



**HAL**  
open science

## **Densités urbaines, bâtis et populations. Modèles spatiaux, images satellites et représentations.**

Colette Cauvin, Anne-Christine Bronner, Jacky Hirsch, Benjamin Kostrubiec, Michel Pruvot, Henri Reymond, Rosine Schlumberger, Charles Schneider, Abdelaziz Serradj, Christiane Weber

### ► To cite this version:

Colette Cauvin, Anne-Christine Bronner, Jacky Hirsch, Benjamin Kostrubiec, Michel Pruvot, et al.. Densités urbaines, bâtis et populations. Modèles spatiaux, images satellites et représentations.. Convention N°93N84/0022 (programme Densité PIR-Villes), CNRS; PIR-Villes. 1997. <hal-05184595>

**HAL Id: hal-05184595**

**<https://hal.science/hal-05184595v1>**

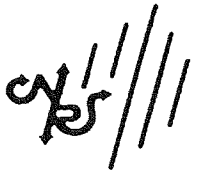
Submitted on 24 Jul 2025

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.



HAL Authorization



**DENSITÉS URBAINES**

**BÂTIS ET POPULATIONS**

**MODÈLES SPATIAUX, IMAGES SATELLITES ET  
REPRÉSENTATIONS**

**RAPPORT DE RECHERCHE "PARTIEL"**

**PROGRAMME "DENSITÉS" - PIR-VILLES**

Responsable scientifique

**C. CAUVIN**

Participants

**A.C. BRONNER - J. HIRSCH - B. KOSTRUBIEC - M. PRUVOT - H. REYMOND  
R. SCHLUMBERGER - C. SCHNEIDER - A. SERRADI - C. WEBER**



**DENSITÉS URBAINES**

**BÂTIS ET POPULATIONS**

**MODÈLES SPATIAUX, IMAGES SATELLITES ET REPRÉSENTATIONS**

RAPPORT DE RECHERCHE "PARTIEL"

**PROGRAMME "DENSITÉS" - PIR-VILLES**  
**CONVENTION N° 93N84/0022**

Responsable scientifique

**C. CAUVIN**

Participants

A.C. BRONNER - J. HIRSCH - B. KOSTRUBIEC - M. PRUVOT - H. REYMOND  
R. SCHLUMBERGER - C. SCHNEIDER - A. SERRADJ - C. WEBER

**Strasbourg**  
**Décembre 1997**







## Convention de recherche N° 93N84/0022

### DESCRIPTION

---

☛ **Intitulé de la recherche**

Intitulé initial

"Réévaluation transdisciplinaire d'un concept multiforme : les densités urbaines"

Intitulé retenu

*"Densités urbaines, bâtis et populations.  
Modèles spatiaux, images satellites et représentations".*

☛ **Période**

10/93 - 10/96 avec une demande de délai. Remise prévue du rapport : premier semestre 1996.

☛ **Nom de l'équipe de recherche**

URA 902 du CNRS - Dynamique des espaces géographiques : processus, cartographie, image, devenu Image et Ville en janvier 1995.

Nouvelle dénomination depuis janvier 1997, dans le cadre de la contractualisation des Universités.

UPRES-A 7011, Image et Ville

*Directeur : Richard KLEINSCHMAGER, professeur.*

☛ **Nom du responsable scientifique du projet**

Colette CAUVIN, professeur.

☛ **Membres de l'unité participant au programme**

Bronner A.C., doctorante

Hirsch J., ingénieur de recherche CNRS

Kostrubiec B., professeur

Pruvot M., maître de conférences

Reymond H., professeur honoraire

Schlumberger R., contractuelle université

Schneider C., chercheur CNRS

Serradj A., maître de conférences

Weber C., chercheur CNRS

Gaugler K., étudiante en DEA

Haniotou H., post-doc.

☛ **Discipline concernée**

Géographie



## RÉSUMÉ

---

Ce rapport final partiel, sur les densités urbaines, a été effectué dans le cadre du programme "densité" du Pir-Villes. Après une réflexion sur le concept de densité et les termes apparentés, les auteurs inventorient les sources d'information disponibles pour la construction d'un indice densitaire et soulignent leurs déficiences. L'apport de la télédétection est envisagé pour compenser l'absence de données, pour les surfaces bâties en particulier, mais il est évident que les possibilités offertes, malgré la richesse des images satellites, demeurent insuffisantes. Les propositions de classification des modèles et le renouvellement de ces derniers sont intéressantes mais ne peuvent être exploitées complètement, en raison de la pauvreté des données accessibles. Cette limite se retrouve au niveau des représentations cartographiques qu'elles soient considérées comme des illustrations ou comme des outils d'analyse des surfaces densitaires, malgré l'éventail des procédés proposés et testés.

### **Mots-clefs**

Analyse fréquentielle, analyse spectrale, bâti urbain, carroyage, carte piézoplèthe, cartographie, cartographie transformationnelle, densités urbaines, image satellite, modélisation, régression bidimensionnelle, Strasbourg, surface de tendance, télédétection



# TABLE DES MATIÈRES

---

CONVENTION DE RECHERCHE : DESCRIPTION

CONVENTION DE RECHERCHE : RÉSUMÉ

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS

INTRODUCTION

*C. Cauvin, H. Reymond*

## □ 1. LE CONCEPT DE DENSITÉ ET SON ÉVALUATION

1.1 Le concept de densité et son expression

*C. Cauvin*

1.2 Des sources de connaissance pour une appréhension des densités  
Statistiques officielles et cartographie : des données insuffisantes

*C. Cauvin*

1.3 Images satellites et densités urbaines

*C. Cauvin, J. Hirsch, C. Weber*

## □ 2. DENSITÉS URBAINES ET MODÉLISATION

2.1 Une approche graphique de la modélisation densitaire

*C. Cauvin  
C. Weber, J. Hirsch, A. Serradj  
avec la collaboration d' A.C. Bronner*

2.2 Description des répartitions densitaires à l'aide de modèles rotatoires

*B. Kostrubiec*

2.3 Un prolongement des modèles de Clark et Newling  
Première approche et premiers tests

*M. Pruvot*

### □ 3. SURFACES DENSITAIRES : REPRÉSENTATIONS ET ANALYSES

#### 3.1 Représentations cartographiques usuelles des densités : inventaire critique

*C. Cauvin  
avec la collaboration d' A.C. Bronner*

#### 3.2 Propositions pour une meilleure comparabilité : des transformations cartographiques

*C. Cauvin  
avec la collaboration d' A.C. Bronner et J. Hirsch*

#### 3.3 Méthodes de filtrages et surfaces densitaires

331 Surfaces densitaires et surfaces de tendance *C. Cauvin*

332 Analyse fréquentielle des surfaces densitaires

3321 Représentations spatio-fréquentielle d'une surface de densités urbaines  
*C. Schneider*

3322 Filtrage spatial et densités intra-urbaines. Le cas de l'agglomération  
strasbourgeoise *C. Cauvin, H. Reymond, C. Schneider*

CONCLUSION

*C. Cauvin*

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

## AVANT-PROPOS

---

*Colette CAUVIN*

La réponse du laboratoire Image et Ville, alors URA 902 du CNRS, à l'appel d'offre du Pir-Villes sur les densités, a été acceptée en octobre 1993, pour une durée de deux ans. Le projet sur lequel l'équipe a travaillé s'intitule

*"Densités urbaines, bâtis et populations.  
Modèles spatiaux, images satellites et représentations".*

Un rapport intermédiaire, remis en mai 1994, avait souligné les problèmes graves auxquels nous étions confrontés, et qui imposaient un report de un an à la rédaction du rapport final. En effet, la suppression du Centre de Calcul du CNRS à Strasbourg-Cronembourg a impliqué une adaptation, ou, dans certains cas, une réécriture complète des programmes auxquels nous faisons appel régulièrement, et, ceci, avant même de pouvoir commencer à développer de nouvelles méthodes avec leur programmation associée, en relation avec le projet annoncé.

Par ailleurs, la Commission Nationale Informatique et Liberté (CNIL) ne nous permettait pas de travailler, comme nous le désirions, au niveau le plus fin disponible en milieu urbain, à savoir l'îlot ; ce qui remettait partiellement en question le programme envisagé.

*Le délai souhaité a été accordé et le rapport était prévu pour le premier semestre 1996.*

Or, en décembre 1995, alors que les différentes directions du projet étaient bien engagées, le CNRS a amputé nos crédits de plus du tiers du montant accordé, comme cela a été le cas pour la plupart des équipes participant à cet appel d'offre. De ce fait, il ne nous était plus possible de continuer cette recherche relativement importante dans des conditions correctes. En particulier, les aspects graphiques et cartographiques prenant une large part dans ce programme, il était indispensable de disposer d'une personne s'y consacrant totalement. La contraction budgétaire brutale a empêché toute l'aide prévue de "non-permanents", puisque l'équipe ne dispose d'aucun ingénieur-cartographe depuis le départ de Monsieur A. Maurer, ingénieur d'Etudes, malgré des demandes réitérées auprès du CNRS. Le travail a donc été arrêté au stade où il était à cette époque, dans l'attente d'une évolution de la situation.

Aussi, remettons-nous actuellement un rapport de recherche inachevé, exprimant cet état de fait devant lequel nous nous sommes trouvés. Il s'agit, à notre grand regret, d'un travail tronqué, dont une grande partie des traitements ne peut ni être exploitée, ni surtout présentée, pour des raisons uniquement financières.

En tant que responsable scientifique de ce projet, je déplore cette situation, et regrette de n'avoir pas pu mener à bien, pour des motifs sur lesquels nous n'avions aucun pouvoir, une recherche dans laquelle nous nous étions fortement investis et qui nous paraissait importante, tant sur le plan de la recherche fondamentale qu'à un niveau plus opérationnel.

Cependant, je tiens à remercier toutes les personnes qui se sont impliquées, à des degrés divers, dans ce programme, quelle que soit la période où elles sont intervenues. L'aide intelligente et innovante de Anne Christine Bronner a été plus qu'appréciable pour tout ce qui concerne les représentations graphiques et cartographiques qu'elle n'a pu malheureusement achever elle-même, ayant de nouvelles obligations. L'aptitude souriante de Hélène Haniotou à reprendre un travail en cours, et réaliser des documents images soignés, a permis, avec l'aide ponctuelle de Isabelle Reymann et de Jérôme Marlier, de mener à bien la présentation graphique de ce rapport. Enfin, on ne saurait passer sous silence la contribution permanente de Rosine Schlumberger à toutes les étapes d'élaboration du texte : frappe, correction, mise en page, bibliographie ; sans son activité courageuse et patiente, aucun rapport n'aurait pu être adressé au Pir-Villes. Quant à notre "agent de liaison", Estelle Baehrel, il faut encore une fois souligner l'importance de son rôle pour la coordination générale. Enfin, la qualité de la reproduction des documents, grâce à Odile Opérial, est toujours aussi appréciée.

Merci à tous, en espérant qu'il sera désormais possible de travailler dans des conditions mieux adaptées à une véritable recherche quel que soit le projet engagé.

## INTRODUCTION

---

*Colette CAUVIN, Henri REYMOND*

*“Il existe dans la plupart des grandes villes des réserves de densification qui évitent de devoir construire de la centralité dans les champs de betteraves.”*

*(Levy, 1991 )*

Une évaluation de la valeur du concept de densité et de sa pertinence pour la planification ou l'aménagement pose actuellement de nombreux problèmes, sa mesure également. Une définition uniquement morphologique<sup>1</sup> de la ville ne correspond plus, on le sait, exactement à ce qui limite le phénomène urbain : “à quel moment la ville nous fait-elle face ?”. “Où commence donc la ville sans porte ?” (Virilio, 1984) ; ceci rend plus difficile, mais non pas impossible, l'utilisation de modèles du type de celui de B. Newling (1966, 1969) qui impliquent la fixation d'une densité périphérique d'agglomération. Une vision qui avalise celle de P. Virilio d'une manière plus opérationnelle nous permet cependant de prendre en compte et l'urbanisation concentrée même dans son étalement et ce qui semble être le début d'une “désurbanisation” actuelle : il s'agit du concept “d'urbanité généralisée” (Levy, 1991). Ce concept, ayant l'avantage d'inclure centralité et urbanité, ne rejette pas le phénomène d'agglomération mais l'intègre dans l'évolution actuelle ; une échelle inclusion centrale/accessibilité périphérique définit “l'urbanité” vécue “intérieurement” dans la diversité immédiate du centre et “extérieurement” selon sa plus ou moins bonne accessibilité ; ceci ne nous éloigne pas trop des modèles connus et manipulables d'utilisation du sol, d'autant plus que J. Levy souligne que les télécommunications renforcent les rôles des centres en rendant plus transparente la mise en contact et en insinuant la hiérarchie urbaine jusqu'aux périphéries les plus reculées.

---

<sup>1</sup> La morphologie, si elle n'est plus la limite évidente qui “nous fait face” en bordant un système d'habitat, reste, cependant, un élément essentiel à prendre en compte dans l'étude de la répartition densitaire, des ruptures, des recouvrements, des archipels, des actuels champs urbains ; cela plus particulièrement en télédétection.

Les réflexions de W. CHRISTALLER, A. Loesch, B.J.L. Berry, etc., sont donc à reformuler, mais non à rejeter ; il "faut concilier l'échelle d'urbanité avec celle de la centralité" et se représenter qu'*une délocalisation centre-banlieue peut être l'équivalent de celle d'une grande ville à une ville plus petite.*

Nous acceptons l'idée de cette double échelle, jointe à celle que la centralité intra-urbaine ne correspond pas forcément à une organisation à géométrie centrale ; nous prendrons comme cadre opérationnel l'ensemble théorique "urbanité-centralité". Il est constitué en continuum (que nous serons peut-être amenés à filtrer pour l'analyse avant de le restituer en une synthèse "imagée" au sens propre, c'est-à-dire cartographique) selon les catégories indiquées : central, suburbain, périurbain, infra-urbain, ..., et si nécessaire para-urbain. Le passage de l'une à l'autre s'effectue-t-il en des indentations et des recouvrements de zones floues ou selon des discontinuités brutales, des cassures qui soulignent la transition ? C'est ce qui a constitué, à l'aide de plusieurs expressions de la densité, notre investigation initiale, puisque le phénomène étudié comprend le concentré de l'agglomération et le diffus à densités irrégulières du sprawl et de "l'outré sprawl", permettant d'étudier la réalité de la fusion et de la confusion de P. Virilio.

Ainsi trois approches complémentaires de la densité ont-elles été envisagées, tentant de répondre aux questions suivantes :

*Quels modèles spatiaux permettent le mieux de montrer les changements de densité ?  
Quelles données sont disponibles ? La télédétection offre-t-elle des informations nouvelles ?  
Quelles méthodes d'analyse et de représentation peuvent traduire la densification urbaine ?*

Un approfondissement a été mené au niveau du concept de densité et des données nécessaires à son étude en liant les informations statistiques, les possibilités offertes par la cartographie et surtout les apports de la télédétection. parallèlement, un inventaire des modèles existants a été entrepris en cherchant à en proposer une classification renouvelée, et à tester des ouvertures pour des modélisations nouvelles. Enfin, l'approche cartographique a été abordée, non tant dans une orientation "illustrative" que, surtout, dans le but d'analyser des surfaces densitaires et d'en faire apparaître les structures sous-jacentes explicatives.

*Malheureusement, aucune de ces directions n'est arrivée à son achèvement. La réflexion théorique encadrante est incomplète, et les résultats, selon les chapitres, n'ont pu être exposés que sous une "forme brute" et doivent être considérés comme des documents préliminaires. Ce rapport est le bilan d'une recherche interrompue et ne peut que faire l'objet d'un textetout à fait provisoire et non utilisable en l'état pour une publication scientifique.*

**1**

**LE CONCEPT DE DENSITÉ ET SON ÉVALUATION**



## Introduction

---

De H. Bleicher (1892) étudiant les densités à Francfort/Main à M. Batty (1994/95) analysant les structures densitaires à travers l'outil fractal, les densités urbaines ont fait l'objet d'une attention continue, soulignée par l'abondance des publications. Pourquoi un tel intérêt ? On peut noter en fait au moins deux familles de motivation. La première considère les densités pour elles-mêmes et vise à comprendre la répartition des populations dans la ville, à expliquer les irrégularités, à chercher les facteurs modificateurs, à modéliser aussi cette "donnée urbaine". Cette dernière tendance conduit à préciser la deuxième justification d'un intérêt pour ce sujet, à savoir comprendre et utiliser les densités, comme révélateur des contraintes urbaines, des populations - occupation insuffisante ou, au contraire, insupportable -, comme en matière de transports, ou des limites d'extension urbaine, par exemple.

Mais dans les deux cas, un premier problème apparaît : qu'entend-on en fait par densité ? Et, selon ce que recouvre ce concept, quelles sont les sources de données existantes permettant de l'appréhender concrètement dans une ville ? De plus, selon les sources et les transformations éventuellement introduites, les modèles retenus, on peut se demander si les représentations choisies conduisent aux mêmes conclusions, aboutissent à des résultats identiques.

En effet, une contrainte essentielle à conserver pour étude structurelle et diachronique des densités est celle de la *comparabilité des résultats*. Or, il est loin d'être certain que, selon la manière dont les informations sont collectées, dont les données sont construites, les résultats soient identiques ; l'analyse des surfaces, la construction des modèles risquent d'en être fortement affectées. Pour comprendre la répartition des populations à l'intérieur d'une ville, en fonction des terrains bâtis ou disponibles, pour étudier les densités associées, la question est ainsi de savoir s'il est possible de décomposer la ville, d'appréhender ses particularités à différents niveaux, et jusqu'à quel degré de finesse.

C'est dans cette optique que la première partie de ce rapport s'attache à un premier essai de compréhension du concept de densité et de sa mesure, tout en inventoriant les informations réellement disponibles, en particulier à des niveaux de résolution très fins, et en cherchant des sources de données pouvant offrir des compléments ou des palliatifs lorsque les documents existants s'avèrent insuffisants. Enfin, l'accent est particulièrement mis sur un point qui nous a paru fondamental, à savoir l'influence des sources de données.



## 1.1

### Le concept de densité urbaine et son expression

---

*Colette CAUVIN*

*Texte préliminaire*

Utilisé dans de multiples contextes, il est étonnant de voir à quel point le terme "densité" devient complexe lorsqu'on cherche à approfondir sa signification ou à lui trouver des synonymes. Les mots abondent, mais chacun conserve un sens très précis. Aussi devons-nous nous intéresser de plus près à la signification de la densité et des termes apparentés.

#### ■ 1.1.1 Le concept de densité

Afin d'y voir plus clair, partons du dictionnaire classique d'E. Littré (1974). Ce dernier indique que la densité est "la qualité de ce qui est dense". On en revient alors dans un premier temps à s'intéresser à cet adjectif, lié au mot densité.

Utilisé à partir de XIII - XIV<sup>e</sup> siècle, dense présente plusieurs origines, grecque, etc., et même hittite, mais dont les définitions convergent. "δασυς" signifie ainsi velu, touffu, épais, serré, compact, non clairsemé, dru, donc ce qui traduit une condensation, une concentration, termes que nous expliciterons par la suite. La question est alors de savoir ce qui est dense. Pour ce faire, nous allons revenir à des définitions de la densité, très courantes, appartenant à d'autres disciplines, en particulier celle de la chimie, concernant les gaz.

"La densité d'un gaz par rapport à l'air est le rapport de la masse d'un certain volume de gaz à la masse d'un égal volume d'air dans les mêmes conditions de température et de pression." (Le Maréchal, Soulié, 1992). On parle aussi de la densité de liquides, de solides, par rapport à l'eau, mais dans tous les cas, il s'agit toujours d'un rapport, entre des corps, entre des états, des matières. C'est cette "particularité" que l'on retrouve dans la définition utilisée en physique où la densité d'une substance S par rapport à l'eau, à une température T et sous une pression P, est le rapport de P à  $\rho_0$  où  $\rho_0$  est la masse volumique de l'eau à T et P. Le densité particulaire est elle aussi caractérisée par un rapport

$$n = \frac{dn}{dT} \quad \text{où } dn \text{ est le nombre de particules dans un petit volume } dT \text{ autour d'un point } M \text{ (Sarmant, 1978).}$$

La densité de courant, quant à elle, est le quotient de l'intensité du courant circulant dans un conducteur et de la surface de la section droite de ce dernier (Larousse, 1977).

Aussi est-il nécessaire de souligner, pour aller plus loin et comprendre le passage de la notion de densité en chimie ou en physique, à celle retenue dans des disciplines spatiales, telle la géographie, qu'une densité est avant tout un rapport entre deux quantités qui sont ou non de même nature : ainsi, un gaz par rapport à un autre gaz, un nombre de particules dans un volume donné. *Il existe donc deux composantes dans une densité qui, réunies sous une forme particulière, donnent un indice significatif pour une discipline donnée.*

Alors quelles définitions peut-on retenir pour une étude géographique, ou démographique, ou encore biologique ? D'après le dictionnaire des sciences humaines (1975), une "densité de population", dans ces domaines, "est une notion qui exprime le nombre d'individus d'une espèce par unité de surface dans le milieu naturellement occupé par cette espèce" <sup>1</sup>.

Dans les mots de la géographie (Brunet et al., 1992), la densité est considérée comme "le rapport d'un nombre d'objets à une surface définie". Le volume est devenu une surface, mais la notion de rapport est toujours présente, comme dans la définition que l'on trouve dans le dictionnaire de P. George (1970) ou Le Robert (1977). Ce serait donc là l'élément essentiel du concept de densité : *un rapport entre deux "composants" dont la nature pourrait varier*, ce qui implique, bien entendu, l'existence de multiples densités ; la densité est en fait un indice qui est un tout significatif en soi, mais qui est pourtant dissécable.

*La densité serait donc un rapport entre deux quantités où le qualificatif dense ne correspondrait qu'à une valeur élevée de ce rapport.*

Cependant, il faut noter que le mot densité est presque toujours associé à d'autres noms ou d'autres qualificatifs. Ceci se comprend très bien si l'on pense à la nécessité de deux composants pour définir une densité. Il faut donc préciser le type de densité selon ces deux composants.

On parle de "densité de population", de "densité de courant". Durkheim en 1893 utilise l'expression "densité sociale" pour rendre compte de l'extension et de l'intensification des relations entre les personnes, résultant de l'accroissement de la division du travail dans les sociétés contemporaines (Gresle et al., 1990). Cette notion d'intensification, d'intensité, associée à celle de densité, se retrouve dans les écrits de D. Pumain (Bailly et al., 1992, p. 440) "La densité de population est une mesure globale de l'intensité de l'occupation humaine. Elle mesure un rapport moyen entre une population et une surface et s'apparente à une mesure de rendement». Cette association entre une population et une surface est parfois caractérisée par un autre qualificatif. Ainsi, C. Tricot (Bailly et al., 1992) semble préférer le terme concentration.

On rejoint ici ce qui avait été indiqué précédemment, c'est-à-dire que de nombreux équivalents, divers synonymes, sont donnés au nom densité. Le mot de concentration se retrouve en chimie, où il exprime "le nombre de moles de l'espace, dissout rapporté au volume de la solution en litre" (Le Maréchal, Soulié, 1992), le "rapport entre la quantité d'un corps et sa solution" (Le Robert, 1979) ; "c'est également un rassemblement physique d'éléments en un même lieu (Brunet et al., 1992)". D'après le lexique Dalloz (1984), la concentration de population est un rassemblement de cette population, qui suggère l'idée de densités élevées, au moins par rapport à l'environnement.

Mais il est certain que c'est l'approche de C. Tricot qui demeure la plus intéressante pour notre problématique de géographe : "la concentration est la probabilité pour qu'un élément du territoire soit vide" (Bailly et al., 1992, p. 424). Cette notion ne se comprend que si l'espace est

<sup>1</sup> Le taux de peuplement total d'une aire donnée correspond à la somme des densités spécifiques relevées à l'intérieur de celles-ci.

divisé en petites unités, par exemple avec une grille. Un tel découpage régulier permet d'introduire la notion de comparabilité, car une grille est toujours adaptable, même si les espaces sont différents, même si les unités de base diffèrent. Cependant si la concentration paraît une notion intéressante, complémentaire de celle de densité, si l'on se réfère à la discipline originelle de ce terme, on se trouve face à un problème de transfert.

En effet, en chimie, la concentration est la "masse d'un corps, dissoute dans l'unité de volume d'une solution" (Larousse, 1977) ; ceci signifie que "le nombre de moles ne change pas" (Le Maréchal, Soulié, 1992), qu'il y a un mélange de deux substances ce qui conduit à une "réunion en un centre, à une augmentation de l'intensité" (Rey, 1992). Mais ceci signifie aussi que "la concentration" - action de concentrer, de rassembler - est le rapport entre la quantité d'un corps et sa solution" (Le Robert, 1979), "comme si" ce rapport était constant en tout point du volume, du contenant. On suppose un mélange "régulier" des deux substances. Or ceci est très discuté lors d'un transfert dans des disciplines spatiales, telles l'urbanisme ou la géographie.

En effet, la première substance, la première quantité qui compose une densité, une concentration, correspond à des hommes, par exemple à un nombre de personnes contenues dans (sur) une surface, qui sont considérées comme "mélangées", "diluées" dans (sur) cette surface de manière homogène, régulière. Or, ceci est loin d'être "vrai" lors de l'observation. En effet dans une concentration surfacique de population, il n'y a pas de mélange mais distribution sur la surface, c'est-à-dire répartition, et rien ne dit que cette répartition soit régulière. Cette constatation constitue une différence fondamentale avec le concept de concentration en chimie. Mais en analyse spatiale, densité et concentration sont inséparables de la notion de répartition.

Cependant, si l'on reprend la définition de C. Tricot, il est évident que des mailles de la grille peuvent être vides ou pleines, et que, pour une même concentration, la répartition pourra différer. *On peut obtenir un même indice de concentration, une même valeur de densité sans avoir, pourtant, une répartition identique.*

Aussi, pour définir "l'organisation" d'une population sur une surface, il semble en fait que trois indices complémentaires soient nécessaires, la répartition indiquant où se trouve cette population, mais comment "caractériser, exprimer" cette répartition ?

La répartition correspond aux positions respectives des "éléments", les uns par rapport aux autres. Même avec une grille, à moins que celle-ci ait une résolution extrêmement fine, une même concentration peut aboutir à deux répartitions distinctes, pour un géographe qu'il s'intéresse à des surfaces ou à des volumes. Mais on peut se demander si la concentration sur une surface, telle que la définit C. Tricot, n'est pas une expression de la répartition, puisqu'il peut la qualifier de "groupée", "dispersée", etc., avec des mesures précises. Cependant, une difficulté essentielle semble être surtout que la notion de concentration comme celle de répartition ne peut se concevoir sans une enveloppe ; celle de densité non plus. La concentration, en analyse spatiale, comme la répartition, concerne la disposition des éléments, des particules, qui restent individualisés (il n'y a pas de dissolution) les uns par rapport aux autres à l'intérieur de l'enveloppe surfacique ou volumique.

Alors que représentent ces différentes notions en géographie et plus particulièrement en milieu intra-urbain ?

L'enveloppe générale de la ville correspond à la surface définie par les limites administratives de cette ville. Les particules sont représentées par des personnes localisées dans cette surface.

Une première densité est obtenue en établissant le rapport entre le nombre de personnes et la surface prise en compte. Mais les personnes ne se trouvent pas nécessairement sur toute la surface. La mesure de densité doit donc être complétée par des mesures de la concentration et de la répartition, qui indiqueront s'il y a groupement, dispersion ... Ces différentes opérations

peuvent s'effectuer à divers niveaux, sur l'ensemble de la ville, dans des quartiers, des îlots ou même à l'échelle des parcelles. Dans tous les cas, il semble, cependant, que l'on considère la ville comme un tout surfacique et non volumique ; de ce fait, certains aspects de la ville ne peuvent être pris en compte, même si toute la population est utilisée.

Enfin, il a bien été souligné, à diverses reprises, que ces indices étaient des rapports ; ils sont donc formés de deux composantes. Il convient alors de les décomposer pour en mieux connaître la signification, en mieux effectuer l'interprétation.

### ■ 1.1.2 La densité : une expression à deux composantes

La densité est donc un tout ayant une signification précise, mais si l'on veut établir des comparaisons, il est nécessaire de connaître les composantes du rapport. La dissociabilité de la densité urbaine est donc indispensable pour reprendre le terme de H. Reymond dans le chapitre III de Problématiques de la géographie (1981, p. 186). Il convient de revenir sur ce que signifient les deux éléments du rapport, le numérateur se référant aux personnes et à leurs caractéristiques, leurs attributs, et le dénominateur concernant le contenant, l'espace, la surface. Ceci revient à étudier la séparabilité attributaire et la décomposabilité spatiale (Reymond, 1981, p. 186).

#### ▲ 1.1.2.1. *Le numérateur de l'indice densitaire*

Le numérateur représente une quantité, un nombre de..., à un temps T ; en fait le plus souvent un nombre de personnes. Ces personnes peuvent être tous les habitants d'une ville, relevés au lieu de résidence ou au lieu de travail, ou encore aux deux emplacements. Mais on peut également séparer des catégories de personnes selon leur catégorie socio-économique, leur âge, leur nationalité, etc. Alors, le terme densité devra être accompagné d'un qualificatif permettant de connaître l'attribut associé à la population prise en compte.

Cependant, on peut également retenir "un nombre de", autre que des personnes : par exemple, le nombre de maisons individuelles, le nombre de grands ensembles, ou encore, selon le but poursuivi, le nombre de commerces, de services, la longueur des rues, etc. Les possibilités concernant le numérateur sont innombrables. Seuls, l'objectif de la recherche et la disponibilité des données interviennent pour prendre des décisions, mais ce nombre est inséparable de son associé - le dénominateur - dont la diversité est moindre.

#### ▲ 1.1.2.2. *Le dénominateur de l'indice densitaire*

En effet, le dénominateur exprime en général une surface, mais de quelle surface s'agit-il ? Comment la décomposer ? La plus courante est une surface administrative dont la taille varie selon l'échelle de l'étude ; en France, on pourra retenir la parcelle (ce qui est rare), l'îlot, le quartier ou même l'arrondissement pour certaines villes. Mais que représentent réellement ces surfaces qui ne sont pas nécessairement entièrement occupées par des populations ou du bâti, qui peuvent être occupées par des maisons individuelles ou des bâtiments collectifs ? Une densité "brute" où l'on rapporte une population totale (au lieu de résidence, ou au lieu de travail) à une surface administrative dont on ignore l'occupation par le construit, et surtout la disposition et la nature de ce construit, peut donner une vision complètement fautive de l'occupation réelle d'une ville.

Aussi des chercheurs, comme J. Szegö (1994), se refusent-ils totalement à prendre en compte ce type de surface et ne commencent leurs travaux qu'à partir de l'aire urbaine construite, c'est-à-dire incluant les bâtis, les rues, les squares ainsi que les secteurs immédiatement adjacents aux espaces verts. Ils n'intègrent pas les zones peu occupées, tels les ports, les aires industrielles ou encore les couvertures végétales continues. Il convient donc bien de décomposer l'unité administrative de base en ses éléments utilisés par le bâti pour saisir plus

correctement les densités, mais encore faut-il distinguer les types de bâti, et considérer, non plus la ville surfacique, mais une ville volumique qui est vraiment celle que l'homme occupe. En effet, une maison individuelle à un niveau ne peut abriter un nombre aussi important de personnes qu'un grand ensemble de 10 étages. La surface du bâti au sol est donc insuffisante pour arriver à une densité significative. Il convient d'introduire un nouvel élément, la surface par niveau d'occupation, ou plus exactement la surface de plancher. Ainsi pour une surface totale de 700m<sup>2</sup> avec une surface bâtie au sol de 500m<sup>2</sup> (20 x 25m), on pourra avoir 500m<sup>2</sup> de surface de plancher pour une maison à un niveau, 1000m<sup>2</sup> pour une maison à deux niveaux, et 5000 pour une immeuble collectif à 10 niveaux. Si 50 personnes occupent cet espace, les densités associées seront les suivantes (en habitant par m<sup>2</sup>)

- densité brute	$50 / 700 = 0,071$
- densité bâtie	$50 / 500 = 0,1$
- densité bâtie volumique	(1 niveau) = 0,10
	(2 niveaux) = 0,05
	(10 niveaux) = 0,01

Ces nombres traduisent aussi des réalités d'occupation du sol très différentes que la seule densité brute ne peut exprimer. Allons plus loin dans la relation "nombre d'habitants - surface", pour bien mettre en évidence l'insuffisance de la notion de densité brute (Figure 1).

Soit une surface totale de 1 ha  
 une surface bâtie de 3600 m<sup>2</sup>  
 une surface de plancher de 3600 m<sup>2</sup>  
 une population de 45 habitants

Les combinaisons sont multiples comme le montre la figure 1, bien que la densité brute soit toujours de 45 habitants / ha ; la densité rapportée à la surface bâtie est de 125 initialement.

*Dans le premier cas (a)*, on se trouve devant un ensemble de maisons individuelles à un niveau, réparties régulièrement sur la surface totale. Le coefficient d'occupation du sol, ou le taux de surface de plancher, sera

$$3600 \text{ m}^2 / 10000 \text{ m}^2 = 0.36$$

et la densité "pondérée", c'est-à-dire le nombre d'habitants rapporté à la surface occupée (donc la surface de plancher), sera

$$(45/3600) \times 10000 = 125 \text{ habitants / ha,}$$

donc dans ce cas, identique à la densité "bâtie".

*Dans le deuxième cas (b)*, l'habitat est décomposé en trois ensembles, deux bâtiments de deux étages et un autre d'un étage. La surface bâtie au sol ne sera plus que de 2400 m<sup>2</sup> mais la surface de plancher restera de 3600 m<sup>2</sup>. Alors les taux d'occupation seront les suivants :

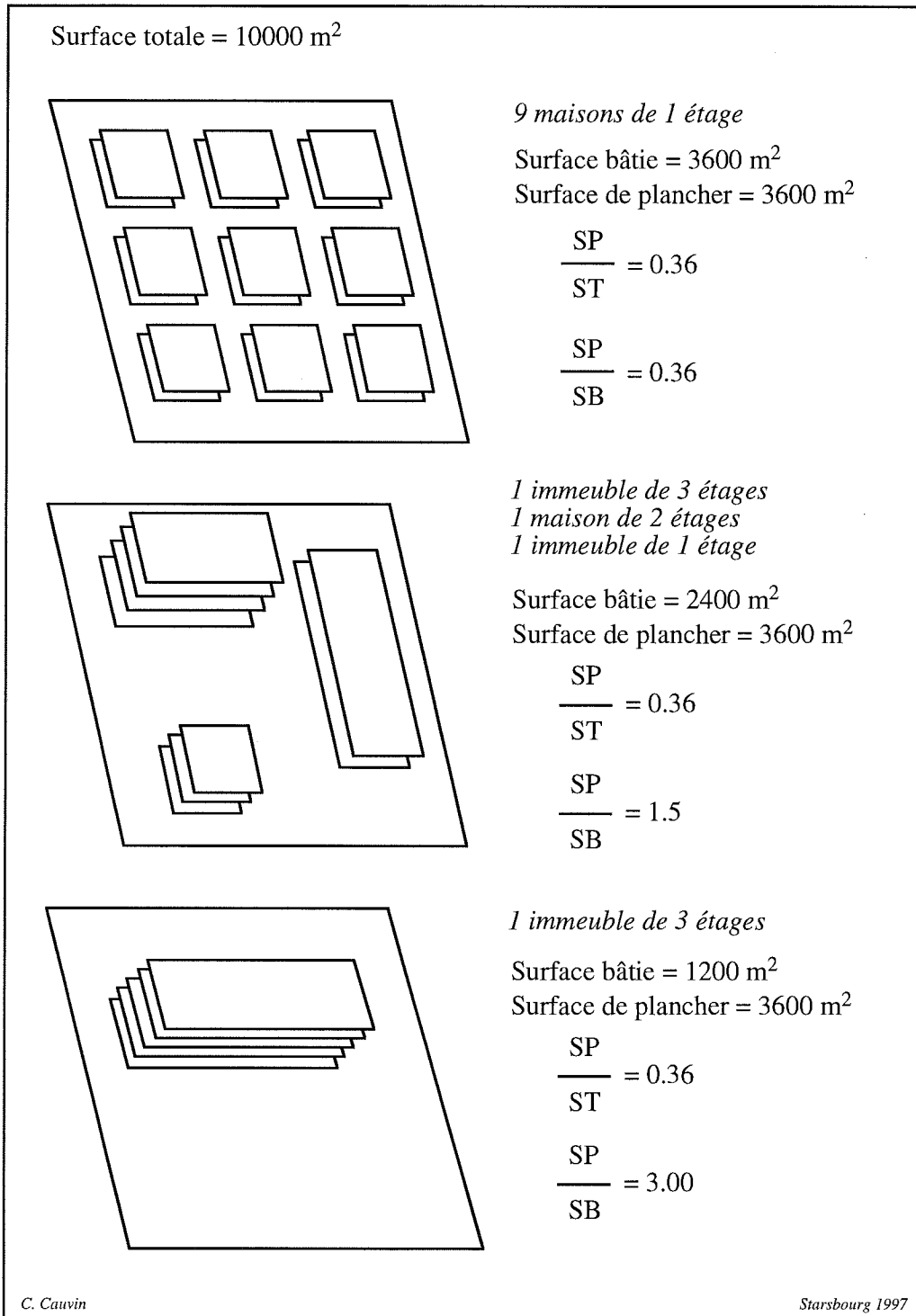
$$SB / ST = 2400 / 10000 = 0.34$$

$$SP / ST = 3600 / 10000 = 0.36$$

$$SP / SB = 3600 / 2400 = 1.50$$

et les densités varieront selon le dénominateur retenu. La densité brute sera toujours 45 habitants / ha. La densité "bâtie" augmentera considérablement, atteignant 187.5 h / ha, alors que la densité "plancher" sera encore égale à 125. Ceci sous réserve que l'on considère que le nombre de personnes par surface de plancher est identique quel que soit l'immeuble, ce qui renvoie aux réflexions concernant le numérateur.

Figure 1  
Surface totale, surface bâtie et surface de plancher



*Enfin, dernier cas (c), l'espace est occupé par un seul bâtiment de trois étages, ayant chacun 1200 m<sup>2</sup>. La surface de plancher reste constante avec 3600 m<sup>2</sup>, mais la surface bâtie n'est plus que 1200 m<sup>2</sup>. Alors les indices sont les suivants :*

$$SB / ST = 1200 / 10000 = 0.12$$

$$SP / ST = 3600 / 10000 = 0.36$$

$$SP / SB = 3600 / 1200 = 3.00$$

La densité brute reste à 45 h / ha, la densité "plancher" à 125, et la densité "bâtie" atteint maintenant la valeur de 375 h / ha.

Cependant, il ne faut pas oublier - comme nous le développerons ultérieurement - que l'on dispose facilement (ou presque), au niveau des sources, de la superficie administrative, quelquefois de la superficie bâtie, mais quasiment jamais, du moins en France, de la surface de plancher. Or on voit que pour une surface totale et une surface de plancher constantes, la surface de bâti varie considérablement et par suite la densité associée. De plus, il est visible que la disposition au sol varie dans les trois cas. Dans le premier, tout est occupé uniformément, dans le deuxième, il reste quelques espaces libres, dans le troisième, une autre barre au moins peut être construite. *Pour l'urbaniste, la connaissance de la configuration va donc être au moins aussi importante que celle de la densité, sinon plus, puisque dans un cas, il se trouve dans un espace "contraint", et, dans le dernier, un espace "à liberté".*

De même, on pourrait modifier les constantes, et cette fois-ci faire varier la surface de plancher en maintenant constante la surface de bâti. Quelle que soit la disposition au sol, l'encombrement ou la disponibilité en terrain seront stables, mais la densité variera selon la surface de plancher. Il est évident, en effet, que dans un tel cas de figure, la population ne peut être constante.

Avec une même surface bâtie au sol, selon le nombre d'étages, la surface de plancher peut varier considérablement. Il est clair que la population abritée ne pourra être la même et que les rapports de variations en relation avec la surface de plancher seront considérables. Mais les autres densités varieront aussi avec des taux de croissance très variables. Dans cette option, le point important sera de voir l'importance de ce que l'on pourrait appeler le "surpeuplement" ou la "suroccupation du bâti". La suroccupation ne ressort pas de la même manière selon les densités, et qu'à la limite, il ne peut s'agir que d'une suroccupation, en quelque sorte, artificielle. *Cet indice permet alors, pour l'urbaniste de juger, non plus des terres disponibles, mais du taux de surpeuplement et, par suite, des conditions de vie des habitants de ces immeubles.*

On peut en conclure que les trois types de surfaces doivent être connues pour que l'on puisse examiner correctement la densité et l'utiliser comme un indice significatif de l'occupation du sol. Ils doivent être associés à une mesure de configuration, c'est-à-dire de disposition des éléments d'occupation du sol. Densité, concentration et répartition sont des mesures inséparables, car complémentaires ; cependant, les composantes retenues pour le dénominateur sont fondamentales. Encore faut-il qu'elles soient disponibles, question que nous aborderons dans le paragraphe suivant.

Auparavant, étudier de plus près l'association numérateur / dénominateur est pourtant indispensable, car, selon leur combinaison, on peut aboutir à des mesures à signification très différentes, indépendantes de ce que nous avons mis en évidence précédemment.

#### ▲ 1.1.2.3. Numérateur et dénominateur de l'indice densitaire

En effet, numérateur et dénominateur ayant de multiples natures possibles, leurs combinaisons sont également très nombreuses, et, par suite, les significations se multiplient.

Pour approfondir cet aspect de la densité<sup>2</sup>, nous nous appuyerons sur un article de V. Fouchier (1994) "Penser la densité" et, surtout, sur l'ouvrage de J. Szegö (1994) "Mapping the urban scene".

Dans le cas d'une population rapportée à une unité administrative, quelle que soit sa taille (îlot, parcelle, etc.), on parlera de *densité brute* au sens où la population et la surface ne se correspondent pas nécessairement dans leur logique. S'il s'agit d'une population au lieu de résidence, on retiendra alors l'expression *densité résidentielle brute* ; ou, s'il l'on considère la population au lieu de travail, il s'agira d'une *densité au lieu de travail brute*. Ceci signifie qu'un qualificatif devra toujours être ajouté, caractérisant la population prise en compte, indépendamment de l'adjectif brut qui correspond à la relation, ou plutôt à l'absence de relation directe entre numérateur et dénominateur.

Lorsque la population est rapportée à la surface réellement occupée, on utilise en général l'expression de *densité nette*.

Notons que R.C. Schmitt (1966), en distinguant une *densité interne* où le nombre de personnes est rapporté à l'unité d'espace résidentiel, donc l'espace habité, et une *densité externe* où ce nombre de personnes est rapporté à une unité plus vaste de type administratif, effectue une division semblable à celle que nous retenons ici avec densité nette et densité brute.

Cependant, pour la densité nette, il est indispensable d'ajouter des qualificatifs afin de préciser ce que représente exactement ce rapport, également en sachant que, pour chaque composante du rapport, les deux peuvent varier.

J. Szegö (1994), travaillant quasiment toujours avec les aires urbaines construites, distingue, quant à lui, les densités suivantes :

- *la densité résidentielle* qui est le nombre de résidants (population relevée au lieu de résidence) par hectare construit. Elle n'exprime, pour cet auteur, qu'une des principales composantes de l'occupation du sol. Ce n'est pas un indicateur complet de l'occupation du sol.
- *la densité de travail* qui est le nombre de travailleurs par hectare construit.  
Il définit alors une troisième densité :
- *la densité structurale* qui est la somme des densités résidentielles et des densités de travail en nombre de personnes par hectare. Cette traduit le nombre d'unités d'espace personnel par hectare construit.

L'unité d'espace personnel est ainsi conçu comme l'espace occupé par une personne à la maison et au lieu de travail, ce qui peut fournir deux unités éventuellement, comme le montre son schéma 2:3, page 45. Cette densité structurale exprime l'intensité avec laquelle l'aire construite est utilisée. Elle est une expression de la demande spatiale. Elle reflète de plus la "physique" de la ville, sa structure volumique, tridimensionnelle, même si la plupart des représentations ne sont que surfaciques (schéma 2:7, page 55). Enfin, elle traduit l'organisation spatiale des activités de la ville, le champ des activités, puisqu'à la limite, comme le fait cet auteur, il serait possible de reconstituer ainsi des parcours quotidiens. *La densité structurale serait donc la "densité vraie", c'est-à-dire la densité des personnes physiques présentes simultanément en un point donné. Elle ne correspond pas à une densité d'individus. Elle indique l'espace qu'une personne a, à sa disposition, comme une partie de sa maison ou de son lieu de travail.*

<sup>2</sup> O. Boustedt (1970) calcule la densité à partir de l'addition des emplois et des habitants pour définir la Stadregio (région formée autour d'un centre urbain).

Ce sont ces espaces qui, ensembles, créent la structure physique de la ville, et exprime quelque chose de caché. Cette densité structurale prend également en compte plus ou moins directement les densités dans le cadre des 24h, donc simultanément le jour et la nuit.

On rejoint ici la notion d'intensité d'activité qui est le temps total passé par des personnes par unité d'espace et de temps. En fait, on voit qu'on parle d'espace, et on peut se demander si travailler en terme de quantité d'espace des possibilités par personne, c'est-à-dire en utilisant le rapport inverse de la densité, ne serait pas plus intéressant pour comprendre l'organisation urbaine, si disposer d'un COS théorique comparé à un COS "concret", observé, ne serait pas enrichissant, enfin si l'appréhension de termes complémentaires comme disposition, répartition, organisation, ne devrait pas être envisagée.

### ■ 1.1.3 Termes apparentés

On constate donc que les densités urbaines ne traduisent qu'un aspect incomplet de l'occupation du sol. Aussi est-il quasiment indispensable d'associer à cet indice, d'autres mesures exprimées sous une forme ou sous une autre qui permettent de compléter ou de mieux appréhender la connaissance de "l'importance" de l'occupation du sol. Trois propositions, induites par ce qui a été expliqué sur la notion de densité, peuvent être exposées.

☞ *La première est la quantité d'espace*, expression inverse de la densité. En termes d'éléments nécessaires à sa mesure, il n'y a aucune différence par rapport à celle de la densité, mais en signification, en interprétation, cette notion mérite qu'on s'y attarde. En effet, la quantité d'espace est la surface que peut occuper une personne donnée, surface urbaine, infrastructures comprises ou non, selon le type de densité que l'on utilise ; elle traduit l'espace disponible pour chacun, elle est donc plus facile à associer à la notion d'entassement, à la perception que l'on peut avoir d'être serré ou non. Avoir comme espace "vital" 3 m<sup>2</sup> ou 100 m<sup>2</sup> (il s'agit du bâti) ne peut se comparer. Le sentiment d'écrasement que l'on peut ressentir dans un cas, n'existe pas dans l'autre. Pour une étude de perception, le concept de quantité d'espace est certainement plus facile à appréhender, à utiliser. Cependant, il présente les mêmes difficultés que la densité pour son obtention. Aussi, d'autres indices sont à utiliser, tel le COS.

☞ *Le COS ou coefficient d'occupation du sol*, quant à lui, "exprime la surface de plancher hors oeuvre, susceptible d'être construite par mètre carré de terrain" (Merlin, Choay, 1988). Il s'agit également d'un rapport, mais cette fois-ci entre deux surfaces, à savoir la surface de plancher constructible rapportée à la surface du terrain. Il a été mis en place par une loi d'orientation foncière en 1967 et permet de fixer une limite maximum de construction à l'intérieur d'un secteur donné d'un plan d'occupation des sols.

Ce coefficient correspond donc à une valeur théorique et non à une valeur exprimant une réalité. De plus, il n'existe pas de valeurs-plafond. Simplement, la valeur 0 indique des zones non constructibles ; les connaître permettrait d'éliminer ces surfaces dans le calcul des densités, ce qui constituerait une amélioration sensible de la mesure de la densité.

Les valeurs d'un COS peuvent fortement varier. Dans le centre-ville de Strasbourg, où aucun COS n'est imposé, un calcul a donné des valeurs de 5 et même plus. Dans les zones collectives, on trouve un COS d'environ 2,7 et dans les secteurs de bureaux, de l'ordre de 1,5. Mais il ne s'agit que de valeurs indicatives ; car les valeurs des COS peuvent ne jamais être atteintes, si tout l'espace constructible n'est pas bâti, ou au contraire, elles peuvent être dépassées pour diverses raisons, avec même l'accord de l'administration ! De plus, les valeurs des COS ne sont pas toujours disponibles, et elles sont fixées pour des zones assez vastes, souvent trop larges pour une étude urbaine fine.

Par ailleurs, comme les densités, un COS ne traduit pas la "réelle" occupation du sol puisqu'une même valeur peut correspondre à des occupations différentes. "Ainsi", comme l'écrit Y. Prats, "sur une parcelle de 1 ha, un COS de 0,5 permettra de réaliser une tour de 10 étages, dont l'emprise au sol sera de 500 m<sup>2</sup> au milieu d'un jardin de 9500 m<sup>2</sup>, avec un parc automobile souterrain ; ou au contraire, un petit lotissement d'habitations individuelles mitoyennes" (In : Merlin, Choay, 1988).

Le type de bâtiments, la disposition des maisons les unes par rapport aux autres, sont des éléments indispensables à prendre en compte pour obtenir une véritable mesure de l'occupation du sol urbain. On arrive ici à une troisième proposition.

☞ *Il s'agit de trouver un indicateur prenant en compte l'arrangement des bâtiments, les caractéristiques de ces bâtiments, ainsi que les populations qui s'y trouvent.* On rejoint ici les mesures de répartition pour des semis valués, ce qui n'est pas évident ; en effet, de nombreux indices existent, mais l'un mettra en évidence la tendance centrale, l'autre la dispersion autour de cette tendance centrale, un autre encore la régularité, ... Seules des méthodes beaucoup plus sophistiquées, telles les séries de Fourier par exemple, permettent de prendre ces différents éléments en compte. Un indice unique ne suffit pas.

*Aussi se trouve-t-on limité pour fournir un indice simple, satisfaisant, pour caractériser l'occupation du sol. La densité est donc une mesure insuffisante, des valeurs identiques peuvent recouvrir des réalités différentes ; il n'existe pas une densité mais des densités.* Encore faut-il que l'on puisse disposer des informations nécessaires pour les calculer, et pour les modéliser, car cette dernière approche est une des plus courantes, pour appréhender les structures urbaines et leur évolution..

Quels que soient les indices, ils sont toujours associés aux termes d'épaisseur, d'abondance, de concentration, dont le degré est variable, mais il convient d'être capable d'en faire une mesure. Aussi, devant la diversité des densités "potentielles", est-il nécessaire de s'interroger sur les données existants permettant de les transformer en densités "observables, relevables".

## 1.2

### Des sources de connaissance pour une appréhension des densités Statistiques officielles et cartographie : des données insuffisantes

---

Colette CAUVIN

Texte préliminaire

Rappelons ce qui a été dit précédemment sans entrer dans le détail de l'argumentation. Une densité exprime un rapport entre deux quantités, l'un représentant un contenu, par exemple la masse volumique d'un corps, un nombre d'objets (ou de sujets), etc., l'autre correspondant au contenant, un volume ou une surface. Dans ce travail, la densité est définie comme le nombre de personnes contenu dans une surface délimitée ; ceci signifie que la densité inclut deux termes - un numérateur et un dénominateur -. Selon l'élément précis pris en compte pour l'un ou l'autre, le rapport peut changer en valeur, mais surtout en signification, comme nous venons de l'exposer.

#### ■ 1.2.1 Des quantités à évaluer

Le numérateur correspond à un "nombre de ...". Les personnes peuvent correspondre à tous les habitants d'une ville - puisqu'il s'agit ici de densités urbaines relevées à leur lieu de résidence, ou à leur lieu de travail, ou aux deux - ; mais on peut aussi se limiter à une catégorie de population selon la classe sociale, l'âge, etc. Ainsi, un premier type de variations apparaît, dont le nombre de combinaisons associées est élevé, comme en témoigne le tableau ci-dessous.

Population	Totale	par catégorie socio-économique	par âge	par ...		
Lieu associé à la population						
résidence						
travail						
résidence et travail						

Retenir une "case" ou l'autre du tableau, c'est-à-dire un attribut donné de la population, correspond, bien entendu, au but poursuivi, aux hypothèses émises.

Mais ce qui est à souligner, c'est que, si des sources existent, elles ne sont pas toutes disponibles ou utilisables. En particulier pour les populations, on dépend uniquement, ou presque, des organismes officiels, tels l'INSEE.

Actuellement, en France, la variété des informations est extrêmement limitée. En ce qui concerne le lieu de relevé, ne sont plus disponibles que des statistiques attachées au lieu de résidence (contrairement à certains recensements antérieurs, où les variables étaient également fournies au lieu de travail). Par ailleurs, seule la population totale par unité spatiale est facilement accessible et comparable à travers le temps. Les catégories socio-professionnelles, quant à elles, présentent des regroupements très variables depuis 1962, et les classes disponibles, surtout en 1990, sont très inégalement satisfaisantes.

Au sujet des unités spatiales, c'est-à-dire de l'échelle où les informations citées ci-dessus sont aisées à obtenir, il faut souligner un fait important. Les données au niveau des îlots sont quasiment inaccessibles en raison des contraintes introduites par la CNIL ces dernières années ; les dérogations sont quasi inexistantes. De ce fait, seules les données des "quartiers 5000" sont toujours disponibles, ce qui conduit le chercheur à travailler sur une population, "importante" en nombre, au lieu de résidence, *densitairement hétérogène au départ même de la prise de données*. Il faut donc être conscient que, si, fonctionnellement, une analyse densitaire au niveau de l'îlot est possible, et plus que souhaitable, pour une étude diachronique, seule une approche à l'échelle des quartiers peut être envisagée.

De ce fait, les choix au niveau du numérateur à partir des sources officielles sont plus que limités, aucune autre source ne semble exister directement, contrairement à l'appréhension des surfaces pour le dénominateur, deuxième composante de la densité.

### ■ 1.2.2 Des surfaces à mesurer

En effet, en ce qui concerne les surfaces, les sources sont plus diverses. On peut distinguer les sources officielles, en général textuelles, des cartes et de l'imagerie satellitaire.

Les premières ne fournissent que les limites des zones définies administrativement, et encore, la plupart du temps, sans les mesures de superficie, en particulier au niveau des îlots. Aussi doit-on faire appel à d'autres sources, telles les cartes ou les images satellitaires.

Les documents cartographiques présentent l'avantage d'exister depuis longtemps et de permettre ainsi de remonter dans le temps. Les limites administratives et les espaces bâtis y sont aisément repérables, mais leur relevé, en vue d'effectuer des mesures de surface, est long sur les cartes-papier ; quant aux cartes numériques, elles sont encore en nombre trop limité pour les découpages urbains fins. De plus, si elles sont satisfaisantes au niveau communal, les cartes papier disponibles sont en général à des échelles trop grossières pour l'appréhension des informations à l'échelle du quartier et surtout de l'îlot. Cependant, pour l'agglomération strasbourgeoise, le fond par îlots, élaboré au laboratoire, a rendu possible des mesures rapides à partir d'une numérisation vectorielle.

Mais, on a montré précédemment que le bâti est un élément essentiel pour évaluer correctement les densités. Faire appel à d'autres sources, en particulier à l'imagerie satellitaire, est donc indispensable.

En effet, les images satellitaires fournissent des informations plus complètes pour caractériser les surfaces de bâti. Si les zones administratives ne sont pas décelables, bien entendu, en revanche, différents types d'occupation du sol, et surtout de bâtis, sont discernables : trois catégories peuvent être reconnues et retenues pour les analyses résidentielles avec une certaine marge d'erreur, à savoir

- les grands ensembles,
- le bâti pavillonnaire,
- le bâti dense.

Mais il faut souligner que l'obtention de ces informations n'est pas directe ; elle exige des transformations et des traitements, qui ne sont pas sans conséquences sur les estimations densitaires, et sur lesquelles nous reviendrons dans le chapitre 3.

Cependant, on constate qu'en croisant les différentes sources disponibles, ou supposées telle, pour les deux composantes de la densité, on peut travailler sur plusieurs types de densité pour une ville française

- *la densité résidentielle "brute"* avec deux variantes selon la base spatiale

$$\frac{\text{population totale}}{\text{superficie îlot}} \quad \text{et} \quad \frac{\text{population totale}}{\text{superficie quartier}}$$

- *la densité résidentielle "nette"*, avec les deux mêmes possibilités d'échelle, mais où la superficie bâtie remplace la superficie totale,
- enfin, *la densité résidentielle nette*, toujours aux deux échelles indiquées, selon les types de bâti grâce à l'utilisation de la télédétection.

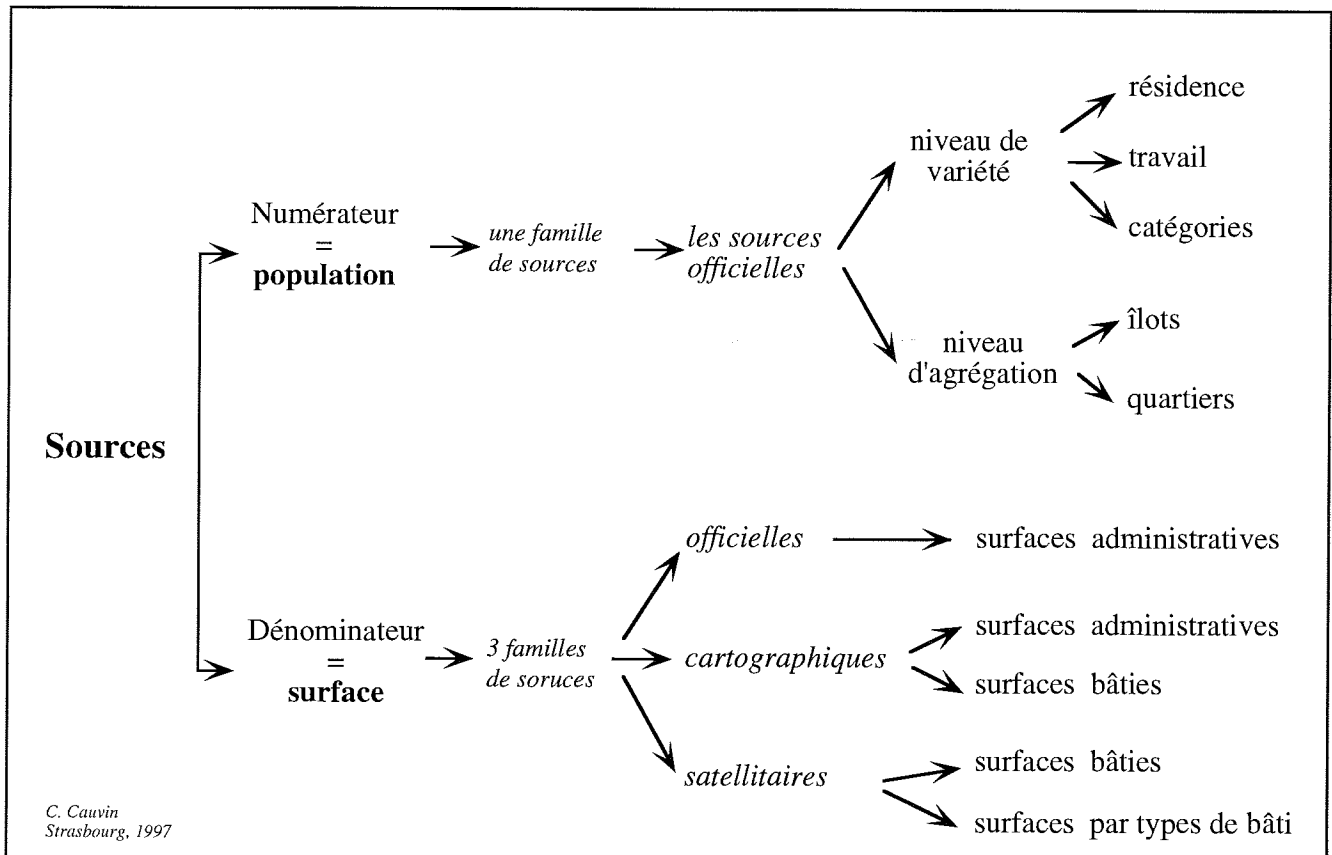
Cette dernière catégorie est intéressante car elle devrait permettre d'aborder les aspects volumiques d'une ville. En effet, il est bien évident que pour une même occupation en surface, un immeuble, selon ses étages, ne présente pas la même capacité d'accueil de personnes comme le montre bien la figure 1 du chapitre 1.1 et le schéma de V. Fouchier, page 9 (1994). Seule la surface de plancher, qui cumule pour un même bâtiment, les surfaces des différents étages, conduit à une estimation des densités urbaines, ce que l'on recherche. Or, en France, cette donnée n'existe pas dans les statistiques officielles. Il convient donc bien de pallier cette déficience en faisant appel à d'autres outils, telle la télédétection.

En résumé, on constate que selon les sources utilisées, la construction des indices densitaires varie fortement comme le montre le schéma 1 selon la manière dont sont associés les types d'informations.

Mais la qualité des indices dépend beaucoup de la manière dont les superficies ont été prises en compte, comme nous l'avons déjà souligné à différentes reprises, en particulier en ce qui concerne les images satellitaires.

Aussi faut-il se demander comment les utiliser correctement, comment améliorer leur capacité informationnelle à l'aide de pré-traitements, par exemple. Ceci, d'autant plus qu'on peut s'interroger sur la nécessité ou l'intérêt de travailler sur des bases spatiales imposées comme l'îlot ou le quartier : peut-être est-il préférable d'aller au-delà des informations initiales et de créer de nouvelles données, par différents procédés, ce que nous aborderons ultérieurement.

Figure 1  
Construction des indices densitaires : sources de variation



## 1.3

### Images satellites et densités urbaines

---

*Christiane WEBER, Jacky HIRSCH, Aziz SERRADJ*

La connaissance des densités que l'on cherche nécessite que l'on fasse appel aux variables usuelles dont nous avons parlé, lorsqu'elles sont disponibles, mais les contraintes spatiales qu'elles impliquent et leur non accessibilité, de plus en plus fréquente à des seuils fins, conduisent à élargir les sources d'informations existantes, disponibles, accessibles et pertinentes. Cette démarche amène nécessairement à l'utilisation simultanée de données de sources variées, en particulier satellite, et se pose alors le problème de leur intégration.

Différents travaux réalisés depuis 1989 (Weber, Hirsch, 1991, 1992) permettent d'affirmer, au moins pour le cas d'une ville comme Strasbourg, que l'utilisation des données satellites en milieu urbain ouvre des possibilités de connaissance en termes d'occupation et d'utilisation du sol. C'est là qu'apparaît tout l'intérêt de leur utilisation, à condition de cerner correctement les limites d'application et les risques d'erreurs potentiels.

En fait, comment s'effectue le passage de la donnée " brute ", c'est à dire la valeur radiométrique de chaque pixel dans chaque canal, à une valeur codée traduisant le fait que ce pixel est occupé par du bâti dense, de la végétation ou de l'eau par exemple. De très nombreux travaux ont été faits sur le sujet et le but poursuivi, ICI, est d'expliquer les traitements effectués pour le thème précis des densités.

#### ■ 1.3.1. Une source de connaissance nouvelle pour une appréhension des densités

Parmi les sources potentielles qui ont un rapport étroit avec l'espace géographique considéré, les informations spatiales, c'est-à-dire celles qui fournissent implicitement des informations sur l'état de la surface terrestre (les photographies aériennes et les images satellites) nécessitent une mise en forme avant leur utilisation. Cette mise en conformité avec une utilisation ultérieure, passe par deux étapes : d'une part, une transformation d'une représentation de la réalité spatiale en un vecteur informationnel manipulable, d'autre part, un traitement plus ou moins sophistiqué permettant une adaptation de ce vecteur informationnel aux objectifs d'utilisation.

Comme tous les types d'information, les images satellites nécessitent la prise en compte de leur spécificité afin d'optimiser leur utilisation tout en tenant compte de leurs limites. Seule une démarche construite peut conduire à un usage performant de l'image.

#### ▲ 1.3.1.1 Caractéristiques de la source d'information

Cette source d'information possède des particularités liées à son mode de constitution et à son type de structure. Parce qu'elle est issue de la transformation d'un signal capté à une certaine altitude en données radiométriques, elle fournit une représentation d'un état de la réalité selon des grandeurs appréciables en termes de couverture spatiale pouvant être référencée par rapport à un système de représentation terrestre. Selon le capteur utilisé (tableau 1), les surfaces considérées peuvent permettre de prendre en compte de 3 500 à 35 000 km<sup>2</sup> d'un seul tenant sans avoir à faire de montage de différents supports comme c'est le cas avec une mission de photographies aériennes. Cet avantage indéniable est renforcé par la répétitivité potentielle de l'information ; pour les capteurs d'observation qui tournent autour de la Terre, l'ordre de révolution est, dans tous les cas, inférieur à un mois, ce qui permet d'avoir éventuellement une couverture renouvelée selon un rythme soutenu.

Parce qu'elle est numérique et donc manipulable, elle est quantitative et utilisable dans des approches déterministes ou stochastiques selon divers niveaux de mesure (binaire, catégoriel ou rapport). C'est pourquoi des traitements identiques peuvent s'appliquer *a priori* de la même manière pour toute image, après adaptation selon les localisations géographiques, si nécessaire. Comme un ensemble de données statistiques, l'image se plie aux traitements mais en plus par sa structure numérique maillée (raster), elle permet des opérations inédites faisant intervenir les notions de voisinage et de proximité.

Tableau 1  
Les différents capteurs les plus courants

Capteurs	Résolution spectrale (µm)	Résolution spatiale (m)	Surface de la tache élémentaire	Largeur de balayage
Landsat MSS	0,5-1,1 10,5-12,4 (MSS8)	60*80	4424 m <sup>2</sup>	185 Km
Landsat TM	0,45-2,35 10,4-12,5 (TM6)	30*30	900 m <sup>2</sup>	185 Km
SPOT Multispectral	0,50-0,90	20*20	400 m <sup>2</sup>	± 475 Km (selon,l'angle de visée)
SPOT Panchromatique	0,51-0,73	10*10	100 m <sup>2</sup>	± 475 Km (selon,l'angle de visée)
ERS-1	30m à 2,5dB 100m à 1dB	30*30	900 m <sup>2</sup>	80Km

Cependant pour bien comprendre cette source de connaissance il semble nécessaire d'expliquer brièvement les étapes de sa constitution.

#### ▲ 1.3.1.2. Transformation des informations radiométriques

Par transformation il faut entendre le passage d'un état à un autre dans une optique spécifique. La prise en compte de la réalité terrestre se fait par l'intermédiaire des particularités

électromagnétiques des objets et éléments de celle-ci. En effet, à un arbre, à un toit ou à une route correspond un phénomène physique qui peut être capté et enregistré ; sous l'excitation

d'une source d'énergie comme le soleil par exemple, les éléments et les objets réfléchissent de l'énergie<sup>3</sup> selon des longueurs d'ondes qui leur sont propres et qui dépendent de leur composition physico-chimique, de leur forme, de leur orientation, de leur couleur et du milieu de propagation (atmosphère, ionosphère, eau, ...).

Cette énergie captée (chimiquement ou électroniquement) est considérée comme caractéristique d'un état donné à un moment précis, celui du passage du capteur. La transformation des signaux radiométriques saisis en vecteurs informationnels manipulables passe par une numérisation de l'image selon la taille de la tache élémentaire propre à chaque capteur<sup>4</sup>.

Cette numérisation d'une grandeur physique (rayonnement électromagnétique puis électrique) est réalisée par le codage du signal selon ses caractéristiques ondulatoires en une grandeur informatique binaire, en général codée sur 8 bits, ce qui autorise 256 niveaux de gris possibles pour la représentation visuelle. Après contrôle de qualité, les données<sup>5</sup> correspondantes sont découpées en scènes ayant la forme de losanges quasi-isocèles dont le côté a pour dimension la longueur de lignes balayées par le capteur.

A chaque capteur, correspondent des pouvoirs de résolution spectrale différents selon les largeurs de bandes du spectre électromagnétique retenues : chaque donnée radiométrique est donc la composition électromagnétique de l'énergie réfléchie de l'élément ou de l'objet selon un faisceau spectral, chaque faisceau étant matérialisé par un canal. Ainsi, dans le cadre de données multispectrales, plusieurs informations illustrent un même élément ou objet. Ces limites de résolution spectrale sont définies en fonction des finalités du capteur, plutôt tournées vers la gestion des espaces végétaux, vers la pollution ou vers la représentation cartographique et la mise à jour.

### ■ 1.3.2. Le traitement des données radiométriques

Deux niveaux de traitement sont à discerner, d'une part des corrections géométriques et radiométriques ou prétraitement d'image, et, d'autre part, des mises en évidence de structures et de texture sur les images, qui sont essentielles à l'interprétation des phénomènes représentés.

⇒ Les prétraitements correspondent à une nécessité d'amélioration et de conformité des images à une utilisation thématique. Ils consistent en général à opérer "des délignages de l'image (élimination des défauts en stries dus au mode d'acquisition des données), des corrections géométriques en tenant compte des conditions de la prise de vue et des corrections radiométriques en retenant les étalonnages et les caractéristiques des détecteurs, de l'optique et de la télémétrie sur les données brutes" (Paul et al., 1991). D'autres prétraitements peuvent être effectués comme des corrections atmosphériques, ou un rééchantillonnage des pixels<sup>6</sup>. Certains prétraitements sont associés à une norme de diffusion des organismes, dans laquelle intervient selon les niveaux : le géocodage par

<sup>3</sup> Selon la loi de conservation de l'énergie: l'énergie issue d'une source naturelle ou artificielle est réfléchie, propagée dans l'atmosphère, transmise dans le sol ou l'eau et enfin absorbée.

<sup>4</sup> Tache élémentaire ou tachèle : élément d'aire de la scène résultant de l'intersection du champ de visée instantané ou élémentaire du capteur avec la surface du terrain.

<sup>5</sup> On utilise le terme signal radiométrique pour les informations saisies par le capteur de la plateforme d'observation, et données radiométriques pour le résultat de leur conversion en l'enregistrement d'un niveau d'intensité.

<sup>6</sup> Pixel (picture element) : plus petite surface homogène constitutive d'une image enregistrée définie par les dimensions de la maille d'échantillonnage (surface au sol délimitée par 4 taches élémentaires ou tachèles).

rapport à un système de référence ou un redressement s'appuyant sur un modèle numérique de terrain afin de s'approcher au plus près des conditions du terrain.

- ⇒ Les traitements ont pour but de mettre en évidence les particularités de la représentation de la réalité au travers des textures et donc des structures perceptibles. La similitude radiométrique est le critère le plus souvent utilisé pour identifier les objets contenus dans l'image pour pouvoir les comparer à la réalité. Cependant une approche déterministe liant objet et réalité n'est pas satisfaisante du fait de l'hétérogénéité du milieu, de la composition du pixel et de la variabilité spatio-temporelle du signal. Les approches statistiques permettant la formalisation d'une relation objet-réalité semblent plus adaptées, notamment par le biais de classifications selon des catégories thématiques (ou classes de pixels) conditionnées par le terrain. L'objectif majeur de ce type de traitement est d'identifier et de localiser des zones homogènes correspondant à des classes thématiques explicites : zones végétales, zones de bâti, zones de cultures, etc.

Les catégories thématiques qui peuvent servir de référence à ces traitements s'appuient plus ou moins sur des nomenclatures utilisées jusqu'à présent en cartographie, selon des pratiques liées à l'aménagement, à l'urbanisme ou encore à des dénombrements nationaux voire internationaux. Une des principales différenciations qu'il y a lieu de mettre en exergue réside dans les notions d'occupation du sol et d'utilisation du sol. Si la première correspond à la réalité biophysique de la surface au sol, ses caractéristiques naturelles (floristiques, orographique, ...), la seconde (tableau 2) y ajoute les finalités associées par l'homme, à savoir la destination de tel bâti (entreprise commerciale ou industrielle, école, parc de loisir, base nautique, ...). Ce deuxième niveau de lecture de la réalité n'étant pas capté, est donc absent de l'image, à moins que des formes archétypales puissent être reliées à telle ou telle finalité comme un stade avec sa couronne, un aéroport avec ses pistes, etc. ; ceci est cependant secondaire. Une des difficultés majeures de l'utilisation de l'image est donc la conformité à une nomenclature adaptée ; conformité qui passe à la fois par l'approfondissement des traitements d'image permettant de discriminer au maximum les zones homogènes susceptibles d'être intéressantes en fonction d'objectifs clairement définis, et par une formalisation moins restrictive ou novatrice des catégories en usage dans la représentation de la réalité. La mise au point de catégories adaptées à des besoins clairement énoncés augmentent les potentialités d'usage des images satellites.

L'information satellite transformée et traitée requiert donc la compréhension de ce cheminement pour une utilisation à bon escient. Les caractéristiques spatiales de couverture, de répétitivité de prise de vue, de répétabilité de traitements en font une source intéressante et performante d'information.

Les données radiométriques une fois traitées fournissent en général une information sur les modalités d'occupation du sol, et les paramètres statistiques et géométriques qui leur sont associés (moyenne et écart-type radiométrique, surface de catégorie, ...). A ce titre elles peuvent être considérées comme des variables à part entière selon leur niveau de mesures (nominal, ordinal ou ratio) utilisables dans des traitements statistiques.

*Tableau 2  
Nomenclature CLUSTERS*

Niveau I	Niveau II		Niveau III		Niveau IV	
Surfaces Artificialisées	A1	Zones résidentielles Services publics	A11	Zones résidentielles	A111 A112 A113 A114 A115	Continues et denses Continues moyennement denses Résidentielles pavillonnaires Résidentielles discontinues Résidentielles collectifs
			A12	Services publics et collectivités	A12	Services marchands ou non
	A2	Activités industrielles commerciales	A20	Activités industrielles et commerciales	A201 A202 A203 A204	Industries lourdes Autres industries Services commerciaux et financiers Exploitations agricoles
	A3	Infrastructures techniques Transport et communication	A31	Infrastructures techniques	A311 A312	Réseaux techniques Traitement des eaux
			A32	Transport et communications	A321 A322 A323	Infrastructures routières Réseaux ferrés Aéroports- aérodromes
	A4	Industrie extractives, chantiers, décharges et friches	A41	Industries extractives		
			A42	Chantiers, décharges et friches	A421 A422 A423	Chantiers Décharges Friches artificialisées
	A5	Terrains aménagés à usage de loisirs	A50	Terrains aménagés à usage de loisirs	A501 A502 A503	Sites historiques Equipements sportifs Espaces divers

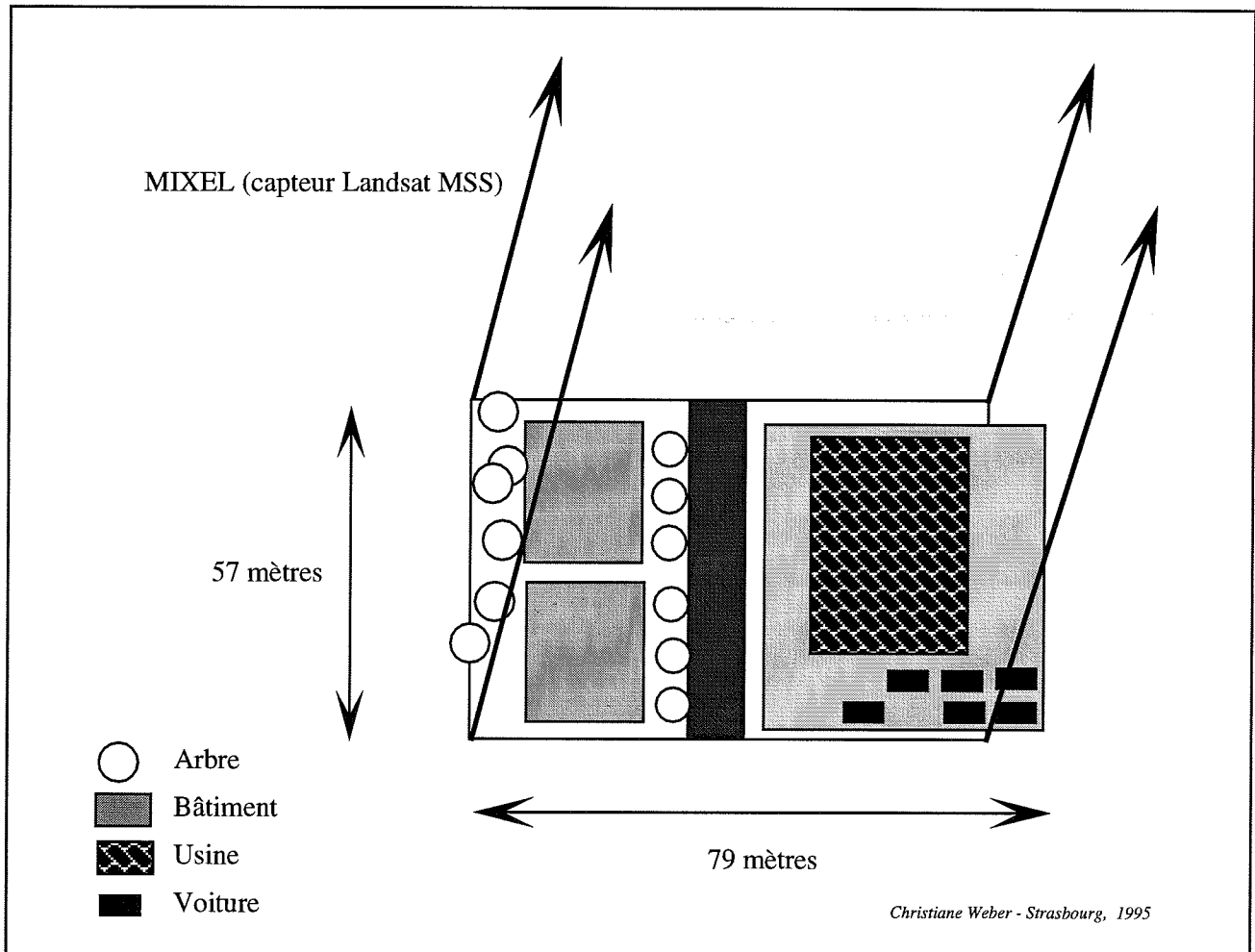
### ▲ 1.3.2.1 Identification des catégories thématiques d'occupation du sol : les types de bâti

L'identification des types d'occupation du sol est obtenue en utilisant les caractéristiques statistiques de l'image dans un traitement de classification destiné à rassembler les plus petits éléments de l'image (pixel) selon des zones homogènes. Divers algorithmes sont utilisés, tous tendent à maximiser les différences et minimiser les écarts au sein des groupes. Afin d'obtenir une information fiable, une classification supervisée est souvent appliquée. Le terme "supervisée" fait référence à une démarche où les types d'occupation du sol sont repérés sur le terrain et permettent d'explicitier les classes thématiques, de les localiser spatialement, d'identifier sur l'image leurs caractéristiques radiométriques ; les coefficients de classification ainsi obtenus permettent alors de classer l'ensemble de l'image. Les résultats sont alors confrontés avec la connaissance du terrain ainsi formalisée, afin de pouvoir évaluer la qualité de l'analyse.

