

2005-02

UNE APPLICATION
C#.NET POUR
LE CALCUL DES
INDICES DE
SÉGRÉGATION
RÉSIDENTIELLE

Philippe APPARICIO
Valera PETKEVITCH
Mathieu CHARRON

Inédits

INRS
Urbanisation, Culture et Société

Document de recherche / *Working paper*

Mai 2005

**Une application C#.Net pour le calcul
des indices de ségrégation résidentielle**

Philippe APPARICIO
Valera PETKEVICH
Mathieu CHARRON

Laboratoire d'analyse spatiale et
d'économie régionale (LASER)

Institut national de la recherche scientifique
Urbanisation, Culture et Société

Mai 2005

Philippe.Apparicio@ucs.inrs.ca

Membre du Laboratoire d'analyse spatiale et d'économie régionale (LASER)

Inédits, collection dirigée par Richard Shearmur

Richard.Shearmur@inrs-ucs.quebec.ca

Institut national de la recherche scientifique

Urbanisation, Culture et Société

3465, rue Durocher

Montréal (Québec) H2X 2C6

Téléphone : (514) 499-4000

Télécopieur : (514) 499-4065

www.inrs-ucs.quebec.ca/

ISBN 2-89575-080-7

© Tous droits réservés

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	V
1. INTRODUCTION	1
2. BREF RETOUR SUR LES NOTIONS DE SÉGRÉGATION RÉSIDEN- TIELLE ET D'HYPER-SÉGRÉGATION.....	2
2.1 Le développement et le recours aux indices de ségrégation.....	2
2.2 Les cinq dimensions de la ségrégation résidentielle et la notion d'hyperségrégation avancée par Massey et Denton.....	3
3. LES INDICES DE SÉGRÉGATION RÉSIDEN- TIELLE IMPLANTÉS DANS L'APPLICATION C#.NET	6
4. DESCRIPTION DE L'APPLICATION C#.NET.....	13
4.1 Modèle de déploiement de l'application C#.Net.....	13
4.2 Calcul des paramètres géométriques pour les indices de ségrégation spatiaux	16
4.3 Temps de calcul nécessaire aux calculs de indices	22
5. CONCLUSION	23
ANNEXE 1 : SOLUTION ANALYTIQUE POUR TROUVER L'INTERSECTION ET L'UNION ENTRE DEUX ELLIPSES.....	25
RÉFÉRENCES.....	27

Liste des tableaux

Tableau 1 : Les indices de ségrégation implantés dans l'application C#.Net.....	7
Tableau 2 : Les indices de ségrégation unigroupes selon les cinq dimensions	8
Tableau 3 : Les indices de ségrégation intergroupes selon les cinq dimensions	10
Tableau 4 : Les indices de ségrégation multigroupes selon les cinq dimensions	12
Tableau 5 : Les indices de ségrégation locaux	13
Tableau 6 : Les paramètres géométriques nécessaires au calcul des indices spatiaux	16
Tableau 7 : Temps de calcul nécessaire aux calculs des différents indices (en secondes).....	22

Liste des figures

Figure 1 : Les cinq dimensions de la ségrégation résidentielle	5
Figure 2 : Structure de l'application.....	14
Figure 3 : L'interface de l'application C#.Net	15
Figure 4 : Calcul de la superficie d'un polygone en utilisant les trapèzes.....	18
Figure 5 : Le centre de gravité en fonction de la décomposition du polygone en triangles.....	19
Figure 6 : Les différentes formes d'intersection de deux ellipses	25

Résumé

Les indices de ségrégation sont aujourd'hui bien connus et de plus en plus utilisés dans le champ des études urbaines. Cependant, en l'absence d'outils informatiques réellement adaptés, le calcul des indices de ségrégation devient rapidement une opération complexe et longue à réaliser. En outre, les rares applications gratuites dédiées aux calculs des indices sont implémentées dans des systèmes d'information géographique (ArcInfo, ArcView et MapInfo). L'utilisateur qui désire calculer les indices à l'aide de ces applications doit donc disposer du logiciel SIG dans lequel est implémentée l'application, mais aussi le maniement des SIG doit lui être suffisamment familier, soit deux conditions qui peuvent limiter l'utilisation et, de ce fait, la démocratisation des indices de ségrégation résidentielle. C'est pour remédier à cette situation que nous proposons ici une application autonome développée en C#.Net permettant de calculer facilement et rapidement une quarantaine d'indices de ségrégation (indices unigroupes, intergroupes et multigroupes), et ce quelles que soient les données ou la ville à l'étude.

Abstract

Segregation indices are today well known and increasingly used in urban studies. However, in the absence of actual adaptive computer tools, calculating segregation indices quickly becomes a long and complicated process. The odd free applications designed to calculate indices are part of geographic information systems (ArcInfo, ArcView, and MapInfo). Users wishing to calculate indices by way of these applications must have the GIS software that contains the applications and also a sufficient understanding of how to use geographic information systems—two conditions that can limit use and correspondingly, broad access to residential segregation indices. To remedy this situation, we are proposing here an independent application developed in C#.Net that allows some forty segregation indices (unigroup, intergroup, and multigroup) to be calculated quickly and easily, regardless of the data or city being studied.

1. INTRODUCTION

Les indices de ségrégation résidentielle habituellement regroupés selon cinq dimensions — l'égalité, l'exposition, la concentration, l'agrégation spatiale, la centralisation — sont aujourd'hui bien connus. Des auteurs comme Massey et Denton, (1988), Massey *et al.* (1996), Apparicio (2000), Hutchens (2001), Reardon et Firebaugh (2002) et Reardon et O'Sullivan (2004) ont proposé des synthèses de la littérature sur les indices de ségrégation dans lesquelles on peut retrouver les formulations et les propriétés de chacun d'entre eux. Ces synthèses ont certainement conduit à une démocratisation de l'utilisation des indices de ségrégation ou, tout au moins, à une utilisation de plus en plus fréquente depuis quelques années dans le champ des études urbaines (voir notamment Apparicio et Séguin, 2002; Huie et Frisbie, 2000; Flippen, 2001; Johnston *et al.*, 2001; Ray, 1999; Ross *et al.*, 2004; Townshend et Walker, 2002). À cela rien d'étonnant, puisque les indices permettent 1) de qualifier et de confronter la répartition dans l'espace métropolitain de groupes de population différenciés sur la base de leur origine ethnique, de leur pays ou de leur région de naissance, de leur langue maternelle, de leur appartenance à une minorité visible ou encore de leur catégorie professionnelle, 2) de comparer les situations entre différentes villes ou encore 3) de réaliser des analyses diachroniques.

Cette démocratisation demeure malgré tout limitée puisqu'en l'absence d'outils informatiques réellement adaptés, le calcul de ces indices devient rapidement une opération complexe et longue à réaliser. Reardon et O'Sullivan (2004 : 127) soulignent d'ailleurs qu'il n'existe actuellement que peu d'applications dédiées aux calculs de ces indices. De plus, les rares applications disponibles sont implémentées dans des logiciels de systèmes d'information géographique (SIG), soit dans ArcInfo et S-Plus à partir de développements en *Arc Macro Language* (AML) (Wong et Chong, 1998), soit dans ArcView à partir de développements en Avenue (Wong, 1996; 2003), ou encore dans MapInfo à partir de développements en MapBasic (Apparicio, 2000). L'utilisateur qui désire calculer les indices à l'aide de ces applications doit donc d'une part, disposer du logiciel SIG dans lequel est implémentée l'application, et d'autre part, le maniement des SIG doit lui être suffisamment familier, soit deux conditions qui peuvent limiter l'utilisation et, de ce fait, la démocratisation des indices de ségrégation.

C'est pour remédier à cette situation qu'il nous a paru opportun de développer une application C#.Net permettant de calculer facilement une quarantaine d'indices de ségrégation, et ce quelles que soient les données ou la ville à l'étude. Après un bref retour sur les notions de ségrégation et d'hyperségrégation résidentielle (1), nous décrirons les indices implantés dans l'application C#.Net (les indices unigroupes,

intergroupes, multigroupes et les mesures locales) (2), puis le modèle de déploiement de l'application (3) ainsi que la façon dont les paramètres géométriques nécessaires aux indices de ségrégation dits spatiaux sont calculés (4).

2. BREF RETOUR SUR LES NOTIONS DE SÉGRÉGATION RÉSIDENIELLE ET D'HYPERSÉGRÉGATION

2.1 Le développement et le recours aux indices de ségrégation

Le développement des indices de ségrégation a eu lieu aux États-Unis où la préoccupation pour les phénomènes de concentration des groupes ethniques ou raciaux n'est pas nouvelle, comme en témoignent divers écrits réalisés par l'École de Chicago dès les années 1920 (Grafmeyer et Joseph, 1984). Durant les années 1950, une nouvelle génération de chercheurs proposent des mesures de la ségrégation résidentielle; parmi elles figurent les indices de ségrégation et de dissimilarité de Duncan et Duncan (1955 a et b) devenus classiques. Brièvement, ces indices permettent de vérifier si un groupe est inégalement réparti à travers un ensemble d'unités spatiales (les secteurs de recensement d'une région métropolitaine par exemple), ou encore si deux groupes ont des répartitions spatiales similaires. Plus récemment, durant les années 1980 et 1990, d'autres chercheurs américains, notamment Jakubs (1981), Morgan (1983), White (1986), Morrill (1991) et Wong (1993), ont développé de nouveaux indices de ségrégation dits spatiaux¹ pour affiner ou compléter les mesures déjà connues de la ségrégation résidentielle. Parallèlement, durant la même période, un autre groupe de chercheurs propose des indices de ségrégation multigroupes permettant de comparer la répartition spatiale de plusieurs groupes à la fois (Theil, 1972; Sakoda, 1981; Carlson, 1992; Reardon, 1998; Wong, 1998; Reardon et Firebaugh, 2002).

Aux États-Unis, le développement et le recours aux indices de ségrégation sont en partie liés aux politiques de déségrégation envers les Afro-Américains. En effet, dans ce contexte historique et politique, disposer de mesures chiffrées claires et facilement interprétables indiquant le degré de ségrégation de la population afro-américaine, que ce soit sur le plan résidentiel, scolaire, ou encore sur le marché du travail, revêt une importance de premier ordre (Rhein, 1994 : 137-140). Le recours aux indices de ségrégation n'est bien entendu pas limité à cette seule finalité. On le retrouve notamment dans le champ des études urbaines pour décrire et confronter la répartition dans l'espace métropolitain de groupes de population différenciés sur la base de leur

¹ On appelle indices spatiaux ceux qui nécessitent le calcul de certains paramètres géométriques comme la superficie et le périmètre des polygones ou encore des matrices de contiguïté, de distance, de longueur de la frontière commune entre les unités spatiales.

origine ethnique ou de leur statut économique par exemple, et ce, en fonction de leur lieu de résidence ou, plus rarement, de leur lieu de travail.

