

# INTRODUCTION D'UN ESPACE COGNITIF AU SEIN D'UN SYSTEME DYNAMIQUE DE L'ETALEMENT URBAIN : APPLICATION A L'ILE DE FRANCE

## Résumé

L'exploration de l'étalement urbain est au cœur de la Géographie comme de l'Economie géographique depuis le début des années 80, période à laquelle se sont amorcées les grandes évolutions du périurbain. De l'ensemble de ces travaux, on ne retient que très peu d'articles spécifiquement réservés à l'étude des modélisations de l'étalement.

Sur la base d'un formalisme déjà défini dans un précédent article, ce papier se propose d'enrichir la modélisation par l'ajout d'une nouvelle hypothèse forte : substituer l'espace physique par un espace cognitif. Ce choix nécessite de fait un travail d'investigation empirique et théorique important pour la définition de ce nouveau principe.

L'article envisage la nouvelle modélisation conséquente et dégage ensuite les intérêts de ce nouveau système basé sur une métrique non euclidienne au regard d'une définition plus conventionnelle de la dynamique. Une double application est proposée pour l'Ile de France.

**Mots clés** : dynamique, géométrie non euclidienne, cognition, modélisation de la croissance urbaine, simulation

## Abstract

The exploration of the urban sprawl is at the heart of the Geography as the geographical Economy from the beginning of the 80s, period in which began the big evolutions of the outer-urban. Of all these works, we hold only very few articles specifically reserved for the studies of the modelling of the sprawl.

On the basis of a formalism already defined in a previous article, this paper suggests enriching the modelling by the addition of a new strong hypothesis: substitute the physical space by a cognitive space. This choice requires actually an empirical and theoretical work of investigation important for the definition of this new principle.

The article envisages the new consequent modelling and loosens then the interests of this new system based on a not Euclidian metrics with regard to a more conventional definition of the dynamics. A double application is proposed for the Ile-de-France.

**Keywords** : Dynamics, non Euclidian geometry, cognition, urban growth modelling, simulation

## Introduction

La question de l'étalement urbain est souvent envisagée de manière plus pratique que théorique comme le montre la plupart des travaux actuels. Souvent, ces études visent donc avant tout à explorer les formes de l'étalement à travers l'espace.

D'autres en revanche, préfèrent explorer la question d'un point de vue plus théorique. Ainsi, abordant les facteurs, Margo (1992) montre qu'une partie de l'extension des banlieues serait imputable à la hausse du revenu des ménages (40% pour les USA). Brueckner ou Fansler

(1983), quant à eux, supposent que la croissance de la population serait principalement à l'origine de l'étalement urbain. Enfin Leroy et Sonstelie (1983) émettent l'hypothèse que les innovations techniques, en matière de transport, auraient pour conséquence un arbitrage entre une relocalisation en périphérie ou au centre ville (concentration).

Les formes d'étalement varient en fonction des territoires, comme le montrent les travaux de Newman et Kenworthy (1989, 1992). Les auteurs analysent la liaison entre forme urbaine et type de mobilité. La théorie des 3 âges de la ville<sup>1</sup> explore ainsi la question de la voiture face à l'urbanisme des villes :

Trois modèles se dessinent à l'échelle des continents : la ville dite californienne, largement dépendante de l'automobile et très étendue, peu dense, la ville européenne, construite principalement à partir des transports en commun (dont les évolutions sont encadrées par les pouvoirs publics) et enfin la ville asiatique (très dense et très congestionnée).

Si le modèle californien semble dominer à l'échelle mondiale, on observe depuis les années 1970, en Europe, une nouvelle forme d'urbanisation sous forme éparpillée dans les villages autour des grandes agglomérations. Pour Ewing (1997), ce style de croissance en *leapfrog*, avec des discontinuités, est aussi pleinement d'actualité aux Etats Unis. Ce phénomène de périurbanisation touche actuellement la plus grande partie du territoire français.

Aujourd'hui relativement connue dans ses formes, la périurbanisation peut être modélisée. Plusieurs types d'études sont cet esprit.

On distinguera tout d'abord l'étude par les densités de population, qui est la pionnière dans l'analyse des formes urbaines. Sur la base des travaux fondateurs d'Alonso (1964), cette question fut d'abord rattachée au modèle concentrique (Clark 1951, Newling 1969, Mills 1970, Bussière 1975) avant de trouver une nouvelle issue polycentrique avec le développement de l'Economie Géographique dans les années 1980 et 1990 (Wang, Zhou 1999, Small., Song 1994, Song 1994, Mc Donald, Prather 1994, Mc Donald 1987, Mahmassani, Baaj, Tong 1988).

D'autres voies ont, depuis, été explorées comme celles des fractals (Batty et al. 1986, 1994, Frankhauser 1997) permettant alors d'intégrer la notion d'échelle au sein même de la description des formes.

Plus récentes, les études systémiques ont sans doute encore plus contribuées à améliorer la connaissance de l'urbain. Elles comprennent les études par équations différentielles et les automates cellulaires. Ces derniers permettent de suivre les évolutions à l'échelle d'une ville (Lajoie et al. 2008) voire de simuler la dynamique de l'occupation du sol à des échelles très fines (Dubos Paillard, Germond, Langlois 2003, Antoni 2003).

Notre approche intervient à ce niveau mais se positionne plus en amont. Quatre hypothèses viennent sous tendre notre travail.

- La première suppose que les masses de population sont sources de flux. Dans sa forme la plus simple, le modèle gravitaire fonctionne selon une analogie avec la loi de la gravitation universelle. Le modèle employé ici en est une généralisation.
- La seconde hypothèse ajoute la mécanique du flux (modèle macroscopique du trafic). Là encore, il est question d'une analogie avec la physique. Ce modèle introduit la fluidité et la congestion au sein des réseaux.
- La troisième hypothèse est encore une analogie avec les lois de la physique. Elle apporte une réponse simple à la dynamique des populations en supposant que les déplacements

---

<sup>1</sup> la ville à 5 km ou ville pedestre, la traked city ou ville du rail (transport en commun métro) et enfin la rubber city ou ville caoutchouc dont les formes sont dessinées par la voiture.

sont, dans le temps, la résultante du jeu des forces d'attraction en présence dans notre espace.

- Enfin, la dernière hypothèse envisage un espace non euclidien sur lequel repose nos dynamiques. Il est construit sur la cognition des espaces et principalement les questions de proxémique.

De ces quatre hypothèses, la plus importante est sans doute celle de l'espace cognitif. Quelles sont aujourd'hui les voies adoptées dans la littérature pour envisager cette question ?

Comment l'aborder, comment modéliser ce type d'espace ? Quel pourrait être alors l'apport de la cognition dans une approche formelle systémique ? Nous émettons l'idée que le processus de construction urbaine et le fonctionnement des villes, tant sur le temps long que court, obéit à des lois dont la géométrie n'est pas celle de l'espace physique. Ainsi, on observera que les déplacements domicile-travail se fondent largement sur des effets cognitifs de type « tunnel. En ce qui concerne le temps long, l'installation des urbains semble, comme l'observe classiquement A.Moles (1972) et d'autres phénoménologues, répondre à des logiques encore non euclidiennes (un monde construit à l'image de nos perceptions). En cela, la géométrie fractale employée pour décrire la forme urbaine pourrait être l'expression de ces homothéties successives de l'espace-temps. Dans ces conditions, comment appréhender correctement la dynamique urbaine dès lors que l'on reste sur des fonctionnements basés sur la géométrie euclidienne ?

Mais concrètement, quel apport peut-on espérer pour notre modélisation ? La question se pose alors en termes de limite ou de frontière. Toute la nuance entre l'approche physique classique et cet espace cognitif réside en une solution continue pour des problèmes de rupture d'espaces intermédiaires. En cela, la nouvelle approche, au regard d'une précédente version, envisage des variations importantes des dynamiques (non linéaires) entre la grande périphérie et l'hypercentre de la ville. Quand l'on définit une rupture entre l'urbain et le périurbain au niveau des densités de population, ne pourrait-on pas y voir une expression d'un changement graduel des métriques de type cognitives qui serait sous-jacent dans la fonction de densité. La justification théorique d'une telle affirmation proviendrait de notre propension à ne pas percevoir de la même manière la ville et la campagne. La densité serait une des clés de cette différenciation.

Sur la base de ces principes généraux, est-il possible d'aller plus loin et poursuivre ainsi par une véritable géométrie des espaces-temps cognitifs ? L'enjeu le plus important serait alors d'introduire cette notion au sein d'un système différentiel.

La justification théorique d'une nouvelle géométrie pourrait-elle alors se voir confirmée au regard d'une approche plus classique euclidienne ? Y verrait-on un certain avantage ? Quels enseignements pourrait-on en tirer quand à la forme urbaine future ? Les dynamiques de l'étalement en seraient-elles changées ?

Pour répondre à ces questions, cet article propose trois parties ; une première où nous évoquerons les hypothèses retenues (en particulier un état de l'art sur l'espace cognitif, sa définition, sa modélisation), la seconde où il sera question à proprement parlé de la démonstration de notre système et enfin une dernière partie, où nous adopterons un point de vue plus régionaliste où nous procéderons à une comparaison entre le modèle initial et le modèle raffiné non euclidien.

## 1. Espace cognitif et autres hypothèses de base de la modélisation

Depuis le milieu des années 70, il est clairement montré que l'espace est un acteur en tant que tel dans les dynamiques du peuplement. Il intervient sous la forme de ce que l'on qualifie d'*espace cognitif*. Ainsi, comprendre la dynamique de la ville et plus généralement les mécanismes de l'étalement urbain implique aussi d'intégrer ce type d'espace au sien de notre approche. Comment l'envisager ? Est-il semblable à l'espace physique ? En existe-t-il des variantes selon les individus ? Nous proposons de commencer cet exposé par des définitions, puis de cerner plus en avant, à l'aide d'une enquête, notre espace pour enfin finir par une définition, que nous retiendrons pour la suite de notre travail. Enfin, nous terminerons ce paragraphe par une définition rapide des hypothèses initiales autres que celles qui sont relatives à la cognition.

### **1.1. Généralités : de l'espace physique à l'espace cognitif**

*L'espace cognitif* apparaît principalement dans les études de psychologie et de géographie à partir des années 70 avec les travaux de J.Pailhous (1970). Ce dernier auteur démontre que l'action semble sous tendue par une image mentale du lieu. Cette période voit le jour de théories psychologiques centrées sur le sujet et plus particulièrement de théorie sur l'image mentale.

Toutefois, pour bien comprendre ces écrits, il faut remonter à 1960 avec K.Lynch. Ce dernier note alors que « l'image de l'espace est produite à la fois par les sensations immédiates, par le souvenir de l'expérience passée ». L'acte de perception comprend donc une dimension inconsciente.

Plus récemment, on a observé deux visions sensiblement différentes sur le sujet :

- Pour Z.W.Pylyshin (1981), il n'existe pas de carte mentale mais des représentations verbales conceptuelles et prépositionnelles. Cette approche est aujourd'hui plus ou moins remise en question.
- Pour S.M.Kosselyn (1981), en revanche, « La représentation mentale serait comme une image, c'est-à-dire bidimensionnelle, continue, analogique, dans ce cas les configurations cognitive seraient bien comme des cartes » « La perception de l'espace est donc essentiellement une appréhension visuelle, l'exemple de représentation internes de l'espace sous forme de carte est conditionnées par la vision ».

L'espace cognitif est donc bien réel, s'impose sur une cartographie spécifique.

Selon C.Cauvin (1984), il existe trois types d'espace : l'espace physique ou chorotaxique, l'espace fonctionnel et enfin l'espace cognitif.

#### *1.1.1. L'espace physique ou chorotaxique*

E.Vurpillot (1971) le définit comme « le lieu des actions et des déplacements des êtres vivants ». Cet espace est « l'absolu » de Poincaré et P.Forer (1978) observe que les attributs sont « statistiques, indépendants des objets qui s'y trouvent et non reliés aux processus qui le traversent ». Pour L.S.Liben (1981), c'est « une espace conçu dans un cadre qui existe indépendamment de ce qu'il contient ».

Pour C.Cauvin (1984), l'espace physique se définit sommairement comme « l'espace concret, celui que l'on peut toujours mesurer d'une manière identique, quel que soit le lieu ou le moment ».

L'auteur reprend par la suite par une définition plus précise de l'espace physique : « L'espace chorotaxique est l'espace étendue qui contient l'homme et l'entoure, déterminé par les lieux et les arrangements entre les lieux avec des attributs spécifiques mesurables universellement (mais reconnu en fonction de motivations particulières...Il peut être représenté sur le plan sous la forme d'une carte de localisation ».

### 1.1.2. Espace fonctionnel

Cet espace peut par exemple être la distance-temps ou l'espace coût.

J.C.Muller (1982) opte pour la définition générale suivante « espace dans lesquels l'homme vit ».

L.S.Liben (1981) considère que « ce sont des espaces relatifs où l'espace change si la position des objets ou l'observateur change ». D.Wood (1978) parle même de « cartographie de la réalité »

C.Cauvin le définit au final comme il suit : « Les espaces fonctionnels sont des espaces dérivés de l'espace chorotaxique, modifié par les caractéristiques possibles retenues pour les lieux et les liens entre les lieux. Ce sont les espaces où peuvent s'effectuer les mouvements, le déplacement en fonction d'un but donné. Ils peuvent être matérialisés par une carte de la réalité aux déformations plus ou moins marquées, irrégulières mais mesurables ».

### 1.1.3. L'espace cognitif

Pour définir *l'espace cognitif*, C.Cauvin propose de partir de l'espace sensoriel. A.Bailly (1977) note alors que « L'individu se trouve placé dans un univers matériel qu'il perçoit à travers tous les sens ». On définit alors l'espace perçu

D.C.D.Pocock (1978) note que « La perception est une étape intermédiaire dans le processus hiérarchique de la conscience sensorielle entre la sensation qui est la réponse initiale non organisée à un stimulus, et la cognition qui représente une conscience générale, un résumé de tous les stimuli précédents, aucun d'eux n'ayant besoin d'être réellement présents ».

C.Cauvin propose une définition synthétique de cet espace perçu :

« Il est donc l'espace fonctionnel avec lequel on a eu une expérience sensorielle directe, à un moment donné, espace auquel on a prêté attention et dont on a gardé certaines caractéristiques en mémoire. ».

Il faut donc bien faire attention et ne pas confondre cet espace avec l'espace cognitif a proprement parlé. Ce dernier est « l'espace fonctionnel, reconnu par le sujet, même s'il n'a pas « vécu » cet espace, à l'aide des informations perçues ou des croyances émises en l'absence de cet espace, et des informations obtenues par des éléments non directement en relation avec cet espace. Il donne en nous ce que l'on appelle une représentation cognitive de l'espace ».

Mais pour aller plus loin encore, C.Levy Leboyer (1980) note que cette représentation mentale est « à la fois une abstraction et une synthèse réalisée à partir des expériences vécues, des perceptions répétées et des déplacements dans l'environnement ». « Toute représentation cognitive de l'environnement est déterminée... par quatre besoins fondamentaux et communs à tous : reconnaître, prédire, évaluer et agir (Kaplan, in Levy Leboyer 1980).