Cette boucle entre le terrain et le traitement est essentielle si l'on veut comprendre la spécificité de l'information satellite. En effet, le milieu urbain est hautement hétérogène, selon les échelles d'observation, les modifications spatiales se succèdent à un rythme plus ou moins soutenu, selon les distances prises en compte : ainsi, si l'on prend en compte la réalité à l'échelle de l'îlot urbain, le passage entre la voie, le bâtiment, le coeur d'îlot se fait selon un rythme rapide sur des distances courtes, ceci sera différent sur l'emprise d'un quartier, *a fortiori* à l'échelle d'une ville. L'hétérogénéité du paysage urbain induite par le capteur, et donc la taille du pixel utilisé, sera plus ou moins accentuée, d'autant plus que les valeurs radiométriques du pixel ne correspondent pas à la réflexion d'un seul objet ou élément mais bien à la composition de tous les éléments ou objets concernés auquel s'ajoute un effet du voisinage. En milieu

urbain, les valeurs de "mixel" (figure 1) ne sont donc pas associables à une unité de l'espace urbain mais plutôt à un arrangement d'unités dont la taille minimum, jusqu'à présent est de 10 x 10m. Il faut cependant noter que, pour un même objet, deux types de réponses radiométriques peuvent être relevées (des maisons aux toitures différentes), mais aussi que deux objets divers peuvent avoir des valeurs identiques là aussi du fait du matériau par exemple.

Figure 1  
Un mixel



Il s'agit donc d'identifier plus particulièrement les arrangements spatiaux qui par leurs aspects, leurs orientations, leur emprises au sol, leur répétitivité, bref, l'organisation qu'ils induisent, pourront être associés à un ou plusieurs pixels de l'image. Il convient de pouvoir isoler des arrangements qui se détachent de l'ensemble de l'image et qui peuvent être identifiés comme un pâté de maison, un établissement industriel, une zone de jardins familiaux, ... Les nomenclatures permettant d'explicitier les classes thématiques doivent tenir compte de ces caractéristiques spatiales pour permettre le lien entre la réalité et l'image. La notion de finalité, associée à ces classes thématiques, ne peut être opérante que par l'introduction d'informations exogènes à l'image, dans le cadre de l'utilisation d'un système d'information géographique par exemple.

En milieu urbain, ce sont les types de bâti que l'on tente de discerner principalement, en fonction de plusieurs principes qui ont trait à sa constitution.

- *La continuité et la densification* : ainsi l'ensemble bâti se distingue par la minéralisation de l'espace qu'il induit. Cependant, il est possible de discerner différents niveaux d'intensité minérale selon qu'il s'agit du centre ou de la périphérie, ceci nous fournit une première indication sur la continuité du tissu urbain. Cette intensité est aussi liée à la forme du réseau viaire et donc à la date de son développement (en Europe), associé aux opérations d'urbanisme qui ont bouleversé la trame initiale, en modifiant le rapport espace privé/espace public notamment par l'élargissement des chaussées.
- *La relation espace minéral et espace végétal* : cette association est très importante en imagerie satellite car elle fournit une indication sur la compacité du bâti, et la minéralisation, mais aussi *a contrario*, une indication sur la place des espaces verts privés ou publics au sein de la ville. Les quartiers apparaissent tour à tour pourvus ou démunis, isolant des zones résidentielles au tissu lâche où les jardins prédominent de celles dont la maille est plus petite.
- *L'orientation par rapport au réseau* : cette indication permet notamment de comprendre de quel type de maillage il s'agit, les parcelles de front d'îlots ou de coeur d'îlots ne présentent pas les mêmes caractéristiques et fournissent là aussi des renseignements sur le type d'urbanisme constitutif de ces zones.
- *L'emprise au sol* : grande elle qualifie le plus souvent des bâtiments de grande taille qu'il faut scinder entre habitat collectif ou bâtiment industriel ou commercial (ce qui se fait selon la toiture et le voisinage le plus souvent), petite ou moyenne, c'est la répétitivité du motif et l'orientation des bâtiments qui va permettre de localiser une zone de collectifs, de taille plus ou moins importante.

En fonction de ces quelques principes qui permettent de repérer sur l'image une représentation d'une réalité connue et relevée sur le terrain, une typologie de classes thématiques est possible, identifiant les zones de bâti dense continu, les zones d'habitat collectif et enfin les zones d'habitat pavillonnaire repérables par la présence de végétation. A chacune de ces classes peut être associée une couleur pour une meilleure discrimination visuelle ainsi que des statistiques permettant de caractériser les surfaces d'habitat de l'ensemble de la surface urbaine définie de manière administrative.

#### ▲ 1.3.2.2. Variabilité des résultats

La spécificité de l'imagerie satellite tient aux caractéristiques instantanées qu'elle fournit sur la réalité. Instantanée lors du passage du capteur, et différente d'un passage à l'autre bien évidemment, puisque la réalité est essentiellement dynamique, sa représentation biophysique ne l'est pas moins. En ce sens la variabilité de l'information fait partie intégrante de la compréhension de l'image satellite.

- ⇒ *Variabilité au travers des capteurs* : ceux-ci correspondent à des faisceaux du spectre qui leur sont propres même s'ils se chevauchent parfois entre capteurs différents. Les réponses radiométriques seront donc aussi différentes pour une même portion d'espace concernée.
- ⇒ *Variabilité au travers des images elles-mêmes* : comme nous l'avons souligné, une image est un instantané, elle correspond à une combinaison d'états de divers éléments que le signal réfléchi traverse : le sol, l'interface sol-atmosphère, l'atmosphère. Pour chacun de ces éléments les conditions antérieures et présentes jouent un rôle, une forte pluie quelques jours ou heures avant le passage du capteur et le sol, tout comme l'atmosphère change, une longue période de sécheresse et là encore le signal est spécifique de la

situation. Une même zone couverte peut ainsi à quelques mois d'intervalle fournir des informations fort variées sur l'état des objets et des éléments. C'est ce qui est tout à fait intéressant pour certains phénomènes (comparaison de la teneur hydrique des sols), mais aussi ce qui perturbe le sens de toute démarche comparative puisqu'il y a une instabilité potentielle. Un moyen pragmatique mais probant est de choisir, si possible, des dates similaires d'une année sur l'autre pour faire des analyses de comparaison, ce que limite *a priori* les risques de variations liées aux conditions climatiques et aux stades d'avancement phénologique pour la végétation et les cultures. Cela dit, les variations liées à des perturbations atmosphériques peuvent être décelées et atténuées dans certains cas, permettant d'identifier les modifications importantes des autres (notamment en milieu urbain).

⇒ *Variabilité de traitements* : selon que l'on tente de mettre en évidence les caractéristiques spatiales ou essentiellement radiométriques du contenu de l'image les cheminements méthodologiques varient. Cependant les résultats sont plus sensibles aux spécificités de l'image qu'aux conditions d'application des traitements eux-mêmes. Il faut pourtant pouvoir adapter les divers traitements en fonction de la localisation du phénomène étudié. Ainsi, une ville européenne et une ville asiatique n'auront pas les mêmes critères de constitution et donc nécessiteront une adaptation : les conditions géographiques entre une ville de plaine et une ville de piedmont semi-désertique ou proche d'une sebkha ne poseront pas les mêmes problèmes de discrimination des types de bâti et demanderont des applications autres. Un des avantages de l'imagerie satellite réside dans la souplesse de traitements possibles de manière automatique ou quasi-automatique, ce qui permet de pouvoir répéter les méthodes avec plus ou moins de facilité.

Malgré ces remarques, l'imagerie satellite ouvre des possibilités d'obtention d'une information spatiale, renouvelable, manipulable au niveau méthodologique, et pouvant fournir des formalisations au niveau des types d'occupation du sol dans le temps et quel que soit l'espace considéré, à condition que les objectifs soient cernés et permettent une adéquation entre les attentes et les résultats fournis par l'image.

Avec des données intrinsèquement surfaciques, l'image apparaît dans bien des cas comme un élément essentiel d'identification et de quantification des surfaces considérées. Rapportée aux problèmes de densités, elle fournit une information peu accessible jusqu'à présent par d'autres sources, la surface des types d'occupation du sol et donc de l'habitat.

### ■ 1.3.3 Données satellitaires et indices densitaires

L'introduction d'une surface de référence associée à la localisation de l'habitat permet de modifier le rapport habituel des densités (rapport d'une population sur une surface) en tenant compte d'une autre relation spatiale, non plus liée à une superficie globale mais à une superficie restreinte par le biais d'une association population-habitat. Cet habitat est identifiable et définissable à partir de plusieurs supports impliquant des méthodologies spécifiques ; la carte, la photographie aérienne et l'image satellite peuvent être utilisées.

#### ▲ 1.3.3.1 Occupation et utilisation du sol

L'image satellite en tant qu'information sur la surface du sol s'avère dans ce cas intéressante par ses caractéristiques spatiales (couverture et résolution), radiométriques (pouvoir de résolution multispectral), numériques (enregistrement binaire exploitable par traitements statistiques). Ainsi l'information sur l'habitat peut-elle être obtenue à partir de traitements statistiques stochastiques de classification fournissant des zones homogènes correspondant à des catégories d'occupation du sol, sémantiquement explicitées. Les nomenclatures liées à ces catégories se situent dans les domaines de l'aménagement et de l'urbanisme, en déclinant la

surface au sol selon deux grands axes : l'occupation du sol (Land Cover) et l'utilisation du sol (Land Use). Ce second axe associe les finalités aux caractéristiques biophysiques du sol, ce qui ne peut se faire qu'en faisant appel à des informations exogènes à l'image satellite. Les caractères retenus pour identifier les types d'occupation du sol et plus particulièrement les groupes d'habitat s'organisent :

- selon la densité des types de bâti, et leur continuité ;
- selon l'alternance entre végétation et bâti : un tissu urbain ayant beaucoup de végétation sera plus aéré et correspondra plus à un type d'habitat résidentiel pavillonnaire que s'il s'agit de bâtiments en barre le long d'un réseau ou au centre d'une maille ;
- l'emprise au sol qui est, elle aussi porteuse de sens, puisque les grandes emprises s'attachent à des bâtiments collectifs de taille importante ou à la localisation d'une entité de production (usine).

Ces éléments servent à spécifier la sémantique des classes ainsi qu'à valider sur le terrain quelques zones-test avant (échantillons) et après (témoins) les traitements de classification. Les surfaces au sol, caractéristiques de l'habitat, peuvent fournir des statistiques, soit globales pour l'ensemble de l'image, soit discrètes en fonction de la partition spatiale de référence (partition administrative comme les unités de recensement).

Il faut noter que ce type de traitement est influencé par la variabilité spectrale en milieu urbain ; pour pallier cet inconvénient, une classification complémentaire peut être réalisée par zone et non plus de manière continue. Cette démarche, correspondant plus à une vision "morphologique" du paysage urbain, introduit une segmentation de l'espace, segmentation réalisée en fonction soit d'une réalité endogène à l'image (obtenue par traitements de morphologie mathématique : squelettisation, chapeau haut de forme, bassin versant,...), soit issue d'une numérisation, exogène à l'image, de partitions administratives ou de zonages quelconques. Les valeurs des canaux sont alors extraites en fonction des unités segmentées et réduites pour chaque canal aux valeurs de la moyenne et de l'écart-type. Cette classification, dite zonale, ne prend en compte que les valeurs des zones, et ne porte que sur les zones.

Les propriétés des deux types de classification (pixel et zonale) sont les suivantes :

- ⇒ pour la première, l'exhaustivité spatiale et numérique, mais qui présente, au niveau du résultat représenté, un pointillisme et des risques de mauvaises classifications (soit logiques pour les berges classées "bâti" ; soit incontrôlables parce que liés à des effets atmosphériques, ou naturels divers, sols nus, cycle végétatif, ...).
- ⇒ pour la seconde, la capacité de travailler sur des zones qui permet d'introduire une organisation spatiale déterminée ou inhérente à l'image. Elle introduit une possibilité d'homogénéité qui peut améliorer les résultats de la classification en évitant les problèmes de variabilité.

Une fusion des deux types de classification, quant à elle, tient compte des avantages des deux classifications : la précision de localisation au niveau du pixel, et la précision sémantique au niveau de la zone. Une image résultat a été obtenue dans laquelle est conservée la localisation de tous les pixels, mais où la classe d'appartenance zonale est attribuée aux pixels classés bâti. L'amélioration est importante, d'autant qu'elle a permis de diminuer fortement les variations dues à la mauvaise qualité des données de départ.

Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé cette démarche pour générer les informations d'occupation du sol de la zone d'étude. Une classification pixel a tout d'abord été réalisée sur l'ensemble des canaux SPOT XS provenant des images de 1989 et 1990 (soit 6 canaux)<sup>7</sup>. La classification zonale a été réalisée sur les moyennes et les écarts-type par zone des canaux XS2 et XS3 de ces images ; la partition zonale provenant des îlots INSEE du recensement de 1990. Cette méthode a permis de résoudre deux types de problèmes :

<sup>7</sup> Images : SPOT XS date: 08/5/89, KJ 51-252, niveau 2b ; SPOT XS date : 17/9/90, KJ : 51-252, niveau 2b

- l'altération des valeurs radiométriques liées à la présence de sols non ressuyés ou de nappe affleurante au nord en 1989 ;
- l'absence de végétation à la date de prise de vue et la confusion importante existant entre certains types de bâti et de sols nus.

### ▲ 1.3.3.2 Indices densitaires

Les mesures de surfaces de bâti peuvent être mises en relation avec la population correspondante par unité de recensement, selon une indication bâti/non bâti ou selon une déclinaison de classes d'habitat. L'obtention de telles statistiques est issue d'une superposition de la partition d'unités de référence (limites administratives ou de recensement etc.) et de l'image satellite classée, ceci dans un référentiel géographique identique par le biais d'une correction géométrique par régression bi-dimensionnelle avec des points homologues. Cette régression a été faite sur les données provenant de deux supports spatiaux à structure maillée (raster), une image satellite et un fond cartographique transformé d'une structure en polygone (vecteur) en une structure maillée, nommée communément "image" même s'il ne s'agit pas d'une image satellite. *Les valeurs de surface obtenues peuvent ensuite être utilisées en tant que dénominateurs du ratio de densité.*

Les tableaux 3 et 4 illustrent l'information de surface issue de deux images satellites sur Strasbourg (1981 et 1989-90)<sup>8</sup>. Les catégories d'occupation du sol caractéristiques de l'habitat (classes 1, 2 et 3) non seulement sont identifiées et qualifiées, mais aussi localisées. *Cette particularité permet d'associer des données de population et des données satellites directement en fonction de leur localisation spatiale (selon un référentiel administratif ou non).*

Tableau 3  
Surfaces obtenues d'après la classification 1981 (Landsat MSS)

Classes	Effectifs (en pixels)	Hectares
1	91	1756
2	24	1198
3	42	2746
4	24	584
5	492	6791
6	42	338

Tableau 4  
Surfaces obtenues d'après la classification 1989 (HRV SPOT Multispectral)

Classes	Effectifs (en pixels)	Hectares
1	148	1010
2	36	1158
3	102	1254
4	256	2045
5	414	7316
6	72	629

- 1 : Bâti dense
- 2 : Bâti collectif
- 3 : Bâti pavillonnaire
- 4 : Emprises commerciales
- 5 : Surfaces de végétation
- 6 : Eau

- Bâti couvrant de manière continue la surface considérée
- Bâti correspondant à un habitat en barres d'emprise variable
- Bâti identifié par des maisons individuelles avec jardins

<sup>8</sup> Taille du pixel : 10x10 soit 100 m<sup>2</sup>

Les résultats obtenus sont divers, en effet la surface de bâti peut être précisée pour selon l'emprise géographique des unités spatiales retenues, un îlot, un quartier ou l'ensemble de l'espace urbain pris en compte et elle peut aussi être déclinée selon le type de bâti (globalement ou selon les caractéristiques résidentielles retenues). Ces informations permettent de prévoir différentes façons de répartir la population selon la surface bâtie.

#### ▲ 1.3.3.3 La répartition de la densité de population

La possibilité d'associer population et habitat a depuis longtemps été utilisée pour obtenir une représentation de la répartition de la population sur une surface (notamment en pays en développement). Ceci a déjà été exploité par de nombreux auteurs très souvent pour pallier le manque d'information sur un lieu.

Plusieurs techniques permettent de rattacher une population à sa localisation résidentielle. Que ce soit à partir de photographies aériennes ou d'images, le principe est d'associer une surface délimitée à un chiffre de population, une maille urbaine à un dénombrement collecté sur le terrain. Cette surface peut provenir d'une carte aux contours de bâti numérisés, d'une photographie aérienne ou d'une image, dont les éléments au sol sont différenciés et donc interprétés et reliés à un dénombrement de population, obtenu par sondage ou collecte exhaustive. Les méthodes de production d'une connaissance liant aspect physique et population qui y réside ont été développées dès les années cinquante principalement aux Etats-Unis. A partir des années soixante, le champ d'application s'est tourné vers les villes des pays en développement, où la croissance rapide a fait naître des besoins énormes de mise à jour de l'information démographique et socio-économique.

La première famille de méthodes considère la tache urbaine et la population dans leur globalité (Holz et al., 1969 ; Ehlers, 1990) . Les performances du capteur Landsat MSS en terme de pouvoir de résolution spatiale y était pour quelque chose. L'amélioration des résultats a été apporté par une différenciation de la structure interne de la ville dans le groupe de la seconde famille de méthode (semi-globales). Les estimations de la population se font en tenant compte des caractéristiques de types de quartier. La connaissance de la population sur ces zones, par recensement antérieur ou collecte sur le terrain permet ainsi d'estimer l'effectif total de la ville (Collins, El-Beik, 1971 ; Kraus, 1974 ; Despart, Dutarte, 1995). Cette association population/habitat repose donc sur une hypothèse d'identification et de localisation des lieux de résidence à partir d'une image satellite traitée. Il est envisageable de répartir la population sur l'ensemble de la surface bâtie ou selon les types de bâti définis. Cette association se trouve physiquement identifiée par l'intermédiaire du pixel, en tant que vecteur d'informations localisées.

Ainsi l'intérêt de l'image réside aussi dans la structure maillée de l'information, puisqu'elle concentre sur un pixel la valeur de l'information retenue et à ce titre, elle facilite les traitements statistiques en gommant les effets de discontinuité introduit par des partitions de tous ordres. A partir de ce principe d'atomisation, l'image permet des "traitements" d'agrégation/désagrégation de la valeur thématique considérée. Ce principe est d'autant plus intéressant que la plupart des partitions présentes sur un espace urbain sont de nature très différente provenant de diverses administrations et présentant plus ou moins des caractéristiques d'ordre ou de hiérarchie. Il est donc séduisant de considérer l'atomisation des valeurs thématiques comme un moyen de dépasser les contraintes liées aux rigidités de partitionnement, notamment dans un contexte comparatif (multidate) ou intégratif (multisource).

Cette particularité facilite ainsi la reconstitution de valeurs selon des niveaux divers d'organisation spatiale (reconstitution de la population par exemple selon l'une ou l'autre unité administrative). Cette situation est souvent présente lorsqu'existent des disparités entre plusieurs référentiels spatiaux de même niveau d'organisation spatiale par exemple des

partitions multiples sur un même espace urbain, ou des partitions modifiées d'une même référence spatiale. Les îlots INSEE en sont un exemple type, ces différences provenant soit de modifications inhérentes à l'évolution des partitions entre deux dates, soit à l'indépendance totale de ces partitions.

La possibilité d'associer spatialement l'information à des plans issus de traitements d'image permet de pallier ce type de modifications de référentiel. Il s'agit là d'un procédé d'interpolation aréale proche du changement de base utilisé en statistiques. L'information sur le bâti extraite de l'image n'est plus considérée comme un produit satellitaire descriptif mais comme un support informationnel, pseudo-continu. Ce procédé de désagrégation et re-agrégation de l'information, est bien entendu intéressant lorsque les référentiels spatiaux ne sont pas identiques et ne sont pas hiérarchiquement liés, c'est-à-dire lorsque l'on ne peut pas déduire facilement l'un de l'autre.

Dans certains cas, des partitions étrangères les unes des autres déterminent des incompatibilités spatiales insolubles jusqu'à maintenant et que les systèmes d'information géographiques (SIG) ont tenté de solutionner par une méthode d'interpolation spatiale : "l'overlay". Cette transformation est faite le plus souvent en prenant pour hypothèse principale l'homogénéité de l'espace (isotropie) et la validité du lien qui relie l'espace à l'information ; ceci n'est pas sans induire quelques problèmes (Lam, 1983). Or très souvent, comme dans le cas des densités réelles, l'espace n'est pas homogène mais discontinu, organisé en zones plus ou moins homogènes, associées ou non à l'information. Comme le suggèrent R. Flowerdew et M. Green (1989), il est possible d'introduire dans l'interpolation une information "exogène" à celle-ci qui permette de solutionner ce problème en rétrécissant l'espace à prendre en considération ; l'information exogène agissant ici comme une co-variable en statistique. Cette fait intervenir une surface restrictive afin de réduire l'aire de référence lors de l'interpolation spatiale opérée pour passer d'un référentiel spatial source (unités administratives S) à un autre appelé cible (unités administratives C). La restriction spatiale, définie par un sous-ensemble de l'espace considéré est obtenue par numérisation des zones de bâti (de manière globale) à partir de photographies aériennes numérisées et ensuite rastérisées (Martin, 1989 ; Martin, Bracken, 1991) ou d'images satellites (Weber, Hirsch, 1989, 1990).

En utilisant l'imagerie et en restreignant la répartition spatiale de la population aux zones résidentielles, les deux conditions liées aux hypothèses sont remplies : discontinuité spatiale liée à l'occupation du sol, et lien surface-information par le lien habitat-population. La reconstitution de l'information interpolée sur un espace restreint correspondant à une co-variable statistique se fait par l'agrégation des valeurs atomisées selon le nouveau référentiel (cible).

Le lien habitat/population peut dès lors être considéré comme une mesure d'intensité et les coefficients obtenus sont dès lors appelés coefficients d'intensité d'occupation. Ils sont localisés sur l'espace de référence et se présentent selon une structure maillée. Ils ont la particularité d'être indépendants les uns des autres car associés à l'élément de base de l'image satellite, le pixel. Cette indépendance par rapport à tout référentiel spécifique permet de passer d'une partition à une autre, tout en conservant le volume d'information (Tobler, 1979 ; Goodchild, 1990), ce que ne font pas nombre d'autres méthodes.

La relation population/habitat est obtenue par une régression selon un modèle simple mettant en relation estimation de la population et type de bâti résidentiel :

$$\text{Population } ci = \text{coef. bâti} \times S \text{ } ci$$

avec  $ci = \text{cellule } i$

$S = \text{surface en nombre de pixels}$

Dans le cas d'une prise en compte des caractéristiques de types de bâti, la différenciation est introduite en fonction de chaque type de bâti présent dans l'unité spatiale :

Population de l'unité spatiale Cible

= coefficient de bâti dense x nombre de pixels de bâti dense de l'unité  
 + coefficient de bâti collectif x nombre de pixels de bâti collectif de l'unité  
 + coefficient de bâti pavillonnaire x nombre de pixels de bâti pavillonnaire de l'unité

soit

$$\text{Pop } c_i = [\text{coef. B1} \times \text{S1 } c_i] + [\text{coef. B2} \times \text{S2 } c_i] + [\text{coef. B3} \times \text{S3 } c_i]$$

Les résultats de répartition de population obtenus, vont pouvoir être utilisés pour reconstituer l'information par agrégation des valeurs selon le référentiel cible choisi. La comparaison des informations est donc possible grâce à cette réorganisation des valeurs thématiques.

#### ▲ 1.3.3.4 Application aux densités strasbourgeoises

Après traitements, deux, voire trois coefficients sont définis et correspondent à l'intensité du lien entre la population et la couverture spatiale considérée. Ces coefficients peuvent s'apparenter à des intensités de relations entre la population et son habitat. L'application de cette relation permet de réaliser une estimation ce qui signifie toujours des écarts ou des résidus. Ces écarts entraînent des erreurs à la fois globales (population totale estimée par rapport à la population réelle) et locales (population suivant les entités spatiales connues par rapport à la population réelle de ces unités). L'application d'un coefficient correcteur ( $C = Y'/Y$  où  $Y'$  est la population estimée, et  $Y$  la population observée) tend à éliminer ces deux types d'erreurs, ce qui diminue fortement les distorsions.

Une fois le plan (raster) du coefficient d'intensité représenté, il est tout à fait envisageable de le considérer comme une forme de répartition de la population sur les cellules du plan raster correspondant à l'habitat. Ce coefficient d'intensité de la répartition de population est donc associé aux cellules de bâti, cellules qui par leur nature (valeur atomique, localisation implicite en ligne et en colonne, peuvent être considérées comme un niveau de désagrégation maximal pouvant être recomposé au gré des entités spatiales servant de référence. Cette procédure a été appliquée aux deux images de référence 1981 et 1989.

La méthode retenue dans le cadre de cette étude détaille la structure du bâti en trois classes bâti dense, bâti collectif et bâti pavillonnaire et l'associe à la population correspondant aux unités administratives de référence. La relation entre structure et population est obtenue par régression linéaire multiple où tous les types de bâti interviennent.

La régression est calculée sans ordonnée à l'origine en partant de l'hypothèse que la population ne peut qu'être localisée et positive. Un autre point important, dans un tel contexte, est l'application de cette régression sur les seules zones bâties où réside une population. Cette distinction a pu être faite par l'utilisation d'information provenant de la base de données de l'INSEE, à partir de laquelle les îlots (unités élémentaires de recensement) sans habitant ont pu être localisés. Cette distinction a été ensuite reportée sur un plan cartographique (raster) qui, superposé à la classification, a permis d'obtenir une dissociation des îlots vides d'habitants des autres. Ces îlots sont en général des localisations où se trouvent des organismes publics (bibliothèque, préfecture, ...). Le but de cette opération, dans le cadre de la régression, est de ne prendre en compte que les surfaces correspondant à des bâtis résidentiels réels.

A noter que, dans le cas des densités, la mise en cohérence des unités statistiques de recensement entre 1982 et 1990<sup>9</sup> s'est avérée incontournable, leur disparité influençant bien évidemment la répartition de la population étudiée et donc empêchant toute comparaison. La

<sup>9</sup> Quoiqu'issus de la même administration, les deux référentiels ont été lourdement modifiés du fait de l'application des règles de restriction de diffusion des informations de recensement de l'INSEE conformément à la loi Informatique et Liberté et aux textes d'application imposés par la CNIL.

recomposition des valeurs de population est apparue nécessaire dans cette optique et a impliqué le choix de l'un des deux référentiels, en l'occurrence 1982, comme canevas de répartition et de reconstitution de l'information de 1990.

Les paramètres de l'équation de répartition de la population peuvent varier comme précisé ci-dessus, selon que la finesse de la structure urbaine est retenue ou non ; ainsi deux types de modèles ont-ils été testés :

- à deux paramètres : le bâti dense et collectif dissocié du bâti pavillonnaire ;
- à trois paramètres : les trois catégories initiales de la classification.

Les résultats de la confrontation entre l'image satellite et les données socio-économiques de l'INSEE 1982, ont été rassemblés dans le tableau 5, où une certaine stabilité peut être décelée.

Image HRV SPOT 1989-90, (48 quartiers)

$$y' = 1.358 (B1) S1 + 1.295 (B2) S2 + .015 (B3) S3$$

avec R2 = .586

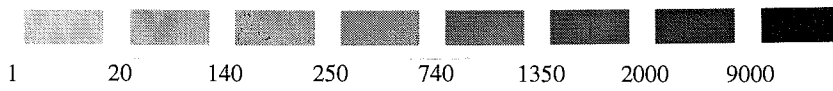
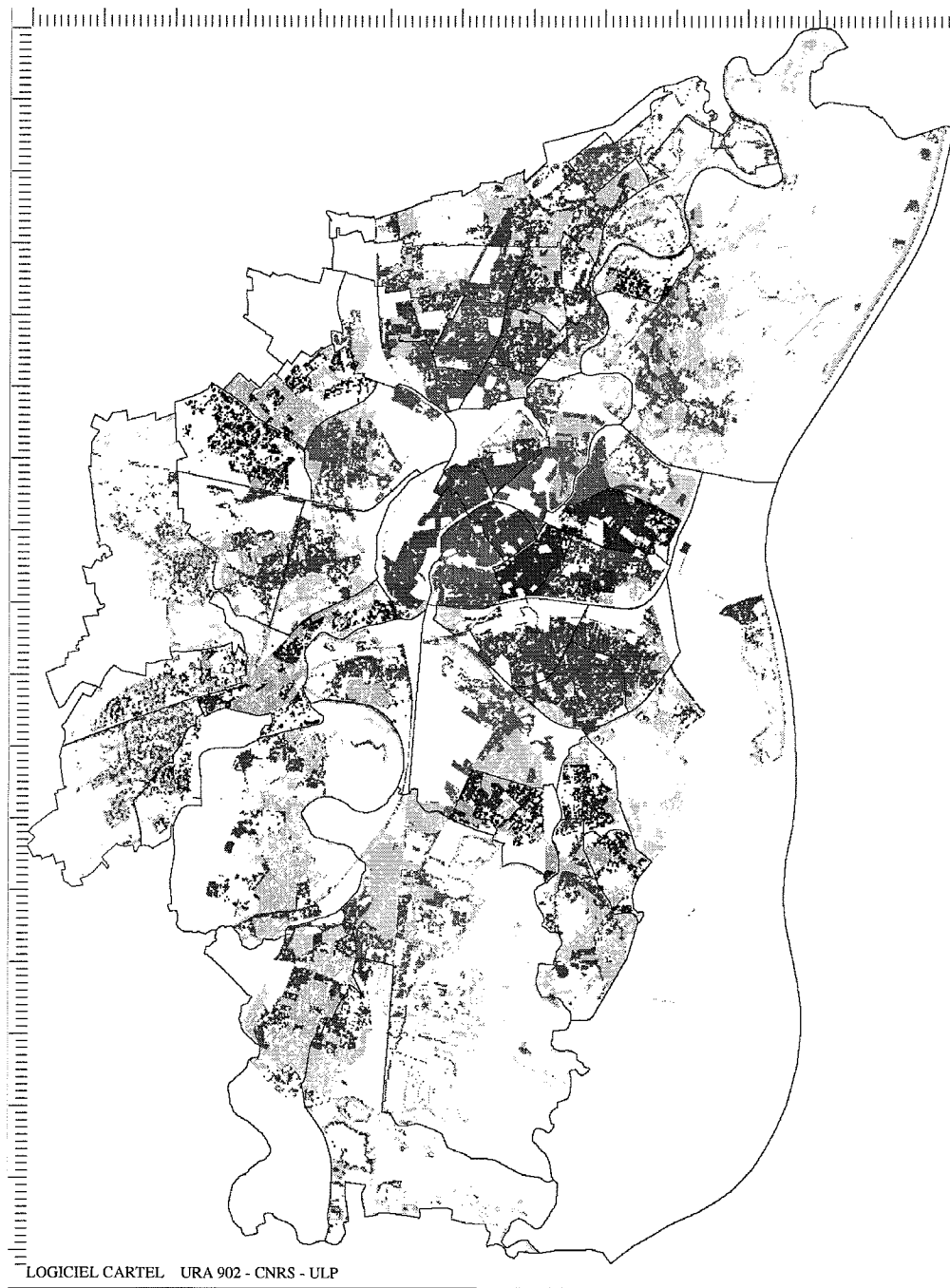
Une fois toutes les valeurs reconstituées, la population totale est obtenue. Pour notre étude la population du recensement de 1990, a donc été répartie en tenant compte du référentiel de 1982, mais en tenant compte de sa répartition initiale. Les tests de validation des résultats ont été jusqu'ici jugés satisfaisants (Weber, Hirsch, Serradj, 1993 ; Weber, Hirsch 1994).

*Tableau 5*  
*Résultats de la répartition de population (1990 versus 1982)*  
*sur des unités n'ayant pas subi de modification ou issue de fusion d'unités*

Unités Spatiales N°/ref.90	Population observée	Superposition simple	Population 1 estimée en fonction des caractéristiques de bâti sans correction	Population 2 estimée en fonction des caractéristiques de bâti après correction	Population 3 estimée en fonction du bâti total
1	12843	12899	12946	12824	12740
3	10571	10635	10600	10555	10474
7	5094	4809	4655	5094	5085
13	13336	13354	13802	13332	13333
14	8329	6808	8335	8322	8235
18	5255	5464	5527	5253	5216
24	4779	5326	4107	4776	4747
27	5333	3672	4998	5331	5312
29	10551	10419	10578	10557	10525
30	13225	12978	12976	13220	13199
36	14264	13737	13861	14254	14258
37	6198	6090	6318	6196	6154
39	10202	10261	10326	10197	10054

La figure 2 présente la représentation des densités de population (à partir des données de recensement de 1990) selon les caractéristiques de bâti (image de 1989/90) avec les coefficients calculés. Les seuils choisis permettent de confronter cette image aux images par carroyage à 250 et 500m (§3.2.1)

Figure 2  
Agglomération de Strasbourg - Densité de population  
(référence INSEE 1990)



Cependant il n'est pas envisageable d'obtenir les mêmes coefficients pour chaque catégorie de bâti quelque soit l'image. En effet, si la permanence des méthodes statistiques est possible avec plus ou moins d'amélioration (voir classification pixel-classification zonale), des variations restent néanmoins réelles. Elles sont le fait de caractéristiques de l'image satellite qu'il n'est pas possible, en l'état actuel des choses, d'éradiquer, tout au plus des améliorations constantes peuvent elles être faites (tableau 6).

Tableau 6  
Comparaison de coefficients

	Images	Traitement	Nbre unités	2 coefficients	R <sup>2</sup>	3 coefficients	R <sup>2</sup> e
1982	XS (10m) 1986	Pixel	81 (RP)	1.279 B12 + .249 B3	.795	.765 B1+ 2.698 B2 - .0085 B3	.809
1982	XS (10m) 1986	Pixel	22 (SA)	1.811 B12 + .0412 B3	.966	1.556 B1 + 2.919 B2 - .019 B3	.969
1982	XS (10m) 1986	Zonale	81 (RP)	1.166 B12 + .164 B3	.914	1.235 B1 + 1.122 B2 +.200 B3	.914
1982	MSS (10m) 1981	Pixel	81 (RP)	1.0273 B12 + .2085 B3	.740	1.0270 B1 + 1.0283 B2 + .2083 B3	.740
1990	XS (10m) 1989-1990	Zonale	48 (RP)			1.358 B1 + 1.295 B2 + .015 B3	.586
Unwin 10 1989	TM (30m) transformé en 10m	Pixel	49 wards	9.89 B12 + 5.03 B3 1.089 B12 + .459 B3	.818		

Ces modes d'obtention des densités urbaines restent associés très fortement au site initial d'étude. En ce sens, ils peuvent être délicats à prendre en considération si la comparaison entre plusieurs sites est nécessaire. Il semble donc intéressant de se pencher sur d'autres types de recombinaison de ces valeurs selon des principes favorisant la reproductibilité (déjà présentés ci-dessus) et la comparabilité des informations.

<sup>10</sup> Ceci sert de référence annexe à nos travaux, l'auteur ayant procédé au même type de traitement sur une image satellite Thematic Mapper.

## Conclusion

---

Cette première approche du concept de densité et des données disponibles nous a conduit à effectuer des choix quant aux termes à retenir et aux indices à élaborer pour tenter une étude plus fine des répartitions de population dans un espace donné.

Les densités résidentielles, seules, seront analysées dans les chapitres suivants, car, ainsi que nous l'avons vu, il n'existe en France aucune statistique en ce qui concerne les relevés de population au lieu de travail dans les derniers recensements. Par ailleurs, si les densités brutes sont quasiment toujours disponibles, malgré les restrictions de la CNIL, la constitution d'indices permettant d'appréhender des densités nettes exige de faire appel à de nouvelles sources de données, à savoir la télédétection. Malgré une certaine variabilité des résultats dont les causes ont été explicitées, *il est certain que les images satellites sont, à l'heure actuelle, un des rares types de documents auxquels on peut avoir accès, pour un coût raisonnable, plus ou moins régulièrement dans le temps*. Les traitements doivent encore être améliorés pour que l'on puisse les utiliser plus complètement et plus couramment.

Ce sont ces indices densitaires, calculés sur l'agglomération strasbourgeoise, selon différentes bases spatiales, et en fonction de diverses pondérations, qui vont être utilisés dans les chapitres ultérieurs aussi bien au niveau de la modélisation que des représentations et analyses cartographiques.



**DENSITÉS URBAINES ET MODÉLISATION**



## Introduction

---

Les densités urbaines ont, comme nous l'avons dit en introduction, fait l'objet de nombreuses recherches sur les modèles à retenir pour décrire leurs caractéristiques en fonction de l'éloignement du centre d'une ville. Dans un premier temps, nous avons tenté de faire un inventaire critique des modèles de structure et de processus "classiques" en nous appuyant sur la littérature, abondante sur ce sujet, dont les principaux titres sont cités dans la bibliographie ci-jointe<sup>2</sup>, et en effectuant les tests correspondants sur un espace précis, à savoir la Communauté Urbaine de Strasbourg (CUS) à différentes dates. Cependant, ayant eu connaissance de l'excellent rapport de S. Berroir, N. Cattan et T. Saint-Julien (1995), ainsi que des travaux de V. Fouchier et P. Merlin (1994), et compte tenu des circonstances dans lesquelles nous effectuons ce rapport, nous n'avons pas jugé utile de recommencer, sans doute moins clairement, ce qui avait déjà été réalisé dans le cadre de l'appel d'offre du Pir-Villes.

Aussi, avons-nous mis l'accent sur trois points distincts mais complémentaires :

- l'approche graphique de la modélisation densitaire, pour laquelle nous ne donnerons cependant que quelques exemples ;
- une classification des répartitions de peuplement appuyée sur des modèles rotatoires, présentée par B. Kostrubiec ;
- une proposition émanant de M. Pruvot, pour un prolongement des modèles de Clark et Newling,

Ces trois volets de la modélisation des densités urbaines seront ainsi exposés successivement, avec l'agglomération strasbourgeoise pour exemple (figure 0), abordée selon le cas à des échelles distinctes.

---

<sup>2</sup> Cette bibliographie a été élaborée essentiellement par R. Schlumberger et K. Gaugler qui ont ainsi réuni, sous forme d'une base constituée sous Hypercard, des références partant de 1951 avec les travaux de C. Clark, pour arriver aux dernières publications, en particulier celles M. Batty et X. Xie en 1994.



## 2.1

### Une approche graphique de la modélisation densitaire

---

*Colette CAUVIN*

*avec la collaboration de Anne-Christine BRONNER*

*Texte préliminaire*

La relation entre les valeurs des densités urbaines et l'éloignement du centre d'une ville, si elle a fait l'objet de nombreuses propositions de modélisations théoriques ou empiriques, peut être appréhendée dans un premier temps par des représentations graphiques très riches d'enseignement. Cependant, selon la base spatiale à partir de laquelle elles sont construites, des variations importantes peuvent apparaître. Aussi convient-il de préciser tout d'abord quelles techniques de construction ont été étudiées et retenues.

#### ■ 2.1.1 Bases spatiales disponibles, adaptées et construites

En effet, lorsqu'on désire appréhender les valeurs des densités selon la distance au centre d'une ville, ce dernier ayant été défini<sup>2</sup>, plusieurs manières de connaître ces valeurs selon le support spatial utilisé sont possibles.

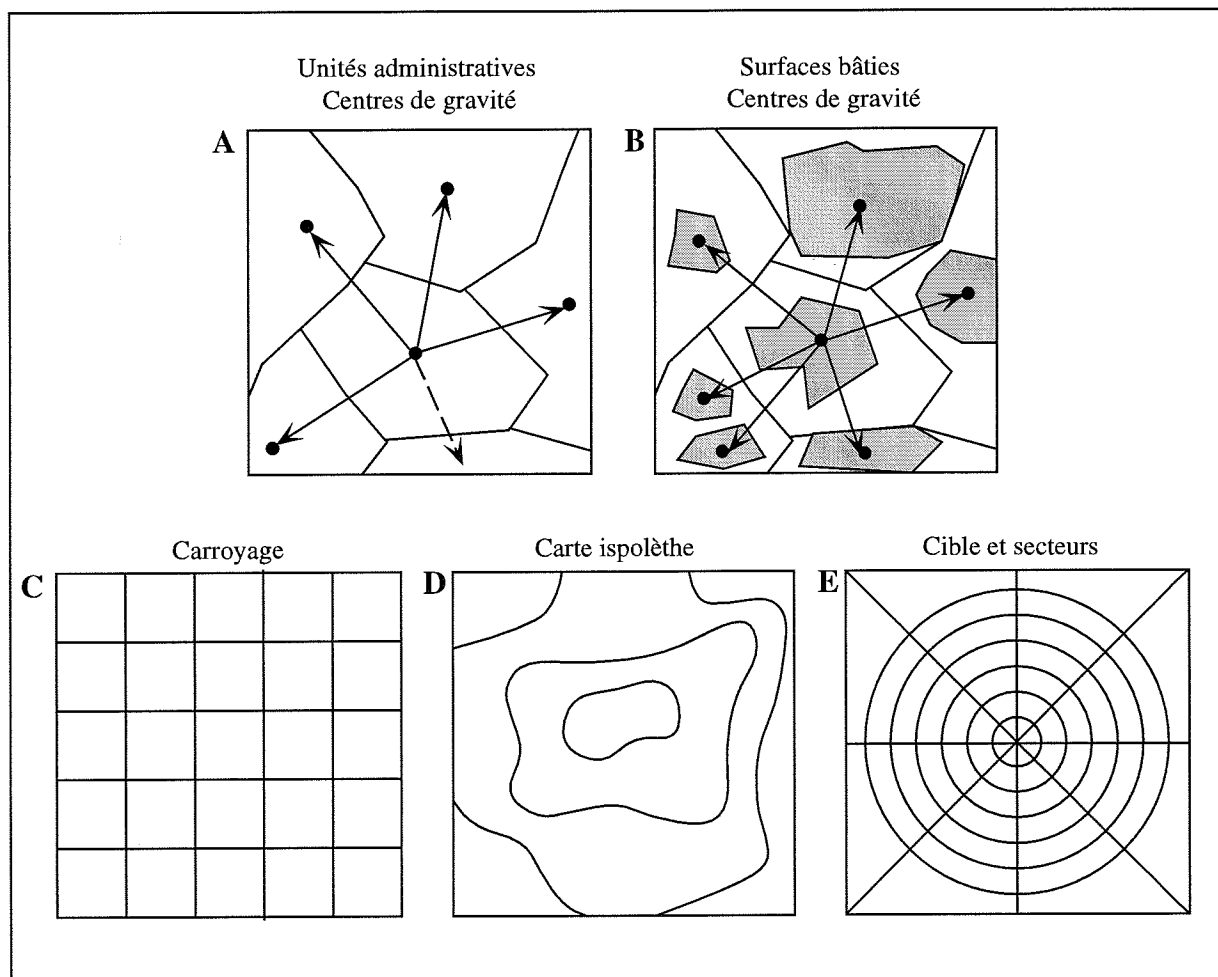
Nous ne disposons, en général, directement que des données de population provenant de l'INSEE (avec toutes les réserves émises précédemment quant à leur validité), attachées à des îlots ou à des quartiers. Dans ce cas, c'est à toute l'unité spatiale qu'est affectée la valeur indiquée, et la densité peut être calculée en rapportant cette quantité à la superficie totale de l'unité, ou la superficie bâtie quand cette information est disponible. Mais le calcul de la distance au centre n'est pas évident car il faut savoir à quel point affecter cette valeur qui caractérise une surface. La solution la plus courante est de retenir le centre de gravité (centre interne) du polygone ; pour des îlots de petite taille, ceci est acceptable ; pour de grands îlots ou des quartiers, il est évident que ce mode de calcul peut introduire des biais. Si l'on ne retient que les surfaces bâties, le choix du centre de gravité est encore plus problématique et des erreurs peuvent en découler (figures 1A et 1B).

---

<sup>2</sup> Le même point central a été retenu à tous les stades de l'étude, à savoir la Place Kléber. En coordonnées Lambert : X = 998.750, Y = 1112.375.

Sans procéder à des transformations cartographiques, aucune solution satisfaisante n'apparaît. Les techniques usuelles sont alors la construction de carroyages, ou de cibles<sup>3</sup> ou encore l'utilisation d'une interpolation. Dans les différents cas, l'ensemble de la surface est ainsi revalué, indépendamment de limites administratives non significatives, et les densités peuvent être obtenues à des distances régulières du centre de la ville retenue (figure 1C, 1D, 1E).

Figure 1  
Bases spatiales et calcul de densité



C. Cauvin

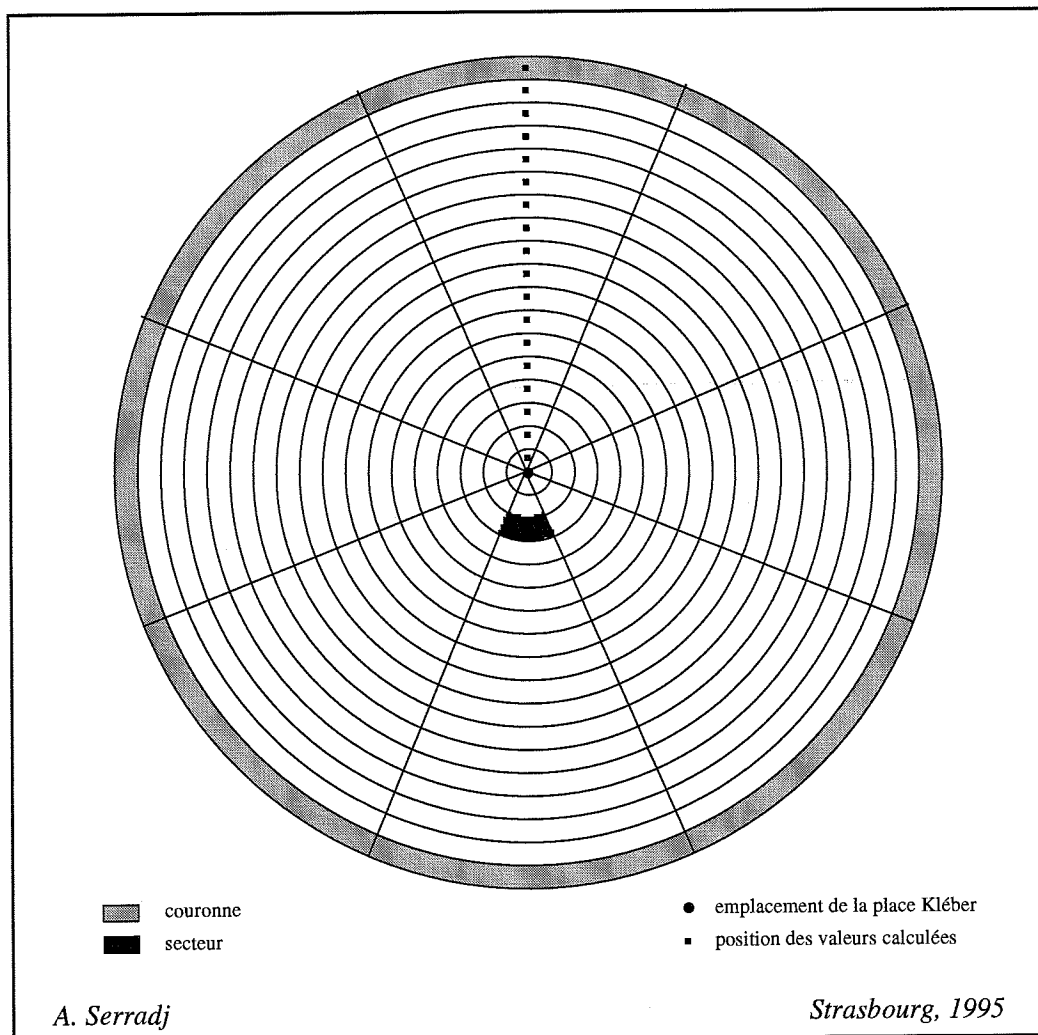
Strasbourg, 1997

Les cibles, formées d'anneaux concentriques centrés sur la place Kléber, ont été ainsi divisées en un nombre variable de couronnes selon le pas retenu, 250 ou 500 m ; elles ont été de plus décomposées en 8 secteurs de 45° (figure 2). Les populations ont alors été évaluées dans chaque portion d'espace formée par l'intersection de secteurs et de couronnes, et les densités associées ont donc été calculées.

De manière similaire, la cible a été appliquée sur une image satellitaire à partir de laquelle les surfaces bâties ont été extraites, et des densités ont été calculées, ainsi que cela a été expliqué dans le chapitre précédent. Seule, la cible, avec un pas de 500 m a été retenue avec 18 couronnes, soit 144 sous-secteurs. Les taux ont été recalculés dans chaque secteur selon la même procédure que pour les densités.

<sup>3</sup> Ces procédés seront décrits dans la troisième partie, lors de l'exposé des représentations cartographiques des densités.

Figure 2  
 Agglomération de Strasbourg - Calcul des pourcentages de bâti au sol  
 Cercle de repérage des auréoles et des secteurs



Il apparaît donc que l'on dispose de diverses valeurs de densité et de distances variables selon le procédé choisi. Dans nos recherches, toutes les techniques ont été testées, mais en raison de l'abondance des documents produits et de l'impossibilité d'en assurer une présentation correcte seuls quelques exemples seront proposés pour chaque type de graphique.

Il est en effet possible de proposer différentes approches graphiques pour mettre en évidence les spécificités des densités à l'intérieur d'une aire urbaine. La principale concerne la relation densité-distance au centre.

### ■ 2.1.2 Approche graphique de la relation densité - distance au centre

Cette approche repose sur *l'hypothèse qu'il existe une relation mathématique entre la densité et la distance à partir du centre-ville. Selon l'ancienneté de la ville, ses particularités physiques et ses fonctions, cette relation varie.*

Tous les graphiques quels qu'ils soient, ont été construits avec en abscisse les distances et en ordonnées les densités<sup>4</sup>.

Nous distinguerons deux grandes familles de représentation :

- les profils et courbes établis à partir de données relevées sur des cartes
- les courbes provenant d'images satellites.

#### ▲ 2.1.2.1. Profils et courbes établis à partir de données cartographiques

Les profils ont tous été construits selon les mêmes tracés établis sur la carte de référence, correspondant aux orientations des secteurs de la cible, et centrés sur la place Kléber. Cependant, divers graphiques peuvent être proposés dont la signification et l'interprétation se complètent.

##### □ 2.1.2.1.2. Des profils associés aux limites administratives

La première série de profils a ainsi retenu les limites des unités administratives (ici les quartiers) et non les centroïdes ; de ce fait, les distances, sur l'axe des abscisses, sont irrégulières et les graphiques ressemblent quelque peu à des histogrammes. Ils sont présentés pour chaque date, soit "à plat" (figure 3), soit en perspective (figure 4) selon quatre orientations.

Ce type de graphique donne une idée de la variation des densités avec l'éloignement du centre-ville en prenant partiellement en compte l'étendue des unités administratives. Il est évident que le choix du tracé des profils peut modifier grandement les résultats. Cependant, cette représentation largement utilisée par J. Szegö (1994), est intéressante dans le cas d'étude diachronique où les entités spatiales sont comparables<sup>5</sup>, car ces entités sont identifiables et donc interprétables géographiquement.

Si l'on utilise la densité avec les surfaces bâties au dénominateur de l'indice, la représentation est identique, mais si l'on veut tenir compte des discontinuités du bâti, la construction est malaisée et les résultats apparaissent peu satisfaisants à ce stade de l'étude.

Une variante a été proposée où le graphique a été construit en relevant les densités selon des distances régulières, mais on peut se demander ce que signifie une densité relevée à une distance fixe sur une carte choroplèthe où les unités sont contiguës, mais où la construction traduit un phénomène discontinu. L'utilisation de données par îlots biaise moins les graphiques, mais après tests, il semble que cette solution soit à abandonner, au moins pour l'instant.

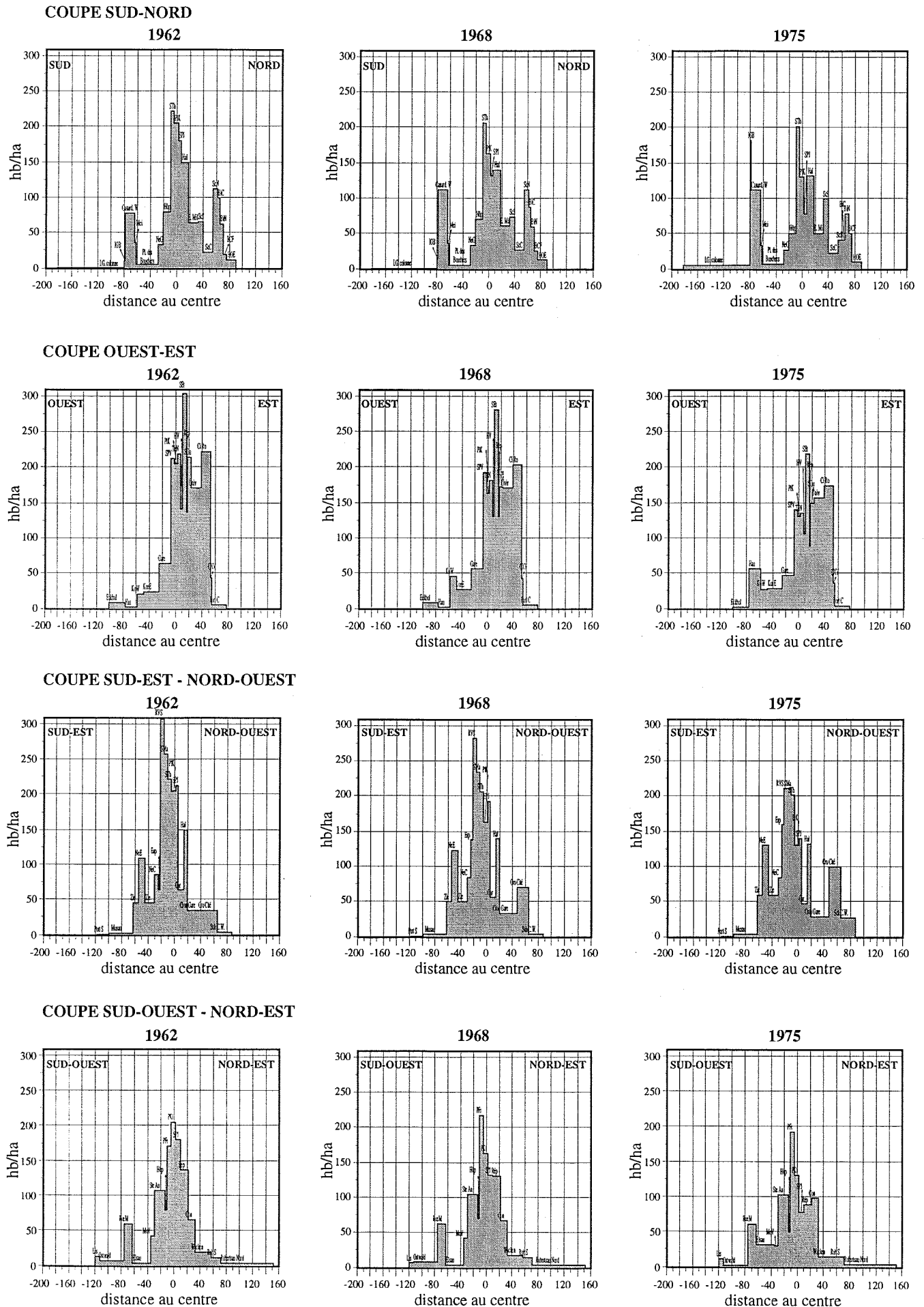
<sup>4</sup> Etant dans l'impossibilité matérielle de présenter tous les résultats obtenus, désormais, en quelques lignes brèves, nous présenterons la technique adoptée, accompagnée selon le cas d'un ou de plusieurs graphiques.

<sup>5</sup> Les limites des quartiers de Strasbourg ont été harmonisées pour tous les recensements de 1962 à 1990.



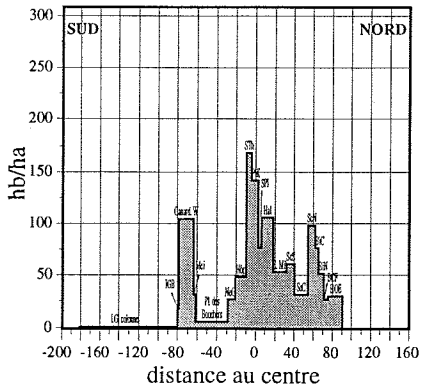
Figure 3

Agglomération de Strasbourg - Profils densitaires. Relation distance au centre - densité résidentielle brute

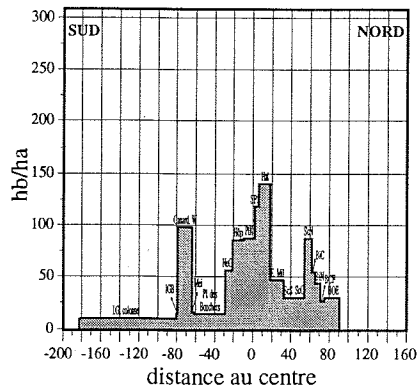


**COUPE SUD-NORD**

1982

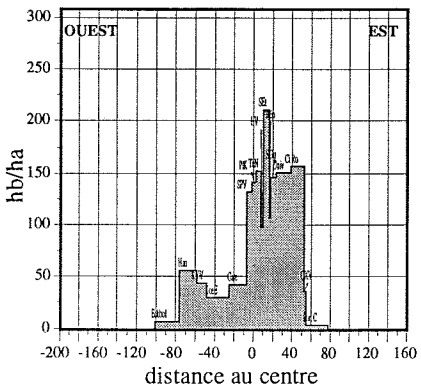


1990

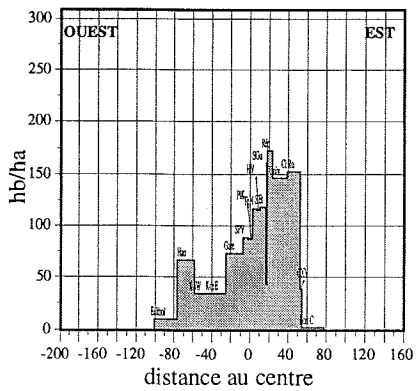


**COUPE OUEST-EST**

1982

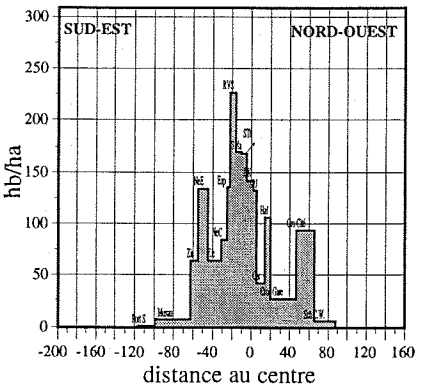


1990

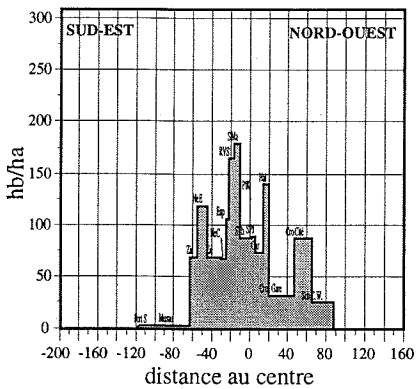


**COUPE SUD-EST - NORD-OUEST**

1982

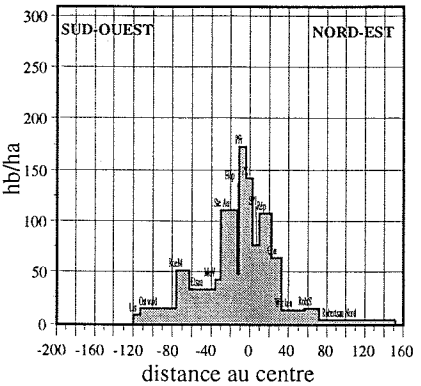


1990



**COUPE SUD-OUEST - NORD-EST**

1982



1990

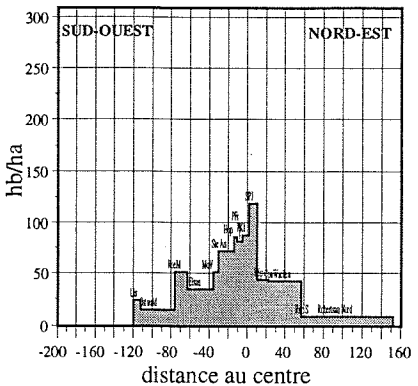
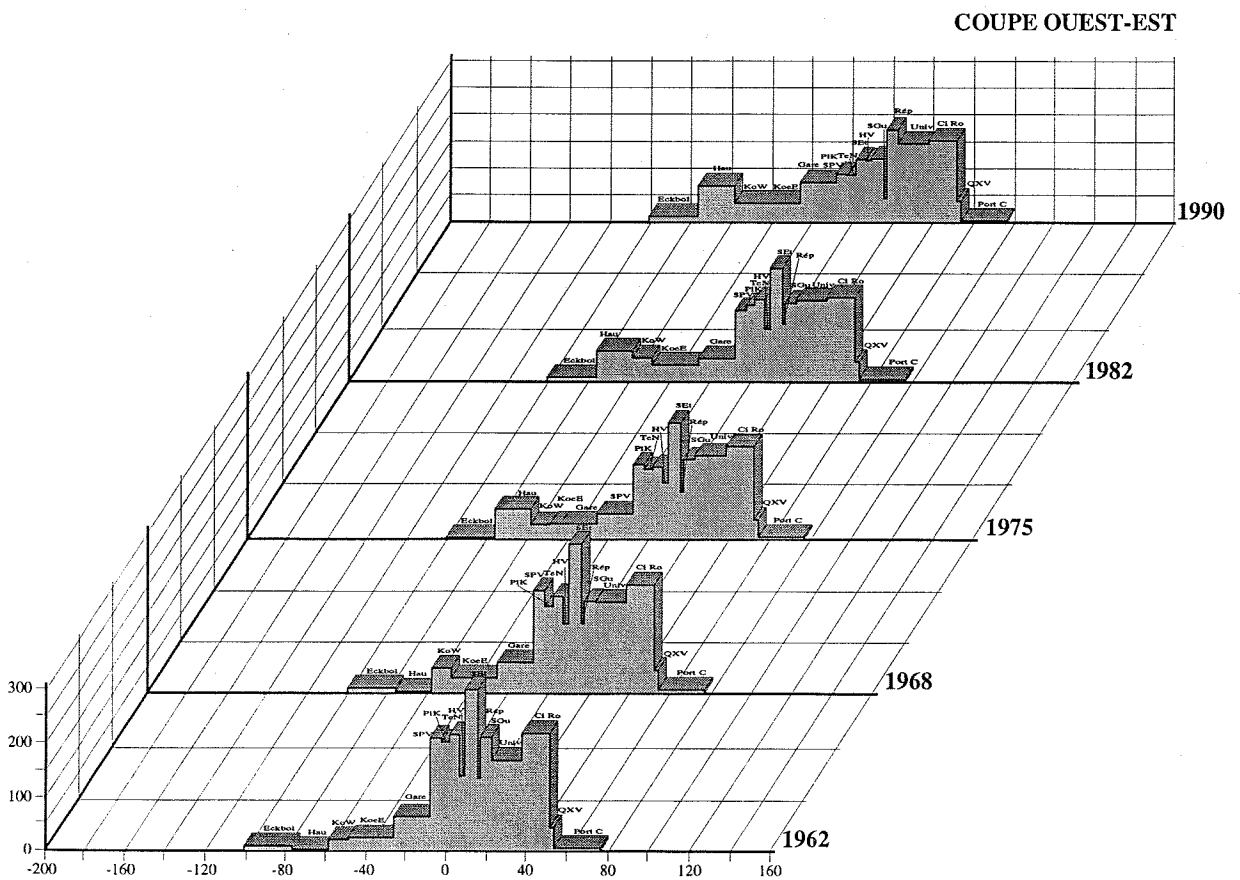
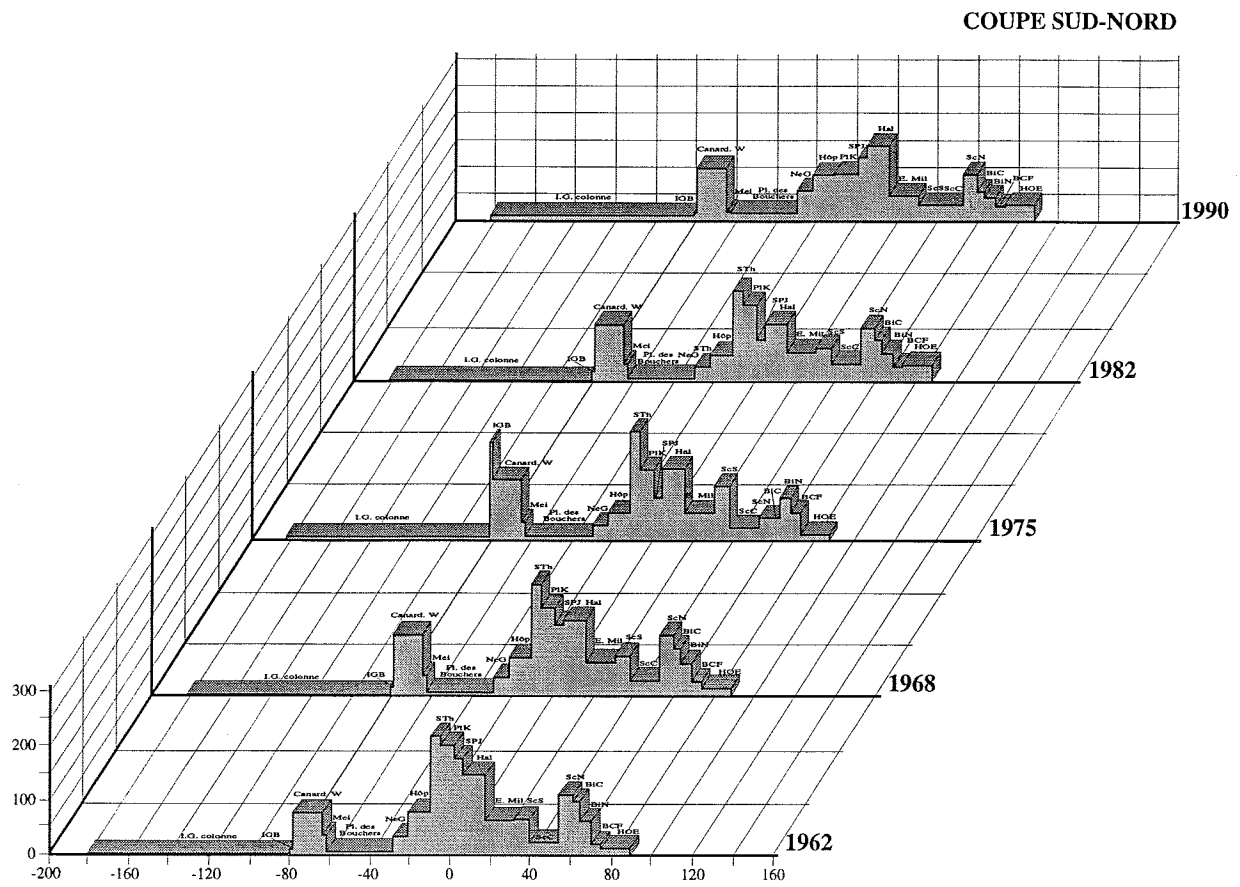


Figure 4  
 Agglomération de Strasbourg - Profils densitaires. Relation distance au centre - densité résidentielle brute





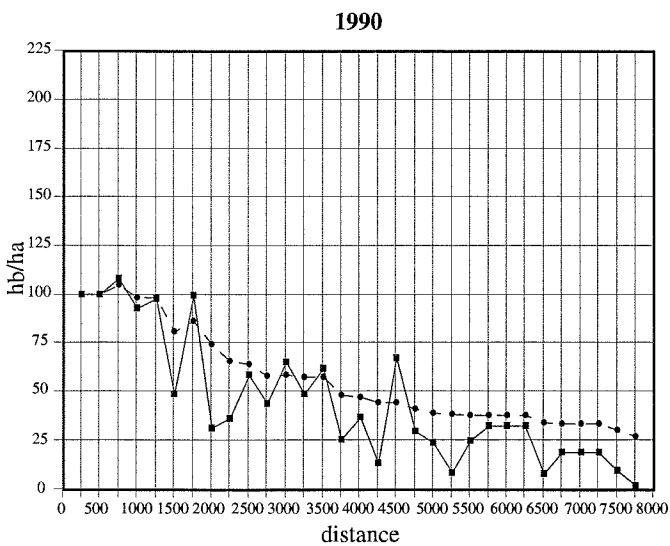
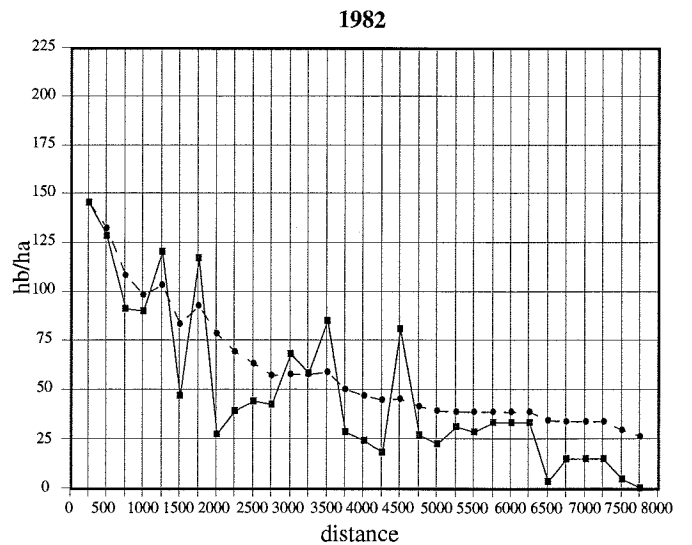
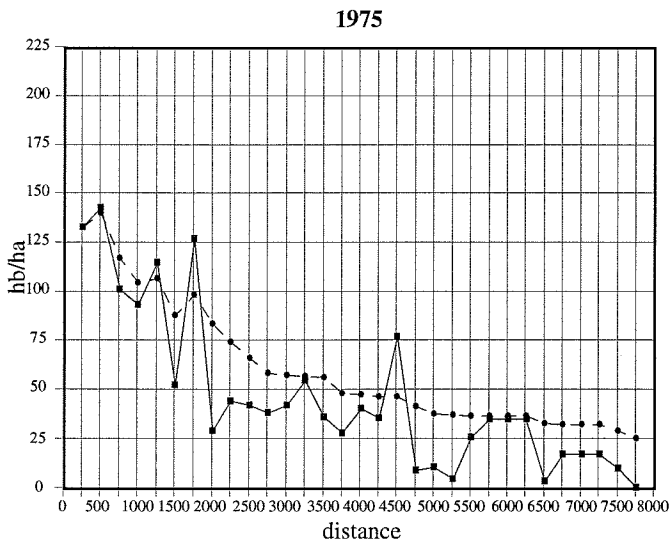
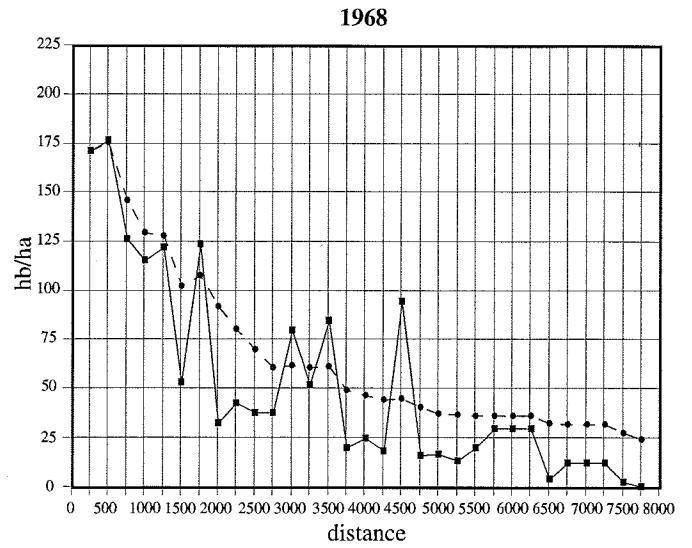
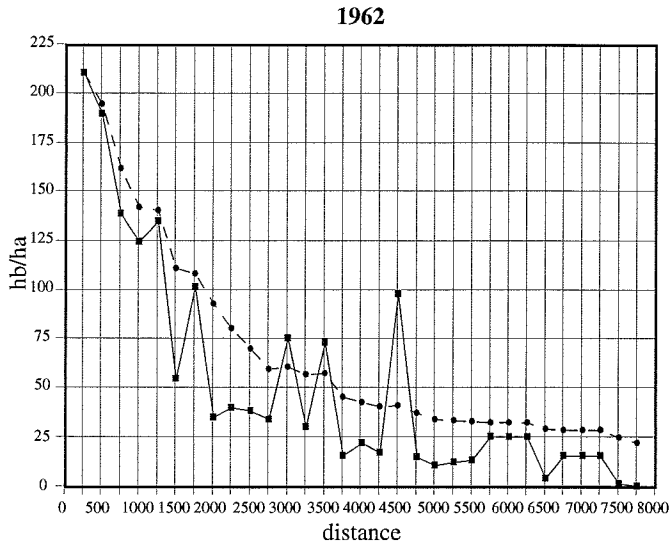
---

Ce type de graphique donne de très bons résultats et fournit une image indiquant le type de fonction à utiliser. Il est bien évident que la représentation qui, sur un support arithmétique, a une forme d'hyperbole la plupart du temps, peut être effectuée sur d'autres supports, permettant de redresser la courbe, en particulier des papiers semi- ou bi-log.

#### □ 2.1.2.1.2. Profils établis sur une base "carroyée"

Enfin des graphiques analogues peuvent être construits sur des cibles placées sur des cartes en carroyage. Le principe est le même, mais la base d'informations est différente, les populations ayant été ventilées selon des mailles égales, de 250 ou 500 m de côté. Une seule figure est présentée sur la base d'un carroyage de 500 m, seul significatif pour des données associées, initialement, à des quartiers ; elle permet de mettre en évidence la forme de la courbe représentative de la relation entre les densités et la distance au centre de la ville (figure 7). On peut noter que la décroissance semble être de moins en moins accentuée de 1962 à 1990.

Figure 6  
 Agglomération de Strasbourg - Relation distance au centre - densité résidentielle brute  
 Tranches de 250 m





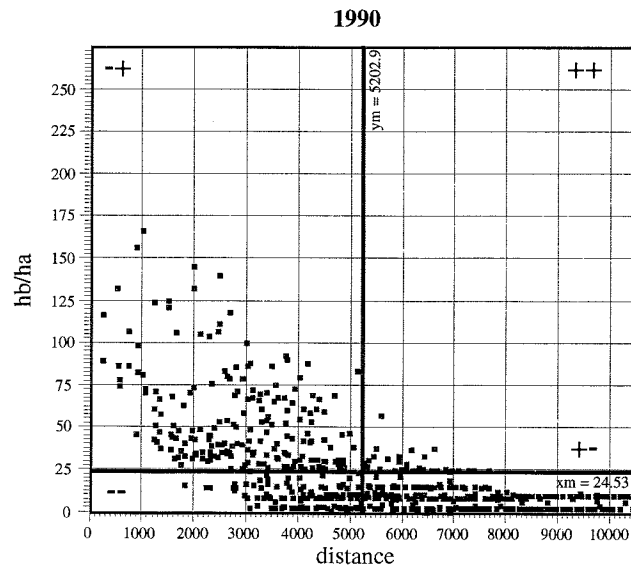
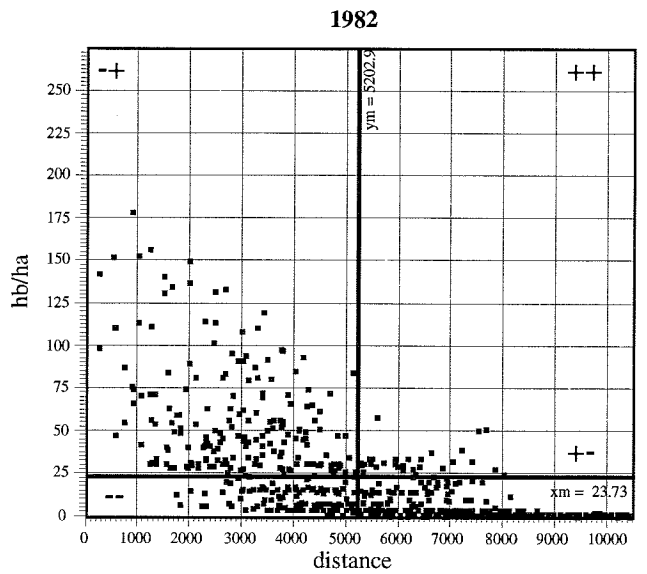
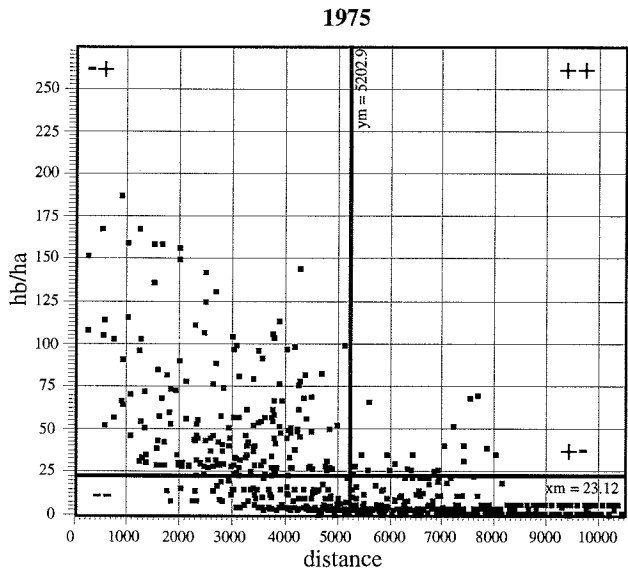
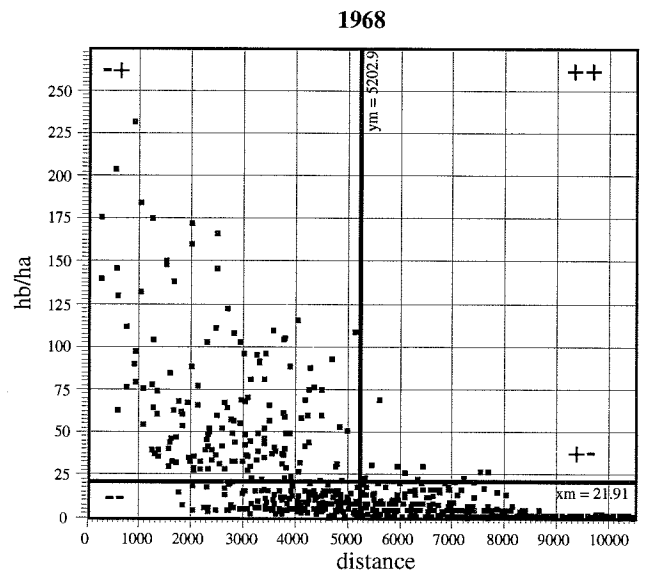
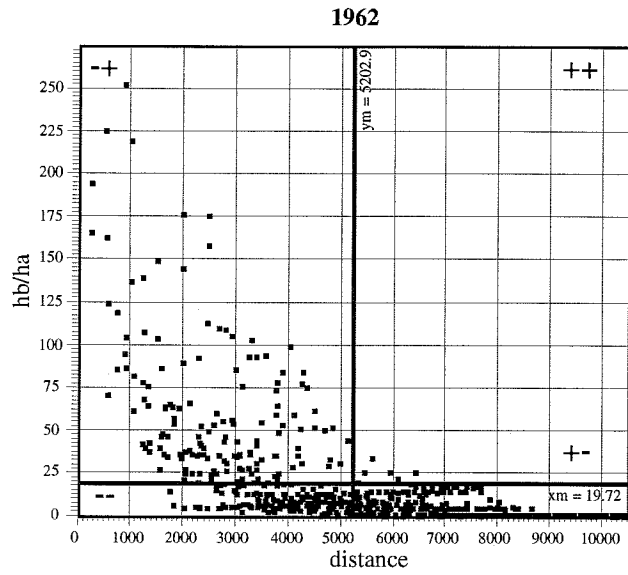
 densités cumulées par tranche à partir du centre  
 densités cumulées par tranche

Figure 7  
 Agglomération de Strasbourg - Carroyage au pas de 500 m. Méthode des quadrants  
 Relation distance au centre - densité résidentielle brute



### ▲ 2.1.2.2. Courbes établis à partir de données satellites

C. Weber, J. Hirsch, A. Serradj

Pour faciliter la comparabilité des informations en analyse spatiale il est souvent intéressant de s'abstraire du référentiel de représentation et de plaquer une organisation spatiale neutre permettant traitements statistiques et représentation.