2.2 Les cinq dimensions de la ségrégation résidentielle et la notion d'hypermégrégation avancée par Massey et Denton

Dans une remarquable synthèse de la littérature sur les indices de ségrégation résidentielle, Massey et Denton (1988) regroupent les formes et les manifestations spatiales de la ségrégation en cinq dimensions bien distinctes qui sont schématisées à la figure 1 : *l'égalité, l'exposition, la concentration, l'agrégation spatiale et la centralisation*. Pour chaque dimension, on distingue généralement trois types d'indices : les indices unigroupes qui mesurent la répartition d'un groupe par rapport à l'ensemble de la population; les indices intergroupes qui comparent la répartition d'un groupe avec celle d'un autre groupe; et les indices multigroupes qui comparent la distribution spatiale de plusieurs groupes à la fois.

L'égalité renvoie à la distribution d'un ou de plusieurs groupes de population à travers les unités spatiales de l'aire métropolitaine (les secteurs de recensement par exemple). Les indices d'égalité mesurent la surreprésentation ou la sous-représentation d'un groupe dans les unités spatiales d'une région métropolitaine : plus un groupe de population est inégalement réparti à travers ces unités spatiales, plus il est ségrégué. À la figure 1, la situation (a) traduit une distribution homogène du groupe à travers les unités spatiales de la ville qui sera mise en évidence par des valeurs d'indices d'égalité unigroupes nuls. À titre d'exemple, un groupe qui représente 25 % de la population d'une région métropolitaine a une distribution homogène s'il représente aussi 25 % de la population de chaque unité spatiale qui compose cette métropole. À l'inverse, (b) renvoie à une distribution ségrégative : les membres du groupe X résident seulement dans quatre unités spatiales de l'aire métropolitaine. Bien que les formes spatiales générées soient totalement différentes, cet état « ségrégatif » se retrouve également dans les situations (c) à (j) : les membres du groupe X sont aussi présents dans uniquement quatre unités spatiales; autrement dit, les valeurs des indices d'égalité seront les mêmes. Ceci démontre que la seule utilisation des mesures d'égalité (tels que l'indice de ségrégation ou l'indice de dissimilarité), certes pertinente, reste toutefois insuffisante pour décrire les répartitions de groupes de population à travers l'espace métropolitain dans toute leur complexité.

L'exposition est le degré de contact potentiel entre les membres du même groupe (unigroupe) ou entre les membres de deux groupes (intergroupe) à l'intérieur des unités spatiales (Massey et Denton, 1989 : 373). Elle mesure la probabilité qu'un membre d'un groupe rencontre un membre de son groupe (l'isolement) ou un membre d'un autre

groupe (l'interaction) dans son unité spatiale. Une distribution similaire de deux groupes (des indices d'égalité intergroupe nuls) à travers la ville ne signifie pas pour autant qu'il existe une forte interaction entre les membres des deux groupes. Imaginons deux groupes, X et Y, l'un majoritaire et l'autre minoritaire, qui représentent respectivement 75 % et 25 % de la population totale de chaque unité spatiale de l'aire métropolitaine. Même s'ils ont une distribution spatiale similaire, la probabilité qu'un membre du groupe Y rencontre un membre du groupe X dans son unité spatiale est plus forte que la probabilité qu'un membre du groupe X rencontre un membre du groupe Y. Un examen de la figure 1 révèle une situation extrême où les membres du groupe X sont totalement isolés en (d) : ils ne partagent aucune unité spatiale avec les membres d'autres groupes (ils représentent 100 % de la population de chacune des quatre unités spatiales où ils résident); tandis qu'ils partagent les unités spatiales avec les membres d'autres groupes en (c) puisqu'ils représentent 25 % de la population totale de chacune des quatre unités spatiales où ils résident.

La **concentration** réfère à l'espace physique occupé par un groupe (en termes de superficie). Plus un groupe occupe une faible partie du territoire de l'aire métropolitaine, plus il est concentré. Selon Massey et Denton (1988 : 289), les minorités ségréguées occupent généralement une faible part de l'espace urbain. Bien que les situations d'égalité soient identiques, la concentration est minimale en (e) et maximale en (f).

D'autres indices mesurent l'**agrégation spatiale**. Plus un groupe occupe des unités spatiales contiguës, formant ainsi une enclave dans la ville, plus il est regroupé et donc ségrégué du point de vue de cette dimension. À la figure 1, les situations d'égalité sont identiques en (g) et en (h), par contre, l'agrégation spatiale est minimale en (g) et maximale en (h).

Enfin, les indices de **centralisation** mesurent la distance du groupe par rapport au centre de la région métropolitaine, défini habituellement comme le centre des affaires et ses environs. Plus un groupe est localisé près du centre-ville, plus il est centralisé et ainsi ségrégué selon cette dimension. À la figure 1, le groupe est totalement centralisé en (j), contrairement à la situation (i). Dans de nombreuses villes nord-américaines, la communauté afro-américaine, et aussi les membres défavorisés des minorités ethniques, résident majoritairement dans les logements insalubres du parc immobilier ancien des quartiers centraux. Par contre, la centralisation des groupes minoritaires est une réalité peu observée dans de nombreuses villes européennes et dans certaines villes canadiennes, où les quartiers du centre ont connu, ces dernières décennies, un mouvement de gentrification ou, encore, où de nombreux quartiers centraux n'ont pas

connu de processus de *filtering down* (Goldberg et Mercer, 1986), c'est-à-dire un appauvrissement de leur population (Apparicio et Séguin, 2002 : 273).

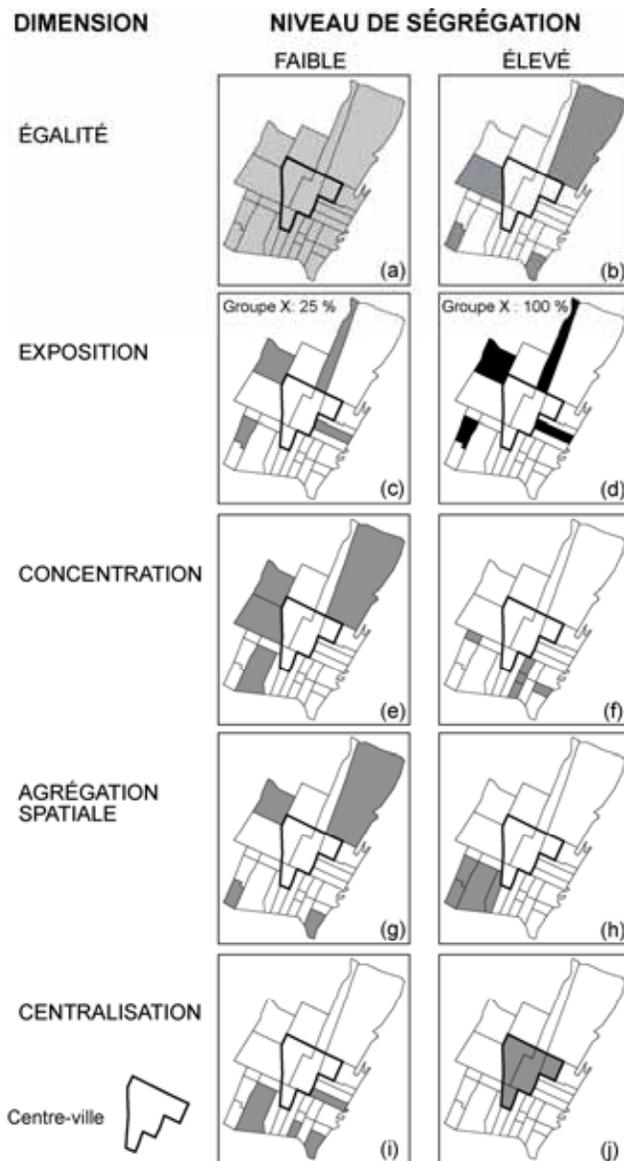


Figure 1 : Les cinq dimensions de la ségrégation résidentielle

On devine l'objectif tacite de l'utilisation de ces dimensions dans la littérature étasunienne : repérer si, dans telle ou telle ville, la minorité afro-américaine est cloisonnée ou non dans un ghetto. En effet, qu'est-ce qu'un ghetto afro-américain si ce n'est : 1) un espace regroupant la majeure partie de la communauté afro-américaine de l'aire métropolitaine (*inégale répartition*); 2) une zone homogène composée très majoritairement d'Afro-Américains (*fort isolement*); 3) une zone représentant une faible partie du territoire métropolitain où la densité de population est l'une des plus fortes de

l'aire métropolitaine (*forte concentration*); 4) une enclave, une zone formée de secteurs de recensement contigus (*forte agrégation*); 5) une zone généralement localisée dans les quartiers centraux (*forte centralisation*). Les travaux de Massey et Denton vont dans ce sens. Lors d'une étude sur la répartition des Noirs et des Hispaniques dans 60 régions métropolitaines américaines, ces sociologues avancent l'idée d'une hyperségrégation des Afro-Américains qui sont fortement ségrégués selon les cinq dimensions à Baltimore, Chicago, Détroit, Milwaukee et Philadelphie (Massey et Denton, 1989 : 381-382).

3. LES INDICES DE SÉGRÉGATION RÉSIDENTIELLE IMPLANTÉS DANS L'APPLICATION C#.NET

Au total, 42 indices de ségrégation ont été implantés dans l'application C#.Net dont 19 indices unigroupes, 13 indices intergroupes, 8 indices multigroupes et deux indices locaux (tableau 1). Les formulations de tous ces indices sont reportées aux tableaux 2 à 5. Nous n'aborderons pas ici les propriétés et la signification de chacun des indices, objets largement décrits par Massey et Denton (1988), Massey *et al.* (1996), Apparicio (2000), Hutchens (2001), Reardon et Firebaugh (2002), Wong (2003) et Reardon et O'Sullivan (2004). Retenons néanmoins que la plupart des indices de ségrégation varient de 0 à 1, soit d'une situation traduisant une absence de ségrégation à un état de ségrégation maximale.