### 1.1.4. Eléments de différenciation des espaces cognitifs

On observera trois types de facteurs pour différencier ces espaces :

1/ les facteurs liés à l'individu :

Il s'agit autant du contexte familial, de l'enfance donc de l'individu en tant que tel, de l'âge, du sexe et du statut social matrimonial. On ajoutera à cela le contexte socio-éco-politique ainsi que les caractéristiques personnelles. P.Burnett (1978) observait ainsi que les distances intra urbaines étaient surestimées chez les individus aux revenus les plus faibles. S.Coren et

C.Porac (1976) note, quant à eux, qu'il existe un lien élevé entre distance cognitive et influence politique avec un  $R^2$  de 0.95.

## 2/ Les facteurs environnementaux

On observe que la forme des objets influe sur la manière dont on se les représente. Ainsi, une route tortueuse sera largement surestimée de même que la taille d'une grande ville.

3/ Enfin, il reste les facteurs liés à l'action, la manière de pratiquer l'espace.

Si d'un point de vue théorique, on voit bien, à présent, comment définir nos différents termes et en cerner les contours, qu'en est-il dès lors que l'on cherche concrètement à en comprendre les principes. Sur ce point, l'enquête semble la voie la plus raisonnable pour poursuivre l'investigation.

### **1.2. Définir l'espace cognitif : une démarche empirique**

Il est difficile a priori de fixer les règles strictes pour notre espace cognitif. Aussi, on ne peut qu'émettre des suppositions d'un point de vue théorique. L'enquête, conduite d'une manière scientifique permet d'approcher les principes et les grandes logiques présidents au cognitif.

#### *1.2.1. Grands principes de l'enquête et premier traitement*

##### 1.2.1.1. Base de l'enquête

Commençons d'abord par aborder la composition de l'échantillon. Il s'agit de 37 individus appartenant toutes au même service du Conseil Général du Val de Marne. Le service SCESR (Service de Coordination, d'Exploitation et de Sécurité Routière) comprend trois subdivisions : Parcival, Etude, Technique et Coordination et enfin Sécurité Routière.

L'échantillon est plus ou moins homogène avec des différences au niveau de la catégorie des personnels (A, B ou C). Il est supposé que la plupart des agents ont une connaissance correcte à très bonne de l'ensemble du département de part leur métier (régulation des feux tricolores ou études portant sur les routes). Cette activité se manifeste par de fréquents déplacements sur l'ensemble du territoire.

L'enquête est réalisée sur la base du volontariat en différée par rapport à la demande.

Il est demandé aux enquêtés de réaliser une « cartographie du Val de Marne à main levée » à partir d'une liste de lieux et de grands axes de circulation dans le département du Val de Marne.

La figure suivante reproduit la feuille adressée à chaque agent du service.

Cette enquête est strictement anonyme et ne débouche en aucune façon sur des résultats personnels.

## Représentation du Département du Val de Marne

Pouvez-vous, sans vous aider d'un atlas ou d'une carte, sur une feuille vierge de type A4, indiquer votre lieu de domicile, votre ancienneté dans le service en années ainsi que représenter les éléments suivants :

Axes routiers et ferrés:

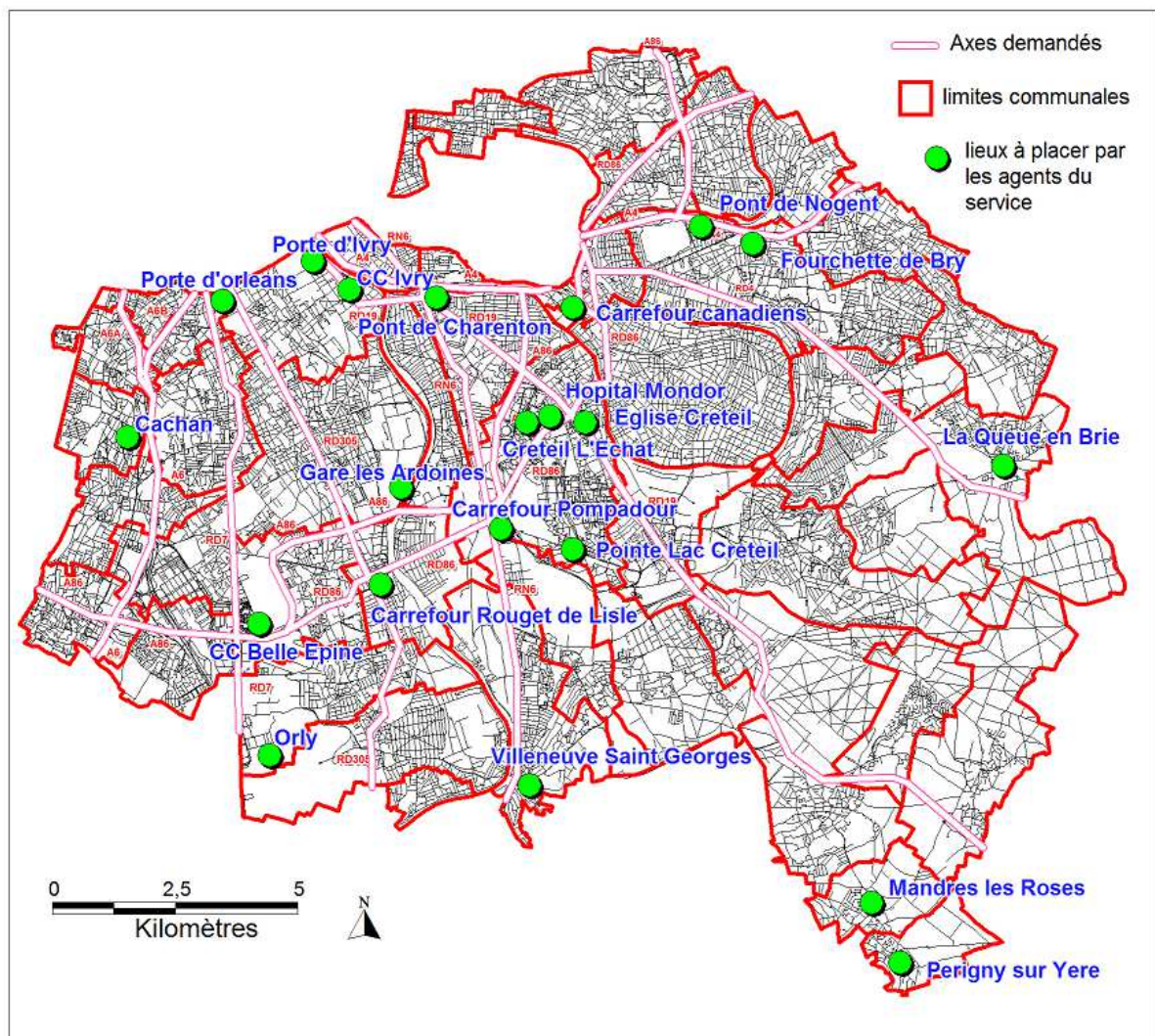
RER A, B et C

RD4, RD86, RD19, RD7, RD5, RN6, A86, A6A, A6B, A6, A86, A4

Les lieux suivants

- Centre commercial Belle Epine
- Pointe du Lac de Créteil
- Immeuble Pyramide Créteil
- Périgny sur Yerres Centre-ville
- Porte D'Ivry
- Carrefour Rouget de Lisle
- Gare Cachan
- Gare Ardoines
- Porte d'Orléans
- Eglise de Créteil
- Hôpital Henri Mondor
- Pont de Charenton
- Ivry Centre Commercial
- Aéroport Orly
- Pont de Bry sur Marne
- Carrefour Fourchette de Bry
- Pont de Nogent sur Marne
- Carrefour des Canadiens
- Carrefour Pompadour
- La Queue en Brie (Centre-ville)
- Mandres les Roses (Centre-ville)
- Villeneuve Saint Georges (pont de...)

**Figure 1.** Enquête distribuée à l'ensemble des agents du service.



**Figure 2.** Localisation réelle de l'ensemble des éléments à placer sur la carte

Le choix des noms de lieux et des grands axes de circulation n'est pas aléatoire. Pour les axes, nous avons pris les plus grands axes structurants du département afin que l'enquête ne soit pas troublée par une feuille vide pour placer les noms de lieux. Il s'agit donc plus d'un cadre. Deux type d'axes ont été retenus : les grandes Départementales (RN et RD inférieures à 10) et enfin les lignes de RER.

Pour les noms de lieux, Le choix s'est porté sur des stations remarquables pour le RER intervenant dans des études du service, et pour les routes, soit sur des grandes infrastructures connues de tous (Orly) ou les carrefours cruciaux pour le service (Ex le Pont de Charenton ou le Pont de Nogent).

Enfin, il reste le problème de la taille de la feuille, l'option préconisée est A4, mais nous aurions pu tout aussi bien opter pour du A3. L'important était que les agents réalisent des cartes sur le même format afin de pouvoir comparer par la suite les distances.

Une petite note précise que dans le cas où l'agent ne saurait pas positionner un lieu alors il ne l'indiquera pas sur la carte afin d'éviter les mesures aberrantes.

#### 1.2.1.2. Première exploitation des résultats

Les différentes cartes produites sont analysées individuellement. Elles sont scannées et intégrées dans un système d'information géographique. L'image n'est pas calée afin de disposer d'un repère propre à l'image (donc non terrestre).

On repère ensuite l'ensemble des points en créant une couche « déformation ».

La macro distance de mapinfo permet ensuite de calculer l'ensemble des distances métriques à vol d'oiseau de point à point. On obtient donc une matrice carrée sous la forme d'une liste avec des identifiants propres pour chaque distance.

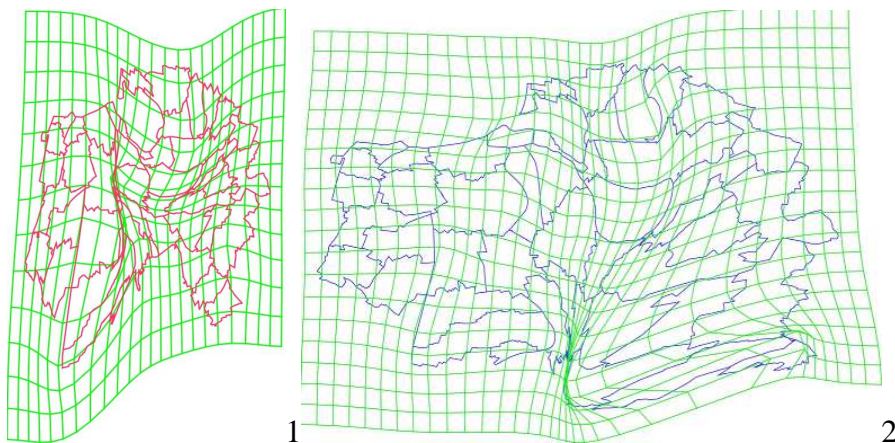
L'ensemble est ensuite exporté sous Excel pour traitement ou transformés en shp pour la réalisation de cartes mentales avec le logiciel Darcy 2.0.

### 1.2.2. Les cartes de Darcy : Principal enseignement des différenciations internes de l'échantillon

L'approche individuelle met en lumière des « lois » générales en matière de différenciations interpersonnelles.

La première d'entre elle est sans doute l'enracinement ou encore ce que A.Moles (1972) définissait comme « loi d'appropriation ». L'espace est d'autant mieux perçu qu'il est occupé dans le temps par l'individu. L'absence efface progressivement cette connaissance.

C'est sans doute le principal enseignement de nos cartographies. Nous présentons ici deux cartes réalisées par le logiciel Darcy, l'une pour un agent dont la connaissance du département est récente (moins de 6 mois) et une autre pour un personnel qui y réside et y travaille depuis 20 ans.



**Figure 3.** Deux images mentales du département du Val de Marne (à gauche agent récent dans le service, à droite agent ancien dans le service)

Dans le cas n°1, la déformation porte sur la quasi-totalité de l'espace de référence avec une exagération des espaces proches du lieu de travail et d'emploi. L'ensemble est contracté et laisse apparaître un écrasement sur la partie centrale du département. La partie est quant à elle largement sous-estimée.

Cas n°2 : L'agent concerné est présent dans le Val de Marne depuis de nombreuses années et dispose à ce titre d'une connaissance bonne à très bonne des métriques de l'espace. La représentation du département correspond approximativement à la forme réelle pour les  $\frac{3}{4}$  de l'espace. Toutefois, on remarque, y compris pour cet individu, l'existence de « zones d'ombre ». Les portes de Paris sont ainsi moins bien évaluées et surtout les zones périphériques moins urbaines du Sud Est.

### 1.2.3. Choix d'une métrique : comparaison de la distance chorotaxique et de la distance cognitive

La thèse d'Etat de C.Cauvin (1984) a bien montré l'existence d'une forte corrélation entre espace chorotaxique et cognitif. Si au niveau de l'individu, la corrélation entre les deux types d'espace est faible (0.481), il en est tout autrement à un niveau agrégé (0.986). L'auteur, dans ce même volume, propose de comparer l'ajustement d'une série de fonctions pour appréhender le lien entre la distance chorotaxique et la distance cognitive.

$Y = aX + b \quad R^2 = 0.986$
$\log Y = a \log X + \log b \quad R^2 = 0.969$
$\log Y = aX + \log b \quad R^2 = 0.958$
$Y = a \log X + b \quad R^2 = 0.921$
$Y = aX^2 + bX + C \quad R^2 = 0.989$

**Tableau 1.** Fonctions testées par C.Cauvin (1984)

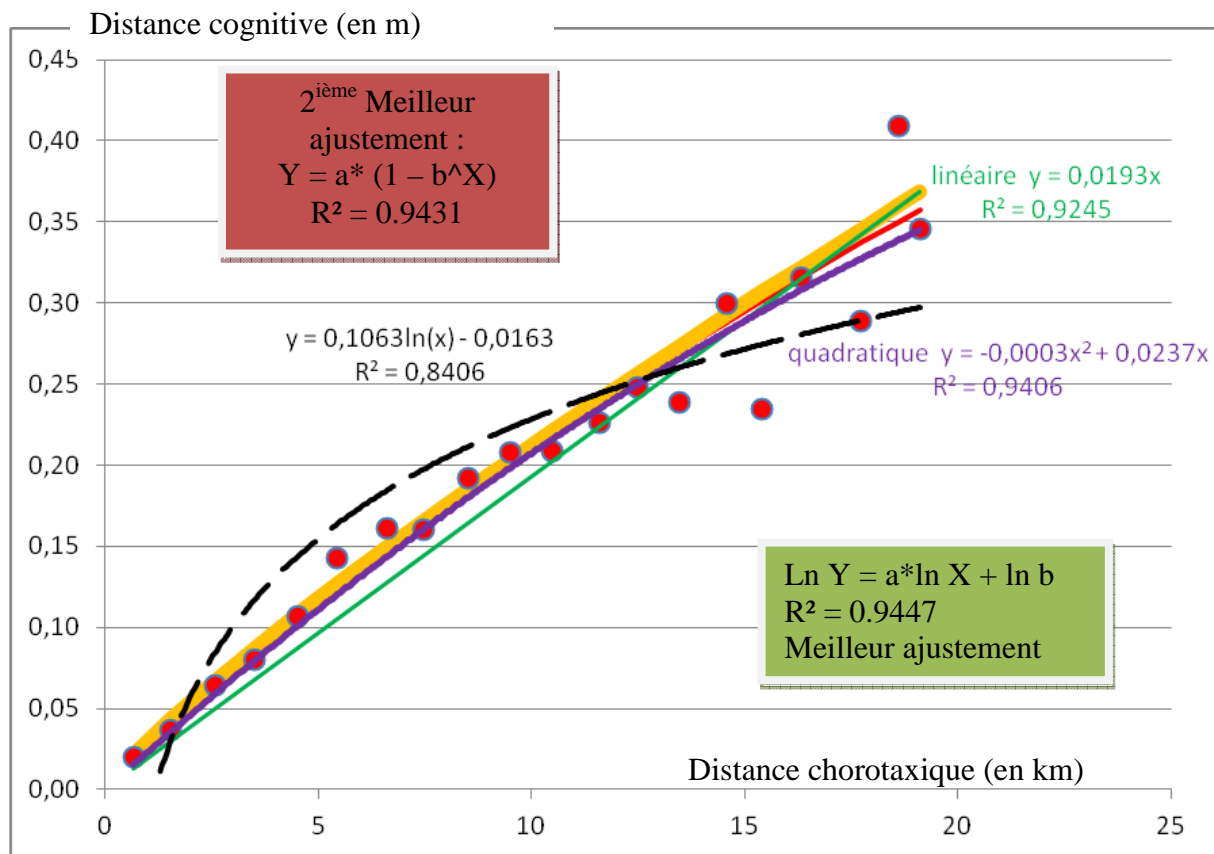
Notre objectif, au regard des enquêtes réalisées au sein du Département du Val de Marne, consiste à vérifier la cohérence de ces fonctions mais également les confronter avec une autre fonction que nous définirons par la suite dans notre étude.

$$Y = a(1 - b^x) \quad [1]$$

Pour ce faire, nous avons procédé de la manière suivante :

- 1) acquisition des données de distances cognitives (vol d'oiseau) au regard des distance (vol doiseau) chorotaxique.
- 2) Fusion de l'ensemble des données individuelles de distance
- 3) calcul de moyennes de distance par pas de 1 km de distance physique.

