

EXTERNALITÉS SPATIALES ET MODÈLES DE LOCALISATION SIMULATION SUR UN RÉSEAU THÉORIQUE

Marie-Alexandre LAURENT

Centre d'Analyse Spatiale et Urbaine
Université Catholique de Louvain

Résumé

Cette recherche concerne l'introduction des externalités spatiales négatives dans les modèles de localisation-affectation. Le modèle de localisation choisi et étendu de manière à incorporer la notion d'externalité spatiale est le modèle de la p-médiane. Différents jeux de simulations théoriques sont réalisés de façon à tester la sensibilité des solutions proposées par les modèles à l'introduction des externalités spatiales. Deux semis de points ont été choisis (rectangulaire et hexagonal), le réseau est régulier, la demande est homogène et différentes fonctions simples de dispersion des externalités sont envisagées. Les coûts dus aux externalités négatives décroissent avec la distance à la source et sont ajoutés au coût de transport.

Mots-clés

Externalité spatiale - Localisation-affectation - Modèle de la p-médiane - Réseau

Les modèles de localisation-affectation, issus de la théorie de Weber de minimisation des coûts de transport, permettent de résoudre certains aspects du problème de l'implantation d'activités ; ils recherchent les localisations optimales des centres d'activité et leur allouent une quantité de demande selon un ou plusieurs critères et sous une série de contraintes. L'implantation d'une activité produit un impact sur l'environnement physique et humain ; la mesure économique de cet impact est appelée « externalité ». L'objectif du travail est d'inclure les externalités spatiales négatives, c'est-à-dire celles qui modifient l'environnement de façon défavorable, dans les modèles classiques de localisation. De cette façon, les coûts de transport et les nuisances sont tous deux pris en compte dans le choix de la localisation des activités à caractère semi-polluant ou polluant.

La localisation de ce type d'activité est envisagée dans la littérature depuis une dizaine d'années. De nombreux auteurs ont traité du problème « maximin », maximisant la distance minimale entre les centres d'activité et certaines zones protégées, comme des réserves naturelles, des villes, des régions agricoles, des complexes hospitaliers,... [2] [3] [4] [5] [11] ; le problème a également été envisagé de façon à minimiser la distance maximale entre l'activité et un nombre n de points [11], ou encore comme un problème « minisum » [1]. La plupart de ces articles ont un point de vue essentiellement théorique, incorporant une fonction d'objectif unique et des fonctions de distance simples. Erkut et Neuman [7] ont présenté une revue synthétique de la littérature concernant ces problèmes. D'autres auteurs ont envisagé la question de manière plus appliquée, comme par exemple Dutton, Hinman et Millham [6] qui ont traité de la localisation optimale des centrales nucléaires dans le Nord Ouest du Pacifique, ou Morell [12] qui aborde le problème de l'équité. Ratick et White [14] ont également réfléchi à la question de la localisation d'activités utiles, mais créatrices de nuisances. Ils se sont tournés vers la perception de la nuisance en fonction de la taille du centre d'activité. Erkut et Neuman [8] ont pris ce travail comme point de départ pour développer un modèle multi-objectif qui cherche à minimiser le coût total d'implantation de l'activité, les nuisances issues de cette activité et à maximiser l'équité entre les habitants.

La plupart des articles cités plus haut utilisent des fonctions simples de dispersion des nuisances. Il existe bien sûr énormément de recherches concernant l'élaboration de modèles complexes et réalistes de diffusion des polluants [9] [10], mais le but des précédentes recherches et de celle-ci n'est pas de représenter l'impact des

nuisances d'une façon complète et détaillée, mais plutôt de choisir une fonction flexible, représentative de nombreux cas de figure et qui peut aisément être remplacée par une fonction plus complexe.

L'objectif de ce travail est de tester de façon systématique la sensibilité d'un modèle classique de localisation à l'introduction d'une fonction d'externalité spatiale dans sa fonction d'objectif. L'étude est axée sur l'analyse de réseaux théoriques afin de bien isoler les impacts des externalités spatiales de ceux dûs au réseau.