Le parti pris ici, réside dans la possibilité d'intégrer des plans différents calés sur un même référentiel de positionnement, qui puisse tenir compte des données de localisation de la population (le bâti résidentiel), des densités calculées selon les partitions de la forme neutre choisie. La cible multidirectionnelle (12 anneaux et 8 secteurs) utilisée permet ainsi d'obtenir des courbes de valeurs de densités selon les directions (courbes densimétriques) et selon un pas de distance au centre (anneaux : 500m) après un calcul pas à pas des densités de population localisées selon le bâti.

Les disparités déjà visibles dans les figures présentées dans le chapitre précédent sont soulignées dans la figure 8 b, où l'on retrouve les espaces de faibles densités autour de l'espace central (centre insulaire plus la partie de la ville développée sous l'occupation allemande et comblée dans les années 70 - Esplanade) liées à des espaces industriels, portuaires, ferroviaires ; puis des zones de plus ou moins fortes densités vers le sud avec des faubourgs anciens (Neudorf, Meinau, Neuhof) et vers le nord selon la succession des communes de Schiltigheim, Bischheim et Hoenheim. A l'ouest, s'identifient les zones de cités et les noyaux denses des communes avoisinantes.

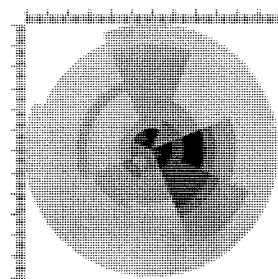
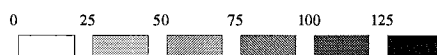
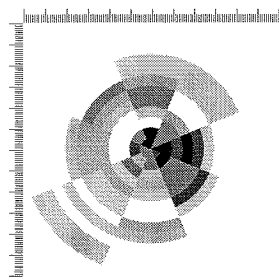
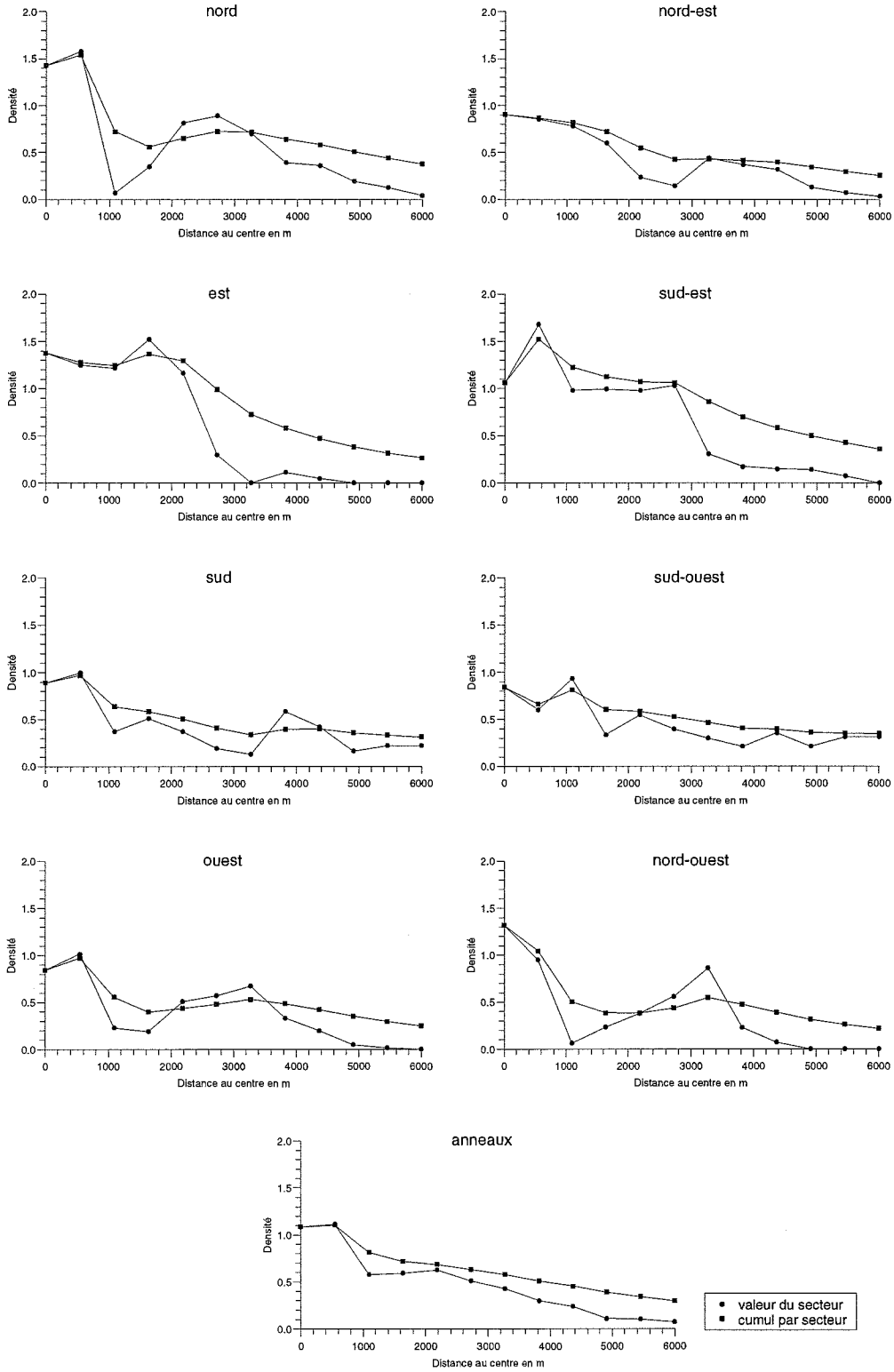
La figure 8 a confirme, par la physionomie des courbes densimétriques obtenues, ces ruptures avec une visualisation plus claire : au nord, l'emprise ferroviaire et les zones du marché-gare, à l'est, la présence du Rhin, au sud-est, le plateau engendré par les fortes densités des quartiers des universités et des anciens faubourgs, etc. Un résumé très parlant peut être visualisé par la figure 8 c, où le cumul calculé des densités par pas de distance rend bien présent cette forte présence de population à l'est et au sud-est par rapport à une auréole de densités quasiment homogènes pour le reste de la ville. A noter l'arc des cités d'Hautepierre et de Cronembourg qui se détachent.

Ainsi, l'image utilisée dans un contexte de définition des densités urbaines s'avère-t-elle tout à fait probante en terme de source d'information et, qui plus est, intéressante pour solutionner des problèmes importants de partitionnements hétérogènes. De plus, la structure maillée de cette information permet des approches nouvelles de réorganisation des valeurs thématiques. Leur reproductibilité facilite les comparaisons de situation, ce qui n'est pas le cas de la plupart des méthodes utilisées à l'heure actuelle. Divers travaux ont permis de tester cette approche dans le cadre de la détermination de l'agglomération urbaine par l'intermédiaire d'une zone morphologique urbaine extraite de l'image satellite (Weber, 1995 ; Weber et al., 1996), ou dans la mise au point d'un panel de méthodes applicables à l'espace urbain pour sa délimitation et sa caractérisation (Weber et al., 1995). Cette méthode de réorganisation de valeurs, que ce soit pour le bâti ou la population, s'avère très prometteuse dans le cas de comparaisons soit diachroniques, soit entre sites urbains.

Tous ces graphiques, quelle que soit la date, montrent à des degrés divers pour l'agglomération strasbourgeoise, la même tendance "classique", à savoir une décroissance des valeurs densitaires à partir du centre, dont la forme mathématique peut être analysée et décrite par des modèles. Cependant, des graphiques complémentaires permettent de mieux comprendre la relation entre les différentes composantes des densités.

Figure 8

Agglomération de Strasbourg 1990 - Courbes directionnelles des densités de population



### ■ 2.1.3 Des graphiques complémentaires pour l'interprétation

Certains graphiques peuvent servir à appréhender la relation entre l'indice densitaire et ses composantes et constituent ainsi une aide à l'interprétation. Nous en distinguerons, essentiellement, trois :

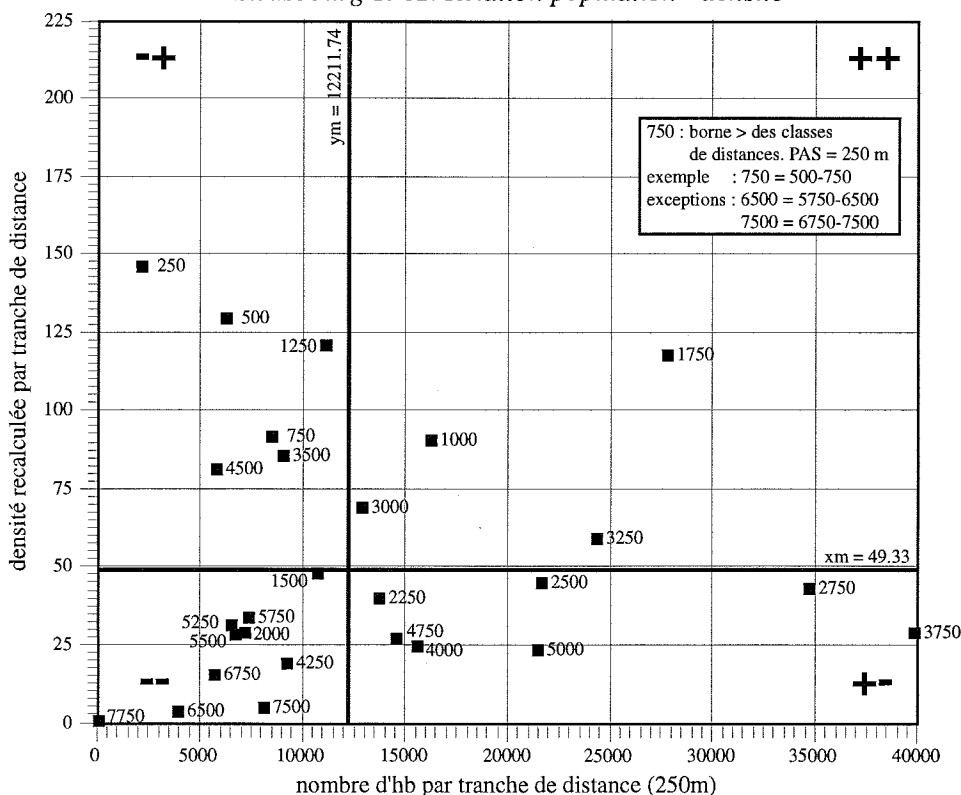
- les premiers mettent en relation la densité avec la population,
- les seconds associent la densité à la surface,
- enfin, les derniers montrent la liaison entre les deux composantes de la densité, les populations et les surfaces.

#### ▲ 2.1.3.1. Densité et population

L'analyse de la relation entre la densité et la population correspond à l'hypothèse que par auréole de distance, il existe une relation décroissante entre la densité et la population.

Le graphique se construit en plaçant, en abscisse, la population, et, en ordonnée, les distances (figure 9).

Figure 9  
Strasbourg 1982. Relation population - densité



C. Cauvin, A.C. Bronner

Strasbourg, 1996

Son interprétation s'effectue aisément en définissant des quadrants de moyennes dont la lecture est la suivante :

- quadrant I (++) Population et densité sont supérieures à la moyenne. On rencontre, dans ce groupe, des unités des quartiers péri-centraux ou centraux.
- quadrant II (-+) La population est inférieure à la moyenne, mais la densité est forte. Ces unités sont alors de petites surfaces et se trouvent soit au centre de la ville, soit au coeur de communes anciennes.
- quadrant III (+-) La population est supérieure à la moyenne, mais la densité est faible. Ceci signifie que l'unité spatiale est grande comparativement à sa population.
- quadrant IV (-- ) La densité est inférieure à la moyenne de même que la population. Il s'agit en général de communes périphériques.

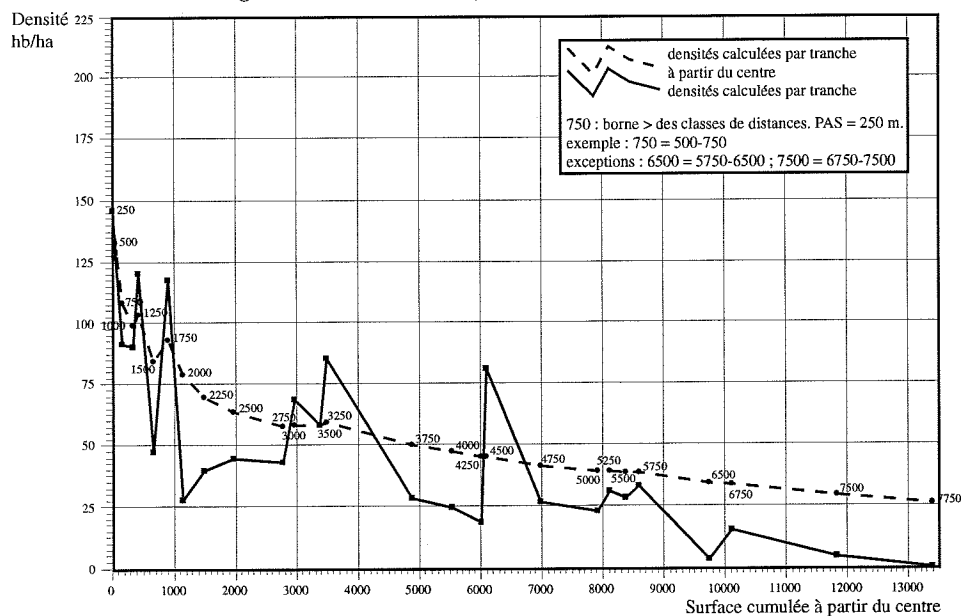
Un graphique reposant sur les mêmes données peut être construit selon les pas de distance. Il s'interprète moins facilement au niveau des lieux ; il sert, essentiellement, pour une analyse de la tendance générale de la liaison.

#### ▲ 2.1.3.2. Densité et surface

La représentation simultanée des densités et des surfaces repose sur l'hypothèse que par classe de distance, il existe une relation décroissante entre la densité et la surface.

Le graphique se construit, dans ce cas, avec en abscisse les surfaces et en ordonnée les densités recalculées à nouveau par pas de distance. Les graphiques réalisés (figure 10) tendent à montrer que la surface influencerait plus fortement dans la forme générale de la courbe distance - densité que la population, mais ceci reste à vérifier mathématiquement.

Figure 10  
Strasbourg 1982. Relation surface - densité par tranches de 250 m



### ▲ 2.1.3.3. Population et surface

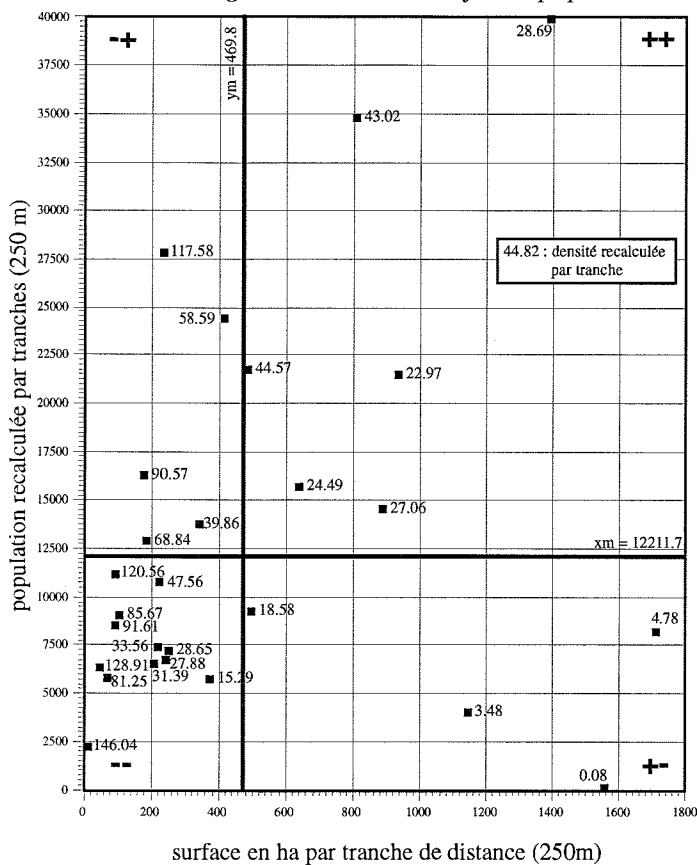
Ce graphique prend en compte les deux composantes de l'indice de densité et permet de vérifier *l'hypothèse qu'il existe une relation croissante entre la population et la surface, et de plus, une concentration de la population sur une part faible de la surface de l'agglomération.*

Le graphique, avec en abscisse les surfaces par tranche de distance et en ordonnée les populations, se présente soit comme un graphique de dispersion à interpréter selon la méthode des quadrants de moyenne, soit comme une courbe cumulative, soit encore comme une courbe similaire à la courbe de Lorenz si les données sont transformées en pourcentage (figures 11a, 11b, 11c).

Ces différents graphiques permettent une meilleure interprétation des densités et préparent au choix des modèles à tester, mais ils demeurent une simple approche visuelle de la modélisation, et une formalisation mathématique est indispensable pour aller au-delà d'une description élémentaire, ce que proposent les deux chapitres suivants.

Figure 11a

Strasbourg 1982. Relation surface - population

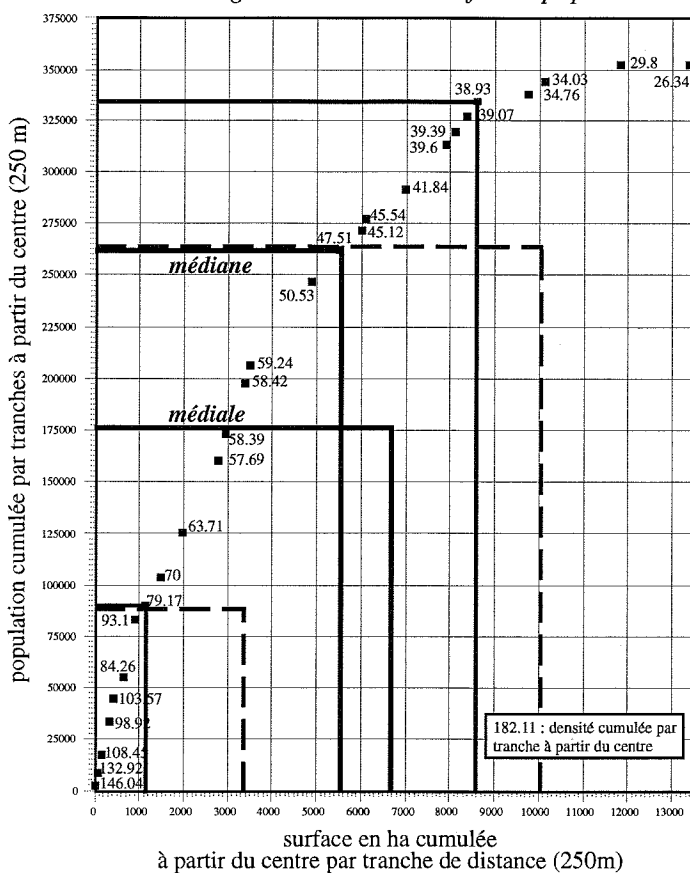


C. Cauvin, A.C. Bronner

Strasbourg, 1996

Figure 11b

Strasbourg 1982. Relation surface - population

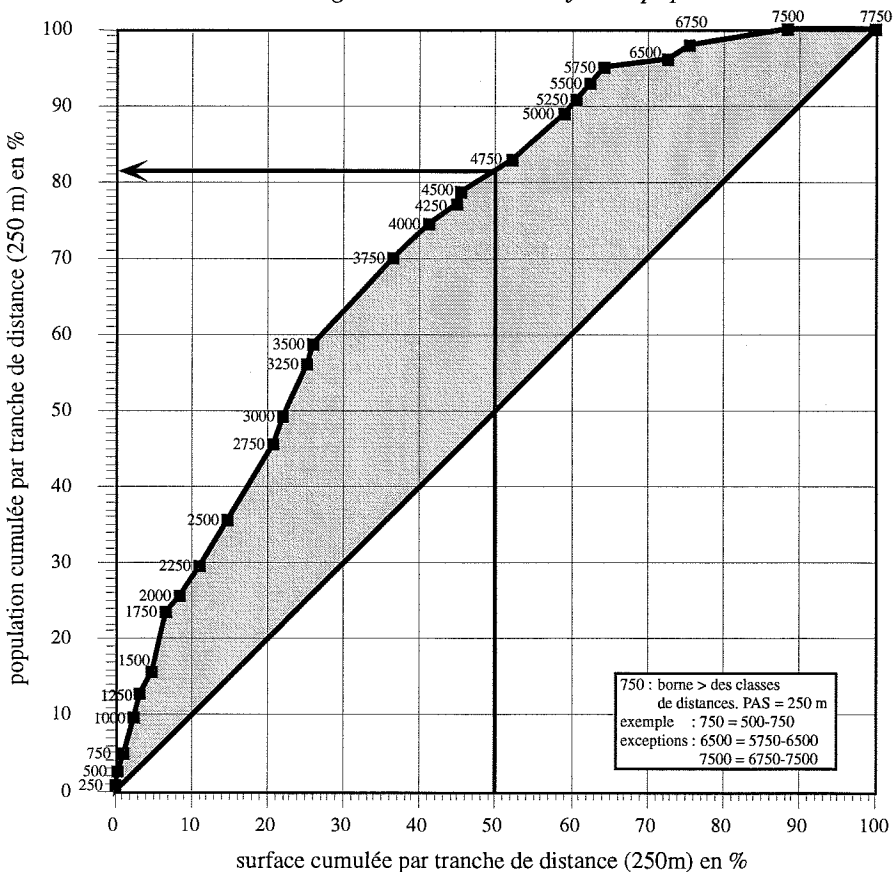


C. Cauvin, A.C. Bronner

Strasbourg, 1996

Figure 11c

Strasbourg 1982. Relation surface - population



C. Cauvin, A.C. Bronner

Strasbourg, 1996

## 2.2

### Description des répartitions de densité à l'aide de modèles rotatoires

---

*Benjamin KOSTRUBIEC*

Le but de ce texte consiste à présenter une nouvelle méthode de description des répartitions du peuplement des villes à l'aide de modèles rotatoires. Les modèles classiques exigent un travail décourageant pour estimer la population résidente à l'intérieur d'un découpage administratif ou artificiel de la ville. Ils réduisent le nombre de villes qui se prêtent à la modélisation et conduisent à une trop grande distortion entre les valeurs estimées et la réalité qu'ils décrivent. La technique décrite ici, premièrement, dispense de la tâche du dénombrement, deuxièmement permet d'inclure chaque ville, sans exception, à la modélisation de la densité urbaine et troisièmement, autorise l'application de tout modèle connu.

Nous commençons par une *description de la ville dans un espace tridimensionnel*. Ensuite, nous dressons une typologie des villes selon la nature du gradient de la densité. Strasbourg, ville difficilement modélisable est prise comme exemple pour appliquer les différents modèles classiques et comparer les résultats au modèle élaboré dans ce texte.

*Description de la fonction de la population urbaine globale d'une ville à centre unique et de sa différentielle dans un système de coordonnées polaires.*

Placer le centre unique **C** d'une ville à l'origine du système de coordonnées polaires **C(R,β,D)** autorise la rotation du profil de densité autour de l'axe **Z=D** et permet de décrire toutes formules dans le même langage formel.

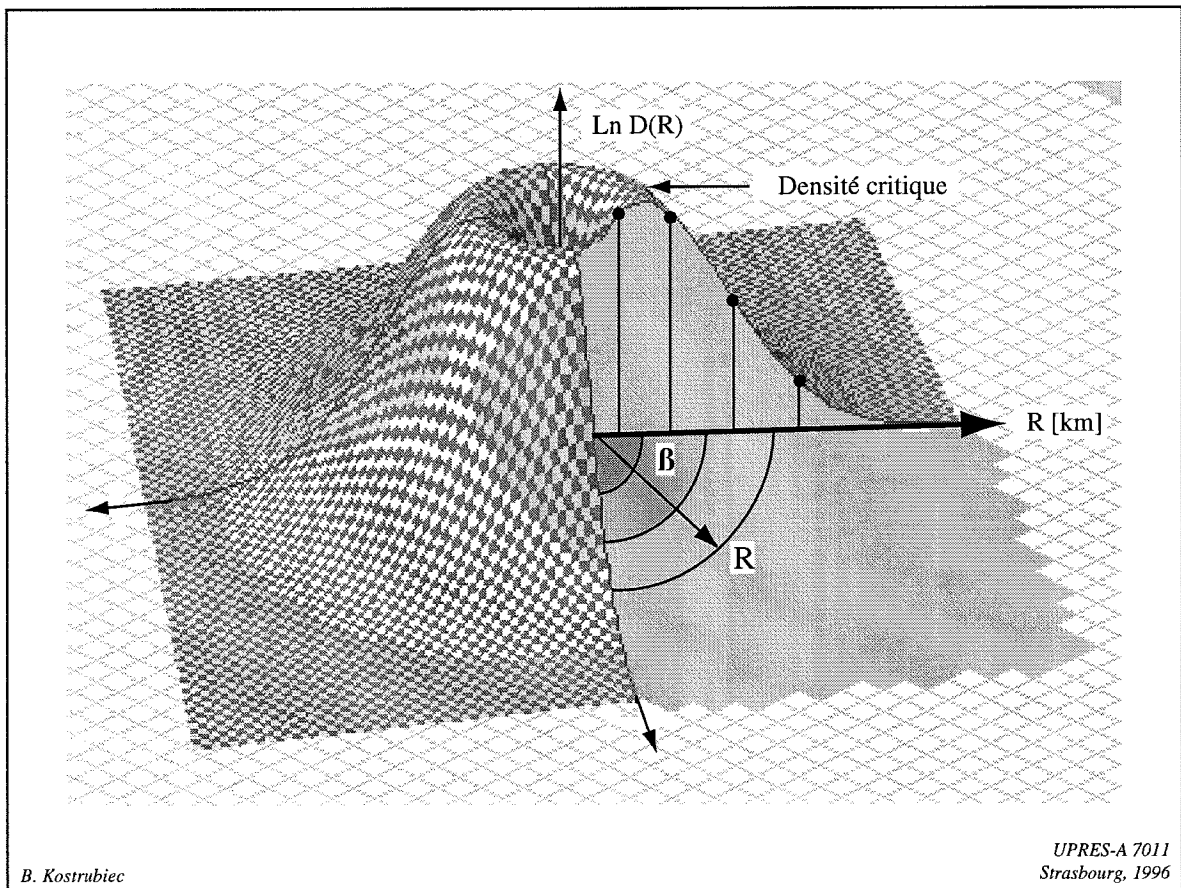
Une ville statique à centre unique est caractérisée par l'existence d'un point **C** où la densité de la population **D<sub>c</sub>** atteint son maximum. Par convention, on admet **CX** comme l'axe principal du système,  $\beta$  comme l'angle d'inclinaison du vecteur-rayon **CR** sur **CX** et **CY = P** comme échelle de valeur **P** (population urbaine résidente) ou **CY = D** comme densité **D** (figure 1).

Les trois coordonnées circonscrivent un espace délimité par les valeurs :

$$C = 0 \leq R \leq \lim R, \quad \text{l'angle } 0 \leq \beta \leq 2\pi \quad \text{et la population } P \geq 0.$$

$\lim R$  dessine une courbe polaire fermée qui constitue l'extrême limite de la ville et qui circonscrit un espace auréolé, considéré comme isotrope.

Figure 1  
Surface de révolution de la fonction exponentielle de la densité urbaine



Dans l'espace  $(R, \beta, D)$ , le nombre d'habitants  $P$  résidant dans la limite de la courbe fermée  $(\text{Lim } R)$  est décrit par la fonction :

$$P(R) = 2\pi \int_0^R D(R, \beta) R \, dR = 2\pi D_0 \int_0^R e^{-TR} R \, dR = 2\pi D(R, \beta) T^{-2} [1 - (1+TR) e^{-TR}]$$

$T(R, \beta)$  représente le gradient centre-périphérie. Il exprime la décroissance de la densité de population le long d'un rayon  $\beta$  arbitrairement choisi et correspond à une fonction continue non négative  $T(R, \beta) \geq 0$ .  $T$  est la dérivée partielle logarithmique de la densité par rapport à l'éloignement du centre  $T(R, \beta) = \frac{\partial \ln D}{\partial R} \geq 0$

La valeur absolue du gradient  $T(R, \beta)$  est la mesure de la concentration des isolignes du champs de densité. Les isolignes les plus serrées désignent les pentes les plus escarpées.

La différentielle de la fonction  $P = \frac{dP(R)}{dR}$ , constitue un outil d'analyse de la densité sur la population urbaine  $P$ . Elle indique le changement induit par la variable dépendante  $R$  dans  $P$ .

Les notions introduites ci-dessus sont employées comme un outil formel normalisé dans le but de dresser une typologie de modèles de densité urbaine, modèles analysant la répartition décroissante et centrifuge de la densité de la population résidentielle urbaine.

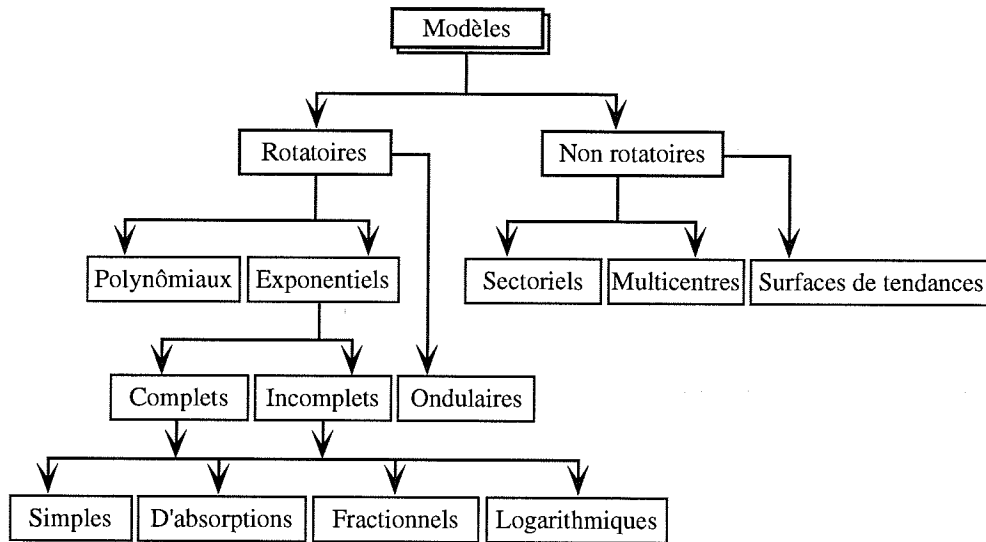
### ■ 2.2.1 Typologie des modèles de densité urbaine

La nature de la répartition spatiale du gradient  $T(R, \beta)$  permet de proposer une classification de villes à centre unique. Deux catégories de  $T$  peuvent être distinguées : les  $T$  constants et les  $T(R, \beta)$  variables. Le  $T$  est dit "constant", lorsqu'il est indépendant de l'azimut et  $T(R, \beta)$  est dit "variable" dans le cas contraire. La branche variable de  $T$  peut être enrichie si l'on considère la complexité de la fonction : d'une part, les fonctions  $T$  simples linéaires, d'autre part les fonctions  $T$  complexes curvilignes. En résumé, trois types de  $T$  sont possibles :  $T$  constant,  $T$  variable simple et  $T$  variable complexe.

Différents modèles de variations de la densité moyenne  $D(R)$  en fonction de la distance du centre de l'agglomération ont été élaborés. Ils peuvent être décomposés en deux groupes (voir schéma ci-dessous). Les premiers, les modèles rotatoires sont obtenus par rotation d'une fonction autour de l'axe de symétrie  $CD$ . Les seconds, les modèles non rotatoires, de genèse différente, comprennent des modèles à forme plus naturelle, plus accidentée, que l'on ne peut pas soumettre à la rotation sans déformer leur aspect spécifique par rabotage.

Les modèles rotatoires constituent la branche principale de l'arbre hiérarchique présenté ci-dessous. Ils se subdivisent en deux classes distinctes, les modèles polynomiaux et les modèles exponentiels. Dans les limites de ce texte, seuls les modèles rotatoires, ou ceux qui peuvent le devenir vont être traités. L'essentiel sera consacré aux modèles rotatoires exponentiels.

Figure 2  
Classification des modèles de densité urbaine



B. Kostrubiec

Strasbourg, 1996

### ▲ 2.2.1.1 Revue des modèles

Dans les paragraphes suivants, nous exposons une revue de modèles, présentés sous une forme normalisée, donc facilement comparables. Nous les soumettons à l'expérimentation et les ordonnons dans l'ordre de qualité, du moins au plus fidèles à la "réalité". Le test consiste à dresser un faisceau de graphiques concernant Strasbourg pour cinq dates retenues. La qualité du modèle est mesurée selon la valeur des sommes des carrés des écarts entre la valeur théorique obtenue par la modélisation et la valeur empirique. Faute de place, seules quelques expérimentations les plus pertinentes ont été présentées. Pour les autres cas, de brèves conclusions sont exposées.

#### □ 2.2.1.1.1 Le type général

Le type général se caractérise par l'exigence  $T(R,\beta) \geq 0$ , ce qui signifie que dans tous les sens et pour tout éloignement du centre, les changements ponctuels de la tendance  $T(R,\beta)$  sont admis. L'équation pour ce genre de villes prend la forme :

$$D(R,\beta) = D(C) e^{-T(R,\beta)} + \text{Résidus}$$

Tous les modèles "distance-densité", comportent deux paramètres  $D(C)$  et  $T(R,\beta)$ , dont chacun a une signification pertinente et précise.

Pour que la fonction de répartition soit une fonction de probabilité, il est indispensable de diviser l'intégrale  $V(x,\beta)$  par le volume de la forme  $V(R,\beta)$ .

$$\frac{V(x,\beta)}{V(R,\beta)} = \frac{\int_{-R}^x \int_0^{2\pi} D(R,\beta) dx d\beta}{\int_{-R}^R \int_0^{2\pi} D(R,\beta) dx d\beta} \leq 1$$

#### □ 2.2.1.1.2. Modèles polynômiaux

Les modèles et sous-modèles polynômiaux sont classés en fonction du degré  $n$  du polynôme  $T(n)$  :

A/ linéaire	$n = 1$	$\implies T_R(1) = a_0 + a_1r$
B/ quadratique	$n = 2$	$\implies T_R(2) = a_0 + a_1r^1 + a_2r^2$
C/ cubique	$n = 3$	$\implies T_R(3) = a_0 + a_1r^1 + a_2r^2 + a_3r^3$
D/ de degré $n$		$\implies T_R(n) = \sum_{i=0}^n a_i r^i$

Toutefois, les densités de population se prêtent assez mal à ce type de modèle. Comme l'ont déjà remarqué Y. Guermond et A. Leduc (1980) sur l'exemple de la Haute Normandie, les pourcentages d'explication des surfaces de tendances pour le peuplement sont médiocres. L'utilisation des surfaces de degré plus élevés n'améliorent guère cette explication. Pour cette raison, les chercheurs ont recours à des modèles rotatoires exponentiels, bien que leur représentation cartographique soit moins appréciée.

#### □ 2.2.1.1.3. Modèles rotatoires exponentiels et modèles qui peuvent les devenir

La plupart des modèles rotatoires exponentiels peuvent être représentés sous la forme d'une fonction spécifique, que l'on nomme par convention le type général. La fonction du type général de second degré peut être exprimée de façon suivante :

$$D(R,\beta) = \exp[-(T(R,\beta))] = \exp(-\sum a_i r^i) = \exp[-(a_0r^0 + a_1r^1 + a_2r^2)],$$

$D(R,\beta)$  correspond à la densité brute moyenne (l'aspect passif ou nocturne du peuplement) d'un disque ou d'une couronne de rayon moyen  $R$  et d'angle  $\beta$ . La constante  $D_0 = e^{-a_0}$  représente la densité théorique de la population résidente au centre  $C(0,0)$  (condition initiale pour  $r = 0$ , obtenue le plus souvent par extrapolation).  $T(R,\beta)$  se rapporte au taux exponentiel de décroissance de la densité en fonction de la direction et de la distance au centre. Toutes fonctions doivent être décroissantes, si et seulement si  $D_0 > 0$  et  $T(R) < 0$ . Quant à l'exposant  $[-(a_0r^0 + a_1r^1 + a_2r^2)]$ , il est composé d'une famille de polynômes, dans lequel les paramètres du trinôme ou du quadrinôme ne peuvent pas être, évidemment, simultanément nuls :  $(a_0^2 + a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 \geq 0)$ .

Tout modèle résulte d'une combinaison possible de monômes  $a_i r^i$ . Le nombre de monômes  $a_i \geq 0$  permet de proposer une sous-typologie de modèles de répartition de la densité urbaine. Si tout  $a_i \neq 0$ , le modèle est dit "complet". Dans le cas contraire, il porte le nom de polynôme "incomplet".

Par ailleurs, les deux branches de modèles exponentiels, les modèles complets et incomplets, peuvent être subdivisés en quatre sous-classes suivantes : les modèles fondamentaux et ses trois transformations :

- les modèles d'absorptions :

$$D'(R) = r^{-d} \times [D_0 e^{-(a_1 r^1 + a_2 r^2)}] = r^{-d} \times D(R) ,$$

- les modèles fractionnaires :

$$D_r = \exp - \left( \sum_{i=1}^4 a_i r^{\frac{i}{2}-1} \right) = \exp - (a_0 r^{-1} + a_1 r^{-\frac{1}{2}} + a_2 r^0 + a_3 r^{\frac{1}{2}} + a_4 r^1)$$

- les modèles logarithmiques :

$$\ln D = \ln D_0 - d \ln r - a_1 r - a_2 r^2 = c + d \ln r - a_1 r - a_2 r^2$$

Pour fixer les idées, le tableau ci-dessous (tableau 1) présente l'ensemble de modèles fondamentaux quadratiques possibles  $n = 2$ . Le tableau suivant (tableau 1), représente des modèles d'absorption. L'ensemble de ces quatre classes de modèles sera analysé et jugé plus loin dans le texte.

*Tableau 1*  
*Modèles exponentiels quadratique fondamentaux*

N°	Modèle	$D_0 \exp[-(a_1 r^1 + a_2 r^2)]$	Formule	Auteur
1	exponentiel négatif	$D_0 \exp[-(a_1 r^1 + 0 r^2)]$	$D_0 \exp(-a_1 r)$	Clark (1951)
2	normal standardisé	$D_0 \exp[-(0 r^1 + a_2 r^2)]$	$D_0 \exp(-a_2 r^2)$	Sherratt (1960)
4	quadratique exponentiel	$D_0 \exp[-(a_1 r^1 + a_2 r^2)]$	$D_0 \exp(-a_1 r + a_2 r^2)$	Newling (1969)

*Tableau 2*  
*Modèles d'absorption quadratique*

Modèle	Expression	Auteur(s)
puissance inverse	$D_0 r^{-d} \exp[-(0 r^1 + 0 r^2)]$	Smeed (1963)
gamma normal	$D_0 r^{-d} \exp[-a_2 r^2]$	Amson (1972)
gamma	$D_0 r^{-d} \exp[-a_1 r]$	Ajo (1965), Korzybski (1982)
normal général	$D_0 r^{-d} \exp[-a_1 r - a_2 r^2]$	

*d*- exposant de la distance. Valeur intermédiaire fixée empiriquement.

Cependant, remarquons tout de suite, que le modèle le plus complet est vraisemblablement le plus juste. Toute réduction d'un ou plusieurs monômes ne fournit qu'une partie de la réalité. En cas d'ommission de certains monômes, excepté celui du plus haut degré, les coefficients des formules "allégées" reprennent une partie des variations redistribuée du phénomène. Dans le cas contraire, lorsque disparaît le coefficient  $a_i$  le plus élevé, on observe que le membre linéaire se transforme en constante du modèle de degré inférieur  $i-1$ .

### ■ 2.2.2. Démarche analytique adoptée

Le but de ce texte consiste à appliquer une pléiade de méthodes de modélisation différentes à la ville de Strasbourg, pour effectuer, sur cet exemple, la comparaison de différents modèles. Toutefois, avant de nous lancer dans cette étude, il est nécessaire de préparer l'objet analysé, c'est à dire l'agglomération de Strasbourg, au microscope employé. Cette préparation consiste à transformer l'espace urbain de l'agglomération étudiée en ville idéale à centre unique et introduire une nouvelle distance entre les quartiers. Cette métrique (Kostrubiec, 1986) est basée sur le procédé empirique de Korzybski (1976).

#### ▲ 2.2.2.1. Explication de la déformation de l'espace

Pour modéliser toutes les agglomérations, même polycentriques, elles doivent se conformer aux exigences rigoureuses du modèle. *Le modèle requiert une tendance strictement décroissante de la densité à partir du centre unique.*

Pour l'obtenir, on fait appel à un procédé mécanique auxiliaire. Déployons la carte de l'agglomération et déposons les masses correspondantes aux densités de population des unités territoriales sur un disque. Perçons un axe perpendiculaire à travers le centre de l'agglomération et mettons le disque en rotation. La force centripète déforme et sépare les unités territoriales, ensuite, elle les tasse et les étale annulairement autour du centre selon leurs poids décroissants. Cette transformation équi-superficielle de la topographie urbaine (figure 3) préserve le point central ainsi que le nombre d'habitants de chaque zone. Cependant, elle lisse les limites des unités, les déplace, ordonne monotoniement et accole en cercles concentriques. Les anneaux se confondent quand deux quartiers ont la même densité.

Comme nous le constatons, la modification réduit le nombre d'unités voisines à deux : la précédente et celle qui lui succède (figure 4). Il est possible de conférer un ordre linéaire au quartiers, ce qui permet de mettre en place une indexation spatiale. Par exemple, avant la déformation, le quartier central de Strasbourg, Place Kléber (n° 14) a cinq voisins (les quartiers 3, 2, 15, 10 et 13, voir la matrice de voisinage (figure 5)). Après la transformation deux anneaux l'entourent (St Guillaume < Place Kléber < Esplanade). Cette simplification est basée sur la notion formalisée du voisinage :

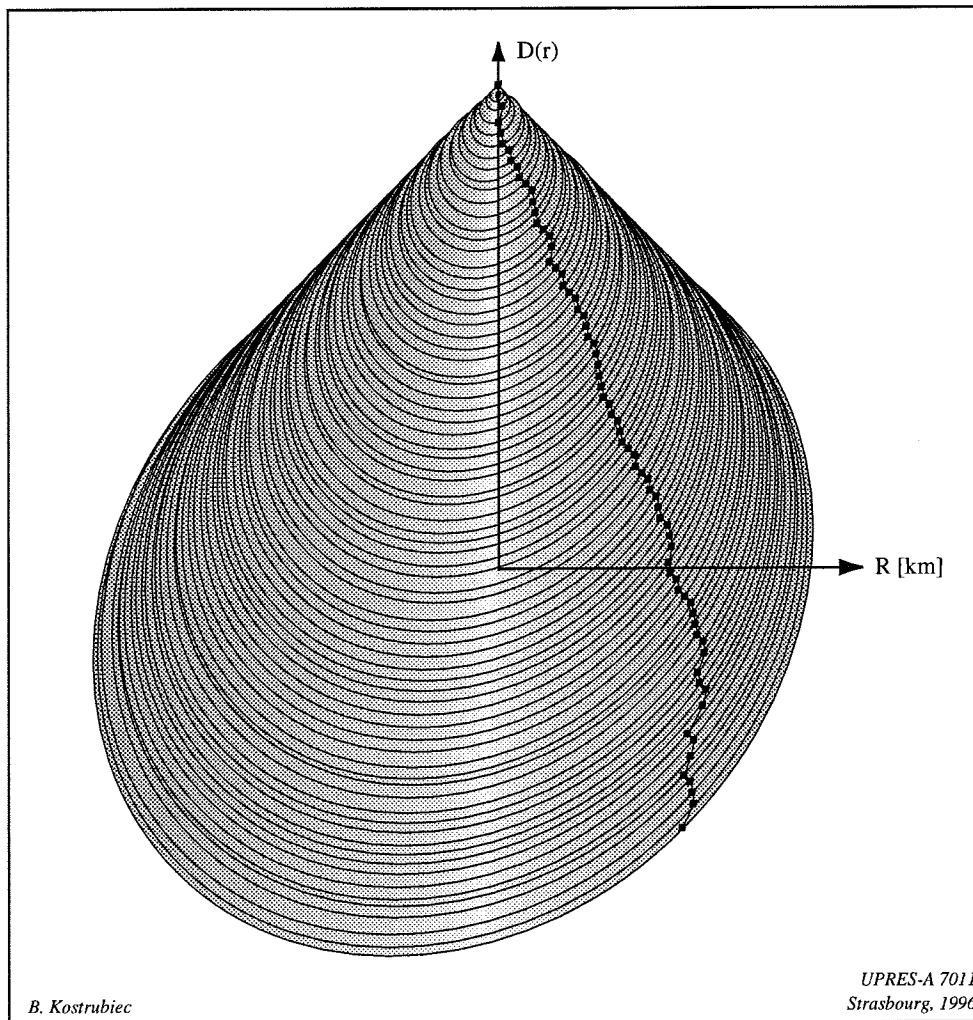
$$V_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{— quand le quartier } i \text{ est voisin du quartier } j \text{ (case pleine)} \\ 0 & \text{— dans le cas contraire (case vide)} \end{cases}$$

La réorganisation due à la transformation est visible sur la matrice du voisinage (figure 5).

L'ordre des quartiers est celui d'après la transformation. Cette anamorphose situe le quartier central au sommet de la matrice. Dans le triangle supérieur, d'avant la transformation, le nombre de voisins est élevé. Après la transformation, il est réduit qu'à deux (cf. le triangle inférieur), l'anneau précédent et l'anneau suivant, et le voisinage se limite à une représentation linéaire de la sous-diagonale.

Cette transformation lève les contraintes qui font obstacle à l'application de modèles classiques. Premièrement, elle "élimine" le cratère situé au cœur de la ville ainsi que les centres multiples. Ces deux phénomènes, négligés par la plupart des auteurs, affaiblissent pourtant sérieusement la qualité de l'ajustement entre le modèle et la réalité. Deuxièmement, elle place précisément le centre à l'origine du système de coordonnées. Troisièmement, elle permet d'évaluer le nombre d'habitants sans charcuter l'aire de l'agglomération en couronnes ou en segments, ce qui évite à l'utilisateur de regrouper ou d'interpoler les données statistiques.

Figure 3  
Densité de Strasbourg, 74 quartiers en 1990. Le cône de la ville radiale



*Figure 4*  
*Alignement des quartiers dans l'ordre de la densité décroissante*

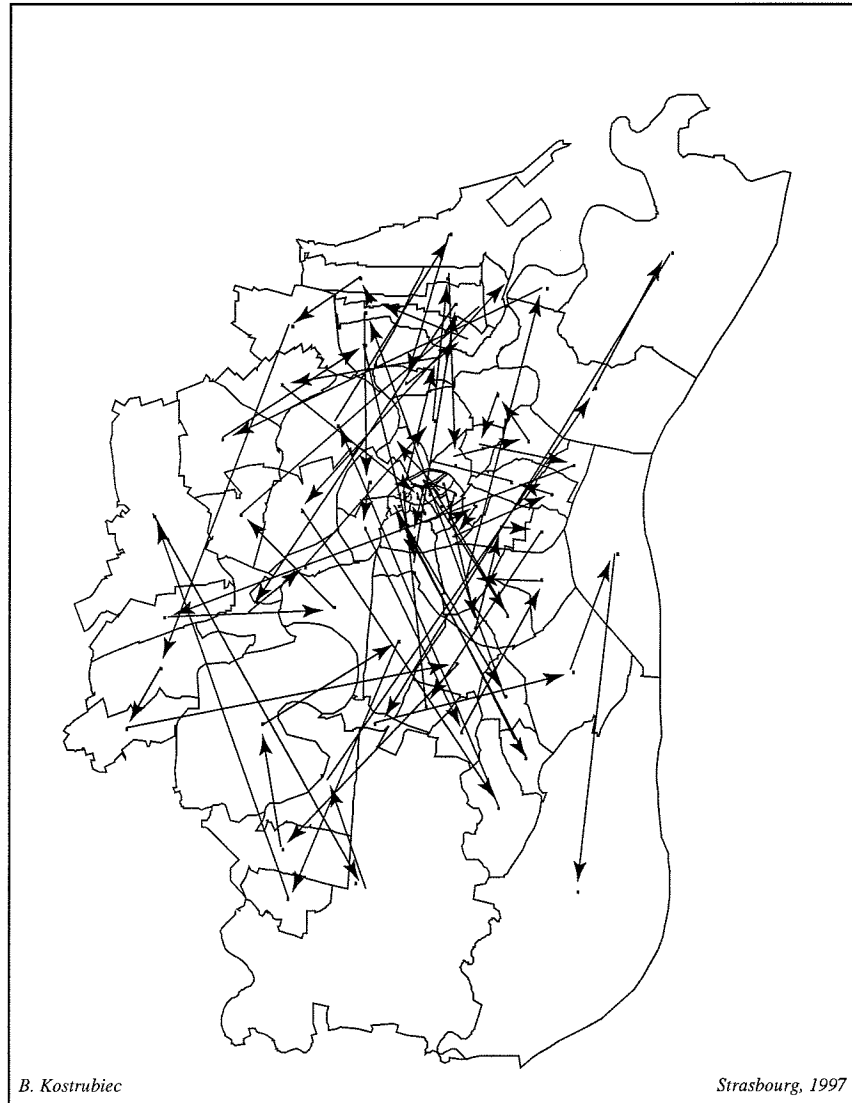
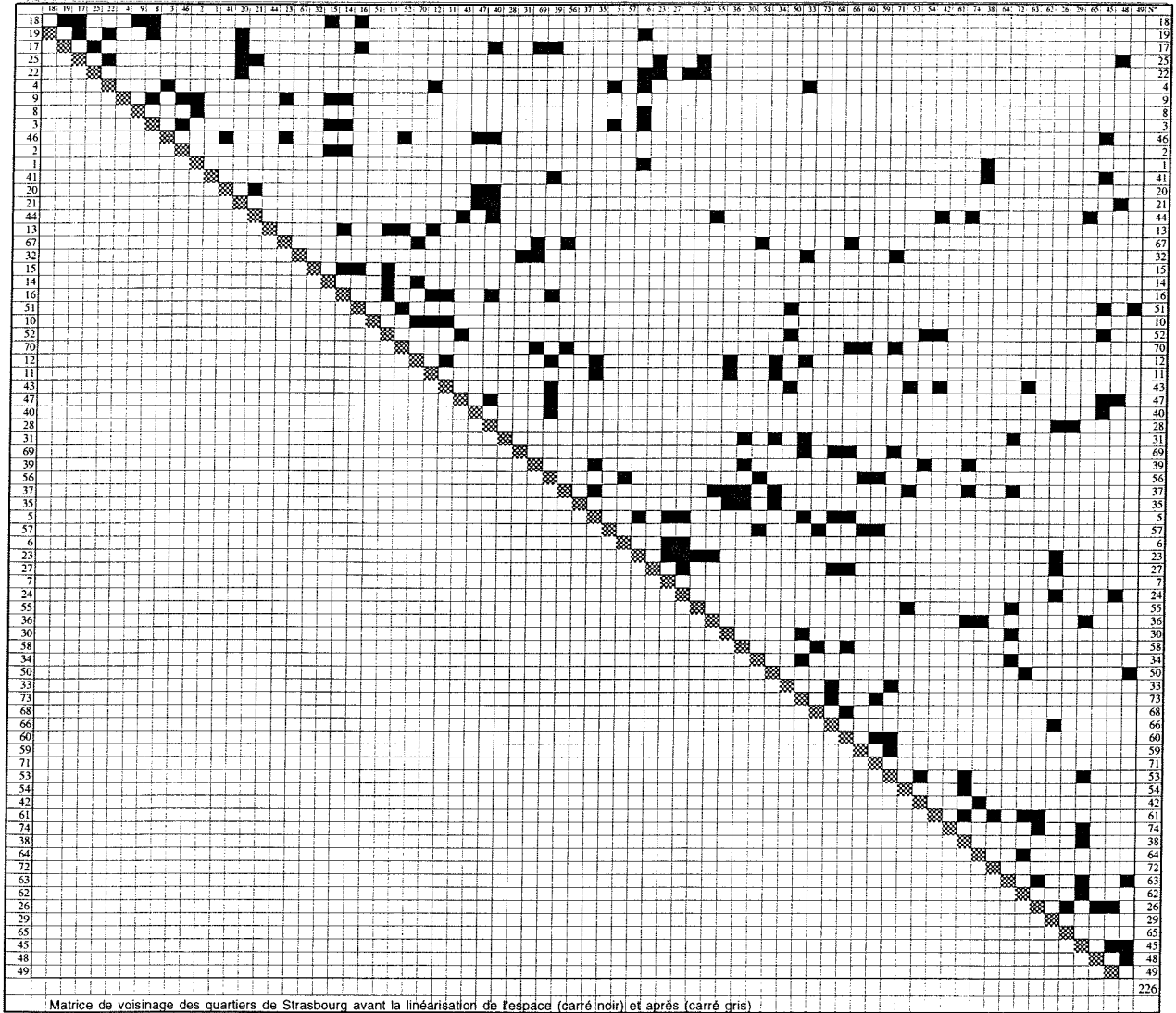


Figure 5  
Matrice de voisinage



Matrice de voisinage des quartiers de Strasbourg avant la linéarisation de l'espace (carré noir) et après (carré gris)

En utilisant ce procédé, *les formules de modèles classiques ne sont pas modifiées, seul le support spatial subit une transformation*. Le site géographique d'une agglomération non convexe est remplacé par un voisinage densitaire et sa topographie physique par une topographie urbaine "interne".

Dans cette géographie abstraite, seule la superficie du quartier est invariable. Mais la largeur de l'anneau qui le représente est relative à la position du quartier envers le centre. Selon la géométrie plane, deux quartiers A et B de même superficie S mais de densités inégales  $D_A > D_B$  seront représentés par deux anneaux a et b de superficie identique mais de largeur l différente  $l_a > l_b$ . La distance densitaire entre deux unités équivaut au rayon du cercle dont la largeur est égale à celle des anneaux qui les séparent. *Deux communes d'une agglomération urbaine se confondent si elles ont des densités identiques et elles sont voisines si elles ont des densités proches.*

La reconstruction du voisinage permet de définir une partition de l'espace urbain en classes ordonnées selon la mesure de l'éloignement du centre.

#### ▲ 2.2.2.2. Notion de la distance densitaire

La notion de la distance densitaire peut être formalisée de la manière suivante : l'agglomération A est subdivisée en un nombre important d'unités opérationnelles (zones, quartiers)  $U_i$ . Chaque subdivision doit être caractérisée par le nombre  $n_i$  d'habitants et sa superficie  $s_i$ , ( $i=1, \dots, k$ ) cf tableau 3. A cet ensemble de points  $U_i(n_i, s_i)$  est associée une métrique

$$d_{ij} = R_{i,j} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \sum_1^j S_i} ; (j = 1, 2, \dots, k)$$

avec R pour rayon qui exprime l'éloignement entre chaque paire de points.

Cette métrique représentant la distance densitaire satisfait trois postulats :

1/  $d_{ij} = 0$ , si et seulement si  $i=j$  ou  $i$  est voisin de  $j$  après transformation de l'espace.

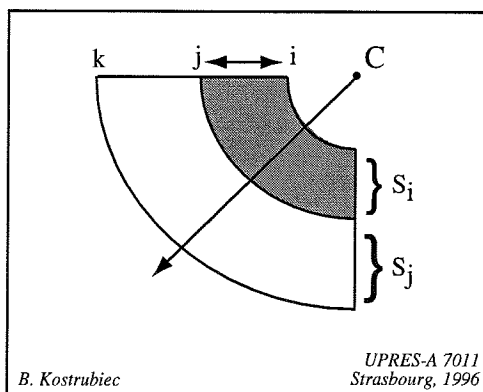
2/  $d_{ij} = d_{ji}$

3/  $d_{ij} + d_{jk} \geq d_{ik}$

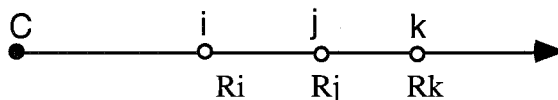
ad 1/ Si l'on mesure la distance entre le quartier et lui-même ( $d_{ii} = 0$ ), ou si l'on mesure la distance entre quartiers voisins alors  $d_{i, i-1} = d_{i, i+1} = 0$

ad 2/ La distance densitaire entre deux quartiers  $i$  et  $j$  (largeur de l'anneau hachuré) est égal à la distance entre  $j$  et  $i$ .

Figure 6  
Distance densitaire.



ad 3/ Pour un quartier j de densité intermédiaire entre les quartiers i et k,



on montre que  $d_{jk} = \sqrt{(R_i - R_k)}$ . En effet, si l'on ajoute, sous le signe de la racine, un quartier d'épaisseur zéro  $= R_i - R_k$ , alors on obtient l'inégalité triangulaire:

$$\sqrt{(R_i - R_j + R_j - R_k)^2} = \sqrt{[(R_i - R_j) + (R_j - R_k)]^2} \leq \sqrt{(R_i - R_j)^2 + (R_j - R_k)^2}$$

car  $2(R_i - R_j) + (R_j - R_k) = 0$  si  $j \neq i$  et  $j \neq k$

Il s'en suit que les largeurs des auréoles peuvent être additionnées et leur somme donne le rayon de l'agglomération entière.

$$\sum_{i=1}^n d_{i,i-1} = d_{i,0} + d_{2,1} + \dots + d_{n,n-1} = d_{n,0} = R_{\text{Agglo}}.$$

Pour Strasbourg,  $n = 74$  et  $R_{\text{Strg}} = 6,7 \text{ km}$ .

#### ▲ 2.2.2.3. La représentation graphique de la répartition de la densité

Les répartition spatiale des densités urbaine sont représentées sous la forme de profils empiriques. La méthode proposée d'obtention d'un tel profil comprend six opérations :

- 1/ le calcul des indices de densité de population par unité de recensement ;
- 2/ le rangement de ces indices dans le sens décroissant  $D_i \geq D_j$  ;

3/ le calcul des distances urbaines de chaque zone selon la formule :

$$d_{ij} = R_{i,j} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \sum_1^j S_i} ; (j = 1, 2, \dots, k)$$

- 4/ le tracé du diagramme qui relie l'ensemble de points  $\{R_j, \log D_j\}$  correspondant au profil ;
- 5/ l'ajustement par une droite, par des segments de droites ou par une courbe, du nuage de points. Pour une droite de régression, la constante  $D_0 = \max D$  est connue, il ne reste qu'à estimer le coefficient de régression ;
- 6/ l'interprétation géographique des coefficients de régression et la représentation cartographique des résultats.

Les aires des deux ensembles de couronnes de Strasbourg (la première est un disque) correspondent à :

$$S_V = \pi R^2 = 55,39 \text{ km}^2$$

$$S_B = \pi (R_b^2 - R_v^2) = \pi (6,44^2 - 4,2^2) = 74,84 \text{ km}^2$$

La distance urbaine  $R_j = d(C,j)$  d'une unité au centre, est égale au rayon des cercles inférieurs qui la sépare. Quand à la distance inter-zone, elle est égale à la différence des rayons

respectifs  $d(C,i) - d(C,j) = d_{ij}$ , d'où  $R(i,j) = \sqrt{\frac{S_j - S_i}{\pi}}$ .

Deux cas extrêmes peuvent être imaginés :

- 1/ le plus petit quartier, du point de vue de la superficie, accueille la totalité de la population de la ville  $D_i = \frac{\text{Population totale}}{\min s_i}$  et  $D_i = 0$ , si  $i \neq j$ . Dans ce cas, le profil "gauche" prend la forme d'un L majuscule.
- 2/ Tous les quartiers enregistrent la même densité  $D_i = D_j$ , pour tout  $i$  et  $j$ . Dans ce second cas, le profil pour cette répartition uniforme est une droite  $D = D_j$ , parallèle à l'axe CR.

Tout profil "réel" est encadré par ces profils extrêmes qui constituent l'espace de représentation possible, le rectangle  $[(0, D_{\max}), (\lim R, D)]$ .

#### ▲ 2.2.2.4. La dynamique des densités intra-urbaines

La pertinence de cet outil apparaît tout particulièrement lorsque l'analyse porte sur l'évolution des densités. Quand un quartier devient plus dense et grimpe dans la hiérarchie, l'anneau qui le représente s'approche du centre. Dans le cas contraire, il s'en éloigne. Ainsi, durant l'évolution de la ville, les anneaux glissent et changent de position. Cette dynamique peut être représentée par la trajectoire d'un point-anneau-quartier sur des profils successifs. A un moment donné  $t$  (comme temps), un profil de densité peut être établi. Pour plusieurs dates successives ( $t_1, t_2 \dots t_i$ ) nous obtenons un faisceau de profils, dont l'épaisseur désigne les changements de densité des quartiers durant la période de l'analyse. Si un quartier se hisse verticalement, alors sa position dans la hiérarchie de densité n'a pas changé. S'il est dévié vers gauche, alors l'anneau qui le représente glisse vers le centre ; s'il est dévié à droite, alors l'anneau se rapproche de la périphérie.

Par exemple pour Strasbourg, le dynamisme de  $D_R(t)$  est désigné par l'épaisseur maximale du faisceau de profils sur les 28 ans qui se sont écoulés. De profondes modifications du tissu urbain s'expriment par des perturbations de l'ordre chronologique des débuts de profils. Le début du profil (cercle central) perd de sa densité, ce qui provoque la naissance d'un cratère. La queue du profil, quant à elle, (l'aurole extérieure au-delà de 3,5 km) s'élève exprimant un dynamisme renforcé. Les parties médianes des profils (l'anneau [1,5 à 2,5 km] du centre), fluctuent moins.

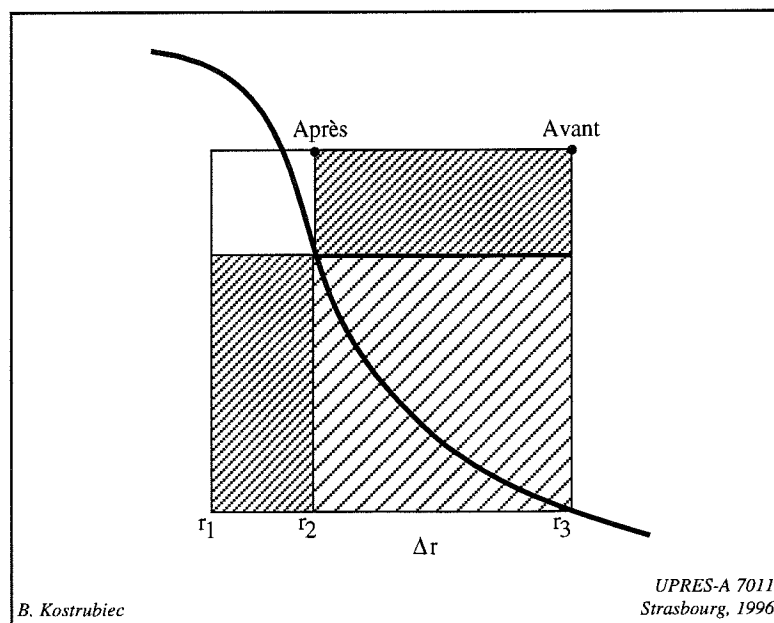
#### ▲ 2.2.2.5. Qualité des ajustements

Le moyen d'apprécier et de comparer la qualité de divers modèles de répartition de la densité urbaine est d'abord la mesure de l'exactitude de l'ajustement exprimé en écarts aux valeurs empiriques, puis les étendues des intervalles de confiance autour des valeurs prédites.

Les meilleurs résultats sont obtenus par le choix d'un modèle le plus pertinent et par l'élimination des quartiers trop dissemblables des autres, qui s'expriment par des points aberrants du nuage, qui brisent l'harmonie du système. Pour Strasbourg, il s'agit des trois derniers quartiers dans la hiérarchie des densités : n° 49 - Port Sud, n° 63 - Illkirch - Graffenstaden- Colonne et n° 48 - Port Centre.

L'exactitude de l'ajustement est exprimée par le carré de l'écart entre le point empirique et le profil (le résidu). Chaque déplacement  $\Delta r$  enlève une partie non négligeable du résidu (figure 7).

Figure 7  
Réduction du résidu en fonction du déplacement du quartier



Par exemple, avant le rapprochement du point au profil, le résidu était  $(|r_2 - r_1| + \Delta r)^2 = (a + \Delta r)^2 = a^2 + 2a\Delta r + \Delta r^2$ , si  $|r_2 - r_1| = a$ , tandis qu'après il se réduit à  $|r_2 - r_1|^2 = a^2$ . La différence, représentée par la partie hachurée, est de  $2a\Delta r + \Delta r^2 \geq 0$

#### ■ 2.2.3. Application de la démarche à l'agglomération strasbourgeoise

Selon la recette énoncée dans les paragraphes précédents, l'analyse du cas concret, doit suivre les cinq étapes suivantes : calcul de la distance densitaire aboutissant à la déformation de l'espace, représentation graphique, analyse de la dynamique et étude de la qualité de l'ajustement. Les données brutes à utiliser sont représentées sous la forme du tableau 4.

Les tests ont été effectués sur Strasbourg pour les derniers recensements (1962, 1968, 1975, 1982 et 1990). Nous considérons les 74 quartiers comme des subdivisions satisfaisant en nombre et taille aux exigences de la calibration des modèles. L'application est effectuée par quartier sur fond harmonisé pour les derniers recensements (figure 8).

*Tableau 4*  
*Données initiales. Valeurs attachées aux quartiers et valeurs calculées*

No	Nom	Population 1982	Surface en m <sup>2</sup>	Densité brute hab/ha				
				1962	1968	1975	1982	1990
1	HOTEL DE VILLE	856	86331	141,2	131,59	105,99	99,15	115,06
2	TEMPLE NEUF	976	63935	218,81	182,37	135,29	152,65	117,06
3	ST PIERRE LE JEUNE	940	122716	180,27	132,83	78,23	76,6	118,5
:	:	:	:	:	:	:	:	:
8	ST ETIENNE	1 932	91374	305,12	282,14	219,98	211,44	119,26
14	PL. KLEBER	1 216	86237	205,36	163,62	131,61	141,01	87,7
17	RUES DES VILLES SUISSES	4 416	194918	307,41	282,94	210,86	226,56	165,01
18	STEMADELEINE	2 856	168895	258,21	234,88	211,97	169,1	178,57
Population totale		352 244		300816	326530	343945	352244	360838
Surface totale			130 241 562					
220	Densité maximale observée cette année							

L'ordonnance des quartiers dans l'ordre de densité décroissante pour l'année 1990 est présentée sur la carte (figure 9). Les quartiers sont représentés dans l'ordre de leurs centralités décroissantes pour les cinq recensements.

Nous constatons que la répartition des densités est loin d'être aléatoire. A droite, l'archipel clair, représente les quartiers à faible densité, inférieure à 17 hab/ha. A gauche, les quartiers densément peuplés.

Si l'on relie ces unités dans l'ordre retenu, alors les liaisons ont l'air d'une "spirale" (figure 4) qui ne correspond en aucun cas à mouvement brownien. Il s'ensuit qu'une loi de répartition existe et nous sommes en droit de tenter de la mettre en évidence par le biais de la modélisation. Dans ce but nous calculons les valeurs du tableau 5.

Figure 8  
Carte de la concentration de la Population de Strasbourg par quintiles en 1990

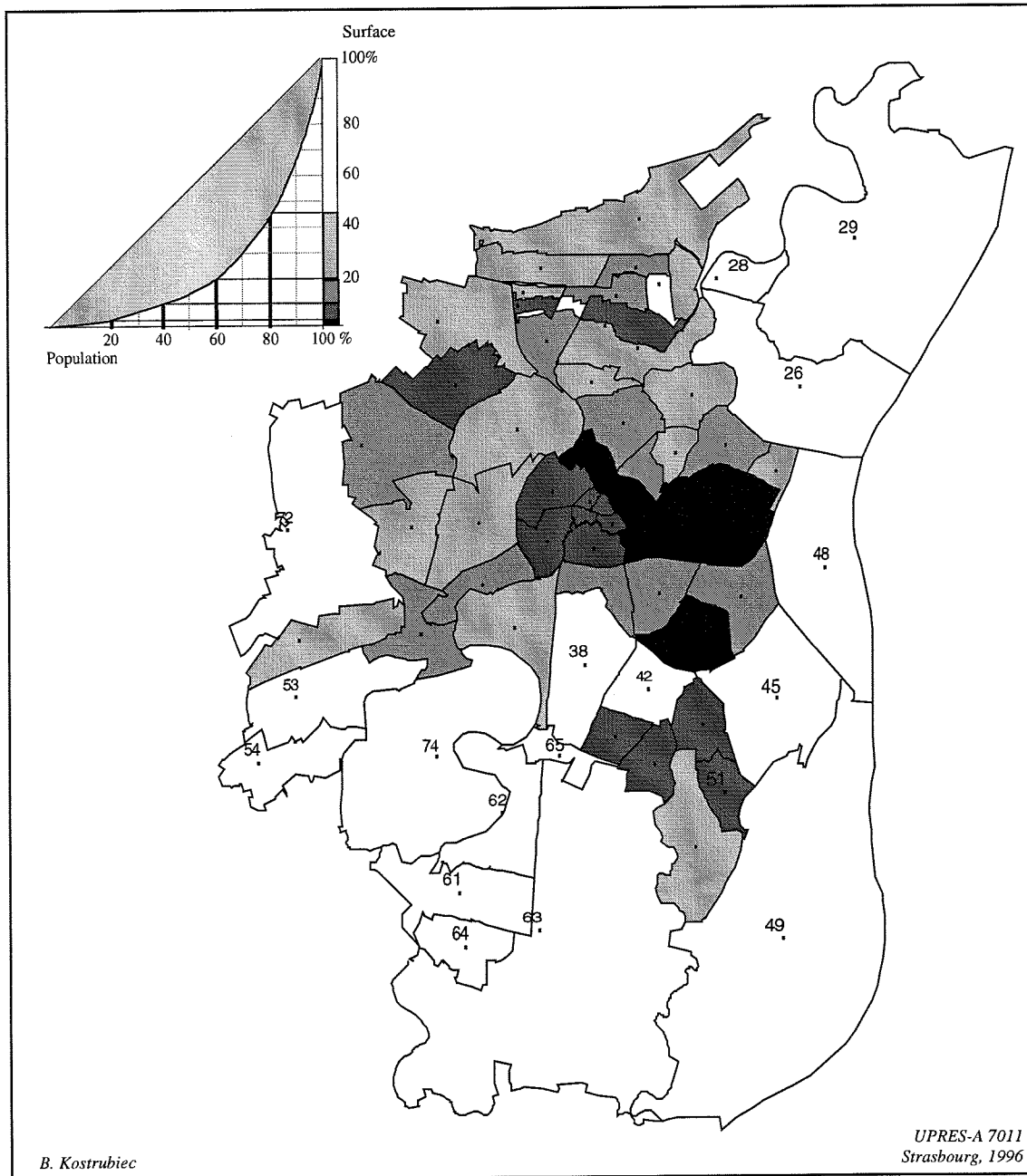
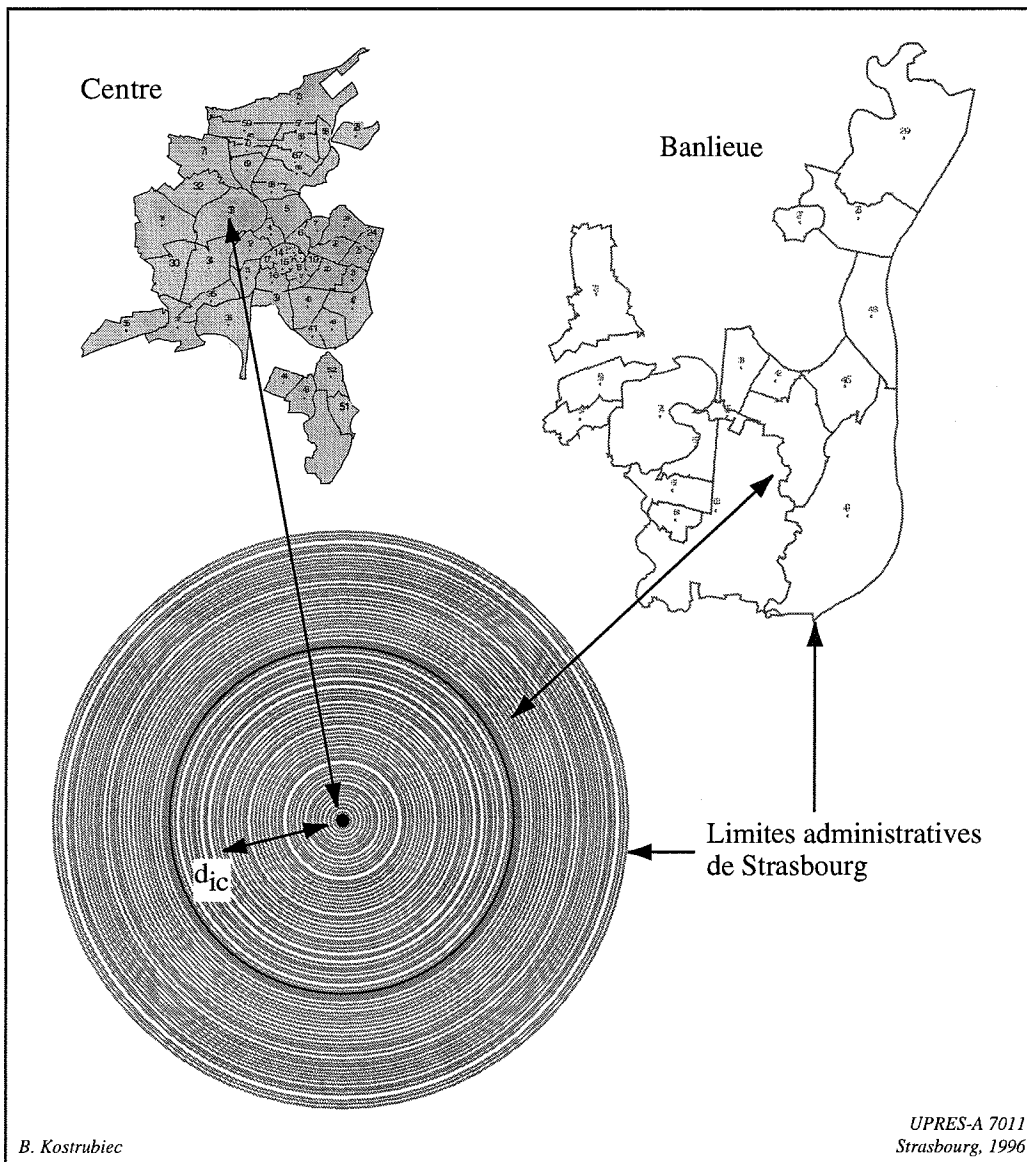


Figure 9  
Déformation de l'espace urbain de Strasbourg



*Tableau 5*  
*Restructuration des données à l'aide d'une feuille de calcul pour tracer un profil de densité.*  
*Extrait du fichier.*

Rang	Quartier	Superficie	Cumul de	Éloignement du	Largeur de la	Densité
i	N°	Si	superficie	centre Ri en km	couronne	Di
1	18	168 895	168 895	0,0	0,2	178,57
2	19	242 372	411 267	0,2	0,2	172,52
3	17	194 918	606 185	0,4	0,2	165,01
4	25	490 040	1 096 225	0,6	0,4	152,24
5	22	619 009	1 715 234	0,7	0,1	146,32
i	...	...	...	...	...	...

Le tableau 5 note les rangs des quartiers en fonction de la densité de population décroissante à chaque recensement. L'unique quartier, Port Sud n° 43, a conservé son dernier rang durant toute la période analysée. Comme nous pouvons le constater, tous les autres quartiers ont progressé ou régressé au moins une fois dans la hiérarchie. Ces mouvements (éloignement ou rapprochement du centre) reflètent les nouvelles installations et les migrations intercentraires observées.

Les logarithmes des valeurs  $\ln Ri$  (déformation de l'espace) et  $\ln Di$  présentés nous autorisent à passer en revue l'ensemble des modèles évoqués dans la classification afin de dresser les profils. Pour chaque modèle, nous commençons par exposer ses principes, ses forces et ses faiblesses et comparons la qualité des ajustements. L'interprétation s'avère fiable, car un même niveau de confiance (99%) est imposé partout.

Dans l'hypothèse d'une corrélation parfaite entre le modèle théorique et la réalité, tous les points devraient s'aligner sur un papier semi-logarithmique. Pour réaliser cet ajustement, deux alternatives sont possibles : soit employer une seule fonction, soit réaliser l'approximation par segments, méthode qui, dernièrement, gagne de plus en plus d'adeptes. La fonction unique, tout comme les segments, peut être linéaire ou curviligne. L'ajustement par segments permet une réduction substantielle des résidus entre le profil de l'agglomération et la droite ou par des fragments de courbes (Ajo, 1965) sur des intervalles disjoints. Indépendamment, nous proposons de mesurer la qualité de l'ajustement dans le temps.

#### ▲ 2.2.3.1. Le type de Clark

Clark vérifia sur un échantillon de quelques dizaines de villes les hypothèses formulées par Stewart, selon lesquelles, le potentiel de la population est égal à  $D_0 P_C/D_{CR}$ . Il en déduit, qu'approximativement, cette distribution apparaît universellement véridique.

Son modèle représente un type de ville aréolaire le plus rudimentaire, pour lequel la pente de la droite se caractérise par un déclin du taux constant de décroissance de la densité de population du centre à la périphérie le long du rayon  $\beta$  quelconque  $T(R, \beta) = T(R)$ . Son gradient du champ du peuplement a la direction des rayons vecteurs fléchés vers les périphéries. Les iso-vecteurs de densité forment des cercles concentriques aux équations  $R = c_i$ . La concentration de ces isolignes faiblit progressivement au fur et à mesure que l'on s'éloigne du centre.

En raison de sa simplicité et de sa lisibilité, ce modèle isotrope encore imparfait s'est longtemps imposé. L'inconvénient est que pour l'appliquer, les unités urbaines doivent être découpées et considérées en block dans des bandes concentriques. Les erreurs d'extrapolation de  $D(R)$  contrarient d'autant plus que le découpage est fin. En réduisant l'espacement des mesures, on obtient une droite qui tend à se confondre avec la ligne de régression. Du point de vue pratique, ces anneaux ne peuvent pas être trop fins, afin de ne pas sectionner les unités

spatiales en lames étroites. Plus on s'éloigne du centre au-delà des limites de la ville, plus les prédictions sont incertaines.