On observe alors une bonne corrélation à la fois au niveau des individus 0.88 en moyenne mais le meilleur résultat est donné au niveau agrégé. Ici, ont été testées la plupart des fonctions de C.Cauvin, auxquelles nous avons ajouté notre modèle [1]



**Figure 4.** Comparaison des ajustements de fonctions entre l'espace chorotaxique et l'espace cognitif

Sur l'ensemble des fonctions envisagées, c'est bien le modèle bi-logarithmique qui semble l'emporter. Nous noterons néanmoins que l'ajustement, au regard de la distance en exponentiel  $b^X$ , est très voisin (à 0.0016 près) donc les deux fonctions peuvent être a priori retenues. Nous faisons le choix de la fonction en  $b^X$ . La suite de notre travail explicitera plus en détail les éléments qui ont présidés à ce choix.

#### 1.2.4. De la distance cognitive à la distance égocentrée

On a pu montrer que la distance chorotaxique s'ajustait à partir de deux fonctions :

- 1)  $\text{Ln } Y = a \cdot \text{Ln } X + \text{Ln } b$  soit  $Y = b \cdot X^a$
- 2)  $Y = a \cdot (1 - b^X)$

Du point de vue de la définition purement mathématique, en positionnant des points A et B avec respectivement  $X_A$  et  $X_B$  les abscisses et  $Y_A$  et  $Y_B$  les ordonnées, cela revient à dire que :

$$Y = a \left( 1 - b^{\sqrt{(X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2}} \right)$$

$$Y = b \left( (X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2 \right)^{1/a}$$

Le raisonnement présenté porte sur l'ensemble des distances mais il est clair que la cognition est le fait de l'individu. Aussi, dès lors qu'on l'envisage, il faut donc se reporter à une référence spatiale qui n'est pas le centre du repère géographique (arbitraire) mais bien le « moi » de l'individu. Tout se produit comme si pour notre distance donnée, l'un des points était fixé.

En fixant par exemple le point A comme centre de repère, on obtient une géométrie de la « centralité » ou « individu centrée », cela conduit à supprimer la coordonnée de l'expression.

$$Y = a \left( 1 - b \sqrt{X_B^2 + Y_B^2} \right) \text{ ou } Y = b \left( X_B^2 + Y_B^2 \right)^{1/a}$$

Mathématiquement, nous en avons l'expression, mais comment alors justifier plus précisément cette approche spécifique de la cognition.

### 1.3. La distance cognitive réduite à la « géométrie de la centralité » : l'approche égocentrée

Contrairement à l'approche classique des sciences physiques ou des mathématiques, l'approche de l'espace des sciences humaines relève de l'homme. Elle devrait donc considérer que la métrique du lieu serait relative à l'individu. Dans ce contexte, toute perception du monde se trouve guidée par une vision du monde centrée sur le « moi ».

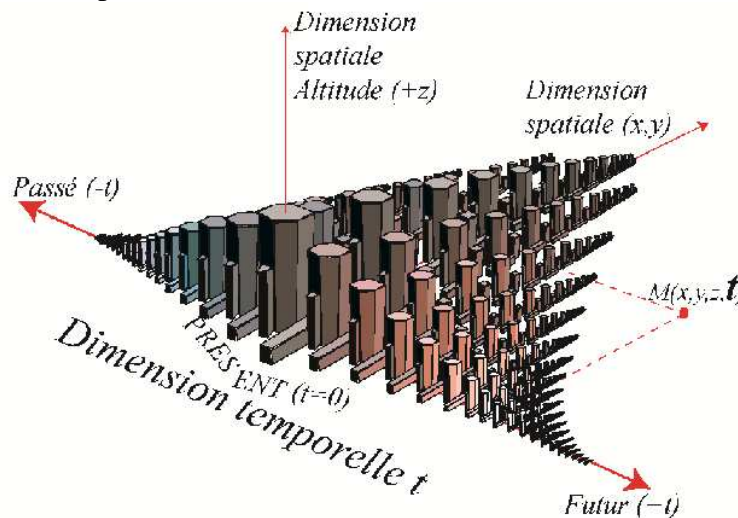
#### 1.3.1. La Phénoménologie et la proxémique, des justifications en soit d'une modélisation de la cognition

Dans son ouvrage, Psychologie de l'espace, A.Moles (1972) propose de définir l'espace comme « égocentré », c'est-à-dire centré sur le corps de l'individu. La notion de proxémique est de ce fait fortement développée pour montrer comment l'individu déforme les espaces en fonction de la distance au corps.

Deux éléments distincts définissent alors la taille de l'objet dans l'esprit de l'individu :

- Le rapport au temps et plus précisément la distance au présent
- Le rapport à l'espace ou encore la distance au corps.

En conséquence, le même objet n'apparaîtra pas de la même manière à l'esprit en fonction de sa position spatiale et temporelle à l'individu.



**Figure 5.** Taille de l'objet en fonction de la distance au corps et de l'éloignement au présent

#### 1.3.2. Quantifier la taille des espaces

Sur des petites distances, la vision contribue dans une certaine mesure à donner *la taille des espaces*<sup>11</sup> et cela est directement mesurable. Plus on s'éloigne de l'individu, plus les distances sont grandes pour une représentation équivalente dans l'esprit. On en déduit que la taille des espaces diminue donc avec la distance au corps.

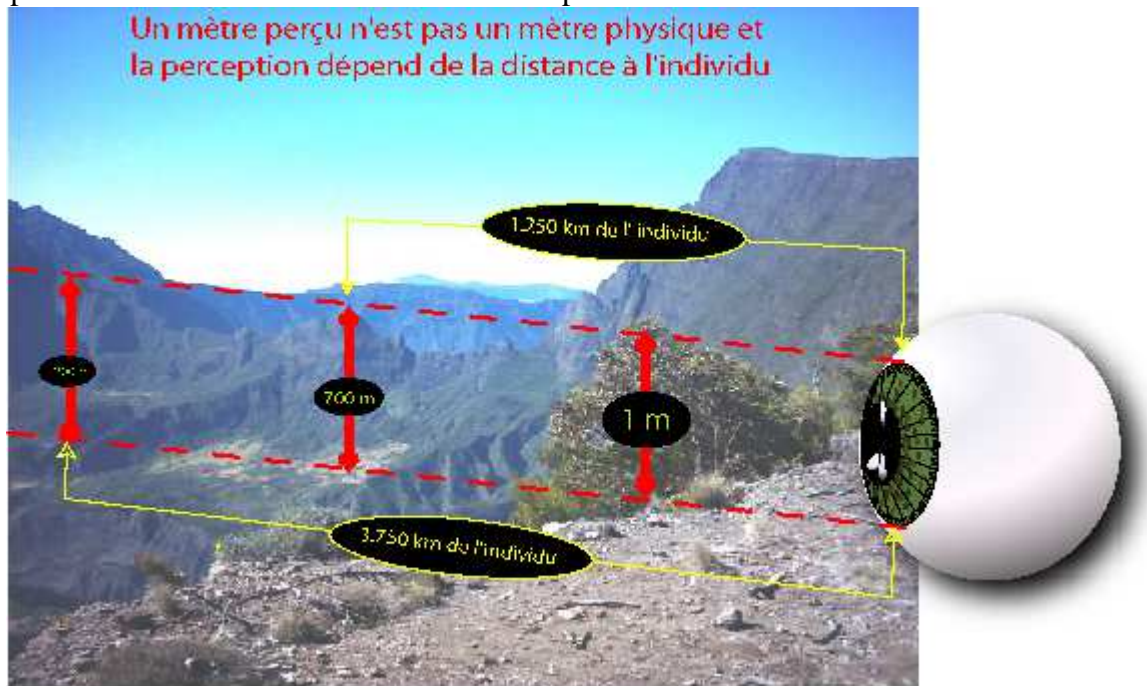


Photo: Ile de la Réunion - Col du Tardif - 97400 - Réunion

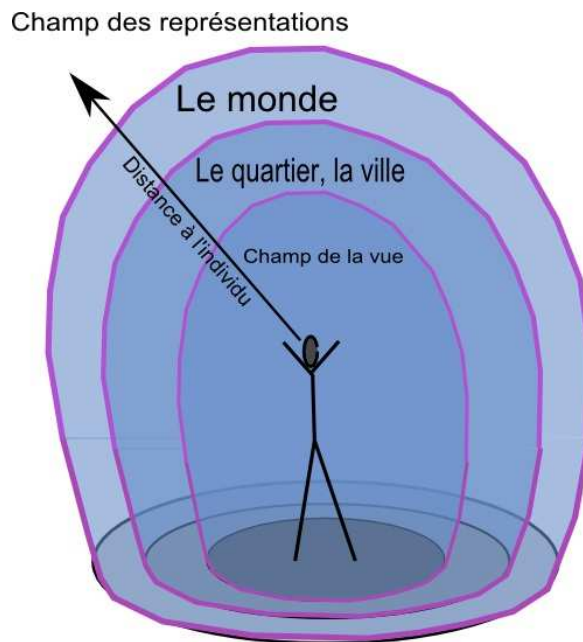
**Figure 6.** La contraction des distances physiques dans le cerveau, cliché Ile de la Réunion cirque de Mafate

Si cette hypothèse est valide pour les distances les plus courtes, qu'en est-il dès lors que l'on s'éloigne encore de l'individu et que l'on sort de son champ de perception visuelle ?

A.Moles et E.Rohmer (1972) répondent à cette question en développant le concept de « coquilles de l'homme ».

L'individu développerait alors inconsciemment 9 « peaux » autour de lui. *Les coquilles de l'homme* se trouveraient emboîtées les unes dans les autres, allant de l'échelle micro (le geste) à l'échelle macro (la géographie des territoires). L'ensemble du territoire ne pourrait pas être affecté par des ruptures, ce qui suppose une continuité complète au niveau des représentations mentales.

<sup>11</sup> On définira par taille d'espace la valeur métrique dans l'esprit de l'unité de distance kilométrique physique ou chorotaxique.



**Figure 7.** « Les Coquilles de l'homme »

Dans un article plus récent (1992), A. Moles expose la notion de proxémique<sup>12</sup> comme « loi » définissant nos comportements. Elle réside, selon l'auteur sur le postulat suivant :

*Ce qui est proche nous paraît plus important*

V.Schwarch (1993) met un nom à cela en énonçant alors de « loi d'airain » ou de proxémique, une loi de la philosophie de la centralité, où chaque individu est le centre du monde. La formulation qui en découle est la suivante : « L'importance de toute chose diminue avec sa distance au point ici ».

Pour cette loi, A.Moles propose même une formalisation de type  $Y = 1/X$  avec  $Y$  *taille de l'espace* et  $X$  distance physique à l'individu.

Plus généralement, il est tout à fait envisageable et même préférable<sup>13</sup> de proposer pour cette même fonction une logique exponentielle négative de type :

$$L(x) = Lr^{-x} \quad [2]$$

Avec  $L(x)$  *taille d'un espace* ou métrique du mètre physique,  $L$  le mètre physique,  $r$  un facteur de réduction et  $x$  distance physique à l'individu.

### 2.1.2. De la métrique cognitive à la distance cognitive

La différence entre *taille d'espace* et *distance cognitive* tient à un processus d'agrégation.

*La distance cognitive se réalise par la somme des tailles d'espace entre l'individu et l'infini des distances à l'individu.*

<sup>12</sup> La proxémique vient du terme proxémie introduit par Hall 1963. La proxémie est la distance physique qui s'établit entre des personnes prises dans une interaction

<sup>13</sup> Notons à ce titre que le choix d'une fonction hyperbolique conduit à une taille d'espace infinie au niveau de l'individu. Cela n'est pas possible car notre surestimation des distances les plus courtes est par nature limitée. Aussi, le choix préférentiel pourrait se porter sur une fonction exponentielle négative disposant des mêmes caractéristiques de décroissance sans avoir les inconvénients théoriques des distances proches de l'individu.

Pour comprendre, il convient d'expliquer que dans un espace chorotaxique, toutes les unités d'espace sont équivalentes en tout lieu du plan. La distance représente donc la somme de l'ensemble des unités physiques (1mètre + 1 mètre + ... = D)

En admettant à présent que l'espace ne soit plus physique, mais cognitif, le territoire devient par nature non euclidien ; *les tailles d'espace* diffèrent en fonction de la distance au corps du sujet.

Reprenons notre expression [2], la *distance cognitive*  $X(x)$  est donc la somme de ces *tailles d'espace* soit :

$$X(x) = \int_0^x Lr^x dx$$

En résolvant, on obtient :

$$X(x) = -\frac{L}{Lnr} (1 - r^x) \quad [3]$$

Où  $X(x)$  représente la *distance cognitive à l'individu ou distance cognitive radiale*,  $L$  est la métrique physique dans le réel,  $r$  un paramètre de réduction et  $x$  la distance physique à l'individu. Notons que cette expression [3] correspond en tout point à la fonction que nous avons utilisée pour notre enquête ([1])

Cette fonction [3] est donc l'expression de la distance cognitive à l'individu dans l'hypothèse d'un unique protagoniste. Mais qu'en est-il si l'on fait intervenir plusieurs sujets.