Les indices de ségrégation unigroupes, intergroupes et multigroupes sont des mesures globales qui renvoient une valeur pour l'ensemble de l'espace d'étude, décrivant ainsi « l'état ségréatif » du ou des groupes de population à l'étude. Ils ne permettent donc pas de répondre à des questionnements spatiaux du type : où se localisent tel ou tel groupe de population dans la région métropolitaine ? Tel ou tel espace est-il dominé par un ou plusieurs groupes ethniques ou sociaux ? Pour cela, on utilise des mesures que nous nommerons ici indices de ségrégation locaux comme le quotient de localisation (QL) et l'indice d'entropie ou de diversité (H2) (tableau 5). Le premier permet de repérer les unités spatiales de l'espace d'étude où un groupe de population est sur-représenté ($QL > 1$) et inversement, sous-représenté ($QL < 1$). Le second permet de repérer les unités spatiales totalement homogènes (seul un groupe de population y est présent, $H2=0$) et celles maximales diversifiées (lorsque tous les groupes de population ont les mêmes effectifs, $H2=1$). Ces deux indices locaux, habituellement discrétisés et cartographiés, sont aussi implantés dans l'application C#.Net.

Tableau 1 : Les indices de ségrégation implantés dans l'application C#.Net

Dimension	Abréviation	N groupe*	Nom de l'indice	Valeurs
Égalité	IS	1	Indice de ségrégation	[0,1]
	IS(adj)	1	Indice de ségrégation ajusté avec une matrice de contiguïté binaire	[0,1]
	IS(w)	1	Indice de ségrégation ajusté avec la longueur de la frontière commune entre les unités spatiales <i>i</i> et <i>j</i>	[0,1]
	IS(s)	1	Indice de ségrégation ajusté avec la longueur de la frontière commune entre les unités spatiales <i>i</i> et <i>j</i> et le ratio périmètre sur aire	[0,1]
	H	1	Indice d'entropie	[0,1]
	G	1	Indice de Gini	[0,1]
	ATK1	1	Indice d'Atkinson (avec $b = 0,1$)	[0,1]
	ATK5	1	Indice d'Atkinson (avec $b = 0,5$)	[0,1]
	ATK9	1	Indice d'Atkinson (avec $b = 0,9$)	[0,1]
	ID	2	Indice de dissimilarité	[0,1]
	ID(adj)	2	Indice de dissimilarité ajusté avec une matrice de contiguïté binaire	[0,1]
	ID(w)	2	Indice de dissimilarité ajusté avec la longueur de la frontière commune entre les unités spatiales <i>i</i> et <i>j</i>	[0,1]
	ID(s)	2	Indice de dissimilarité ajusté avec la longueur de la frontière commune entre les unités spatiales <i>i</i> et <i>j</i> et le ratio périmètre sur aire	[0,1]
	S	2	Indice centrographique	[0,1]
	D	N	Indice de dissimilarité multigroupe	[0,1]
	SD	N	Indice de dissimilarité multigroupe ajusté avec une matrice de contiguïté binaire	[0,1]
	G	N	Indice de Gini multigroupe	[0,1]
	H	N	Indice d'entropie multigroupe	[0,1]
	C	N	Coefficient de variation multigroupe au carré	[0,1]
	S	N	Indice centrographique multigroupe	[0,1]
Exposition	xPx	1	Indice d'isolement	[0,1]
	ETA2	1	Indice d'isolement ajusté (Eta2)	[0,1]
	xPy	2	Indice d'interaction	[0,1]
	P	N	Isolement normalisé	[0,1]
	R	N	Indice de diversité relative	[0,1]
Concentration	DEL	1	Indice Delta	[0,1]
	ACO	1	Indice de concentration absolue	[0,1]
	RCO	2	Indice de concentration relative	[-1,1]
Agrégation	ACL	1	Indice de regroupement absolu	[0,1]
	Pxx	1	Mesure de la proximité moyenne intragroupe	[0, ∞]
	Pxx ^{exp}	1	Mesure de la proximité moyenne (non linéaire)	[0, ∞]
	DPxx	1	Indice d'isolement (non-linéaire)	[0,1]
	Pxy	2	Mesure de la proximité moyenne intergroupe	[0, ∞]
	Pxy ^{exp}	2	Mesure de la proximité moyenne intergroupe (non linéaire)	[0, ∞]
	SP	2	Proximité spatiale intergroupe	[0, ∞]
	RCL	2	Indice d'agrégation relative	[-∞, ∞]
DPxy	2	Indice d'interaction (non-linéaire)	[0,1]	
Centralisation	Pcc	1	Proportion du groupe au centre-ville	[0,1]
	ACE	1	Indice de centralisation absolue	[-1,1]
	RCE	2	Indice de centralisation relative	[-1,1]
Indices locaux	QL	1	Quotient de localisation	[0, ∞]
	H2	N	Indice d'entropie	[0, 1]

* N Groupe : 1 pour les indices intragroupes, 2 pour les indices intergroupes, N pour les indices multigroupes.

Tableau 2 : Les indices de ségrégation unigroupes selon les cinq dimensions

Dimension et indice	Formulation	Auteur
ÉGALITÉ		
Indice de ségrégation	$IS = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left \frac{X_i}{X} - \frac{t_i - X_i}{T - X} \right $	Duncan & Duncan (1955)
Indice de ségrégation ajusté avec une matrice de contiguïté binaire *	$IS(adj) = IS - \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} \left(\frac{X_i}{t_i} - \frac{X_j}{t_j} \right) \right) / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij}$	Morrill (1991)
Indice de ségrégation ajusté avec la longueur de la frontière commune entre les unités spatiales <i>i</i> et <i>j</i> *	$IS(w) = IS - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left w_{ij} \left(\frac{X_i}{t_i} - \frac{X_j}{t_j} \right) \right $ avec $w_{ij} = f_{ij} / \sum_{j=1}^n f_{ij}$	Wong (1993)
Indice de ségrégation ajusté avec la longueur de la frontière commune entre les unités spatiales <i>i</i> et <i>j</i> et le ratio périmètre sur aire *	$IS(s) = IS - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left\{ \frac{w_{ij} \left \frac{X_i}{t_i} - \frac{X_j}{t_j} \right }{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \times \frac{1}{2} \frac{[(P_i / A_i) + (P_j / A_j)]}{MAX(P/A)} \right\}$	Wong (1993)
Indice d'entropie	$H = \sum_{i=1}^n [t_i(E - E_i) / ET]$ avec $E = (P) \ln[1/P] + (1-P) \ln[1/(1-P)]$ et $E_i = (p_i) \ln[1/p_i] + (1-p_i) \ln[1/(1-p_i)]$	Theil (1972), Theil et Finizza (1971)
Indice de Gini	$G = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [t_i t_j p_i - p_j / 2 T^2 P(1-P)]$	Duncan & Duncan (1955)
Indice d'Atkinson (avec b = 0,1 ou b = 0,5 ou b = 0,9)	$A = 1 - [P/(1-P)] \sum_{i=1}^n [(1-p_i)^{1-b} p_i^b t_i / PT]^{1/(1-b)}$	Atkinson (1970)
EXPOSITION		
Indice d'isolement	${}_x P_x = \sum_{i=1}^n [X_i / X] [X_i / t_i]$	Bell (1954)
Indice d'isolement ajusté	$Eta^2 = [({}_x P_x - P) / (1-P)]$	Bell (1954), White (1986)
CONCENTRATION		
Indice Delta	$DEL = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left \frac{X_i}{X} - \frac{A_i}{A} \right $	Hoover (1941), Duncan <i>et al.</i> (1961)
Indice de concentration absolue	$ACO = 1 - \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (X_i A_i / X) - \sum_{i=1}^n (t_i A_i / T_1)}{\sum_{i=n_2}^n (t_i A_i / T_2) - \sum_{i=1}^n (t_i A_i / T_1)} \right\}$	Massey et Denton (1988)

Les unités spatiales sont triées selon la superficie par ordre croissant.

* Les auteurs proposent en fait des versions ajustées de l'indice de dissimilarité (pour deux groupes et non un groupe, voir le tableau 3). Nous proposons ici une très légère adaptation de leurs indices pour qu'ils fonctionnent pour un groupe.

Tableau 2 (suite) : Les indices de ségrégation unigroupes selon les cinq dimensions

Dimension et indice	Formulation	Auteur
REGROUPEMENT – AGRÉGATION SPATIALE		
Indice de regroupement absolu	$ACL = \left\{ \left[\sum_{i=1}^n (x_i / X) \sum_{j=1}^n (c_{ij} x_j) \right] - \left[X / n^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} \right] \right\} / \left\{ \left[\sum_{i=1}^n (x_i / X) \sum_{j=1}^n (c_{ij} t_j) \right] - \left[X / n^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} \right] \right\}$	Massey et Denton adapté de Dacey (1968) et Geary (1954)
Mesure de la proximité moyenne intragroupe	$P_{xx} = \frac{1}{X^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j d_{ij}$	White (1986)
Mesure de la proximité moyenne (non linéaire)	$P_{xx_{exp}} = \frac{1}{X^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j e^{-d_{ij}}$	White (1986)
Indice d'isolement (non-linéaire)	$DP_{xx} = \sum_{i=1}^n x_i / X \sum_{j=1}^n k_{ij} x_j / t_j$ avec $k_{ij} = t_j e^{-d_{ij}} / \sum_{l=1}^n t_l e^{-d_{il}}$	Morgan (1983)
CENTRALISATION		
Proportion du groupe au centre-ville	$PCC = X_{cc} / X$	Massey et Denton (1988)
Indice de centralisation absolue	$ACE = \left(\sum_{i=1}^n X_{i-1} S_i \right) - \left(\sum_{i=1}^n X_i S_{i-1} \right)$	Massey et Denton (1988)
Les unités spatiales sont triées par ordre croissant selon la distance par rapport au centre-ville.		