Il s'ensuit que le tracé sur papier linéaire est une courbe au relief de la tour Eiffel. Si ces coordonnées sont portées sur un papier semi-logarithmique, nous obtenons une droite représentative. Le papier fonctionnel fait apparaître les rapports qui existent entre les densités, qui possèdent des valeurs étendues et contrastées sur l'agglomération. La pente caractérise le dit taux constant de décroissance est une fonction exponentielle négative.

$$\text{Log } D(R) = \text{Log } D(c) - T(R).$$

$$D_R = D(c) \exp(-TR) = D(0) \exp(-TR) = D_0 \exp -(a_0R).$$

L'expression de la courbe génératrice  $D(R) = D(C) e^{-TR}$  tournant autour de son axe apparaît sur la coupe transversale de la figure 3. Elle rappelle la forme d'une soucoupe flottante en caoutchouc, qui émerge et change constamment de volume avec le temps. Le volume  $V$  du solide ainsi obtenu est :

$$V(R,\beta) = \int_{-R}^R \int_0^{2\pi} D(R,\beta) dR d\beta$$

Si l'on appuie, par exemple, sur le sommet du solide, les parties périphériques "gonflent" afin d'absorber le surplus de la masse ainsi déplacée. Les couronnes périphériques de la distribution se hissent, ce qui permettrait de confirmer l'hypothèse de l'effet de l'approfondissement du cratère sur la banlieu lointaine. On soupçonnait l'existence d'un point d'intersection  $X_0$  qui satisfierait le système d'équations

$$D1(x_0) = D2(x_0) = \dots Dn(x_0) = 0$$

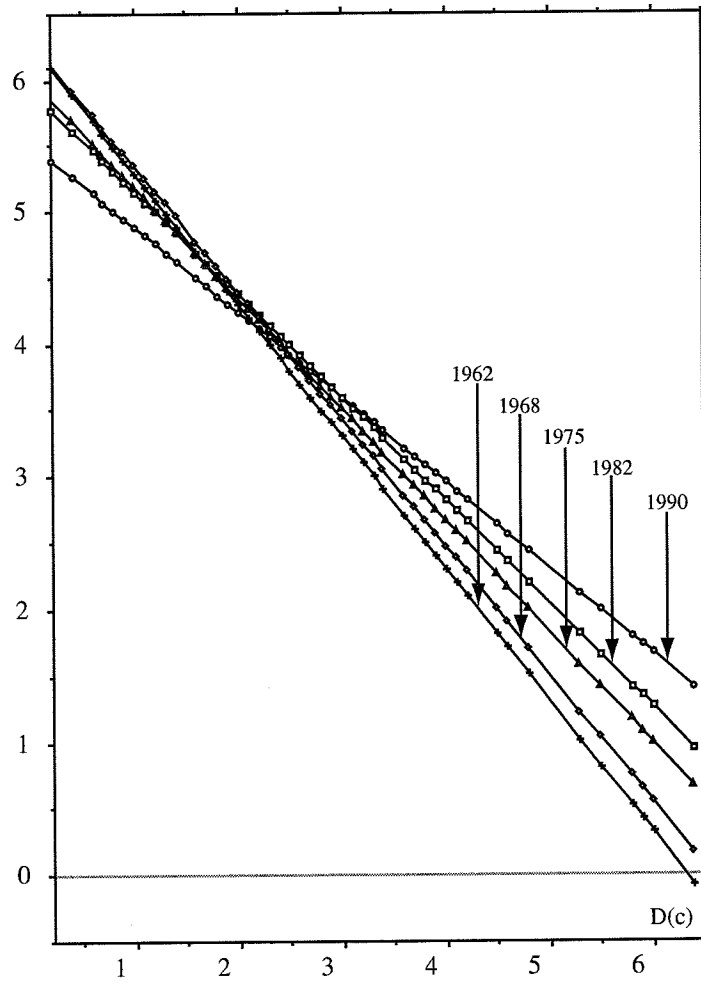
et qui jouerait le rôle d'un levier autour duquel s'articulent les différentes droites (figure 10). Le faisceau de profils contredit cette hypothèse trop simple. Aucun point levier unique ne peut être détecté, mais il existe visiblement un ensemble de points proches qui, approximativement, satisfait cette condition. Le point charnière autour duquel pivote le faisceau de droites a les coordonnées (2,3 km ; 54,6 hab/ha)

La méthode de Clark modifiée appliquée à l'agglomération de Strasbourg aboutit aux résultats présentés ci-dessous. La valeur à l'origine pour  $R = 0$  entraîne  $D_R = D_0$ . Les formules du faisceau de droites représentées sur la figure 10 remplissent le tableau 6. L'ensemble de paramètres qui le caractérise est contenu dans le tableau suivant.

*Tableau 6*  
*Approximations linéaires des densité de Strasbourg. Modèle de Clark.*

Année	Formule	Coef. de détermination	Carré moyen
1990	$D_R = e^{5,525} e^{-0,641 R}$	0,955	73,36
1982	$D_R = e^{5,930} e^{-0,777 R}$	0,860	107,60
1975	$D_R = e^{6,018} e^{-0,837 R}$	0,898	124,85
1968	$D_R = e^{6,308} e^{-0,959 R}$	0,918	164,17
1962	$D_R = e^{6,287} e^{-0,994 R}$	0,938	176,29

Figure 10  
Modèle de Clark Strasbourg



B. Kostrubiec

UPRES-A 7011, Strasbourg, 1996

*Tableau 7*  
*Caractéristiques et paramètres du modèle de Clark pour Strasbourg*

Année	1962	1968	1975	1982	1990
N° du quartier	17	17	8	17	18
Do	307,4	282,9	220,0	226,6	178,6
Moyenne D(t)	22,42	24,34	25,64	26,25	26,89
Accroissement annuel	—	4 285	2 487	1 185	1 074
Constante a11	6,287	6,308	6,018	5,930	5,525
Pente a12	-0,994	-0,959	-0,837	-0,777	-0,641
Carré moyen	76,29	164,17	124,85107,60	73,36	
Corrélation r	0,969	0,958	0,948	0,927	0,978

Remarquons, que dans le modèle de Clark, la prolongation des droites de tendance est un jeu dangereux, parce que les profils dépassent les limites de la ville.

#### ▲ 2.2.3.2. Le type radial de Korzybski

Dans le modèle de Korzybski, la pente du profil s'affaiblit de cercle en cercle, mais à l'intérieur d'un cercle, elle reste stable dans toutes les directions  $\beta$ ,  $T(R, \beta) = T(R)$ , (figure 11). L'équation pour ce type de ville convient même si la configuration spatiale n'est pas circulaire et la ville est multipolaire. Dans ce modèle, le cône volcanique n'apparaît pas, même s'il existe :

$$D(R) = D(C) R e^{-T(R)R}$$

S'il n'y a pas de permutations de quartiers dans les colonnes du tableau, une unique opération suffit pour tracer le faisceau de profils. Si les permutations existent, il faut tracer les profils séparément, en figeant les échelles du premier graphique pour superposer ensuite les courbes.

Dans le cas de Strasbourg, l'observation du tracé des profils formés par les 74 points montre leur nature curviligne évidente. La précision de l'ajustement montre un accord presque parfait,  $r = 0,98$ . Cette analyse permet de saisir la transformation interne de l'organisme urbain et de délimiter les parties distinctes de l'agglomération en temps qu'entités morphologiques.

La fonction par segments qui représente l'allure du profil pour 1990 est la suivante :

$$D(R) = \begin{cases} 203,57 e^{-0,532 R} & \text{pour } 0 \leq R < 4,20 \text{ km} \\ 994,26 e^{-0,932 R} & \text{pour } 4,21 \leq R \leq 6,51 \text{ km} \end{cases}$$

Les autres fonctions sont contenus dans le tableau 8 :

*Tableau 8*  
*Approximation par segments concatenés d'expressions linéaires de Korzybski*

Année	Formule pour $0 \leq R \leq 4,1$	Formule pour $4,11 \leq R \leq 6,51$	Coef. détermin	Carré moyen
1990	$D_R = e^{5,316} e^{-0,532 R}$	$D_R = e^{6,932} e^{-0,932 R}$	0,986	23,30
1982	$D_R = e^{5,499} e^{-0,557 R}$	$D_R = e^{10,775} e^{-1,742 R}$	0,990	39,62
1975	$D_R = e^{5,658} e^{-0,651 R}$	$D_R = e^{9,356} e^{-1,513 R}$	0,989	43,54
1968	$D_R = e^{5,940} e^{-0,769 R}$	$D_R = e^{9,294} e^{-1,573 R}$	0,975	56,64
1962	$D_R = e^{6,035} e^{-0,869 R}$	$D_R = e^{10,01} e^{-1,721 R}$	0,988	71,21

Figure 11  
L'évolution des profils de densité de la population de Strasbourg.  
Années 1962-1990

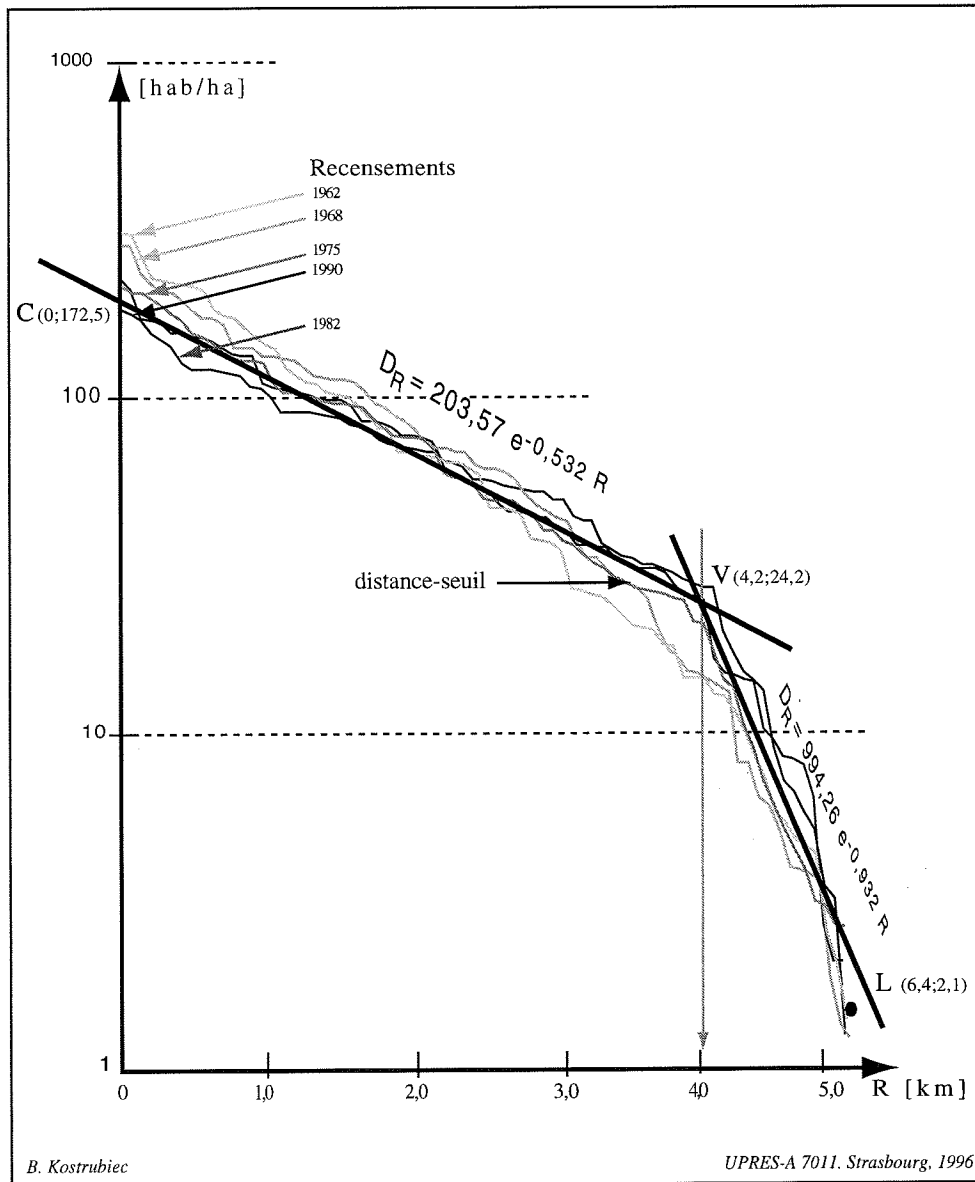
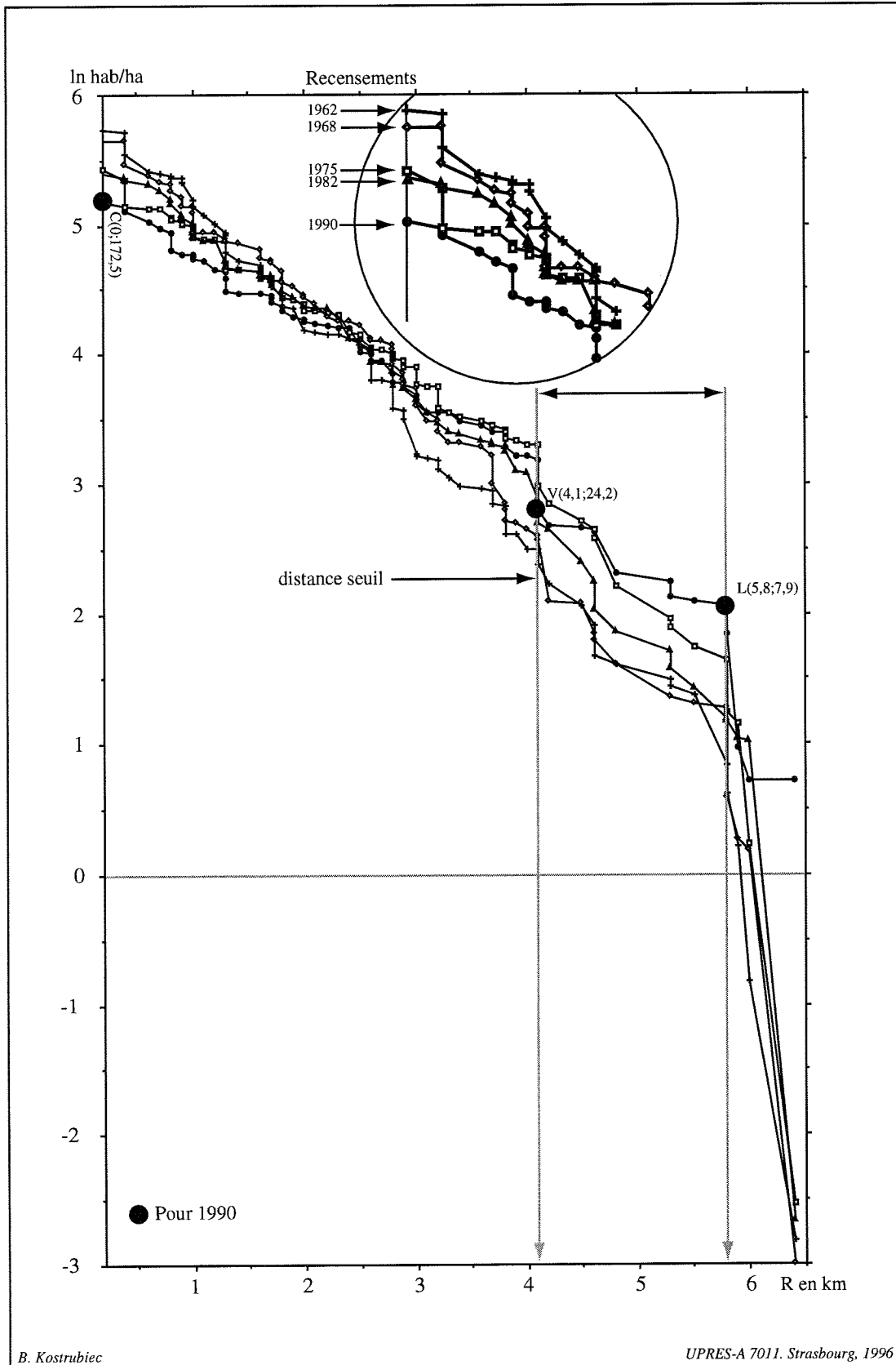


Figure 12  
Evolution des profils de densité de la population de Strasbourg



La représentation tridimensionnelle du modèle est représentée par l'image 3 :

Le point central C, aisément identifiable, autour duquel gravite la population entière, est localisé au centre du quartier qui se caractérise par la densité maximale. A partir de C, les densités chutent jusqu'à 2 500 mètres du centre. Au-delà, les densités ont légèrement repris, favorisées par l'habitat multifamilial qui s'y installe, surtout dans le quadrant S-O de l'agglomération.

L'éventail des profils présente des caractéristiques communes, comme l'accélération du peuplement d'après-guerre de l'effondrement de la densité du centre. Ces profils présentent également des irrégularités prévisibles dans certains points singuliers, dessinant des segments à allure d'escaliers diaboliques où les tangentes se modifient d'une manière brusque.

Grâce à ces profils, nous distinguons des seuils (limites précises des parties intérieures de la ville) et d'autres régularités à travers l'exploration du tracé. Le déclin de la courbe est constant, mais change sur chaque segment CV (centre-ville), VL (ville-banlieue). L'évolution est la suivante : d'abord nous observons une décroissance lente des quartiers à population dense jusqu'au point d'articulation -distance-seuil- V. Ensuite, une décroissance plus rapide qui s'amorce pour les quartiers faiblement peuplés. Le quartier charnière, numéro 59, Illkirch-Grafenstaden-Centre est le point appartenant simultanément à deux droites de régression.

A gauche du point V(4,0 km ; 24,2 hab/ha), 60 quartiers s'alignent (la première couronne). A l'exception de cinq quartiers isolés et éloignés, ils proviennent de la partie centrale de l'agglomération. Pendant la période 1962-1990, les 60 unités décrites montre une grande stabilité. L'abscisse du second point spécifique L(5,8km ; 7,9 hab/ha), détermine l'enveloppe de la partie médiane de l'agglomération (la seconde couronne). Son dernier quartier est éloigné de 6,8 km du centre hypothétique. Cette partie représente l'assemblage de tous les quartiers de la queue du profil. Cette banlieue non-convexe se disloque en deux parties. Du point L à la limite (la troisième couronne), les quartiers périphériques sont les plus homogènes. Cette étendue est la plus stable du point de vue de l'évolution, même si dans son sein les permutations sont fréquentes.

La première pente  $T(C,V) = -0,532$  est inclinée sous un angle  $152^\circ$ , la seconde,  $T(V,B) = -0,932$  sous l'angle  $138^\circ 12'$ , la dernière, la plus abrupte,  $102^\circ$ . A partir de L, les profils tombent à pic, car l'agglomération reste cloîtrée dans ses limites. A une certaine distance, la courbe chute vers les valeurs de la densité rurale environnante, jusqu'au moment où les anneaux rencontrent une nouvelle ville.

Les distortions de la forme des profils sont les plus fortes pour des villes qui rencontrent des obstacles et qui perturbent l'expansion de l'agglomération dans cette direction.

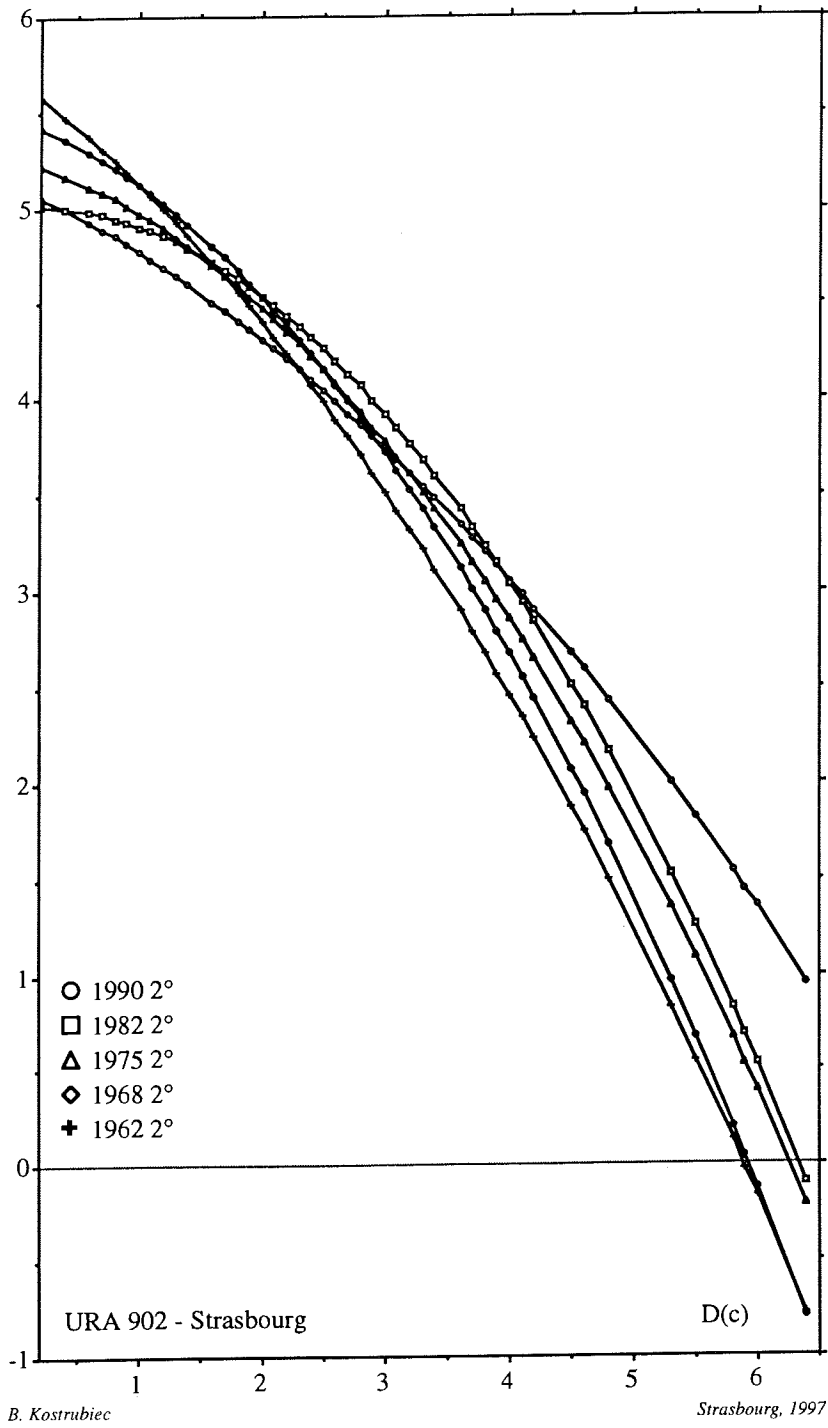
#### ▲ 2.2.3.3. *Le modèle de Newling*

Dans le modèle concurrent de Newling, les profils prennent compte du cratère de densité au centre et représentent les graphiques de la fonction  $\ln D(R)$ . La surface sous la courbe est égale à

$$\int_0^{74} D_0 e^{-Tr} dr = \frac{D_0}{T}$$

où T correspond au gradient.

Figure 13  
 Strasbourg - Faisceau de courbes exponentielles quadratiques



Chaque équation à exposants portés au second degré (tableau 8), fait l'objet d'une analyse de sa physionomie. Les profils ainsi lissés prennent l'aspect dessiné ci-dessous (figure 13), et leurs fonctions s'expriment de la manière suivante :

*Tableau 9*  
*Expressions exponentielles quadratiques DR(t) pour Strasbourg*

Recensement	Formule	Constante	Coef. de détermination	Carré moyen
1990	$D = e^{5,116} e^{-(0,286 R + 0,057 R^2)}$	166,67	0,978	37,51
1982	$D_R = e^{5,007} e^{-(0,024 R + 0,128 R^2)}$	149,46	0,927	58,01
1975	$D_R = e^{5,255} e^{-(0,174 R + 0,106 R^2)}$	191,52	0,940	65,31
1968	$D_R = e^{5,473} e^{-(0,234 R + 0,116 R^2)}$	238,17	0,957	85,34
1962	$D_R = e^{5,674} e^{-(0,462 R + 0,085 R^2)}$	291,20	0,958	90,00

Les paramètres essentiels de la ville définissent le degré d'entassement de sa population et ses contrastes de densité. Les différences entre les coefficients  $a_i$  sont liées à la forme de l'agglomération, à son âge et la hiérarchie de la ville. Chaque monôme contribue dans la valeur de la fonction densité (surtout dans le cas des  $a_i \geq 0$  liés aux puissances paires).

A un degré de sophistication plus élevé, on peut porter l'expression exponentielle à un degré supérieur, pour parvenir à des ajustements plus satisfaisants. Toutefois, déjà au niveau des expressions cubiques, les formules deviennent si compliquées que le gain est, en fait, illusoire, car les résultats s'avèrent ininterprétables. Chaque chercheur doit établir un compromis entre la qualité de l'ajustement et l'interprétabilité des résultats. Selon la stratégie prescrite, nous devons nous attendre (avec  $P = 0,001$ ) à ce que les coefficients  $a_i$  soient significativement différents de zéro.

Les caractéristiques des puissances du troisième degré sont présentées dans le tableau 10.

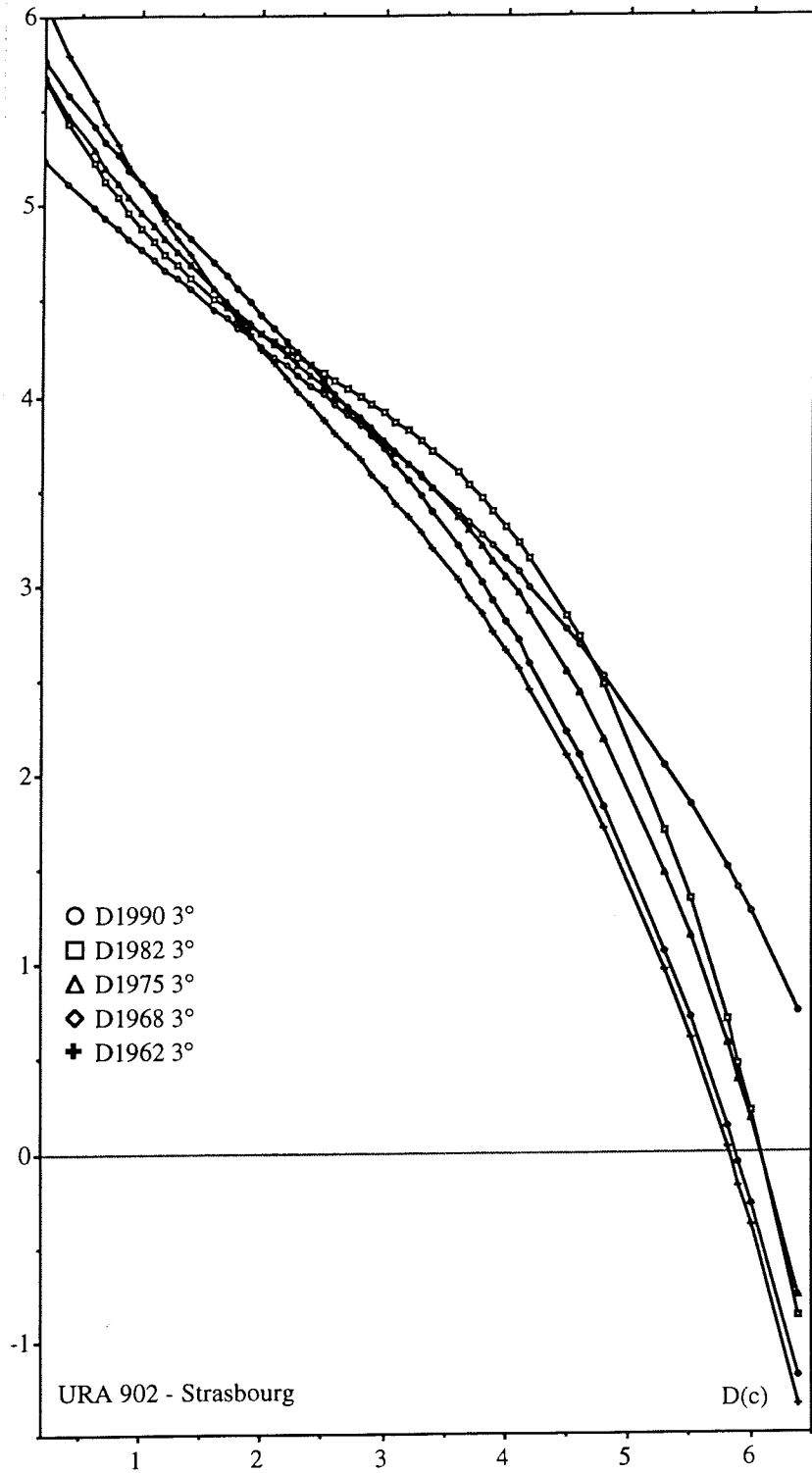
*Tableau 10*  
*Expressions exponentielles cubiques DR(t) pour Strasbourg*

Recensement	Formule	Coef. de détermination	Carré moyen
1990	$D_R = e^{5,367} e^{-(0,672 R - 0,089 R^2 + 0,015 R^3)}$	0,981	24,10
1982	$D_R = e^{5,927} e^{-(1,392 R + 0,405 R^2 - 0,055 R^3)}$	0,957	39,89
1975	$D_R = e^{5,907} e^{-(1,177 R - 0,272 R^2 + 0,039 R^3)}$	0,953	44,15
1968	$D_R = e^{5,949} e^{-(0,967 R - 0,16 R^2 + 0,029 R^3)}$	0,962	57,32
1962	$D_R = e^{6,356} e^{-(1,512 R - 0,31 R^2 + 0,041 R^3)}$	0,969	60,67

Pour le degré  $n = 3$  :

- $a_0$  - est la densité au centre  $D_0$  (la constante du modèle) ;
- $a_1$  - exprime la profondeur du cratère (attribut de la métropolisation) du dépeuplement du centre de la ville suivant l'âge de celle-ci ;
- $a_2$  - agit surtout sur la hauteur de la forme, il représente les changements de la concentration de la population et étale la ville en élargissant son aire ;
- $a_3$  - avec sa valeur négative, garantit l'accélération de la décroissance de la densité.

Figure 14  
Strasbourg - Faisceau de courbes exponentielles cubiques



Le modèle à degré fractionnel (à demi pas) :

$$D_r = \exp \left( -\left( \frac{a_0}{r} + \frac{a_1}{\sqrt{r}} + a_2 + a_3 \sqrt{r} + a_4 r \right) \right)$$

appliqué pour Strasbourg pour l'année 1990 donne :

$$D_R = D_0 e^{-\left( \frac{0,194}{R} - \frac{0,468}{\sqrt{R}} + 0,835 \sqrt{R} + 0,945 R \right)}.$$

La constante  $a_0$  se situe au centre de la l'expression mathématique du modèle. Comparé aux résidus d'autres modèles, il tient la première place du point de vue de la précision de l'ajustement. Les formules des profils pour les dates choisies (figure 15), associées à ce modèle et comparées à la répartition réelle est présenté ci-dessous :

*Tableau 11*  
*Expressions exponentielles à progression de demi degré DR(t) pour Strasbourg.*

Recensement	Formule	Coef. De Détermination	Carré moyen
1990	$D_R = e^{-\left( \frac{0,194}{R} + \frac{0,468}{\sqrt{R}} + 5,365 + 0,835 \sqrt{R} - 0,945 R \right)}$	0,980	18,80
1982	$D_R = e^{-\left( \frac{0,921}{R} + \frac{0,399}{\sqrt{R}} + 14,67 + 4,958 \sqrt{R} - 0,134 R \right)}$	0,977	30,57
1975	$D_R = e^{-\left( \frac{0,801}{R} + \frac{0,758}{\sqrt{R}} + 14,714 + 5,174 \sqrt{R} - 0,152 R \right)}$	0,974	33,83
1968	$D_R = e^{-\left( \frac{0,724}{R} + \frac{0,337}{\sqrt{R}} + 12,799 + 3,337 \sqrt{R} - 0,424 R \right)}$	0,979	43,75
1962	$D_R = e^{-\left( \frac{0,765}{R} + \frac{1,016}{\sqrt{R}} + 15,68 + 5,961 \sqrt{R} - 0,226 R \right)}$	0,981	46,09

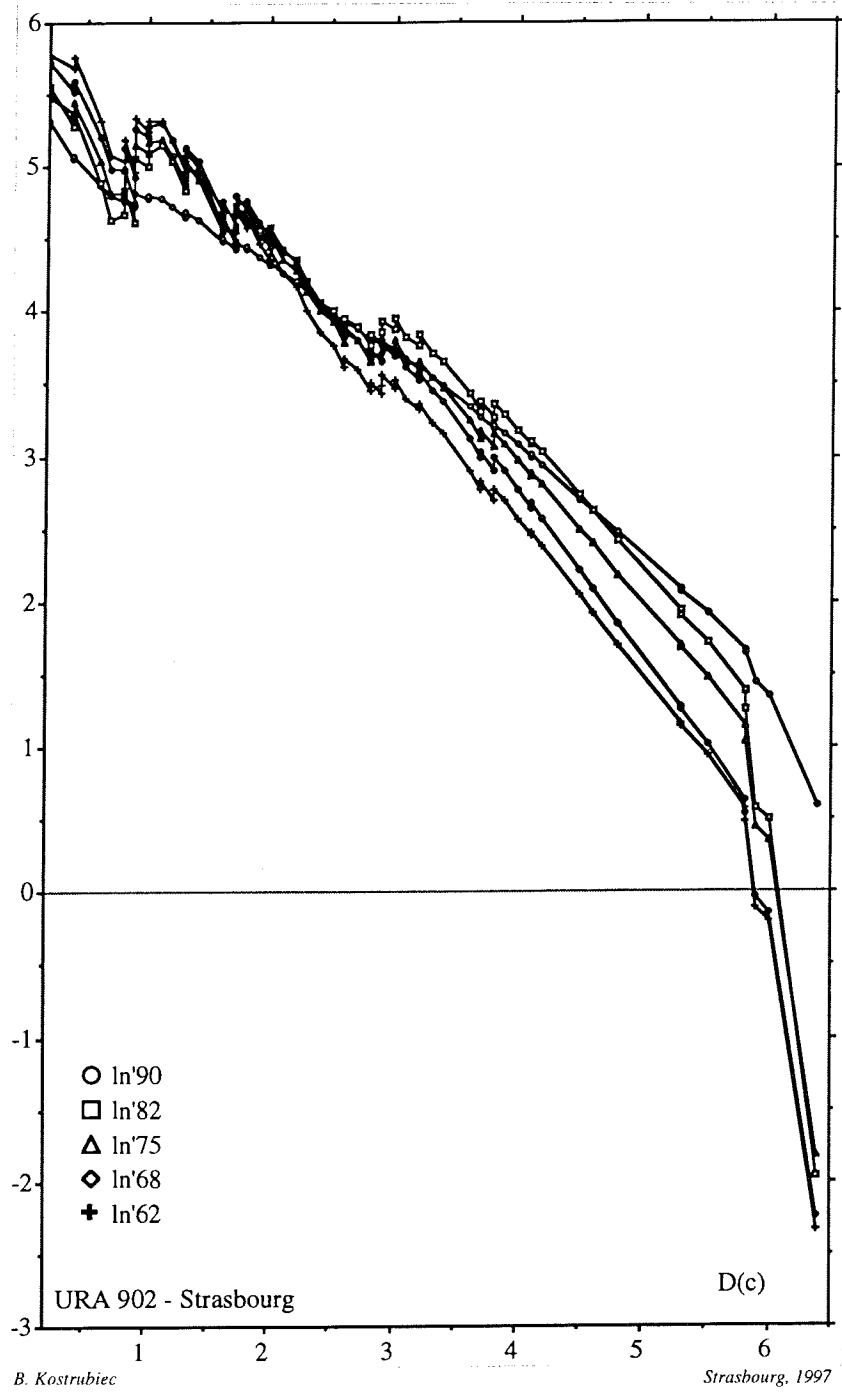
Dans ces modèles à degré  $i$  fractionnel, la fonction inverse de  $R^{-i}$  introduit un effet perturbateur par l'exagération des résidus à proximité immédiate du centre. Par contre, elle néglige les écarts des quartiers très éloignés. Paradoxalement, cette méthode donne les meilleurs résultats.

L'ensemble des paramètres mérite d'être soigneusement étudié, car leur comportement est révélateur du contexte dans lequel la ville est inscrite. Ces paramètres semblent être strictement liés à la taille et à la structure interne de l'agglomération pour la période donnée. En simulant les effet des changements des coefficients  $a_i$  sur la forme du solide, on observe que chaque coefficient contribue sur le comportement de la forme. Aucun coefficient ne peut être tenu comme responsable à lui seul d'une variation de cette forme, car les coordonnées de chaque point singulier sont calculées en fonction de l'ensemble des paramètres d'ordre inférieur :

$$a_i = f(a_0, a_1, a_2, \dots, a_n)$$

Par conséquent, les controverses opposant les partisans et les adversaires de l'effet d'un tel ou tel coefficient sur la forme du solide peuvent être jugés stériles.

Figure 15  
Strasbourg 1962-1990 - Faisceau de profils à demi pas



#### ▲ 2.2.3.4. Le modèle lognormal

L'application du modèle lognormal donne les résultats suivants :

Tableau 12  
Expressions exponentielles lognormales  $DR(t)$  pour Strasbourg.

Recensement	Formule	Constante	Coef. déterm	Carré moyen
1990	$D_R = e^{5,662} e^{-(0,388 \ln R + 0,402 \ln R^2)}$	287,7	0,967	37,09
1982	$D_R = e^{6,217} e^{-(0,815 \ln R + 0,56 \ln R^2)}$	501,2	0,889	55,61
1975	$D_R = e^{6,273} e^{-(0,721 \ln R + 0,570 \ln R^2)}$	530,1	0,919	63,85
1968	$D_R = e^{6,603} e^{-(0,835 \ln R + 0,656 \ln R^2)}$	737,3	0,937	83,99
1962		654,6	0,946	89,00

Les profils associés à ce modèle, comparés à la répartition réelle est présenté ci-dessous dans la figure 16.

Pour juger la validité de la classification, nous l'appliquons à l'exemple concret qu'est Strasbourg en 1990. Comme le rejet d'une expression testée s'effectue en fonction des carrés des écarts, on a de bonnes raisons pour penser que les ajustements s'améliorent au détriment de l'aisance de l'interprétation des coefficients des termes introduits. Une amélioration de l'ajustement passe par un découpage en nombre élevé de minuscules unités territoriales (îlots INSEE par exemple), un découpage qui peut s'avérer trop lourd pour le traitement (figure 17).

La juxtaposition de courbes de résidus de quelques modèles testés se présente, comme suit le montre la figure 18.

Ces quelques modèles comparés, donnent des résidus (carrés moyens) ordonnés dans le sens de la flèche du temps :

$$\text{Res (1990)} < \text{Res(1982)} < \text{Res(1975)} < \text{Res(1968)} < \text{Res(1962)}.$$

On peut en déduire, que, sans que les raisons en soient connues, Strasbourg nivelle ses disparités internes et se prête mieux à la modélisation avec le temps (figure 19).

La fonction empirique de la répartition de densité  $E = D + \text{Résidus}$ , d'où les Résidus =  $E - D$ . Mais comme nous pouvons le constater, même après la transformation de l'espace, la distribution des résidus est pourtant loin d'être aléatoire. Beaucoup de fluctuations nous échappent dans l'analyse.

Il est important de connaître la localisation des résidus. L'image ainsi obtenue apporte un correctif indispensable à la cartographie des densités urbaines. La carte des résidus, pour le modèle appliqué pour 1990, montre que les écarts relativement les plus significatifs se situent au-delà des 5,5 km du centre. Un point de rupture apparaît au quatrième kilomètre du centre, à l'endroit où commencent les espaces industriels. Les résidus changent brutalement de signe. Les processus de déconcentration du centre liés aux facteurs technologiques, économiques et culturels.

Figure 16  
 Strasbourg - Faisceau de courbes exponentielles lognormales

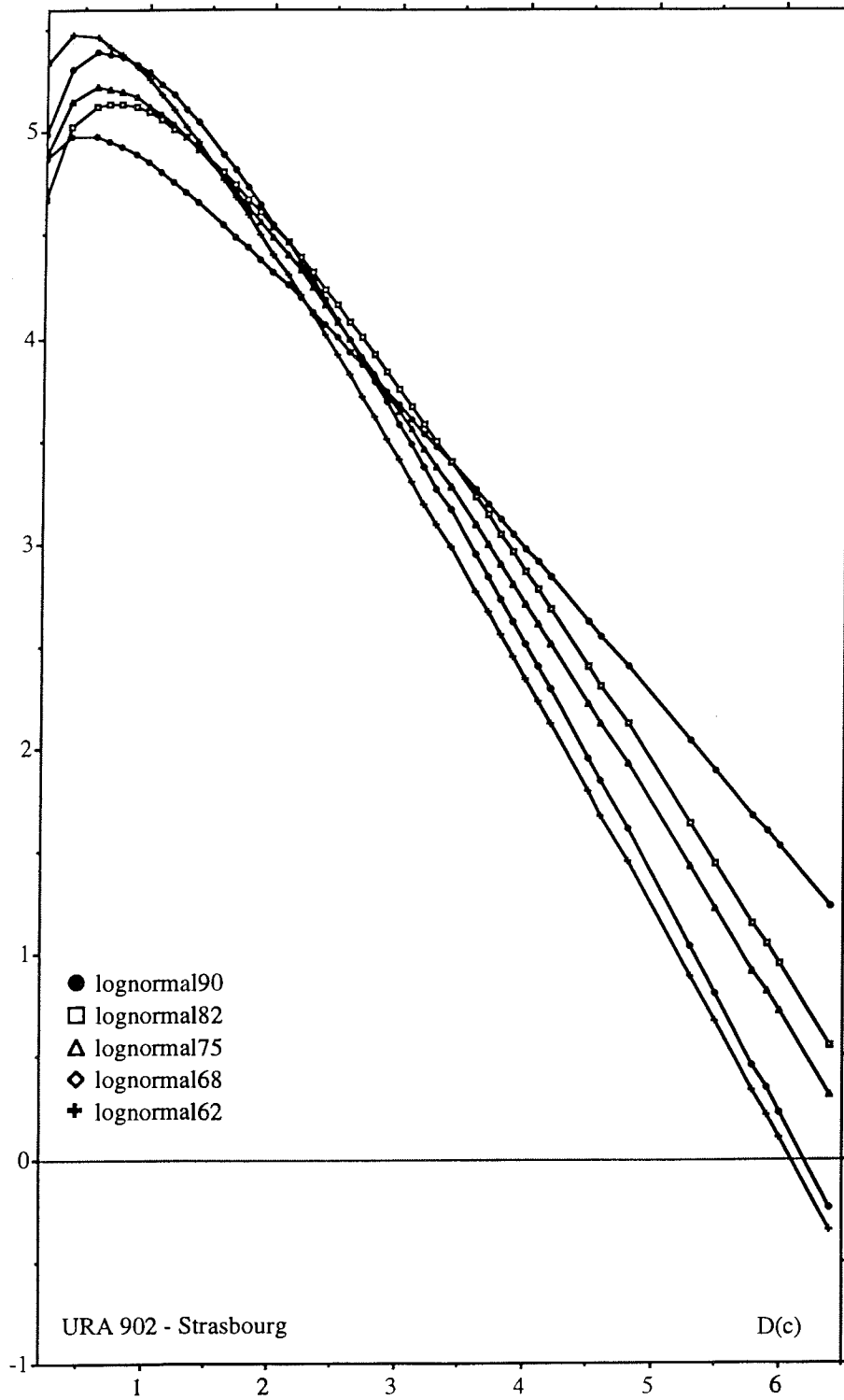


Figure 17  
Strasbourg 1962-1990 - Faisceau de profils généraux

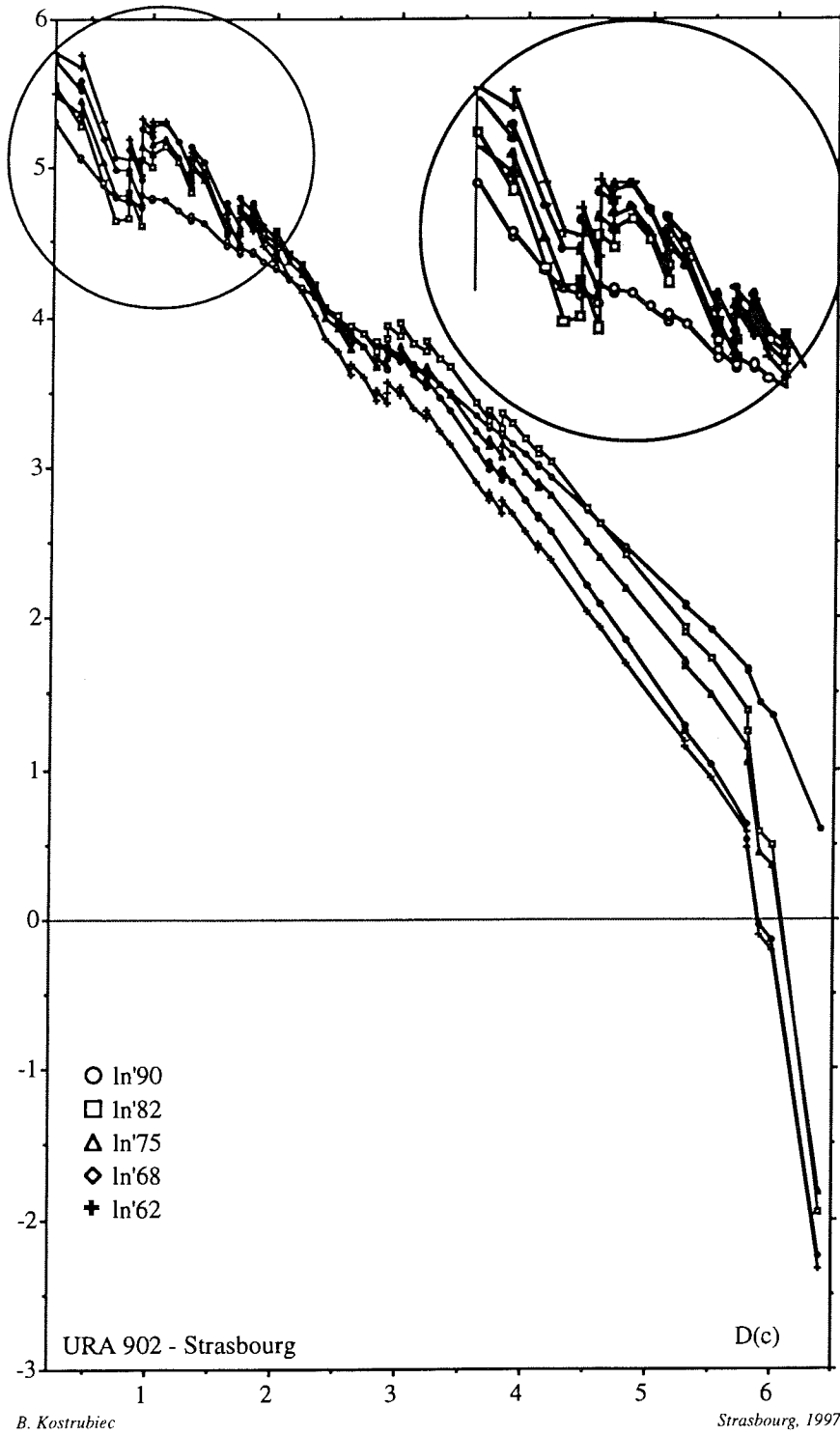


Figure 18  
Evolution de la densité moyenne et du carré moyen de l'ajustement.  
Strasbourg, Modèle exponentiel cubique

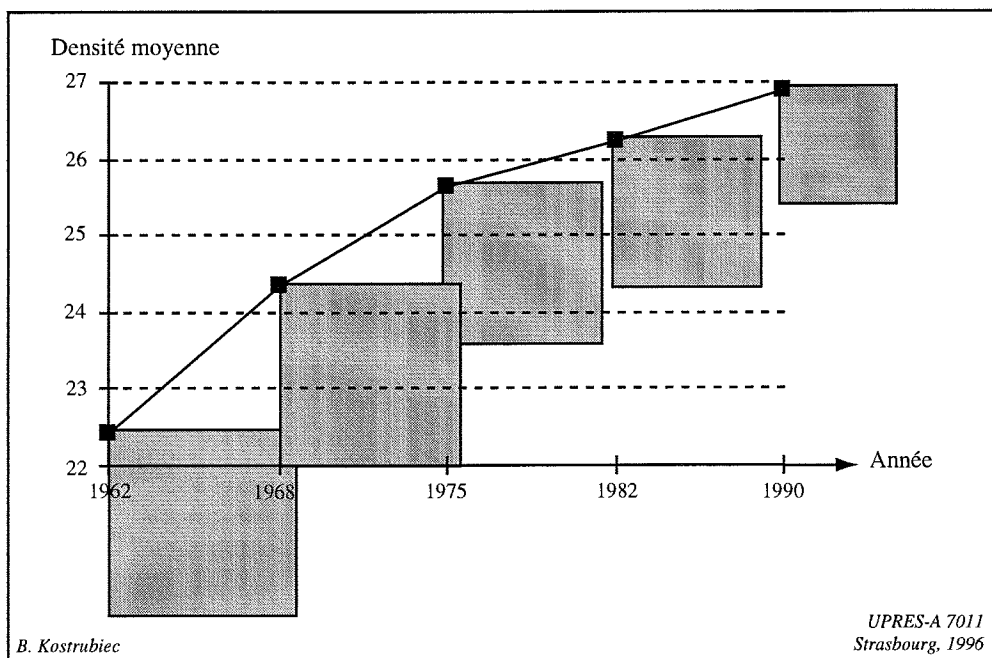
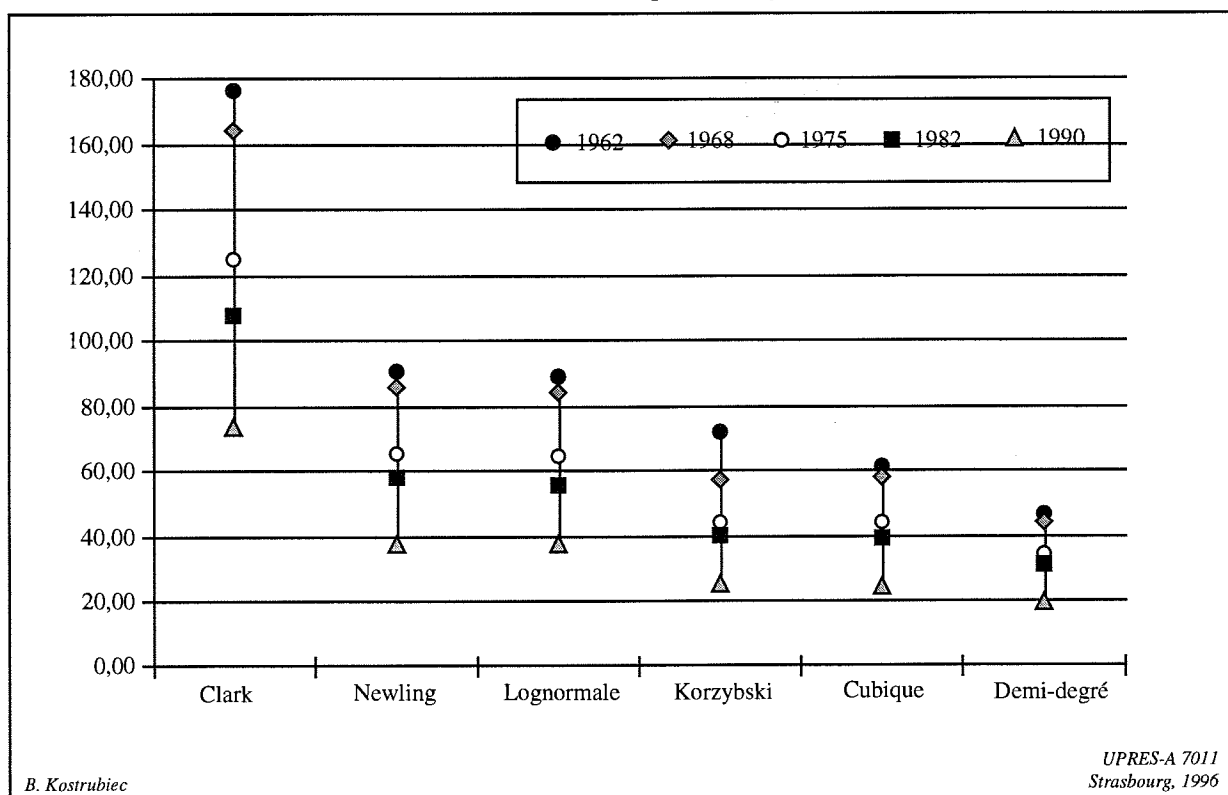


Figure 19  
Résidus de modèles comparés (moyens carrés)

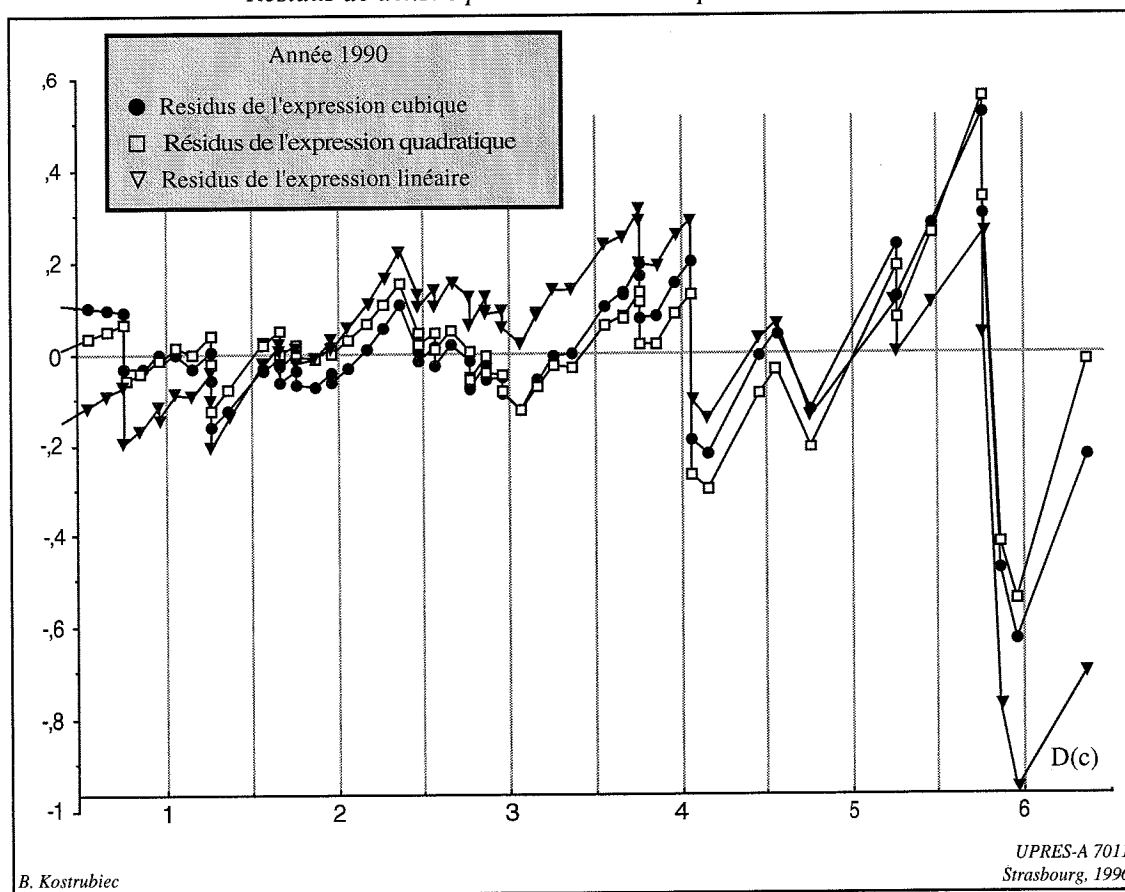


### ▲ 2.2.3.5. Évolution chrono-spatiale comparée

Parmi les courbes tracées pour différentes villes, nous observons de frappantes analogies de la répartition des densités.

Plutôt que de s'efforcer d'ajuster qu'une seule fonction, mieux vaut essayer d'ajuster  
 1/ par segments de ligne droite,  
 2/ par segments de courbe à degré supérieur.

Figure 20  
 Résidus de densité pour modèles à complexité croissante



Le profil de densité avec le cratère, nous permet de déterminer l'étape de la maturité urbaine de l'agglomération. Pour cela, il suffit de se rapporter à un catalogue similaire à celui de Newling (1969), ou aux résultats des travaux de Casetti (1973). Il en déduit, que l'augmentation ou la baisse de densité au centre-ville est fonction du temps, qui exerce un rôle fondamental sur l'expression.

$$D_{0,t} = D_{0,0} e^{mt-nt^2}$$

$D_{0,t}$  - la densité centrale au moment  $t$

$D_{0,0}$  = la densité centrale au début arbitraire  $t = 0$

$m$  = l'indice initial de croissance de la densité au centre

$n$  - l'indice du changement de la densité au centre en temps (figure 10). Les étapes du développement de la ville.

Les différents profils pour chaque modèle rassemblés sont réciproquement comparés. On constate qu'il existe des frappantes ressemblances formelles. L'évolution spatiale et temporelle de la structure interne de la ville similaire aux évolutions rencontrées dans d'autres villes à taille comparable, des comportements de structures, l'estimation du volume de la population résidente, les saturations de l'espace dans ses limites.

## Conclusion

Notre étude constitue une recherche théorique et empirique sur les modèles des densités urbaines. Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence les structures spatiales, de tester des modèles dont la portée pratique est plus qu'évidente. Elles permettent à dégager à l'intérieur des aires urbanisées, les noyaux, les franges péricentrales, les banlieues, ainsi que les zones suburbanisées. Nous avons testé quelques expressions mathématiques en vertu de leur capacité à refléter les plus importantes caractéristiques de la répartition des densités urbaines.

Il existe toujours des tentatives d'orientation de la recherche vers des fonctions de densité associées à des expressions plus complexes. Le transfert de modèle emprunté à la physique n'est pas toujours une heureuse initiative. Certains modèles reconstruisent le cratère là où il devrait être par définition absent (voir figures 15,16).



## 2.3

### Un prolongement des modèles de Clark et de Newling

#### Première approche et premiers tests

---

*Michel PRUVOT*

Le travail présenté ici constitue un premier essai de prolongement de modèles connus, accompagné de tests portant pour l'un toujours sur l'agglomération strasbourgeoise, et pour l'autre, sur la ville de Bergen en Norvège.

#### ■ 2.3.1 Les modèles

Le point de départ de cette étude sur les densités urbaines, ce sont les modèles classiques de Clark et de Newling. Le premier, formulé en 1951 peut être considéré comme un modèle de régression linéaire simple, à condition de transformer la densité en logarithme. Le second, afin de prendre en considération le "cratère" des C.B.D. revêt la forme d'une régression polynomiale du second degré. Dans l'ensemble ce dernier donne de meilleurs résultats à notre époque et dans les sociétés développées, ce d'autant plus que la taille de la ville est importante.

##### ▲ 2.3.1.1 Le modèle de Clark

Le modèle de Clark s'écrit :

$$\ln d_x = -a x + \ln d_0$$

où :  $x$  = distance au centre

$d_0$  = densité au centre

$d_x$  = densité à la distance  $x$  du centre

$-a$  = pente (négative) de la droite = gradient de densité

ou sous sa forme anglo-saxonne :

$$\ln d_x = \ln d_0 - b x$$

où :  $-b$  est le gradient (explicitement négatif)

On peut encore l'écrire sous sa forme exponentielle :

$$d_x = d_0 e^{-ax}$$

où :  $e$  = la base des logarithmes népériens.

L'avantage de cette dernière notation est de mieux mettre en évidence la valeur de densité au centre ; son inconvénient est sa complexité par rapport à la notation logarithmique.

#### ▲ 2.3.1.2 *Le modèle de Newling*

Le modèle de Newling s'écrit :

$$\ln d_x = -a x^2 + b x + \ln d_0$$

ou, sous sa forme exponentielle :

$$d_x = d_0 e^{-a x^2 + b x}$$

La première forme est celle d'un polynôme du second degré, où la variable expliquée, la densité  $d_x$  est transformée en logarithme.

#### ▲ 2.3.1.3 *Prolongement au modèle de Newling*

Le modèle de Newling, tel quel, suppose pour fonctionner de manière optimum une isotropie de l'espace autour du centre. Deux phénomènes majeurs, cependant, viennent troubler cette hypothèse trop simple :

- la théorie des lieux centraux intra-urbains, qui nous invite à considérer l'existence de centres secondaires avec des pics de densité, mais pas de "cratères", car ce ne sont pas des C.B.D.

- et surtout l'existence de zones planifiées de développement volontaire, avec souvent des logements de masse, phénomène beaucoup plus européen qu'américain, correspondant, par exemple, à la couronne intermédiaire des "grands ensembles" de la plupart des villes françaises. Ces pics secondaires, contrairement à ceux plus modestes des lieux centraux, n'ont aucune raison d'obéir à une logique de régularité.

Ce sont en bonne partie ces considérations qui m'ont amené à envisager l'extension des modèles de Clark (1<sup>er</sup> degré) et Newling (2<sup>ème</sup> degré) à des degrés supérieurs de polynômes. Si on conserve la même notation que ci-dessus, on écrira le 3<sup>ème</sup> degré :

$$\ln d_x = -a x^3 + b x^2 + c x + \ln d_0$$

ou en indiquant les coefficients

$$\ln d_x = a_1 x + a_2 x^2 - a_3 x^3 + \ln d_0$$

ou sous forme exponentielle

$$d_x = d_0 e^{-a x^3 + b x^2 + c x}$$

Il est aisé d'écrire le 4<sup>ème</sup> degré ou les degrés supérieurs.

#### ▲ 2.3.1.4 *Interprétation théorique des polynômes*

Dans toutes ces formulations, l'aspect exponentiel peut aussi bien rendu par la forme logarithmique de l'équation. Alors, en remplaçant  $y$  par  $\ln y$ , on retrouve la forme polynomiale. Deux questions se posent dès lors :

- cette forme polynomiale (quel qu'en soit le degré) a-t-elle une signification en soi, ou bien n'est-elle qu'une approximation d'une autre fonction (jusqu'ici inconnue) et qu'on utilise par commodité à la manière des mathématiciens dans la technique dite du "développement limité" ?

- si cette forme est effectivement fondamentale, que signifient ses composantes, les différents degrés et leurs coefficients ?

Jusqu'à ce jour (et peut-être pour longtemps encore) aucune réponse satisfaisante n'a été apportée (sinon très limitée). Je tâcherai, en fin d'exemples, d'explorer ces courbes d'un peu plus près.

### ■ 2.3.2 Applications

Le modèle classique de densité a été appliqué successivement aux exemples envisagés, en étudiant la relation linéaire entre le log népérien de la densité et la distance au centre, conformément au modèle de Clark, puis la relation polynomiale du 2<sup>ème</sup> degré, conformément au modèle de Newling, enfin les polynômes de degré supérieur, conformément à notre hypothèse selon laquelle après le cratère central et la couronne dense, la décroissance ne se fait pas régulièrement, mais avec des bosses secondaires, correspondant à des grands ensembles planifiés ou non ou à l'inclusion dans la zone urbanisée de centres secondaires plus ou moins anciens.

#### ▲ 2.3.2.1 L'application globale à l'ensemble de l'agglomération

##### □ 2.3.2.1.1 A Strasbourg

La présentation de Strasbourg comme lieu d'expérimentation a été faite ailleurs. Il suffit donc de préciser ici que ce travail se fait à l'échelle de l'îlot, la plus petite unité spatiale disponible au niveau du recensement. Précisons encore que, pour supprimer les quartiers non-résidentiels ou trop peu peuplés pour pouvoir être représentatifs, j'ai éliminé les quartiers de moins de 10 habitants (limite arbitraire après tests), ce qui laisse 2148 îlots sur 2498.

L'expérimentation du degré 1 correspond à l'application du modèle de Clark. L'ajustement est médiocre ( $r = 0.386$ ). Les résidus sont tout à fait dissymétriques (les négatifs sont plus extrêmes), mais, attention, on travaille sur des logarithmes, ce qui ramène les valeurs élevées vers la moyenne.

$$\ln d_x = 9.639005 - 0.268559 x$$

$$r = 0.3862$$

Source	Somme des carrés	Degré de liberté	Variance estimée	F
Régression	497.59313	1	497.59313	376.092
Résiduelle	2839.28895	2146	1.32306	
Totale	3336.88208	2147	1.55421	
dernière valeur significative de F à 1% :				6.647

La corrélation est faible, mais significative (figure 1).

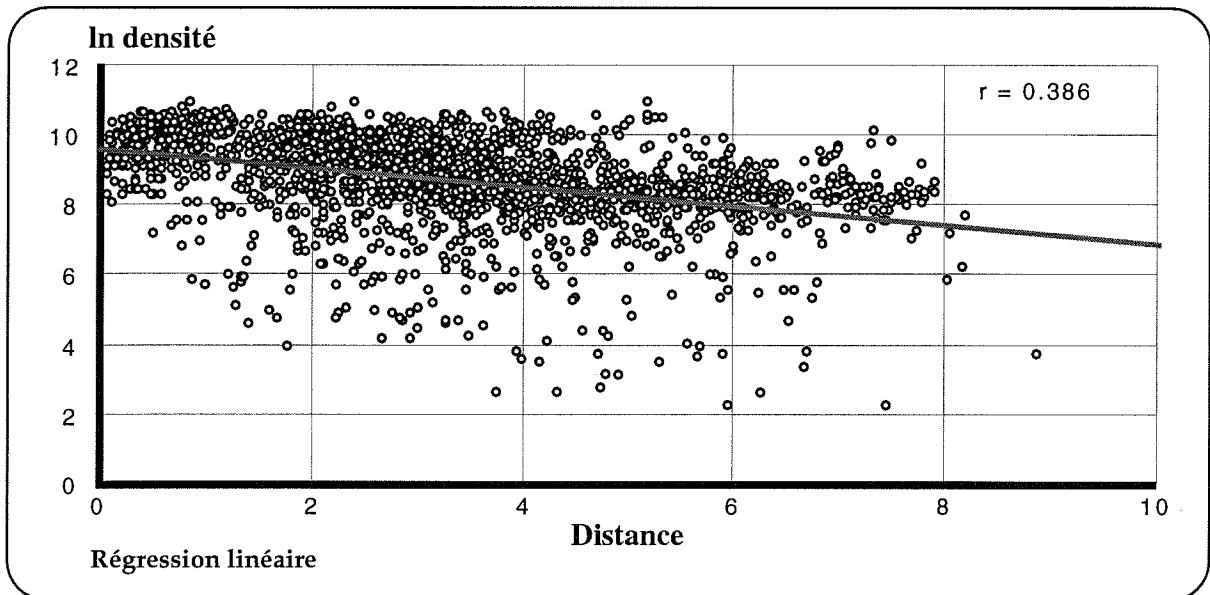
Le degré 2, correspondant au modèle de Newling (figure 2), donne un ajustement à peine amélioré ( $r = 0.394$ ).

$$\ln d_x = 9.889608 - 0.452086 x + 0.025222 x^2$$

$$r = 0.3941$$

Source	Somme des carrés	Degré de liberté	Variance estimée	F
Régression	518.29193	2	259.14596	197.215
Résiduelle	2818.59016	2145	1.31403	
Totale	3336.88208	2147	1.55421	
dernière valeur significative de F à 1% :				4.615

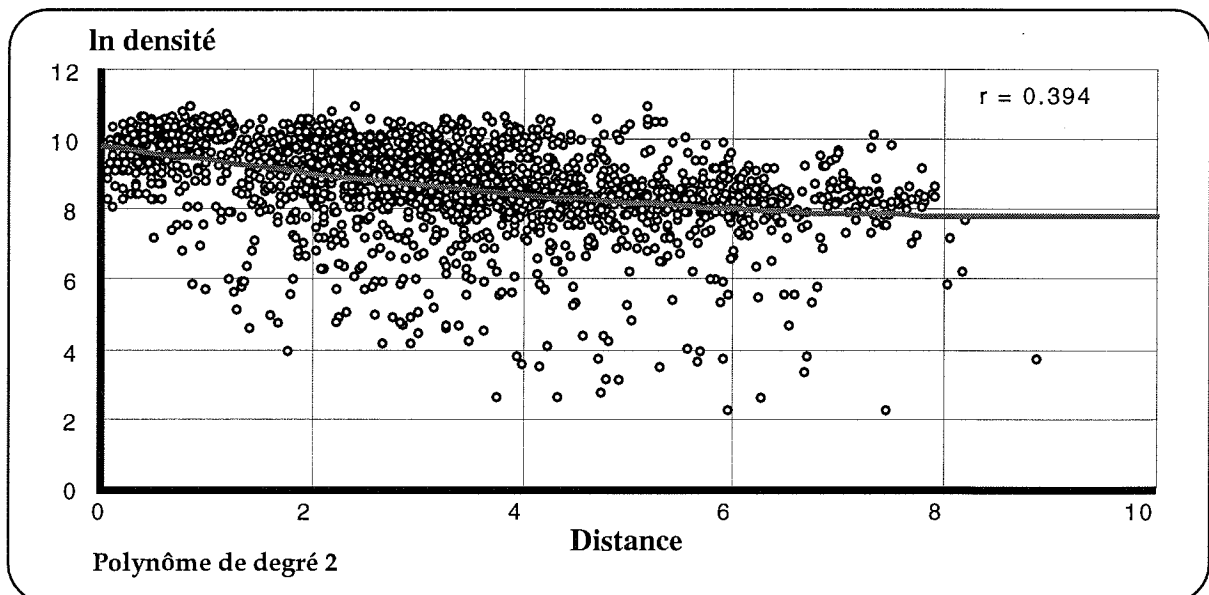
Figure 1  
Le ln de la densité expliqué par la distance au centre. Régression linéaire  
Strasbourg, 2148 îlots, 1990



M. Pruvot

Strasbourg, 1996

Figure 2  
Le ln de la densité expliqué par la distance au centre. Régression polynomiale de degré 2  
Strasbourg, 2148 îlots, 1990



M. Pruvot

Strasbourg, 1996

Si la corrélation est significative, on peut toutefois tester si l'amélioration apportée par le passage au degré supérieur l'est également, en utilisant le test :

$$F_{(1), (n-p-1)} = \frac{r_p^2 - r_{p-1}^2}{\frac{1}{n-p-1} (1 - r_p^2)}$$

où  $p$  est le degré du polynôme supérieur et  $r_p^2$  le carré de la corrélation de ce modèle. La valeur théorique tabulée pour un risque  $\alpha = 0.01$  est  $F_{1,2145} = 6.64$ , tandis que la valeur calculée est de 15.65 ; l'amélioration est significative.

Au degré 3 la corrélation est de 0.3943 ; le gain est faible (figure 3). Le modèle s'écrit :

$$\ln d_x = 9.838395 - 0.379297 x + 0.001405 x^2 + 0.002106 x^3$$

$$r = 0.3943$$

Source	Somme des carrés	Degré de liberté	Variance estimée	F
Régression	518.90453	3	172.96818	131.599
Résiduelle	2817.97755	2144	1.31436	
Totale	3336.88208	2147	1.55421	
dernière valeur significative de F à 1% :				3.791

La corrélation est significative, mais l'amélioration ne l'est pas ; toutefois, ceci n'est pas une raison pour arrêter le processus, car nous ne sommes pas dans le cadre d'une régression par étape : en effet si l'amélioration n'est pas significative avec l'adjonction du terme du 3<sup>ème</sup> degré, elle peut à nouveau l'être avec des termes de degré supérieur, et, de fait, elle le sera.

Au degré 4 la corrélation est de 0.3956 (figure 4). Le modèle devient :

$$\ln d_x = 9.687339 - 0.040204 x - 0.185211 x^2 + 0.038715 x^3 - 0.002330 x^4$$

$$r = 0.3956$$

Source	Somme des carrés	Degré de liberté	Variance estimée	F
Régression	522.90453	4	130.56109	99.406
Résiduelle	2814.63772	2143	1.31341	
Totale	3336.88208	2147	1.55421	
dernière valeur significative de F à 1% :				3.328

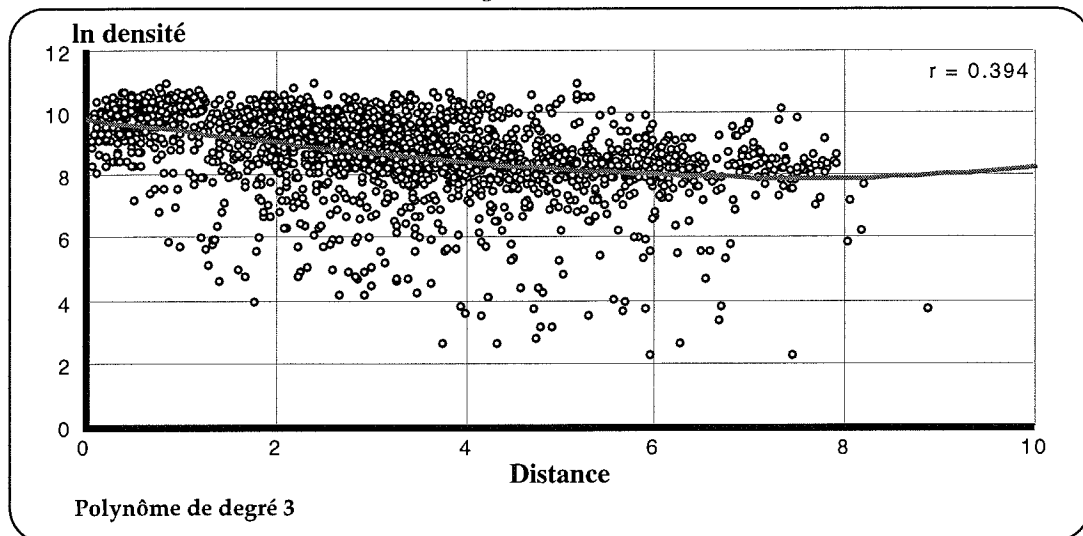
Ici encore la corrélation est significative, mais pas l'amélioration (avec les mêmes réserves).

Le polynôme de degré 5 offre une corrélation de  $r = 0.3986$  et le modèle (figure 5) s'écrit alors :

$$\ln d_x = 9.978463 - 0.938099 x + 0.537747 x^2 - 0.193506 x^3 + 0.029743 x^4 - 0.001587 x^5$$

$$r = 0.3986$$

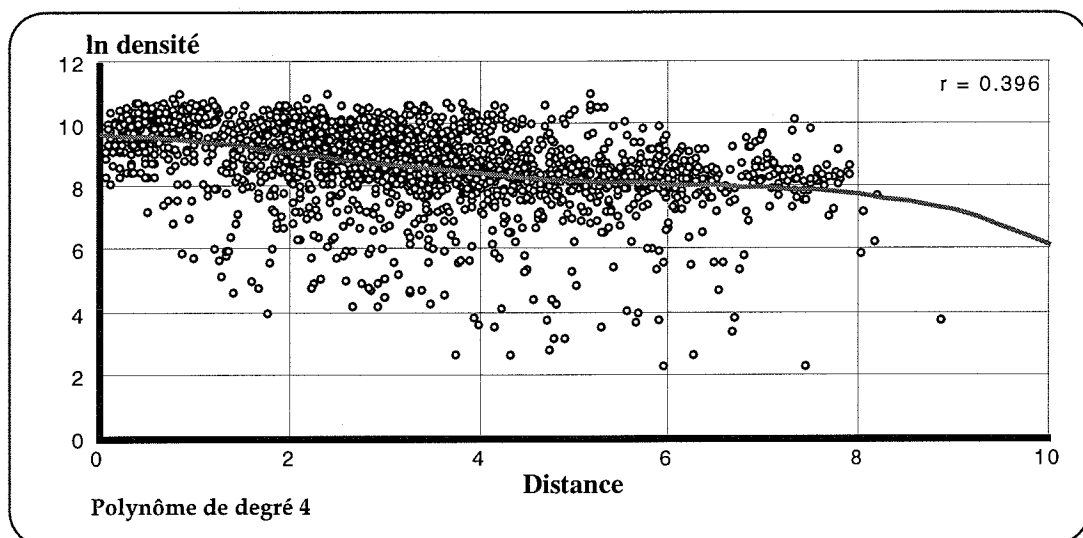
Figure 3  
Le ln de la densité expliqué par la distance au centre. Régression polynomiale de degré 3  
Strasbourg, 2148 îlots, 1990



M. Pruvot

Strasbourg, 1996

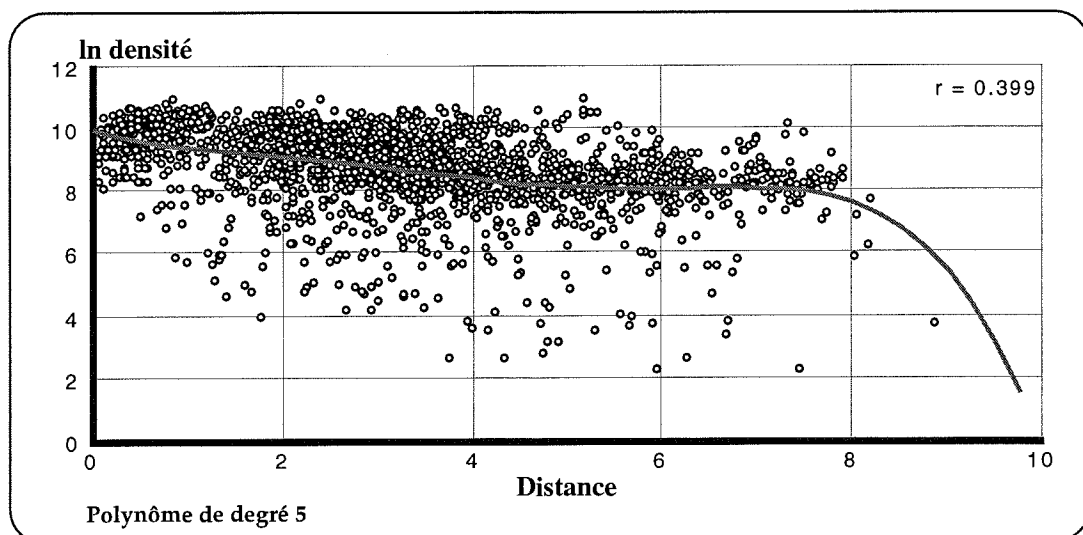
Figure 4  
Le ln de la densité expliqué par la distance au centre. Régression polynomiale de degré 4  
Strasbourg, 2148 îlots, 1990



M. Pruvot

Strasbourg, 1996

Figure 5  
Le ln de la densité expliqué par la distance au centre. Régression polynomiale de degré 5  
Strasbourg, 2148 îlots, 1990



M. Pruvot

Strasbourg, 1996

Source	Somme des carrés	Degré de liberté	Variance estimée	F
Régression	530.20625	5	106.04125	<b>80.929</b>
Résiduelle	2806.67583	2142	1.31031	
Totale	3336.88208	2147	1.55421	
<i>dernière valeur significative de F à 1% :</i>				3.026

L'expérimentation des degrés 6 à 9 montre que les corrélations sont toujours significatives, et même largement, mais ceci est assez attendu, étant donné le nombre d'observations (2148). On examinera plus loin la forme des courbes et ce que signifient les coefficients. Il n'en reste pas moins que la faible amélioration fournie par les degrés supérieurs s'accompagne d'un considérable alourdissement du modèle au détriment de la parcimonie.

