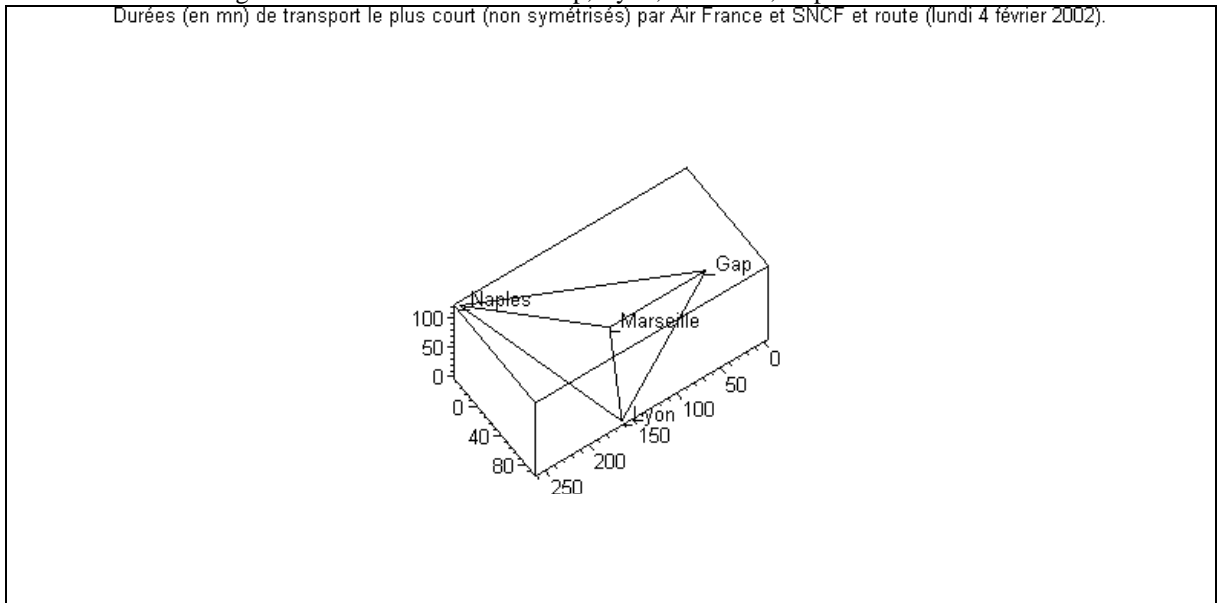
Fig. 10 : le quadrilatère GLMN



© D. Eckert, F. Mangolte, 2002

Fig. 11 : la carte des DD entre Gap, Lyon, Marseille, Napoli

Durées (en mn) de transport le plus court (non symétrisés) par Air France et SNCF et route (lundi 4 février 2002).



© D. Eckert, F. Mangolte, 2002



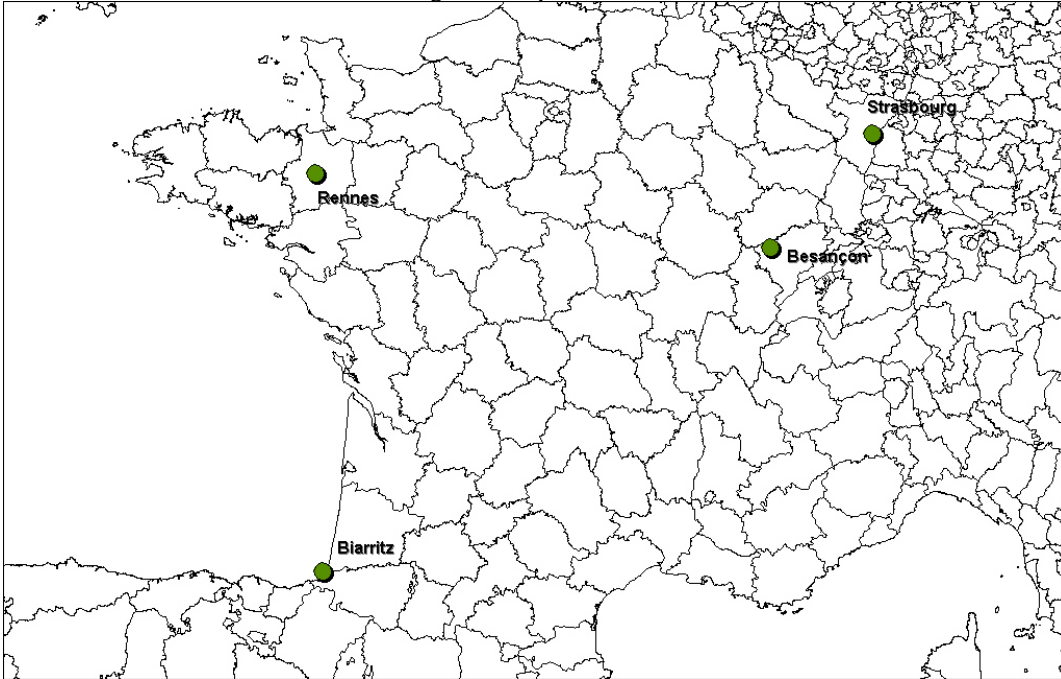
## 7.2. Besançon, Biarritz, Rennes, Strasbourg