1. Modèle de localisation et externalités spatiales

1.1. Le modèle

Les modèles classiques de localisation-affectation minimisent généralement une fonction de coût de transport, localisent de cette façon p centres et leur allouent une demande m . La formulation exacte de la fonction d'objectif et des contraintes qui y sont associées détermine le type de problème. Le modèle que nous utilisons comme point de départ est un modèle fréquemment retenu pour la localisation de services : le modèle de la p -médiane. Il consiste à trouver une configuration de p unités minimisant le coût total de déplacement, chaque utilisateur étant affecté à l'unité la plus proche. L'incorporation d'externalités spatiales dans le problème entraîne l'ajout dans la fonction d'objectif de coûts fixes pour chaque unité. Le problème ainsi obtenu est une extension d'un problème connu en programmation mathématique sous le nom de SPLP (Simple Plant Location Problem). On ajoute ainsi au SPLP une contrainte de cardinalité imposant l'ouverture de p centres. Le problème étendu peut se formuler de la manière suivante :

$$\text{Min. } F(x, y) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n E_{ij} y_j \quad (\text{a.1})$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad (\text{a.2})$$

$$0 \leq x_{ij} \leq y_j \quad (\text{a.3})$$

$$y_j \in \{0, 1\} \quad (\text{a.4})$$

$$\sum_{j=1}^n y_j = p \quad (\text{a.5})$$

avec i = indice des points de demande

j = indice des points d'offre

m = nombre de points de demande

n = nombre de localisations potentielles de l'offre

c_{ij} = coût lié au déplacement d'un point de demande i à un point d'offre j

x_{ij} = proportion de la demande émanant de i allouée au site j

y_j = variable binaire qui vaut 1 quand un centre est implanté en j , 0 autrement

E_{ij} = externalité spatiale ressentie au lieu i et provenant du centre implanté en j

p = nombre d'unités à implanter

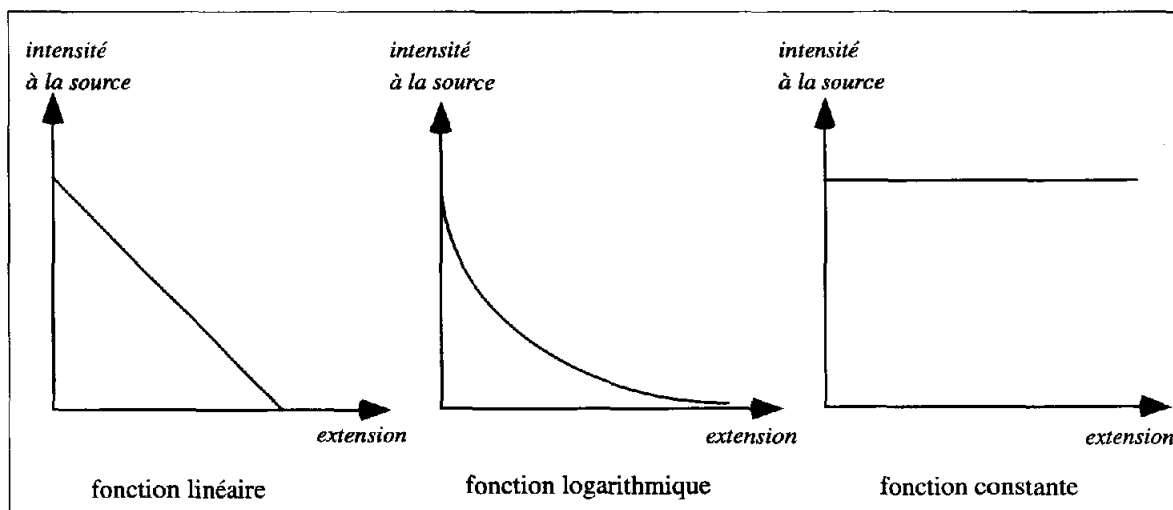
F est la fonction d'objectif. Le problème consiste donc à déterminer la configuration des localisations de manière à minimiser à la fois les coûts de déplacement et les externalités spatiales négatives. Le problème est contraint : l'équation (a.2) exprime la nécessité que tout point de demande soit affecté à une unité d'offre ; l'équation (a.3) montre que la demande du point i allouée à un point j ne peut être satisfaite que si une unité est localisée au point j ; la troisième contrainte est une contrainte d'intégralité imposant que la variable y_j ne puisse prendre que des valeurs binaires. La contrainte de cardinalité (a.5) permet de préciser le nombre d'unités à implanter. C'est ce nouveau modèle qui va être utilisé dans les simulations théoriques.