### 2.2.3. Du territoire égocentré au territoire multi-égocentré : le territoire envisagé par $i$ individus

Dans l'hypothèse d'un seul individu, l'ensemble des espaces environnants sont déformés selon une fonction de type [3]. A présent, considérons l'existence de  $i$  individus. Quelle sera alors la forme de *l'espace cognitif*.

L'idée de base consiste à supposer qu'il s'agit d'une moyenne de l'ensemble des *tailles d'espace des individus*, ce qui revient à une moyenne de l'ensemble des *distances cognitives des individus*. De même qu'il existe des modèles polycentriques de densité de population dans les villes, on peut envisager aussi l'existence de logiques semblables pour les « représentations mentales » des espaces. Pour *les tailles d'espace*, on obtient donc la fonction suivante :

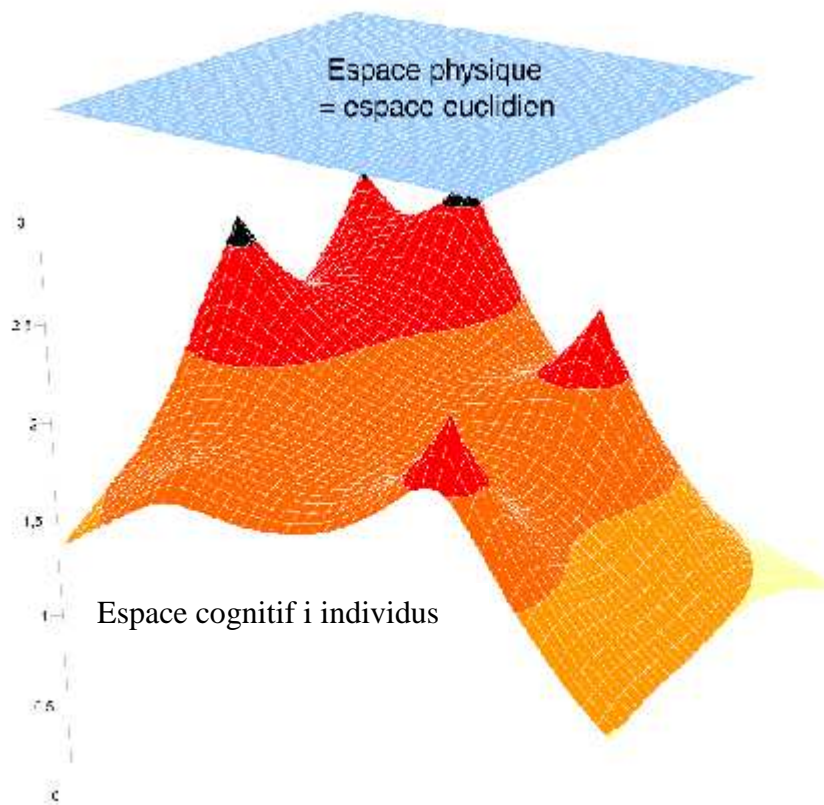
$$L(x_i) = \frac{\sum_{i=0}^N Lr^{x_i}}{i} \quad [4]$$

Dans cette relation les valeurs  $L$  et  $r$  peuvent être relatives à l'individu ou non selon que l'on considère une cognition moyennée des populations<sup>14</sup>.  $i$  représente le nombre d'individus ou par extension le nombre de groupe d'individus (un quartier, une commune...).

Le graphique suivant nous donne l'image stylisée *des tailles d'espace* généralisé à  $i$  individus.

---

<sup>14</sup> On pourrait imaginer plus que de raisonner à l'échelle individuelle de considérer une cognition par un groupe d'individus, par exemple une couche de la société, une catégorie sociale. Dans tout autre cas, il est possible d'homogénéiser les facteurs  $L$  et  $r$  et de les concevoir comme des constantes absolue.



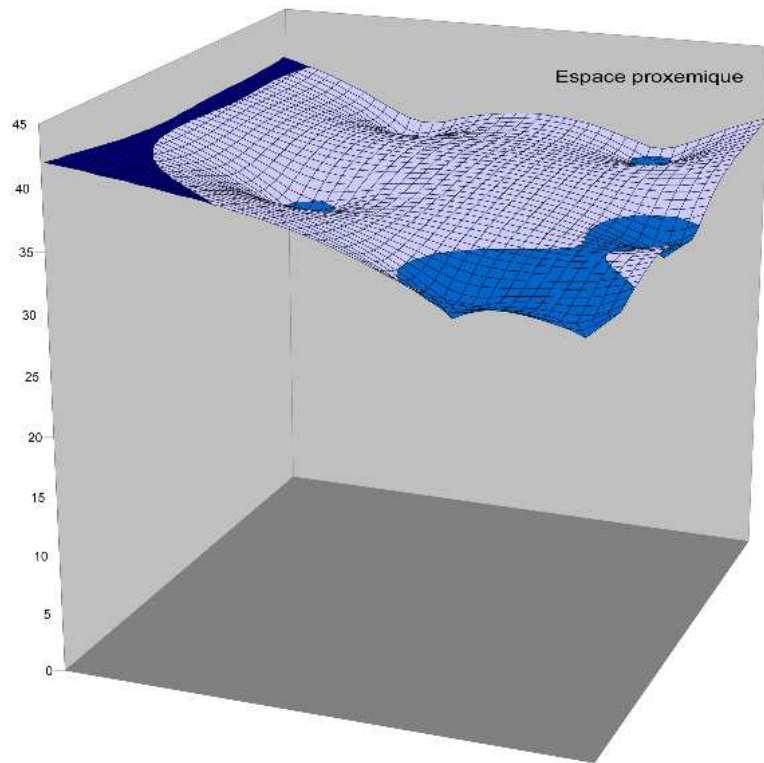
**Figure 8.** Le territoire déformé par  $i$  individus<sup>15</sup>.

En poursuivant ce raisonnement, il est possible de représenter non plus *les tailles d'espace* mais *les espaces cognitifs*. Il suffit pour cela de moyenniser l'expression [3] en fonction de  $i$  individus soit :

$$X(x_i) = \frac{\sum_{i=0}^N -\frac{L}{Lnr} (1 - r^{x_i})}{i} \quad [5]$$

Graphiquement, *une géométrie multi-égocentrée cognitive* correspond à cela :

<sup>15</sup> A noté que la métrique a été à chaque fois pondérée ici par un nombre d'individus présent en  $i$ .



**Figure 9.** Espace cognitif pour un territoire multi-égo-centré.

A l'issue de ce paragraphe, nous parvenons à définir *l'espace cognitif* en le réduisant à une géométrie multi égo-centrée, ce qui revient à l'établir en le centrant sur  $i$  individus. Par nature, dans ce type de géométrie, il existe autant de repère que l'individu et les distances sont radiales.

Cet aspect n'est pas négligeable car il peut permettre d'intégrer notre *espace cognitif* dans un ensemble plus vaste. Cette opération, relativement simple se base sur une loi assez connu de l'urbanisme : le modèle de Clark (1951).

#### 2.2.4. Le lien mécanique cognition-occupation de l'espace ou cognition-urbanisme

Une des idées principales de notre article de 2012 (Enault 2012) est que l'espace, occupé par des densités obéit à une règle classique de répartition : le modèle de Clark (1951).

Or, l'objet de cet article consiste justement à substituer l'espace physique, chorotaxique par un *espace cognitif*.

L'hypothèse est donc la suivante :

Ce n'est pas l'espace physique qui guide la loi de répartition des populations mais bien *l'espace cognitif* ; dans cette éventualité, la distance chorotaxique, dans la formule de Clark (généralisée à  $i$  centres) doit être alors substituée par la distance cognitive soit :

$$D(X(x_i)) = \sum_i M_i e^{-\alpha X(x_i)} \quad [6]$$

Dans le sens inverse on obtient donc une expression de la proxémique en fonction de la densité soit :

$$X(x_i) = -\frac{1}{\alpha} \frac{\sum_i \text{Ln}\left(\frac{D(X(x_i))}{M_i}\right)}{i} \quad [7]$$

On notera par la suite  $X_i$  ( $x_i$ ) plus simplement  $X_i$  et  $D(X(x_i))$ ,  $D(X_i)$

A noté que des dynamiques au niveau de vitesse ou du trafic se réalisent sur le temps court et donc ne nécessitent pas l'introduction de distance cognitive dans les calculs.

Voici donc fixés tous les éléments pour notre *espace cognitif*, il nous reste à traiter le reste des hypothèses pour notre modélisation et sur ce point, nous en avons déjà explicité les grands principes dans notre précédent article de 2012.

#### 1.4. Des hypothèses de base maintenues par rapport au système précédemment construit

Les 3 grandes hypothèses de base sont maintenues dans ce modèle au regard de celui que nous avons défini (Enault 2012)

- Le modèle LRW : l'approche du trafic routière et les conditions de fluidité

$$\begin{cases} Q_i = K_i V_i \\ \frac{\partial Q_i}{\partial x_i} + \frac{\partial K_i}{\partial t} = R \\ Q_i = -aK_i^2 + bK_i \end{cases}$$

Avec  $Q_i$  le débit au lieu  $i$  en véhicules par heure,  $K_i$  la concentration véhiculaire au lieu  $i$  en véhicules par km,  $V_i$  la vitesse moyenne agrégée en  $i$

- La quantité de force en  $i$  : les grandes tendances de déplacements dans nos espaces

$$\sum \vec{P}_i = \tau_i \frac{d\vec{V}_i}{dt} \quad [8]$$

$P_i$  représente les forces gravitaires s'exerçant à un instant donné  $t$  et en un lieu  $i$  sur l'objet en mouvement dans notre espace et  $\tau_i$  un paramètre relatif au lieu  $i$ .

- Le modèle gravitaire dans sa variante en exponentielle

$$Q_i = G \sum_i M_i e^{-\alpha_i X_i} = G g_i \quad [9]$$

$M_i$  densité extrapolée au centre,  $G$  paramètre,  $X_i$  *distance cognitive radiale*,  $\alpha$ , gradient de densité,  $g_i$  densité polycentrique.

*L'espace cognitif* se présente donc comme la forme la plus synthétique des représentations du lieu par l'individu. Par définition, il est la résultante des transformations suivantes du plan :

Espace chorotaxique => espace fonctionnel => *espace cognitif*

Il a pu également être observé que, par nature, ce type d'espace relevait autant de la structure du lieu que de la personne.

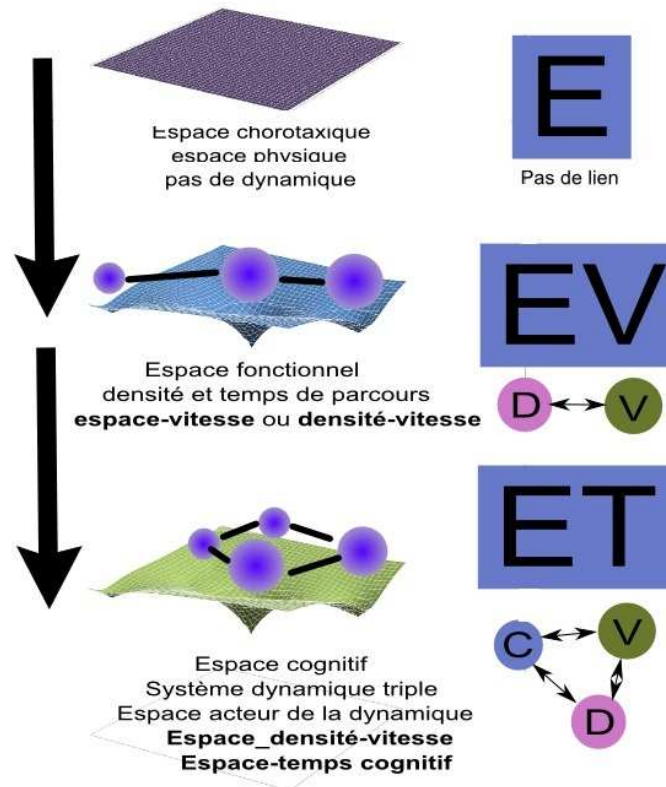
L'autre grande idée de cette partie est qu'il était possible de faire émerger statistiquement une relation entre l'espace chorotaxique et *l'espace cognitif*.

Une approche particulière de cette relation peut être entreprise en admettant alors une origine aux distances. On peut parler de *géométrie de la centralité* où l'importance des objets décroît avec la distance au « moi » (ou au corps du sujet), cela correspond à la *loi d'airain*.

Toute une modélisation peut ensuite être proposée pour signifier un espace cognitif bien particulier centré sur l'individu.

Hors de cette géométrie et plus généralement de cet espace cognitif, l'engagement d'une démarche modélisatrice dynamique de l'étalement urbain dans une version d'espace non euclidienne devrait comprendre aussi d'autres hypothèses théoriques comme le modèle gravitaire, le fonctionnement des espaces ainsi que les modèles d'écoulement des fluides.

Au final, l'objectif est le développement d'un système faisant intervenir *l'espace cognitif* en tant qu'acteur de la dynamique. Il est défini comme il suit :



**Figure 10.** Etape pour la constitution de notre système dynamique

Mais au-delà de cet aspect purement conceptuel, comment peut-on établir ce système. C'est ce que se propose de décrire la partie suivante.

## 2. Le modèle général : démonstration du système différentiel

La recherche de ce système passe par trois étapes successives :

- La définition dynamique de la vitesse faisant intervenir *l'espace cognitif*
- La définition dynamique de la densité et son lien à la vitesse et à *l'espace cognitif*
- La dynamique de *l'espace cognitif*

### 2.1. Exprimer la dynamique de la vitesse

L'objet de ce paragraphe est, à partir des hypothèses de §1 de rechercher une expression dynamique de la vitesse en fonction de la densité.

Pour ce faire, on part de la relation débit-concentration. En introduisant la vitesse, on montre d'après le système LRW que :

$$V_i = -aK_i + b \quad [10]$$

Où  $V_i$  est la vitesse moyenne,  $K_i$  la concentration véhiculaire et  $a$  et  $b$  des paramètres à déterminer.

Recherchons ensuite la dynamique de la vitesse par la dérivée soit :

$$\frac{dV_i}{dt} = -a \frac{dK_i}{dt}$$

La concentration peut être réduite.

$$\frac{dV_i}{dt} = -a \left( R - \frac{\partial Q_i}{\partial x_i} \right)$$

Calculons à présent  $\delta Q_i / \delta x_i$ . On fait également apparaître  $g_i = M_i \exp(-\alpha X_i)$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial x_i} = -\alpha G \frac{\partial X_i}{\partial x_i} M_i e^{-\alpha X_i} = -\alpha G \frac{\partial X_i}{\partial x_i} g_i$$

La dérivation de  $X_i$  peut faire l'objet d'un calcul spécifique ou il reste toutefois à en exprimer la partie  $x_i$  en fonction de  $X_i$ .

$$\frac{\partial X_i}{\partial x_i} = L r^{x_i} \text{ or } r^{x_i} \text{ peut s'exprimer en fonction de } X_i \text{ dans [2], on en déduit que :}$$

$$\frac{\partial X_i}{\partial x_i} = L \left( 1 + \frac{Lnr}{L} X_i \right)$$

D'où

$$\frac{\partial Q_i}{\partial x_i} = -\alpha LG \left( 1 + \frac{Lnr}{L} X_i \right) g_i$$

On posera au final  $aG\alpha L = \lambda$ ,  $Lnr/L = -\beta$  et  $aR = \Gamma$ <sup>16</sup> ; ce qui nous donne la première partie de notre système vitesse-densité.

$$\frac{dV_i}{dt} = -\lambda(1 - \beta X_i)g_i - \Gamma \quad [11]$$

## 2.2. Définition de la gravitation des populations et de la dynamique des flux

Pour chaque point  $i$  de l'espace, on définira un repère de Frenet<sup>17</sup> de coordonnées curvilignes offrant ainsi la possibilité de mettre en évidence le lien densité vitesse par le biais de la seconde loi de Newton.