On voit bien sûr qu'en passant à des polynômes de degré supérieur, on améliore le % d'explication par la distance, mais on sait aussi qu'il ne peut en être qu'ainsi (le % d'explication ne peut jamais diminuer !), tout au plus le résultat peut-il rester stable, sans augmentation décelable. Cette amélioration, même lorsqu'elle apparaît encore n'est plus nécessairement significative au sens statistique du terme.

degré du polynôme	Corrélation	F	F (amélioration)
1	0.3862	376.092	—
2	0.3941	197.215	15.654 **
3	0.3943	131.599	0.400
4	0.3956	99.406	2.609
5	0.3986	80.929	6.068 *
6	0.4065	70.655	16.313 **
7	0.4068	60.620	0.626
8	0.4079	53.352	2.300
9	0.4086	47.617	1.467
		significatif :	* : à 0.05 (F>3.84)
		(amélioration)	** : à 0.01 (F>6.64)

#### □ 2.3.2.1.2 A Bergen

##### ☞ Les conditions

L'exemple de Bergen (212 944 habitants en 1990) a été choisi ici comme une sorte de contre-exemple. En effet, si Strasbourg connaît quelques obstacles physiques (le Rhin) ou historiques (les zones non-*œdificandi* pour raison militaire), cela reste dans des limites ordinaires. Avec la ville de Bergen, c'est d'abord la nature extrêmement tourmentée de la côte ouest de la Norvège : ramification et imbrication de la terre et de la mer, reliefs accidentés, dénivelés violents, barrières montagneuses, maritimes ou lacustres, dispersion des zones constructibles, etc.

Pour prendre en compte la réalité bergenoise, il est très insuffisant de s'en tenir aux modèles classiques densité-distance au centre, à cause de la fantastique contrainte physique (mer et montagne). La ville, née sur une petite presqu'île festonnée mais pas excessivement accidentée, s'est, au cours des 2 derniers siècles, étendue le long de rivages enserrés entre mer

et montagne abrupte au nord et au sud, avant d'occuper une vallée plus large débouchant sur un fjord, et des lacs aux ramifications multiples. Deux ponts, le premier, bas, au début du siècle, le second enjambant de haut un bras de fjord où transitaient de gros bateaux, au cours des années 50, permettent d'accéder à d'autres extensions indépendantes, en ruban. En fait, hormis le vieux centre et la portion de vallée au delà du Store Lungegårdsvann, tous les développements ont été difficiles, en ruban, le long des côtes et des montagnes, suivant des chemins accidentés et sinueux. Étouffant dans ces limites, elle a progressivement débordé ces obstacles naturels, par des routes étroites et longues franchissant les hauteurs, qui créent autant de ruptures dans le tissu urbain, mais aussi par des ferries, puis, plus tard, par des ouvrages d'art (ponts et tunnels). Les nouveaux espaces ainsi atteints ont été des plateaux au relief souvent tourmenté (Åsane), des vallées désertes (Fyllingsdalen) ou occupées par un petit centre isolé (Arna), des "dentelles" d'îles, de lacs et de criques (Fana), quand ce n'est pas une île voisine à 10 minutes de ferry, comme Askøy (qui ne fait pas partie de la commune). Entre ces filets plus denses, les anciens établissements agricoles de ces terres pauvres ont été occultés ou remplacés par un important habitat dispersé, témoin d'une profonde tradition culturelle. L'agglomération officielle (sans Askøy) s'étend ainsi sur 36 km. N-S et 30 km. E-O pour une surface communale de 465 km<sup>2</sup> avec 210 km de côte !

C'est ce caractère de formidable contrainte physique avec ces déformations considérables qui rendent intéressant un test du modèle en situation extrême.

La ville est divisée, pour le recensement de 1990, en 347 kretser (le krets est la plus petite unité spatiale de recensement disponible), dont 8 ont été éliminés pour population trop faible (< 20 hab.) ou densité insuffisante (< 15 h/km<sup>2</sup>), compte tenu également de leur caractère. Ces 339 kretser ont une population moyenne de 622 habitants (de 29 à 2604), une surface moyenne de 1,09 km<sup>2</sup> (de 0,01 à 20,73) et une gamme de densités de 16 h/km<sup>2</sup> à 20644 h/km<sup>2</sup>.

#### Les résultats

L'application du modèle de Clark, ici la régression linéaire sur le log népérien de la densité, donne un ajustement très supérieur à ce qu'on a trouvé sur Strasbourg, soit une corrélation de 0.709 :

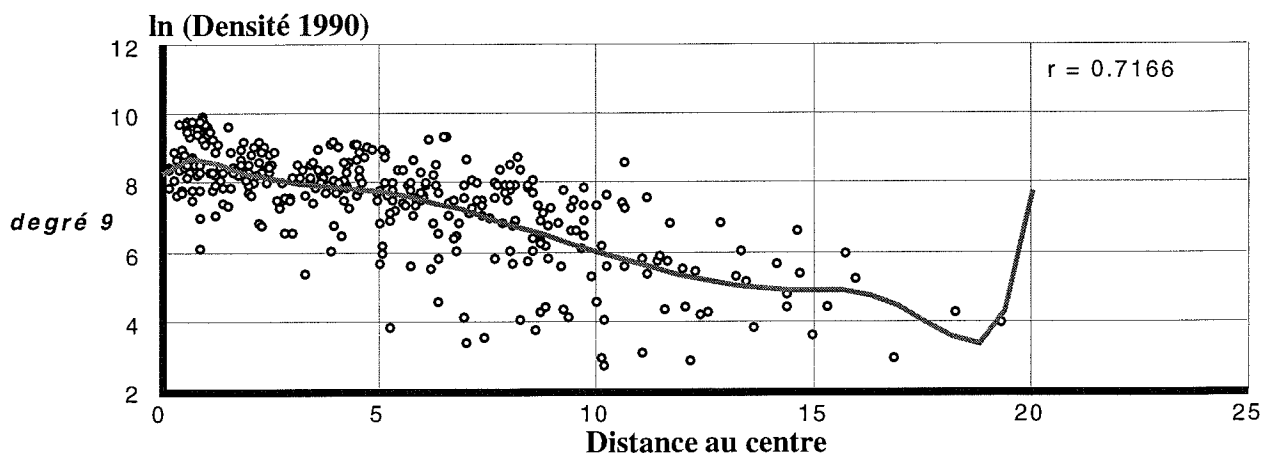
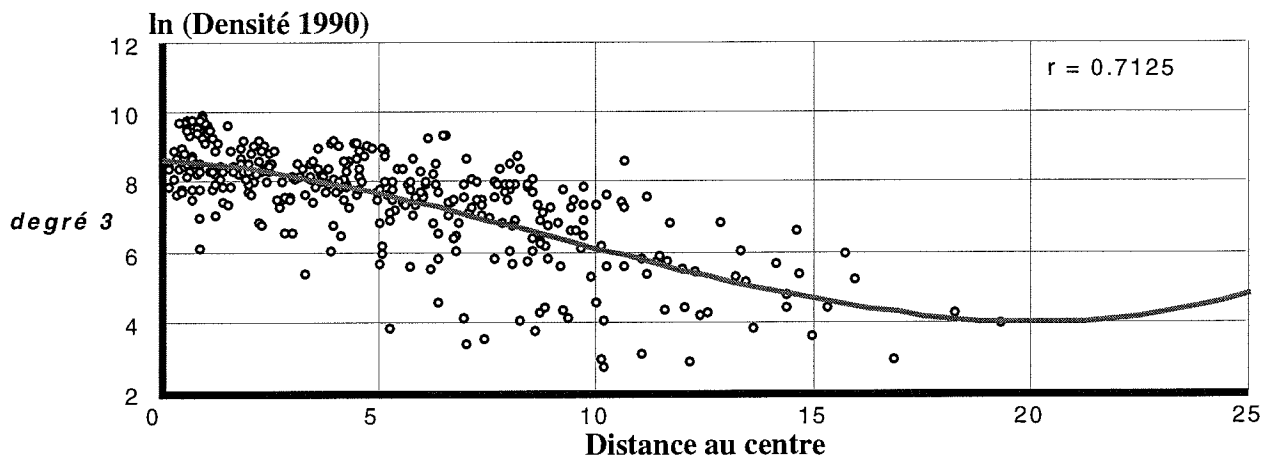
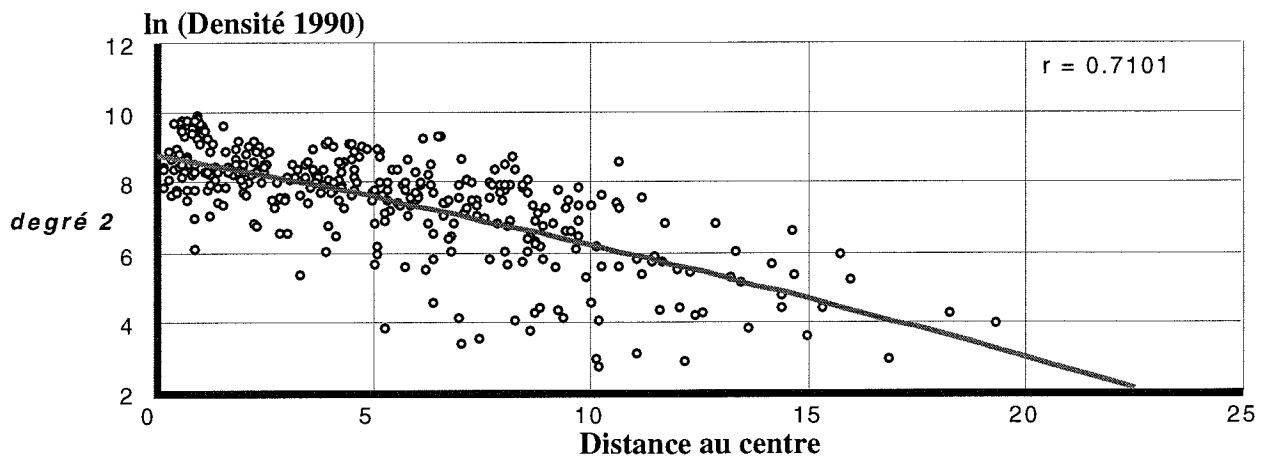
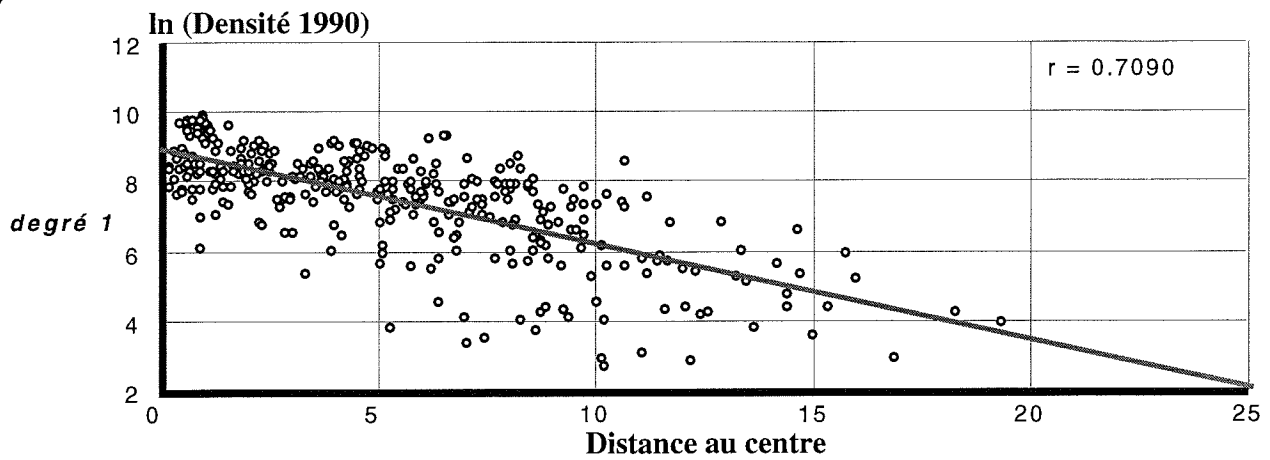
$$\ln d_x = 8.964402 - 0.273928 x$$

$$r = 0.7090$$

Source	Somme des carrés	Degré de liberté	Variance estimée	F
Régression	384.14314	1	384.14314	<b>340.601</b>
Résiduelle	380.08142	337	1.12784	
Totale	764.22457	338	2.26102	
dernière valeur significative de F à 1% :				6.711

En comparant ce résultat avec celui de Strasbourg, il faut prendre en compte deux considérations importantes : d'abord les unités spatiales, les *kretser* sont plus importantes en surface et en population que les îlots de Strasbourg, ce qui tend à lisser les résultats et donc à améliorer les ajustements ; ensuite l'importance de la population dispersée, du fait de la nature, mais aussi de la culture et les distances importantes auxquelles se situent les *kretser* les plus périphériques, en étirant le nuage de point, contribuent aussi à améliorer l'ajustement (figure 6).

Figure 6  
 Le ln de la densité expliqué par la distance au centre. Régression polynomiale de degrés 1, 2, 3 et 9  
 Bergen 1990, 339 quartiers



L'utilisation du modèle de Newling n'apporte guère d'amélioration, avec une corrélation de 0.710, soit :

$$\ln d_x = 8.870424 - 0.231547 x + 0.003062 x^2$$

$$r = 0.7101$$

Source	Somme des carrés	Degré de liberté	Variance estimée	F
Régression	388.31740	2	192.65870	<b>170.842</b>
Résiduelle	378.90716	336	1.12770	
Totale	764.22457	338	2.26102	
dernière valeur significative de F à 1% :				4.669

L'ajustement par un polynôme du 3<sup>ème</sup> degré est le premier niveau d'amélioration que j'ai proposé par rapport au modèle de Newling. Il s'avère ici peu performant. La première raison pourrait en être encore une fois l'importance de la dispersion, qui est assez bien prise en compte par la relation linéaire ; la seconde, un phénomène de city encore peu accentué, à cause de la variété de l'urbanisation au centre (imbrication de vieux centre protégé et de reconstruction après incendies, culture et planification également significatives au niveau des bureaux) :

$$\ln d_x = 8.698789 - 0.093053 x - 0.025352 x^2 + 0.000917 x^3$$

$$r = 0.7125$$

Source	Somme des carrés	Degré de liberté	Variance estimée	F
Régression	387.98781	3	129.32927	<b>115.154</b>
Résiduelle	376.23676	335	1.12309	
Totale	764.22457	338	2.26102	
dernière valeur significative de F à 1% :				3.841

On remarquera, toutefois, en comparant le terme constant (l'ordonnée à l'origine), que la valeur diminue sensiblement, traduisant mieux le phénomène en creux, de la city :

$$\begin{aligned} \exp 8.964402 &= 7820 \\ \exp 8.870424 &= 7118 \\ \exp 8.698789 &= 5996 \end{aligned}$$

mais ceci ne se poursuit pas systématiquement aux puissances supérieures. De plus, à ces niveaux, aucune amélioration n'est significative. On peut résumer cela :

degré du polynôme	Corrélation	F	F (amélioration)	densité théorique au centre
1	0.7090	340.601	—	7820
2	0.7101	170.842	1.058	7119
3	0.7125	115.154	2.323	5996
4	0.7127	86.204	0.193	6365
5	0.7143	69.390	1.552	7961
6	0.7143	57.655	0.000	7782
7	0.7158	49.687	1.456	5731
8	0.7159	43.346	0.097	5384
9	0.7166	38.578	0.678	3995
significatif : (amélioration)			* : à 0.05 (F>3.87) ** : à 0.01 (F>6.72)	

Il est à noter que, malgré le peu de signification des termes de degrés supérieurs, la souplesse acquise permet de rendre compte des plus faibles densités de l'extrême centre (mais à quel prix !) (figure 6).

D'autre part, afin de tester les variations récentes, la même analyse a été réalisée sur les données de 1980, avec les mêmes conditions. Les résultats sont globalement les mêmes, avec des corrélations semblables, mais bien sûr des variations locales sensibles. Ainsi le polynôme du 3<sup>ème</sup> degré (figure 7) ajuste avec une corrélation de 0.7148 et l'équation est :

$$\ln d_x = 8.863952 - 0.143237 x - 0.024238 x^2 + 0.000973 x^3$$

Enfin la même analyse a été réalisée sur 342 *kretser* en 1993. La régression linéaire sur le log népérien des densités donne une corrélation de 0.687 le polynôme du 3<sup>ème</sup> degré (figure 8), une corrélation de 0.6884 et une équation :

$$\ln d_x = 8.809203 - 0.179137 x - 0.012850 x^2 + 0.000469 x^3$$

La comparaison des résidus de 1980 et 1993 (figure 9) révèle 3 *kretser* (encerclés sur le graphique) très détachés de l'ensemble principal (la comparaison par régression donne une corrélation linéaire de 0.9343), qui correspondent à des quartiers neufs (le n° 805 Morvikbotnane à Åsane, de 37 h/km<sup>2</sup> à 725 h/km<sup>2</sup> par exemple, ou le n° 1704 Bønes, près de Sælen, de 101 h/km<sup>2</sup> à 2896 h/km<sup>2</sup>), tandis qu'une 2<sup>ème</sup> ligne (également encerclée sur le graphique) moins détachée, révèle des quartiers de développement déjà plus anciens (par exemple le n°1606 Nordås, à l'est de l'aéroport de Flesland, passant de 424 h/km<sup>2</sup> à 1917 h/km<sup>2</sup>).

Figure 7  
 Le ln de la densité expliqué par la distance au centre. Régression polynomiale de degré 3  
 Bergen, 1980, 339 quartiers

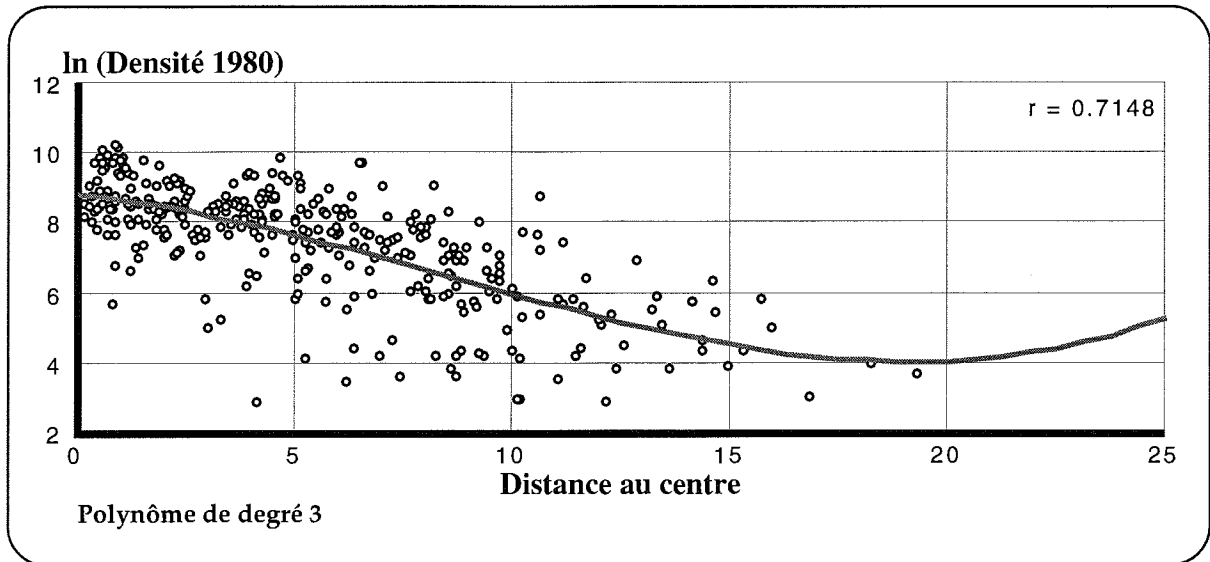


Figure 8  
 Le ln de la densité expliqué par la distance au centre. Régression polynomiale de degré 3  
 Bergen, 1993, 342 quartiers

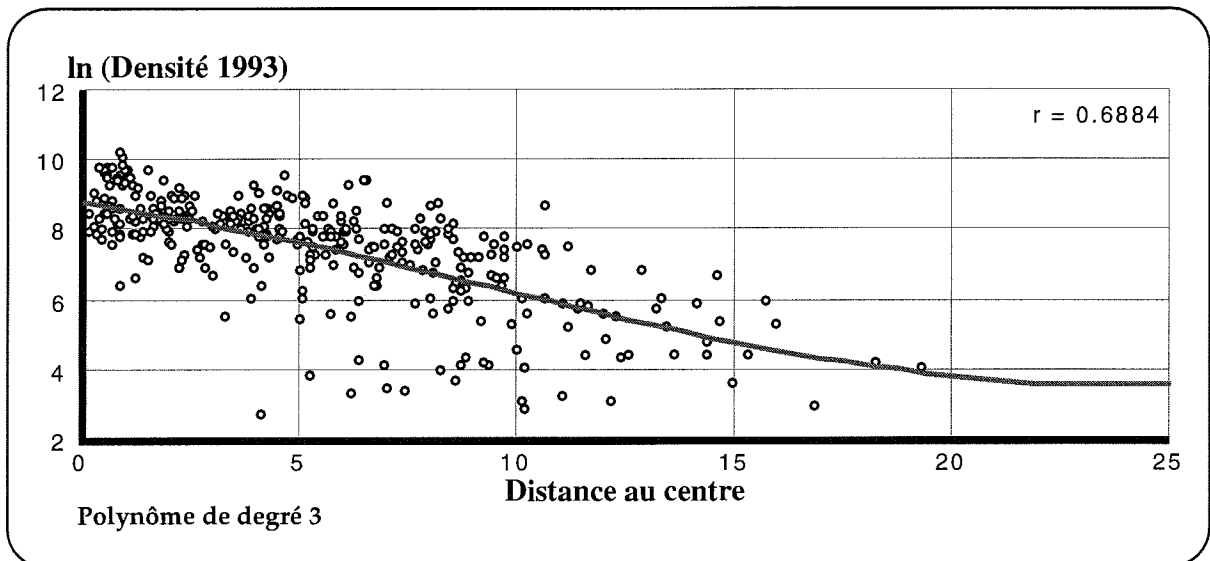
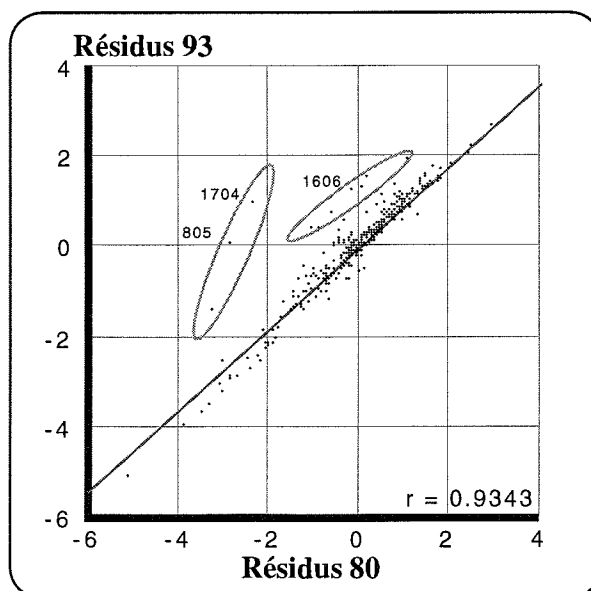


Figure 9  
 Comparaison des résidus des analyses de Bergen de 1993 et 1980. Graphique de régression



### ▲ 2.3.2.2 Test par secteurs

#### □ 2.3.2.2.1 Bergen

Toutefois ces tests ont une limite, qui est liée au fait que la forme de la ville est loin d'être homogène dans toutes les directions à partir du centre, du fait de la configuration, des conditions de croissance, etc. L'élasticité de la distance est donc différentielle, et en tenir compte est susceptible d'améliorer sensiblement l'application du modèle. Reste à savoir quand, comment et pourquoi.

Afin de réaliser ce test il convenait de réaliser des secteurs à partir du centre, mais si cela est relativement facile à réaliser sur Strasbourg, il n'en va pas du tout de même à Bergen. Du fait de ses conditions physiques décrites plus haut, la seule subdivision possible est un secteur nord en direction d'Åsane et épousant l'incurvation des voies d'accès après Eidsvåg, un secteur sud vers Fana et englobant la presqu'île jusque vers Flesland en direction de l'ouest ; enfin un petit secteur ouest comprenant surtout Laksevåg et Fyllingsdalen, assez bien délimité par la mer. Un grand tiers est du territoire ne peut être constitué en secteur, à cause des obstacles, des routes qui les contournent par les autres secteurs, ou du long tunnel du train, sans compter qu'une bonne partie est montagneuse. Le test présenté ici sur les 3 premiers degrés donne, comme on pouvait s'y attendre, des résultats très différents d'un secteur à l'autre ; en revanche, les résultats sont systématiquement moins bons que pour la ville entière. Loin donc d'hétérogénéiser le nuage, le procédé en donne trois formes plus simples, en révélant des groupements et des étranglements qui les séparent. On voit, ici, que le 3<sup>ème</sup> degré (figure 10) épouse nettement mieux cette forme très marquée par les obstacles physiques ou les espaces interstitiels entre l'ancienne commune de Bergen et les anciens centres de banlieue de Fana et de Laksevåg. Ces résultats se présentent ainsi :

	Nord	Ouest	Sud
<i>Linéaire</i>	0.6517	0.5184	0.7731
<i>Degré 2</i>	0.6518	0.5187	0.7772
<i>Degré 3</i>	0.6661	0.6081	0.7907

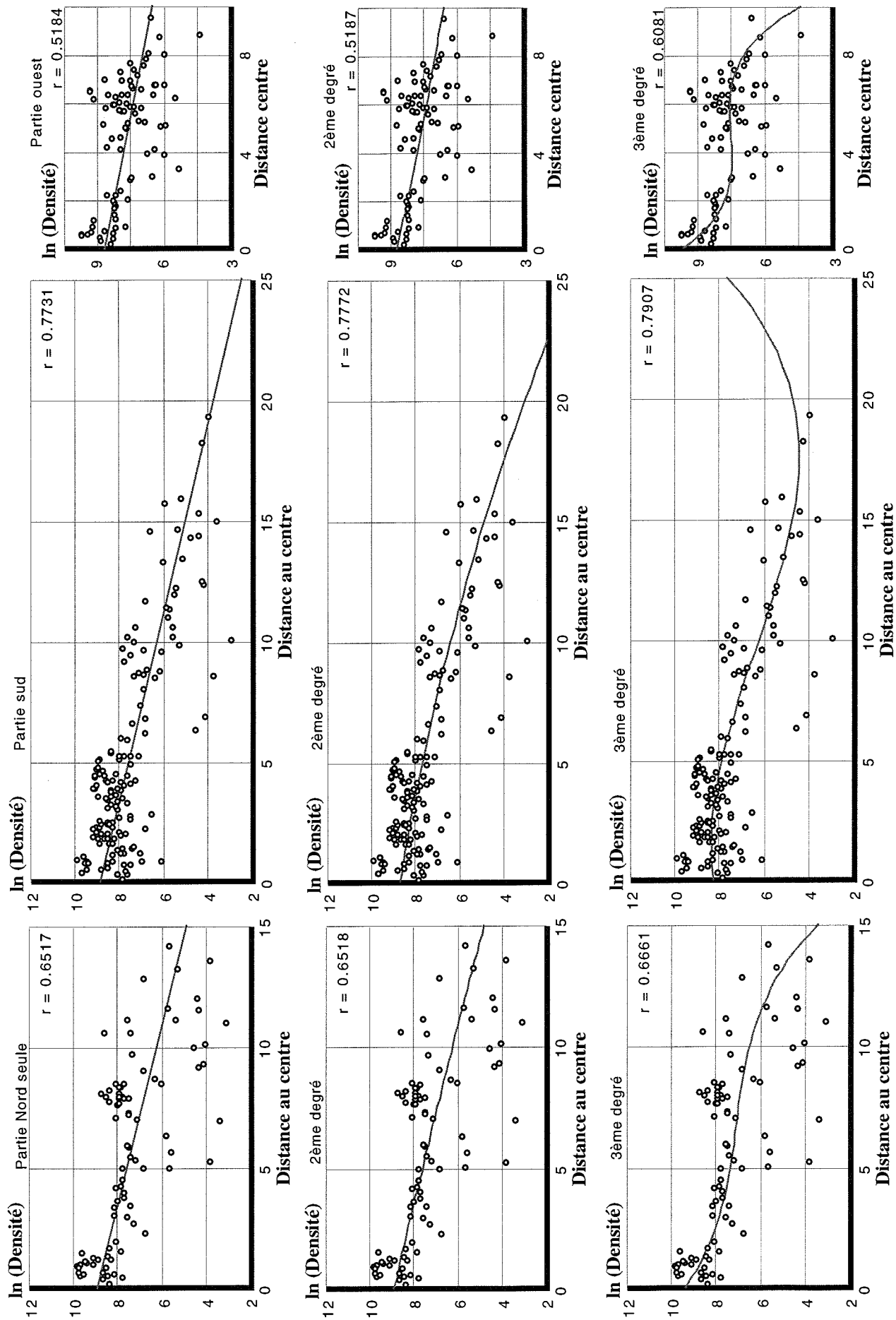
Coefficients de corrélation

	Nord	a1	a2	a3	a0	Estimation densité au centre
<b>Nord</b>						
Linéaire		-0.2701			8.9971	7686
Degré 2		-0.2546	-0.0013		8.9690	7856
Degré 3		-0.7481	0.0908	-0.0045	9.4448	12642
<b>Ouest</b>						
Linéaire		-0.2190			8.7548	6341
Degré 2		-0.2499	0.0037		8.7947	6599
Degré 3		-0.6395	-1.8986	1.6438	9.9565	21088
<b>Sud</b>						
Linéaire		-0.2577			8.9471	7686
Degré 2		-0.1714	0.0056		8.7533	6332
Degré 3		-1.5236	0.3404	-0.0241	9.7235	16705

Coefficients des équations de régression

Figure 10

Analyse de la relation du  $\ln$  de la densité avec la distance au centre, à Bergen, 1990, pour 3 secteurs (N, S, O). Régression polynomiale de degrés 1 à 3



Ces résultats ne sauraient être généralisés. On le verra bien avec Strasbourg. Il est, par exemple, étonnant d'obtenir, avec des ajustements pourtant un peu meilleurs, des valeurs de densité théorique au centre bien trop élevées.

#### □ 2.3.2.2.2 Strasbourg

Pour Strasbourg, les résultats de l'étude générale sur l'ensemble de l'agglomération, même après avoir éliminé les îlots qu'on peut qualifier schématiquement de non-résidentiels, restaient médiocres, en raison des comportements très différents des principaux axes d'allongement, et de l'ancienne couronne de terrains non-*œdificandi* pour raison militaire. Afin de tenir compte de cette élasticité différentielle de la distance, un test lourd a été réalisé par secteur. La ville a été découpée en 6 secteurs de 60° à partir du centre (Place Kléber), ce en démarrant exactement à partir de la direction est ; ces secteurs ne diffèrent pas trop des principaux axes d'extension. Une 2<sup>ème</sup> différence provient de la taille des unités (les îlots), beaucoup plus petites que les quartiers de Bergen. A chacun de ces 6 secteurs a été appliquée la même analyse de régression, en testant successivement les polynômes de degré 1 à 5. Les corrélations varient considérablement d'un secteur à l'autre, comme le montre la figure 11.

Les améliorations obtenues aux degrés supérieurs sont également variables selon le secteur. On en sera convaincu en comparant les formules présentées sous forme de tableau des coefficients (figure 11) et les courbes (figure 12).

Malgré ces tentatives d'amélioration, les résultats restent relativement insatisfaisants ; les nuages de points "épais" traduisent, avec notamment un voile de points descendant en dessous de la masse principale, l'existence d'une grande variabilité locale au niveau, par exemple, des îlots. A la limite, en descendant encore plus bas on finirait au niveau des individus avec une "densité" de 0 ou de 1, et la donnée du recensement n'aurait plus aucun sens. En fait, la notion de densité n'a de sens qu'à un niveau de regroupement et par conséquent d'imprécision ou de flou, même si cela peut paraître paradoxal. On aboutit, dans le meilleur des cas, à un lissage des données.

Une première manière de le réaliser peut être, comme cela a souvent été fait, d'étudier les densités par anneau concentrique à partir du centre, en considérant la densité de l'anneau tout entier.

#### ▲ 2.3.2.3 Exponentielle ou non ?

Jusqu'à présent je n'ai pas remis en question l'aspect exponentiel du modèle de référence, aussi bien chez Clark que chez Newling, ou, si l'on préfère, la transformation logarithmique de la densité dans le modèle "linéarisé". La raison d'être de telles transformations est double :

- d'une part elle assure la "normalité" de la distribution d'une variable (ici la densité)
- d'autre part elle correspond au caractère multiplicatif et non additif du phénomène, dans lequel les valeurs de la variable dépendante (la densité) dépendent de la valeur à l'origine 0 de la variable indépendante (la distance).

Si on ne prend en compte que la normalité, on constate, sur l'exemple de Strasbourg, que la correction introduite par la transformation logarithmique sur l'asymétrie est excessive. La racine cubique de la variable densité donne une meilleure correction, comme on le voit dans le tableau suivant :

Figure 11

Relation du ln de la densité avec la distance au centre (2148 îlots de Strasbourg), pour 6 secteurs de la ville  
 Régression polynomiale de degrés 1 à 5 - Tableau des coefficients

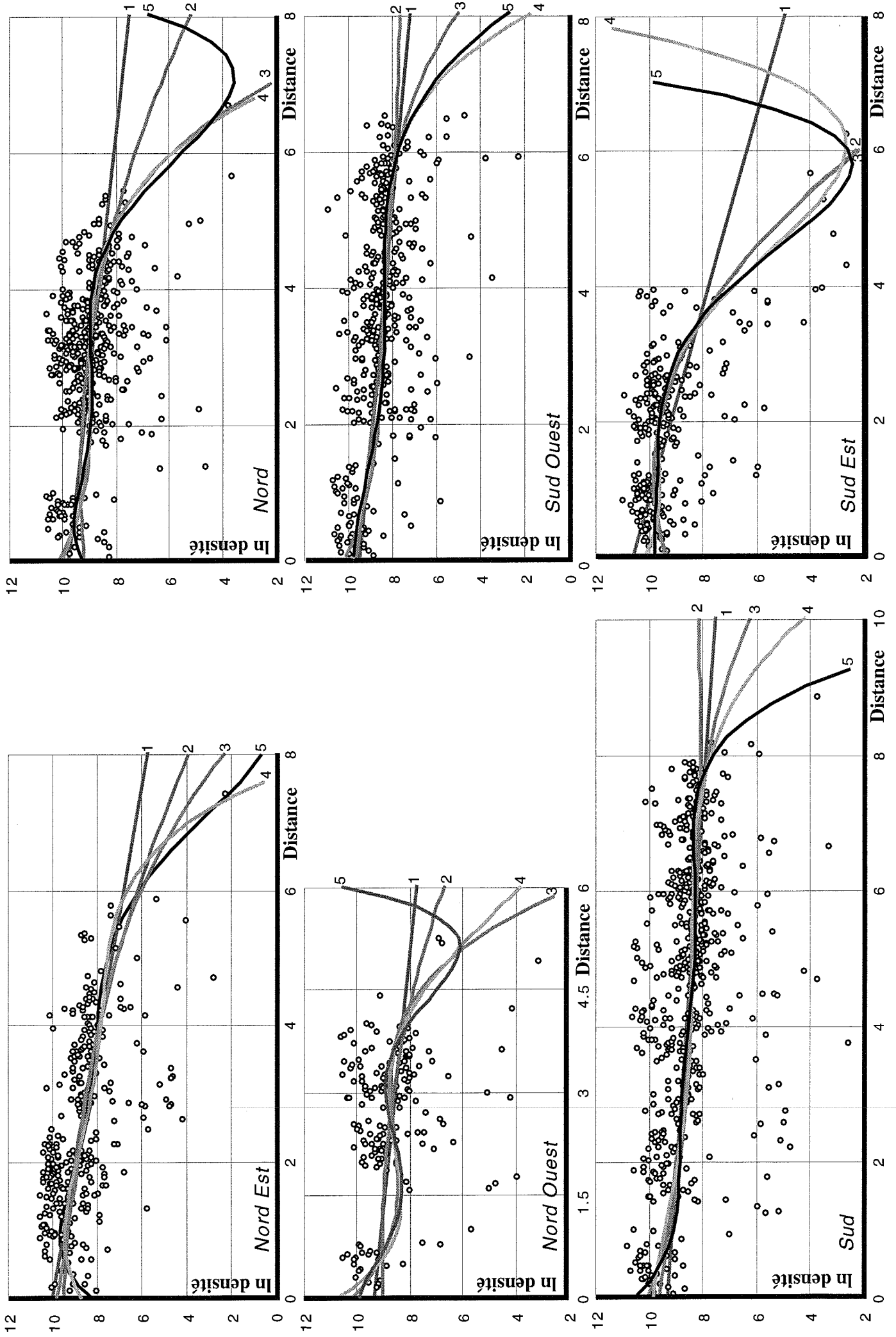
	Nord-est	Nord	Nord-ouest	Sud-ouest	Sud	Sud-est
Linéaire	0.5111	0.3281	0.2128	0.4051	0.3247	0.5269
Degré 2	0.5238	0.3672	0.2319	0.4095	0.3358	0.6563
Degré 3	0.5278	0.4337	0.3418	0.4313	0.3521	0.6564
Degré 4	0.5559	0.4341	0.3477	0.4367	0.3556	0.6691
Degré 5	0.5617	0.4434	0.3590	0.4368	0.3765	0.6715

Coefficients de corrélation

Coefficients des équations de régression							Estimation densité au centre
Nord-est	a1	a2	a3	a4	a5	b	
<i>Nord-est</i>							
Linéaire	-0.5334					10.0539	23246
Degré 2	-0.1073	-0.0743				9.5775	14437
Degré 3	-0.5899	0.1037	-0.0185			9.9143	20218
Degré 4	1.8469	-1.4194	0.3247	-0.0248		8.8390	6898
Degré 5	3.9594	-3.3930	1.0627	-0.1428	0.0067	8.2131	3689
<i>Nord</i>							
Linéaire	-0.2880					9.8410	18788
Degré 2	0.2148	-0.0903				9.2694	10609
Degré 3	-1.4700	0.5978	-0.0788			10.2208	27469
Degré 4	-1.1729	0.4094	-0.0348	-0.0034		10.1041	24443
Degré 5	1.3631	-1.9814	0.8898	-0.1596	0.0095	9.3567	11576
<i>Nord-ouest</i>							
Linéaire	-0.2647					9.4043	12141
Degré 2	0.1162	-0.0833				9.0759	8742
Degré 3	-2.5423	1.1841	-0.1663			10.2647	28702
Degré 4	-4.3167	2.5501	-0.5486	0.0352		10.8211	50065
Degré 5	-0.6395	-1.8986	1.6438	-0.4337	0.0360	9.9565	21088
<i>Sud-ouest</i>							
Linéaire	-0.2810					9.5256	13707
Degré 2	-0.4355	0.0233				9.7153	16569
Degré 3	-1.3411	0.3643	-0.0347			10.2096	27162
Degré 4	-0.3860	-0.2526	0.1069	-0.0106		9.8808	19550
Degré 5	-0.1542	-0.4778	0.1934	-0.0249	0.0009	9.8221	18436
<i>Sud</i>							
Linéaire	-0.1829					9.3838	11894
Degré 2	-0.3712	0.0225				9.6799	15993
Degré 3	-0.9226	0.1836	-0.0130			10.0962	24249
Degré 4	-0.4131	-0.0793	0.0350	-0.0029		9.8707	19355
Degré 5	-2.6871	1.6553	-0.4838	0.0640	-0.0031	10.5799	39334
<i>Sud-est</i>							
Linéaire	-0.7058					10.6340	41523
Degré 2	0.7520	-0.3263				9.4283	12435
Degré 3	0.8548	-0.3733	0.0057			9.3768	11811
Degré 4	-1.5136	1.4053	-0.4740	0.0412		10.2055	27052
Degré 5	0.0451	-0.3845	0.3520	-0.1209	0.0112	9.8132	18274

Figure 12

Relation du ln de la densité avec la distance au centre (2148 îlots de Strasbourg), pour 6 secteurs de la ville. Régression polynomiale de degrés 1 à 5



<i>Variable</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Écart-type</i>	<i>Asymétrie</i>	<i>Aplatissement</i>
Distance	3.340	1.793	<b>0.333</b>	0.421
Densité	10562.500	9738.100	<b>1.407</b>	1.659
ln densité	8.742	1.247	<b>-1.443</b>	3.682
racine cub. dens.	19.823	6.800	<b>0.079</b>	0.305

En procédant de la même manière qu'avec les logarithmes, on obtient une analyse du premier degré (linéaire). D'emblée le résultat est meilleur, avec une corrélation de 0.45 contre 0.386 pour les log :

$$\sqrt[3]{d_x} = 25.520064 - 1.705916 x$$

$$r = 0.4497$$

<i>Source</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>Degré de liberté</i>	<i>Variance estimée</i>	<i>F</i>
Régression	20077.4809	1	20077.4809	<b>544.062</b>
Résiduelle	79193.7394	2146	36.90295	
Totale	99271.2203	2147	46.23718	
<i>dernière valeur significative de F à 1% :</i>				6.647

Si la relation est hautement significative, et la corrélation plus élevée, il n'y a plus de signification particulière de l'ordonnée à l'origine, la valeur en  $x = 0$ , la densité au centre-ville (qui était la spécificité de la relation logarithmique, ou plus explicitement de sa forme exponentielle).

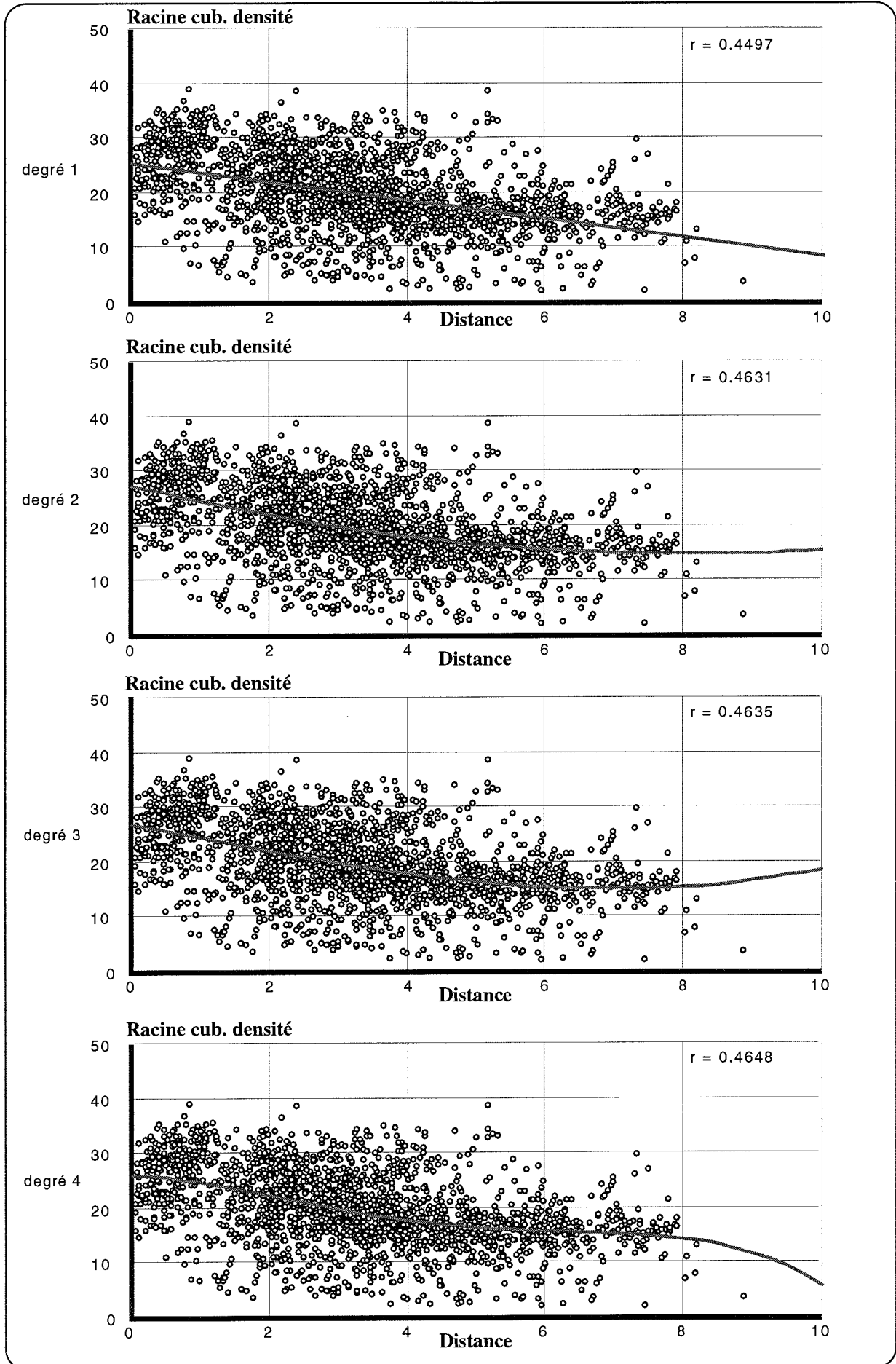
Avec une corrélation de 0.463, le polynôme du 2<sup>ème</sup> degré se rapproche de la forme exponentielle négative, tout en ajustant mieux les données (voir aussi les courbes figure 13).

Les polynômes de degré supérieur, comme dans le cas précédent sont tous significatifs, tout en présentant des améliorations de détail :

degré du polynôme	Corrélation	F	F (amélioration)
1	0.4497	544.062	—
2	0.4631	292.751	33.400 **
3	0.4635	195.524	1.012
4	0.4648	147.653	3.299
5	0.4649	118.092	0.254
6	0.4714	101.957	16.753 **
7	0.4730	88.090	4.166 *
8	0.4735	77.282	1.305
9	0.4743	68.964	2.092
significatif :		* : à 0.05 (F>3.84)	
(amélioration)		** : à 0.01 (F>6.40)	

Figure 13

Graphiques de régressions polynomiales des degrés 1 à 4 entre la racine cubique de la densité et la distance au centre  
Strasbourg, 2148 îlots, 1990



En conclusion temporaire, on peut dire que, malgré un meilleur ajustement, rien ne permet de préférer cette solution, qui paraît moins riche de pouvoir explicatif conceptuel que celle des logarithmes (exponentielle).

### ■ 2.3.3 Interprétation des courbes polynomiales

On avait remarqué, plus haut, que certains degrés du polynôme n'apportaient que peu d'amélioration par rapport au degré immédiatement inférieur, tandis qu'un degré supplémentaire apporte de nouveau un supplément d'explication significatif ; ceci provient du fait que chaque composante (degré) du polynôme correspond à un minimum ou maximum local supplémentaire et, comme on peut le constater sur la figure # "envoie" tour à tour (selon la puissance positive ou négative) la suite de la courbe "vers le haut" ou "vers le bas". Les minima ou maxima locaux ne paraissent pas susceptibles d'interprétation générale. L'orientation liée à un degré particulier permet essentiellement à la courbe de mieux épouser dans le "détail" la forme du nuage. En pratique, cela joue essentiellement aux 2 extrémités du nuage, où les points sont moins nombreux. Cela se remarque sur les graphiques où l'on superpose les courbes des polynômes obtenus aux différents degrés (figure 14) ; la partie centrale reste quasi immuable. Attention aussi, quand on examine les courbes dans leur domaine de validité statistique, c'est à dire dans l'étendue des valeurs observées : les principales modifications des courbes peuvent avoir lieu loin en dehors du domaine de validité ; dans ce cas la corrélation n'est guère affectée, contrairement à l'équation de la courbe (d'où la nécessité de représenter les courbes, contrairement à la tradition des algébristes), mais c'est ce qui permet d'infléchir de façon minime les courbes aux extrémités de la zone de validité.

### ■ 2.3.4 Le potentiel de population

#### ▲ 2.3.4.1 La notion

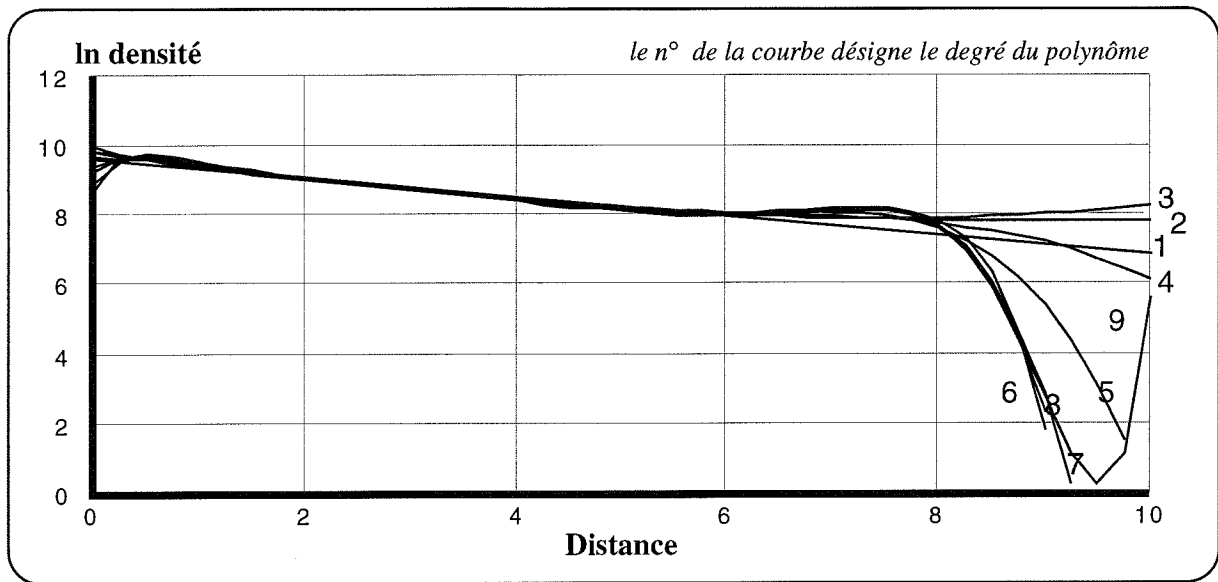
Au delà de la notion de densité, apparaît celle de potentiel de population. La notion de densité contenant la notion de lissage, d'autant plus que les surfaces étudiées sont vastes, on peut considérer, au bout de la chaîne, la notion de potentiel de population. Ici le lissage n'est plus une simple forme de moyenne pondérée, comme lorsqu'on passe à des surfaces de plus en plus grandes, mais une valeur dont la masse est pondérée par la distance. On pourrait dire qu'on passe, en quelque sorte, de la chimie (la densité correspond à un taux de dilution), à la physique (le potentiel est une masse dont les éléments interviennent en fonction de la distance). Cette idée est empruntée à la physique newtonienne ; elle exprime l'attraction de corps les uns par rapport aux autres, en fonction de leurs distances respectives. On sait que la force de gravité entre deux corps varie en fonction de leurs masses et en fonction inverse du carré de leur distance. L'idée, déjà ancienne en géographie, est celle de la transposition à l'interaction sociale, d'abord à l'échelle d'un réseau urbain ou des unités spatiales d'une vaste région (par exemple l'étude du potentiel de marché des États-Unis en 1948 par C.D. Harris) puis, ainsi que je le propose ici, dans le domaine intra-urbain. Dans ce domaine, l'interaction n'est plus une hypothèse, mais une évidence : dans une ville les individus sont en interaction permanente et rapide ; chaque jour ils sont susceptibles de se déplacer à l'échelle de la ville entière, justifiant l'aspect dynamique du potentiel, par rapport à l'aspect statique de la densité .

La formule est :

$$V_i = \sum_{j=1}^n \frac{P_j}{d_{ij}^2}$$

où  $V_i$  = le potentiel de population du lieu  $i$   
 $P_j$  = la population du lieu  $j$   
 $d_{ij}$  = la distance entre les lieux  $i$  et  $j$

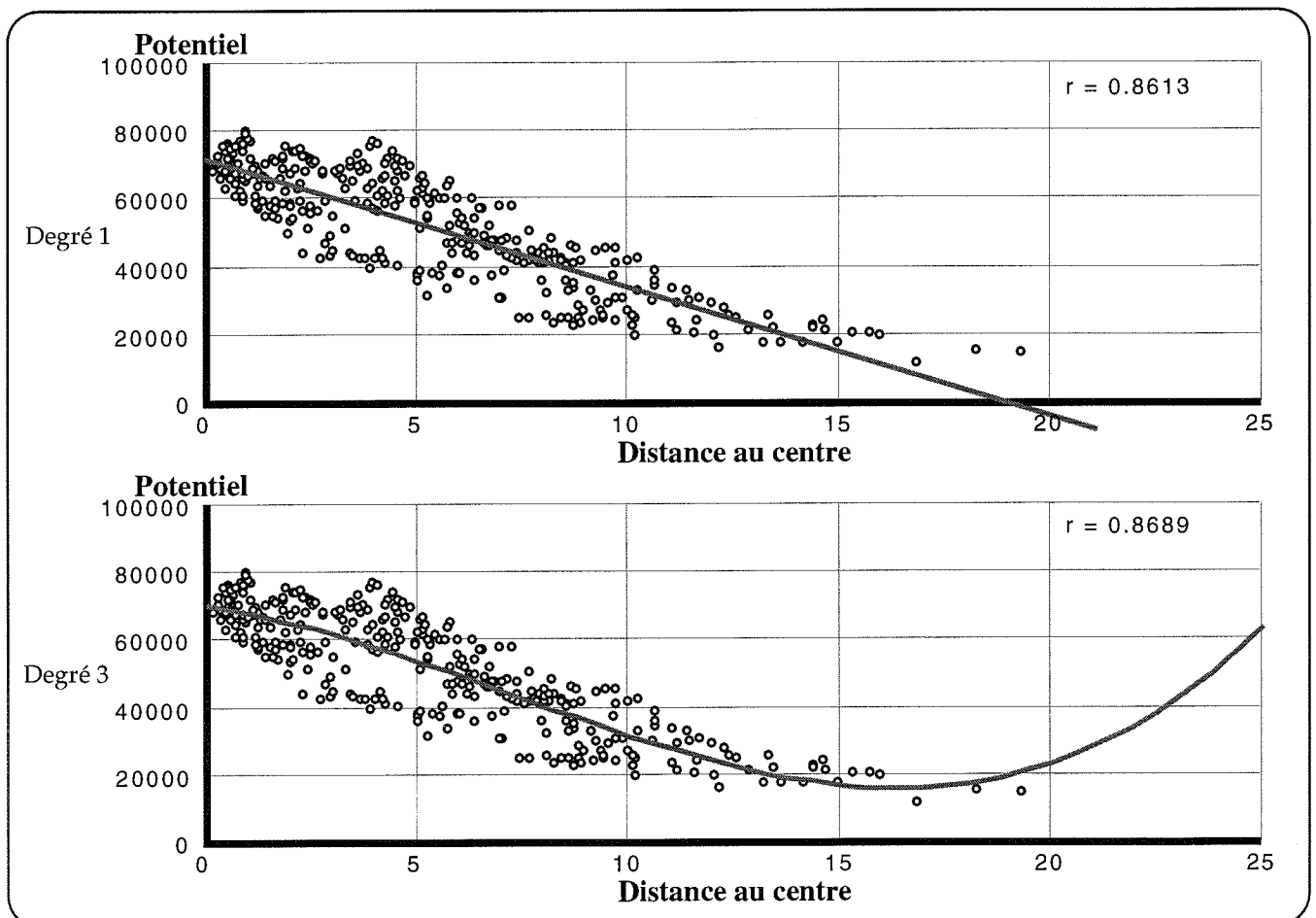
Figure 14  
 Les 9 courbes des régressions polynomiales des 2148 îlots, Strasbourg 1990, pour comparaison



M. Pruvot

Strasbourg, 1996

Figure 15  
 Relation entre le potentiel de population et la distance au centre. Régression linéaire et polynomiale de degré 3  
 Bergen, 1990, 339 quartiers



M. Pruvot

Strasbourg, 1996

où la population tient le rôle de la masse dans les formulations physiques. Cette somme comprend le lieu  $i$  lui-même quand  $i = j$  ; mais, comme  $d_{ij}$  serait nulle,  $\frac{P_j}{d_{ij}}$  serait infinie ; on est donc amené à la remplacer, soit, classiquement par la moitié de la distance au plus proche voisin, soit, comme je l'ai fait ici, par le demi-rayon d'un cercle de surface égale au quartier concerné (cela dépend des types de données spatiales).

Toutefois, de même que l'analogie entre la densité de population et la dilution d'un corps chimique a des limites évidentes, de même le potentiel de population doit-il être envisagé comme homologie. Le potentiel à un endroit donné correspond à une quantité de population susceptible d'"intervenir" dans ce lieu, d'avoir une interaction ; la limitation liée à la distance est celle d'une "friction". La densité représenterait l'importance relative de la population quand "tout le monde dort" (sic), le potentiel représenterait la population qui serait susceptible de jouer un rôle, par exemple comme client de commerces, etc. Ni l'une ni l'autre ne peut prendre en compte l'orientation des déplacements, qui serait commandée par le lieu du travail. Cela représente une sorte de *proximité générale* de la population en tout lieu. Naturellement la distance utilisée serait plus intéressante s'il s'agissait de distance parcourue (rues et routes) ou de temps de parcours, mais cela conduirait à un travail énorme.

#### ▲ 2.3.4.2 Bergen

Pour Bergen, le modèle fondé sur le potentiel est très supérieur au modèle fondé sur le log des densités : le modèle linéaire présente déjà une corrélation de 0.8613 (au lieu de 0.709)

$$y = -3803.053450 x + 72187.269668$$

$$r = 0.8613$$

Source	Somme des carrés	Degré de liberté	Variance estimée	F
Régression	74042982256	1	74042982256	968.457
Résiduelle	25765196482	337	76454588.97	
Totale	99808178738	338	295290469.6	

Et, si le polynôme de degré 2 n'apporte pas grande amélioration, le 3<sup>ème</sup> degré porte la corrélation à 0.8689 (au lieu de 0.7125)

$$y = 70317.372554 - 1770.053917 x - 386.311571 x^2 + 17.876358 x^3$$

$$r = 0.8689$$

Source	Somme des carrés	Degré de liberté	Variance estimée	F
Régression	75347616589	3	25115872196	343.975
Résiduelle	24460562149	335	73016603.43	
Totale	99808178738	338	295290469.6	

On voit, quand on regarde les graphiques de régression (figure 15), que les améliorations concernent surtout les extrêmes (les quartiers du centre et de la périphérie).

Les résultats sont élevés, les tests sont hautement significatifs, mais les potentiels ne sont pas des logarithmes et les ordonnées à l'origine (valeurs théoriques au centre) n'ont pas de signification.

#### ▲ 2.3.4.3 Strasbourg

La différence avec le modèle de densité proprement dit est encore bien plus favorable avec le cas de Strasbourg. Au premier degré (relation linéaire), la corrélation, qui était seulement de 0.3862 passe ici à la valeur très élevée de 0.9233 ; l'équation de la droite est :

$$y = 196869.60860 - 18137.15186 x$$

mais il faut bien dire que ces coefficients ne sont guère utilisables, sauf dans des comparaisons bien définies, car leur échelle n'a pas de référence, et la valeur n'a pas de signification, comme je l'ai déjà exprimé pour le cas de Bergen. La relation peut également être améliorée en passant à des courbes de degrés supérieurs (figures 16 à 19), mais l'amélioration est faible par rapport à celle réalisée en passant des densités au potentiel :

degré 1

$$r = 0.9233$$

$$y = 196869.60860 - 18137.15186 x$$

degré 2

$$r = 0.9298$$

$$y = 206755.54982 - 25377.03097 x + 994.95885 x^2$$

degré 3

$$r = 0.9336$$

$$y = 197778.36291 - 12617.72650 x - 3179.82643 x^2 + 369.14450 x^3$$

degré 4

$$r = 0.9349$$

$$y = 191121.32094 + 2326.13313 x - 11404.02555 x^2 + 1982.49017 x^3 - 102.69997 x^4$$

Le "lissage" opéré par l'utilisation du potentiel est d'autant plus profitable que les unités sont petites, comme on pouvait le penser ; en revanche on peut difficilement savoir si les contraintes physiques de Bergen ont une conséquence sur l'importance moindre de l'amélioration.

Enfin, pour les deux villes, le modèle de potentiel expliqué par la distance au centre donne un excellent résultat, et ce dès le premier degré : la relation peut être considérée comme linéaire.

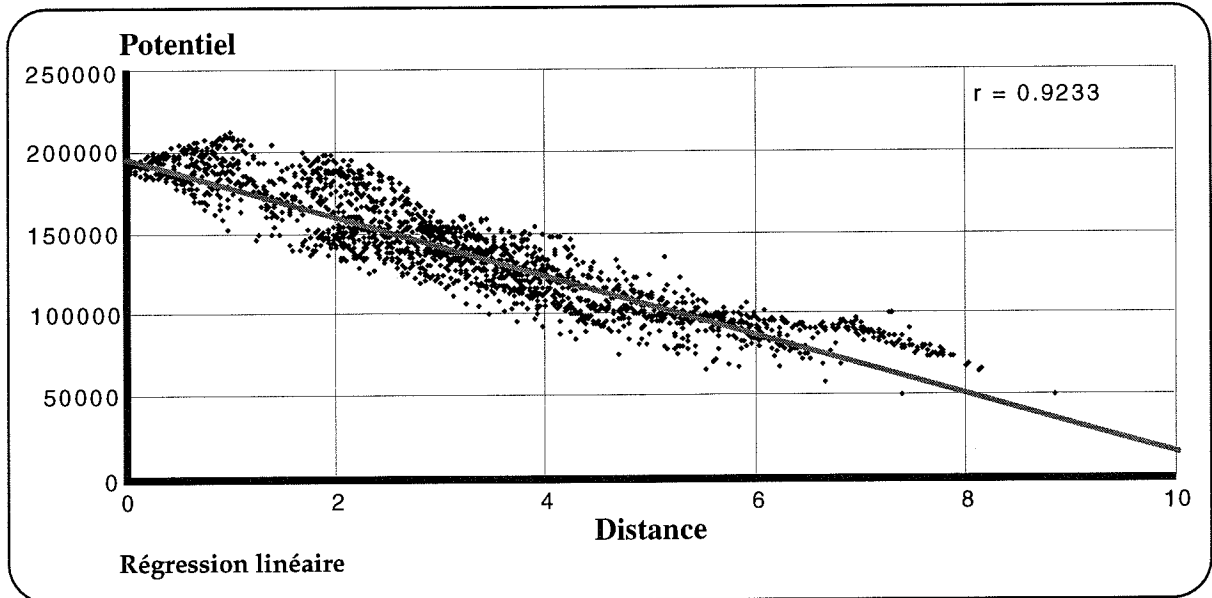
## Conclusions

Ainsi les ajustements réalisés par les surfaces polynomiales de tendance sont-ils nettement supérieurs aux ajustements des régressions linéaires ou polynomiales sur la distance au centre. On peut donc considérer que d'un point de vue technique un modèle de surface polynomiale est supérieur. Si techniquement le modèle est supérieur, est-ce à dire que le modèle géographique est plus satisfaisant (valide ?) ? Les modèles de Clark, puis de Newling, fondés sur la régression (sa formalisation, tout au moins) et sur la distance au centre, se veulent des modèles très généraux, sinon universels ; le passage du premier au second permet de prendre en compte les étapes de l'évolution technologique des sociétés humaines, et le passage à des puissances plus élevées (degrés 3, 4 ou 5) autorise la prise en considération des opérations de densification différentielle par opération institutionnelle (planification, grands ensembles de couronne intermédiaire, limitation du pavillonnaire). Les applications aux villes de Bergen et de Strasbourg que j'ai esquissées ci-dessus, comme celles qui ont été reportées dans de nombreuses autres études, montrent un degré d'approximation certain. Les problèmes de définition de la densité et les divers problèmes d'agrégation des données (échelle d'observation)

---

ajoutent beaucoup à ces incertitudes. L'utilisation, par ailleurs, des surfaces polynomiales de tendance inciterait à les préférer. Cependant, le modèle de Clark, le modèle de Newling, ainsi que l'extension proposée plus haut signifient toutes "la densité (son logarithme) varie en fonction de la distance au centre selon une relation linéaire, ou une courbe polynomiale" et c'est géographiquement "simple" sinon tout à fait exact... Dire "la densité (son logarithme) varie selon les coordonnées dans l'espace en fonction d'un polynôme de tel degré en  $x$  et  $y$ ", est certainement plus précis (corrélation plus élevée), mais beaucoup moins explicite. En revanche si la modélisation géographique est inférieure, la lecture des formes urbaines est plus "concrète" pour le cas particulier que représente chaque ville. L'approche de la densité par le potentiel de population donne des résultats encore meilleurs en terme de régression polynomiale (simple à comprendre et à représenter), mais le concept de potentiel, même si on sait qu'il correspond à un lissage pondéré, est beaucoup moins "parlant", surtout pour un non-spécialiste.

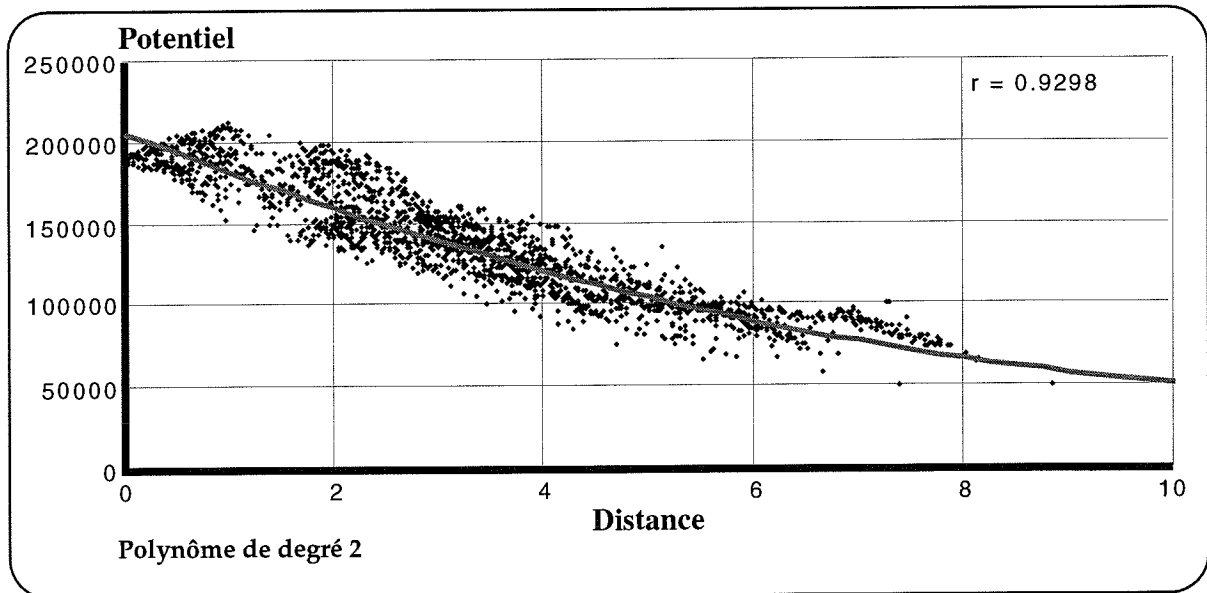
Figure 16  
Relation entre le potentiel de population et la distance au centre. Régression linéaire  
Strasbourg, 2148 îlots, 1990



M. Pruvot

Strasbourg, 1996

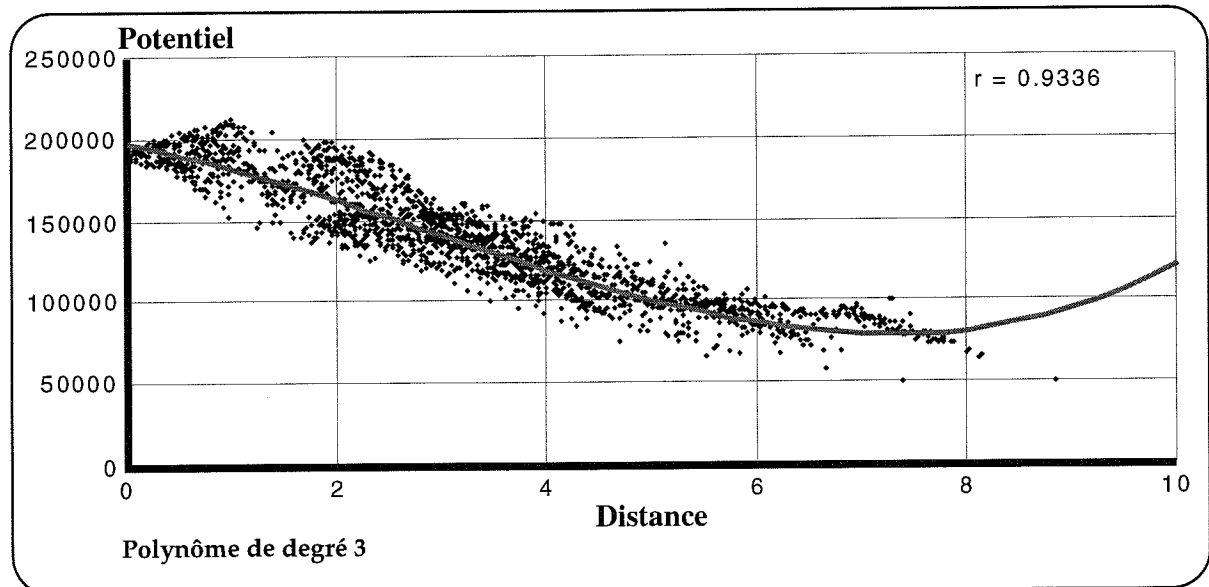
Figure 17  
Relation entre le potentiel de population et la distance au centre. Régression polynomiale de degré 2  
Strasbourg, 2148 îlots, 1990



M. Pruvot

Strasbourg, 1996

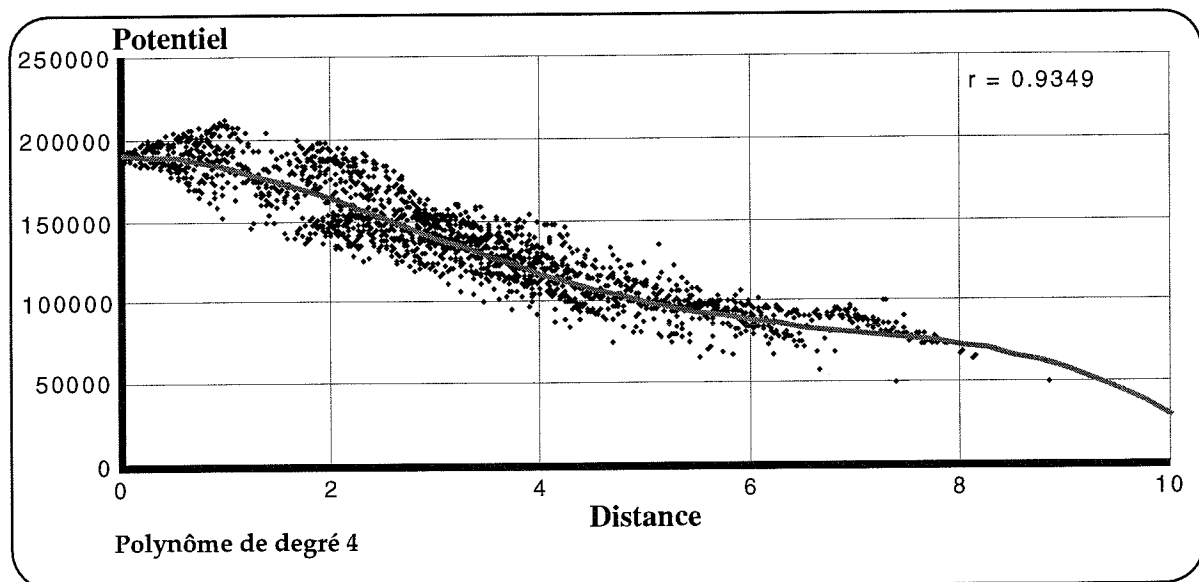
Figure 18  
Relation entre le potentiel de population et la distance au centre. Régression polynomiale de degré 3  
Strasbourg, 2148 îlots, 1990



M. Pruvot

Strasbourg, 1996

Figure 19  
Relation entre le potentiel de population et la distance au centre. Régression polynomiale de degré 4  
Strasbourg, 2148 îlots, 1990



M. Pruvot

Strasbourg, 1996

## Conclusion

---

Ce chapitre a rappelé certains modèles bien connus, comme ceux de C. Clark et de B. Newling, et a proposé de nouvelles orientations pour classer l'ensemble des modèles et élargir les modèles existants. Cependant, il faut noter que tous les tests effectués par B. Kostrubiec ont porté sur les données des quartiers avec toutes leurs insuffisances ; cela a permis des conclusions intéressantes que le temps accordé initialement pour ce projet auraient permis de confirmer. Quant aux directions ouvertes par M. Pruvot, elles présentent l'avantage de montrer des applications non seulement sur l'agglomération strasbourgeoise mais aussi sur une ville bien différente dans son site, Bergen en Norvège. Ce double exemple permet de renforcer la validité des résultats obtenus, mais il faut noter que d'autres comparaisons étaient prévues, en particulier sur la ville de Alcalá de Hénarès (Espagne) avec la collaboration de F. Escobar ; ceci n'a pu se faire pour les motifs déjà exposés et que nous ne saurions oublier.

Enfin, avec ces recherches, on a constaté, dès l'approche graphique, que les modèles, les profils, les courbes pouvaient varier fortement selon les bases spatiales utilisées qu'il s'agisse des sources cartographiques ou des images satellites. Les représentations cartographiques initiales interviennent fortement ; or, elles sont rarement explicitées dans les publications traitant des densités urbaines. Aussi, dans un troisième chapitre, avons-nous voulu aborder cet aspect important pour la validité des études sur les densités urbaines en mettant l'accent non seulement sur l'apport de ces documents en tant que sources d'information ou comme illustrations, mais aussi - et surtout -, sur leur pouvoir révélateur de structures sous-jacentes.

134

**3**

**SURFACES DENSITAIRES**

**REPRÉSENTATIONS ET ANALYSES CARTOGRAPHIQUES**



## Introduction

---

L'approche graphique des densités ainsi que les modèles présentés et les modifications proposées ont déjà mis en évidence, à plusieurs reprises, un problème fondamental de l'appréhension des densités urbaines, à savoir celui des bases spatiales utilisées. En effet, il ne suffit pas de données statistiques dans un tableau pour comprendre la relation entre des quantités de population et les surfaces qu'elles occupent. La manière dont s'effectue leur relevé joue un rôle essentiel qui peut, selon les cas, soit améliorer la connaissance, soit, au contraire, la biaiser ou même la fausser. Mais cette information, de nature fondamentalement spatiale, peut être collectée selon divers procédés qui ne conduisent pas à des résultats similaires et dont on doit connaître avec précision les avantages et les inconvénients, même si certains d'entre eux sont d'un usage tellement courant qu'on oublie trop souvent, à tort, de se poser des questions à leur sujet, comme cela est le cas pour les célèbres cartes par points (dot maps) ou les cartes choroplèthes. Cette nécessaire interrogation sur les relevés spatiaux nous amène ainsi directement à nous intéresser aux nombreuses techniques de représentations cartographiques des densités, qu'elles soient urbaines ou non afin d'en analyser les intérêts et les risques et d'en préciser les contraintes et les conditions d'utilisation.

Il est donc ainsi évident de procéder, dans un premier temps, à un inventaire critique des représentations usuelles, mais, ceci, dans un objectif bien précis. Il ne s'agit nullement de faire des cartes pour faire des cartes, les logiciels actuels s'en chargent fort bien et permettent de "produire tout et n'importe quoi". Il ne faut pas oublier le sigle "GIGO", caractérisant une des premières règles de base en informatique, dont les conséquences sont, instantanément, encore plus visibles en cartographie assistée par ordinateur ; ainsi avons-nous très tôt obtenu, en 1971, avec S. Rimbert, une magnifique fleur en guise de représentation de la population par îlot à Strasbourg. Avant de faire appel à des logiciels dont les sorties éblouissent, même si elles sont fausses, il faut connaître, bien entendu, *les caractéristiques des procédés, mais surtout préciser dans quel but on veut les utiliser.*

Dans le cadre présent, les images envisagées ont comme objectifs de traduire visuellement les caractères des densités, de permettre des relevés et des calculs en vue des modélisations retenues, de souligner les transformations dans le temps des densités observées ou estimées, d'essayer de révéler leurs composantes sous-jacentes, et si nécessaire, de proposer des techniques plus adaptées à nos projets. Nous serons ainsi conduits, après l'inventaire évoqué, à avancer quelques solutions pour une meilleure comparabilité structurelle et diachronique des densités, et à envisager des méthodes de filtrage ou de recomposition en vue d'une amélioration de la compréhension des surfaces densitaires.



### 3.1

## Représentations cartographiques usuelles des densités

### Inventaire critique

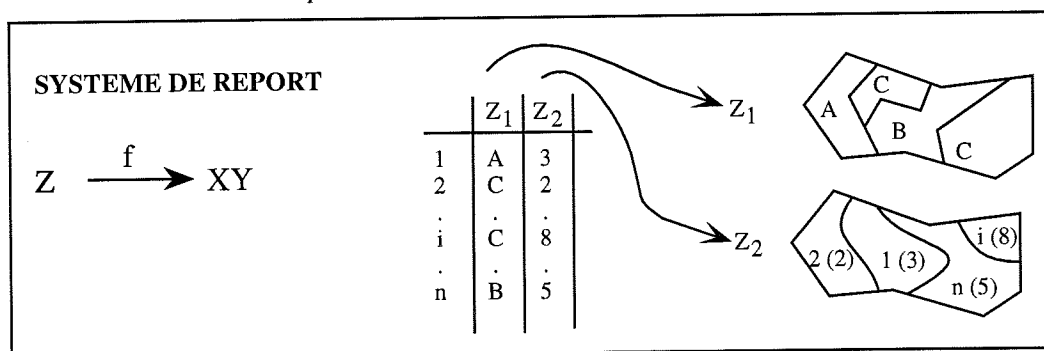
Colette CAUVIN

avec la collaboration de Anne-Christine BRONNER

Texte préliminaire

Les types d'images des densités urbaines qui vont être rappelés ici - car il ne faut pas oublier qu'il s'agit de procédés usuels - appartiennent tous au domaine de ce que S. Rimbart a appelé en 1979 "la cartographie de report". Cette expression qualifie les modes de représentation où les variables thématiques Z sont projetées sur la surface cartographique, indépendamment de l'implantation géométrique, "comme si" l'espace était "neutre" (Muller, 1978). On procède à une application f de Z sur l'espace XY, comme le montre la figure 1.