Dans la plupart des travaux que nous avons cités plus haut, les modèles utilisés sont des modèles continus, c'est-à-dire que l'ensemble des localisations potentielles des centres d'activité est une partie délimitée d'un plan. Le modèle que nous avons retenu est un modèle discret pour lequel l'ensemble des localisations possibles est un nombre fini de points. Les modèles discrets peuvent être résolus par programmation linéaire en nombres entiers. Ils présentent l'avantage d'une grande flexibilité qui permet l'inclusion de diverses caractéristiques de l'activité et/ou du demandeur, ainsi que des particularités du milieu d'étude. Les modèles discrets sont plus adaptés à la problématique que nous envisageons. En effet, leur grande flexibilité nous permet d'y incorporer de nouvelles caractéristiques et contraintes liées aux externalités spatiales et la résolution par des méthodes combinatoires simplifie la procédure. L'ensemble des sites potentiels est donné par un réseau constitué d'un nombre fini d'arcs topologiques. Les points d'implantation possibles étant situés aux extrémités ou sur des sections intermédiaires des arcs. Ce réseau figure le réseau de transport, le long duquel il est hautement probable que se situe un centre d'activité.

1.2. La fonction d'externalité spatiale

L'implantation d'un centre d'activité produit un impact sur l'environnement qui l'entoure. Les activités à caractère polluant créent des nuisances, celles-ci décroissent généralement avec la distance au centre générateur [13]. Trois formes simples de dispersion des externalités ont été testées. Il s'agit de fonction linéaire, logarithmique et constante jusqu'à un seuil d'annulation (fig. 1). Ces fonctions n'ont pas été choisies pour leur représentation réelle de diverses fonctions de dispersion de polluants, mais pour leur simplicité et leur flexibilité. Nous supposons une unité commune qui nous permet de mesurer à la fois le coût de transport et le coût engendré par la nuisance sur la population. Une des particularités de l'externalité spatiale est que la population qui la subit n'est pas nécessairement celle concernée par le service.

Figure 1 : Trois fonctions simples de dispersion des externalités



Les externalités spatiales décroissant de façon isotropique, aucune direction n'est privilégiée. Outre leur forme, elles sont définies par deux paramètres, l'intensité à la source (*int*) et l'extension (*ext*). Ces deux caractéristiques permettent de définir la grandeur de la nuisance et sa dispersion dans l'espace. Étant donnée la taille du semis de points, nous ferons varier les valeurs de l'intensité et de l'extension de 0 à 800, par pas de 100, pour les formes linéaire et constante. La forme logarithmique est définie par l'intensité à la source et par la pente ; l'intensité variera de 0 à 800 et la pente prendra respectivement les valeurs -0,3 ; -0,5 ; -0,8 ; -1 ; -1,5 ; -2. Ces valeurs ont été arrêtées de manière à obtenir un vaste échantillon, tout en maintenant un nombre de simulations raisonnable.