Notation :

- A_i Superficie de l'unité spatiale i
- A_j Superficie de l'unité spatiale j
- A Superficie de la ville
- b Paramètre représentant la pondération appliquée à la courbe de Lorenz (varie entre 0 et 1)
- c_{ij} Valeur de la cellule de la matrice de contiguïté binaire entre les unités spatiales i et j : 1 quand i et j sont contigus et 0 lorsqu'ils ne le sont pas
- d_{ij} Distance entre les centroïdes des unités spatiales i et j
- f_{ij} Longueur de frontière commune entre les unités spatiales i et j
- $Max(P/A)$ Rapport maximum entre le périmètre et l'aire des unités spatiales j
- n Nombre d'unités spatiales dans la ville
- n_1 Numéro de l'unité spatiale quand la somme cumulée de la population totale des unités spatiales est égale à la somme de la population du groupe X dans la ville (de 1 vers n_1)
- n_2 Numéro de l'unité spatiale quand la somme cumulée de la population totale des unités spatiales est égale à la somme de la population du groupe X dans la ville (de n vers n_2)
- P Proportion du groupe dans la ville, soit X / T
- p_i Proportion du groupe dans l'unité spatiale i , soit x_i / t_i
- p_j Proportion du groupe dans l'unité spatiale j , soit x_j / t_j
- P_i Périmètre de l'unité spatiale i
- P_j Périmètre de l'unité spatiale j
- S_i Proportion cumulée de la superficie de l'unité spatiale i (rapport entre la superficie de i et celle de la ville, cumulé de 1 vers i)
- T Population totale dans la ville
- T_1 Population totale dans les unités spatiales de 1 à n_1
- T_2 Population totale dans les unités spatiales de n_2 à n
- t_i Population totale dans l'unité spatiale i
- t_j Population totale dans l'unité spatiale j
- X Population du groupe X dans la ville
- X_{cc} Population du groupe X dans le centre-ville
- x_i Population du groupe X dans l'unité spatiale i
- x_j Population du groupe X dans l'unité spatiale j
- X_{i-1} Proportion cumulée du groupe X dans l'unité spatiale i (rapport entre les populations du groupe X dans i et dans la ville, cumulé de 1 vers i)

Tableau 3 : Les indices de ségrégation intergroupes selon les cinq dimensions

Dimension et indice	Formulation	Auteur
ÉGALITÉ		
Indice de dissimilarité	$ID = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left \frac{X_i}{X} - \frac{Y_i}{Y} \right $	Duncan & Duncan (1955)
Indice de dissimilarité ajusté avec une matrice de contiguïté binaire	$D(adj) = ID - \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} \left(\frac{X_i}{t_i} - \frac{X_j}{t_j} \right) \right) / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij}$	Morrill (1991)
Indice de dissimilarité ajusté avec la longueur de la frontière commune entre les unités spatiales i et j	$D(w) = ID - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left w_{ij} \left(\frac{X_i}{t_i} - \frac{X_j}{t_j} \right) \right $ avec $w_{ij} = f_{ij} / \sum_{j=1}^n f_{ij}$	Wong (1993)
Indice de dissimilarité ajusté avec la longueur de la frontière commune entre les unités spatiales i et j et le ratio périmètre sur aire	$D(s) = ID - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left\{ \frac{w_{ij} \left \frac{X_i}{t_i} - \frac{X_j}{t_j} \right }{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \times \frac{1}{2} \frac{[(P_{i,l} / A_i) + (P_{j,l} / A_j)]}{MAX (P / A)} \right\}$	Wong (1993)
Indice centrographique	$S = 1 - (Ell_1 \cap Ell_2 / Ell_1 \cup Ell_2)$ Le numérateur représente la superficie couverte par l'intersection des ellipses des deux groupes alors que le dénominateur représente l'union de ces deux ellipses.	Wong (1999)
EXPOSITION		
Indice d'interaction	${}_x P_y = \sum_{i=1}^n [x_i / X][y_i / t_i]$	Bell (1954)
CONCENTRATION		
Indice de concentration relative	$RCO = \left\{ \left[\frac{\sum_{i=1}^n (x_i A_i / X)}{\sum_{i=1}^n (y_i A_i / Y)} - 1 \right] / \left[\frac{\sum_{i=1}^n (t_i A_i / T_1)}{\sum_{i=n_2}^n (t_i A_i / T_2)} - 1 \right] \right\}$ Les unités spatiales sont triées selon la superficie par ordre croissant.	Massey et Denton (1988)
REGROUPEMENT – AGRÉGATION SPATIALE		
Mesure de la proximité moyenne intergroupe	$P_{xy} = \frac{1}{XY} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i y_j d_{ij}$	White (1986)
Mesure de la proximité moyenne intergroupe (non linéaire)	$P_{xy \exp} = \frac{1}{XY} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i y_j e^{-d_{ij}}$	White (1986)
Proximité spatiale intergroupe	$SP = (XP_{xx} + YP_{yy}) / (X + Y) P_{00}$ avec $P_{00} = \frac{1}{XY} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n e^{-d_{ij}} (x_i + y_i)(x_j + y_j)$ et $e^{-d_{ij}}$ pour P_{xx} , P_{yy} et P_{00}	White (1986)
Indice d'agrégation relative	$RCL = P_{xx} / P_{yy} - 1$ avec $e^{-d_{ij}}$ pour P_{xx} et P_{yy}	White (1986)
Indice d'interaction (non-linéaire)	$DP_{xy} = \sum_{i=1}^n x_i / X \sum_{j=1}^n k_{ij} y_j / t_j$ avec $k_{ij} = t_j e^{-d_{ij}} / \sum_{i=1}^n t_i e^{-d_{ij}}$	Morgan (1983)
CENTRALISATION		
Indice de centralisation relative	$RCE = \left(\sum_{i=1}^n X_{i-1} Y_i \right) - \left(\sum_{i=1}^n X_i Y_{i-1} \right)$ Les unités spatiales sont triées par ordre croissant selon la distance par rapport au centre-ville.	Duncan & Duncan (1955)

Notation :

A_i	Superficie de l'unité spatiale i
A_j	Superficie de l'unité spatiale j
c_{ij}	Valeur de la cellule de la matrice de contiguïté binaire entre les unités spatiales i et j : 1 quand i et j sont contigus et 0 lorsqu'ils ne le sont pas
d_{ij}	Distance entre les centroïdes des unités spatiales i et j
f_{ij}	Longueur de frontière commune entre les unités spatiales i et j
$Max(P/A)$	Rapport maximum entre le périmètre et l'aire des unités spatiales j
n	Nombre d'unités spatiales dans la ville
n_1	Numéro de l'unité spatiale quand la somme cumulée de la population totale des unités spatiales est égale à la somme de la population du groupe X dans la ville (de 1 vers n_1)
n_2	Numéro de l'unité spatiale quand la somme cumulée de la population totale des unités spatiales est égale à la somme de la population du groupe X dans la ville (de n vers n_2)
P_i	Périmètre de l'unité spatiale i
P_j	Périmètre de l'unité spatiale j
T	Population totale dans la ville
T_1	Population totale dans les unités spatiales de 1 à n_1
T_2	Population totale dans les unités spatiales de n_2 à n
t_i	Population totale dans l'unité spatiale i
t_j	Population totale dans l'unité spatiale j
X	Population du groupe X dans la ville
x_i	Population du groupe X dans l'unité spatiale i
x_j	Population du groupe X dans l'unité spatiale j
X_{i-1}	Proportion cumulée du groupe X dans l'unité spatiale i (rapport entre les populations du groupe X dans i et dans la ville, cumulé de 1 vers i)
Y_{i-1}	Proportion cumulée du groupe Y dans l'unité spatiale i (rapport entre les populations du groupe Y dans i et dans la ville, cumulé de 1 vers i)
Y	Population du groupe Y dans la ville
y_i	Population du groupe X dans l'unité spatiale i

Tableau 4 : Les indices de ségrégation multigroupes selon les cinq dimensions

Dimension et indice	Formulation	Auteur
ÉGALITÉ		
Indice de dissimilarité multigroupe	$D = \left(\frac{1}{2T}\right) \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J t_j \pi_{jm} - \pi_m $	Morgan (1975), Sakoda (1981)
Indice de dissimilarité multigroupe ajusté avec une matrice de contiguïté binaire	$SD = (1/2) \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m CN_{ij} - CE_{ij} / \sum_{j=1}^m CN \times CP_j (1 - CP_j) \right)$ avec $CE_{ij} = (CN_i - CN_j) / CN \text{ et } CN_j = \sum_{k=1}^n d(N_{kj})$	Wong (1998)
Gini multigroupe	$G = \left(\frac{1}{2T^2}\right) \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^J \sum_{j=1}^J t_i t_j \pi_{im} - \pi_{jm} $	Reardon (1998)
Entropie multigroupe	$H = \left(\frac{1}{TE}\right) \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J t_j \pi_{jm} \ln[\pi_{jm} / \pi_m]$	Theil (1972), Theil et Finezza (1971)
Indice centrographique multigroupe	$S = 1 - (Ell_1 \cap Ell_2 \cap Ell_3 \cap \dots \cap Ell_n) / (Ell_1 \cup Ell_2 \cup Ell_3 \cup \dots \cup Ell_n)$	Wong (1999)
EXPOSITION		
Isolement normalisé	$P = \frac{1}{T} \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J t_j (\pi_{jm} - \pi_m)^2 / (1 - \pi_{jm})$	Massey et Denton (1988)
Indice de diversité relative	$R = \frac{1}{T} \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J t_j (\pi_{jm} - \pi_m)^2$	Carlson (1992), Goodman et Kruskal (1954), Reardon (1998)
Coefficient de variation multigroupe au carré	$C = \frac{1}{T(M-1)} \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J t_j (\pi_{jm} - \pi_m)^2 / \pi_m$	Reardon et Firebaugh (2002)

Notation :

CN_{ij} Le comptage de la population pour l'unité i et le groupe j où $d()$ est une fonction représentant les unités spatiales contiguës à i . En outre, CN_{ij} n'est pas calculée si N_i , la population dans l'unité spatiale i , est égale à 0

CN_i Le comptage de la population totale pour l'unité i

CN_j Le comptage de la population pour le groupe j

CN Le comptage de la population pour l'ensemble de la ville

CP_j La proportion de la population de groupe j

$I = \sum_{m=1}^M \pi_m (1 - \pi_m)$ Indice d'interaction de Simpson (Liberson, 1969; White, 1986).

$E = \sum_{m=1}^M \pi_m \ln(1/\pi_m)$ Indice d'entropie (Theil, 1972).