Figure 1  
Correspondance entre les [XY/Z] Système de report



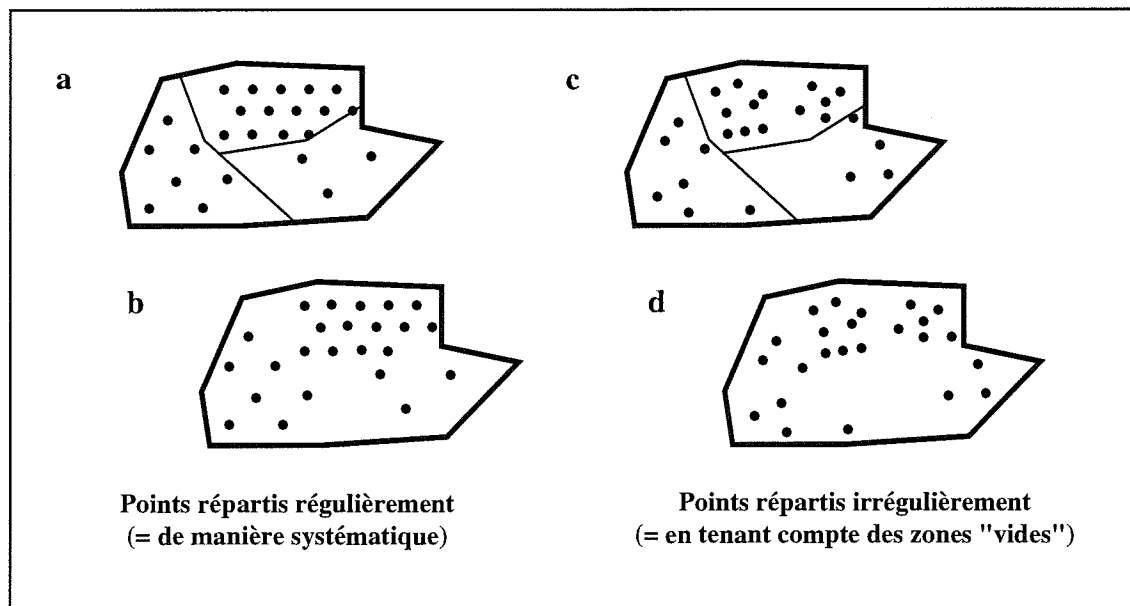
C. Cauvin d'après S. Rimbart 1979

Strasbourg, 1997

Les variables à représenter subissent, préalablement, des traitements graphiques ou mathématiques, plus ou moins élaborés. Dans cette optique, l'espace n'est jamais pris en compte explicitement. Or, par définition même de l'indice densitaire, il apparaît dès le départ une incohérence entre la notion de densité et ces représentations.

De ce fait, pour pallier cette grave distorsion logique, nous mettrons avant tout l'accent sur les représentations surfaciques, en excluant les procédés ponctuels. Ces derniers, en effet, ont été très souvent utilisés, en particulier les cartes avec symboles quantitatifs ponctuels valués, dites souvent cartes par points, ou dot maps, qui représentent une répartition, avec des points de taille, en général unique, petite, et expriment des quantités sur une surface. Elles sont supposées traduire une densité et leur signification spatiale tend donc à devenir surfacique. Ces cartes sont élaborées lorsque l'on connaît une population (au sens statistique du terme) dans un espace donné - par exemple, la population totale par quartiers, par îlots -, et sont construites comme le montre la figure 2.

Figure 2  
Cartes par symboles valués égaux



C. Cauvin

Strasbourg, 1994

Mais de telles cartes supposent que le lecteur soit capable d'établir la relation entre les surfaces et la quantité de points, afin d'en déduire une densité. Or, dès 1961, avec les travaux de H.H. Mac Carthy et N.E. Salisbury, notre faible aptitude à faire des associations visuelles correctes a été clairement mise en évidence. Aussi, nous ne retiendrons aucune représentation ponctuelle car elles ne permettent ni une visualisation correcte, ni des relevés en vue de mesures.

A l'opposé, les techniques conduisant à des cartes surfaciques sont beaucoup plus intéressantes, même si le biais signalé existe toujours. Cependant, ces représentations sont abondantes et, en fonction de l'objet de ce rapport, une première classification s'appuiera sur la notion de continuité.

### ■ 3.1.1 Du discontinu au continu : des représentations à significations distinctes

En effet, on peut se demander si le phénomène densitaire doit être considéré comme continu ou discontinu, et, en liaison avec cette question d'ordre thématique, on doit s'interroger

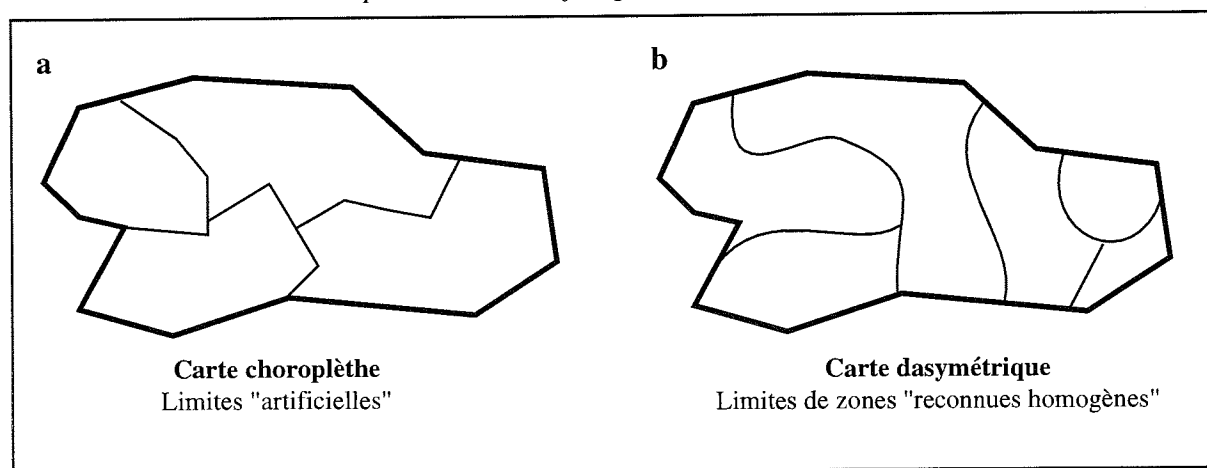
sur les représentations qui permettent d'exprimer cette caractéristique géométrique fondamentale. La question est la suivante : les surfaces de densité sont-elles formées d'unités spatiales distinctes, séparées, comme des unités administratives par exemple (îlots, quartiers d'une ville, ...) ou des unités physiques identifiables sur le terrain comme des ensembles de bâtiments similaires ? Au contraire, s'agit-il de surfaces continues où les traits n'expriment que des niveaux dans une gradation, dans une progression, comme des "courbes de niveau" ? En s'appuyant sur ce critère de continuité, on peut ainsi proposer une distinction entre les cartes "discrètes" telles les cartes choroplèthes ou les cartes dasymétriques<sup>1</sup>, et les cartes "continues" comme les cartes en isolignes.

### ▲ 3.1.1.1 Représentations discontinues : cartes choroplèthes et cartes dasymétriques

Les cartes à unités spatiales discrètes sont des représentations où les unités sont contiguës et où la surface du secteur étudié est totalement couverte par les symboles représentant le phénomène sélectionné. Mais il n'y a pas de continuité lors du passage d'une unité à l'autre.

Dans le cas des cartes choroplèthes, les valeurs peuvent totalement différer entre deux unités voisines sans que cette absence de transition corresponde réellement à une différence observable. Des densités calculées par unités administratives en sont un exemple caractéristique ; en effet, on rapporte une quantité de population obtenue lors d'un recensement à l'unité de référence correspondante (commune, quartier, ...), mais l'ensemble de la commune ou du quartier n'est pas nécessairement occupé par cette population qui peut être groupée dans une zone particulière, limitée ; donc la densité peut ne pas exprimer une "réalité". Par ailleurs, cette valeur "moyenne" calculée ne change pas brutalement lorsqu'on passe à l'unité d'observation voisine. Les cartes choroplèthes sont donc des cartes où les unités spatiales sont des unités discontinues, non visibles nécessairement sur le terrain, où les limites sont "artificielles", imposées, créées par l'homme, dont les divisions administratives ou politiques sont des exemples types (figure 3a).

Figure 3  
Représentations surfaciques discontinues



C. Cauvin

Strasbourg, 1994

<sup>1</sup> Terme introduit par J.K. Wright en 1936 pour des cartes de population construites par zones homogènes.

Il en est de même pour les cartes dasymétriques qui sont composées également d'unités distinctes, mais ces unités correspondent à des zones considérées comme homogènes soit par observation sur le terrain (occupation du sol, types de bâti), soit par calcul comme dans les travaux initiaux de J.K. Wright en 1936. Les limites sont ainsi observées ou calculées (figure 3b).

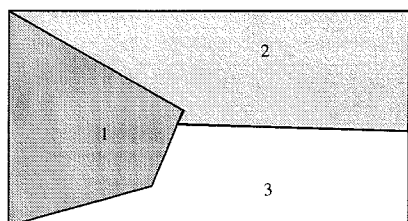
Ces deux types de cartes aréales, à signification surfacique, sont donc caractérisées par la discontinuité des unités d'observation, cette discontinuité n'ayant pas, thématiquement, le même sens dans les deux cas.

Précisons que ces deux types de cartes sont intéressants pour l'évaluation des densités. Si les limites, qu'il s'agisse des unités administratives ou des zones bâties obtenues, par exemple, par traitement d'images satellites, sont numérisées, on connaît immédiatement les superficies associées aux données de population ; les indices de densité peuvent alors être obtenus directement. Ainsi, sur la figure 4, on voit comment on peut effectuer les calculs, et à quel point les densités peuvent varier selon que l'on prend en compte les unités administratives ou les surfaces bâties.

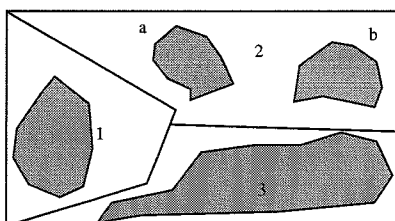
Figure 4  
Carte choroplèthe et carte dasymétrique calcul des densités

Soit 3 unités [1, 2, 3] de population

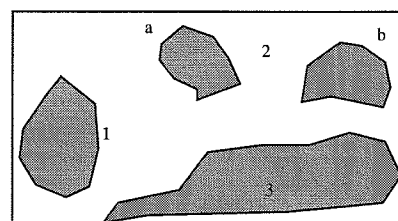
1	1500
2	2500
3	500



UNITES ADMINISTRATIVES  
CARTE CHOROPLÈTHE



ZONES BATIES  
DANS LES UNITES ADMINISTRATIVES



CARTE DASYMETRIQUE

3 unités administratives de surfaces

	surfaces	densités
1	8,23	182,26
2	11,93	209,55
3	9,8	51,02

surfaces bâties en 1 ou 2 morceaux

	surfaces	densités
1	2,38	630,25
2a	1,26	
2b	1,43	
soit 2 =	2,69	929,36
3	5,23	95,60

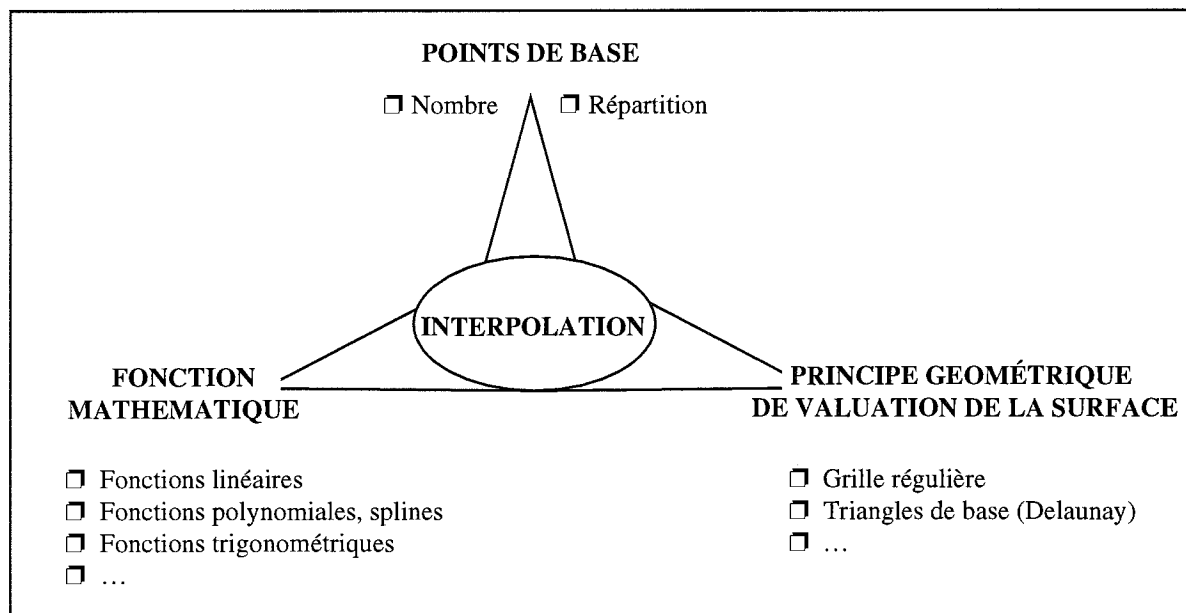
Mais dans les deux cas, les surfaces, contiguës ou non, traduisent toujours le fait que l'on considère les densités comme un phénomène discontinu. Or, cette position est discutable, et certaines représentations permettent d'exprimer les densités de manière continue.

### ▲ 3.1.1.2 Représentations continues : cartes isoplèthes

La densité est une variable quantitative, continue. Or, les cartes aréales en isolignes, cartes "continues", sont des représentations où les variables thématiques sont nécessairement quantitatives, continues, où la contrainte spatiale de base est la continuité spatiale, car leur construction suppose une interpolation, donc un calcul de dérivées. Les isolignes sont des lignes, sur une surface, réunissant les points ayant la même valeur pour un phénomène donné ; elles ne traduisent ainsi graphiquement qu'un passage d'une valeur à une autre de part et d'autre de la ligne ; un gradient peut être calculé en tout point de la carte.

Ces cartes sont construites à partir d'informations ponctuelles, déjà valuées, à partir desquelles on calcule les valeurs en tout point de la surface. Plusieurs composantes interviennent et introduisent des variations dans l'élaboration de ces surfaces ; nous n'en citons que les principales, à savoir, les points de base, la fonction d'interpolation, et le principe géométrique de répartition des valeurs (figure 5).

Figure 5  
Interpolations : principales composantes de variation



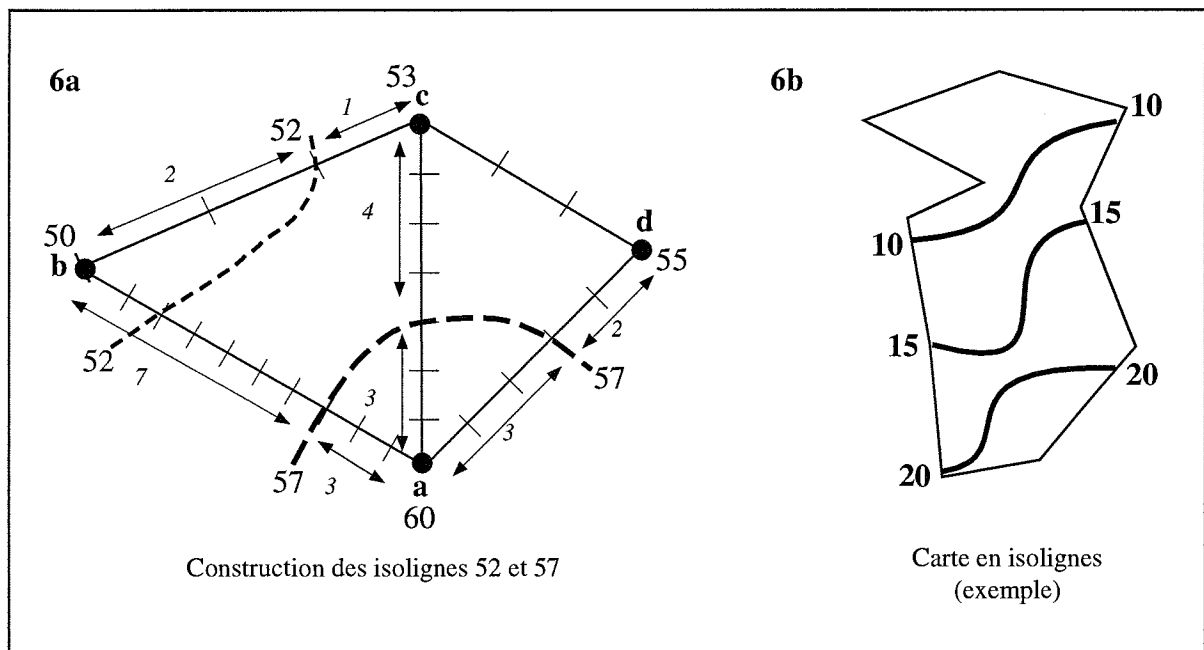
C. Cauvin

Strasbourg 1994

Chaque composante a son importance, et peut conduire à l'obtention de cartes très différentes ; c'est pourquoi l'utilisation des cartes en isolignes, même si elle est très riche, doit être pratiquée avec précaution. Si le nombre de points de base est faible ou si ces points sont très irrégulièrement répartis, il est nécessaire de retenir une procédure d'interpolation qui prend en compte ces "déficiences" du semis initial. Quant au choix de la fonction d'interpolation, il est lié au phénomène étudié : est-il spatialement linéaire, quadratique, cubique ? Cette connaissance est loin d'être évidente ; peu d'ouvrages ou d'articles ont tenté d'établir des équivalences entre le phénomène thématique et la fonction d'interpolation, même si certains auteurs ont présenté des synthèses sur les cartes en isolignes (Lam, 1983).

Afin de mieux comprendre les contraintes des cartes en isolignes, un exemple simple de construction est présenté sur la figure 6 avec 4 points de base (a, b, c, d) valués ; les isolignes à tracer correspondent aux valeurs 52 et 57. Les options retenues sont une fonction bilinéaire et une valuation par triangles de base de type Delaunay. On voit sur le dessin qu'entre les points a (60) et b (50), les deux isolignes (celles de 52 et de 57) passent ; entre a et c et a et d, seule celle de 57 traverse ; entre b et c, on trouve celle de 52, alors qu'aucune isoligne ne peut couper le segment cd. Les emplacements des lignes sont calculés proportionnellement.

Figure 6  
Interpolation : construction et exemple



C. Cauvin

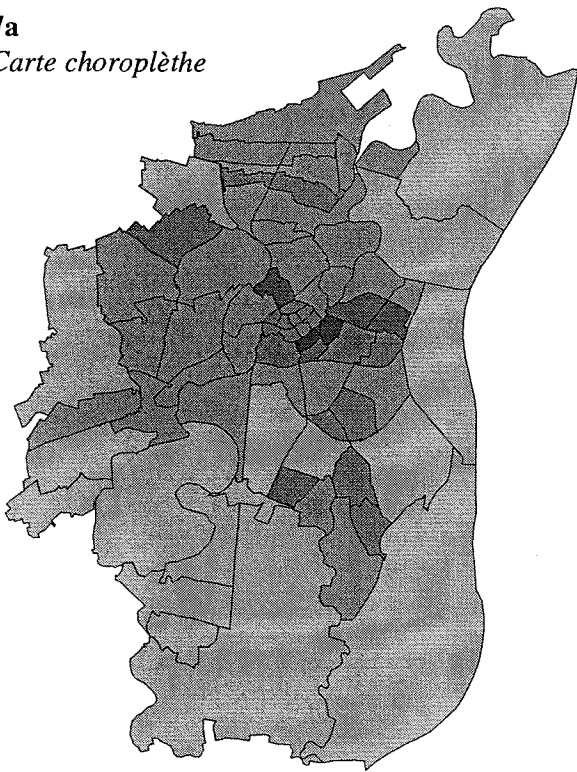
Strasbourg, 1994

Ainsi, les cartes en isolignes sont des constructions qui traduisent des phénomènes observables comme des caractéristiques théoriques. Elles sont uniques, une fois les critères d'élaboration choisis, mais le point qu'il faut actuellement approfondir est celui de la "bonne" sélection de ces critères. Or, pour les densités, si nous avons effectué certains tests, nous ne sommes pas à même de dire quelle fonction est la plus adaptée pour procéder à l'interpolation. Introduire les fonctions des modèles proposés dans la deuxième partie serait intéressant, mais nous n'avons pu, à ce jour, procéder à ces expérimentations très longues car elles exigent, pour chaque modèle, une programmation spécifique.

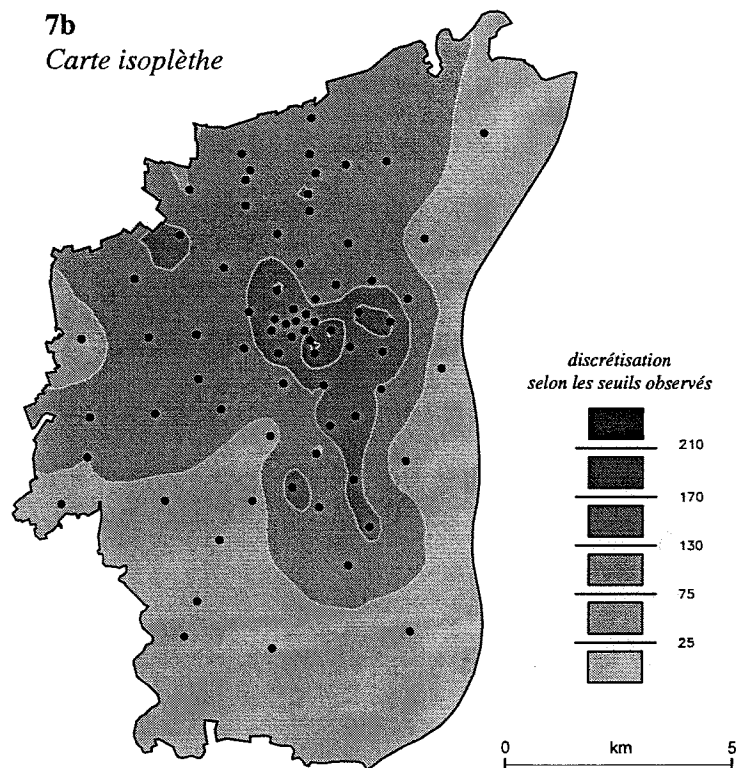
A titre d'exemple, nous présentons deux cartes de l'agglomération strasbourgeoise, illustrant les densités résidentielles brutes en 1990, avec une même discrétisation au niveau des valeurs, mais dans un cas par une carte choroplèthe, et dans l'autre une carte isoplèthe. La lecture en est évidemment très différente, les limites administratives cassant systématiquement la formation d'ensembles de même densité (figure 7). Ces cartes ont été établies sur la base des quartiers, mais cette division, imposée par la disponibilité des données, n'est pas nécessairement la meilleure. Aussi, une autre distinction des représentations classiques repose, non pas sur une logique technique, mais sur un principe administratif et statistique.

Figure 7  
Agglomération de Strasbourg - Densité résidentielle brute 1990

7a  
Carte choroplèthe



7b  
Carte isoplèthe



### ■ 3.1.2 De l'îlot au quartier : un changement de base spatiale

Selon l'espace urbain que l'on veut étudier, la base spatiale à retenir doit être adaptée. Si l'on s'intéresse à une aire urbaine par exemple, le nombre de communes non îlotées est important, une analyse de toute l'aire implique que les entités aient des tailles à peu près similaires. Dans ce cas, sélectionner les quartiers pour les grandes communes peut s'avérer un choix judicieux. Par contre, si l'on s'intéresse à la répartition d'un centre-ville comme celui de Strasbourg, ou de toute autre grande agglomération, il est indispensable de descendre à un niveau plus fin, tel l'îlot, dont les données de population existent, même si en raison des contraintes de la CNIL, elles ne sont que rarement disponibles.

Afin de montrer les différences d'information entre les deux bases spatiales, nous proposons ici deux cartes de l'agglomération strasbourgeoise, l'une par îlot, l'autre par quartier, avec les deux modes de représentation exposés ci-dessus. En raison des autorisations à obtenir, nous ne pouvons présenter que les densités de 1982 (figure 8). La finesse de l'information contenue dans les cartes sur la base de l'îlot est évidente, mais les tendances ressortent bien sur les images par quartier ; *le but poursuivi pour les représentations doit donc être un élément essentiel de décision pour opter pour un des deux niveaux d'étude.*

Mais si le choix d'une base est essentiellement lié au but poursuivi, il est, malheureusement, très dépendant de la disponibilité des données. Ceci est d'autant plus important dans le cadre de comparaisons structurelles ou diachroniques où de nombreux problèmes apparaissent.

### ■ 3.1.3 Comparaisons structurelles et diachroniques : des contraintes et des choix indispensables

Un des intérêts d'une étude des densités urbaines est sans aucun doute de pouvoir montrer les changements dans le temps ; de même, il est très utile de mettre en évidence les modifications introduites lorsque l'on considère des densités construites selon les différents critères indiqués dans la première partie. Ceci exige que l'on puisse faire des comparaisons, soit entre types de densités à une date donnée, soit pour une même densité dans le temps. Or, la comparabilité implique des contraintes sur le plan spatial et des choix au niveau des valeurs des indices.

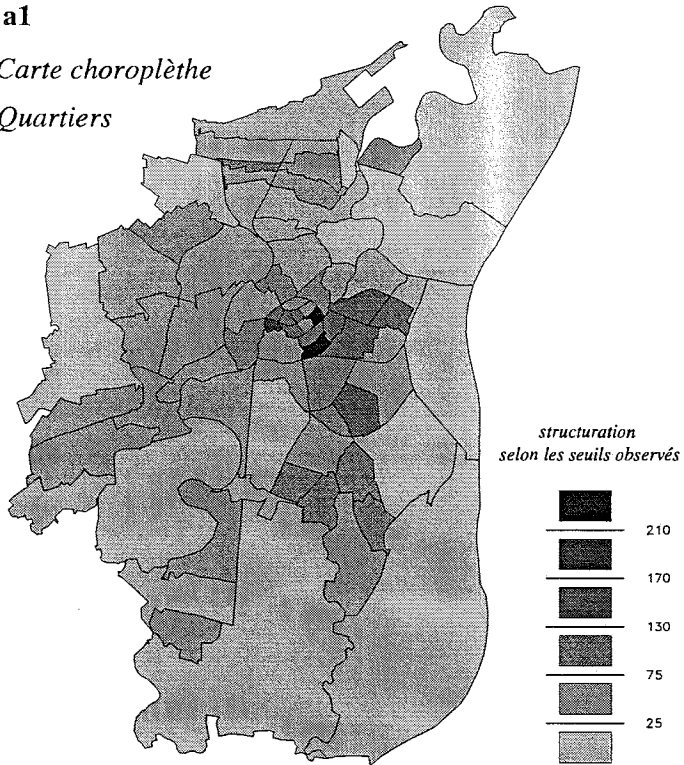
*En effet, dans un premier temps, il est indispensable que les unités spatiales soient les mêmes d'une période à une autre pour une étude diachronique, mais toute personne qui a consulté les données de l'INSEE en France sait parfaitement que cette homogénéité temporelle n'existe pas ! Les quartiers de 1962 ne sont pas ceux de 1982. Quant à ceux de 1990, les fameux "quartiers 5000", mieux vaut ne pas les évoquer ! Un travail considérable est à faire alors pour harmoniser les fonds de cartes, les découpages administratifs et évaluer les populations correspondant à ces "nouvelles unités" comparables. Nous avons tenté cette expérience pour l'agglomération strasbourgeoise, ce qui a pris un temps considérable, qu'il est difficile d'estimer, mais qui est indispensable. Nous disposons, ainsi, pour l'agglomération strasbourgeoise d'un fond harmonisé avec 74 quartiers. Au niveau des îlots, seul le centre-ville a "subi" ces vérifications et ces transformations<sup>2</sup>, et nous n'avons pu terminer les estimations.*

<sup>2</sup> Travail effectué "courageusement" par P. Gerber, doctorant, dont la recherche porte sur le phénomène de gentrification à Strasbourg.

Agglomération de Strasbourg - Densité résidentielle brute 1982

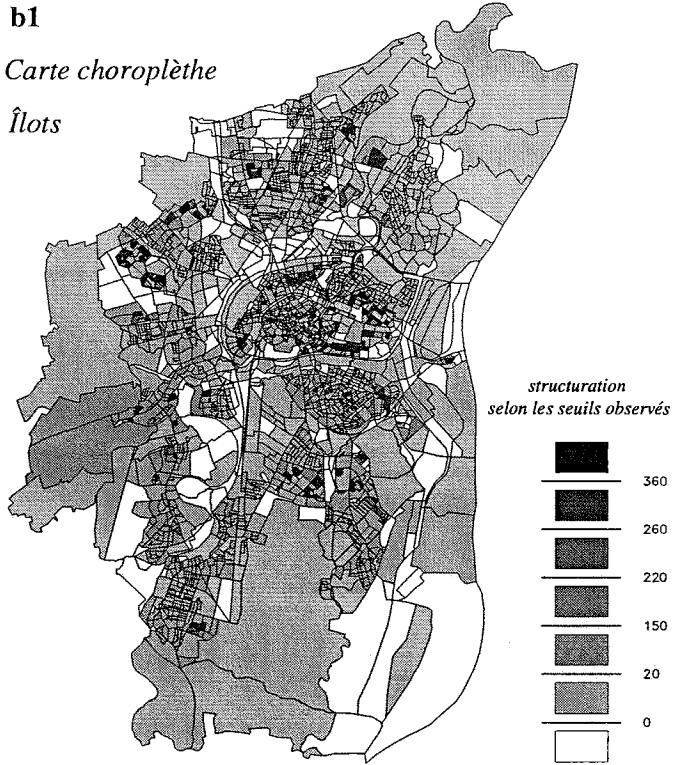
a1

Carte choroplèthe  
Quartiers



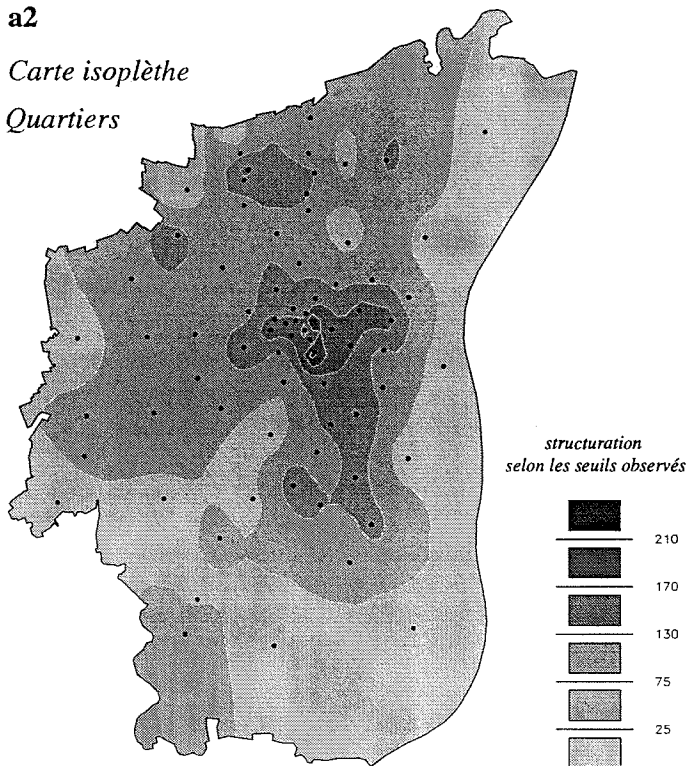
b1

Carte choroplèthe  
Îlots



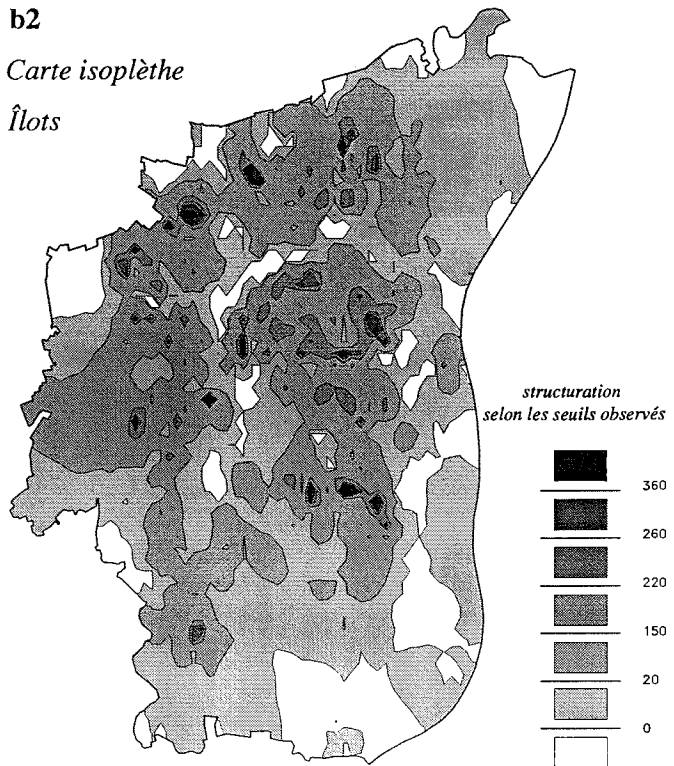
a2

Carte isoplèthe  
Quartiers



b2

Carte isoplèthe  
Îlots



La première contrainte - l'harmonisation des bases spatiales - est donc d'ordre spatial, et ne peut pas toujours aboutir à une solution, malgré les avancées techniques et le développement des systèmes d'information géographique.

*La seconde contrainte* concerne les valeurs densitaires ; elle implique des choix liés aux buts de la carte et aux caractéristiques thématiques. Elle rejoint un problème tout à fait général en cartographie : celui de la discrétisation.

En effet, pour que les cartes soient comparables, quel que soit le procédé retenu, il est indispensable que les limites des classes, dans la mesure où des classes sont établies, soient identiques. Il n'est pas certain que la méthode de discrétisation la mieux adaptée aux données de 1962 soit la même pour celles de 1990 et, même dans ce cas, qu'elle conduise aux mêmes valeurs de seuils. Deux techniques peuvent être envisagées pour résoudre ce problème.

Si la distribution des variables suit une loi normale, ou peut être facilement normalisée, il est possible de retenir un découpage faisant appel à la moyenne et à l'écart-type. Dans ce cas, les valeurs étant standardisées, toutes les densités, quelle que soit la date, seront comparables. La structure même des densités sera mise en évidence indépendamment de tout effet de taille. Ce principe sert aussi bien pour une étude diachronique que pour une étude structurelle, et ceci indépendamment de la base spatiale.

Si l'on désire plutôt montrer les variations, en conservant les effets de taille éventuels, alors des classes harmonisées sont préférables ; on réunit pour ce faire toutes les valeurs densitaires des différentes années, et on choisit le découpage le mieux adapté à cette nouvelle variable, issue du regroupement. Cette technique convient également aussi bien pour des comparaisons structurelles que diachroniques, mais elle mal adaptée aux bases spatiales trop différentes.

A titre d'exemple, nous présentons, toujours pour l'agglomération strasbourgeoise, sous forme choroplèthe, d'une part des cartes montrant les densités de 1962 à 1990, d'autre part des cartes représentant les densités résidentielles brutes et les densités nettes selon les bâtis en 1990, par quartier.

Pour les représentations diachroniques, dans le premier cas la variation de structure dans le temps est mise en évidence par une discrétisation en écart-type centré sur la moyenne (figure 9a), dans les deux autres, des classes harmonisées ont été retenues pour souligner les changements densitaires en termes de "poids", soit avec des seuils observés (figure 9b), soit avec un découpage en classes d'égale étendue après transformation de la variable par la racine carrée (figure 9c).

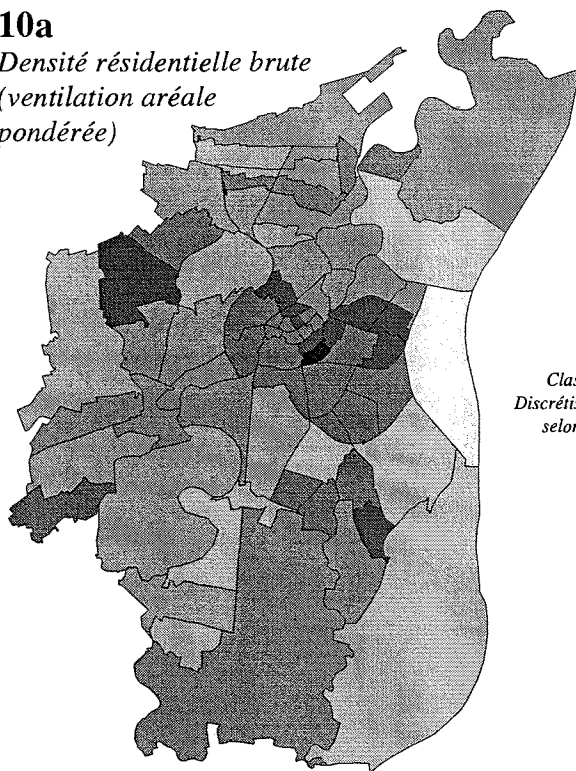
Les types de densité sélectionnés pour 1990 (figure 10) ont été établis à l'aide des données issues de la télédétection. On distingue les densités résidentielles brutes obtenues par ventilation aréale pondérée des densités résidentielles nettes avec trois options correspondant à des choix pour le dénominateur de l'indice : toutes les surfaces bâties, les surfaces avec le bâti habité, enfin les surfaces avec le bâti habité pondéré.

Des solutions au niveau de la comparabilité des valeurs thématiques existent donc, même si les choix ne sont pas toujours évidents. Il n'en est pas de même en ce qui concerne les bases spatiales. C'est pourquoi d'autres procédés de représentation, moins classiques, doivent être envisagés.

Agglomération de Strasbourg - Densité résidentielle 1990

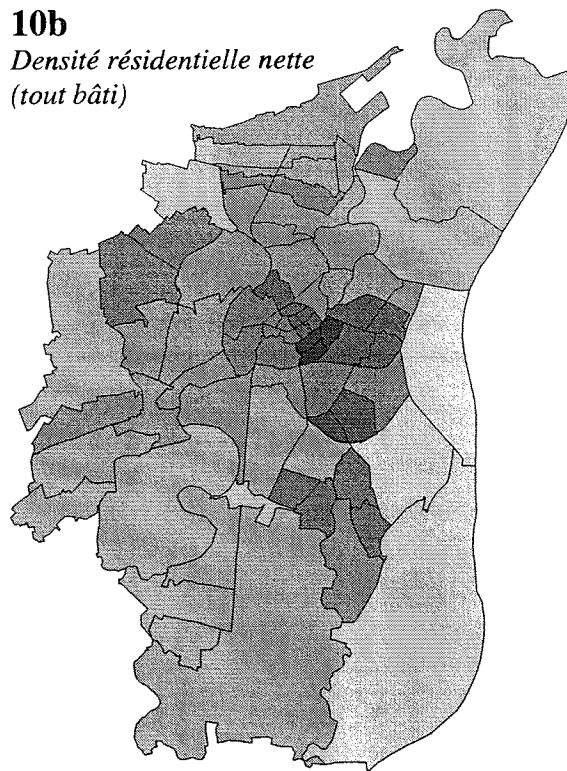
**10a**

Densité résidentielle brute  
(ventilation aérée  
pondérée)

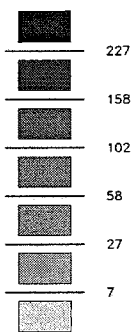


**10b**

Densité résidentielle nette  
(tout bâti)

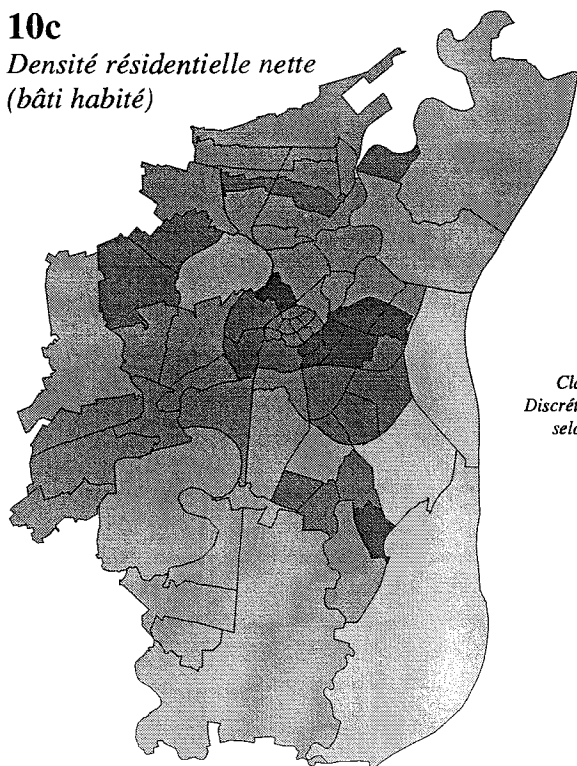


Classes harmonisées  
Discretisation mathématique  
selon la racine carrée



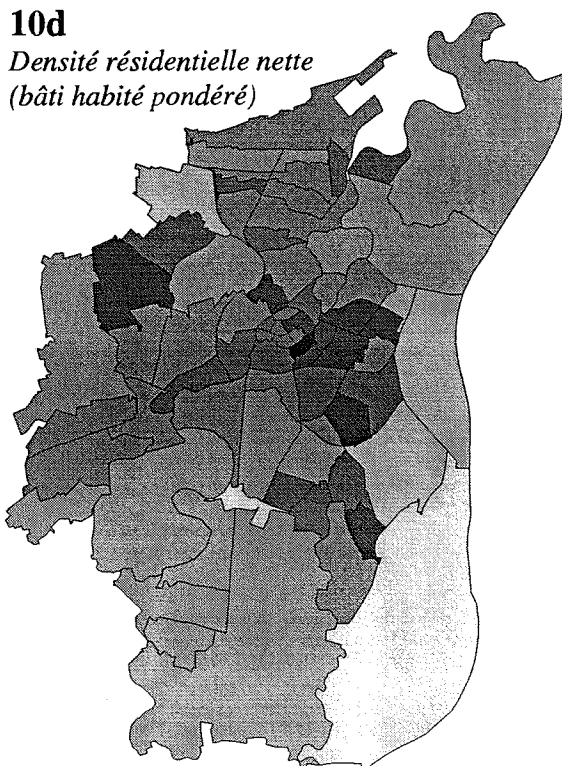
**10c**

Densité résidentielle nette  
(bâti habité)

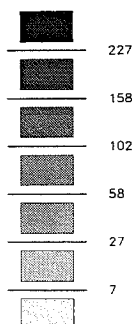


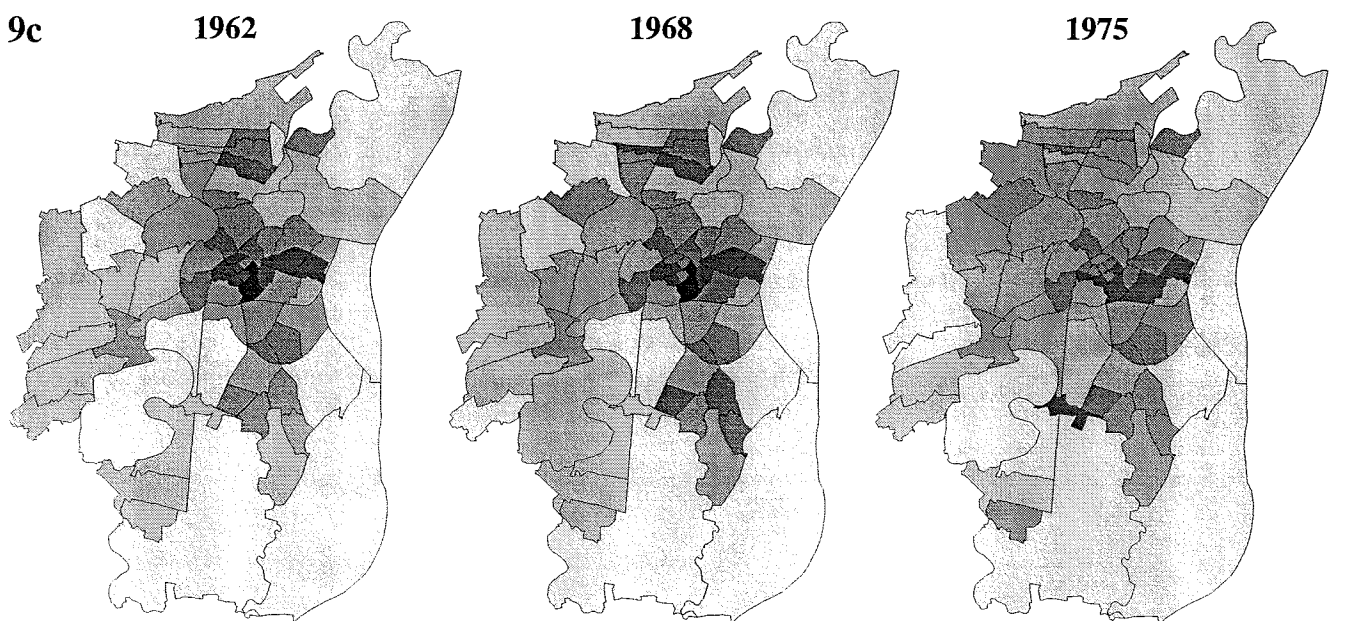
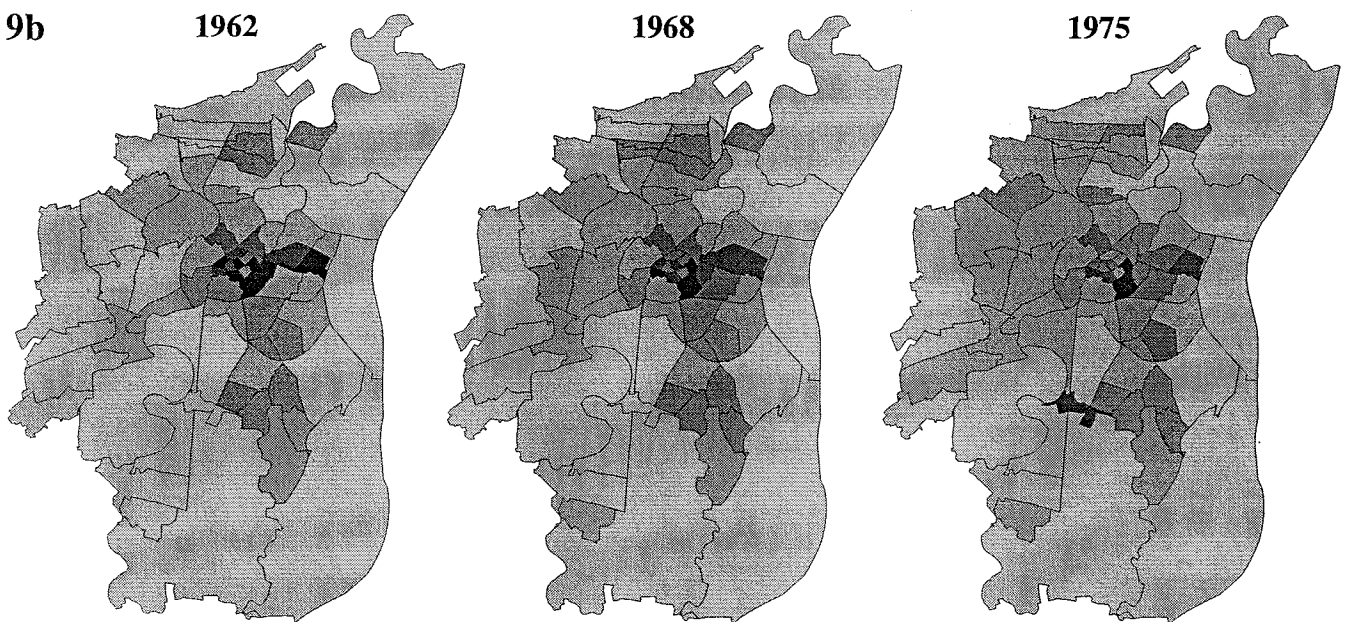
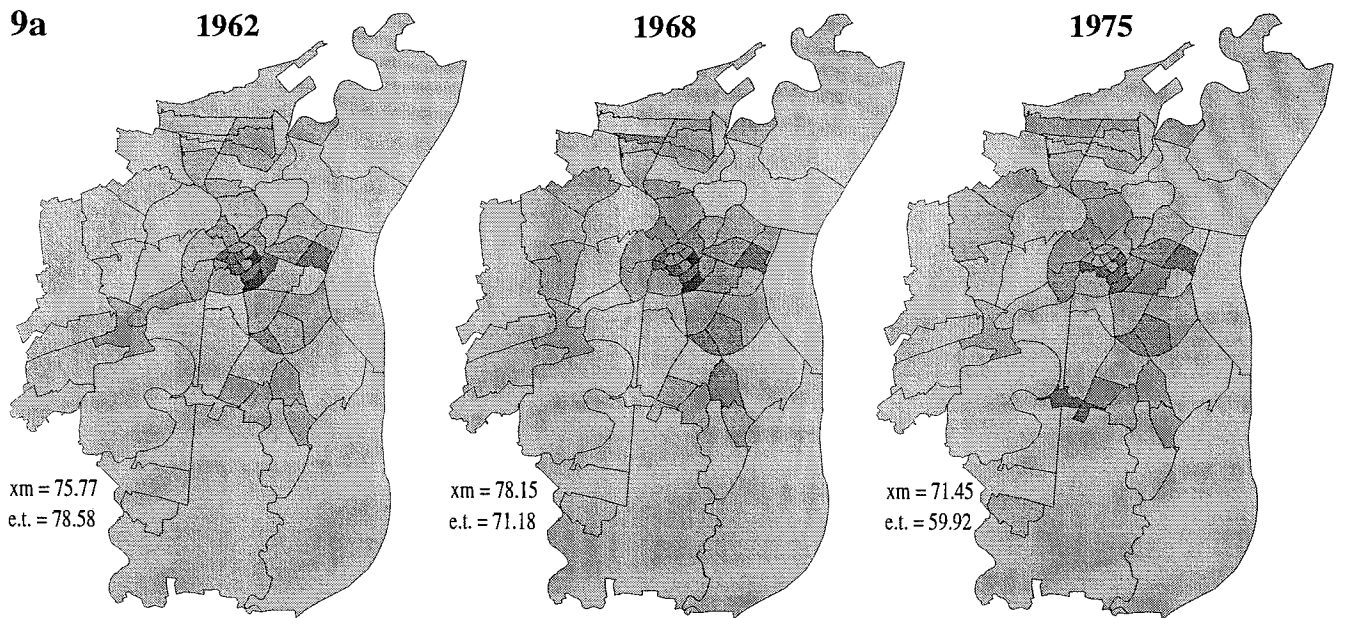
**10d**

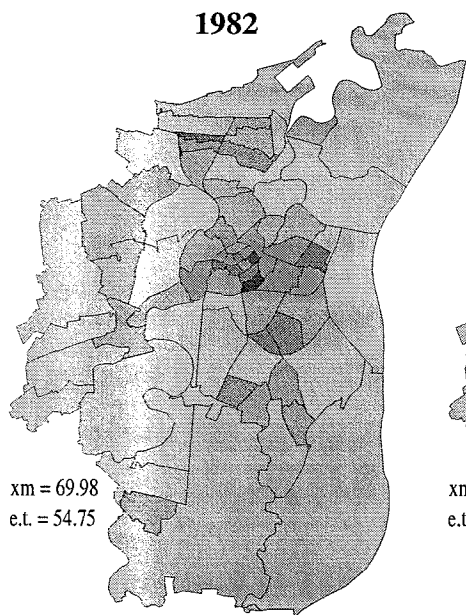
Densité résidentielle nette  
(bâti habité pondéré)



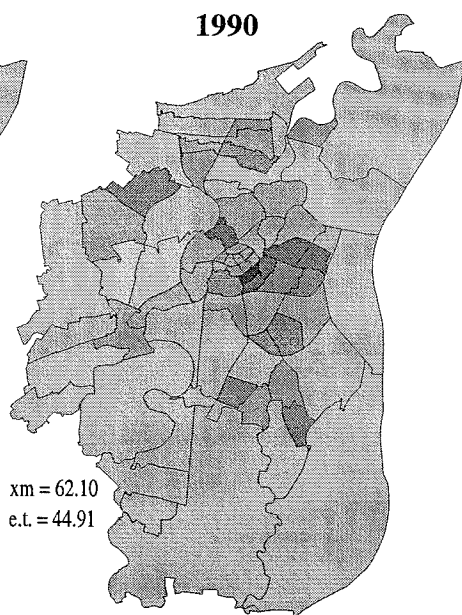
Classes harmonisées  
Discretisation mathématique  
selon la racine carrée



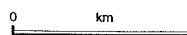
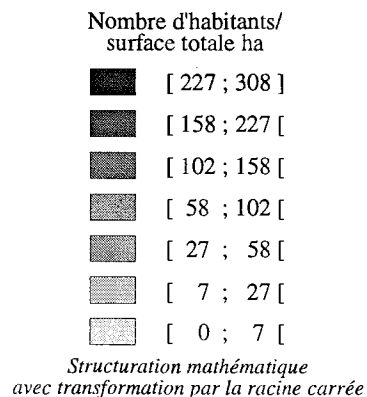
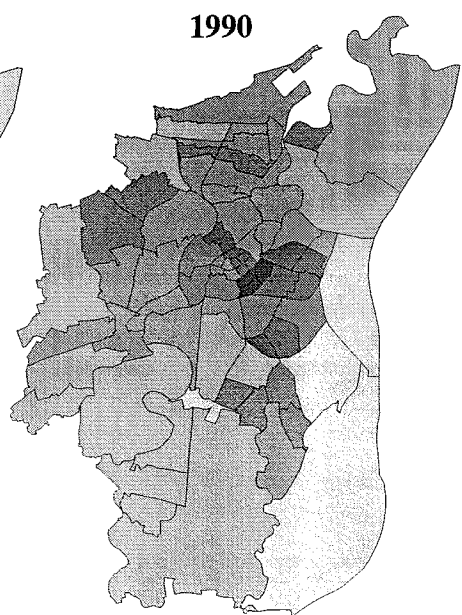
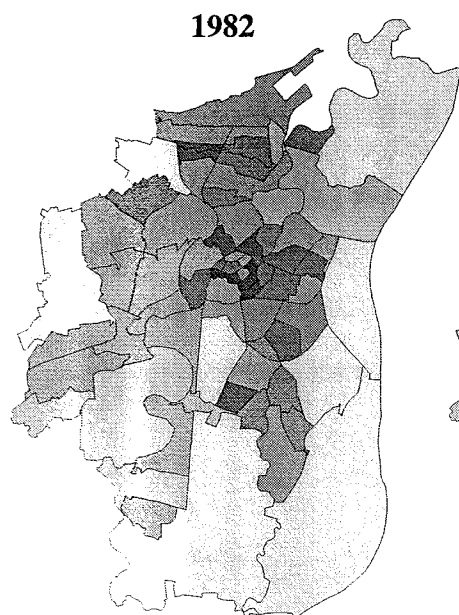
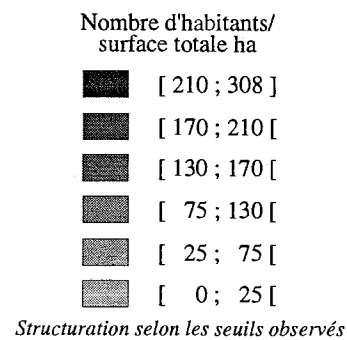
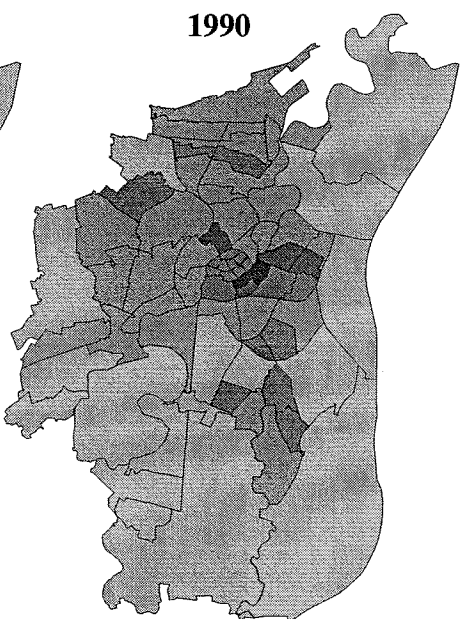
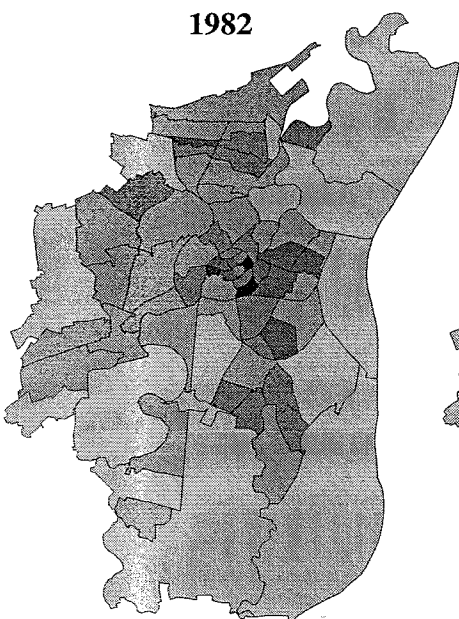
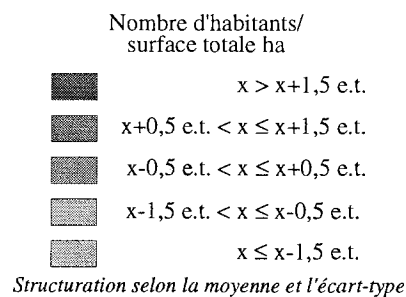




$x_m = 69.98$   
e.t. = 54.75



$x_m = 62.10$   
e.t. = 44.91





## 3.2

### **Propositions pour une meilleure comparabilité : des transformations cartographiques**

---

*Colette CAUVIN*

*avec la collaboration de  
Anne-Christine BRONNER et Jacky HIRSCH*

Deux éléments importants ont été soulignés dans le chapitre précédent. D'une part, les bases spatiales posent des problèmes au niveau des comparaisons diachroniques, d'autre part la lecture des cartes est souvent erronée car les associations visuelles sont très insuffisantes. Il convient donc d'essayer de trouver des solutions pour pallier ces insuffisances, en rappelant que, dans les représentations exposées jusqu'à maintenant, aucune n'a pris en compte l'espace explicitement, qu'aucune n'a réellement fait ressortir la structure des surfaces densitaires. Il s'est agi avant tout d'illustration pouvant éventuellement servir de document de relevé, mais en aucun cas d'outil révélateur des caractéristiques spatiales sous-jacentes des données densitaires.

Pour ce faire, il est nécessaire de faire appel à des domaines nouveaux, d'utiliser des approches inédites - les transformations cartographiques - qui vont permettre d'exprimer ces caractéristiques cachées des espaces qui nous entourent et que nous utilisons. Cette expression "transformation cartographique", signifie littéralement "changement de forme lié à une carte", mais tout dépend de ce que l'on entend par forme<sup>3</sup>.

Or, il n'y a pas qu'une seule méthode, loin de là. Nous distinguons, quant à nous, deux grandes familles de transformations cartographiques, en précisant que le vocabulaire est un vocabulaire de travail, soumis à changements en fonction de l'avancée des recherches (figure 1) :

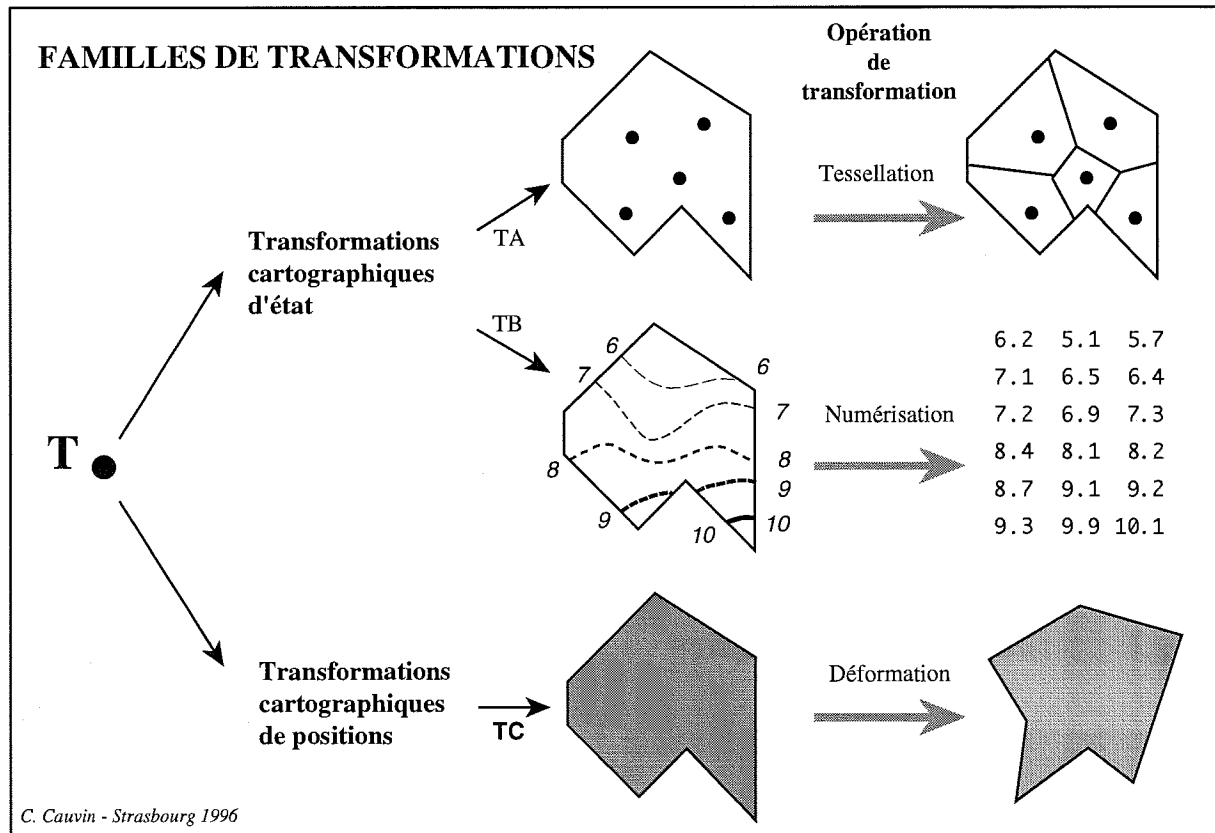
- les transformations cartographiques d'état,
- et les transformations cartographiques de position.

*Les premières* correspondent à une tendance très développée actuellement avec les S.I.G. ; amorcées dès les années 70 avec W. Tobler, elles permettent de passer d'une forme analogique à une forme numérique, c'est-à-dire où, en fait, la carte peut se montrer sous sa forme graphique ou sous une forme numérique ou encore sous celle d'un graphe. Les transformations proviennent des traitements effectués sur une des formes de la carte, en général sa forme numérique, et ensuite on retourne à une forme analogique de la carte, différente de la première, en raison des traitements effectués. Le champ des transformations est immense et fait l'objet de multiples recherches. Nous ne retiendrons pour le travail en cours que la méthode du carroyage, très riche pour l'appréhension des densités.

---

<sup>3</sup> Nous n'aborderons pas, dans ce texte incomplet, les différentes significations de ce terme, et ce qu'elles impliquent pour les transformations cartographiques.

Figure 1  
Familles de transformations cartographiques



*Les secondes*, très souvent dénommées anamorphoses, expriment des modifications de la forme-même de la carte, par suite de déplacements de ses contours, ou de ses limites internes, ou encore des lieux qui la constituent. Leur intérêt est grand, et, en nous appuyant sur les travaux de W. d'Arcy Thompson (1917, 1948), repris, discutés, confirmés, d'ailleurs, par différents chercheurs comme S.J. Gould (1971), nous les considérons comme un ensemble de méthodes permettant de faire surgir des structures sous-jacentes, d'effectuer des simulations, etc.

Elles conduisent à des images inhabituelles qui expriment des tendances ou des différences, et qui, grâce à une lecture globale aisée, dégagent clairement les caractéristiques propres des surfaces densitaires. Nous les aborderons dans un second temps avec deux méthodes particulières, les cartes piézoplèthes et la régression bidimensionnelle.

### ■ 3.2.1 Carroyage et harmonisation des bases spatiales

Le carroyage présente un intérêt indéniable comme le montrent les travaux de G. Lajoie (1992) ou de C. Collet (1992), car ce procédé permet de faire abstraction des bases administratives originelles et d'intégrer les résultats obtenus avec des données satellitaires.

▲ *Les buts essentiels* du carroyage, dans le cadre de cette étude, sont les suivants :

- ⇨ Créer des unités spatiales comparables spatialement, que la base spatiale initiale soit administrative (commune, canton .. ou îlot, quartier, ..), "naturelle" (relevé sur des cartes topographiques d'échelles variables) ou encore ponctuelle imposée. En effet, très souvent, on désire comparer des données physiques et socio-économiques, mais les bases spatiales étant différentes, il est impossible de procéder à ces comparaisons. Créer des bases communes résout ce problème, mais pour cela il faut être capable de répartir sans biais (avec un biais minimum) les valeurs affectées à des unités de taille et de forme variables sur l'ensemble de la surface considérée ou du moins dans des surfaces unitaires identiques.
- ⇨ Construire, de manière identique, des unités spatiales comparables dans le temps, ce qui est indispensable, les limites administratives subissant régulièrement des modifications que ce soit à l'échelle intra-urbaine (îlots, quartiers, etc.), ou interurbaines (communes, cantons, etc.), comme nous l'avons déjà signalé.
- ⇨ Par suite, un troisième but est évident : généraliser des données spatiales et les répartir sur une surface quelle que soit la base spatiale initiale. Il est, en effet, nécessaire de pouvoir connaître les valeurs en chaque point de la surface, ou du moins sur des unités spatiales identiques, si l'on veut pouvoir comparer ou confronter ces différentes données.
- ⇨ Enfin, changer d'échelle "à son gré" est un des buts poursuivis avec l'utilisation des carroyages. En effet, *"tout changement d'échelle amène à se poser un problème nouveau et rien ne permet de présupposer que des liaisons existant à une échelle existent à une autre échelle"*. L'usage de carroyages permet de tester la véracité de cette affirmation extrêmement importante au niveau géographique.

▲ *De ces différents buts se dégagent les nombreux intérêts* de la cartographie par carroyage pour une étude densitaire.

- ⇨ Un premier intérêt apparaît immédiatement : celui de la disparition des biais spatiaux dans la lecture des cartes. On sait que la lecture des cartes est partiellement faussée par le fait que les grisés affectés aux valeurs sont portés sur des surfaces de taille inégale, très marquée souvent en milieu urbain. Les solutions graphiques proposées étaient toutes insuffisantes. Le carroyage pourrait être "La" solution principale si aucun autre inconvénient n'apparaît à l'usage.
- ⇨ Un autre intérêt est tout aussi évident : celui de la possibilité désormais offerte pour une comparaison de données d'origines différentes. Les données étant associées à des unités spatiales communes, les croisements sont toujours possibles, sous réserves que les niveaux de mesure le permettent ; mais là aussi, les carroyages permettent de confronter des données qualitatives et des données quantitatives.

Cependant, ces buts auxquels le carroyage prétend répondre, ces intérêts qui semblent évidents, sont-ils réellement atteignables avec les techniques actuelles ? Ou existe-t-il parallèlement des inconvénients graves qui expliqueraient le développement relativement récent des carroyages opérationnels et les réticences rencontrées ?

▲ *Des contraintes* importantes apparaissent, en effet, lors de la mise en place des carroyages, fort bien exposées dans les ouvrages déjà cités. Aussi, ici, ne faisons-nous que rappeler quelques problèmes soulevés par cette technique.

Constituer un carroyage pour remplacer des unités existantes, remplir ces carrés de valeurs associées aux variables thématiques, sont des opérations moins évidentes qu'elles peuvent le paraître au premier abord. En effet, il s'agit de transformer une carte, avec des limites observées ou administratives, limites irrégulières, en une carte "matricielle", tablée, qui ressemble comme deux gouttes d'eau, à une matrice mathématique où chaque carré, chaque case, de la matrice, correspond à une information XYZ où les Z traduisent l'information thématique, comme dans toute carte, où les XY, désormais, ne sont pas des coordonnées mais les numéros des lignes et des colonnes.

Les triplets de localisations ont donc changé de signification ; à la limite, une fois le fond préparé, toute matrice de données thématiques peut permettre de fournir une nouvelle carte. L'équivalence matrice localisée et carte est donc obtenue. On rentre de plein pied dans la cartographie transformationnelle.

Mais cette équivalence n'est pas évidente et de nombreuses difficultés surviennent liées à trois éléments :

- les données elles-mêmes, c'est-à-dire leur origine, leur nature et leur forme,
- la forme et la taille de la grille à remplir,
- le mode d'affectation des valeurs à chaque maille de la grille.

En effet, il convient de choisir une taille pour les carrés, de caler la grille sur le fond de référence, de généraliser la forme en tenant compte de cette grille et de valuer les mailles en fonction des données initiales. Une couverture spatiale doit avoir été préalablement établie, afin que les valeurs de population aient été réparties sur la zone étudiée selon des unités de surface élémentaires (pixels). Le fond de carte est donc alors transformé en une "image", c'est-à-dire une surface maillée avec des mailles très fines (figure 2)<sup>4</sup>. Ce maillage peut être superposé soit aux unités administratives, soit à des unités incluant également les zones bâties (figure 3).

La valuation de chaque pixel peut se faire selon différentes procédures. La plus simple est une répartition proportionnelle où chaque pixel a le même poids (figure 4). A partir de ce remplissage des grilles fines, les transformations sont aisées ; il faut décider de la taille des carrés : pour Strasbourg, nous avons retenu des mailles de 250 et 500 mètres de côté, la généralisation initiale ayant été faite soit sur les îlots, soit sur les quartiers. Signalons que le pas de 250 mètres pour les quartiers introduit une précision qui n'existe pas initialement, alors que le pas de 500 mètres apparaît grossier au niveau des îlots et provoque aussi une perte d'information parfois importante.

Toutes les cartes ne sont pas présentées dans ce rapport ; nous en proposons deux à titre d'exemple, une pour chaque pas, construite sur la base des données îlotées (figure 5).

Mais grâce à ce type de transformation, toutes les données dont nous disposons sur Strasbourg, quelles que soient leur date ou leur base initiale, sont comparables. Ceci a permis de construire des graphiques de la relation densité - distance au centre extrêmement intéressants, qui mériteraient une interprétation approfondie.

Cependant, d'autres transformations conduisent à des résultats complémentaires une fois l'harmonisation spatio-temporelle effectuée. Il s'agit des transformations cartographiques de position.

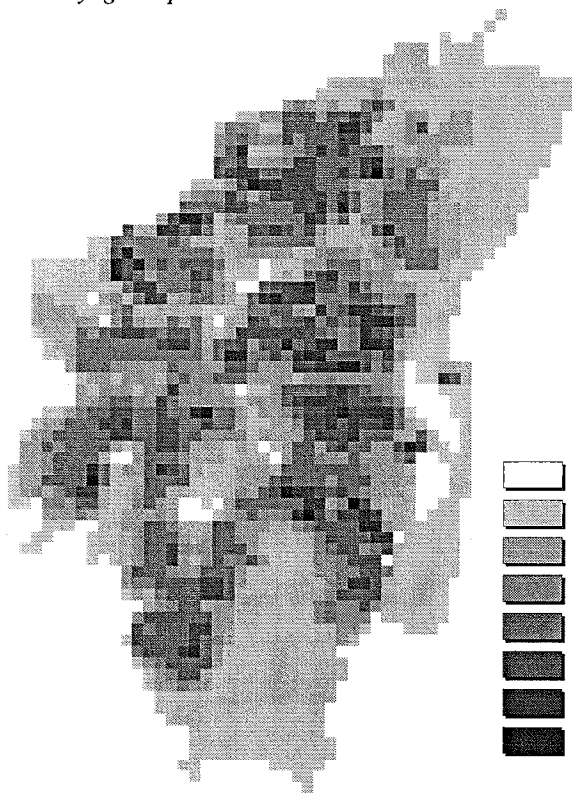
---

<sup>4</sup> Ceci correspond à une rasterisation qui peut être effectuée automatiquement.

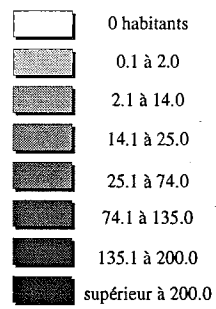
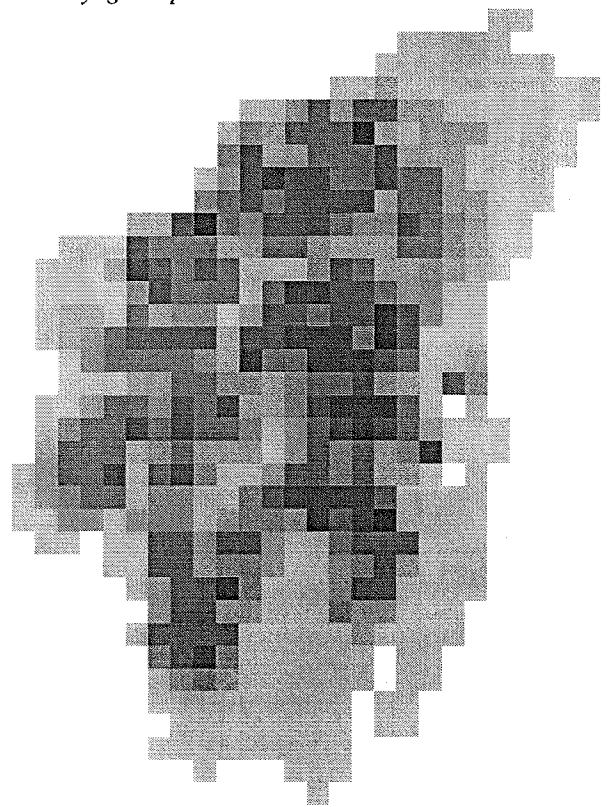


Figure 5  
Agglomération de Strasbourg - Densité résidentielle brute par carroyage 1990  
(ventilation aréale pondérée)

5a  
Carroyage au pas de 250 m



5b  
Carroyage au pas de 500 m



### ■ 3.2.2 Tendances et différences des surfaces densitaires : apport des transformations cartographiques de position

Nous avons indiqué en introduction du chapitre 3.2 qu'il existait deux grandes familles de transformations cartographiques. Désormais, la recherche de la structure densitaire sous-jacente va faire appel à des méthodes de la deuxième famille, celle des transformations cartographiques de position.

Cette deuxième famille correspond aux transformations où ce sont les contours apparents de la forme spatiale ou les points qui la composent, qui subissent des modifications de localisation. La transformations de la "configuration spatiale", au sens de R. Thom par opposition à la forme logique ou la forme comme principe vital, est alors "une transformation réelle non liée à un déplacement du point de vue de l'observateur". Elle s'appuie sur l'hypothèse de base suivante issue des travaux de W. d'Arcy Thompson (1917, 1948), à savoir que *"la forme exprime la structure d'un phénomène ; si l'on est à même de caractériser une forme ou de comparer des formes, alors on peut révéler, par l'intermédiaire de la forme, une structure non visible, on peut comparer des structures entre elles"*. Il est évident que, dans ces transformations, l'espace est intégré explicitement ; on se trouve ainsi à l'opposé des représentations classiques où l'espace était en quelque sorte considéré comme neutre.

Ces transformations présentent des avantages indéniables.

*D'une part, au niveau de la communication* : ceci est important car de nombreux auteurs ont souligné le rôle de la cartographie comme science de la communication ; il ne faut pas oublier que la cartographie a pour but de transmettre un message par l'intermédiaire d'un canal, la carte. Cette dernière a donc pour fonction, de faire passer entre un auteur et un lecteur une information, un message de manière efficace, avec autant d'exactitude que possible. Tout "procédé" qui favorise la communication ou qui permet une meilleure compréhension de l'espace considéré doit donc être retenu comme un procédé "positif", sans connotation de jugement.

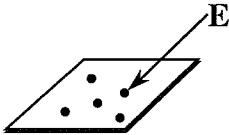
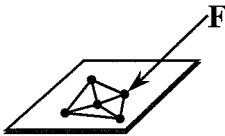
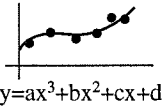


Or la plupart des transformations cartographiques de position utilisent, directement ou non, les variations de surface pour transmettre une information ; des tests en perception graphique et des recherches en cartographie ont souligné que le lecteur enregistrait en premier des formes, et qu'il était particulièrement sensible aux variations de surface pour différencier les éléments des images. Les transformations cartographiques de position montrent, grâce aux modifications de la forme spatiale, des ensembles, des tendances, facilitant ainsi la lecture et améliorant l'efficacité de la communication.

*D'autre part*, si l'on retient avec C. Board (1967) que la carte peut également être considérée, non seulement comme un modèle iconique et représentationnel, mais aussi comme un *modèle conceptuel* "du monde réel", la carte devient un outil d'analyse et de compréhension de l'espace. En tant que modèle, une fois les hypothèses énoncées et les contraintes définies, la carte obtenue a un caractère "unique". Quelle que soit la personne qui la construit selon ces hypothèses, les résultats seront identiques et reproductibles. Toute transformation cartographique de position doit donc conduire à une ou des solution(s) reproductible(s) par tous, si l'on veut pouvoir l'interpréter et l'utiliser comme outil d'analyse de l'espace, comme outil de simulation.

Les transformations de position sont ainsi des constructions mathématiques qui conduisent à des solutions reproductibles par tous, exprimant de manière unique des caractéristiques visibles ou invisibles des espaces étudiés. Elles regroupent des méthodes impliquant le passage, par une opération mathématique, d'une forme d'un espace à une autre forme du même espace, en privilégiant les changements des localisants spatiaux ; mais il en existe différentes groupes qui peuvent être classées selon certains critères.

On distinguera principalement les transformations cartographiques thématiques, des transformations cartographiques différentielles, comme l'indique la figure 6. Mais dans le cadre d'une étude densitaire, seules deux méthodes nous intéressent, principalement, pour l'instant, appartenant chacune à l'un des groupes cités : il s'agit des cartes piézoplèthes et des représentations associées à la régression bidimensionnelle.

Figure 6  
Types de transformations cartographiques de position

TRANSFORMATIONS CARTOGRAPHIQUES DEPOSITION		MÉTHODES
THÉMATIQUES	<ul style="list-style-type: none"> <li>● de poids </li> </ul>	Carte piézoplèthe Pseudo-cartogramme Projection poly focale .....
	<ul style="list-style-type: none"> <li>● de liens </li> </ul>	Analyse multidimensionnelle des proximités Trilatération Cartographie élastique Analyse des préférences .....
DIFFÉRENTIELLES	<ul style="list-style-type: none"> <li>● de tendance </li> </ul>	Transformation azimutale (type AZMAP ou "Boutoura")
	<ul style="list-style-type: none"> <li>● de comparaison                             <ul style="list-style-type: none"> <li>unipolaire </li> <li>multipolaire </li> </ul> </li> </ul>	"Isodist" "Anamorphose unipolaire" ? Régression bidimensionnelle "Carte de tension" Méthode "espace-temps" Anamorphose vectorielle } ?

▲ 3.2.2.1. Les cartes piézoplèthes :  
une méthode pour exprimer des structures et des processus spatiaux.