Dans une logique d'attraction gravitaire, tout flux est considéré comme convergeant ou divergeant vers la totalité des lieux  $i$  (suivant ainsi un principe polycentrique). La trajectoire alors suivie par un mobile sera fonction de la répartition gravitaire des masses de population pour l'ensemble des lieux  $i$ .

De fait, le mouvement observé oscille entre les différentes trajectoires autour des points  $i$ . Le schéma suivant explicite les modalités de la trajectoire du mobile suivant le repère de Frenet<sup>18</sup> soit :

<sup>16</sup>  $\lambda$  estime la part de la densité de population qui explique la variation de vitesse.  $\Gamma$  estime la part constante de décroissance de la variation de vitesse.

<sup>17</sup> Le repère de Frenet se définit comme un repère orthonormé mobile centré sur l'objet en mouvement. Il est décrit par deux coordonnées : la coordonnée tangentielle qui est tangente à la trajectoire de l'objet et la coordonnée radiale qui est perpendiculaire à cette dernière. La coordonnée tangentielle est formalisée par l'accélération  $dV/dt$  et la coordonnée radiale par le carré de la vitesse par la distance au centre de courbure soit  $V^2/x_i$ . On peut dans certain cas, linéariser les deux coordonnées en écrivant  $M = dt/dt + V^2/x_i$

<sup>18</sup> Dans lequel on ne conservera pas la partie tangentielle, ce qui conduirait à un mouvement spiralé.

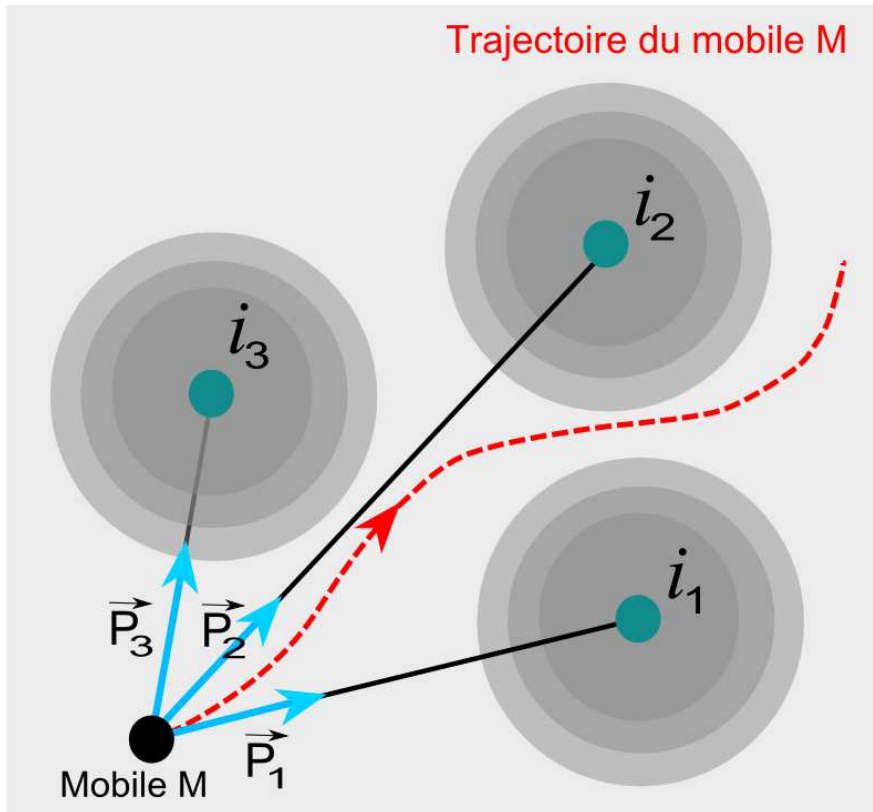


Figure 11. Mouvement et attraction gravitaire

Dans ce modèle la composante radiale est par définition égale à  $V_i^2/x_i$ <sup>19</sup>. Il est également possible que les mouvements soient en sens contraires pour les populations. Dans ce cas, alors, la partie  $V_i^2/x_i$  devient négative car contraire à l'orientation du repère de Frenet.

On proposera alors une fonction aléatoire pour modéliser les déplacements du centre vers la périphérie ou de la périphérie vers le centre<sup>20</sup> ou plus concrètement, cela permet de formaliser des mouvements centrifuges ou centripètes (on choisit alors une fonction aléatoire pipée pour favoriser la dispersion ou la concentration).

Soit

$$aléa = (-1)^{Entier(random() + 1 + f)}$$

$f$  est défini comme un paramètre de randomisation pour « piper » la probabilité. Il est compris entre 0 et 0.5. Plus ce paramètre est proche de 0.5, plus la probabilité d'obtenir des mouvements de concentration est forte.

La somme des forces  $P_i$  s'exprime selon le modèle gravitaire polycentrique défini par [9]

D'où:

$$\frac{dg_i}{dt} = aléa \frac{2\tau_i \lambda}{Gx_i} (1 - \beta X_i) V_i g_i + aléa \frac{2\Gamma \tau_i}{Gx_i} V_i$$

On posera alors  $2\lambda/Gx_i = \xi$  et  $2\Gamma/Gx_i = \Phi$ <sup>21</sup>

On retiendra alors l'expression suivante pour le couple vitesse-densité :

$$\frac{dg_i}{dt} = aléa \tau_i \xi (1 - \beta X_i) V_i g_i + aléa \tau_i \Phi V_i \quad [12]$$

<sup>19</sup> Selon les lois d'accélération gravitaire

<sup>20</sup> Selon un processus de dès à 2 faces soit 1, soit -1 avec une partie pour accroître les chances d'obtenir soit un 1 soit un -1.

<sup>21</sup>  $\xi$  estime la force du lien entre vitesse et densité dans la variation de densité de population.  $\Phi$ , exprime la part de croît de la variation de densité liée à la vitesse

### 2.3. Calcul de l'espace-temps cognitif

Commençons déjà par définir **l'espace-temps cognitif** : Il s'agit de l'espace cognitif que l'on appréhende d'un point de vue dynamique, c'est-à-dire dans son rapport avec le temps mais également en lieu avec les autres grandeurs définies dans le système. Dans notre exemple, il s'agit de la vitesse et de la densité. Par définition, l'espace cognitif est lié au temps et inversement, on peut donc bien parler d'espace-temps. Dès lors que l'espace-temps cognitif se réduit à une date donnée, on parle d'espace cognitif.

Formellement, l'expression peut être envisagée en se référant à la formule [7] et en procédant au calcul de la dynamique (dans sa version simplifiée sans moyenne).

On a donc :

$$X_i = -\frac{1}{\alpha} \text{Ln}\left(\frac{g_i}{M_i}\right) \text{ on a donc}$$

$$\frac{dX_i}{dt} = -\frac{1}{\alpha} \frac{dg_i}{dt} \frac{1}{g_i}$$

On en conclut donc que

$$\frac{dX_i}{dt} = -\frac{1}{\alpha g_i} (\text{aléa} \tau_i \xi (1 - \beta X_i) V_i g_i + \text{aléa} \tau_i \Phi V_i)$$

Ou encore en posant  $1/\alpha = \Lambda$ , on obtient donc le système suivant :

$$\begin{cases} \frac{dV_i}{dt} = -\lambda(1 - \beta X_i) g_i - \Gamma \\ \frac{dg_i}{dt} = \text{aléa} \tau_i \xi (1 - \beta X_i) V_i g_i + \text{aléa} \tau_i \Phi V_i \\ \frac{dX_i}{dt} = -\Lambda \left( \text{aléa} \tau_i \xi (1 - \beta X_i) V_i g_i + \frac{\text{aléa} \tau_i \Phi V_i}{g_i} \right) \end{cases} \quad [13]$$

Le résultat, que nous obtenons ici, est un système dynamique mettant en relation directe la densité de population  $g_i$  avec la vitesse routière  $V_i$  et l'espace-temps cognitif  $X_i$  moyennant des variables d'ajustement. Dans la pratique cela signifie que l'évolution de la vitesse agit sur l'évolution de la densité et l'espace-temps cognitif et cela de manière interactive.

Si le système est relativement simple dans son expression, il ne dispose toutefois pas de solution car les trois fonctions  $V_i$ ,  $X_i$  et  $g_i$  sont liées dans le temps par leurs dérivées.

De par sa construction, il recèle également une partie aléatoire (*aléa*).

Le paramètre  $\tau_i$  représente, quant à lui, le taux local de croissance de la densité de population, on le calculera selon la formule suivante :

$$\tau_i = \frac{\Delta g_i}{\Delta t}$$

Enfin, le modèle suit l'évolution du trio vitesse densité espace-temps et cela pour un lieu  $i$  indéfini de l'espace. En conséquence, il permet dans le cadre d'une application à de multiples entités géographiques de suivre les trajectoires différenciées des espaces.

En cela, on peut dire que mathématiquement, notre modèle s'apparente au champ tridimensionnel de vecteurs d'un espace géographique.

## 2.4. Hypothèse pour l'initialisation du modèle [13]

Comment mesurer *un espace cognitif*? Ce n'est pas évident d'autant plus les valeurs qui devront être attribuées seront anciennes.

On se base donc à la technique encore une fois pour évaluer les valeurs.

$$\text{La formule est simple : } X_i = -\frac{1}{\alpha} \text{Ln}\left(\frac{g_i}{M_i}\right)$$

Les valeurs  $\alpha$  et  $M_i$  sont évaluées en fonction de l'ajustement global de la densité à l'espace selon la formule de Clark.

Si, d'un point de vue purement technique, la démarche formelle nous a permis de définir les différentes équations de notre système différentiel, conceptuellement, cela a aussi conduit à envisager une nouvelle base de travail, à savoir *l'espace-temps cognitif*. Ainsi, ce dernier se présente comme la forme dynamique de *l'espace cognitif*, il maintient, par un lien univoque, espace et temps aux autres grandeurs de la dynamique générale de notre système. En cela, on peut admettre que l'espace-temps, ainsi défini, est un acteur à part entière de la dynamique.

Toute la question est alors de cerner si cette modification tant sur le plan méthodologique que conceptuel est à même d'entraîner des modifications d'importance au sein de l'expression de l'étalement urbain pour nos villes. La partie suivante a justement pour objet de rechercher les évolutions potentielles et réelles de cette nouvelle dynamique de notre système.

## 3. Comparaison de deux modélisations systémiques de la croissance urbaine

La définition cognitive de l'espace peut paraître bien complexe pour, somme toute, parvenir à des résultats, a priori, comparables à une simulation plus simple. Quel peut donc bien être l'intérêt de ce type de modélisation par rapport à des familles de systèmes telles que nous avons pu en définir dans notre précédent article ?

Ce paragraphe a pour principal intérêt de mettre en lumière les originalités de la nouvelle modélisation. Il se propose alors de décrire l'espace d'étude (la Région Ile de France) puis d'analyser les modalités d'ajustement du modèle le plus complexe pour enfin finir par un tableau comparatif de deux modélisations systémiques (avec et sans *espace-temps cognitif*).

### 3.1. Présentation de l'aire d'étude et des données du modèle

La région Ile de France est la première des régions françaises de part sa population et sa zone d'emploi bien qu'elle couvre une surface relativement faible à l'échelle nationale.

Avec 11 598 844 habitants, la région est pour une grande part urbaine mais couvre également une large portion périurbaine.

L'ensemble se développe dans un espace relativement plat de bas plateaux faiblement encaissés et vallées larges (Seine, Marne, Oise), ce qui n'oppose pas réellement de résistance à l'urbanisation.

L'agglomération Parisienne couvre une vaste superficie en rapport à la surface de la région. Si Paris centre ne couvre qu'une petite partie de l'espace, c'est bien la banlieue qui compose la majorité du territoire urbain. Les densités de population centrales sont fortes mais ne représentent pas les densités les plus importantes de l'Ile de France, qui se trouvent dans la banlieue proche. Ces dernières s'étirent donc le long des axes de communication où l'on voit

bien que la frange urbaine suit les grandes vallées (Seine Oise et Marne), On y trouve aussi les grands axes de circulation : Autoroute, RER et voie de chemin de fer classique.

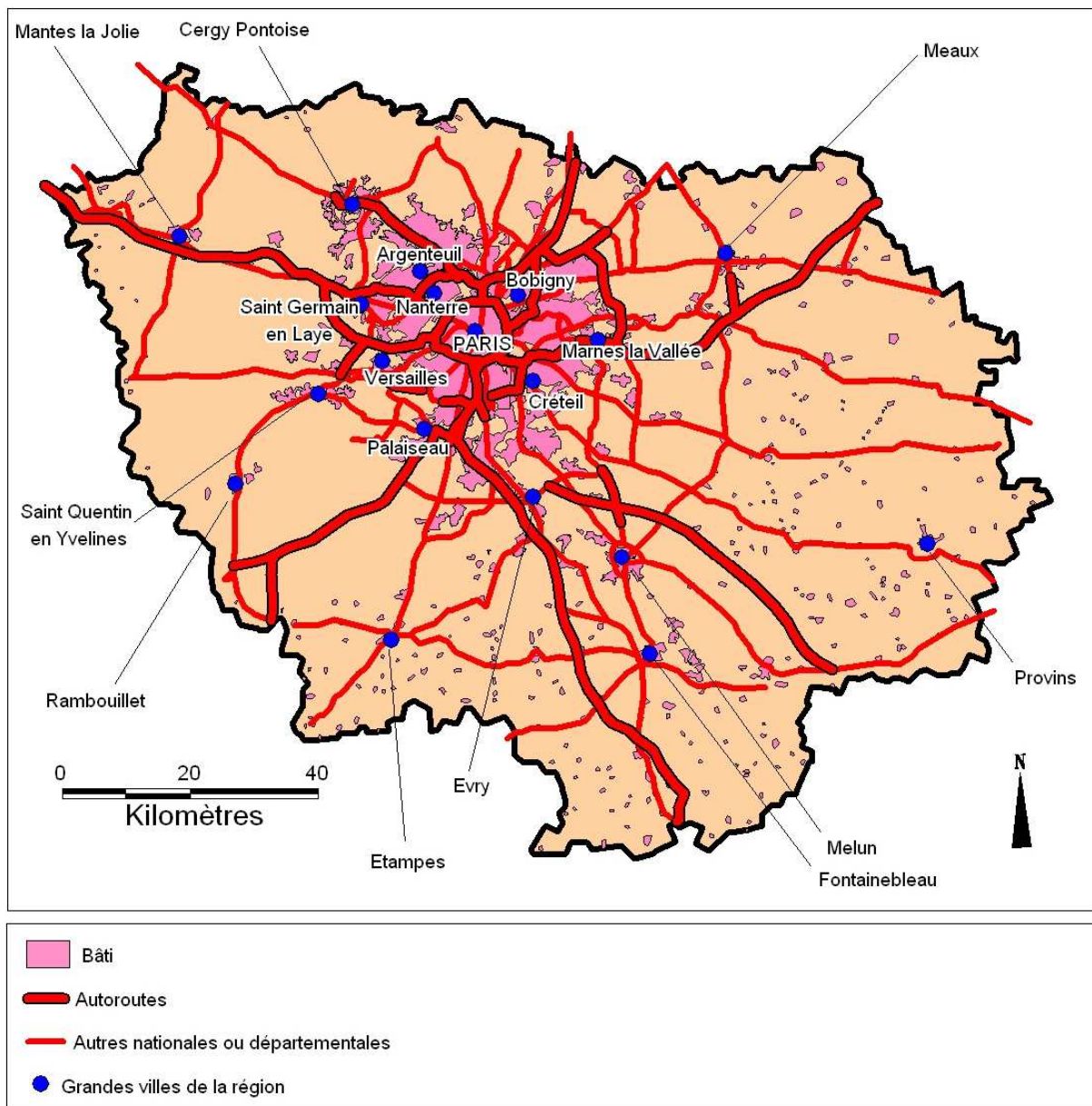
Plus précisément, l'agglomération parisienne tisse des densités fortes centrales qui s'allongent le long des lignes de RER A, B, C et D. La ligne E est plus récente et pour l'instant cela a pas eu des conséquences moyennes en terme d'urbanisation.