M Nombre de groupes

t_j Population totale dans l'unité spatiale j

T Population totale dans la ville

π_m Proportion du groupe m dans la ville

π_{im} Proportion du groupe m dans l'unité i

π_{jm} Proportion du groupe m dans l'unité j

Tableau 5 : Les indices de ségrégation locaux

Indice	Formulation	Auteur
Quotient de localisation	$QL = (x_i / t_i) / (X / T)$	Isard (1960)
Indice d'entropie	$H2 = - \sum_{j=1}^n [(P_j / P_j) \ln(P_j / P_j)] / \ln n$	Theil (1972), Theil et Finezza (1971)
Notation :		
n	Nombre de groupes	T_i Population totale dans l'unité spatiale i
P_j	Population du groupe X dans la ville	T Population totale dans la ville
P_{ij}	Population du groupe i dans l'unité spatiale j	x_i Population du groupe X dans l'unité spatiale i
		X Population du groupe X dans la ville

4. DESCRIPTION DE L'APPLICATION C#.NET

Les initiatives de démocratisation des données développées par les organismes producteurs des recensements américains et canadiens (US Census Bureau et Statistique Canada) ont sans aucun doute grandement facilité l'accès aux données géographiques. Aujourd'hui, trouver un fichier géographique des unités spatiales d'une région métropolitaine canadienne ou étasunienne² (les secteurs de recensement par exemple), ainsi que des données ethniques ou socioéconomiques³ s'y rattachant est à la portée de tous. Par conséquent, monter une base géographique au format *shapefile* (format d'ESRI) à des fins d'analyse de la ségrégation résidentielle de différents groupes de population pour une métropole donnée est relativement simple à réaliser. Par contre, sans outil informatique réellement adapté, le calcul des indices peut rapidement devenir une opération complexe et fastidieuse. Ceci nous a donc conduit à développer une application C#.Net qui fonctionne à partir de fichiers géographiques *shapefile* qu'il est possible de télécharger gratuitement sur le site du Laboratoire d'analyse spatiale et d'économie régionale du centre Urbanisation, Culture et Société de l'INRS (LASER, <http://www.inrs-uqc.ca/default.asp?p=grlaser>).

4.1 Modèle de déploiement de l'application C#.Net

L'application dénommée *Calcul des indices de ségrégation résidentielle* a été développée à partir du langage C# qui fonctionne avec la plateforme .Net de Microsoft. Ce langage ayant de nombreuses similarités avec le C++ permet de déployer rapidement des applications. L'application est autonome et non reliée à un logiciel de SIG ou de

² Par exemple pour les villes étasuniennes, on pourra télécharger gratuitement les fichiers géographiques (*census tract, census block division, county, etc.*) à l'adresse suivante : http://www.census.gov/geo/www/cob/bdy_files.html.

³ Par exemple pour les villes canadiennes, on pourra télécharger des données socioéconomiques, sociodémographiques et ethniques ou autres pour différents découpages géographiques (secteurs de recensement, divisions de recensement, municipalités sur le site d'E-STAT (http://www.statcan.ca/francais/Estat/licence_f.htm)).

statistique. Par conséquent, l'utilisateur qui désire calculer des indices n'a pas besoin ni de disposer d'un logiciel de SIG ou de statistique, ni d'être familier avec le maniement de ces types de logiciels, soit des réalités qui facilitent grandement l'utilisation de notre application.

Le processus de calcul des indices de ségrégation résidentielle dans l'application présentée ici est schématisé à la figure 2. Pour les indices de ségrégation non-spatiaux, soit la majorité des indices, trois étapes sont nécessaires : 1) la construction d'un tableau des données (les populations des différents groupes sélectionnés pour chacune des unités spatiales de l'aire métropolitaine) en lisant le fichier *dbase* via un pilote ODBC ou OLEDB; 2) l'application des différentes formules des indices; 3) l'exportation des résultats dans un fichier de sortie. Pour les indices de ségrégation dits spatiaux — notamment ceux proposés par Morgan (1983), White (1988), Morrill (1991), Wong (1993 et 1998) —, le processus est plus complexe parce qu'il faut aussi calculer toute une série de paramètres géométriques à savoir trois matrices (de contiguïté, de distance et de longueur de la frontière commune entre les unités spatiales) et trois vecteurs (pour les centres de gravité, la superficie et le périmètre des polygones). Pour ce faire, nous avons aussi développé un DLL en C# qui lit les informations géométriques des unités spatiales dans le fichier *shapefile (shp)*⁴, puis qui construit les différentes matrices et vecteurs (ESRI, 1998).

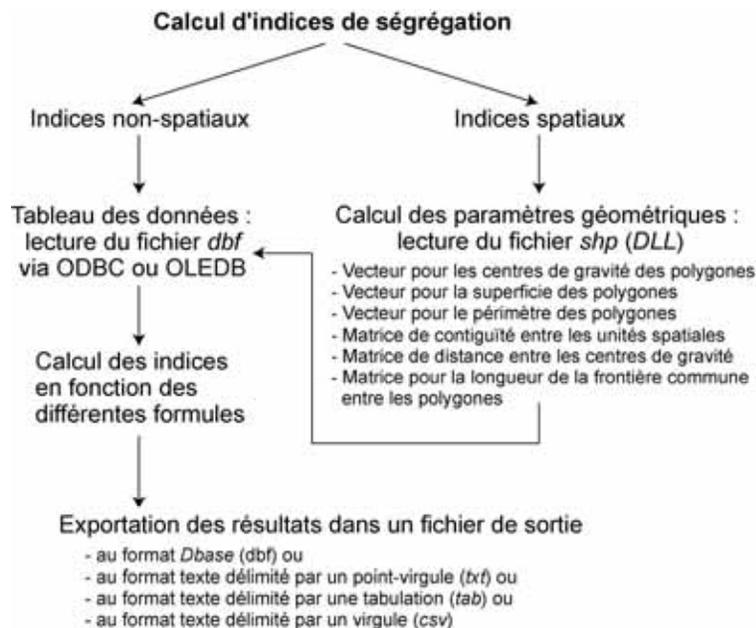


Figure 2 : Structure de l'application

⁴ Pour connaître la structure des fichiers *shapefile*, on pourra lire la description technique de ce format de fichier dans ESRI (1998).

La figure 3 montre l'interface de l'application qui est d'ailleurs disponible en anglais, en français et en espagnol. Globalement, à partir de cette interface, l'utilisateur peut calculer un ou plusieurs indices de ségrégation pour un ou plusieurs groupes de population préalablement sélectionnés. Il est à noter que les indices sont regroupés en cinq catégories : les indices unigroupes, les indices intergroupes, les indices multigroupes, le quotient de localisation et l'indice d'entropie. Une fois les indices calculés, l'utilisateur peut exporter les résultats dans un fichier de sortie.

Calcul d'indices de ségrégation

Carte à analyser... D:\Montreal Data\MONTREAL_SR.shp Français

Champs à analyser

Population totale POP_TOT

FRANCAIS
 ANGLAIS
 ITALIEN
 ESPAGNOL
 ARABE
 GREC
 CHINOIS
 CREOLES
 PORTUGAIS

Sélectionner tout Effacer tout

Sélectionner des indices

Types d'indices Indices unigroupes

IS Indice de ségrégation
 IS(adj) Indice de ségrégation modifié
 IS(w) Indice de ségrégation modifié
 IS(s) Indice de ségrégation modifié
 H Indice d'entropie
 G Indice de Gini
 A(0.1) Indice d'Atkinson
 A(0.5) Indice d'Atkinson
 A(0.9) Indice d'Atkinson

Sélectionner tout Effacer tout

Autres paramètres

Centre-ville... D:\Montreal Data\CentreVille.shp

Matrice de Contiguïté

Noeud Chaîne

Unités de distance

Unités de la carte : Mètres Unités des résultats : Kilomètres

Calculer Annuler Aide

Temps de calcul : 4 seconds, 219 millisecondes

Nom	IS Indice de	IS(adj) Indic	IS(w) Indice	IS(s) Indice	H Indice d'en	G Indice de	A(0.1) Inc
FRANCAIS	0.52338404	0.41970795	0.44375166	0.50985048	0.27679778	0.67664138	0.089189
ANGLAIS	0.52191271	0.47115354	0.48075891	0.51518745	0.21219123	0.66090581	0.082311
ITALIEN	0.59204567	0.56388038	0.56999859	0.58848961	0.27769678	0.74720922	0.185191
ESPAGNOL	0.45074809	0.43417995	0.43666106	0.44788827	0.14662141	0.60195161	0.169290
ARABE	0.53377936	0.52014926	0.52240822	0.53180524	0.22466805	0.71019304	0.294714
GREC	0.66370805	0.65242211	0.65523126	0.66228984	0.35043920	0.83933144	0.462818
CHINOIS	0.58601186	0.57055608	0.57347871	0.58345276	0.25062090	0.76010272	0.449798
CREOLES	0.60772126	0.59817867	0.59997089	0.60632573	0.25326611	0.77889533	0.453693
PORTUGAI	0.52158447	0.51054558	0.51273107	0.51969992	0.19541785	0.69548740	0.323025
VIETNAMIE	0.63065513	0.62263448	0.62419875	0.62928094	0.24074506	0.78610093	0.542625
POLONAIS	0.52405609	0.51853392	0.51915475	0.52317342	0.16708216	0.68535002	0.404668

Enregistrer sous Annuler

Figure 3 : L'interface de l'application C#.Net

4.2 Calcul des paramètres géométriques pour les indices de ségrégation spatiaux

Plusieurs paramètres géométriques sont requis pour le calcul des indices de ségrégation spatiaux (voir le tableau 6). Pour les indices de Morrill (1991) et l'indice de dissimilarité multigroupe de Wong (1998) — IS(adj), D(adj) et SD — il faut construire une matrice de contiguïté binaire entre les unités spatiales de la région métropolitaine. De même, le calcul des indices IS(w) et ID(w) de Wong (1993) requiert une matrice pour la longueur de la frontière commune entre les polygones, tandis que le calcul de IS(s) et ID(s) de Wong (1993), nécessite aussi deux vecteurs, l'un pour la superficie des polygones, l'autre pour le périmètre des polygones.