Les cartes piézoplèthes<sup>5</sup>, dont le nom a été proposé par C. Schneider, présentent deux grands avantages pour des cartes concernant la densité : d'une part, comparer la structure de

<sup>5</sup> Piézoplèthe : ce terme est construit sur le modèle des qualificatifs tels que "choroplèthe, isoplèthe", où la

données différentes à une même période, et, d'autre part, montrer l'évolution d'un même phénomène dans le temps. Les cartes piézoplèthes correspondent à des modèles mathématiques reposant sur des hypothèses précises avec des équivalences à effectuer entre le domaine originel d'utilisation - le calcul des structures en résistance des matériaux - et le thème cartographique étudié, ici la densité. Sans exposer la méthode en détail<sup>6</sup>, nous en rappellerons brièvement le principe et les contraintes.

#### □ Principe de la méthode

Le principe peut être résumé de la manière suivante : la carte, assimilée à une surface physique d'épaisseur constante, constituée d'un matériau donné (béton, acier, ...), est décomposée en éléments finis, généralisés en un ensemble de mailles carrées ou triangulaires, les côtés de ces mailles étant formés de barres et de noeuds. Les zones géographiques étudiées (îlots, quartiers, ...) sont déterminées par le regroupement d'un certain nombre de mailles, donc de barres. La variable thématique retenue (population, densité, ...) assimilée à un poids est appliquée sur cette surface comme une force qui provoque en certains points des contractions ou des dilatations du matériau ; ces forces sont ensuite réparties continûment sur l'ensemble de la surface, les extensions et les rétractions variant d'intensité selon les proximités. La structure va donc se déformer, se transformer différentiellement, selon les deux directions X et Y.

La construction correspond à un transfert de modèle puisque l'on fait appel à un modèle d'une autre discipline, comme nous l'avons déjà indiqué. On conserve l'ensemble des formules mathématiques, mais on assimile l'espace à représenter à une surface composée d'un matériau, ce matériau pouvant varier ; la variable thématique, quant à elle, est considérée comme une force physique. Pour que le transfert de modèle soit correct, il convient de voir si les contraintes associées au modèle physique sont en adéquation avec les hypothèses du phénomène et de l'espace étudiés, en particulier la continuité de l'espace, l'homogénéité du matériau et le type de force physique. Cet aspect du transfert doit être encore approfondi. En effet, les contraintes sont importantes surtout deux d'entre elles.

#### □ Contraintes du modèle

La première contrainte est spatiale. L'équilibrage des forces à partir des noeuds et des barres s'effectue continûment : ceci implique que le phénomène étudié et l'espace retenu sont continus ou peuvent être considérés comme continus. Dans le cas contraire, nous introduirions dans la représentation des caractéristiques qui n'existent pas, une information supplémentaire et éventuellement erronée. Il faut en être conscient pour éviter de faire des erreurs graves et de discréditer des méthodes intéressantes mais dangereuses si elles ne sont pas utilisées à bon escient.

La deuxième contrainte joue sur l'interprétation correcte de ces cartes ; il convient de savoir qu'elles sont construites de telle manière que la taille de la maille de base, avant déformation, correspond à la valeur de la moyenne de la variable thématique. Les mailles sont plus grandes lorsque le phénomène présente des valeurs supérieures à la moyenne et inversement. Il est donc bien évident que ce type de modèle ne peut être retenu que pour des données relevées selon un niveau de mesure "quantitatif".

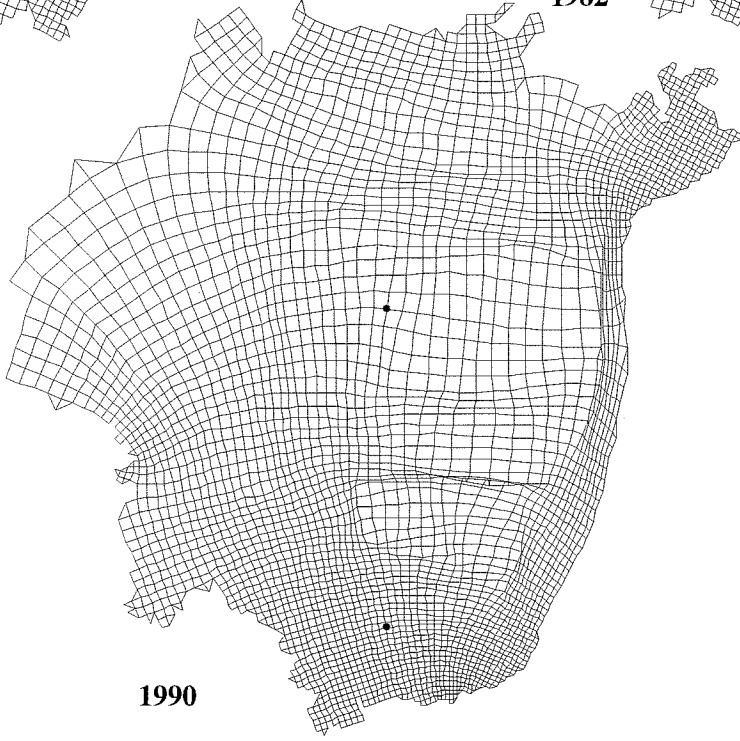
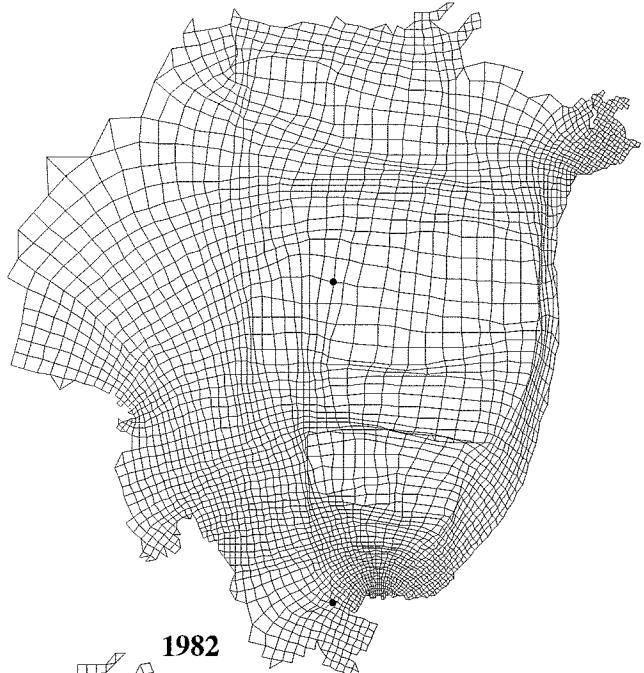
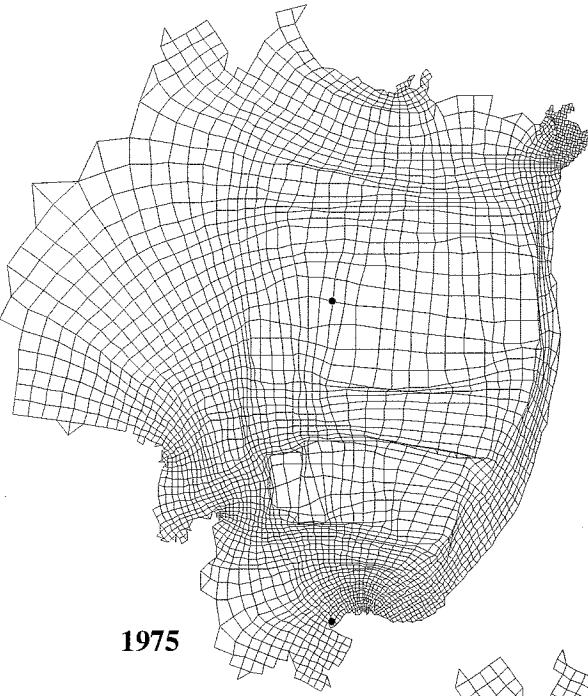
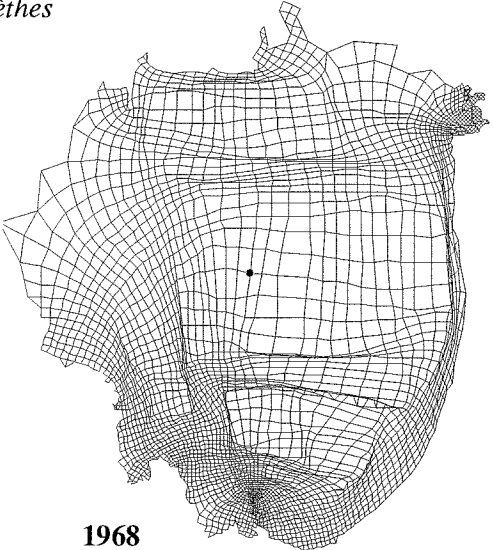
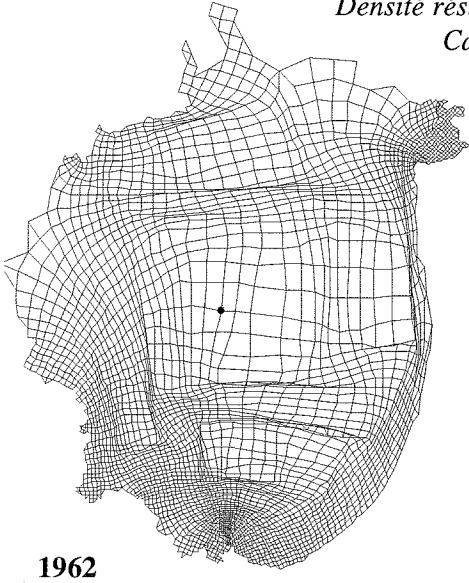
Notons encore que ce procédé peut être amélioré graphiquement en fonction du public, mais la construction en est reproductible et les améliorations graphiques peuvent être dangereuses, en particulier avec un usage maladroit de la couleur.

---

composante "piézo" vient du grec  $\piιεζειν$ , et signifie "serrer, presser".

<sup>6</sup> Pour une approche plus précise, nous renverrons aux travaux suivants : Cauvin C. et al., 1985 ; Da Silva A., 1986 ; Cauvin C. et al., 1989 ; Enaux C., 1989..

Figure 7  
Densité résidentielle brute 1962-1990  
Cartes piézoplèthes



Ces constructions ont donc des avantages incontestables : leur puissance visuelle. N'oublions pas le pouvoir de l'image : on retient mieux une image, surtout avec des variations de surfaces, qu'un texte. Les cartes piézoplèthes, qui font appel à ces variations, permettent ainsi de mettre en évidence les grandes tendances d'un phénomène donné. Il n'est pas question de chercher à connaître le détail de ce qui se passe dans telle ou telle maille. La lecture doit être globale, ce qui correspond d'ailleurs à la première règle de lecture des cartes. Si l'on désire des informations précises sur un secteur donné, alors ce mode de représentation est à proscrire. Si l'on veut comparer globalement des phénomènes distincts à une période donnée, ou montrer l'évolution d'un phénomène dans le temps, alors ce procédé est particulièrement indiqué.

De plus, il correspond à un transfert de modèle avec toutes les informations que cela peut apporter en complément. Au-delà des données initiales, il fait apparaître des tendances sous-jacentes. Il apporte une connaissance nouvelle sur le phénomène étudié et l'espace associé. Mais il faut aussi savoir que ce modèle ne peut être appliqué indifféremment sur n'importe quel espace et pour n'importe quelle variable. Le meilleur outil, mal utilisé, ne peut fournir de bons résultats !

*En définitive, ce type de représentation permet de montrer des tendances et de faire apparaître des caractéristiques sous-jacentes. Il peut exprimer aussi bien des différences de structure que des changements dans le temps.*

Nous avons ainsi appliqué ce procédé dans les deux ouvertures, à savoir pour montrer les différences de structure densitaire au niveau des quartiers entre les densités brutes et les densités associées aux surfaces bâties, et les différences diachroniques de 1962 à 1990 ; seul, cet exemple est présenté ici (figure 7).

Cependant, un fait est à noter : jusqu'à maintenant, les comparaisons que nous avons effectuées sont demeurées visuelles, et nous avons mis l'accent sur leur facilité, sans qu'apparaissent d'erreurs importantes. Or, on sait par ailleurs, que les confrontations visuelles sont toujours entachées d'erreurs comme nous l'avons déjà dit en nous appuyant sur les travaux de H.H. Mac Carty et N.E. Salisbury en 1961 ; les cartes piézoplèthes limitent ces erreurs, elles ne les font pas disparaître. C'est pourquoi, un autre mode de représentation va être proposé, dont l'intérêt réside dans sa capacité à produire des comparaisons cartographiques et généralisables.

#### ▲ 3.2.2.1 *Une méthode de comparaison spatiale des structures densitaires : la régression bidimensionnelle*

Les cartes piézoplèthes obtenues précédemment nous conduisent à émettre une hypothèse, hypothèse de travail au moins pour l'instant, qui peut être énoncée comme suit : "les variables thématiques, considérés comme des poids, des forces, des températures sur une surface, induisent des transformations des surfaces et donc de l'espace, des formes caractéristiques du phénomène étudié. L'image obtenue par les transformations thématiques de poids exprime ces changements (de structure ou de processus) au même titre que les changements de forme exprimaient les changements de structure, et, donc, la croissance pour W. d'Arcy Thompson". Si nous acceptons cette hypothèse, il devient possible d'effectuer des comparaisons en s'appuyant sur les travaux de cet auteur concernant la croissance et la forme, ainsi que ceux de W. Tobler (1977) sur les changements de formes, et ceux de H. Raymond dans son étude des modèles graphiques (1968).

Les changements de forme traduisent un changement de structure (entre des phénomènes à un moment donné, ou pour un même phénomène dans le temps). La comparaison des formes, en faisant appel aux projections cartographiques, exprimera à la fois statistiquement et cartographiquement, d'une manière généralisable, les différences entre des formes, donc entre

ce que traduisent ces formes : structure, croissance, évolution... Ces notions sont fondamentales en géographie de la population et plus particulièrement pour les densités. C'est pourquoi, ces méthodes nous paraissent particulièrement adaptées à ce type de données.

Désormais, on pourra traduire des différences entre des organisations spatiales autrement qu'en effectuant une simple corrélation entre les valeurs des variables sélectionnées. Les images exprimant la structure spatiale, obtenues précédemment vont être comparées entre elles, en prenant en compte les caractéristiques spatiales, en même temps que les valeurs thématiques.

La méthode la plus connue pour répondre à ce problème a été développée par W. Tobler et a été dénommée régression bidimensionnelle<sup>7</sup>. Sans entrer dans le détail, rappelons-en le principe et les étapes principales.

Le problème à résoudre est le suivant :

"Etant donné deux espaces homologues, l'un considéré comme source ou référentiel, l'autre comme image ou espace homologue à comparer (les deux espaces possédant donc les mêmes points homologues, différemment localisés), comment comparer ces deux espaces ?".

La solution de W. Tobler (1977), qui comprend de nombreuses étapes, repose sur un principe simple :

"On cherche à minimiser le carré de la somme des écarts entre les points de la surface de référence et les points homologues de l'image en trouvant l'image ajustée la plus proche de la surface image compte-tenu de la surface de référence".

Par translation (centrage), rotation (correspondance des axes) et changement d'échelle (homothétie), à l'aide d'une projection qui peut être de nature variable selon le problème posé, on aboutit à un ajustement des deux surfaces fournissant des résultats statistiques nombreux et une carte indiquant les vecteurs de déplacements soit l'écart orienté entre la localisation géographique et la localisation thématique de chacun des lieux.

La deuxième étape, plus complexe, introduit une interpolation qui conduit à la production de nombreuses cartes. Une seule sera retenue ici : l'anamorphose qui traduit sur l'ensemble de la surface les différences notées par lieu dans le cadre de la carte des vecteurs de déplacements. L'interpolation généralise les résultats en permettant de connaître les distorsions en chaque point de la surface. Ces dernières sont à la fois statistiques et cartographiques ; les comparaisons sont effectuées sur l'espace et non sur les données délocalisées. *Les anamorphoses qui en sont issues soulignent donc les différences entre les images et une même surface de référence, autorisant donc les comparaisons, ou encore entre les images elles-mêmes.*

Nous avons aussi appliqué cette méthode aux images obtenues à l'étape précédente, d'une part, en confrontant chaque anamorphose au référentiel, d'autre part, en comparant les images

<sup>7</sup> Cependant signalons que pour les anamorphoses multipolaires d'autres méthodes du même type ont été développées, d'abord par F. Liviératos et C. Boutoura, en 1986 (mais les résultats sont quasiment identiques), par M. Wegener et K. Spiekermann (1993) mais leur méthode semble strictement adaptée aux transports avec une contrainte de non violation de la topologie, et par Rouen, également dans le cadre des transports avec des contraintes encore plus fortes, mais comme nous n'avons eu qu'une partie de la démonstration, nous nous garderons bien d'en parler davantage. Sans doute dans la même catégorie devons-nous classer les travaux de Mourrieras sur les noms de familles, mais nous n'avons pas encore assez approfondi ce procédé pour être sûr de notre classification. C'est pourquoi nous avons tendance encore pour l'instant à appliquer essentiellement la méthode de la régression bidimensionnelle lorsque nous voulons comparer des espaces, car elle est très générale comme celle de Liviératos et Boutoura ; nous en connaissons les contraintes, les limites et les impératifs au niveau de l'interprétation (bien que nous faisons encore de nombreuses découvertes dans les possibilités du programme). Il s'agit d'un transfert de la biologie à la géographie, la biologie ayant emprunté elle-même la méthode à des cartographes. Va et vient d'échanges entre les disciplines.

---

entre elles, soit entre deux dates, soit à une même date, mais avec des densités calculées différemment.

Des tableaux résument les résultats obtenus car les comparaisons sont nombreuses (figures 8a, 8b) et deux ensembles de cartes montrent les écarts entre la situation densitaire de 1962 et celle de 1982 d'une part (figure 9a), les différences entre la densité résidentielle brute et la densité nette en 1982 (figure 9b). Ces documents sont fournis à titre d'exemple, mais leur commentaire s'avérerait riche d'enseignements pour comprendre les densités de l'intérieur !

Notons que d'autres transformations cartographiques de position seraient encore à tester : un premier essai devrait porter sur les transformations conduisant à des comparaisons à partir d'un pôle unique ce qui se justifierait tout à fait avec l'idée que l'on étudie les densités à partir d'un centre donné ; le second viserait à visualiser les tendances des modèles proposées en utilisant le procédé proposé par J.W. Cerny (1971), mais on rencontrera sans aucun doute, encore une fois, le problème de la liaison visuelle entre la fonction mathématique et l'image obtenue. Ces expérimentations seront faites ultérieurement, en fonction des circonstances !

D'autres méthodes, que nous allons présenter maintenant, abordent, cependant, la compréhension des densités d'une autre manière, en s'appuyant sur les notions de filtrage et de décomposition de l'information.

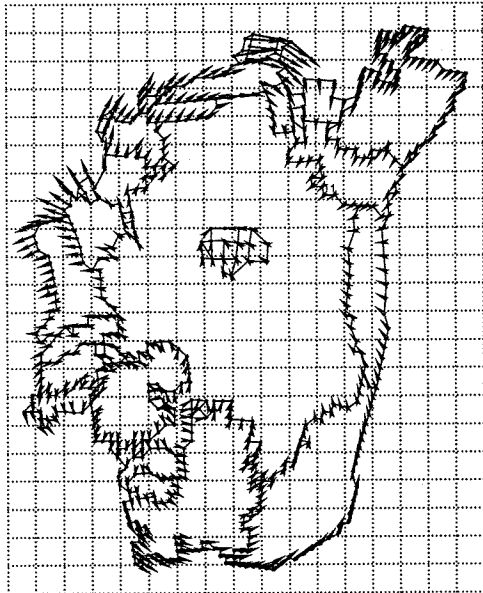
Figure 8a  
Comparaisons diachroniques spatiales - Résultats statistiques

Liste des études	R1	R2	R3	RMSE1	RMSE2	RMSE4	M2	(1/N*M2)-1/2	ellipse coeff d'étiement
str.62.cont.elli.dar	.9877	99.66	100.00	33.1909	1.9275	32.99888	2741.60	1.40644	5.43696
str.68.cont.elli.dar	.9873	99.70	100.00	33.6683	1.8410	33.45819	2724.60	1.40207	5.54252
str.75.cont.elli.dar	.9890	99.77	100.00	31.4384	1.5155	31.26509	2769.75	1.41364	5.65685
str.82.cont.elli.dar	.9876	99.80	100.00	33.3509	1.4840	33.19218	2723.06	1.40167	5.27734
str.82bat.cont.elli.dar	.9668	99.84	99.99	54.5137	2.1547	54.27970	2790.91	1.41903	4.59680
str.90.cont.elli.dar	.9895	99.83	100.00	30.6332	1.2765	30.51343	2737.72	1.40544	6.02158
str.90bat.cont.elli.dar	.9660	99.91	100.00	55.1471	1.6855	55.02837	2935.53	1.45533	4.64857
str.comp.62a68.cont.elli.dar	.9994	99.12	100.00	5.3402	.5007	5.28674	2974.92	1.48282	4.52250
str.comp.62a75.cont.elli.dar	.9950	99.83	100.00	15.0312	.6187	14.97136	3009.01	1.49129	3.51824
str.comp.62a82.cont.elli.dar	.9954	99.81	100.00	14.4724	.6293	14.41797	2985.07	1.48535	3.56225
str.comp.62a90.cont.elli.dar	.9951	99.82	100.00	14.9079	.6388	14.84613	3005.13	1.49033	3.67987
str.comp.82a82bat.cont.elli.dar	.9920	99.87	100.00	20.5562	.7519	20.51243	2973.66	1.47869	3.66700
str.82.18q.elli.dar	.9888	99.90	100.00	26.6429	.8461	26.62612	3695.85	1.37670	4.65657
str.comp.62a82.18q.elli.dar	.9962	99.86	100.00	11.2747	.4606	11.24575	4370.62	1.47828	2.95385
str.comp.82a82bat.18q.elli.dar	.9939	99.88	100.00	15.3946	.5229	15.38002	4758.99	1.50539	3.20413

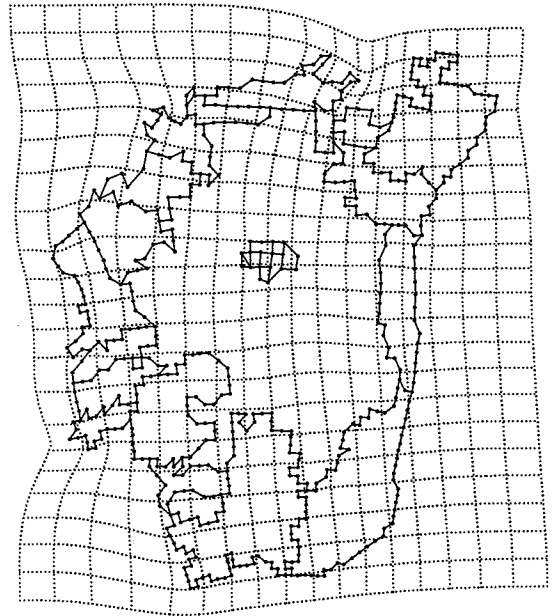


Figure 9a

Agglomération de Strasbourg. Densités résidentielles brutes - Comparaison diachronique 1962 et 1982



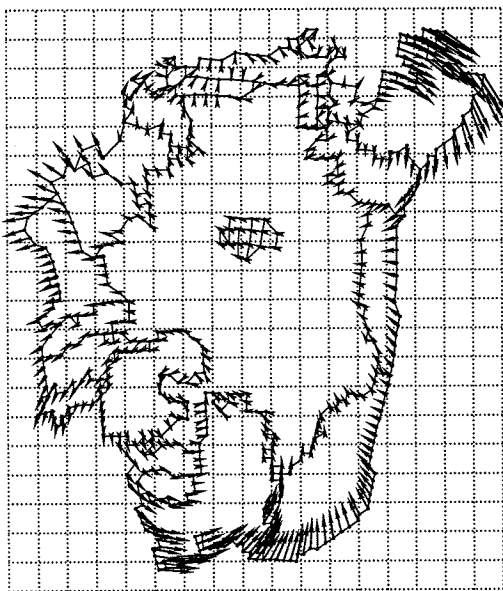
C. Cauvin, A.C. Bronner



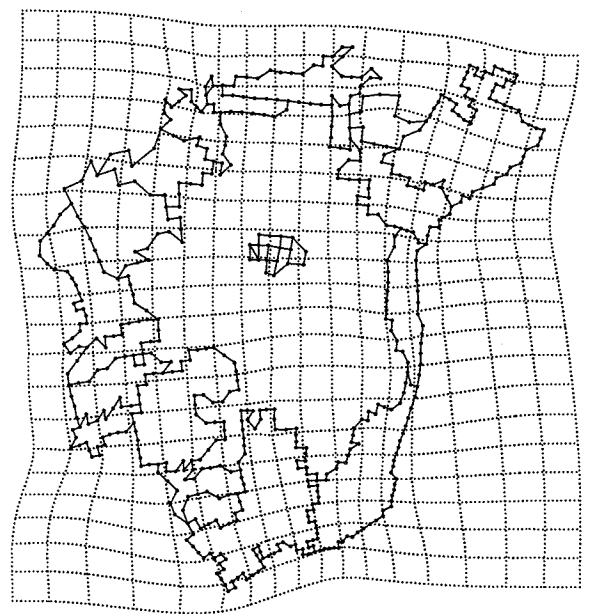
Strasbourg, 1996

Figure 9b

Agglomération de Strasbourg 1982 - Comparaison structurelle des densités résidentielles brutes et nettes



C. Cauvin, A.C. Bronner



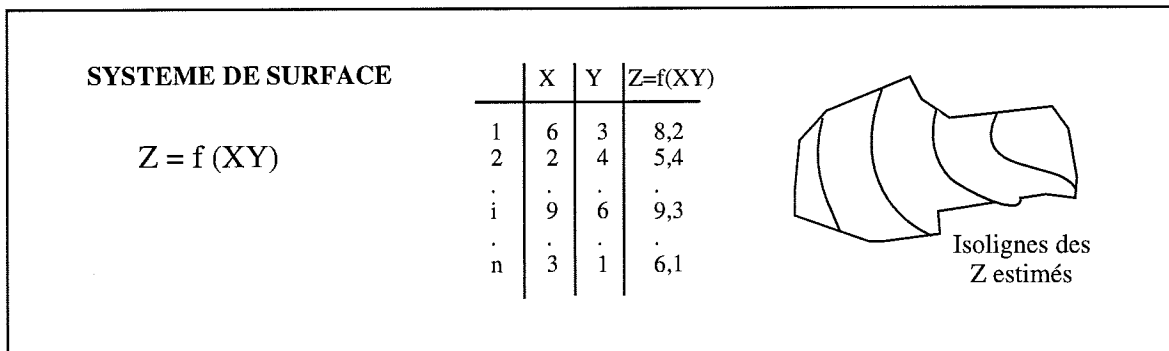
Strasbourg, 1996

### 3.3

## Méthodes de filtrage et surfaces densitaires

Nous avons précisé dans l'introduction du chapitre 3.2 que les transformations cartographiques pouvaient être décomposées en transformations cartographiques d'état et transformations cartographiques de position. Nous avons dans ce chapitre un exemple de chacun des deux types. Cependant, les transformations cartographiques d'état comprennent différents ensembles de procédés ; entre autres, les méthodes permettant de filtrer les différentes composantes d'un phénomène spatial selon des fonctions variables. On retrouve ainsi le système de correspondance dénommé "système de surface" par S. Rimbart en 1979 et que nous pouvons illustrer par la figure 1.

Figure 1  
Correspondance entre les [XY/Z] - Système de surface



C. Cauvin d'après S. Rimbart 1979

Strasbourg, 1994

Ce système exprime que les attributs Z sont une fonction mathématique, f, des localisations XY, soit  $Z = f(XY)$ . Il traduit le fait que le phénomène étudié est fondamentalement lié aux localisations : le support spatial n'est plus considéré comme secondaire, comme neutre, mais comme un élément intervenant dans la compréhension du phénomène, expliquant ce phénomène. Ce sont les localisations qui permettent de calculer les valeurs de la variable thématique. Il s'agit ainsi "d'expliquer" une variable thématique Z, considérée comme variable dépendante, par ses composantes géographiques, c'est-à-dire par les coordonnées de ses localisations XY. Sous cet aspect, ces modèles sont liés aux modèles de régression.

Mais comme ces méthodes permettent également de mettre en évidence les différentes tendances (générale, régionale ou locale) de la répartition géographique d'un phénomène spatial donné, ce deuxième aspect les rattache aux méthodes de filtrage.

Les formes les plus fréquentes de la fonction  $f$ , qui lie les  $Z$  aux  $XY$ , sont de deux types :

- le modèle polynomial, plus usuel, dont le degré du polynôme peut varier,
- le modèle harmonique (ou analyse spectrale) qui s'appuie sur la notion de fréquence.

Nous verrons dans un premier temps ce qu'apportent les modèles polynomiaux avant d'approfondir l'approche fréquentielle.

### ■ 3.3.1 Surfaces densitaires et surfaces de tendance

*Colette Cauvin*

L'utilisation des fonctions polynomiales conduit à l'obtention de ce que l'on appelle les surfaces de tendance. Ces dernières mettent en évidence les différentes composantes d'un phénomène spatial, ici le phénomène densitaire, en séparant la tendance générale, des variations plus locales. En s'appuyant sur l'ouvrage de H. Béguin (1979), la méthode des surfaces de tendance peut être brièvement décrite comme suit.

Les valeurs d'une variable  $Z$ , ici les densités urbaines, sont mesurées pour chaque lieu  $i$  (par exemple les centroïdes des îlots ou des quartiers d'une ville). Au-dessus de chaque lieu, on peut représenter un point comme le sommet d'un "pic" dont la hauteur correspond à la valeur  $Z_i$  en ce lieu. La réunion de tous ces points par une surface continue représente la variation spatiale de  $Z$ . C'est cette surface "observée" que l'on va chercher à ajuster par une surface "théorique", la plus proche possible, au sens des moindres carrés. Cette surface théorique peut être un plan, une surface quadratique, ou cubique ou ... Le modèle est donc une régression multiple polynomiale de degré variable, avec deux variables explicatives - les coordonnées  $X$  et  $Y$  -.

Cette méthode comprend donc plusieurs étapes :

- ⇨ des ajustements successifs selon le principe des moindres carrés par des polynômes de degrés de plus en plus élevés ;
- ⇨ le calcul des coefficients de l'équation caractéristique de l'ajustement pour chaque degré des polynômes. Cette équation décrit la surface "théorique" (ou estimée) correspondante.

Equation d'un polynôme du premier degré :

$$Z = aX + bY + c$$

Equations pour un polynôme de degré supérieur à 1 :

- ajustement quadratique :

$$Z = aX^2 + bX + cXY + dY + eY^2 + f$$

- ajustement cubique :

$$Z = aX^3 + bX^2Y + cX^2 + dXY + eX + fY + gY^2 + hXY^2 + iY^3 + j$$

- .....

- ⇨ des mesures de la qualité et de la validité de chaque ajustement à l'aide du coefficient de corrélation  $R$  et surtout du test  $F$  de Fischer-Snédecor adapté.

Comme pour les régressions multiples, trois types de cartes peuvent être établis - carte des données observées  $Z$ , cartes des valeurs estimées et cartes des résidus. Mais ici, deux différences importantes apparaissent : au niveau du nombre de cartes à construire, et au niveau du mode de représentation. En effet, d'une part, pour une carte des données observées, on construit autant de cartes de données estimées et de cartes de résidus que d'ajustements retenus (c'est-à-dire reconnus comme acceptables sur le plan statistique).

D'autre part, le mode de représentation est imposé : les cartes à produire sont toujours des cartes isoplèthes, car elles expriment une tendance spatiale avec des variables quantitatives. De ce fait, il est évident que la carte des données observées doit, elle aussi, être construite selon ce

---

procédé, si l'on veut pouvoir la comparer aisément aux cartes des données estimées et aux cartes des résidus.

Cette méthode a été appliquée aux données de l'agglomération strasbourgeoise et les résultats sont consignés dans trois tableaux (figures 2, 3 et 4), mais aucune carte n'est présentée ici. Obtenues avec un logiciel "ancien", il n'a pas été possible, pour l'instant, de "récupérer" les cartes numériques pour disposer d'un document "esthétique" ou seulement acceptable. Des tests sont en cours.

D'après ces tableaux, on constate que pour toutes les années, les polynômes du deuxième au quatrième degré sont toujours satisfaisants au regard du test F en ce qui concerne les densités résidentielles brutes. Il en est de même pour les densités calculées par rapport aux surfaces bâties. Par contre, les résultats liés au carroyage sont plus difficiles à interpréter et nécessiterait un examen approfondi.

Cette orientation reste donc à étudier de plus près, mais elle est largement complétée par l'analyse fréquentielle proposée par C. Schneider.

Figure 2  
Densité résidentielle brute

année	degré	Ez	Ez	variance expliquée	variance résiduelle	variance totale	coeff. dét. R2	coeff. corr. R	degré de liberté	F calculé	F théorique		conclusion	
											1%	5%	F calculé > au	F théorique ?
1962	1	76.30	25787.75	425002.91	450790.66	0.057	0.239	2 / 71	2.154	4.98	3.15	non	non	
	2	62.46	166009.50	284781.16	450790.66	0.368	0.607	5 / 68	7.928	3.34	2.37	oui	oui	
	3	58.36	202123.38	248667.28	450790.66	0.448	0.670	9 / 64	5.780	2.72	2.04	oui	oui	
	4	58.28	202853.05	247937.61	450790.66	0.450	0.671	14 / 59	3.448	2.35	1.84	oui	oui	
	5	58.35	202256.67	248533.98	450790.65	0.449	0.670	20 / 53	2.157	2.20	1.75	non	oui	
	6	58.35	202256.67	248533.98	450790.65	0.449	0.670	27 / 46	1.386	2.29	1.79	non	non	
1968	1	68.92	23089.71	345780.78	369870.49	0.062	0.250	2 / 71	2.364	4.98	3.15	non	non	
	2	57.06	132202.11	237668.39	369870.50	0.357	0.598	5 / 68	7.565	3.34	2.37	oui	oui	
	3	54.65	151863.59	218006.91	369870.50	0.411	0.641	9 / 64	4.954	2.72	2.04	oui	oui	
	4	54.64	151960.11	217910.39	369870.50	0.411	0.641	14 / 59	2.939	2.35	1.84	oui	oui	
	5	54.69	151510.59	218359.91	369870.50	0.410	0.640	20 / 53	1.839	2.20	1.75	non	oui	
	6	54.69	151510.59	218359.91	369870.50	0.410	0.640	27 / 46	1.182	2.29	1.79	non	non	
1975	1	59.00	8733.92	254109.17	262843.09	0.033	0.182	2 / 71	1.220	4.98	3.15	non	non	
	2	48.90	87972.72	174870.38	262843.10	0.335	0.579	5 / 68	6.842	3.34	2.37	oui	oui	
	3	47.85	95678.53	167164.56	262843.09	0.364	0.603	9 / 64	4.070	2.72	2.04	oui	oui	
	4	47.76	96301.61	166541.48	262843.09	0.366	0.605	14 / 59	2.437	2.35	1.84	oui	oui	
	5	47.75	96408.09	166435.00	262843.09	0.367	0.606	20 / 53	1.535	2.20	1.75	non	non	
	6	47.75	96408.09	166435.00	262843.09	0.367	0.606	27 / 46	0.987	2.29	1.79	non	non	
1982	1	53.34	9871.61	207701.06	217572.67	0.045	0.213	2 / 71	1.687	4.98	3.15	non	non	
	2	45.32	67670.17	149902.50	217572.67	0.311	0.558	5 / 68	6.139	3.34	2.37	oui	oui	
	3	43.93	76707.30	140865.38	217572.68	0.353	0.594	9 / 64	3.872	2.72	2.04	oui	oui	
	4	43.93	76699.92	140872.75	217572.67	0.353	0.594	14 / 59	2.295	2.35	1.84	oui	oui	
	5	43.93	76528.05	141044.62	217572.67	0.352	0.593	20 / 53	1.438	2.20	1.75	non	non	
	6	43.96	76528.04	141044.62	217572.66	0.352	0.593	27 / 46	0.924	2.29	1.79	non	non	
1990	1	43.62	8276.08	138927.45	147203.53	0.056	0.237	2 / 71	2.115	4.98	3.15	non	non	
	2	35.70	54149.59	98053.95	147203.53	0.368	0.607	5 / 68	7.914	3.34	2.37	oui	oui	
	3	33.94	63118.16	84085.37	147203.53	0.429	0.655	9 / 64	5.338	2.72	2.04	oui	oui	
	4	33.85	63571.87	83631.66	147203.53	0.432	0.657	14 / 59	3.203	2.35	1.84	oui	oui	
	5	33.86	63505.39	83698.14	147203.53	0.431	0.657	20 / 53	2.011	2.20	1.75	non	non	
	6	33.86	63505.39	83698.41	147203.80	0.431	0.657	27 / 46	1.293	2.29	1.79	non	non	

Figure 3  
Densité résidentielle nette

SURFACE DE TENDANCE - RESULTATS DENSITE BATIE (hb/surf batie pixel)													
année	degré	Ez	Ez	variance expliquée	variance résiduelle	variance totale	coeff. dét. R2	coeff. corr R	degré de liberté	F calculé	F théorique		conclusion
											1%	5%	
1982	1	57.50	6955.08	241344.55	248299.63	0.028	0.167	2 / 71	1.023	4.98	3.15	non	
	2	51.89	51777.39	196522.23	248299.62	0.209	0.457	5 / 68	3.583	3.34	2.37	oui	
	3	50.58	61539.61	186760.02	248299.63	0.248	0.498	9 / 64	2.343	2.72	2.04	non	
	4	50.43	62620.48	185679.14	248299.62	0.252	0.502	14 / 59	1.421	2.35	1.84	non	
	5	50.41	62797.41	185502.22	248299.63	0.253	0.503	20 / 53	0.897	2.20	1.75	non	
	6	50.41	62797.41	185502.22	248299.63	0.253	0.503	27 / 46	0.577	2.29	1.79	non	
1990vap	1	54.04	9821.81	213220.61	223042.42	0.044	0.210	2 / 71	1.635	4.98	3.15	non	
	2	48.41	51940.28	171102.14	223042.42	0.233	0.483	5 / 68	4.128	3.34	2.37	oui	
	3	45.82	69798.52	153243.91	223042.43	0.313	0.559	9 / 64	3.239	2.72	2.04	oui	
	4	45.36	72852.08	150190.34	223042.42	0.327	0.572	14 / 59	2.044	2.35	1.84	non	
	5	45.24	73638.66	149403.77	223042.43	0.330	0.575	20 / 53	1.306	2.20	1.75	non	
	6	45.24	73638.66	149403.77	223042.43	0.330	0.575	27 / 46	0.840	2.29	1.79	non	
1990bh	1	51.21	8798.50	191459.44	200257.94	0.044	0.210	2 / 71	1.631	4.98	3.15	non	
	2	44.14	58017.19	142240.75	200257.94	0.290	0.538	5 / 68	5.547	3.34	2.37	oui	
	3	42.03	71312.38	128945.56	200257.94	0.356	0.597	9 / 64	3.933	2.72	2.04	oui	
	4	41.75	73006.64	127251.30	200257.94	0.365	0.604	14 / 59	2.418	2.35	1.84	oui	
	5	41.71	73284.93	126973.01	200257.94	0.366	0.605	20 / 53	1.529	2.20	1.75	non	
	6	41.71	73284.93	126973.01	200257.94	0.366	0.605	27 / 46	0.983	2.29	1.79	non	
19903c	1	55.47	9483.86	224580.38	234064.24	0.041	0.201	2 / 71	1.499	4.98	3.15	non	
	2	47.29	70784.09	163280.14	234064.23	0.302	0.550	5 / 68	5.896	3.34	2.37	oui	
	3	44.68	88309.23	145755.00	234064.23	0.377	0.614	9 / 64	4.308	2.72	2.04	oui	
	4	44.29	90857.44	143206.80	234064.24	0.388	0.623	14 / 59	2.674	2.35	1.84	oui	
	5	44.21	91374.33	142689.91	234064.24	0.390	0.625	20 / 53	1.697	2.20	1.75	non	
	6	44.21	91374.33	142689.91	234064.24	0.390	0.625	27 / 46	1.091	2.29	1.79	non	

Figure 4  
Densité résidentielle nette

SURFACE DE TENDANCE - RESULTATS DENSITE BATIE 1982 - CARROYAGE 500 (hb/surf batie pixel)													
année 1982	degré	Ez Ez	variance expliquée	variance résiduelle	variance totale	coefficient de détermination R <sup>2</sup>	coefficient de corrélation R	degré de liberté	F calculé	F théorique		conclusion	
										1%	5%	F calculé > au	F théorique ?
vap/vap	1	29.08	53348.56	516741.06	570089.62	0.094	0.306	2 / 71	3.665	4.98	3.15	non	oui
	2	24.48	203936.09	366153.53	570089.62	0.358	0.598	5 / 68	7.575	3.34	2.37	oui	oui
	3	24.03	217184.50	352905.12	570089.62	0.381	0.617	9 / 64	4.376	2.72	2.04	oui	oui
	4	23.84	219952.88	350136.75	570089.63	0.386	0.621	14 / 59	2.647	2.35	1.84	oui	oui
	5	23.94	219952.88	350136.75	570089.63	0.386	0.621	20 / 53	1.665	2.20	1.75	non	non
	6	23.84	219952.88	350136.75	570089.63	0.386	0.621	27 / 46	1.070	2.29	1.79	non	non
bh/bh	1	39.20	154596.25	938708.38	1093304.63	0.141	0.376	2 / 71	5.847	4.98	3.15	oui	oui
	2	32.67	441200.25	652104.38	1093304.63	0.404	0.635	5 / 68	9.201	3.34	2.37	oui	oui
	3	32.34	454374.88	638929.75	1093304.63	0.416	0.645	9 / 64	5.057	2.72	2.04	oui	oui
	4	32.27	457221.69	636082.94	1093304.63	0.418	0.647	14 / 59	3.029	2.35	1.84	oui	oui
	5	32.27	457221.69	636082.94	1093304.63	0.418	0.647	20 / 53	1.905	2.20	1.75	non	non
	6	32.27	457221.69	636082.94	1093304.63	0.418	0.647	27 / 46	1.225	2.29	1.79	non	non
3c/bh	1	40.68	135983.81	1011160.10	1147143.91	0.119	0.344	2 / 71	4.774	4.98	3.15	non	oui
	2	34.53	418757.06	728386.81	1147143.87	0.385	0.604	5 / 68	7.819	3.34	2.37	oui	oui
	3	34.05	438589.00	708554.88	1147143.88	0.382	0.618	9 / 64	4.402	2.72	2.04	oui	oui
	4	33.96	442675.00	704468.88	1147143.88	0.386	0.621	14 / 59	2.648	2.35	1.84	oui	oui
	5	33.96	442675.00	704468.88	1147143.88	0.386	0.621	20 / 53	1.665	2.20	1.75	non	non
	6	33.96	442675.00	704468.88	1147143.88	0.386	0.621	27 / 46	1.071	2.29	1.79	non	non
bh/vap	1	31.53	53580.25	607521.69	661101.94	0.081	0.285	2 / 71	3.131	4.98	3.15	non	non
	2	26.53	231189.38	429912.56	661101.94	0.350	0.591	5 / 68	7.314	3.34	2.37	oui	oui
	3	25.93	250299.31	410802.62	661101.93	0.379	0.615	9 / 64	4.333	2.72	2.04	oui	oui
	4	25.80	254402.12	406699.81	661101.93	0.385	0.620	14 / 59	2.636	2.35	1.84	oui	oui
	5	25.80	254402.12	406699.81	661101.93	0.385	0.620	20 / 53	1.658	2.20	1.75	non	non
	6	25.80	254402.12	406699.81	661101.93	0.385	0.620	27 / 46	1.066	2.29	1.79	non	non
3c/vap	1	32.85	50630.44	659294.75	709925.19	0.071	0.267	2 / 71	2.726	4.98	3.15	non	non
	2	28.05	229083.94	480841.25	709925.19	0.323	0.568	5 / 68	6.479	3.34	2.37	oui	oui
	3	27.43	250189.53	459735.66	709925.19	0.352	0.594	9 / 64	3.870	2.72	2.04	oui	oui
	4	27.29	254725.16	455200.03	709925.19	0.359	0.599	14 / 59	2.358	2.35	1.84	oui	oui
	5	27.29	254725.16	455200.03	709925.19	0.359	0.599	20 / 53	1.483	2.20	1.75	non	non
	6	27.29	254725.16	455200.03	709925.19	0.359	0.599	27 / 46	0.953	2.29	1.79	non	non
vap/bh	1	401.76	347240.00	98620808	98968048	0.004	0.059	2 / 71	0.125	4.98	3.15	non	non
	2	401.64	403128.00	98564920	98968048	0.004	0.064	5 / 68	0.056	3.34	2.37	non	non
	3	398.80	1793376.00	97174672	98968048	0.018	0.135	9 / 64	0.131	2.72	2.04	non	non
	4	398.25	2061296.00	96906752	98968048	0.021	0.144	14 / 59	0.090	2.35	1.84	non	non
	5	398.16	2104176.00	96863872	98968048	0.021	0.146	20 / 53	0.058	2.20	1.75	non	non
	6	398.16	2104176.00	96863872	98968048	0.021	0.146	27 / 46	0.037	2.29	1.79	non	non
ilo/vap	1	36.71	48386.75	823356.44	871743.19	0.056	0.236	2 / 71	2.086	4.98	3.15	non	non
	2	32.92	209524.75	662218.44	871743.19	0.240	0.490	5 / 68	4.303	3.34	2.37	oui	oui
	3	32.43	229243.50	642499.69	871743.19	0.263	0.513	9 / 64	2.537	2.72	2.04	non	non
	4	32.33	233279.44	638463.75	871743.19	0.268	0.517	14 / 59	1.540	2.35	1.84	non	non
	5	32.33	233279.44	638463.75	871743.19	0.268	0.517	20 / 53	0.968	2.20	1.75	non	non
	6	32.33	233279.44	638463.75	871743.19	0.268	0.517	27 / 46	0.622	2.29	1.79	non	non

### ■ 3.3.2 Analyse fréquentielle des surfaces densitaires

Ce chapitre correspond à la présentation d'une méthode développée par C. Schneider et son application à l'agglomération strasbourgeoise. Il comprend deux volets, le premier exposant les différents éléments de la démarche proposée accompagnés des principaux résultats, le second reprenant un article expliquant plus spécifiquement la première étape du procédé.

#### ▲ 3.3.2.1 Représentation spatio-fréquentielle d'une surface de densités urbaines

Charles Schneider

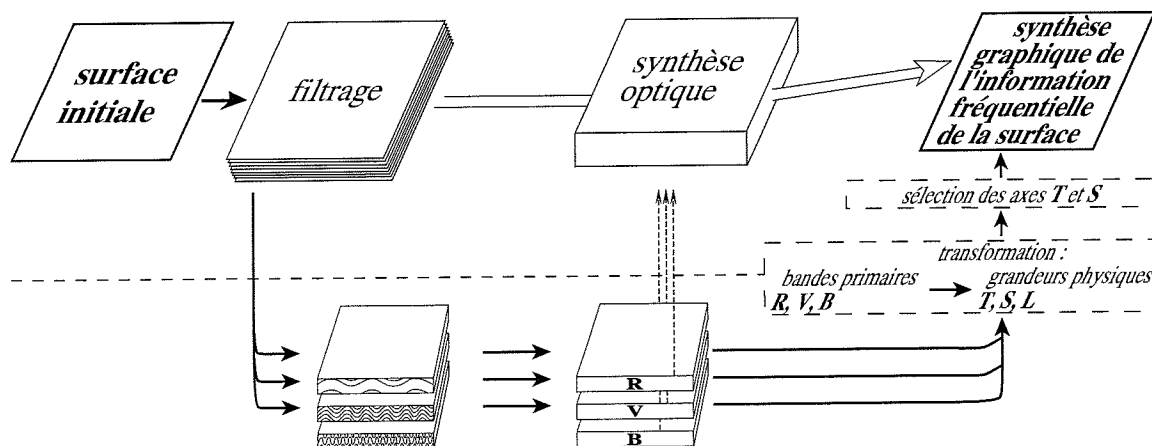
##### □ 3.3.2.1.1 Objectifs

La représentation spatio-fréquentielle est un outil d'analyse visuelle de phénomènes géographiques sous l'angle des forces qui organisent les surfaces.

Hypothèse de la transformation : une surface complexe résulte de la superposition de forces multiples et de l'interaction d'objets de différents niveaux. La représentation graphique synthétique des composantes spatio-fréquentielles est un moyen de retrouver l'agencement des niveaux de forces selon un critère d'échelle.

La structuration est effectuée en deux étapes (figure 1) : d'abord une décomposition par diffraction (transformations de Fourier) de l'ensemble des fréquences spatiales virtuelles de la surface ; l'information fréquentielle est ensuite isolée et recomposée graphiquement (procédé IRISOS). La transformation s'applique à tout phénomène spatialisé de type surface 3D, physique ou théorique.

Figure 1  
Organigramme de la méthode IRISOS



On obtient ainsi un graphe d'interaction complémentaire de la forme ou un "diagramme des forces", à l'instar de ceux évoqués par d'Arcy Thompson, où apparaissent des domaines de différentes échelles régis par des forces de différente nature. La transformation fréquentielle fournit des résultats non accessibles par l'observation directe de la surface initiale, en particulier pour les formes complexes ; la structure fréquentielle révèle notamment des composantes d'échelle intermédiaire peu visibles sur l'image initiale car masquées par les tendances fondamentales et les discontinuités majeures de la surface. L'autre aspect important est le caractère hiérarchisé de la représentation, interprétable en termes fonctionnels.

La démarche est d'abord globale et phénoménologique avant d'être explicative. Pour obtenir un graphe d'interaction de forces cohérent et acceptable on se place délibérément dans un système de propagation de champs de forces sans préjuger des causes premières des forces en action. L'interprétation thématique de la description spatio-fréquentielle est effectuée dans un deuxième temps : elle permet de réexaminer les principes d'organisation de la structure décelée, et éventuellement de faire évoluer sa compréhension à la 'lumière' des hypothèses et concepts qui sous-tendent le procédé de structuration.

#### □ 3.3.2.1.2 L'image spatio-fréquentielle des densités

Représenter la structure spatio-fréquentielle d'une surface des densités c'est en quelque sorte reconstituer le modèle graphique des forces de densification, et passer d'une surface complexe de données quantitatives - les densités - à des unités géographiques qualitatives, interdépendantes et structurées. La relation entre les densités et la structure urbaine avec ses composantes foncières, sociales et démographiques, avait déjà été soulignée par les analyses de H. Nonn (1965) : la représentation spatio-fréquentielle des densités est un moyen rapide, graphique et néanmoins rigoureux de retrouver les traits essentiels de la structure urbaine.

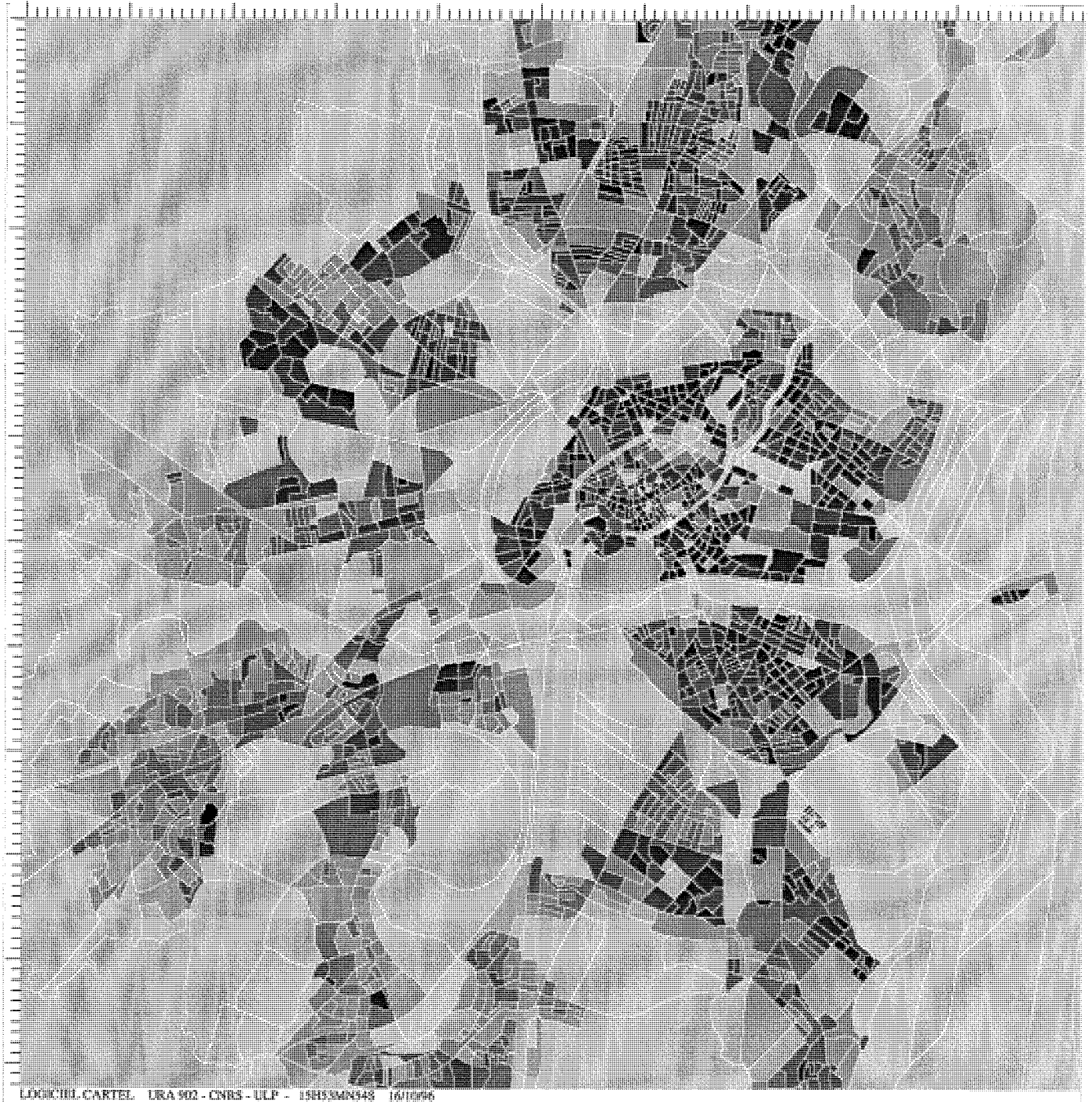
Dans le cadre du programme "densités urbaines" du PIR Villes nous avons effectué des traitements sur des surfaces de densités de l'agglomération strasbourgeoise. Une des données traitées a été la population par îlot du recensement de 1990, ventilée par pixels de un are (pour une raison de codage la variable utilisée pour le traitement est la densité par 50 ares). La transformation fréquentielle est appliquée à cette surface définie en x,y,z (figure 2). Taille de la matrice traitée : 1024 lignes x 1024 colonnes. Taille de l'extrait "Centre" : 240 x 380.

#### □ 3.3.2.1.3 Codage, lecture et signification

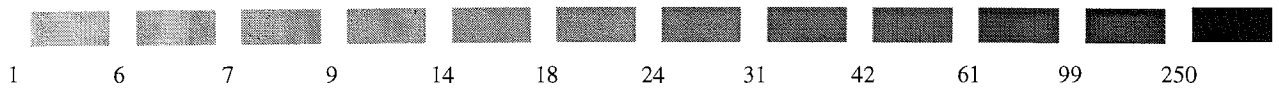
Ce sont les tonalités du spectre des couleurs, du rouge pour les basses fréquences au bleu pour les hautes fréquences, qui représentent la fréquence spatiale dominante en chaque point de l'image. Le degré de saturation/désaturation indique le niveau de singularité ou de mélange des composantes ; les couleurs désaturées, grisâtres à grises, correspondent à des mélanges de fréquences. L'information transmise par les couleurs/fréquences est appréhendée à deux niveaux.

Typologie spatio-fréquentielle des objets urbains : les propriétés différentielles des couleurs permettent d'identifier dans la surface complexe *une structure qualitative* formée d'objets de nature différente. De quoi la surface est-elle composée ? Quelle est la structure urbaine vue à travers le spectre des fréquences spatiales ? L'agencement des taches de couleurs saturées en termes de structure globale, groupements, superpositions et texture, répond à cette question.

Figure 2  
Strasbourg - Densités de population par îlot



LOGICIEL CARTEL. LIRA 902 - CNRS - ULP - 1983/MN948 16/10/96



Le second niveau d'information est celui de l'ordre spectral des taches colorées : l'ordre physique des couleurs traduit *une hiérarchie spatiale* d'agencement des taches. Cette hiérarchie spatio-fréquentielle découle directement des hypothèses de la transformation - propagation de forces avec minimisation de l'énergie, superposition de champs de forces- et d'elles seulement. L'ordre des sous-structures est de type :

- (1) *fondamentale* : basses fréquences qui indiquent l'aire d'extension du principe organisateur ou le noyau de la structure.
- (2) *complémentaire* : moyennes fréquences qui soit prolongent, soit s'opposent aux composantes fondamentales.
- (3) *additionnelles* : hautes fréquences qui signalent des inclusions ou additions d'éléments de petite longueur d'onde, en contraste avec leur contexte et qui peuvent être interprétées comme des indicateurs de variation ou d'écart par rapport aux tendances principales.
- (4) *accessoires* : très hautes fréquences et artefacts dus le plus souvent aux fortes discontinuités provenant des procédés d'observation et de saisie des données.

Ce regroupement en quelques "composantes principales" est guidé par la perception visuelle des couleurs, mais l'information fréquentielle peut être détaillée selon un plus grand nombre de niveaux. Au stade de l'interprétation c'est l'ordre qui est essentiel, plutôt que l'étiquette des niveaux fréquentiels singuliers.

#### □ 3.3.2.1.4 Interprétation

Comme indiqué ci-dessus il s'agit d'examiner les traits essentiels de la structure spatio-fréquentielle des densités en la mettant en relation avec des caractéristiques démographiques, socio-économiques, ou foncières déjà connues, puis d'interpréter la hiérarchie des unités de densification. La représentation fréquentielle, avec sa hiérarchie d'échelles simulant des flux de personnes, d'informations et de biens, assure le *rôle d'intermédiaire* assigné aux modèles graphiques par H. Reymond (1968) : ici elle permet de passer de la surface complexe des densités à une structure fonctionnelle hiérarchisée, et d'aborder ainsi les questions relatives aux principes moteurs, à la genèse et à la dynamique de la forme examinée.

L'examen de l'image fréquentielle de l'ensemble de l'agglomération strasbourgeoise (figure 3) fait apparaître des modes d'organisation très divers suivant les différentes parties de la ville. Plutôt que d'en faire une description exhaustive nous présentons ici quelques éléments sur l'organisation de la partie centrale de l'agglomération et sur la hiérarchie de ses unités fonctionnelles (Figure 4) :

- (1) Le noyau fonctionnel : les basses fréquences (en rouge et orangé) soulignent un noyau central relativement étendu par rapport à la surface totale du centre urbain ; il recouvre un espace qui regroupe de nombreuses activités, essentiellement administratives, commerciales, universitaires et culturelles ; il correspond à un ensemble de densités de valeur moyenne réparties dans les interstices des espaces fonctionnels. Ce noyau fonctionnel est décalé vers l'Est par rapport au centre historique, à cheval sur la ville ancienne et la ville moderne.
- (2) Les aires de concentration de la population du centre : les fréquences moyennes (en jaune, vert et cyan) se répartissent sur un ensemble de quartiers à dominante résidentielle qui entourent le noyau central ; les densités y sont globalement élevées bien que recouvrant des réalités foncières et socio-économiques diverses ; cet ensemble est doublement complémentaire du noyau : qualitativement en accolant au noyau central une composante résidentielle significative, et quantitativement en donnant au centre ville sa masse critique.

- (3) Inclusions d'îlots disséminés de très forte densité : les hautes fréquences (en bleu) signalent un troisième groupe d'objets constitutif du centre ville. Des îlots ou petits groupes d'îlots de très forte densité, de type socio-économique très variable, sont éparpillés sans ordre net dans le noyau central ou à sa proximité. Ces inclusions multiples représentent l'un des éléments de diversité de la structure du centre.
- (4) Pour des îlots situés aux extrémités ultimes de la surface des densités la décomposition de Fourier engendre des hautes fréquences non significatives.

#### □ 3.3.2.1.5. De la structure aux principes organisateurs

L'interprétation géographique est fondée sur les principes généraux de la transformation, mais la confrontation approfondie avec les analyses et modèles de géographie urbaine reste à effectuer.

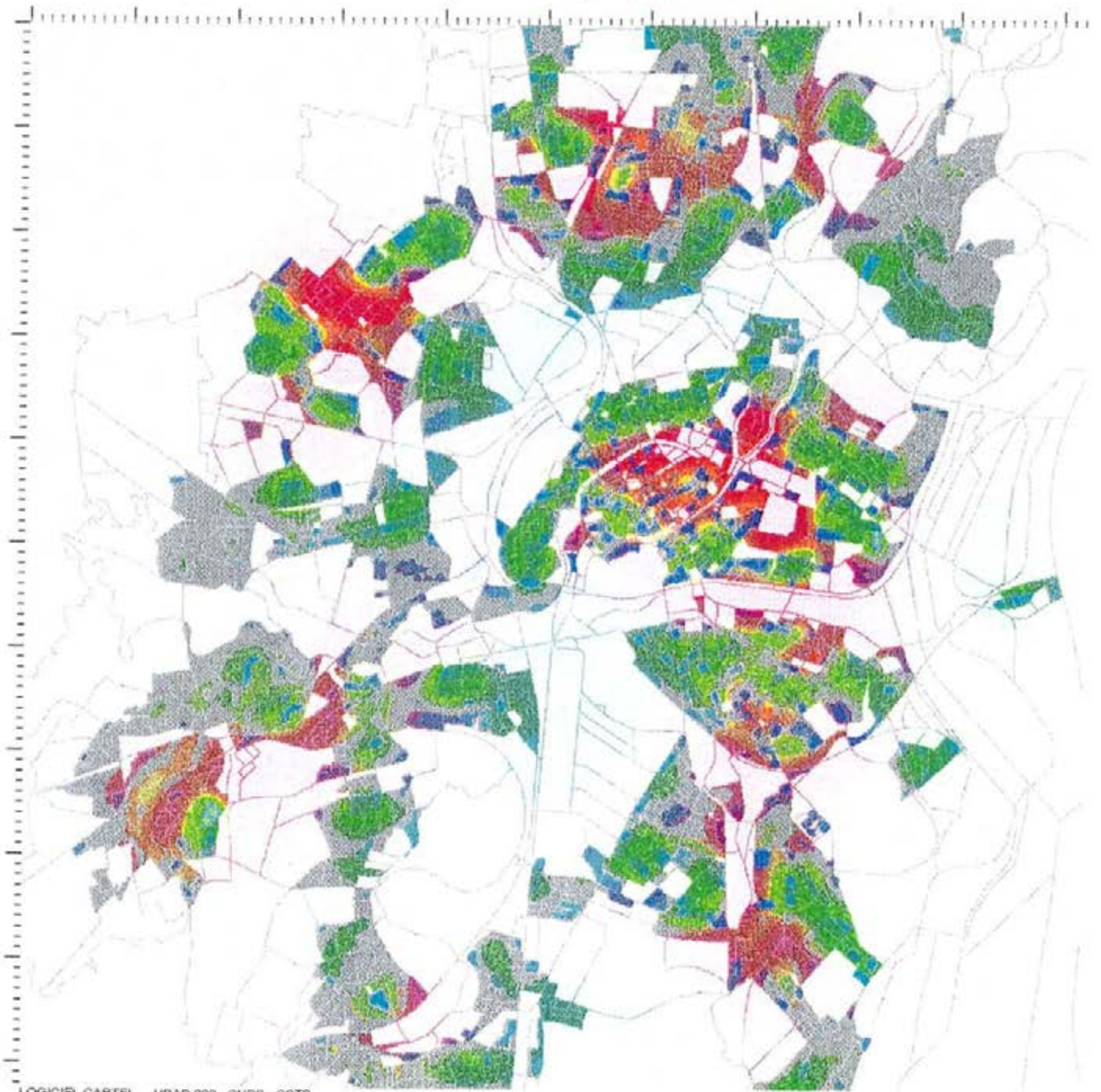
Selon la structure spatio-fréquentielle, la composante prépondérante du centre de Strasbourg est la composante fonctionnelle ; viennent ensuite la composante résidentielle et son aspect massif, puis une composante de diversification ou de variété qualitative. L'entité "centre ville" résulte de l'addition des trois et des principes d'urbanisation qui y sont associés.

D'après ce schéma d'organisation du centre urbain on constate que le rôle de la composante gravitaire est ramenée à une notion de minima ou de seuil critique alors que ce sont les aspects fonctionnels, et de façon encore plus précise la diversité fonctionnelle, qui semblent en être les principes déterminants. La structure fréquentielle des densités indiquerait ainsi que c'est d'abord le potentiel d'interactions multiples et simultanées qui "feraient" le centre.

On ne peut pas négliger le fait qu'un outil d'analyse privilégie sa logique propre : celle de la minimisation de l'énergie et de la gravité quand il se fonde sur la mesure des quantités, celle de la diversité qualitative et des interactions quand l'outil est fondé sur la séparation des variétés et des multiplicités de flux superposés. La représentation fréquentielle est un outil d'analyse graphique mettant en valeur le second point de vue.

Si cette méthode comprend différentes étapes qui permettent de faire apparaître des structures inhabituelles, il est évident que chaque stade mérite un approfondissement que nous avons tenté pour la première partie concernant l'analyse spectrale.

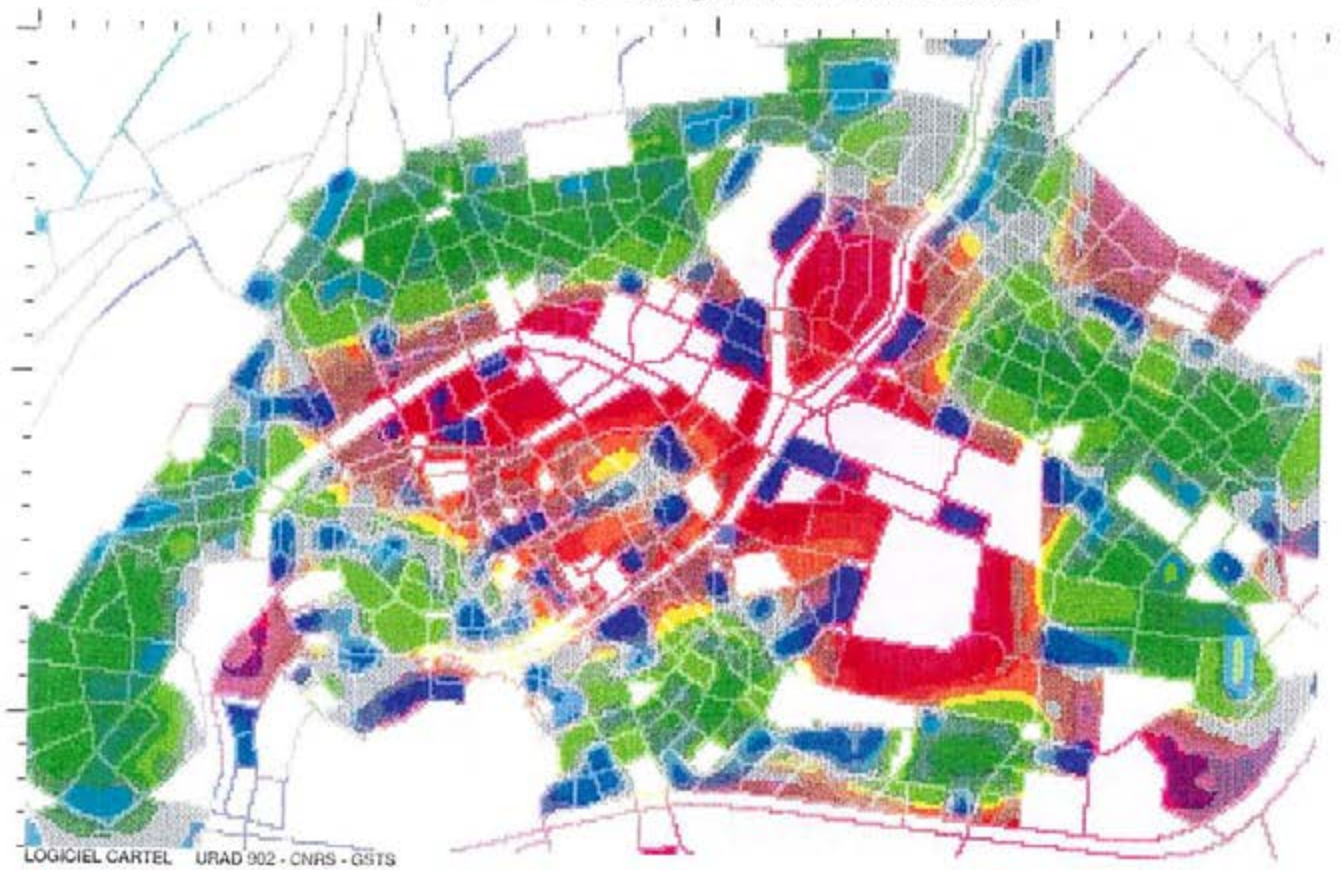
Figure 3  
Strasbourg - Structure spatio-fréquentielle



LOGICIEL CARTEL URAD 902 - CNRS - GSTS  
C. Schneider

Strasbourg, 1997

Figure 4  
Strasbourg - Structure spatio-fréquentielle de l'extrait "centre"



LOGICIEL CARTEL URAD 902 - CNRS - G5TS

C. Schneider

Strasbourg, 1997

▲ 3.3.2.2 *Filtrage spatial et densités intra-urbaines.  
Le cas de l'agglomération strasbourgeoise*<sup>8</sup>

C. Cauvin, H. Reymond, Charles Schneider

Les densités urbaines ont fait l'objet de nombreux écrits, de multiples propositions de modèles descriptifs ou explicatifs, et de diverses représentations cartographiques qui émaillent les atlas ou les ouvrages sur la ville ; mais, toujours, il s'agit d'exprimer, même à partir de constructions sophistiquées, ce que l'on constate, ce que l'on voit. Qu'apportent en fait ces cartes ? Si l'on regarde une représentation choroplèthe<sup>9</sup> des densités résidentielles par îlot<sup>10</sup> - ici de la ville de Strasbourg (figure 1) - on ne peut que constater l'importance des variations locales comme la difficulté à dégager des ensembles significatifs permettant aux chercheurs comme aux élus ou aux urbanistes de prendre des décisions quant au développement d'une ville. Des densités faibles côtoient des densités très élevées sans aucune transition, des continuités densitaires surgissent, s'arrêtant brusquement sur un creux ou un pic. Il semblerait donc que ces cartes bien connues, plus ou moins lourdes à produire, soient insuffisantes à la compréhension opérationnelle d'une ville.

Mais est-il possible d'aller au-delà de la simple observation visuelle des informations spatialisées ? Peut-on dépasser les formes apparentes, faire ressortir des structures spatiales sous-jacentes, non visibles directement, pour mieux comprendre la répartition des masses densitaires d'une ville, pour appréhender autrement son organisation ? C'est un essai partiel de réponse à ces diverses interrogations que nous présentons ici. Nous avons voulu aller au-delà du visible immédiat, pour séparer ce qui structure globalement une ville, qui ne peut être modifié sans travaux importants, sans perturber le fonctionnement d'ensemble, des éléments plus locaux, plus aisément transformables. Nous avons tenté de montrer qu'il existe différents "niveaux" urbains que l'aménageur, le géographe, ... ne peuvent étudier, disposer, organiser de manière identique, et *qu'il est possible de reconnaître ces niveaux* ; pour ce faire, nous avons décomposé l'observable, en nous appuyant sur un outil particulier de filtrage : l'analyse de Fourier.

□ 3.3.2.2.1 Une méthode de filtrage : l'analyse de Fourier

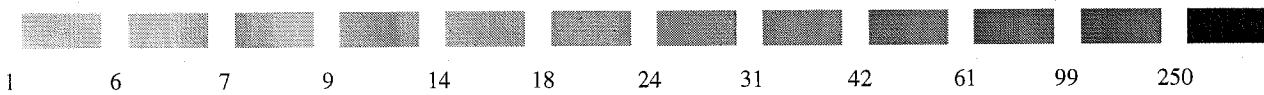
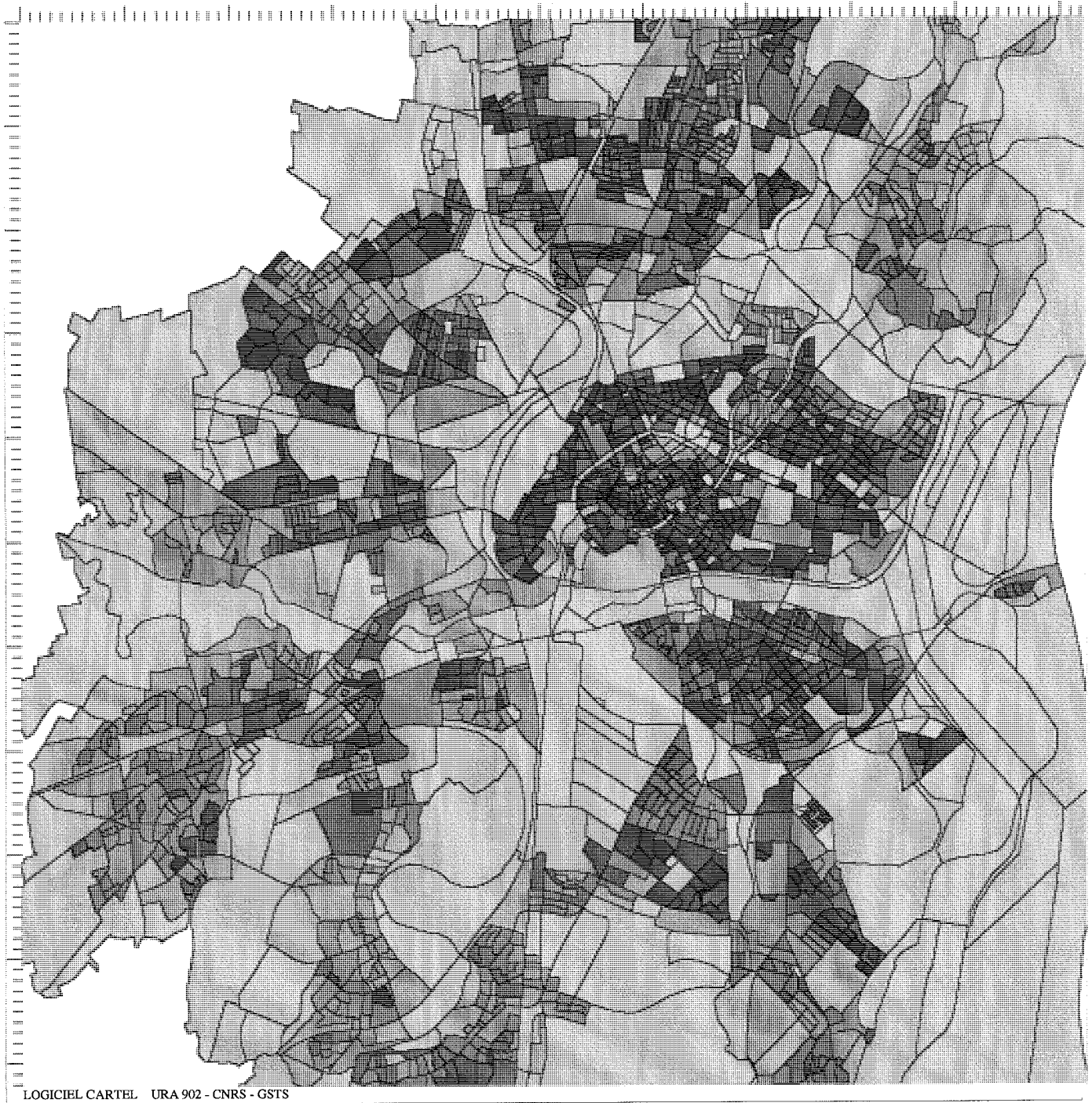
Cet outil permet d'identifier les niveaux où les processus géographiques urbains différents apparaissent et de séparer les variations spatiales en fonction des échelles correspondantes. Son principe peut être explicité à l'aide d'un schéma, celui d'un géologue, J.C. Davis (1973), qui s'appuie sur un exemple d'optique. Il montre comment la lumière blanche, uniformément perçue, en réalité onde complexe, peut être décomposée à l'aide d'un prisme en ses composantes élémentaires, images juxtaposées formant une suite ininterrompue de couleurs, la gamme des couleurs de l'arc-en-ciel, faisant ainsi apparaître ce que l'on appelle la composition spectrale - ou spectre.

<sup>8</sup> Ce texte correspond partiellement à un article publié en 1996 dans le *Courrier du CNRS*, n° 82.

<sup>9</sup> Carte où sont représentées les valeurs d'un phénomène donné, dans des unités spatiales surfaciques imposées (administratives, par exemple).

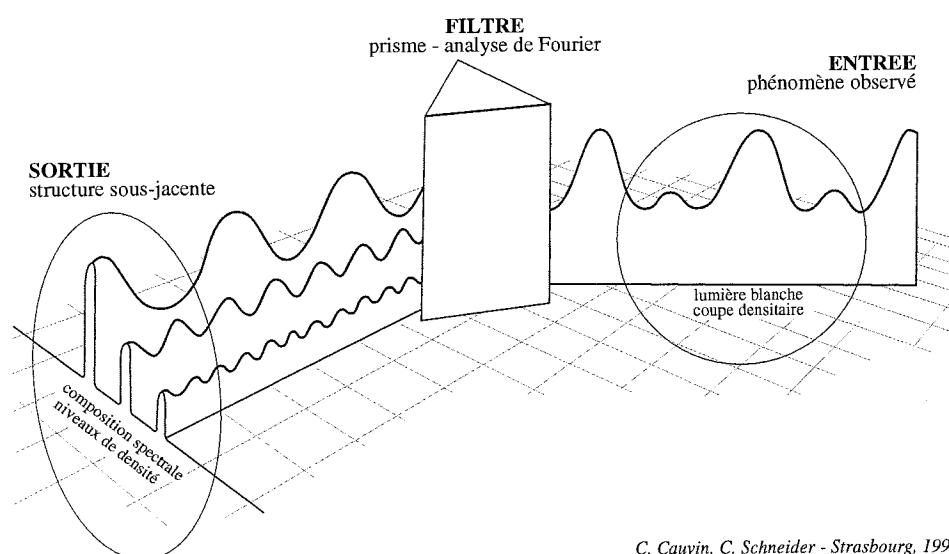
<sup>10</sup> La cartographie de cet article a été assurée par A.C. Bronner que nous remercions très sincèrement.

Figure 1  
Agglomération de Strasbourg 1990 - Densités de population par îlot



Ce schéma peut être transféré en géographie et, ici, plus particulièrement utilisé pour l'étude des densités urbaines, à condition de préciser les équivalences en fonction de ce phénomène. En suivant Davis, on considérera que la complexité voilée de la lumière blanche correspond à la complexité, voilée également, d'un phénomène spatial, telle la densité, où le rôle du prisme est tenu par l'analyse de Fourier qui le dissocie en plusieurs niveaux de répétition dissimulés à l'observation directe. Ainsi, à l'entrée de l'analyse de Fourier (prisme), on place la surface densitaire (lumière blanche) où l'on rencontre, côte à côte, des valeurs très inégales ; à la sortie, on trouve de nombreux niveaux (ondes) différents, correspondant chacun à un espacement et une densité maximale spécifiques (figure 2). Ainsi sont séparées, identifiées, les composantes qui provoquaient ces alternances de proximités densitaires inégales, irrégulières sur la carte choroplèthe.