Fig.12: données BBRS

distance-durée tous modes avec transfert ( 80 mn)

	Rennes	Besançon	Strasbourg	Biarritz
Rennes	0	275	185	250
Besançon		0	139	335
Strasbourg			0	255
Biarritz				0

Fig. 13 : le quadrilatère BBRS

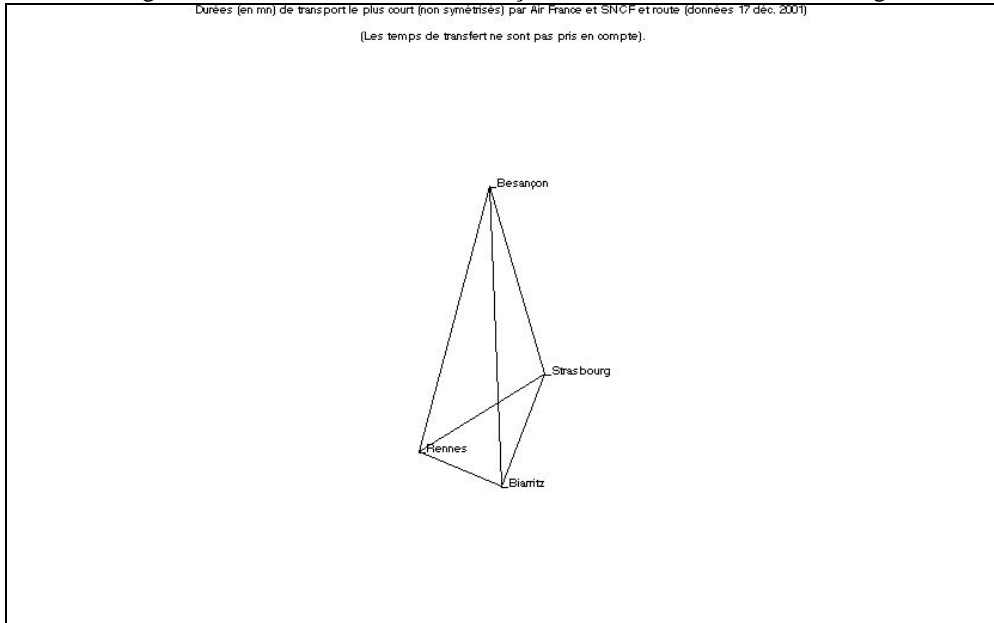


© D. Eckert, F. Mangolte, 2002

Fig. 14 : la carte des DD entre Besançon, Biarritz, Rennes et Strasbourg

Durées (en mn) de transport le plus court (non symétriques) par Air France et SNCF et route (données 17 déc. 2001)

(Les temps de transfert ne sont pas pris en compte).



© D. Eckert, F. Mangolte, 2002

## 8. Discussion

### 8.1. Les limites de la représentation

Les limites de ce type de représentation sont flagrants : pauvreté obligée du nombre de lieux représentés, difficulté à interpréter les structures que l'on visualise. On pourrait imaginer un atlas informatique, dont chaque carte serait une représentation des DD de 4 villes. Autant de briques qui permettraient de cartographier l'espace géographique vu à travers la distance-durée.