Aux franges de l'agglomération, on rencontre les villes nouvelles caractérisées elles-aussi par des densités élevées : Marne la Vallée, Saint Quentin en Yvelines, Cergy Pontoise Evry et Melun Sénart

Au delà de la limite des 40-45 km, on rentre dans les espaces périurbains de l'Ile de France où l'on assiste à une urbanisation par paquet autour des villages avec de vastes étendues vides, réservées encore à l'agriculture. Ces territoires sont en évolution rapide et l'on assiste chaque année à une diminution de la surface agricole avec la pression des prix du foncier.

Dans le cadre de cette étude, nous disposons de deux jeux de données : les populations des différents recensements sans double compte par commune de 1968 à 2007 ainsi que des données de vitesse récentes de l'Ile de France fournies par la DIRIF en 1999-2005. Elles donnent donc une appréciation de la situation moyenne des vitesses pour cette période. Par ailleurs, à partir des tronçons, nous avons agrégé ces données à l'échelle des communes pour obtenir une vitesse moyenne.

Les données de vitesse ne seront pas intégrées dans le modèle mais serviront en revanche pour le calage de la simulation.



**Figure 12.** Présentation de l'aire d'étude

### 3.2. Application du modèle et tests de validité.

Pour notre ajustement, nous disposons donc de deux systèmes

Les tests de la simulation fournissent de bons résultats en fixant les paramètres  $\lambda$ ,  $\xi$ ,  $\Gamma$ ,  $\Phi$  et  $\beta$ , ce qui laisse une certaine liberté pour  $\Lambda$ .

Les paramètres conservent naturellement leur définition :

$\lambda$  estime la part de la densité qui explique la variation de vitesse

$\xi$  estime la force du lien entre vitesse et densité dans la variation de densité de population

$\Gamma$  estime la part constante de décroissance de la variation de vitesse

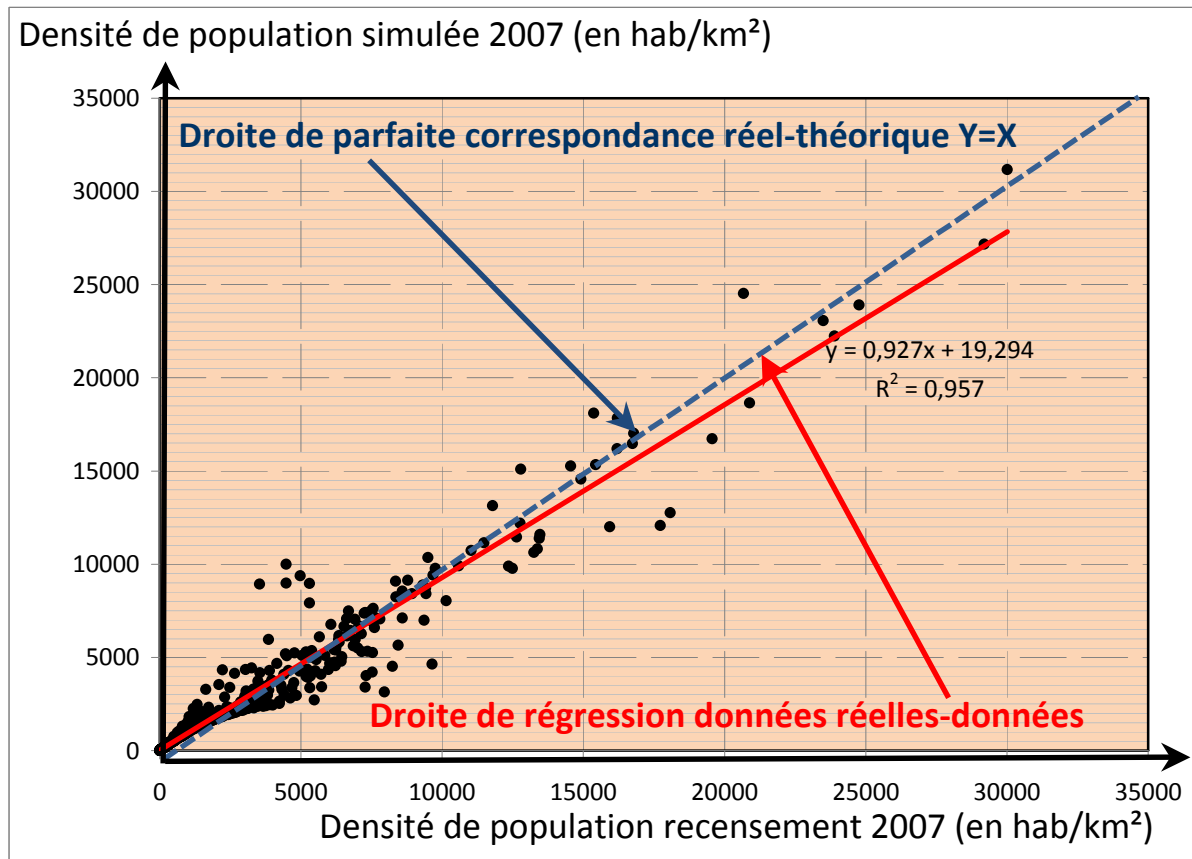
$\beta$  estime la part de la distance cognitive qui influe sur les variations de la densité et de la vitesse

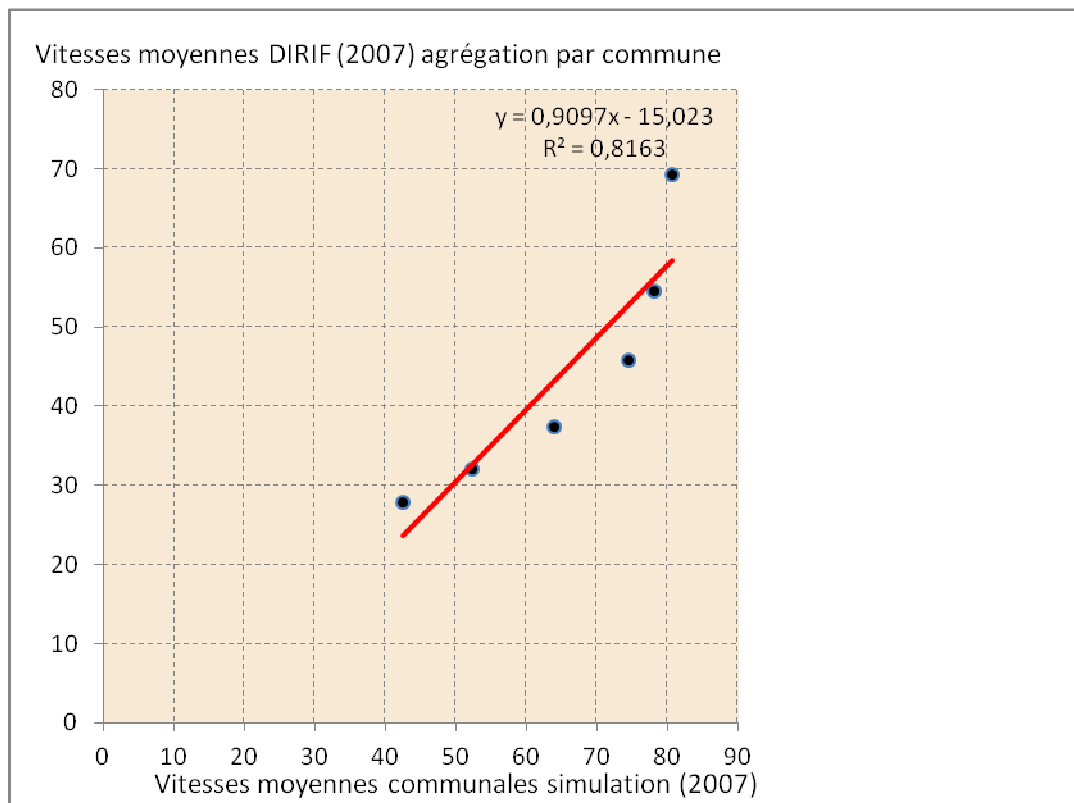
$\Lambda$  estime la vitesse de changement de représentation de l'espace (urbain contre périurbain) donc les mutations morphologiques de l'espace.

Enfin  $\Phi$ , exprime la part de croît de la variation de densité liée à la vitesse

L'estimation de ces paramètres relève du calibrage à partir des données réelles de densité de population et de vitesse pour l'aire d'étude.

Le principe général de comparaison théorique-réel repose sur la mise en corrélation des données issues du modèle avec les densités de population du recensement de 2007 ainsi que les vitesses pour les mêmes dates. Dans ces deux graphiques, on analysera bien sûr le  $R^2$ , qui nous donne pour une grande partie la fiabilité de notre modèle mais on recherchera également les valeurs des coefficients de la droite de régression afin que ces derniers nous conduisent au plus proche de la fonction  $Y=X$  (parfaite adéquation entre le réel et le théorique).





**Figure 13a et 13b.** Validation de la simulation avec les données réelles (densité et vitesse)

Les résultats obtenus, tant pour les densités de population que pour les moyennes de vitesse agrégées sont satisfaisants. Examinons à présent nos deux systèmes plus en détail.

### 3.3. Originalité du système cognitif par rapport à une logique chorotaxique

Le système que nous avons mis en place dans cet article postule que l'espace est non euclidien et donc que l'ensemble des dynamiques qui s'y opèrent forment des logiques elles-mêmes non linéaires.

Mais en quoi les deux types de systèmes diffèrent-ils ?

#### 3.3.1. Différences théoriques entre les systèmes

Pour bien le percevoir, il convient de mettre en perspective les deux systèmes :

A) Le système non euclidien	B) le système euclidien
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\frac{dV_i}{dt} = -\lambda(1 - \beta X_i)g_i - \Gamma</math></li> <li>• <math>\frac{dg_i}{dt} = \text{aléa}\tau_i\xi(1 - \beta X_i)V_i g_i + \text{aléa}\tau_i\Phi V_i</math></li> <li>• <math>\frac{dX_i}{dt} = -\Lambda\left(\text{aléa}\tau_i\xi(1 - \beta X_i)V_i + \frac{\text{aléa}\tau_i\Phi V_i}{g_i}\right)</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\frac{dV_i}{dt} = -\lambda g_i - \Gamma</math></li> <li>• <math>\frac{dg_i}{dt} = \text{aléa}\tau_i\xi V_i g_i + \text{aléa}\tau_i\Phi V_i</math></li> </ul>

**Figure 14.** Tableau des deux systèmes d'étude

La première et la plus importante des différences entre ces deux systèmes est le nombre d'équations ; deux pour le plus simple et trois pour le plus complexe, ce qui implique par conséquent l'usage de trois fonctions pour le modèle le plus complexe.

La véritable différence formelle est donc bien l'introduction de *l'espace-temps cognitif* Xi.

Observons que quand  $\beta \longrightarrow 0$ , le système (A) tend à ignorer la fonction Xi et donc se résume au système (B). On en déduit donc que le système (A) est une famille qui englobe (B). La conséquence sur la dynamique pourrait nous conduire à des résultats tels que toute simulation suit  $B \subset A$

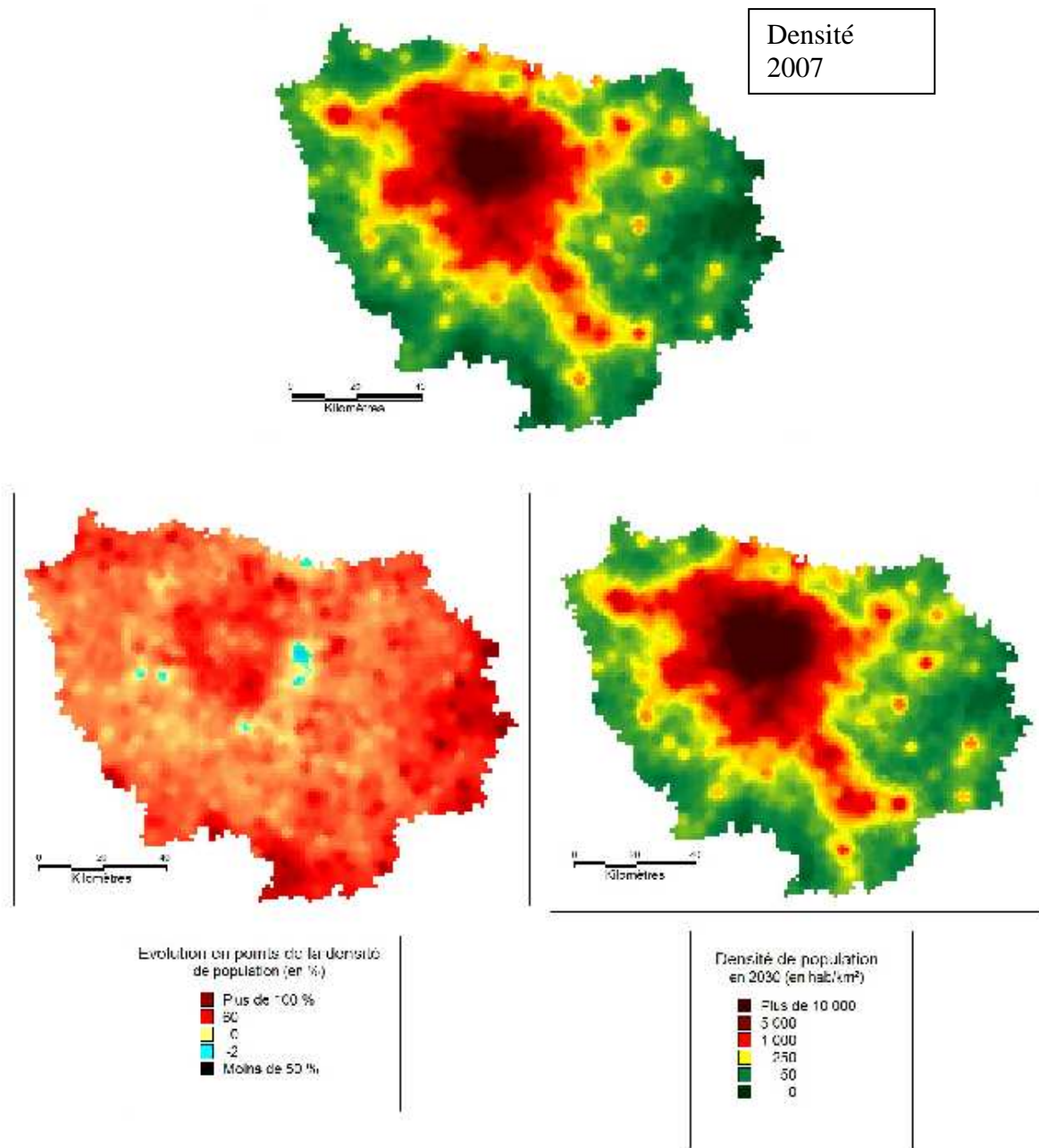
On en conclut que le système (A) peut conduire à d'autres voies que le système (B).