Figure 2  
Prisme et analyse de Fourier (adapté de Davis, 1973)



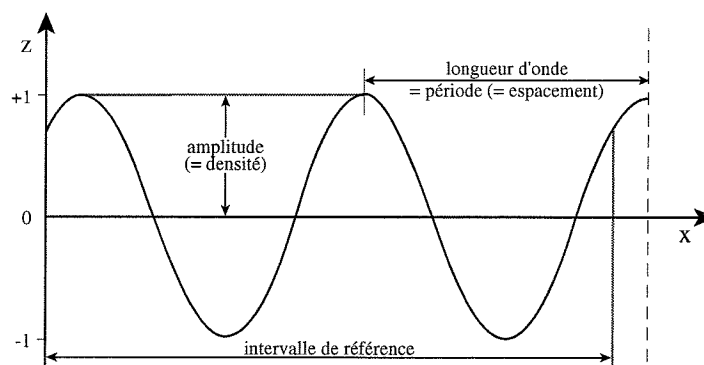
C. Cauvin, C. Schneider - Strasbourg, 1996

Pour mieux comprendre cette décomposition spectrale, il est utile d'en préciser le vocabulaire de base en se référant à une onde simple correspondant à une fonction périodique élémentaire<sup>11</sup> (figure 3). Trois éléments sont à prendre en considération pour comprendre l'interprétation des documents cartographiques qui vont suivre :

- les harmoniques qui caractérisent les niveaux reconnus par l'opération de filtrage ;
- l'amplitude qui exprime la valeur maximum du phénomène Z, la densité, pour une harmonique donnée ;
- la longueur d'onde associée qui traduit la distance, l'espacement, qui sépare deux valeurs identiques sur la courbe (coupe densitaire), ou sur la surface. La fréquence, inverse de la longueur d'onde, fournit le nombre de répétitions du phénomène, dans l'intervalle de référence.

<sup>11</sup> Rappelons qu'une fonction périodique est une fonction où le phénomène se reproduit, se répète régulièrement, soit dans le temps soit dans l'espace. La figure 3 ne présente qu'une dimension (le temps, un espace linéaire, ...) pour permettre une lecture plus simple des éléments à prendre en considération.

Figure 3  
Fonction périodique élémentaire pour une harmonique donnée



C. Cauvin, C. Schneider

Strasbourg, 1996

L'application de ce procédé de filtrage à l'étude des densités d'une ville - dans le cas présent, une partie de l'agglomération de Strasbourg - s'effectue à partir d'une carte choroplèthe par îlot (figure 4) ou plus exactement d'une image construite en répartissant<sup>12</sup> la population "îlot" dans des mailles régulières de 10 x 10 m. Afin de détecter des régularités et des structures spatiales, la surface est décomposée en un nombre important de niveaux que l'on regroupe en trois sous-ensembles, c'est-à-dire en trois sous-surfaces, correspondant à des longueurs d'ondes, donc des fréquences ordonnées - basses, moyennes, hautes -, c'est-à-dire trois bandes de répétitions spatiales. Qu'apportent ces trois images résultantes à la compréhension des densités ?

#### □ 3.3.2.2.2. De nouvelles images densitaires : une interprétation géographique

La description de ces trois images, dont le repérage est indiqué sur la figure 4, est facilitée par le fait qu'elles présentent à chaque fois un trait commun, un guide pour la lecture : le "fond" gris clair. Il correspond à des "bandes" d'amplitude faible, sorte de plan moyen, de "plan d'équilibre", interrompu par des masses de gris plus foncé dont la taille et la répétition varient d'une échelle à l'autre, allant d'ensembles compacts pour le premier niveau reconnu à de petits noyaux éparpillés pour le dernier<sup>13</sup>. Les amplitudes fortes (gris foncé) expriment, si elles sont positives, des *densités résidentielles* élevées, et, si elles sont négatives, des densités résidentielles quasi nulles, *en fait d'autres types de densité* (zones industrielles, infrastructures routières ou ferroviaires, ...). Une coupe de repérage, allant de Hausbergen au Nord-Ouest au port du Rhin à l'Est, permet de mieux visualiser l'onde "complexe" caractérisant chaque niveau.

<sup>12</sup> Répartition (ou ventilation) areale proportionnelle.

<sup>13</sup> Sur l'image, ici surface bidimensionnelle, les valeurs de contraste doivent s'interpréter comme la projection sur un plan zéro, plan d'équilibre (le gris clair), des amplitudes, positives ou négatives, des ondes complexes de basses, moyennes ou hautes fréquences.

Strasbourg 1990 - Carte de repérage



COMMUNE  
Quartiers  
Autres lieu

*La première image* (figure 5) - celle des basses fréquences caractérisée par une amplitude maximale de 77 h/ha - propose une vision des caractéristiques densitaires globales du milieu urbain qui expriment la répartition des grands ensembles d'utilisation du sol selon qu'ils sont résidentiels ou non. La décomposition de Fourier livre ainsi des compacités, avec leurs étendues, leur organisation faisant ressortir une image nouvelle de la ville qui correspond, en fait, à la connaissance géographique mal formulée, inconsciente, que l'on a de l'agglomération. La coupe correspondante montre des amplitudes positives, c'est-à-dire des densités résidentielles largement étalées au-dessus du fond gris clair, contrastant avec des amplitudes faibles et moins étendues du côté négatif, donc des densités basses ou, plus exactement, de zones n'ayant pas ou quasiment pas de population résidentielle. Elle souligne ainsi l'opposition entre les ensembles de HautePierre, du Centre Ville, de l'Esplanade et les secteurs de la Gare ou du port du Rhin. Ce profil rassemble bien, en les différenciant, les masses à densités élevées ou faibles de part et d'autre d'un plateau qui n'est caractéristique ni de l'un ni de l'autre : la ligne "zéro" du tracé linéaire, le plan "zéro" de la répartition surfacique (c'est-à-dire le fond gris clair). Sur cette image du niveau des basses fréquences, apparaît ainsi la charpente maîtresse de l'organisation du système urbain strasbourgeois, ceinture quasi continue, quasi circulaire, séparant les noyaux spatiaux durs fortement peuplés ; en forme de fer à cheval, elle correspond, dans la majorité des cas, à des zones non ou très peu résidentielles - ensemble des bâtis tertiaires consacrés aux sports, aux loisirs, aux expositions, grandes connections autoroutières, ferroviaires, portuaires - mais fondamentales quant au fonctionnement de l'agglomération.

Qu'apporte alors l'image des moyennes fréquences (amplitude maximale de 265 h/ha), une fois extraits les renseignements globaux du premier niveau (figure 6) ? Elle met en évidence les groupes homogènes en termes de densité, intermédiaires par leur taille entre le quartier et l'îlot. Au Nord-Ouest de la coupe, trois mailles de HautePierre ainsi que le Vieux Cronembourg ressortent, tandis que le CHU se distingue clairement comme un secteur non résidentiel. Quelques variations positives ou négatives alternent ensuite avec le marché Gare, la zone du faubourg de Pierre, puis le centre des C.C.P. pour aboutir à un contraste majeur entre l'ensemble "Jardin botanique-Faculté des Sciences" et la zone de la Cité Rotterdam. La complexité apparaît dans la variation des amplitudes, mais la longueur d'onde (donc l'espacement et la répétitivité) demeure moyenne. Ces fréquences intermédiaires permettent d'affiner la description de la ville, en confirmant l'absence d'implantation résidentielle dans les zones d'amplitude négative. Elles font apparaître des quartiers non pris en compte par les basses fréquences ; elles subdivisent les premières masses résidentielles étalées du premier niveau en une mosaïque plus complexe, plus détaillée et plus couvrante.

Enfin, la dernière bande - celle des hautes fréquences (figure 7) - présente essentiellement des pics, avec un maximum de 367h/ha, très caractéristiques des hautes densités intra-urbaines, soulignant sur la coupe un immeuble de la maille Jacqueline, un autre de la maille Catherine, la rue de Wissembourg, et, à l'Esplanade, la Rue d'Upsal, par exemple. Ce sont donc des îlots très ponctuels, très localisés, qui ressortent, qui émergent du plateau du niveau des moyennes fréquences et qui correspondent pour la plupart à des cités, des habitations collectives. La surface des hautes fréquences redécompose donc chacun des ensembles précédents soulignant, en les en séparant, les densités très élevées, signalant ainsi au lecteur les cités "chaudes" de Strasbourg, connues comme des lieux difficiles, que ce soit à Lingolsheim, à l'Elsau ou à La Canardière.

Ces trois images montrent donc des niveaux successifs qui sont, chacun, constitués d'une onde complexe différente dont l'amplitude maximale (densité) est plus marquée, la longueur d'onde (espacement) plus réduite, la fréquence (répétition) plus élevée au fur et mesure que l'on descend vers la grande échelle, allant jusqu'à exprimer des "événements" très locaux<sup>14</sup>. Elles

<sup>14</sup> L'analyse complète comprend une reconstruction de l'image initiale par sommation des ondes identifiées ; ceci a été effectuée par C. Schneider, mais comme il s'agit d'une composition colorée, il a été impossible de l'intégrer dans le cadre de cette publication.

---

permettent de comprendre l'information que peut apporter l'analyse de Fourier pour l'appréhension opérationnelle des densités urbaines.

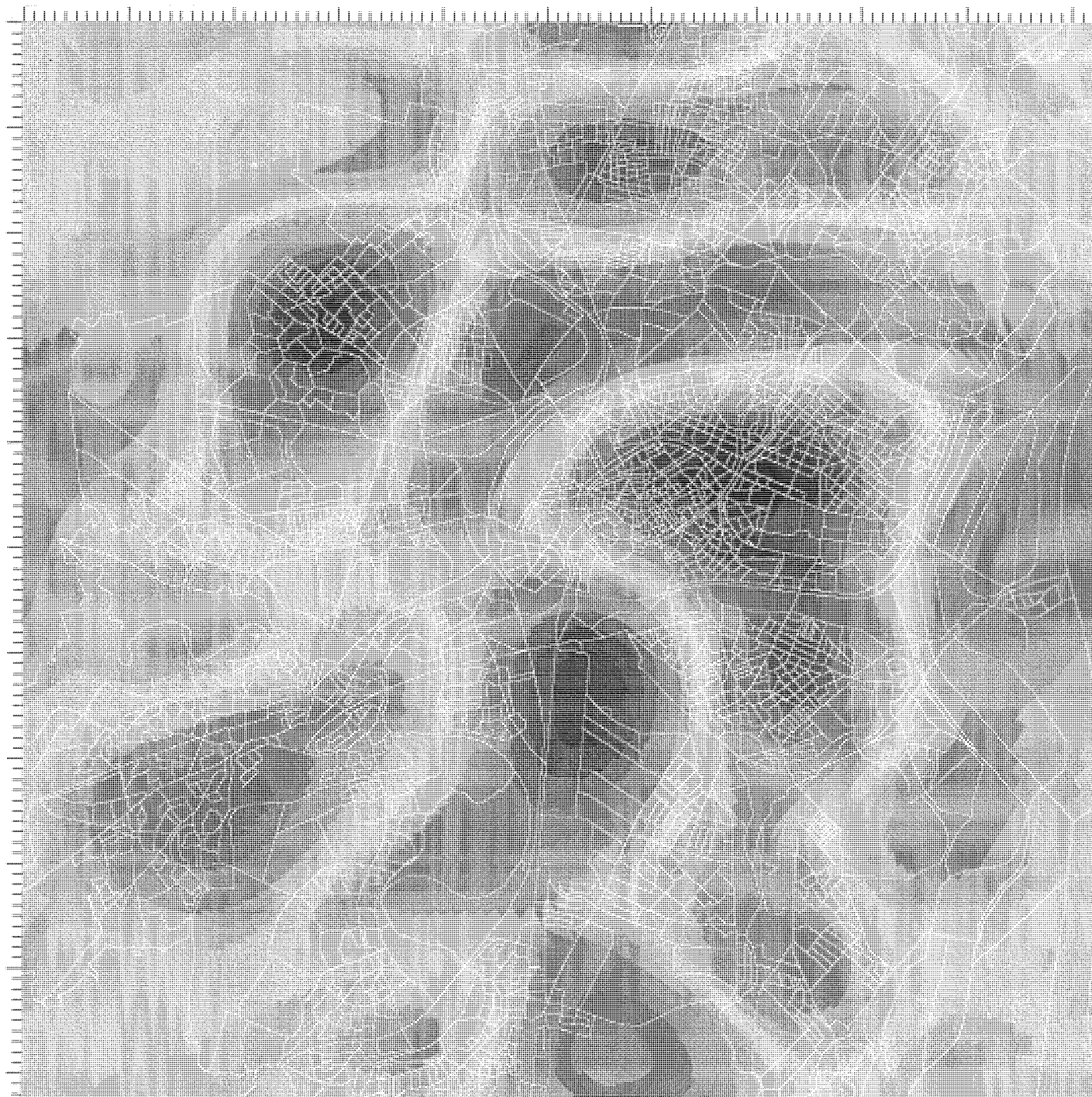
## Conclusion

Cette méthode d'analyse, indépendante du thème d'étude, puisqu'elle peut être utilisée en géologie comme en climatologie ou en démographie est très puissante puisqu'elle révèle des traits spatiaux essentiels des densités urbaines, en faisant abstraction d'hypothèses sur lesquels s'appuient habituellement la plupart des modèles urbains. Cette utilisation de l'analyse de Fourier ouvre ainsi la voie à un nouveau type de modèle de comparaison de surfaces ; cette démarche peut, en effet, être utilisée de manière identique pour toute autre ville sous la seule réserve de disposer d'un relevé de densités localisées.

Cette méthode donne une vision du "dedans" de la ville apparente, elle fait surgir une structure sous-jacente invisible au regard immédiat, mais indispensable aux acteurs urbains auxquels elle propose une nouvelle possibilité d'appréciation de la signification géographique et urbanistique des trois niveaux principaux d'emboîtements densitaires

Le premier souligne les tendances générales et les axes structurants de la ville opposant les masses résidentielles aux autres types d'utilisation du sol. Le second permet une reconnaissance d'unités homogènes, faisant abstraction des découpages administratifs, et exprimant ce qui constituerait, peut-être, les unités de découpage pertinent pour une ville. Enfin, le dernier niveau extrait les spécificités locales, cassant même les unités primaires des recensements. On voit ainsi qu'en descendant la gamme des niveaux, on passe de la vision des formes prégnantes, difficiles à modifier, sur lesquelles se calque la dynamique complexe des développements en cours, à une image permettant d'appréhender des phénomènes très locaux, plus ou moins aisément adaptables selon qu'ils correspondent à des problèmes morphologiques, fonctionnels, sociaux ou symboliques. On rejoint ainsi cette loi bien connue des systèmes généraux ouverts qui dit que ces derniers perdurent parce qu'ils peuvent modifier pour se conserver leurs unités les plus élémentaires.

Figure 5  
 Strasbourg 1990 - Image des basses fréquences densitaires



LOGICIEL CARTEL - URA 902 - CNRS - GTS

0 7 13 21 31 41 51 61 71 77



Amplitude : densités en h./ha (valeurs absolues)

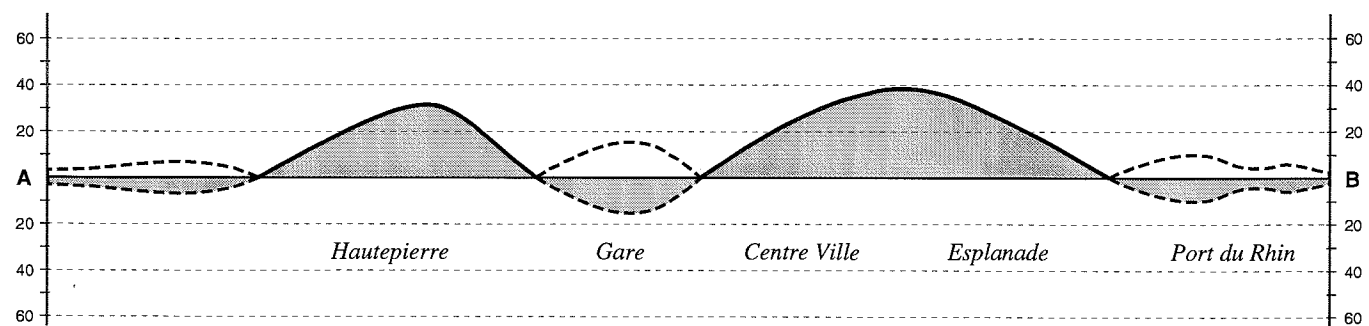
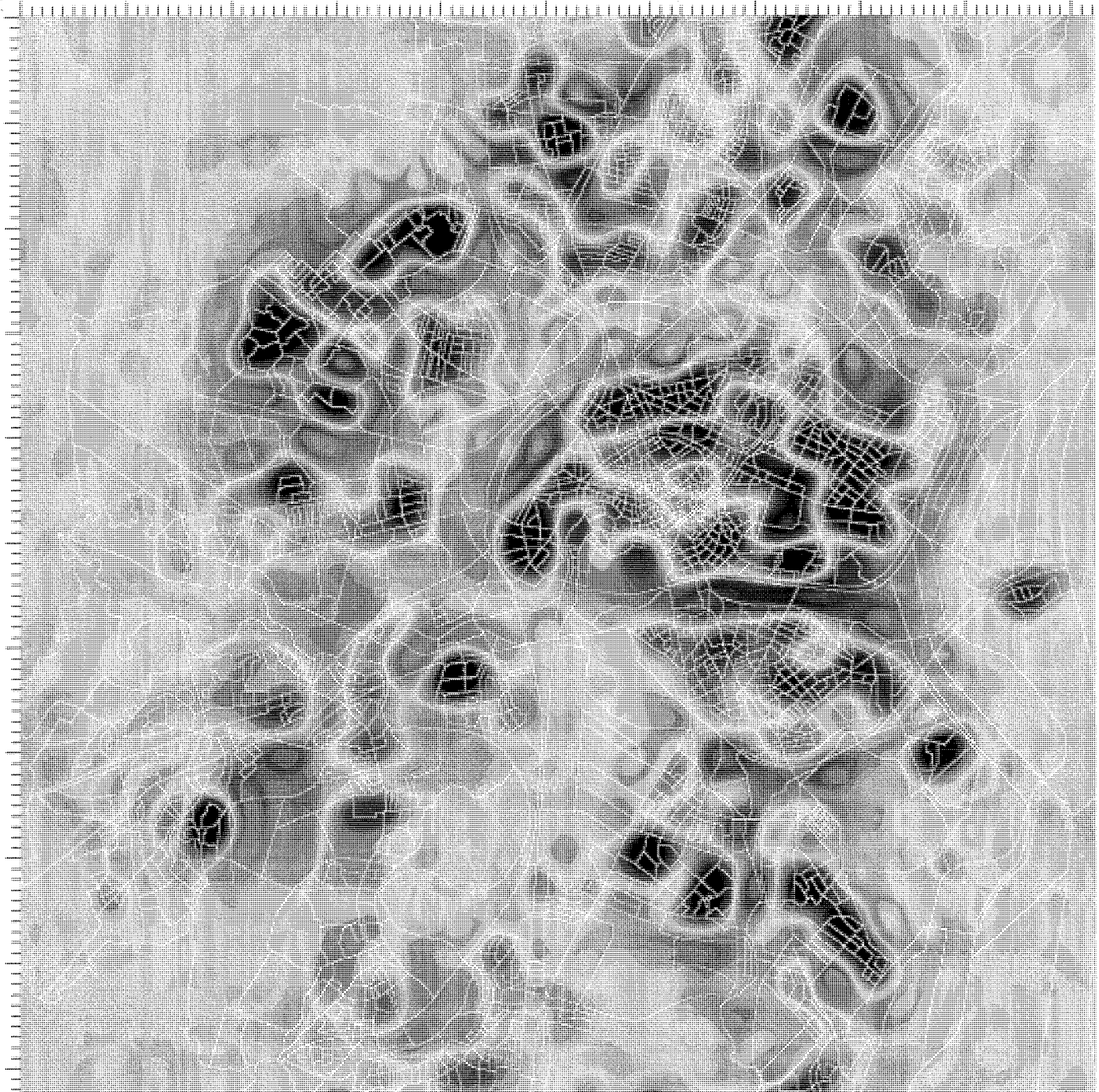
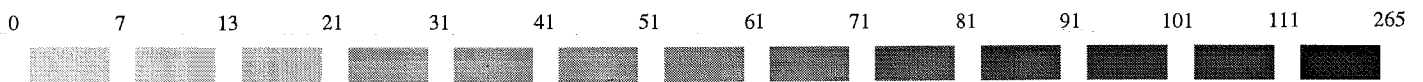


Figure 6  
 Strasbourg 1990 - Image des fréquences densitaires moyennes



LOGICIEL CARTEL URA 902 - CNRS - GSTS



Amplitude : densités en h./ha (valeurs absolues)

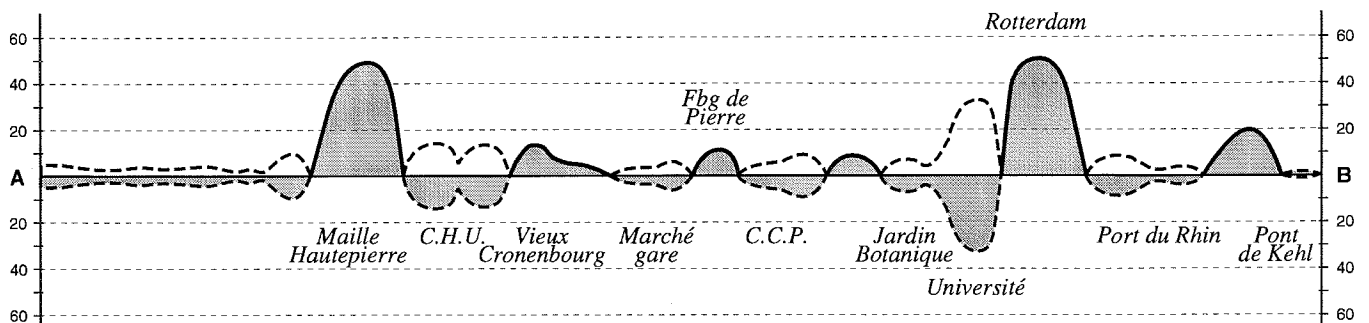
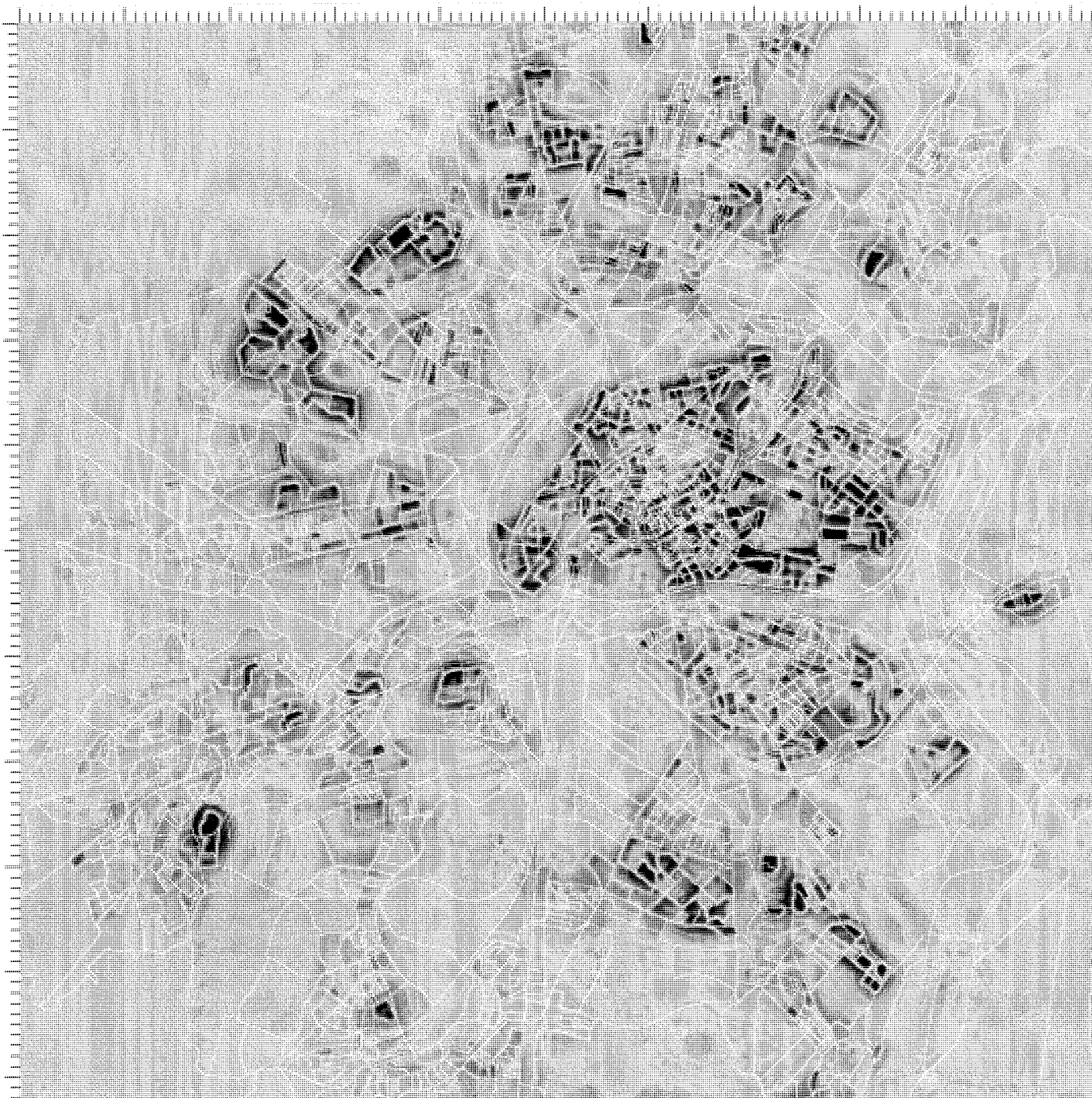


Figure 7  
Strasbourg 1990 - Image des hautes fréquences densitaires



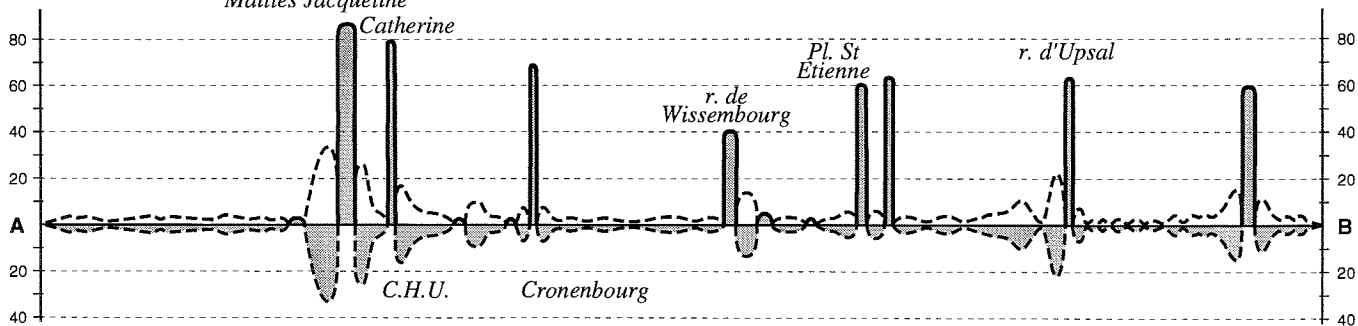
LOGICIEL CARTEL LIRA 902 - CNRS - GFTS

0 7 13 21 31 41 51 61 71 81 91 101 111 367



Amplitude : densités en h./ha (valeurs absolues)

Mailles Jacqueline



## Conclusion

---

L'inventaire critique des techniques de représentation cartographique des densités urbaines a montré leur utilité mais aussi leurs insuffisances, en particulier quand ces représentations doivent servir de bases spatiales pour des relevés de valeurs densitaires. Leur précision peut être améliorée, surtout avec le développement des systèmes d'information géographique, mais leur contenu même peut introduire, des biais, voire des erreurs. Ces procédés sont à appliquer, à utiliser, mais en en connaissant bien les contraintes et les limites.

Aussi, les approches liées à la cartographie transformationnelle s'avèrent-elles intéressantes, au moins sur le plan de la communication, sur celui de la comparabilité des résultats, ou encore sur celui de l'extraction de structures non visibles directement. Harmoniser des bases spatiales disparates, séparer les composantes sous-jacentes au phénomène densitaire, exprimer les structures et les processus par des formes "construites", modélisées, avec un référentiel commun, voilà différentes voies fondamentales pour renouveler l'étude des densités, et, ainsi, tenter de mieux comprendre l'organisation morpho-résidentielle des villes. Le champ est large, surtout si l'on est prêt à faire des investissements dans des disciplines, plus ou moins éloignées de la géographie ou de l'urbanisme, pour lesquelles les notions de densité, de concentration ou de répartition sont importantes, même si ces notions ne portent pas sur des populations humaines.

Cependant, il convient de toujours procéder à de nombreuses expérimentations afin d'éviter de développer trop rapidement des procédés séduisants, mais inadaptés au sujet traité. Nous nous en sommes bien rendus compte, les uns et les autres, avec les cartes piézoplèthes, les images associées à la régression bidimensionnelle, ou encore l'analyse fréquentielle. A chaque application, une nouvelle réflexion doit être menée pour être certain de ne pas effectuer des transferts malencontreux : caractéristiques thématiques et contraintes méthodologiques doivent être en adéquation pour que l'on puisse avancer dans ce domaine de recherche. Mais on reste toujours lié à une difficulté fondamentale sur laquelle nous allons revenir en conclusion, à savoir l'accessibilité à des données significatives du phénomène étudié.



## CONCLUSION

---

*Colette CAUVIN*

Cette recherche, entreprise dans un contexte bien précis, avait des buts bien précis qui sont loin d'avoir été atteints pour diverses raisons, même si les différentes étapes du projet ont été abordées.

La lecture, ou la relecture, de la littérature sur les densités, jointes aux expériences concrètes de l'équipe, a conduit à réfléchir différemment sur le concept de densité et à s'interroger sur la pertinence de son utilisation, malgré sa permanence. Cependant, sa confrontation avec le concept inverse, celui de quantité de surface par personne, n'a pu être approfondie ; pourtant, elle aurait un intérêt direct, concrètement interprétable en termes de sur ou sous occupation de l'espace bâti disponible, tant pour les géographes que pour les architectes, les urbanistes et les aménagistes. Il faut noter que les approches de J. Szegö, extrêmement intéressantes, n'ont pu être suivies, puisque les données auxquelles il fait appel ne semblent pas exister en France. Nous n'avons pu, pour l'instant, leur trouver de substitut.

Il est certain que la télédétection peut compenser certains manques, peut fournir des alternatives, au sens positif du terme, à la non disponibilité des informations nécessaires au calcul de densités, mais essentiellement pour tout ce qui concerne l'occupation et l'utilisation du sol. Cette voie, bien explorée par les membres de l'unité, de même que par d'autres chercheurs face aux mêmes difficultés, mérite nettement d'être encore approfondie. De nouveaux capteurs apparaissent ; il convient d'en chercher l'éventail des possibilités pour les études urbaines fines. Par ailleurs, les données satellitaires permettent de s'abstraire, au moins partiellement, des contraintes spatiales administratives, ce qui paraît indispensable actuellement comme le souligne F. Moriconi-Ebrard (1994), pour qui l'agglomération strasbourgeoise est conçue en association l'espace urbain de Kehl. Mais, cette source de données, "répétitive" temporellement, dont la résolution s'affine régulièrement, ne peut donner d'informations sur l'intérieur des bâtiments, sur les personnes qui y vivent, sur les déplacements quotidiens résidence/travail. Or, en ce domaine, la diversité reste pauvre.

Bien sûr, les modèles testés sur les données disponibles ont donné des indications précieuses pour reconnaître ceux qui sont les plus aptes à traduire les changements dans le temps et de donc de procéder à des comparaisons spatio-temporelles. Bien sûr, les nouvelles propositions tant de classification que de modélisation ont permis de "penser" autrement les densités urbaines, mais il aurait fallu pouvoir aller plus loin et continuer les tests sur des données satisfaisantes, pertinentes. Comment, sans cela, valider des modèles et préciser leur rôle respectif pour analyser les structures (répartitions) densitaires ou les processus de densification (dynamiques des densités) ?

Les transformations cartographiques conduisent aisément à une meilleure visualisation et une meilleure compréhension de ces changements, surtout lorsqu'elles sont accompagnées de mesures statistiques comme dans le cas de la régression bidimensionnelle ou des surfaces de tendance. L'analyse fréquentielle, dont l'interprétation thématique mérite encore d'être explorée, affirmée et enrichie par la multiplication d'expérimentations, mérite également qu'on s'y intéresse vraiment car tous ses apports sont loin d'avoir encore été envisagés.

Mais dans tous les cas, on bute sur la même difficulté : à quoi sert de disposer d'outils remarquables, que les ouvriers soient bons ou mauvais, si les matériaux initiaux, eux, sont déficients. Que ces insuffisances au niveau des données proviennent des interdictions de la CNIL que ne nous saurions trop rappeler, ou de l'absence de relevés adaptés lors des recensements, il est certain que, pour la France, il est impossible actuellement de faire des études d'occupation de l'espace par les populations urbaines qui soient vraiment pertinentes pour des raisons sur lesquelles aucun des chercheurs n'a réellement de possibilité d'action.

Aussi, le bilan de cette étude est très incomplet et nous laisse nettement insatisfaits malgré tout le travail effectué. Données inaccessibles ou inexistantes, palliatifs limités malgré les efforts d'imagination, et, pour finir, des contraintes financières et des conditions de travail difficilement acceptables. Un rapport est fourni ; nous y avons mis ce qui était en notre pouvoir de mettre ; nous y avons laissé aussi beaucoup de découragement. Espérons que les prochains projets, s'il y en a, pourront être menés à bien avec moins de déception et d'amertume.

## **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**



- ADENIYI P.O. 1987 Using remotely sensed data for census surveys and population estimation in developing countries : examples from Nigeria. *Geocarto International*, 4, pp. 11-31.
- AJO R. 1965 On the structure of population density in London field. *Acta Geographica*, 18, 4, pp. 1-17.
- ALPEROVICH G. 1980 Determinants of population density gradient in Tel Aviv metropolitan area. *Urban Studies*, 17, pp. 185-192.
- AMSON J.C. 1973 Equilibrium models of cities : 2. Single-species cities. *Environment and Planning*, 5, pp. 295-338.
- AMSON J.C. 1972 The dependence of population distribution on location costs. *Environment and Planning*, 4, pp. 163-181.
- ANSELIN L., CAN A. 1986 Model comparison and model validation issues in empirical work on urban density functions. *Geographical Analysis*, 18, 3, pp. 179-197.
- ARCY THOMPSON (d') W.  
1948 *On growth and form*. Mac Millan ed., New-York (2<sup>nd</sup> ed.), 1116 p.
- AUZELLE R. 1961 *Technique de l'urbanisme*. Que Sais-je ? P.U.F., Paris, 128 p.
- BACON R.W. 1993 Retail rents and market areas. *Environment and Planning A*, 25, pp. 481-494.
- BAILLY A. 1950 *Dictionnaire Grec - Français*. Hachette, Paris, 2227 p.
- BAILLY A., BEGUIN H.  
1982 *Introduction à la géographie humaine*. Masson, Coll. Géographie, 188 p.
- BAILLY A., FERRAS R., PUMAIN D. (sous la dir.)  
1992 *Encyclopédie de Géographie*. Economica, Paris, 1132 p.
- BAKER R.G.V., GARNER B.J.  
1989 On the space-time associations in the consumer patronage of planned shopping centres. *Environment and Planning A*, 21, 9, pp. 1179-1194.
- BARBER G.M., MILNE W.J.  
1988 Modelling internal migration in Kenya : an econometric analysis with limited data. *Environment and Planning A*, 20, 9, pp. 1185-1196.
- BATTY M., SIKDAR P.K.  
1982 Spatial aggregation in gravity models : 2. One-dimensional population density models. *Environment and Planning A*, 14, pp. 525-553.
- BATTY M., LONGLEY P., FOTHERINGHAM S.  
1989 Urban growth and form : scaling, fractal geometry and diffusion-limited aggregation. *Environment and Planning A*, 21, 11, pp. 1447-1472.
- BATTY M., XIE Y. 1996 Preliminary evidence for a theory of the fractal city. *Environment and Planning A*, 28, 10, pp. 1745-1762.
- BEGUIN H., THISSE J. 1979 An axiomatic approach to geographical space. *Geographical analysis*, 11, pp. 325-341.

- BEGUIN H., THOMAS I., VANDENBUSSCHE D.  
1992 Weight variations within a set of demand points, and location-allocation issues : a case study of public libraries. *Environment and Planning A*, 24, 12. pp. 1769-1779.
- BELDING R. 1981 A test of the von Thünen locational model of agricultural land use with accountancy data from the European Economic Community. *Transactions of the I.B.G. New Series*, 6, 2, pp. 176-187.
- BENNETT R.J. 1989 Demographic and budgetary influence on the geography of the poll tax : alarm or false alarm ? *Transactions of the I. B. G. New Series*, 14, 1, pp. 400-417.
- BENTHAM G. 1986 Public satisfaction and social, economic and environmental conditions in the counties of England. *Transactions of the I. B. G. New Series*, 11, 1, pp. 27-36.
- BERROIR S. 1996 L'espace des densités dans la ville : théories et modélisation. *L'Espace Géographique*, 4, pp. 353-368.
- BERROIR S., CATTAN N., SAINT-JULIEN T.  
1995 *Densités et villes : notions et mesures*. Rapport de recherche pour le PIR-Villes, Programme "Densités", 94 p. ronéotées.
- BERRY B.J.L., SIMMONS J.W., TENNANT R.J.  
1963 Urban population densities : structure and change. *The Geographical Review*, LIII, pp. 389-405.
- BERRY B.J.L., HORTON F.E.  
1970 *Geographic perspectives on urban systems with integrated readings*. Prentice Hall, 564 p.
- BERRY B.J.L., KIM H.M.  
1993 Challenges to the monocentric model. *Geographical Analysis*, 25, 1, pp. 1-4.
- BOARD C. 1967 Maps as models. In : *Models in geography* (Chorley R.J., Haggett P., eds). Methuen. pp. 671-719.
- BONDIL L. 1990 Applications of multi-level modelling to geography. *Area*, 22, 3, pp. 256-263.
- BOSCH-DOMENECH A., ESCRIBANO C.  
1988 Regional allocation of public funds : an evaluation index. *Environment and Planning A*, 20, 10, pp. 1323-1333.
- BOUSTEDT O., RANTZ H.  
1957 *Regionale Struktur und Wirtschaftsforschung*. Bremen
- BOUTOURA C. 1994 Logarithmic urban thematic mapping in MIS environment. *Cartographica*, vol. 31, n° 1, pp. 41-53.
- BOUTOURA C., LIVIERATOS F.  
1986 Strain analysis for geometric comparisons of maps. *The Cartographic Journal*, vol. 23, n° 1, pp. 27-34.
- BOYCE R.R. 1966 The edge of the metropolis : the wave theory analog approach. *British Columbia Geographical Series*, 7, pp. 31-40.
- BOYLE P.J., FLOWERDEW R.  
1993 Modelling sparse interaction matrices : interward migration in Hereford and Worcester, and the underdispersion problem. *Environment and Planning A*, 25, pp. 1201-1209.
- BRAMLEY G. 1993 Land-use planning and the housing market in Britain : the impact on housebuilding and house prices. *Environment and Planning A*, 25, 7, pp. 1021-1051.

- BROCKER J. 1989 How to eliminate certain defects of the potential formula. *Environment and Planning A*, 21, 6, pp. 817-830.
- BROWN K.M. 1968 A note on "Urban population density patterns : an alternate explanation". *Le Géographe Canadien*, pp. 203-205.
- BRUGIONI D.A. 1983 The census : it can be done more accurately with space-age technology.(Commentary) *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 49, 9, pp. 1337-1339.
- BRUNET R., FERRAS R., THERY H.  
1992 *Les mots de la géographie. Dictionnaire critique*. Coll. Dynamique du Territoire, Reclus, la Documentation Française, Montpellier, Paris, 470 p.
- BRUNSDON C. 1991 Estimating probability surfaces in GIS : an adaptive technique. *EGIS'91*, pp. 155-164.
- BUNGE W. 1962 Theoretical geography. *Lund Studies in Geography, Series C*, 2, 195 p.
- BUSSIÈRE R. 1972 Modèle urbain de localisation résidentielle. Compte-rendu. *Centre de Recherche d'Urbanisme*, 163 p.
- CABANNE C. (dir) 1984 *Lexique de géographie humaine et économique*. Dalloz. Paris. 432 p.
- CASETTI E. 1967 Urban population density patterns : an alternate explanation. *The Canadian Geographer*, 11, 2, pp. 96-100.
- CASETTI E. 1968 A reply to "A note on 'Urban population density patterns an alternate explanation' " (Brown). *Le Géographe Canadien*, pp. 205-206.
- CASETTI E. 1968 A formalization of the demographic transition theory. *Papers of the Regional Science Association*, 21, pp. 159-164.
- CASETTI E. 1968 A formalization of the demographic transition theory. *PPRSA*, pp. 159-164.
- CASETTI E. 1973 Testing for spatial-temporal trends : an application to urban population density trends using the expansion method. *Canadian Geographer*, 17, 2, pp.127-137.
- CASETTI E., PAPAGEORGIOU G.  
1971 A spatial equilibrium model of urban structure. *Canadian Geographer*, 15, 1, pp. 30-37.
- CAUVIN C., REYMOND H., HIRSCH J.  
1985 *L'espacement des lieux. Théorie des lieux centraux et analyse spectrale*. Mémoires et documents de géographie, Nouvelle collection, Editions du CNRS, 186 p.
- CAUVIN C., SCHNEIDER C. (en collaboration avec G. CHERRIER)  
1989 Cartographic transformations and the piezopleth maps method. *The Cartographical Journal*, 26, 2, pp. 96-104.
- CAUVIN C., ENAUX C.  
1991 De la cartographie de report à la cartographie transformationnelle : propositions pour la représentation de données de population. *Espaces, Populations, Sociétés*, 3, pp. 487-503.
- CERNY J.W. 1971 A computer program for azimuthal map transformation. *Professional Geographer*, 2302, pp. 144-145.
- CERVERO R. 1990 America's Suburban Centers : the land-use transportation link. (Book Review) *Transactions of the I. B. G. New Series*, 15, 3, pp. 379-381.

- 
- CHATELAIN A. 1944 Démographie urbaine. Exemples de densités linéaires et volumétriques sur certaines rues de Lyon. In : *Livre jubilaire offert à M. Zimmermann*. Lyon, pp. 83-102.
- CHATELAIN A. 1946 Les densités urbaines. *L'information géographique*, n° 4, pp. 159-161.
- CLARK C. 1951 Urban population densities. *Royal Statistical Society, Series A*, 114, 4, pp. 490-496.
- CLARKE M., WILSON A.G. 1985 The dynamics of urban spatial structure : the progress of a research programme. *Transactions of the I. B. G. New Series*, 10, 4, pp. 427-451.
- COIGNET 1964 *Densité urbaine*. IAURP Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région Parisienne, Paris, 32 p.
- COLLET C. 1992 *Systèmes d'information géographique en mode image*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Coll. Gérer l'environnement, 186 p.
- COLLINS W.G., EL BEIK A.H.A. 1971 Population Census with the aid of aerial photographs: an experiment in the City of Leeds. *Photogrammetric Record*. Vol.7. pp 16-26.
- COLWELL R.N. 1983 *Manual of remote sensing*. American society of photogrammetry. Falls Church, Virginia, USA.
- COUCLELIS H. 1988 Of mice and men : what rodent populations can teach us about complex spatial dynamics. *Environment and Planning A*, 20, 1, pp. 99-109.
- CRAIG J., HASKEY J. 1979 Pivotal density : what is it ? *Urban studies*, 16, pp. 217-223.
- CRAMPTON G.R. 1991 Residential density patterns in London - any role left for the exponential density gradient ? *Environment and Planning A*, 23, 7, pp. 1007-1024.
- CURRAN P.J., HOBSON T.A. 1987 Landsat MSS imagery to estimate residential heat-load density. *Environment and Planning A*, 19, 12, pp. 1597-1610.
- DAVIS J.C. 1973 *Statistics and data analysis*. John Wiley & Sons Inc., New-York, 550 p.
- DENAIN J.C., LANGLOIS P. 1995 *Apports et limites de la cartographie en anamorphoses*. Communication, 9ème colloque de Géographie Théorique et Quantitative, Spa, Bergique, Contribution de laboratoire MTG, Université de Rouen, pp. 58-73. ronéotées.
- DESPART J.F., et DUTARTRE P. 1995 *Estimation de la population des quartiers périphériques de Ouagadougou, par télédétection*. Coll. Villes. Paris Anthropos.
- DORLING D. 1995 Visualizing changing social structure from census. *Environment and Planning A*, 27, pp. 353-378.
- DOWNAN I.J., PEACEGOOG G. 1988 Information content of high resolution satellite imagery. *Archives of photogrammetry and remote sensing*, 27, 4, pp. 84-93.
- DUNN R., WALKER P. 1989 District-level variations in the configuration of the service provision in England : a graphical approach to classification. *Environment and Planning A*, 21, 10, pp. 1397-1411.
- EHLERS M. 1990 Application of Spot Data for the Regional Growth Analysis and Local Planning, *Photogrammetry and Remote Sensing*, vol 56, n°2, pp 175-180.

- FISCH O. 1991 A structural approach to the form of the population density function. *Geographical Analysis*, 23, 3, pp. 261-275.
- FOLEY D.J. et al. 1992 *Computer graphics. Principles et practice*. Addison-Wesley Co., New-York, 1174 p.
- FOUCHIER V. 1994 Penser la densité. *Etudes Foncières*, 64, pp. 7-12.
- FOUCHIER V., MERLIN P. 1994 *Les fortes densités urbaines : une solution pour nos villes ?* En association avec l'INTA / AIVN et l'Institut Français d'Urbanisme, French Advances and Communication on Technology and Science, Hong Kong, 77 p.
- FLOWEREEW R., GREEN M. 1989 *Inference between incompatible zonal systems using the EM algorithm*. 6e Colloquium of Theoretical and Quantitative Geography, Chantilly.
- FREEMAN H.L. 1984 Mental health in the inner city. *Environment and Planning A*, 16, 1, pp. 115-121.
- GAFFIOT F. 1934 *Dictionnaire illustré Latin - Français*. Hachette, Paris, 1719 p.
- GATRELL A. 1994 Density estimation and visualization of point patterns. In : *Visualization in GIS* (Ch.9). Ed. Mearns H.M. et Unwin D.J., J. Wiley and sons, pp. 65-75.
- GAUGLER K. 1994 *Densités urbaines. Modèles spatiaux et représentations cartographiques*. Mémoire de DEA, UFR de Géographie, Strasbourg, 138 p.
- GEORGE P. 1970 *Dictionnaire de la Géographie*. P.U.F., Paris, 448 p.
- GILBERT A.G., WARD P.M. 1982 Residential movement among the poor : the constraints on housing choice in Latin American cities. *Transactions of the I.B.G. New Series*, 7, 2, pp. 129-149.
- GILMARTIN P. 1988 The design of choropleth shadings for maps on 2 and 4-bit color graphics monitors. *Cartographica*, 25, 4, pp. 1-10.
- GILBERT A., GUGLER J. 1993 Cities, poverty and development : urbanization in the Third World. *Reviews Environment and Planning A*, 25, 6, pp. 899-901.
- GILMARTIN P., SHELTON E. 1989 Choropleth maps on high resolution CRTs/ The effects of number of classes and hue on communication. *Cartographica*, 26, 2, pp. 40-52.
- GOODCHILD M.F., ANSELIN L., DEICHMANN U. 1993 A framework for the areal interpolation of socioeconomic data. *Environment and Planning A*, 25, 3, pp. 383-397.
- GORDON P., RICHARDSON H.W., WONG H.L. 1986 The distribution of population and employment in a polycentric city : the case of Los Angeles. *Environment and Planning A*, 18, 2, pp. 161-173.
- GOULD P.R. 1972 On mental maps. In : ENGLISH P.W., MAYFIELD R.C., *Man, space and environment. Concepts in contemporary Geography*. Oxford University Press, pp. 260-282.
- GOULD S.J. 1971 D'Arcy Thompson and the science of form. *New Literary History*, vol. 2, n° 2, pp. 229-258.
- GRESLE F. et al. 1990 *Dictionnaire des Sciences Humaines*. Sociologie, Psychologie sociale, Anthropologie. Nathan, Paris, 381 p.

- 
- GRIMAUD A. 1989 Nonoptimal ranking of households in urban space : an example. *Environment and Planning A*, 21, 2, pp. 257-263.
- GROOP R.E., MULLER J.C. 1978 Evaluating an urban model : a cartographic approach. *The American Cartographer*, 5, 2, pp. 111-120.
- GUERMOND Y., LEDUC A. 1980 Analyse des surfaces dans un espace rural. *Actes du V Colloque Franco-Polonais de Géographie*, Université de Caen, pp. 203-218.
- GULDMANN J.M. 1984 An econometric model of electricity distribution systems in urban areas. *Environment and Planning A*, 16, 6, pp. 793-806.
- GUREVICH B.L. 1967 The density of population of a city and the density of probability of a random magnitude. *Soviet Geography*.
- GUREVICH B.L., SAUSZKIN J.G. 1967 Metoda matematyczna w geografii. *Przegląd Zagranicznej Literatury Geograficznej*, 1, Varsovie, pp. 83-125.
- GUSEIN-ZADE S.M. 1982 Bunge's problem in central place theory and its generalizations. *Geographical Analysis*, 14, 3, pp. 246-252.
- HAGERSTRAND T. 1957 Migration and area. *Lund Studies Series in Geography*, series B, n° 13, pp. 27-158.
- HAINING R.P. 1981 Spatial interdependencies in population distributions : a study in univariate map analysis.1. Rural population densities.2. Urban population distributions. *Environment and Planning A*, 13, 1, pp. 65-84 et 85-96.
- HARRIS C., ULLMANN E.L. 1945 The nature of cities. *Annals of American Academy of Political and Social Sciences*, 7, pp. 242-
- HAWORTH J., VINCENT P. 1982 Power transformations and linear regression models in geography. *Area*, 14, 2, pp. 137-143.
- HAZEL A. ET al. 1984 Remote sensing technology and the US census. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 50, 2, pp. 229-232.
- HEIKKILA E., GORDON P., KIM J.I., PEISER R.B., RICHARDSON H.W., DALE-JOHNSON D. 1989 What happened to the CBD distance gradient ? : land value in a policentric city. *Environment and Planning A*, 21, 2, pp. 221-232.
- HEPPLE L.W. 1995 Bayesian techniques in spatial and network econometrics : 1. Model comparison and posterior odds. *Environment and Planning A*, 27, pp. 447-469.
- HEPPLE L.W. 1995 Bayesian techniques in spatial and network econometrics : 2 . Computational methods and algorithms. *Environment and Planning A*, 27, pp. 615-644.
- HOLZ R.K, HUFF D.L., MAYFIELD R.C. 1969 *Urban spatial structure based on remote sensing imagery*, Proceedings, Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment, vol 2, pp 819-830.
- HORN M.E.T. 1995 Solution techniques for large regional partitioning problems. *Geographical Analysis*, 27, 3, pp. 230-248.

- 
- HUNT A.J., MOISLEY H.A.  
1960 Population mapping in urban areas. *Geography*, Sheffield, vol. XLV, n° 1, pp. 79-89.
- ISARD W., REINER T.A.  
1962 Regional science and planning. *Paper of Regional Science Association*, 8, pp. 1-36.
- ISNARD H., RACINE J.B., REYMOND H.  
1981 *Problématiques de la géographie*. P.U.F., Paris, 262 p.
- ISHIKAWA H. 1980 A new model for the population density distribution in an isolated city. *Geographical Analysis*, 12, 3, pp. 223-235.
- JONES D.W., O'NEILL R.V.  
1993 A model of neotropical land use with endogenous malaria and preventive ecological measures. *Environment and Planning A*, 25, 11, pp. 1677-1687.
- JONES K. 1990 A multi-level approach to immunisation uptake. *Area*, 22, 3, pp. 264-271.
- JOSEPH A.E., SMIT B., MACILRAVEY G.P.  
1989 Consumer preferences for rural residences : a conjoint analysis in Ontario, Canada. *Environment and Planning A*, 21, 1, pp. 47-63.
- KADMON N. 1983 Photographic, polyfocal and polar-diagrammatic mapping of atmospheric pollution. *The Cartographic Journal*, vol. 20, n° 2, pp. 121-126.
- KADMON N., SHLOMI E.  
1978 A polyfocal projection for statistical surfaces. *The Cartographic Journal*, vol. 15, n° 1, pp. 36-41.
- KANAROGLOU P.S., BRAUN G.O.  
1992 The pattern of counterurbanization in the federal Republic of Germany, 1977-85. *Environment and Planning A*, 24, 4, pp. 481-496.
- KANTOROVICH Y.G. 1992 Equilibrium models of spatial interaction with locational-capacity constraints. *Environment and Planning A*, 24, 8, pp. 1077-1095.
- KEERSMAECKER (DE) M.L.  
1987 Stratégie d'échantillonnage des données de terrain intégrées dans l'analyse des images satellitaires. *L'Espace Géographique*, 3, pp. 195-205.
- KING R.J. 1989 Capital switching and the role of the ground rent : 3. Switching between circuits, switching between submarkets, and social change. *Environment and Planning A*, 21, 7, pp. 853-880.
- KLAK T. 1993 Why do shelter conditions differ in Ecuador cities and how do we know that they do ? a comparative locality study. *Environment and Planning A*, 25, pp. 1115-1130.
- KLEINSCHMAGER R.  
1997 Strasbourg, une ambition européenne. *Anthropos-Economica*, série Villes, Paris, 216 p.
- KOHSAKA H. 1989 An analysis of competitive oscillations between japanese twin cities. *Environment and Planning A*, 21, 6, pp. 803-816.
- KOHSAKA H. 1993 A monitoring and locational decision support system for retail activity. *Environment and Planning A*, 25, 2, pp. 197-211.
- KOIZUMI A., INAKAZU T.  
1989 A multipurpose optimization model for area-wide sewerage systems. *Environment and Planning A*, 21, 8, pp. 1015-1026.

- KONTULY T., SCHÖN K.P.  
1994 Changing western German internal migration systems during the second half of the 1980s. *Environment and Planning A*, 26, 10, pp. 1521-1543
- KORCELLI P., KOSTRUBIEC B.  
1973 Harmonic analysis of urban spatial growth. *Geographia polonica*, 25, pp. 95-101.
- KORZYBSKI S. 1954 Le profil de densité de population dans l'étude des zones urbaines de Londres et de Paris. *Urbanisme et Habitation* (extrait) -La vie urbaine, 2, pp. 113-156.
- KORZYBSKI S. 1976 *Une méthode inductive et peuplement urbain*. Recueil de quatre études indépendantes formant un tout, écrites en 1952, 1954, 1958 et 1972. Paris V, 814 p.
- KOSTRUBIEC B. 1970 On the concentration of geographical objects. *Geographical Analysis, Research notes* 4, pp. 186-191.
- KOSTRUBIEC B. 1986 Etude des répartitions de la population urbaine - Exemple sur l'agglomération lilloise. In : *Eléments de démographie urbaine* Collection des travaux du programme commun d'études en sciences de la population, pp. 77-96.
- KOSTRUBIEC B., DAS NEVES SALGUEIRO M.G.  
1986 Medida de concentração espacial e relativa numa distribuição pontual (ensaio na região centro de Portugal). *Actes du 4e colloque ibérique de Géographie*, Coimbra, pp. 845-855.
- KRAKOVER S. 1984 Trends of spatial reorganisation of growth in urban fields in the eastern United States, 1962-1978. *Environment and Planning A*, 16, 10, pp. 1361-1373.
- KRAUS S.P., SENGEL L.W., RYERSON J.M.  
1974 Estimating population from photographically determined residential land use types. *Remote Sensing of Environment*, 3, pp. 35-42.
- KRIEGER M.H. 1987 Where do centers come from? *Environment and Planning A*, 19, 9, pp. 1251-1260.
- KUTAY A. 1988 Technological change and spatial transformation in an information economy : 1. A structural model of transition in the urban system. *Environment and Planning A*, 20, 5, pp. 569-593.
- KUTAY A. 1988 Technological change and spatial transformation in an information economy : 2. the influence of new information technology on the urban system. *Environment and Planning A*, 20, 6, pp. 707-718.
- LAJOIE G. 1992 *Le carroyage des informations urbaines. Une nouvelle forme de banque de données sur l'environnement du Grand Rouen*. Publications de l'Université de Rouen, Coll. Nouvelles données en Géographie, n° 177, 238 p.
- LAM N.S.N. 1983 Spatial interpolation methods : A review. *The American Cartographer*, vol.10, n°2, pp 129-149.
- LAROUSSE 1977 *Nouveau Dictionnaire encyclopédique*. Paris - Montréal, vol. 1, 992 p.
- LATHAM R.F., YEATES M.H.  
1970 Population density growth in metropolitan Toronto. *Geographical Analysis, Research Notes and Comments*, pp. 177-185.
- LAVIN S.J., CERVENY R.S.  
1987 Unit-vector density mapping. *Cartographic Journal*, 24, pp. 131-141.
- LEE Y. 1989 An allometric analysis of the US urban system : 1960-80. *Environment and Planning A*, 21, 4, pp. 463-476.

- 
- LE MARECHAL J.F., SOULIE L.  
1992 *Dictionnaire pratique de la Chimie*. Hatier, Paris, 158 p.
- LEVY J. 1991 La ville modernité spatiale. In : *Dynamiques urbaines*. Géographie sociale. CNRS URA 915. Publication de l'Université de Caen, 11, pp. 363-374
- LITTRÉ L. 1974 *Dictionnaire de la langue française*. Encyclopaedia Britannica. Chicago. 4 vol.
- LIM H. 1993 Cultural strategies for revitalizing the city : a review and evaluation. *Regional Studies*, 27, 6, pp. 589-595.
- LIU H.-L. 1988 Two-sector nonmonocentric urban land-use model with variable density. *Environment and Planning A*, 20, 4, pp. 477-488.
- LO C.P. 1986 Accuracy of population estimation from medium-scale aerial photography. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52, 12, pp. 1859-1869.
- LO C.P., WU C.Y.M. 1984 New town monitoring from sequential aerial photographs. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 50, 8, pp. 1145-1158.
- LOGAN T. 1984 Urban and regional planning in a federal system : New South Wales and Victoria. *Environment and Planning A*, 16, 8, pp. 1041-1054.
- LOUGUET F. 1992 *Synthèse d'image sur micro-ordinateur*. Dunod Tech-Radio, 247 p.
- MAC CARTHY H.H., SALISBURY N.E.  
1961 Visual comparison of isopleth maps as measures of determining correlations between spatially distributed phenomena. Département of Geography, State University of Iowa, vol. 3, 81 p.
- MACDONALD J.F. 1979 An empirical test of a theory of the urban housing market. *Urban Studies*, 16, pp. 291-297.
- MACDONALD J.F., MACMILLEN D.P.  
1990 Employment subcenters and land values in a polycentric urban area : the case of Chicago. *Environment and Planning A*, 22, 12, pp. 1561-1574.
- MACLACHLAN I. 1981 Settlement pattern evolution and Catastrophe Theory : a comment. *Transactions of the I.B.G. New Series*, 6, 1, pp. 126-128.
- MARSDEN B.S. 1970 Temporal aspects of urban population densities : Brisbane, 1861-1966. *Australian Geographical Studies*, pp. 71-83.
- MARTIN D. 1989 Mapping population data from zone centroid locations. *Transactions of the I.B.G. New Series*, 14, pp. 90-97.
- MARDIN D., BRACKEN I.  
1991 Techniques for modelling population-related raster databases. *Environment and planning A*, 23, pp 1069-1075.
- MARTIN L.R.G. 1989 Accuracy assessment of Landsat-based visual change detection applied to the urban fringe. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 55, n° 2, pp. 209-215.
- MATTSSON L.G. 1987 Urban welfare maximisation and housing market equilibrium in a random utility setting. *Environment and Planning A*, 19, 2, pp. 247-261.
- MAY L.N. 1986 An evaluation of Landsat MSS digital data for updating habitat maps of the Louisiana coastal zone. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52, 8, pp. 1147-1158.
- MERCER J. 1968 Density decline surfaces in urban areas. *Canadian Geographer*, 12, 3, pp. 158-181.

- MERLIN P., CHOAY F.  
1988, 1996  
*Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement*. P.U.F., Paris, 863 p.
- MILLS E.S. 1970 Urban density functions. *Urban Studies*, févr., pp. 5-20.
- MILLS E.S., PENG TAN J.  
1980 A comparison of urban population density fonctions in developed and developing countries. *Urban Studies*, 17, pp. 313-321.
- MOORE E.G. 1969 The structure of intra-urban movement rates : an ecological model. *Urban Studies*, 6, 1, pp. 17-33.
- MORIARTY B.M. 1991 Urban systems, industrial restructuring, and the spatial-temporal diffusion of manufacturing employment. *Environment and Planning A*, 23, 11, pp. 1571-1588.
- MORICONI-EBRARD F.  
1994 *Pour comparer les villes du monde*. *Geopolis*. Anthropos, série villes, Paris, 246 p.
- MULLER J.C. 1978 La cartographie thématique aux USA. *L'Espace Géographique*. pp.
- MULLER J.C. 1982 Non euclidean geographic spaces : mapping functional distances. *Geographical Analysis*, vol. 14, n° 3, pp. 189-203.
- MULLER N. 1989 Valid modelling of institutions that are challenged by rapid environmental changes - the case of a waterworks coping with nitrate compounds in drinking water. *Environment and Planning A*, 21, 8, pp. 1049-1074.
- MUTH R.F. 1965 The variation of population density and its components in South Chicago. *Papers of the Regional Science Association*, pp. 173-183.
- MUTIN M. 1978 Un nouveau village socialiste : Beni-Chougrane - Tamesguida, commune de Mouzaïa, wilaya de Blida. *Cahiers de l'Aménagement de l'Espace*, 3, Office des Publications Universitaires, Alger, pp. 44-72.
- MUZIOL-WECLAWOWICZ A.  
1992 Die Transformation des Wohnungens in Polen - Eine Analyse des Warschauer Wohnungsmarktes. Unter Mitarbeit von Josef Kohlbacher. *ISR - Forschungsberichte*, 7, pp. 8-55.
- NEWLING B. 1966 Urban growth and spatial structure. Mathematical models and empirical evidence. *The Geographical Review*, LVI, pp. 213-225.
- NEWLING B. 1969 The spatial variation of urban population densities. *The Geographical Review*, 59, 2, pp. 242-252.
- NEWMAN D. 1987 Data collection problems and the identification of Jewish ethnic community patterns : a reply. *Transactions of the I. B. G.*, New Series, 12, 1, pp. 113-115.
- NIEDERCORN J.H. 1971 A negative exponential model of urban land use densities and its implications for metropolitan development. *Journal of Regional Science*, 11, 3, pp. 317-326.
- NONN H. 1965 *Strasbourg, des densités aux structures urbaines*. Presses Universitaires de Strasbourg, Strasbourg, 189 p. + 12 planches hors texte.
- O'BRIEN L.G. 1983 Generalised linear modelling using the GLIM system. *Area*, 15, 4, pp. 327-336.
- OGAWA H., FUJITA M.  
1989 Nonmonocentric urban configuration in a two-dimensional space. *Environment and Planning A*, 21, 3, pp. 363-374.

- OGDEN P.E. 1987 COLEMAN D., SCHOFIELD R. ed. (1986) The state of population theory : forward from Malthus.  
WOODS R., REES P. ed. (1986) Population structures and models : developments in spatial demography.  
*Transactions of the I. B. G., New Series* (Book review), 12, 1, pp. 121-122.
- OGROSKY C.E. 1975 Population estimates from satellite imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, pp. 707-712.
- OKABE A., MASUDA S.  
1984 Qualitative analysis of two-dimensional urban population distributions in Japan. *Geographical Analysis*, 16, 4, pp. 301-312.
- OKABE A., YOSHIKAWA T., FUJII A., OIKAWA K.  
1988 The statistical analysis of a distribution of activity points in relation to surface-like elements. *Environment and Planning A*, 20, 5, pp. 609-620.
- OPENSHAW S., FLOWERDEW R.  
1987 A review of the problems of transferring data from one set of areal units to another incompatible set. *Northern Regional Research Laboratory, Research report n°4*.
- OWENS S.E. 1984 Energy and spatial structure : a rural example. *Environment and Planning A*, 16, 10, pp. 1319-1337.
- PAPAGEORGIU G.J., CASETTI E.  
1971 Spatial equilibrium residential land values in a multicenter setting. *Journal of Regional Science*, 11, 3, pp. 385-389.
- PAPAGEORGIU Y.Y.  
1987 Spatial public goods . 1. : Theory. *Environment and Planning A*, 19, 3, pp. 331-352.
- PAPAGEORGIU Y.Y.  
1987 Spatial public goods . 2. : Applications. *Environment and Planning A*, 19, 4, pp. 471-492.
- PARR J.B. 1985 A population density approach to regional spatial structure. *Urban Studies*, 22, pp. 289-303.
- PARR J.B., JONES C. 1983 City size distributions and urban density fonctions. Some interrelationships. *Journal of Regional Science*, 23, pp. 283-307.
- PARR J.B., O'NEILL G.J.  
1989 Aspects of the lognormal function in the analysis of regional population distribution. *Environment and Planning A*, 21, 7, pp. 961-973.
- PAS E.I. 1984 The effect of selected sociodemographic characteristics on daily travel-activity behavior. *Environment and Planning A*, 16, 5, pp. 571-581.
- PAUL S., DEPECKER L., GUILLOT C., LENCO M.  
1991 *Introduction à l'étude de la télédétection aérospatiale et de son vocabulaire*. Ed. La documentation française. Paris.
- PERKINS H.C. 1988 Bulldozers in the Southern Part of Heaven : defending place against rapid growth. Part 1 : local residents' interpretations of rapid urban growth in a free-standing service-class town. *Environment and Planning A*, 20, 3, pp. 285-308.
- PERKINS H.C. 1988 Bulldozers in the Southern Part of Heaven : defending place against rapid growth. Part 2 : the Alliance strikes back. *Environment and Planning A*, 20, 4, pp. 435-456.

- PERSSON H. 1986 Algorithmme 12 : Solving the entropy maximization problem with equality and inequality constraints. *Environment and Planning A*, 18, 12, pp. 1665-1676.
- PHILLIPS D.R., VINCENT J., BLACKSELL S. 1987 Spatial concentration of residential homes for the elderly : planning responses and dilemmas. *Transactions of the I. B. G. New Series*, 12, 1, pp. 73-83.
- PINES D. 1970 The exponential density function : a comment. *Journal of Regional Science*, 10, 1, pp. 107-110.
- PIRON V. 1995 Moyens de transport et densité. *Etudes Foncières*, 66, pp. 17-23.
- PUMAIN D., SAINT-JULIEN T., CATTAN N., ROZENBLAT C., P.A.R.I.S., N.U.R.E.C. 1991 *Le concept statistique de la ville en Europe*. Eurostat, 88 p.
- REINO A. 1963 Fields of Oslo, Stockholm and Helsinki. *Acta Geographica*, 17, 5, pp. 3-19.
- REINO A. 1964 London's field response, partie II. *Acta Geographica*, 18, 3, pp. 20-27.
- REINO A. 1964 On the structure of population density in London's field. *Acta Geographica*, 18, 4, pp. ?
- RENFREW C. 1981 Space, time and man. *Transactions of the I.B.G. New Series*, 6, 3, pp. 257-278.
- REY A. (sous la dir.) 1992 *Dictionnaire historique de la langue française*. 2 vol., Dictionnaires Le Robert, Paris, 2383 p.
- REYMOND H. 1968 Actualité des modèles graphiques en géographie. *Cahiers géographiques du Québec*. pp.
- REYMOND H. 1978 Géochorotaxologie et praxéologie prospectuelle. *Recherches géographiques à Strasbourg*, n° 2, 14 p.
- REYMOND H. 1981 Une problématique théorique de la géographie : plaidoyer pour une chorotaxie expérimentale, pp. 161-262. In : ISNARD H., RACINE J.B., REYMOND H., *Problématiques de la géographie*. P.U.F., Paris, 262 p.
- RICHARD D., BEGUIN H., PEETERS D. 1990 The location of fire stations in a rural environment : a case study. *Environment and Planning A*, 22, 1, pp. 39-52.
- RIMBERT S. et al. 1979 Carte des densités du centre de Strasbourg en 3D avec le procédé SYMVU.
- ROY J.R. 1993 Comment on "The development of a new gravity-opportunity model for trip distribution". *Environment and Planning A*, 25, 11, pp. 1689-1691.
- RUDEL T.K. 1985 Crowds and strategies for avoiding them in a densely settled region. *Environment and Planning A*, 17, 6, pp. 815-828.
- SARMANT J.P. 1978 *Dictionnaire de Physique*. Faire le point, Hachette, Paris, 288 p.
- SASAKI K. 1990 The establishment of a subcenter and urban spatial structure. *Environment and Planning A*, 22, 3, pp. 369-383.
- SAUVEZ M. 1994 La gestion des densités. *Etudes Foncières*, 65, pp. 12-16.
- SCHMITT R.C. 1966 Density health and social disorganization. *Journal of the American Institute of Planners*, n° 32, pp. 38-40.
- SCHNEIDER C. 1993 *Représentation graphique et analyse de surfaces avec le procédé IRISOS*. Communication à l'International Cartographic Conference, Cologne, pp. 682-691.

- SCHROEDER L.D., SJOQUIST D.L.  
1976 Investigation of population density gradients using trend surface analysis. *Land Economics*, 52, 3, pp. 382-392.
- SCHUTZ R. 1985 *Ecologie urbaine factorielle de l'agglomération de Strasbourg 1968*. Mémoire de maîtrise, UFR de Géographie, Strasbourg, 99 p.
- SHARPE R. 1980 Improving energy efficiency in community land-use-transportation systems. *Environment and Planning A*, 12, 2, pp. 203-216.
- SHERRAT G.G. 1960 A model for general urban growth, management science, models and technics. New-York, *Proceedings of the sixth intern. meeting of the institute of management sciences*, 2, pp. 147-159.
- SIDDIQI A.H. 1979 Population pressure in Pakistan. *Geoforum*, 10, 2, pp. 183-194.
- SIT V. 1980 The location of urban small industries : an ecological approach. *Transactions of the I.B.G. New Series*, 5, 4, pp. 413-426.
- SKABURSKIS A. 1989 Inversions in urban density gradients : a brief look at the Vancouver metropolitan area's density profile. *Urban studies*, 26, pp. 397-401.
- SMITH T.E. 1991 A simple decision theory of spatial interaction : the Alonso model revisited. *Environment and Planning A*, 23, 9, pp. 1233-1268.
- SPIEKERMANN K., WEGENER M.  
1993 *New time-space maps of Europe*. Premières Rencontres Théo Quant, IRADES, Besançon, 7-8 oct. 1993, 25 p.
- STILLWELL J., BODEN P., REES P.  
1990 Trends in internal net migration in the UK : 1975 to 1986. *Area*, 22, 1, pp. 57-65.
- SZEGÖ J. 1994 *Mapping hidden dimensions of the urban scene*. Swedish Council for Building Research, Stockholm, Sweden, 266 p.
- TABUCHI T. 1986 Existence and stability of city-size distribution in the gravity and logit models. *Environment and Planning A*, 18, 10, pp. 1375-1389.
- TELLIER L.N. 1992 From the Weber problem to a 'topodynamic' approach to locational systems. *Environment and Planning A*, 24, 6, pp. 793-806.
- THINES G., LEMPEREUR A.  
1975 *Dictionnaire général des Sciences Humaines*. Ed. Universitaires, Paris, 1034 p.
- THRALL G.I. 1991 Production theory of land rent. *Environment and Planning A*, 23, 7, pp. 955-967.
- TOBLER W. 1976 Analytical cartography. *American Cartographer*.
- TOBLER W. 1977 *Bidimensionnal regression: a computer program*. University of Santa Barbara, CA, 71 p. ronéotées.
- TOBLER W. 1977 *The trilateration problem*. Notes de lecture, Santa Barbara, CA, 8 p. ronéotées.
- TOBLER W. 1978 Comparisons of plane forms. *The geographical Analysis*, vol. X, n° 2, pp. 154-162.
- TOBLER W. 1979 Smooth pycnophylactic interpolation for geographic regions. *Journal of the American Statistical Association*, vol 74, n°367, pp 519-536.
- TOBLER W. 1982 *Cartographic study of movement tables*. Communication. Statistical graphics mapping national computer Graphics association. Anaheim Ca., 4 p. ronéotées.

- TOBLER W. 1986 Pseudo-cartogramms. *The American Cartographer*, vol. 13, n° 7, pp. 43-50.
- UPTON G.J.G. 1985 Distance-weighted geographic interpolation. *Environment and Planning A*, 17, 5, pp. 667-671.
- USUELS DU ROBERT (Les)  
1979 Collection dirigée par MITTERAND H. et REY A.  
Le Robert, Paris, 11 vol.
- VAN DEN BERG L., VAN DEN MEER J.  
1988 Dynamics of urban systems : general trends and Dutch experiences. *Environment and Planning A*, 20, 11, pp. 1471-1486.
- VAN DER LAAN L. 1993 Regional differentiation in trade union density. *Environment and Planning A*, 25, 2, pp. 255-272.
- VIRILIO P. 1984 *L'espace critique*. Choix, essais. Bourgois éd., 188 p.
- WADDELL P., BERRY B.J.L., HOCH I.  
1993 Housing price gradients : the intersection of space and built form. *Geographical Analysis*, 25,1, pp. 5-19.
- WALLACE D.N., WALLACE R.  
1984 Structural fire as an urban parasite : population density dependence of structural fire in New York City and implications. *Environment and Planning A*, 16, 2, pp. 249-260.
- WARD D. 1984 The progressives and the urban question : British and American responses to the inner city slums 1880-1920. *Transactions of the I.B.G. New Series*, 9, 3, pp. 299-314.
- WARD P.M. 1993 The Latin American inner city : differences of degree or of kind ? *Environment and Planning A*, 25, pp. 1131-1160.
- WATERMAN S., KOSMIN B.A.  
1987 Residential change in a middle-class suburban ethnic population : a comment. *Transactions of the I.B.G. New Series*, 12, 1, pp. 107-112.
- WATERMAN S., KOSMIN B.A.  
1988 Residential patterns and processes a study of Jews in three London boroughs. *Institute of British Geographers*, 13, 1, pp. 79-95.
- WATKINS J.F., MORROW-JONES H.A.  
1985 Small area population estimates using aerial photography. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 51, 12, pp. 1933-1935.
- WEBER C. 1992 *Traitement de l'Information Satellitaire et Modélisation Urbaine : Contraintes de discrimination et reproductivité*. Programme National de Télédétection Spatiale - 90N50/0074 CNES/CNRS. 102 p + annexes; 40 figures.
- WEBER C. 1995 *Télédétection des milieux urbains et péri-urbains. Reconnaissance des formes urbaines : transfert méthodologique Nord-Sud*. Rapport d'activité (1ère année). Action de recherche partagée de l'AUPELF - UREF, X/1.20.04/01/94.18.0, 55 p. + 16 figures.
- WEBER C., HIRSCH J.  
1989 Intégration de données multi-sources : Les problèmes de désagrégation et agrégation de données dans une approche de Système d'Information Géographique. Fiabilité et utilisation optimum des informations. *SIGEO 89*. Rouen. 15 p.

- 
- WEBER C., HIRSCH J.  
1990 *L'information satellitaire en milieu urbain*. Rencontre Nationale du Génie Urbain, Lyon, 29-30 mars 1990.
- WEBER C., HIRSCH J.  
1990 *Image de la ville et composantes de son évolution*. 115e Congrès des Sociétés Savantes.
- WEBER C., HIRSCH J.  
1990 Estimation of variable with remote sensing data in a GIS approach, First European GIS conference, *EGIS'90* Amsterdam, 9-13 Avril 1990. pp 1140-1154.
- WEBER C., HIRSCH J.  
1991 Interpolation aréale : exemple de recombinaison d'ordres spatiaux différents à l'aide de données satellitaires. *SIG-GIS-CARTAO*, Paris, 28 - 31 Mai. pp 269-279.
- WEBER C., HIRSCH J.  
1994 *Comment obtenir des données comparables lorsque les règles de recensement changent ?* Communication à EGIS/MARI 1994. Mars/Avril 94, pp. 604-611.
- WEBER C. et al.  
1992 *Traitement de l'information satellitaire et modélisation urbaine : contrainte de discrimination et reproductivité*. PNTS CNRS, Strasbourg, 103 p.+ annexes.
- WEBER C., SERTIT  
1994 *Intégration de la cartographie des écosystèmes urbains dérivés de l'imagerie SPOT dans le SIG de la Ville de Mulhouse*. Rapport final. Contrat entre la Ville de Mulhouse et les Ministères de l'Équipement et de l'Environnement, 86 p. ronéotées.
- WEBER C., HIRSCH J., SERRADJ A.  
1993 *Complex area-based areal interpolation : a modelling approach for surface models of population*. Soumis dans le cadre des réunions Changement d'échelles dans les modèles de l'environnement et de la télédétection du GSTS. Edition CNRS, pp. 155 - 167.
- WEBER C., HIRSCH J., SERRADJ A.  
1995 *Pour une autre approche de la délimitation urbaine*. AUPELF-UREF, Télédétection des milieux urbains. Liège. pp 225-239.
- WEBER C., HIRSCH J., SERRADJ A.  
1996 *Limites urbaines*. Espace géographique des villes, dir. H. REYMOND, Collection Villes, Paris, Anthropos, à paraître.
- WERCZBERGER E., BERECHMAN J.  
1988 Incorporating neighborhood effects into spatial allocation models. *Environment and Planning A*, 20, 5, pp. 595-607.
- WHITE R., ENGELEN G.  
1993 Cellular automata and fractal urban form : a cellular modelling approach to the evolution of urban land-use patterns. *Environment and Planning A*, 25, pp. 1175-1199.
- WHITEHAND J.W.R., LARKHAM P.J.  
1991 Housebuilding in the back garden : reshaping suburban townscapes in the Midlands and South East England. *Area*, 23, 1, pp. 57-65.
- WILKINS C.A., SHAW J.A.  
1969 An example to illustrate the "average" nature of Clark's law of urban populations. *Journal of Regional Science*, 9, 2, pp. 255-259.

- 
- WINSBOROUGH H.H. 1962 City growth and city structure.(incomplet). *Journal of Regional Science*, 4, 2, pp. 35-45.
- WRIGHT J.K. 1936 A method of mapping densities of population with Cape Cod as an example. *The Geographical Review*, vol. XXVI, pp. 102-110.
- YI P., CHAN Y. 1988 Bifurcation and disaggregation in Lowry-Garin derivative models : theory, calibration, and case study. *Environment and Planning A*, 20, 9, pp. 1253-1267.
- ZHANG W.B. 1988 The pattern formation of an urban system. *Geographical Analysis. Research notes and Comments*, 20, 1, pp. 75-84.
- ZIELINSKI K. 1979 Experimental analysis of eleven models of urban population density. *Environment and Planning A*, 11, pp. 629-641.
- ZIELINSKI K. 1980 The modelling of urban population density : a survey. *Environment and Planning A*, 12, 2, pp. 135-154.