Tableau 6 : Les paramètres géométriques nécessaires au calcul des indices spatiaux

Indice de ségrégation	Vecteur pour les centres de gravité	Vecteur pour les superficies	Vecteur pour les périmètres	Matrice de contiguïté binaire	Matrice de distance	Matrice pour la longueur de la frontière commune	Intersection et union d'ellipses
Égalité							
IS(adj)				✓			
ID(adj)				✓			
SD				✓			
IS(w)				✓		✓	
ID(w)				✓		✓	
IS(s)		✓	✓	✓		✓	
ID(s)		✓	✓	✓		✓	
S	✓						✓
Concentration							
DEL		✓					
ACO		✓					
RCO		✓					
Agrégation							
ACL				✓			
RCL				✓			
Pxx	✓				✓		
Pxx _{exp}	✓				✓		
DPxx	✓				✓		
Pxy	✓				✓		
Pxy _{exp}	✓				✓		
DPxy	✓				✓		
SP	✓				✓		
RCL	✓				✓		
Centralisation							
ACE	✓				✓		
RCE	✓				✓		

Par contre, pour les indices de concentration (indices Delta, de concentration absolue et de concentration relative — DEL, ACO, RCO), on doit disposer uniquement d'un vecteur pour la superficie des polygones qui composent l'aire métropolitaine à l'étude. Finalement, pour le calcul des indices qui relèvent des dimensions d'agrégation et de centralisation, il faut recourir soit à une matrice de contiguïté binaire (ACL et RCL), soit à une matrice de distance et à un vecteur pour les centres de gravité des polygones.

Puisque notre application est autonome et ne repose pas sur un langage de programmation SIG tel que ArcObjects (ArcGis) ou Avenue (ArcView) par exemple, dans lesquels des propriétés d'objets permettent de trouver le centre de gravité, le périmètre ou la superficie d'un polygone, et dans lesquels des méthodes permettent de connaître la relation d'adjacence et la longueur de la frontière commune entre deux polygones, nous avons dû implanter les différents paramètres géométriques dans notre application C#. Il nous semble donc judicieux de décrire comment ces opérations ont été réalisées.

Calcul du vecteur pour la superficie des polygones

Avant de décrire le processus de calcul de la superficie des polygones, il est important de mentionner que le format *shp* d'ESRI utilise le concept de polygone multi-parties : l'unité polygonale peut être composée d'un seul polygone ou de plusieurs zones comme un archipel d'îles formant un seul État par exemple. Autrement dit, un polygone est formé de plusieurs polygones qui représentent soit le territoire, soit des îles, soit des lacs. Pour calculer la superficie des polygones multi-parties, il faut donc sommer les superficies des territoires et des îles et soustraire celles des lacs. Il est à noter que ce calcul peut être récursif puisque le territoire pourrait contenir un lac, qui pourrait contenir une île, qui elle-même pourrait contenir un autre lac et ainsi de suite.

Pour calculer la superficie d'un polygone, nous utilisons un algorithme basé sur la somme signée de la superficie des trapèzes, soit un algorithme plus rapide que celui basé sur une décomposition en triangles. Ce processus est schématisé à la figure 4. Pour calculer la superficie du polygone A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 et ayant les coordonnées $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), (x_4, y_4), (x_5, y_5)$, il suffit de sommer la superficie des trapèzes. On a alors :

$$S = x_1y_1y_2x_2 + x_2y_2y_3x_3 + x_3y_3y_4x_4 - x_5y_5y_4x_4 - x_1y_1y_5x_5.$$

$$2S = (y_1 + y_2)(x_2 - x_1) + (y_2 + y_3)(x_3 - x_2) + (y_3 + y_4)(x_4 - x_3) + (y_4 + y_5)(x_5 - x_4) + (y_5 + y_1)(x_1 - x_5).$$

Après quelques regroupements et simplifications on a alors :

$$2S = y_1x_2 - y_2x_1 + y_2x_3 - y_3x_2 + y_3x_4 - y_4x_3 + y_4x_5 - y_5x_4 + y_5x_1 - y_1x_5.$$

$$2S = x_1(y_2 - y_5) + x_2(y_3 - y_1) + x_3(y_4 - y_2) + x_4(y_5 - y_3) + x_5(y_1 - y_4).$$

$$2S = y_1(x_5 - x_2) + y_2(x_1 - x_3) + y_3(x_2 - x_4) + y_4(x_3 - x_5) + y_5(x_4 - x_1).$$

Finalement, la superficie des polygones, qu'ils soient convexes ou concaves, est égale à :

$$S = \frac{1}{2} \left| \sum_{k=1}^N (x_k + x_{k+1}) \cdot (y_k - y_{k+1}) \right| \quad (1)$$

où N représente le nombre de points qui composent le polygone et x_k, y_k , sont les coordonnées x et y du $k^{\text{ième}}$ point.

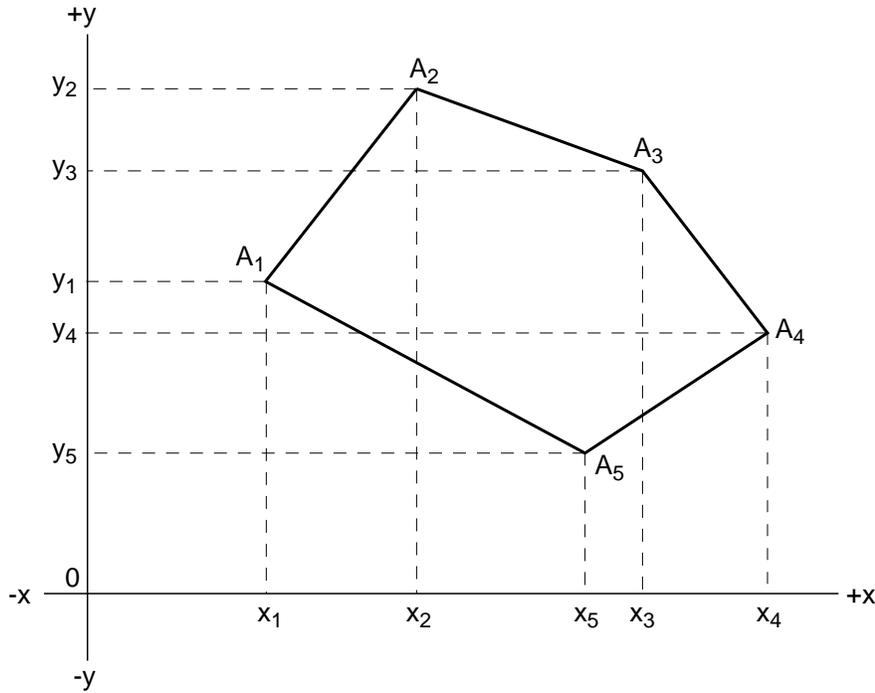


Figure 4 : Calcul de la superficie d'un polygone en utilisant les trapèzes

Calcul du vecteur pour le périmètre des polygones

Le calcul du vecteur pour le périmètre des polygones est très simple (2).

$$P = \sum_{k=2}^n \sqrt{(x_k - x_{k-1})^2 + (y_k - y_{k-1})^2} \quad (2)$$

où n représente le nombre de points qui composent le polygone; x_k, y_k , sont les coordonnées x et y du $k^{\text{ième}}$ point et où $x_1 = x_n$ et $y_1 = y_n$.

Dans le cas de polygones multi-parties, il faut calculer et sommer les périmètres de toutes les zones.

Calcul du vecteur pour les centres de gravité des polygones

Le calcul du centre de gravité d'un polygone peut être réalisé en décomposant ou non le polygone en triangles. Dans le cas de l'approche avec décomposition, trois étapes sont

nécessaires : décomposer le polygone en triangles; trouver les centres de gravité de chaque triangle; calculer le point moyen de ces centres pondéré par la superficie des triangles (figure 5).

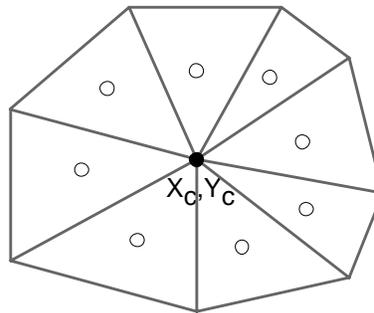


Figure 5 : Le centre de gravité en fonction de la décomposition du polygone en triangles

La décomposition des polygones en triangles est aisée dans le cas de polygones convexes car, d'une part, le point moyen (x_c, y_c) est toujours situé à l'intérieur du polygone et, d'autre part, il n'y a pas de chevauchement de triangles.

Par contre, dans le cas d'un polygone concave, il faut préalablement le décomposer en polygones convexes ou en polygones monotones, soit une opération qui peut être réalisée à partir de plusieurs algorithmes tels que celui de *Divide and Rule* (O'Rourke, 1994), celui de la différence des enveloppes convexes (Tor et Middleditch, 1984), celui de la décomposition d'une ligne par balayage (Laszlo, 1996 : 191-201), ou encore celui de la décomposition horizontale (Seidel, 1991). Une fois cette décomposition réalisée, on calcule les centres de gravité de chacun des triangles (3), puis le centre de gravité du polygone qui correspond à la moyenne pondérée par la superficie des centres de gravité des triangles qui composent le polygone.

$$(x_c, y_c) = \left(\frac{1}{3}(x_1 + x_2 + x_3), \frac{1}{3}(y_1 + y_2 + y_3) \right) \quad (3)$$

$$(x_c, y_c) = \left(\frac{1}{S_p} \sum_{i=1}^n s_i x_i, \frac{1}{S_p} \sum_{i=1}^n s_i y_i \right) \quad (4)$$

où n représente le nombre de triangles; s_i la superficie du triangle i ; x_i et y_i les coordonnées du centre de gravité du triangle i ; et S_p la superficie du polygone p .

Il est cependant possible de calculer le centre de gravité du polygone sans le décomposer en triangles (5).

$$X_c = \frac{1}{3S} \sum_{i=1}^N \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ x_k & x_{k+1} & x_{k+2} \\ y_k & y_{k+1} & y_{k+2} \end{vmatrix} \cdot (x_k + x_{k+1} + x_{k+2}), \quad Y_c = \frac{1}{3S} \sum_{i=1}^N \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ x_k & x_{k+1} & x_{k+2} \\ y_k & y_{k+1} & y_{k+2} \end{vmatrix} \cdot (y_k + y_{k+1} + y_{k+2}) \quad (5)$$

où S représente la superficie du polygone calculée à partir de l'équation (1) et N le nombre de points que comprend le polygone et $k = i \text{ Mod } (N-2)$.

Pour les polygones multi-parties, on peut aussi utiliser l'équation 5 : toutefois, les superficies des *lacs* seront soustraites. Dans notre application C#, nous avons préféré implanter cette dernière équation puisqu'elle fonctionne tant pour les polygones convexes que concaves.