La suite de cet article s'efforcera de démontrer plus concrètement comment (A) l'emporte sur (B).

### *3.3.2. Etude de la dynamique du système le plus simple (A): dynamique à espace chorotaxique.*

Dans ce système, il n'est pas question de différenciation réelle au niveau des logiques dans la mesure, où l'ensemble des scénarios qu'il nous est possible de présenter, se regroupe dans une même famille. Notre modèle précédent qui explicitait différents scénarios montrait sur un territoire comme l'aire urbaine de Dijon comment on pouvait construire des évolutions différentes en fonction d'une variation d'un unique paramètre  $\Phi$ .

Nous pouvons faire de même ici mais nous préférons d'avantage analyser les évolutions entre le présent et la simulation de 2030.



**Figure 15.** Simulation de l'Evolution de densité et densité de population en 2030

Suivant la simulation sur Paris ou même les travaux sur Dijon, il existe donc une seule famille de scénarios. Il suffit de faire varier légèrement le paramètre  $\Phi$  entre deux bornes.

La conséquence au niveau des formes urbaines est l'édification d'un tissu privilégiant le centre urbain par rapport aux périphéries les plus proches.

En somme, dans cette famille de scénarios, le centre gagne des habitants quand la banlieue proche stagne ou perd des habitants.

Il existe ensuite un dégradé de croissance du centre vers la périphérie avec une large préférence pour l'installation en milieu périurbain.

Dans le détail, on observe l'existence d'une logique plus proche du cratère de densité avec une première couronne de banlieue (les départements de la petite couronne) qui concentre les plus fortes densités ainsi que les plus hauts taux de croissance et ensuite le centre qui conserve des taux positifs mais bien plus faibles.

En somme, le système à espace physique conduit à une croissance avec un anneau plus ou moins central de forte densité.

Il privilégie également la grande périphérie et favorise l'étalement urbain sous forme de village.

### 3.3.3. Evaluation des dynamiques du système à espace-temps cognitif

Le système cognitif, comme nous l'avons noté, conduit à deux types de scénarios :

- Un premier type se rapprochant du système à espace physique
- Un second type spécifique à définir
- Eventuellement quelques variantes

La dynamique la plus connue à présent conduit donc à un anneau central dont les variations dépendent de la valeur du paramètre  $\Phi$ .

Ensuite, on va également trouver des familles de scénarios qui dépendent de la valeur de  $\beta$ .

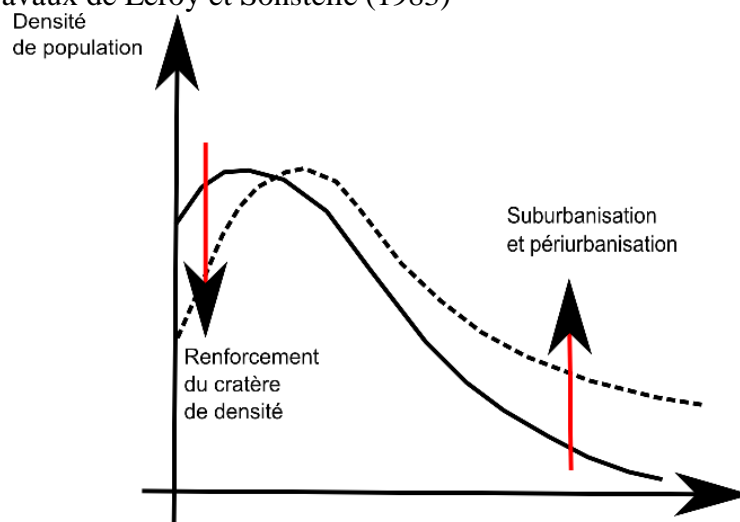
Plus  $\beta$  grandit, plus le scénario s'éloigne de la forme du système à métrique euclidienne (physique).

Plus concrètement, on distinguera deux familles de scénarios spécifiquement « non euclidiens » :

- 1) Pour une valeur de  $\beta < 1$ , le scénario est proche de l'euclidien
- 2) Pour  $1 < \beta < 1000$ , les scénarios tendent vers une logique de centre (Paris et proche banlieue) en stagnation et une périphérie en croissance modérée
- 3) Pour  $1000 < \beta$ , on obtient le cratère de densité et l'explosion des banlieues et surtout du périurbain.

On peut ainsi dégager une véritable mécanique de croissance qui associe le centre à la périphérie.

Cette hypothèse a été évoquée par D.Rusk (1995). L'auteur montre alors qu'une évolution au centre conduit à une évolution inverse en périphérie. C'est également le sentiment que l'on a quand on lit les travaux de Leroy et Sonstelie (1983)



**Figure 16.** Evolution simultanée du centre et de la périphérie dans le système de type non euclidien

Densité de population 2030  
du système complexe

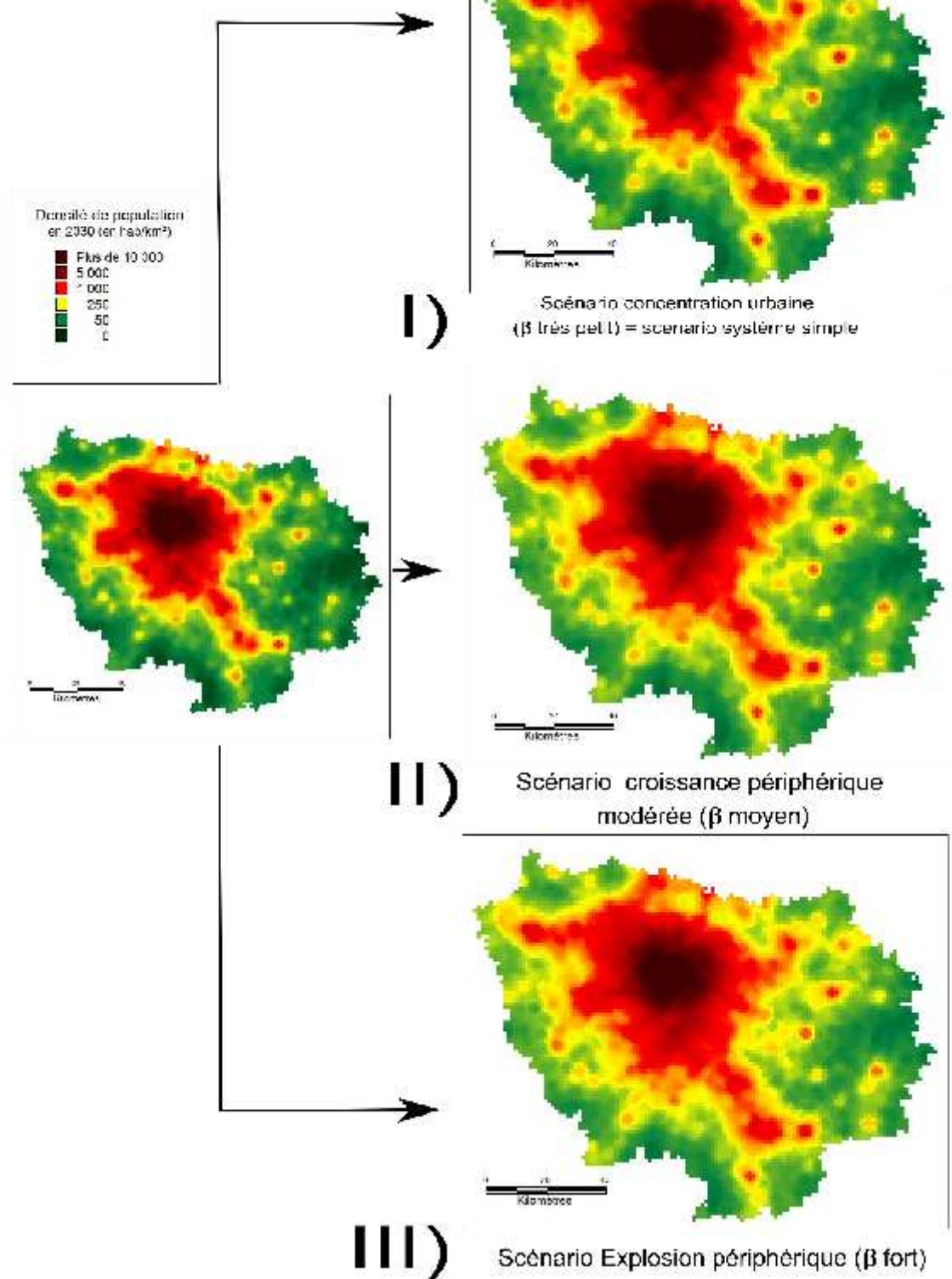
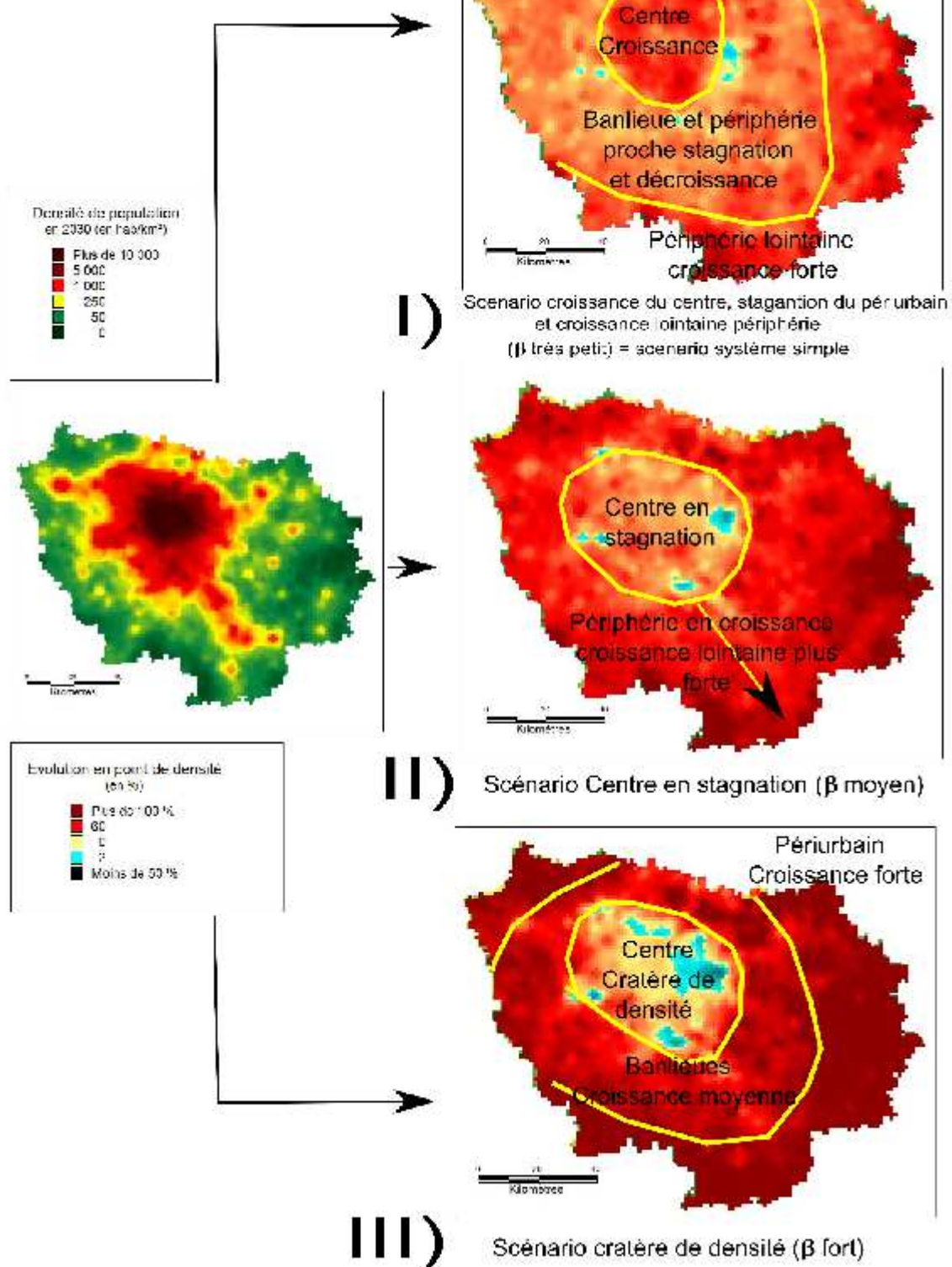


Figure 17. Simulation de la densité de population en 2030 en Ile de France (3 scénarios du système « non euclidien »)

Evolution de la densité du système complexe



**Figure 18.** Evolution de la densité de population entre 1999 et 2030 en % dans le système « non euclidien »

## Conclusion

La question la plus fondamentale défendue dans cet article est l'introduction d'un *espace ou espace-temps cognitif* au sein d'un système dynamique déjà préexistant. Comment envisager cette intégration ? Mais avant toute chose, comment cerner *l'espace cognitif* lui-même ? Cela revient à en comprendre les principes, le définir mais également l'approcher expérimentalement. Cet article a donc envisagé une démarche expérimentale suivie d'une approche plus théorique, des efforts afin de parvenir à un socle d'hypothèses fiables portant sur l'espace.

L'importance de cette partie spécifique portant sur l'espace cognitif ne doit pas occulter le reste de la démarche, la finalité de l'article, à savoir comprendre la dynamique urbaine. Plusieurs questions ont ici trouvé une réponse. Comment définir l'étalement urbain, le décrire ?

Quelle en est alors la signification ? La réponse est relativement simple, essentiellement une dynamique de la ville sous la contrainte d'un nombre limité de facteurs. Trois équations différentielles pour appréhender les évolutions générales de la ville.

Si le système définit apparaît nettement plus complexe que celui que nous avons pu construire dans un article précédent, la sophistication ainsi mise en œuvre se justifie-t-elle pour autant ?

Il est certain que d'un point de vue purement théorique, il aurait pu être néfaste de passer à côté d'une telle définition de l'espace dans la mesure où *l'espace-temps cognitif* participe pour une grande part à l'émergence des structures et dynamiques spatiales.

