II RELATION ENTRE GOUVERNANCE ET TERRITOIRE: METHODE ET INCERTITUDE

Notre approche de l'exploitation et de la protection de la forêt a été réalisée par une méthode spatiale multiobjectif. Ces deux phénomènes sont concomitants et nous traduisons leur interaction en termes de « tension ». L'exploitation est une conséquence du « développement économique » et la protection est une conséquence de la gouvernance du district. Nous allons représenter le développement et la gouvernance par un ensemble de critères dont certains sont spatialisés. D'une part, le « développement économique » est étudié à l'aide de la « dynamique de la forêt », la « démographie » et l'impact de la « force centripète » de la vallée d'Aburrá (principalement la ville de Medellín) sur les municipalités agricoles étudiées. D'autre part, la gouvernance du district est analysée notamment en termes de *subsidiarité coordonnée* comme principe dominant, en tenant compte de la « gestion environnementale » et de l'« allocation des ressources financières » municipales, ainsi que de l'« allocation des ressources financières » de la Corporation autonome régional du centre d'Antioquia (CORANTIOQUIA). La protection de la forêt comme conséquence du principe dominant de gouvernance est nommée dorénavant « protection dans le district ».

Notre raisonnement part de l'hypothèse que la gouvernance du district est encadrée par une économie « monocentrique » (Fujita *et al.*, 1999), où la « tension » entre la « protection dans le district » et le « développement économique » s'intensifie au fur et à mesure que l'on s'approche de la ville. Nous procédons en deux temps afin d'établir une vue d'ensemble de cette « tension ». Dans le chapitre 3, la « dynamique de la forêt » est estimée par télédétection aux échelles du district et des municipalités. Deux perspectives sont proposées afin de différentier cette dynamique dans l'espace géographique des municipalités, en tenant compte d'observations sur le terrain et de la carte officielle d'occupation du sol. Quant à la classification de la forêt, l'incertitude de cette estimation est discutée tout en considérant l'impact de la présence des nuages.

Dans le chapitre 4, trois scénarios sont proposés pour comprendre la relation entre la gouvernance et le territoire dans une perspective spatio-temporelle, compte tenu de la

relation entre critères observée statistiquement. Dans le premier scénario, le « développement économique » est déterminé suite aux relations entre la « dynamique de la forêt », la « démographie » et l'impact de la « force centripète ».

Dans le deuxième scénario, la « protection dans le district » de la forêt est déterminée par les relations entre les « allocations de ressources financières » municipales et de la CORANTIOQUIA, puis entre ces allocations et la « gestion environnementale municipale ». Et dans le troisième scénario, le niveau de « tension », entre le « développement économique » et la « protection dans le district », est estimé en tenant compte de la classification et de la hiérarchisation des municipalités issues des scénarios précédents.

Enfin, l'incertitude des scénarios est discutée sur la base de données et sur la méthode de hiérarchisation des municipalités. L'incertitude des scénarios est liée à la base de données lorsque des erreurs sont commises au niveau de la mesure et/ou du choix des critères, alors que l'incertitude est liée à la hiérarchisation lorsque ces critères ne contribuent guère aux scénarios.

Différenciation de la dynamique de la forêt dans les municipalités du district de gestion intégrée du Système de Páramos Hauts-Andins d'Antioquia

La dynamique de la forêt du district est estimée entre 1989 et 2003, à l'aide de la cartographie officielle d'occupation du sol de 1989 et des images Landsat de 1996, 2002 et 2003. Cette analyse spatio-temporelle est effectuée par télédétection et son approche régionale ne s'adapte pas à l'utilisation de photographies aériennes. Le *déboisement* et le *reboisement* définissent une dynamique différenciée de la forêt dans l'espace des municipalités à l'intérieur du district.

Des traitements préliminaires sur les images satellitales sont dans un premier temps réalisés afin de réduire les erreurs entraînées par les effets de l'atmosphère et de la topographie. Une classification préliminaire de l'occupation du sol est ensuite réalisée afin d'obtenir le même nombre et type de classes pour toutes les prises de vue. Une dernière classification est effectuée en prenant en compte les résultats préliminaires et les relevés terrain.

Le *déboisement* et le *reboisement* sont ensuite estimés en fonction des changements spatiotemporels de la forêt, compte tenu des résultats obtenus par les images satellitales et de la carte d'occupation du sol de référence. Plusieurs typologies de « dynamique de la forêt » sont présentées afin de mettre en évidence les disparités municipales dans le district. Enfin, l'incertitude de cette « dynamique de la forêt » est discutée et deux approches des disparités municipales sont proposées.