Calcul de la matrice de distance

Chaque cellule d_{ij} de la matrice de distance représente la distance entre les centres de gravité des polygones i et j . Cette distance devrait être calculée en utilisant la formule de distance de la trigonométrie sphérique (6). Cependant, en études urbaines, cette opération peut être simplifiée puisqu'à l'échelle d'une région métropolitaine, on peut utiliser la formule de la distance euclidienne basée sur la géométrie plane et non sphérique (7) sans perte de précision. Bien entendu, la matrice étant symétrique ($d_{ij} = d_{ji}$), il suffit donc de calculer la partie triangulaire supérieure de la matrice.

$$d_{ij} = 2R_{\text{Terre}} \cdot \arcsin \left(\sqrt{\sin^2(\delta_i - \delta_j) + \cos(\delta_i) \cos(\delta_j) \sin^2\left(\frac{\phi_i - \phi_j}{2}\right)} \right) \quad (6)$$

où δ_i , δ_j , ϕ_i , ϕ_j sont respectivement les coordonnées géographiques (latitude et longitude) des centres de gravité i et j , et R_{Terre} le rayon de la Terre.

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (7)$$

où x_i , x_j , y_i , y_j sont respectivement les coordonnées x et y des centre de gravité i et j .

Calcul de la matrice de contiguïté

Chaque cellule c_{ij} de la matrice de contiguïté est égale à 0 si les polygones i et j ne se touchent pas et égale à 1 s'ils sont adjacents. L'adjacence peut être définie selon le partage d'au moins un nœud ou d'un segment. Dans notre application, il est possible de choisir l'une ou l'autre de ces options. Si l'on construit directement la matrice de contiguïté, le temps de calcul risque d'être très long puisqu'une telle approche a un niveau de complexité de $O(N^2)$ où N représente le nombre de polygones dans le *shapefile*. Pour accélérer la construction de la matrice, on peut procéder en deux étapes.

Dans un premier temps, on construit la partie triangulaire supérieure de la matrice de contiguïté à partir des enveloppes des polygones⁵; puis pour chaque élément de la matrice ayant la valeur 1, on vérifie cette fois-ci l'adjacence à partir des polygones et non des enveloppes.

Calcul de la matrice pour la longueur de la frontière commune

Une fois la matrice de contiguïté générée, il est facile de construire une matrice pour la longueur de la frontière commune en remplaçant toutes les valeurs 1 de la matrice de contiguïté par la longueur de la frontière commune entre les polygones i et j . Cette longueur est calculée à partir de la distance euclidienne (4).

Calcul des unions et des intersections des ellipses

Pour le calcul de l'indice de ségrégation de Wong (1998) basée sur l'analyse centrographique, il faut trouver les surfaces d'intersection et d'union de deux ou plusieurs ellipses. Ce problème peut être résolu de trois façons différentes :

- La première repose sur la transformation par approximation des ellipses en polygones et sur l'utilisation des algorithmes d'identification de l'intersection et de l'union pour des objets polygonaux (Laszlo, 1996 : chapitre 7). Cette approche, utilisée dans un SIG tel qu'ArcView, est très gourmande en temps de calcul, qui varie selon la précision de la transformation de l'ellipse en polygone, autrement dit selon le nombre de points utilisés pour construire le polygone.
- La deuxième est une solution analytique qui est basée sur les équations des ellipses (voir l'annexe 1). C'est l'approche la plus précise et elle demeure facile à appliquer pour deux ellipses. Cependant, pour un jeu de trois d'ellipses ou plus, il devient très complexe de programmer une telle approche.
- La troisième approche est basée sur la méthode Monte-Carlo. Il s'agit dans un premier temps de trouver la plus petite ellipse et de générer une série de points (n) à l'intérieur de l'ellipse. Par la suite, on comptabilise le nombre de ces points qui sont situés à l'intérieur de toutes les autres ellipses (m). Le ratio m/n multiplié par la superficie de la plus petite ellipse nous donne l'aire de l'intersection des ellipses. La même approche peut être utilisée pour trouver la superficie de l'union des ellipses. Pour ce faire, on génère toute une série de points (N) à l'intérieur de chacune des ellipses, puis on comptabilise le nombre de ces points situés à l'intérieur d'une seule ellipse (M). Le ratio M/N multiplié par la somme des superficies des ellipses

⁵ L'enveloppe d'un polygone est en fait un rectangle construit à partir des coordonnées maximale et minimale des points qui forment le polygone.

correspond à la superficie de la surface d'union des ellipses. Cette approche est facilement implantable et donne une précision relativement bonne, comparable à celle de la première approche. En outre, elle demeure plus rapide que la première approche pour un grand nombre d'ellipses puisque vérifier qu'un point est situé à l'intérieur d'une ellipse nécessite uniquement quatre multiplications et une addition (8).

$$\text{Si } \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} \leq 1 \text{ le point est compris à l'intérieur de l'ellipse} \quad (8)$$

où a et b sont les axes mineur et majeur de l'ellipse; x et y sont les coordonnées du point.

4.3 Temps de calcul nécessaire aux calculs de indices

Pour donner une idée de la rapidité de calcul des différents indices avec notre application, nous avons reporté au tableau 7 des temps⁶ obtenus à partir des deux fichiers géographiques comprenant chacun 20 groupes de population : l'un dans les secteurs de recensement de la région métropolitaine de Montréal (N=846) et l'autre dans les subdivisions de recensement de la même région (N=106). Ces temps demeurent très raisonnables puisqu'ils restent inférieurs à trois secondes pour chacune des catégories d'indices, excepté pour le calcul des 13 indices intergroupes qui requièrent environ 11 secondes. Ceci s'explique par le fait qu'il faut construire les trois matrices et les trois vecteurs précédemment décrits pour les indices intergroupes. Or, c'est justement le calcul des paramètres géométriques qui est le plus gourmand en temps de calcul comme le démontrent les différences de temps entre les indices spatiaux et les indices non spatiaux.

Tableau 7 : Temps de calcul nécessaire aux calculs des différents indices (en secondes)

Types d'indices calculés pour 20 groupes de population à la fois	Nombre d'indices	Secteurs de recensement de la région métropolitaine de Montréal (N = 846)	Subdivision de recensement de la région métropolitaine de Montréal (N = 106)
Indices unigroupes			
Tous	19	2,227	0,953
Indices non spatiaux	9	0,452	0,046
Indices intergroupes			
Tous	13	10,963	1,578
Indices non spatiaux	2	0,171	0,046
Indices multigroupes			
Tous	8	1,500	1,031
Indices non spatiaux	6	0,250	0,031
Mesures locales			
Quotient de localisation	1	0,171	0,046
Indice d'entropie	1	0,156	0,031

⁶ Ces temps ont été obtenus sur un ordinateur équipé d'un processeur Pentium IV cadencé à 2,8 Ghz et avec Microsoft Windows XP Professionnel comme système d'exploitation.

5. CONCLUSION

Reardon et O'Sullivan (2004) soulignent à juste titre le manque d'outils informatiques réellement adaptés pour le calcul des indices de ségrégation résidentielle. Les rares outils qui existent à l'heure actuelle sont implantés dans des logiciels de SIG. Par exemple, Apparicio (2000) propose un outil permettant de calculer une vingtaine d'indices unigroupes et intergroupes dans MapInfo, tandis que Wong (2003) propose une application pour calculer les indices de dissimilarité intergroupe et multigroupe, mais aussi cinq indices spatiaux ($ID(adj)$, $ID(w)$, $ID(s)$, SD et S) et une mesure locale de la ségrégation.

L'application C#.Net que nous venons de décrire est bien différente à plusieurs égards. Tout d'abord, elle est autonome, c'est-à-dire non reliée à un logiciel de SIG ou de statistique, ce qui facilite son utilisation : il ne faut ni être habitué au maniement des SIG ou d'un logiciel de statistique particulier (SAS ou SPSS par exemple), ni disposer de ce type de logiciel pour l'utiliser. De plus, elle permet le calcul de beaucoup plus d'indices bien que la liste ne soit pas exhaustive : une quarantaine au total dont des indices unigroupes, intergroupes, multigroupes, mais aussi deux mesures locales de la ségrégation (le quotient de localisation et l'indice d'entropie). Autre différence importante : contrairement aux deux applications précédemment évoquées — celle de Wong dans ArcView et celle d'Apparicio dans MapInfo —, il est possible de calculer d'un coup tous les indices unigroupes pour plusieurs groupes de population préalablement sélectionnés et non un indice à la fois (même chose pour les indices intergroupes et pour les multigroupes). Finalement, les temps de calcul sont très rapides.

Un tel développement ne peut donc que contribuer à la démocratisation des indices de ségrégation résidentielle qui sont désormais facilement calculables avec cette application, et ce quelles que soient les données ou la ville à l'étude.

Annexe 1 : Solution analytique pour trouver l'intersection et l'union entre deux ellipses

Pour trouver les surfaces d'intersection et d'union entre deux ellipses, nous devons connaître les coordonnées où ont lieu l'intersection. Pour ce faire, il faut trouver la solution du système construit à partir des équations des deux ellipses :

$$\begin{cases} a_1x^2 + b_1y^2 + c_1x + d_1y + e_1 = 0 \\ a_2x^2 + b_2y^2 + c_2x + d_2y + e_2 = 0 \end{cases}$$

Ce système peut avoir de 0 à 4 solutions schématisées à la figure 6.