Mais au delà de ces aspects, la définition « non euclidienne » et cognitive des espaces est aussi une formidable opportunité d'introduire de multiples variations au sein des dynamiques urbaines ; c'est ce que la troisième partie de notre travail a pu démontrer. En comparant système « non euclidien » et système « euclidien », nous sommes parvenus à la conclusion que la seconde famille de système n'était qu'un exemple de la première. En terme de forme urbaine, les conséquences sont importantes et permettent de définir dans le cas le plus général (le non euclidien), trois types fondamentalement différents de scénarios contre un seul pour l'euclidien.

Aussi d'un point de vue purement conceptuel s'opposent au final deux types d'évolutions urbaines : une première où le centre conserve un certain poids avec une croissance plus ou moins forte de la périphérie (à définir en fonction d'un unique paramètre) et une seconde où le centre évolue en cratère de densité avec mécaniquement une évolution simultanée des périphéries. La ville du scénario se rapprochant de « l'euclidien » voit une croissance des banlieues proches quand le scénario spécifique du système « non euclidien » dégage une croissance forte des banlieues lointaines et du périurbain.

A l'issue de ce travail, nous parvenons donc à la conclusion que le modèle à espace cognitif est bien plus à même de rendre compte des dynamiques urbaines. Mais l'intérêt de cette nouvelle géométrie dépasse l'usage dans ce système puisqu'elle peut être également employée par substitution à la distance à vol d'oiseau. On pourra l'utiliser entre autre pour ajuster les modèles de densité de population de type Clark ou Newling voire même le modèle de Bussière. En cela, elle montre que l'introduction de notions de psychologie au sein des métriques permet dans une certaine mesure de s'affranchir des limites urbain/périurbain ; la réalité de cette affirmation proviendrait des différences de fonctionnement de l'espace entre la ville et la campagne. L'apparente discontinuité ville/campagne pourrait alors partiellement s'effacer sous l'effet de cette nouvelle métrique.

## Références

- ALONSO W. (1964) *Localisation and land use*, Harvard University Press
- ANAS A., ARNOTT R., SMALL K.A. (1998) « Urban Spatial Structure », *Journal of Economics Literature*, n°36, pp.1426-1464
- ANTONI J. P. (2003), *Modélisation dynamique de l'étalement urbain : aspects conceptuels et gestionnaires : application à Belfort*, doctorat en géographie sous la direction de C. Cauvin, Université de Strasbourg.
- BAILLY A. (1977) *La perception de l'espace urbain les concepts, les méthodes d'études, leur utilisation dans la recherche géographique*, these de d'Etat, Paris Sorbonne, 4 tomes
- BATTEN D.F., BOYCE D.E. (1987), « Spatial Interaction, Transportation, and Interregional Commodity Flow Models », in *Handbook of Regional and Urban Economics*, P. Nijkamp, vol. 1, Chapter 9, pp. 357-406,
- BATTY M., LONGLEY P. (1986), « The fractal simulation of urban structure », *Environment and Planning A*, 18, pp 1143-1179
- BATTY M., XIE Y. (1994), « From cells to cities », *Environment and Planning B*, vol 21(7), pp 31-48
- BECK R.J. S. WOOD D. 1976 « Cognitive transformation from urban geography fields to mental maps », *Environment and Behaviour*, n°8, p. 199-237
- BONNAFOUS A., TABOURIN E. (1998) « Modélisation de l'évolution des densités urbaines », *Données urbaines II* dirigé par PUMAIN D. et MATTEI M.F., Paris, Anthropos, collection Villes, pp. 273-285.
- BRUECKNER J.K., FANSLER D.A., (1983) « The economics of urban sprawl : theory and evidence on the spatial sizes of cities », *The review of Economics and Statistics*, 65, 479-482
- BURNETT P. (1978) « Time cognition and urban travel behavior », *Geographiska Annaler*, Vol 60 B, n°2 pp107 -115
- BUSSIERE R. (1975) *Interaction urbaines. Le modèle de la CRU*, Annales 1975, Paris, Centre de recherche d'urbanisme
- CANTER D. (1977) *The psychology of place*, The architectural Press, Ltd London 198 p
- CARROTHERS G.A.P. (1956), « An historical Review of the Gravity and Potential Concepts of Human Interaction », *Journal of The American Institute of Planners*, 22, pp. 94-102.
- CAUVIN.C. (1984) « Espaces cognitifs et transformations cartographiques, les conditions de comparaison des espaces cognitifs : de la carte aux configurations : l'exemple de l'espace urbain strasbourgeois », Thèse de doctorat d'Etat sous la dir de H.Reymond
- CLARK C. (1951) « Urban population densities », *Journal of the royal Statistical Society serie A*, n°114, p. 490-496
- COHEN R., WEATHERFORD D.L., BURD D. 1980, « Distance estimates of children as a function of acquit and Reponses activities », *Journal of experimental Child Psychology*, n°30, p. 464-472
- COMTER D., TAGG S.K. 1975, « Distance estimation in cities », *Environment and Behaviour*, n°7, 5980
- COREN S., PORAC C. (1976) « Distance makes the heart grow fonder : attributes and metrics in cognitive macromaps », in Suedfeld Russel (ed) *The Behavioral basis design Book I*, Pennsylvanny pp 81 -85 881 p
- D'AUBIGNY G., CALZADA C., GRASLAND C., ROBERT D., VIHO G. et VINCENT J.-M., « Approche poissonnienne des modèles d'interaction spatiale », *Cybergeo : European Journal of Geography*, Systèmes, Modélisation, Géostatistiques, article 126, mis en ligne le 09 mars 2000, modifié le 07 juin 2007.
- DEL CASTILLO J.M., BENITEZ F.G. (1995) « On the functional form of the speed-density relationship », *I General Theory Transportation Research part B*, Vol 29B, n°5, pp. 373-389.

- DEL CASTILLO J.M., PINTADO P., BENITEZ F.G. (1993) « A formulation for Reaction Time of Traffic Flow Models », in Daganzo CF (ed) *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Symposium on transportation and Traffic Flow Theory* Berkeley (Etats Unis) Amsterdam Pergamon pp. 387-405
- DOWNS R.M. 1970, « geography space perception », *Progress in Human geography*, Ed. Arnold, vol. 2, p. 67-107
- DUBOS-PAILLARD E., GUERMOND Y., LANGLOIS P. (2003), « Analyse de l'évolution urbaine par automate cellulaire : le modèle SpaCelle », *L'espace géographique*, Tome 32, vol 4, pp 357-378
- ENAULT C. (2012) « Simulation de l'étalement urbain de Dijon en 2030 : approche systémique de la dynamique gravitaire ville-transport », *Cybergeo, European Journal of Geography*
- EWING R. (1997), « Is Los Angeles Style sprawl desirable », *Journal of the American Planning Association* 63 (7), pp107-126
- FORER P. (1978) « A place of plastic space », *progress in Human geography*, Vol 2, n°2, pp230-267
- FRANKHAUSER P. (1997) « L'approche fractale : un nouvel outil de réflexion dans l'analyse spatiale des agglomérations urbaines », *Population*, n°4, pp. 1005-1040
- GIORGI F., LECLERCQ L., LESORT J.B. (2002), « A traffic flow model for urban and environmental applications », in Taylor M.(ed), *Proceedings of the 15<sup>th</sup> International symposium Transportation and Traffic Theory*, 16, 18<sup>th</sup> July Adelaide, pp. 393-415
- GREENSHIELDS B.D. (1935) « A study of traffic capacity », *Highway Research Board Proceedings*, Vol 14, pp 448-477.
- ISARD W., BRAMHALL D.F. (1960), « Gravity, Potential and Spatial Interaction models », in *Methods of Regional Analysis*, W. Isard, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, pp. 493-568.
- LAJOIE G., HAGEN ZANKER A. (2008), « La simulation de l'étalement urbain à la Réunion : apport de l'automate cellulaire métronamica pour la prospective territoriale », *European Journal of Geography*, Systèmes, Modélisation, Géostatistiques, article 405, mis en ligne le 18 octobre 2007, modifié le 21 avril 2008.
- LEBACQUE J.P.(1993), « Les modèles macroscopiques du trafic », *Annales des Ponts et chaussées*, Vol 67, pp. 28 45.
- LEBACQUE J.P., LESORT J.B. (1999), « Macroscopic Traffic Flow Models : A question of Order », *Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Symposium and Traffic Theory*, Jerusalem, pp. 3-25
- LECLERCQ L. (2002) « Modélisation du trafic et estimation des nuisances sonores », *Modélisation du trafic dirigé* par ARON M., BOILLOT F. et LEBACQUE J.P., Actes du groupe de travail 1999, les collections de l'INRETS n°83, pp. 37-54
- LEROY S.F., SONSTELIE J. (1983) « Paradise lost and regained : transportation innovation, income and residential location », *Journal of Urban Economics*, n°13, pp. 301-310
- LEROY S.F., SONSTELIE J., (1983), « Paradise lost and regained : transportation innovation, income and residential location », *Journal of Urban Economics*, No13, 301-310
- LEVY-LEBOYER C., (1980), *Psychologie et environnement*. P.U.F., Coll. Le Psychologue, n 79, 216 p.
- LIBEN L.S., PATTERSON A.H., NEWCOMBE N. (1981) *Spatial Representation and behavior across the lifespan*, Theory and application, Academic Press, New York, 404 p
- LIGHTHILL M.J., WHITHAM G.B. (1955) « On kinematic waves : a theory of traffic flow on long crowded roads », *Proceedings of Royal Society*, n°1178, pp. 145-317
- LYNCH K. (1960), *L'image de la Cité*, 1<sup>ière</sup> édition, trad. Venard MF Coll Aspects de l'urbanisme Dunod 222 p

- MAHMASSANI H.S., BAAJ M.M., TONG C.C. (1988) « Characterization and evolution of spatial density patterns in urban areas », *Transportation*, vol. 15, n°3, pp. 233-256
- MARGO R.A., (1992), « Explaining the postwar suburbanization of the population in United States : the role of income », *Journal of Urban Economics*, No 31, 301-310
- MC DONALD J. (1987) « The identification of urban employment subcenters », *Journal of Urban Economics*, n°2, pp.242-258
- MC DONALD J., PRATHER P. (1994) « Suburban employment centres : the case of Chicago », *Urban Studies*, n°3, pp. 20-28
- MILLS E.S. (1970) « Urban density functions », *Urban Studies*, n°7, pp. 5-20
- MOLES A. ROHMER E. 1972, *Psychologie de l'espace*, Tournai, Casterman
- MOLES, A. 1992, « vers une psycho-géographie », In Bailly, A., Ferras, R. et Pumain, D. *Encyclopédie de la géographie*. Paris : Economica, p. 177-205.
- MULLER J.C. (1982) « Non Euclidean geographic space : mapping functional distance », *Geo Analysis* Vol 14, n°3, pp 189-203
- NEWLING B.E. (1969) « The spatial variation of urban population densities », *Geographical Review*, n°59, pp. 242-252
- NEWMAN P., KENWORTHY J.R. (1989), *Cities and automobile dependence, an international Sourcebook*, Brookfield.
- NEWMAN P., KENWORTHY J.R. (1992) « Transport and urban form in thirty two of the world's principal cities », *Transport Review*, n°3, pp. 249-272
- PAILHOUS J.( 1970) « La représentation d'image spatiale et de règles de déplacement : une étude sur l'espace urbain », *le travail humain*, Vol 34, n°2, pp 299-324
- PAPAGEORGIU M., BLOSSEVILLE J.M., HADJ SALEM H. (1990), « Macroscopic Modelling of Traffic flow on the Boulevard peripherique in Paris » *Part I, Modelling Transportation Research part A*, Vol. 24A, n°5, pp. 345-359
- PAYNE H.J. (1971) « Models of the freeway traffic and Control » *Proceedings of the Mathematics Modes and Public Systems* San Diego Simulation Councils Inc, pp. 51-61
- PEGUY P.Y. (2000) *Analyse économique des configurations urbaines et de leur étalement*, thèse de doctorat en Sciences Economique sous la direction A. Bonnafous, Université de Lyon II
- PIAGET J. INHELDER B, SZEMINSK A. 1960, *The child's conception of geometry*, New York
- PIAGET J., INHELDER B. 1967, *The child's conception of space*, New York, Norton 1967
- POCOCK D.C.D., (1978), « The cognition of intra urban distances : a summary. » *Scottish geographical Magazine*, pp. 31-35
- PUMAIN D. (1982) *La dynamique des villes*, Paris, Economica
- PUMAIN D., SANDERS L., SAINT JULIEN T. (1989) *Villes et auto organisation*, Paris, Economica
- PYLYSHIN Z.W. (1981) « The imagery debate: analogue media versus tacit knowledge », *Psychological Review* 88, n°1, pp 16-45
- RAVENSTEIN E., (1885), « The law of Migration », *Journal of the Royal Statistic Society*, pp. 167-235
- RICHARDS P.I. (1956), « Shockwaves on the highway », *Operations Research*, Vol 4, pp. 42-51
- ROSS P. (1988), « Traffic Dynamics » *Transportation Research part B*, Vol 32, n°7, pp 421-435
- ROSSLYN S.M. (1981) « The medium and the message mental imagery: a theory », *Psychological Review* 88, n°46 60
- RUSK D. (1995), *Cities without Suburbs*, Woodrow Wilson Center Press, 168 p.

- SCHWARCH V. (1993) « Phénoménologie et proxémique, la methode d'Abraham Moles », *Congrès Internationale de Sociologie Sorbonne*, Publication Bulletin de micropsychologie n°24
- SMALL K.A., SONG S. (1994) « Population and employment densities : structure and change », *Journal of Urban Economics*, n°36, pp. 292-313
- SONG S. (1994) « Modelling worker residence distribution in the Los Angeles region », *Urban Studies*, n°31, pp.1533-1544
- TILLOUS M. 2009 *Le voyageur au sein des espaces de mobilité : un individu face à une machine ou un être socialisé en interaction avec un territoire ? Les déterminants de l'aisance au cours du déplacement urbain*, thèse de doctorat en géographie aménagement sous la direction de Francis Beaucire, Paris I la Sorbonne
- VURPILLOT E. (1971) « Introduction à l'étude du rôle des déterminants perceptifs dans l'organisation spatiale », *Cahiers de Psychologie* Vol 14, n°4 pp 317-325
- WANG F., ZHOU Y. (1999) « Modelling urban population densities in Beijing 1982-1990 : suburbanization and its causes », *Urban Studies*, n°36, pp. 271-287
- WHEATON W.C. (1998) « Land use and density in cities with congestion », *Journal of Urban Economics*, n°2, vol 43, pp. 258-272
- WHITE S. H., SIEGEL A.W. 1984, « Cognitive development in time and Space », in Rogoff and Lave (ed) *Every Day cognition Its development in Social Context* Cambridge Mass. Harvard University Press
- WILSON A.G. (1970) *Entropy in urban and regional modelling*, Pion, London, Great Britain
- WOOD D. (1978) « Introducing the cartography of reality », in Samule Levy (ed), *Humanistic geography* Maaroufa Press pp 206-219
- ZHANG H.M. (1998), « A theory of none equilibrium traffic flow », *Transportation Research part B*, Vol 32, n°7, pp 485-498