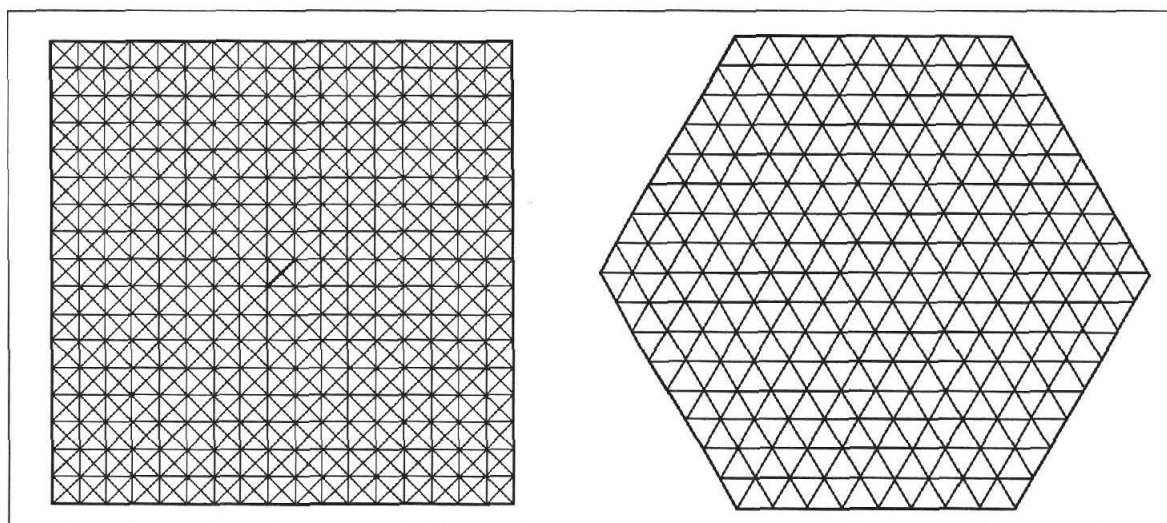
Si la dispersion des externalités se fait isotropiquement dans le plan, elles ne sont mesurées qu'au niveau des nœuds du réseau, puisque c'est en ces points que la demande est localisée.

2. Simulations

L'étude est basée sur l'analyse de réseaux théoriques afin d'isoler l'impact des externalités spatiales sur les localisations des effets de la morphologie du réseau. Le choix d'un treillis de points régulier plutôt que d'un semis aléatoire ou irrégulier permet d'éviter de multiples sources de variation et de tirer des conclusions plus générales.

Parmi toutes les configurations possibles, deux semis de points ont été retenus : un carré et un hexagone. Le semis carré a un côté de 18 points, tous les points sont dispersés régulièrement dans l'espace. Un point central a été ajouté aux 324 points, de façon à rendre une localisation centrale possible. Tous les points de ce semis ont donc un environnement semblable, à l'exception du point central et des points de bordure (fig. 2). Chaque point i du semis est défini par ses coordonnées et est relié par un arc à ses plus proches voisins. La longueur de ces arcs est de 100 pour les côtés et de 141 pour les diagonales. Le semis hexagonal est basé sur la théorie des lieux centraux de Christaller. Le semis hexagonal comprend 271 points, la cellule fondamentale de ce semis est un triangle équilatéral de 100 de côté. Tous les points de ce semis ont un environnement semblable, à l'exception des points de bordure (fig. 2) La taille des treillis est déterminée par un compromis entre faisabilité technique et temps de résolution informatique.

Figure 2 : Semis carré et semis hexagonal



Chaque point i du semis est simultanément un point potentiel de demande et un point potentiel d'offre. La demande est uniformément répartie sur le nombre de points i et elle est unitaire en chaque point ($a_i = 1, \forall i$). La demande est entièrement satisfaite par les centres d'activité localisés optimalement et est inélastique à la distance. Aucun axe n'est unidirectionnel et la congestion n'est pas prise en compte. L'environnement peut donc être considéré comme homogène. Le coût de transport est calculé le long des arcs qui relient chaque point à son voisin le plus proche.