Mais on tombe assez vite sur des problèmes, même en se confinant à 3D, donc à quatre villes repérées par 6 DD: les tétraèdres construits sont représentés dans un espace euclidien (3D virtuel) ; or il apparaît que la DD, si elle est rigoureusement une distance mathématique, n'est pas *a priori* euclidienne. Donc, dès que l'on cherche à représenter des tétraèdres correspondant à des DD mesurées, on arrive à des figures non-représentables dans l'espace euclidien.

Dans les cas de figure utilisés, on s'est aperçu qu'une légère correction (de moins de 10%) opérée sur les DD suffisait en général à rendre les figures euclidiennes. Mais on n'a pas d'argument pour savoir si ce genre de correction marginale est toujours pertinente. Les exemples précédents ont été réalisés avec des corrections de ce type.

### 8.2. L'impossible exhaustivité de la mesure

On voit assez simplement que, dès que l'on accroît le nombre de lieux pris en considération, le nombre de DD à intégrer dans la matrice croît exponentiellement (Fig. 2). On en est conduit à proposer un échantillonnage de l'espace géographique, si l'on se fixe comme objectif la couverture d'un territoire donné. Quel échantillon de lieux choisir ? Selon quels principes ? S'agira-t-il par exemple d'un ensemble d'agglomérations ayant une population supérieure à un seuil donné ? Ou va-t-on chercher un maillage régulier de l'espace, en créant une grille de points avec un pas donné ?

Etant donné le volume de données à collecter, il faudrait imaginer, pour établir les DD de mille villes (à l'échelle de la grande Europe, par exemple), la création d'un système d'observation géré par un organisme d'étude public. Mesurer l'évolution des DD sur le territoire français pourrait relever des missions de l'IGN au même titre que le suivi de la BDTopo... on peut rêver un peu. Ce genre de travail est par contre hors de portée d'équipes de recherche.

### 8.3. L'interprétation des configurations

Dans pas mal de cas, on est gêné pour interpréter les structures révélées par la cartographie des DD. Il y a donc un problème de lisibilité des structures. L'analogie avec la carte usuelle est d'ailleurs trompeuse : sur les cartes de DD, les arcs entre les points n'ont pas la même signification qu'un trait sur une carte : en s'arrêtant à mi-chemin sur l'un de ces arcs, on est dans l'incapacité de dire « où » l'on est par rapport aux autres lieux. Il n'y a pas d'interprétation de cette position.

## Conclusion

On peut imaginer plusieurs développements possibles de cette recherche.

-La première direction est, en prenant des ensembles de données de DD non-représentables (du fait de leur dimension), de chercher à les rendre représentables, au prix d'un travail de « projection » des données dans un espace visualisable, en 2 ou 3D. Ces procédures restent à définir et éventuellement à valider : rien ne dit qu'on puisse construire des procédures pertinentes.

-La deuxième direction serait d'abandonner toute prétention à la représentation visuelle, de construire de objets géométriques correspondant à la structure des matrices de DD, et de se donner les outils d'analyse des configurations qui se déploient dans l'espace des DD. On passe alors à une dimension définitivement abstraite de la cartographie. Le paradoxe d'une cartographie sans représentation. Mais peut-être que l'arrangement des bouquets de lieux dans cet espace abstrait a un sens, peut-être voit-on émerger des configurations répétitives ? La question reste ouverte, et on souhaite pouvoir y travailler.

### **Bibliographie sélective**

Beguin, H. and Thisse, J.-F. (1979), « An axiomatic approach to geographical space », *Geographical Analysis*, 11 : p. 325-341.

Cauvin C. (1998), « Des transformations cartographiques », *Mappemonde*, n°49 p. 12-15.

Dumolard P. (1999), « Accessibilité et diffusion spatiale », *L'Espace géographique*, t. 28 n°3, p. 205-214.

Muller J.-C. (1982), « Non euclidean geographic spaces : mapping functional distances ». *Geographical Analysis*, n°3, p. 189-203.

Muller J.-C. (1979). « La cartographie d'une métrique non-euclidienne : les distances-temps », (16 fig.) *L'Espace géographique*, T. VIII, n°3, p. 215-227.

Ollivro J. (2000), *L'homme à toutes vitesses, De la lenteur homogène à la rapidité différenciée*. Rennes : Presses Universitaires de Rennes, 184 p.