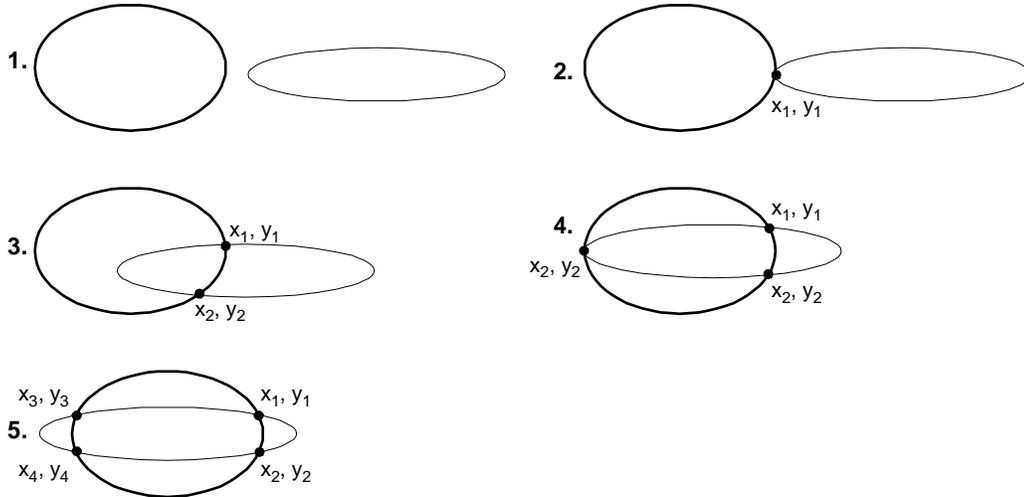


Figure 6 : Les différentes formes d'intersection de deux ellipses

Maintenant, trouver la superficie d'intersection des deux ellipses (S_{\cap}) pour les cas 1 et 2 de la figure 6 revient à trouver $S_{\cap} = 0$. Pour le cas 3, on a :

$$S_{\cap} = \int_{y_1}^{y_2} \int_{x_1}^{x_2} (a_1x^2 + b_1y^2 + c_1x + d_1y + e_1) dx dy + \int_{y_2}^{y_1} \int_{x_2}^{x_1} (a_2x^2 + b_2y^2 + c_2x + d_2y + e_2) dx dy$$

Pour le cas 4, on a :

$$S_{\cap} = \int_{y_2}^{y_1} \int_{x_2}^{x_1} (a_2x^2 + b_2y^2 + c_2x + d_2y + e_2) dx dy$$

Pour le cas 5, on a :

$$S_{\cap} = \int_{y_2}^{y_3} \int_{x_2}^{x_3} (a_2x^2 + b_2y^2 + c_2x + d_2y + e_2) dx dy + \int_{y_4}^{y_1} \int_{x_4}^{x_1} (a_2x^2 + b_2y^2 + c_2x + d_2y + e_2) dx dy$$

Pour trouver l'union des deux ellipses, on utilise : $S_U = \pi A_1 B_1 + \pi A_2 B_2 - S_\cap$ où A_1, A_2, B_1, B_2 sont les axes majeurs et mineurs des ellipses.

Le calcul de l'intersection de N ellipses demeure plus difficile; par contre, leur union est plus facile à trouver :

$$\bigcup_{i=1}^N S_i = \sum_{i=1}^N S_i - \sum_{i=2}^N \cap(S_1, S_i) + \sum_{i=2}^{N-1} \cap(S_1, S_i, S_{i+1}) + \dots + (-1)^{N-1} \cap(S_1, S_2, \dots, S_N)$$

Références

- APPARICIO, P. (2000), « Les indices de ségrégation résidentielle : un outil intégré dans un système d'information géographique », *Revue européenne de géographie / European Journal of Geography*.
- APPARICIO, P. et A. M. SÉGUIN (2002), « La division de l'espace résidentiel montréalais en fonction de la langue maternelle: apport des indices de ségrégation résidentielle », *Canadian Journal of Urban Research*, vol. 11, n° 2, p. 265-297.
- ATKINSON, A. B. (1970), « On the measurement of inequality », *Journal of Economic Theory*, vol. 43, p. 865-880.
- BELL, W. (1954), « A probability model for the measurement of ecological segregation », *Social Forces*, vol. 32, n° 4, p. 357-364.
- CARLSON, S. M. (1992), « Trends in race/sex occupational inequality: conceptual and measurement issues », *Social Problems*, vol. 39, p. 269-290.
- DACEY, M. F. (1968), « A review on measures of contiguity for two and K-color maps », in B. J. L. BERRY and D. F. M. MARBLE (dir.), *Spatial analysis : a reader in statistical geography*, Englewood Cliff : Prentice-Hall, p. 479-495.
- DUNCAN, O.D., R. P. CUZZORT et B. DUNCAN (1961), *Statistical geography : problems in analyzing areal data*. Illinois : The Free Press of Glencoe.
- DUNCAN, O. D. et B. DUNCAN (1955a), « A methodological analysis of segregation indexes », *American Sociological Review*, vol. 20, p. 210-217.
- DUNCAN, O. D. et B. DUNCAN (1955b), « Residential distribution and occupational stratification », *American Journal of Sociology*, vol. 60, p. 493-503.
- ESRI (1998), *ESRI Shapefile Technical Description. An ESRI White Paper*. Redlands (Californie) : Environmental Systems Research Institute Inc.
- FLIPPEN, C. A. (2001), « Residential segregation and minority home ownership », *Social Science Research*, vol. 30, p. 337-361.
- JAKUBS, J. F. (1981), « A distance based segregation index », *Journal of Socio-Economic Planning Sciences*, vol. 15, p. 129-141.
- JOHNSTON, R., J. FORREST et M. POULSEN (2001), « Sydney's ethnic geography : new approaches to analysing patterns of residential concentration », *Australian Geographer*, vol. 32, p. 149-162.
- GEARY, R. C. (1954), « The contiguity ratio and statistical mapping », *Incorporated Statistician*, vol. 5, p. 115-141.
- GOLDBERG, M. A. et J. MERCER (1986), *The Myth of the North American City : Continentalism Challenged*. Vancouver : University of British Columbia Press.
- GOODMAN, L. et W. H. KRUSKAL (1954), « Measures of Association for Cross-Classifications », *Journal of the American Statistical Association*, vol. 49, p. 732-764.
- HOOVER, E. M. (1941), « Interstate redistribution of population, 1850-1940 », *Journal of Economic History*, vol. 1, p. 199-205.
- HUIE, S. A. B. et W. P. FRISBIE (2000), « The components of density and the dimensions of residential segregation », *Population Research and Policy Review*, vol. 19, p. 505-524.
- HUTCHENS, R. (2001), « Numerical measures of segregation: desirable properties and their implications », *Mathematical Social Sciences*, vol. 42, p. 13-29.
- LASZLO, M. (1996), *Computational geometry and computer graphics in C++*. Prentice Hall.

- LIBERSON, S. (1969), « Measuring population diversity », *American Sociological Review*, vol. 34, p. 850-862.
- MASSEY, D. S. et N. A. DENTON (1988), « The dimensions of residential segregation », *Social Forces*, vol. 67, p. 281-315.
- MASSEY, D. S., N. A. DENTON et V.-C. PHUA (1996), « The dimensions of residential segregation revisited », *Sociological Methods & Research*, vol. 25, p. 172-206.
- MASSEY, D. S. et N. A. DENTON (1989), « Hypersegregation in U.S. metropolitan areas: Black and Hispanic segregation along five dimensions », *Demography*, vol. 26, n° 3, p. 373-391.
- MORGAN, B. S. (1983), « An alternate approach to the development of the distance-based measure of racial segregation », *American Journal of Sociology*, vol. 88, p. 1237-1249.
- MORGAN, B. S. (1975), « The Segregation of socioeconomic groups in urban areas: a comparative analysis », *Urban Studies*, vol. 12, p. 47-60.
- MORRILL, R. (1991), « On the measure of geographic segregation », *Geography Research Forum*, vol. 11, p. 25-36.
- NARKHEDE, A. et D. MANOCHA. (1995), *Graphics Gems 5*. Editor : Alan Paeth, Academic Press.
- O'ROURKE, J. (1994), *Computational geometry in C*. Cambridge University Press.
- RAY, B. K. (1999), « Plural geographies in Canadian cities : interpreting immigrant residential spaces in Toronto and Montreal », *Canadian Journal of Regional Science*, vol. 22, p. 65-86.
- REARDON, S. F. (1998), « Measures of racial diversity and segregation in multigroup and hierarchical structured Populations », *Presented at the annual meeting of the Eastern Sociological Society*, Philadelphia, PA.
- REARDON, S. F. et G. FIREBAUGH (2002), « Measures of multigroup segregation », *Sociological Methodology*, vol. 32, p. 33-67.
- REARDON, S. F. et D. O'SULLIVAN (2004), « Measures of spatial segregation », *Sociological Methodology*, vol. 34, p. 121-162.
- RHEIN, C. (1994), « La ségrégation et ses mesures », in J. BRUN et C. RHEIN (dir.), *La ségrégation dans la ville*, Paris : L'harmattan, p. 121-161.
- ROSS, N. A., C. HOULE, J. R. DUN et M. AYE (2004), « Dimensions and dynamics of residential segregation by income in urban Canada, 1991-1996 », *Canadian Geographer*, vol. 48, p. 433-445.
- SAKODA, J. N. (1981), « A generalized Index of dissimilarity », *Demography*, vol. 18, p. 245-250.
- SEIDEL, R. (1995), « A simple and fast incremental randomized algorithm for computing trapezoidal decompositions and for triangulating polygons », *Computational Geometry : Theory and Applications*, vol. 1, n° 1, p. 51-64.
- THEIL, H. (1972), *Statistical Decomposition Analysis*. Amsterdam : North-Holland.
- THEIL, H. et A. J. FINEZZA (1971), « A note on the measurement of racial integration of schools by means of informational concepts », *Journal of Mathematical Sociology*, vol. 1, p. 187-194.
- TOR, S. B. et A. E. MIDDLEDITCH (1984), « Convex decomposition of simple polygons », *ACM Trans. on Graphics*, vol. 3, n° 4, p. 244-265.
- TOWNSEND, I. J. et R. WALKER (2002), « The structure of income residential segregation in Canadian metropolitan areas », *Canadian Journal of Urban Research*, vol. 25, n° 1, p. 25-52.
- WHITE, M. J. (1986), « Segregation and diversity measures in population distribution », *Population Index*, vol. 52, p. 198-221.

-
- WONG, D. W. S. (2003), « Implementing spatial segregation measures in GIS », *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 27, p. 53-70.
- WONG, D. W. S. (1999), « Geostatistics as measures of spatial Segregation », *Urban Geography*, vol. 20, p. 635-47.
- WONG, D. W. S. (1998), « Measuring multiethnic segregation », *Urban Geography*, vol. 19, p. 77-87.
- WONG, D. W. S. (1996), « Enhancing segregation studies using GIS », *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 20, p. 99-109.
- WONG, D. W. S. (1993), « Spatial indices of segregation », *Urban Studies*, vol. 30, p. 559-572.
- WONG, D. W. S. et W. K. CHONG (1998), « Using spatial segregation measures in GIS and statistical modeling packages », *Urban Geography*, vol. 19, p. 477-485.