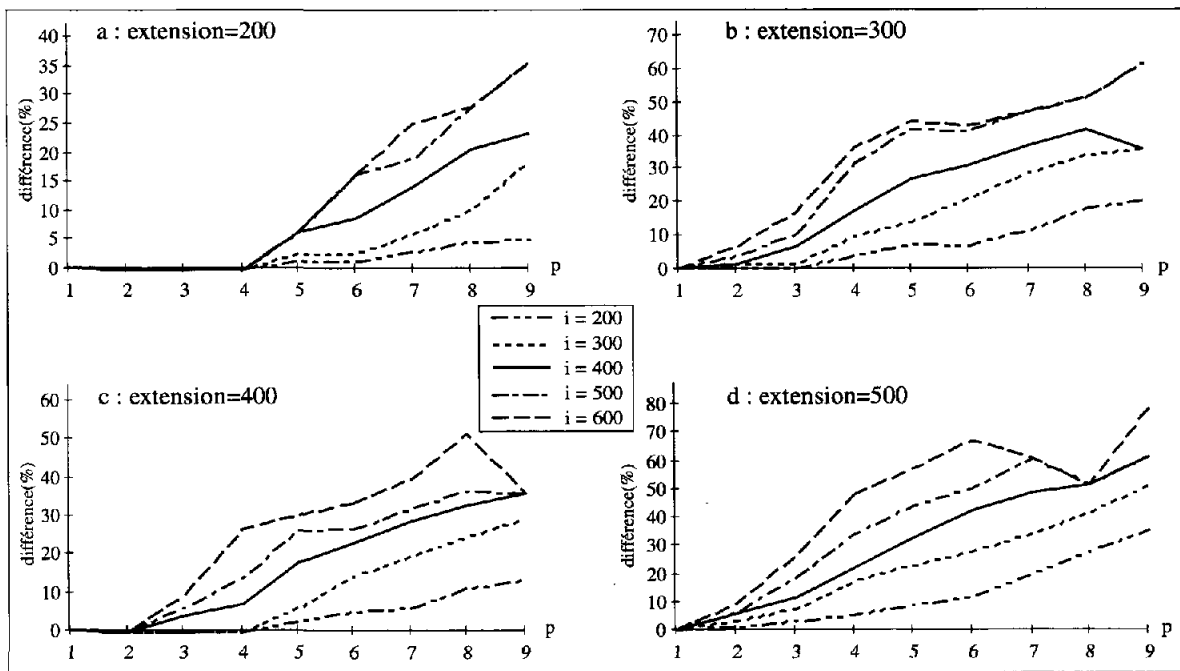
3. Résultats

Les simulations ont été menées sur deux types de semis de points et pour trois types de fonction de dispersion des externalités. Six jeux de simulations ont donc été réalisés. Pour chacun d'eux, nous avons fait varier le nombre p de centres d'activités de 1 à 9. Les résultats de ces différents jeux seront analysés globalement dans les deux paragraphes suivants.

3.1. L'efficacité

La distance moyenne entre les points de demande i et le centre le plus proche j est un des résultats les plus courants des modèles de localisation-affectation, considéré souvent comme une mesure de l'efficacité de la configuration spatiale. La distance moyenne diminue d'autant plus que le nombre p de centres implantés augmente, la diminution relative étant de plus en plus faible. L'analyse des différences de distance moyenne pour les modèles qui intègrent des externalités spatiales et pour ceux qui ne prennent en compte que les coûts de transport nous renseigne sur l'effet de l'introduction des externalités sur l'efficacité du système. La différence de distance moyenne entre les localisations optimales obtenues si les externalités n'interviennent pas et les localisations pour lesquelles elles interviennent augmente avec le nombre de centres implantés, l'intensité et l'extension de l'externalité.

Figure 3 : Variation de la distance moyenne selon le nombre de centres d'activité (p) et l'intensité à la source (int)



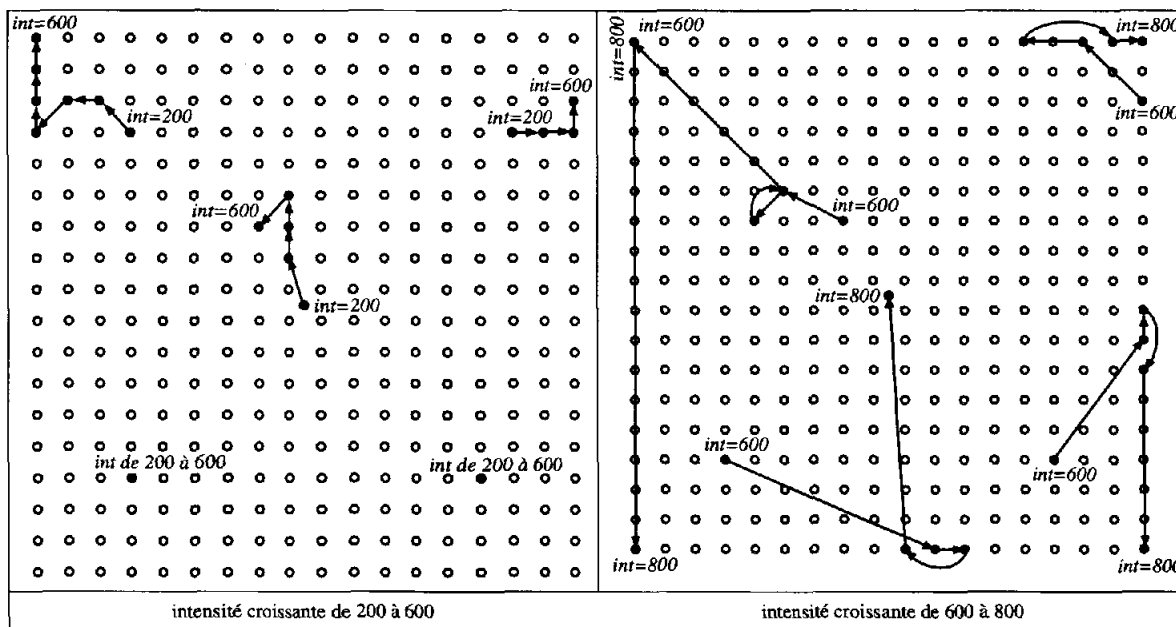
La figure 3 illustre la différence, exprimée en pourcentage, entre la distance moyenne aux centres générateurs d'une externalité et la distance moyenne aux centres non générateurs d'externalité, selon le nombre p de centres et l'intensité de l'externalité (l'extension étant fixée). Dans ce cas, il s'agit d'un treillis carré et d'une fonction linéaire de dispersion de l'externalité. Chaque diagramme de la figure 4 se réfère à une valeur d'extension et exprime la différence relative de la distance moyenne en fonction de p (p allant de 1 à 9) et de l'intensité (qui varie de 200 à 600, par pas de 100). Ces résultats ne sont qu'un échantillon parmi de nombreux autres, mais ils sont représentatifs de la tendance observée. Le premier constat porte sur l'introduction d'externalités négatives sur les localisations de centres d'activité. Un effet centrifuge apparaît nettement, les localisations étant repoussées en périphérie. Cet effet centrifuge se marque d'autant plus que l'intensité est forte et que l'extension est grande. L'extension a d'ailleurs un impact plus important sur les localisations que l'intensité. L'effet de l'extension de l'externalité se marque essentiellement au niveau du nombre d'implantations nécessaires pour voir apparaître cet effet répulsif, alors que l'intensité accentue la répulsion lorsqu'elle existe, mais ne l'engendre pas. Cet effet répulsif diminue, bien sûr, l'efficacité du système puisqu'il augmente la distance moyenne entre l'utilisateur du service et l'implantation de celui-ci. Cet effet répulsif entraîne également une modification des aires de marché des centres de service. Les modifications se font sentir à la fois au niveau de la forme de l'aire de marché et de sa taille. Les services centraux sont ainsi privilégiés aux dépens des centres périphériques.

Une hiérarchie des centres s'installe en raison, non pas de distinctions propres aux centres, mais d'une volonté de minimisation de la nuisance ressentie par la population. Ceci n'étant possible que parce que le réseau est un espace borné.

3.2. La mobilité des centres

Nous avons donc observé une diminution de l'efficacité du système suite à la migration des centres vers la périphérie, de façon à minimiser la nuisance ressentie par les populations. Cette migration des centres s'opère de façon continue plutôt que par « sauts », à l'inverse de ce qui a pu être observé dans d'autres études traitant de délocalisation industrielle, par exemple. Il s'agit d'une migration continue dans la mesure où l'on peut parler de continu dans un espace discret. Les délocalisations se font de nœud en nœud (fig. 4a). Toutefois, lorsque les centres entrent en « compétition », c'est-à-dire quand les aires d'influence de leur externalité se rejoignent (puisque le réseau a une taille limitée), les déplacements de localisation sont plus désordonnés (fig. 4b). Ceci s'explique par la simple géométrie ; les centres se repoussant de façon à éviter tout cumul des nuisances, des rotations de configuration apparaissent pour maximiser la distance entre les centres. Des configurations paradoxales se présentent parfois dans le cas du treillis hexagonal, quand le nombre de centres à implanter est important (8 ou 9). Certains centres sont alors implantés optimalement par le modèle, côte à côte. Cette localisation étonnante pour des activités polluantes s'explique en partie par l'existence d'optima alternatifs, mais surtout par la géométrie du semis. En effet, la limitation du semis dans l'espace crée des zones privilégiées à la frontière et plus particulièrement aux angles, où les coûts dus aux externalités sont moindres étant donné l'inexistence de points en dehors du semis étudié. On pourrait considérer ceci comme un artefact théorique puisqu'un environnement réel est rarement totalement isolé par sa frontière. Toutefois, la localisation de certaines centrales nucléaires, par exemple, en bordure de frontière montre la réalité psychologique et politique de cette limitation au territoire national.

Figure 4a et 4b : Changements de localisation de 5 unités engendrant une nuisance d'extension fixe (600)
 a. d'intensité croissante (200 à 600)
 b. d'intensité croissante (600 à 800)



Le but de ce travail est de tester la sensibilité des résultats des modèles de localisation-affectation à l'introduction d'externalités négatives dans la fonction d'objectif. Le modèle de base est le modèle de la p-médiane, modifié par l'inclusion de fonctions d'externalités. Les simulations ont été réalisées sur deux semis de points, l'un carré, l'autre hexagonal. Les résultats principaux nous montrent une diminution de l'efficacité du système suite à un rejet en périphérie des activités polluantes. Ce rejet s'opère quand les centres entrent en « compétition », c'est-à-dire quand les nuisances issues de différentes unités se rejoignent. Ce refoulement vers l'extérieur peut être perturbé par la taille du semis de points, des rotations de configuration apparaissent alors, de façon à maximiser la distance entre les centres. Ces rotations peuvent conduire à des localisations paradoxales, dépendantes de la morphologie du treillis.

Ce travail n'est que le début d'une analyse plus profonde concernant les effets de l'introduction des externalités spatiales dans les modèles classiques de localisation-affectation. Il s'inscrit dans une recherche plus large traitant de la sensibilité des modèles de localisation à différents entrants comme la morphologie de réseau, la mesure de la distance, la congestion du réseau,... Le croisement de ces différents entrants pourra nous renseigner sur les possibilités et les limites de ces modèles classiques de localisation.

Bibliographie

- [1] CHURCH R., GARFINKEL R., 1978 : « Locating an obnoxious facility on a network », *Transportation Science*, 12, pp. 107-118
- [2] DASARATHY B., WHITE L., 1980 : « A Maximin location problem », *Operations Research*, 28, pp. 1385-1401
- [3] DREZNER Z., WESOLOWSKY G., 1983 : « Location of an obnoxious facility with rectangular distances », *Journal of Regional Science*, 23, pp. 241-248
- [4] DREZNER Z., WESOLOWSKY G., 1985 : « Location of multiple obnoxious », *Transportation Science*, 19, pp. 193-202
- [5] DREZNER Z., WESOLOWSKY G., 1996 : « Obnoxious facility location in the interior of a planar network », *Journal of Regional Science*, 35, pp. 675-688
- [6] DUTTON R., HINMAN G., MILLHAM C., 1974 : « The Optimal location of nuclear-power facilities in the Pacific Northwest », *Operations Research*, 22, pp. 478-487
- [7] ERKUT E., NEUMAN S., 1989 : « Analytical models for locating undesirable facilities », *European Journal of Operational Research*, 40, pp. 275-291
- [8] ERKUT E., NEUMAN S., 1992 : « A multiobjectif model for locating undesirable facilities », *Annals of Operations Research*, 40, pp. 209-227
- [9] KARKAZIS J., BOFFEY B., 1994 : « Modelling pollution spread », *Studies in Location Analysis*, 7, pp. 91-104
- [10] LIPSCOMB D., TAYLOR Jr., 1978 : *Noise Control, Handbook of Principles and Practices*, New York, Van Nostrand Reinhold
- [11] MELACHRINOUDIS E., CULLINANE T., 1985 : « Locating a undesirable facility within a geographical region using the maximin criterion », *Journal of Regional Science*, 25, pp. 115-127

[12] MORELL D., 1984 : Siting and the politics of equity, *Hazardous Waste*, 1, pp. 555-571

[13] PAPAGEORGIU Y., 1978 : « Spatial externalities I : Theory », *Annals of the Association of American Geographers*, 68, pp. 465-492

[14] RATICK S., WHITE A., 1988 : « A risk-sharing model for locating noxious facilities », *Environment and Planning B : Planning and Design*, 15, pp. 165-179