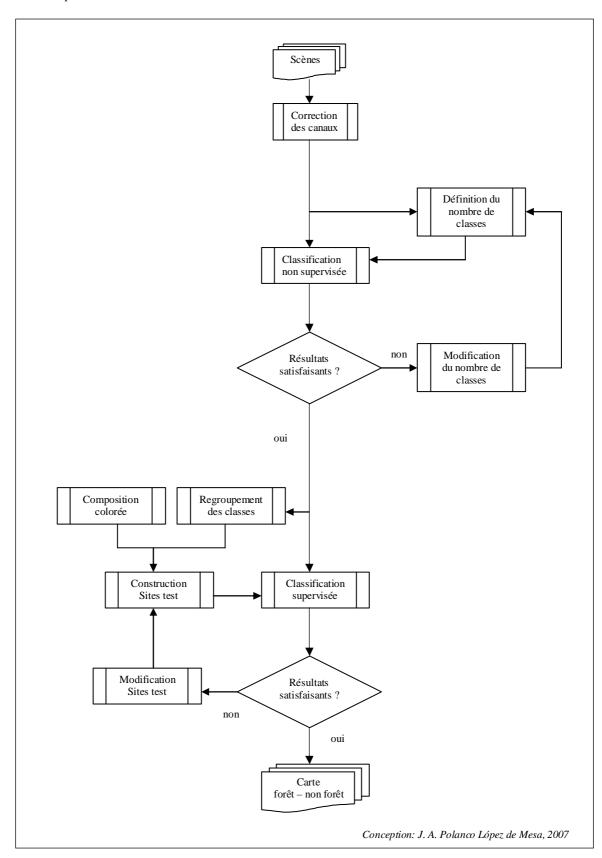
3.1 Classification de l'occupation du sol et identification de la forêt

La forêt est représentée sur une carte à deux classes (« forêt » et « non forêt »). Nous disposons de trois images satellitales et d'une carte numérisée de l'occupation du sol. La première image provient du satellite Landsat 5, datée du 2 août 1996 (TM96), et les deux autres du satellite Landsat 7 (ETM+), datées du 14 octobre 2002 (ETM02) et du 3 février 2003 (ETM03). Les images TM96 et ETM03 correspondent à une saison sèche et l'image ETM02 à une saison des pluies. La carte est numérisée par la Corporation Autonome Régionale du Centre d'Antioquia, sur la base de l'information d'occupation du sol publiée par le Bureau d'Agriculture du département d'Antioquia en 1989, à l'échelle de 1/100 000. Cette carte est adoptée par toutes les municipalités du département dans leurs Plans Municipaux d'Aménagement du territoire (*Planes Municipales de Ordenamiento Territorial* – PMOT).

L'occupation du sol a été classifiée sur les images et comparée avec celle de la carte. Suite aux traitements préliminaires de corrections géométriques et radiométriques des images, cette classification a été effectuée suivant deux processus articulés (*cf.* Figure 3.1) : les classifications « non supervisée » et « supervisée ». Ces deux processus sont articulés dans la mesure où le deuxième utilise le résultat du premier pour construire les « sites test », en tenant compte d'un regroupement des classes non supervisées et de l'analyse d'une composition colorée.

Figure 3.1 La démarche de la classification

Les actions réalisées sont liées par des flèches dans un ordre logique indiquant le chemin emprunté.



3.1.1 Traitements préliminaires

Quelques traitements préliminaires ont été nécessaires afin de distinguer la forêt des autres modes d'occupation du sol sur les images. Ces traitements préliminaires consistent d'une part à corriger les images suite aux perturbations atmosphériques et topographiques et aux déformations géométriques issues du processus de géoréférencement : la correction vise à réduire l'erreur de mesure issue des perturbations et des déformations. D'autre part, les traitements préliminaires cherchent à classifier les mesures corrigées afin d'établir une première vision de leur organisation spatiale et thématique.

3.1.1.1 Correction des images

L'impact de l'atmosphère sur les capteurs passifs (Landsat 5 et 7) se traduit par une diminution du rayonnement solaire réfléchi par la terre, en raison des phénomènes de diffusion et d'absorption. Ces rayonnements solaires qui informent sur les objets au sol sont de ce fait modifiés, pouvant entraîner de fausses interprétations, notamment lorsqu'il s'agit d'études diachroniques sur la végétation. Nous corrigeons ces effets à l'aide du modèle COS(t) (Chavez, 1996, cité par Eastman, 2001) et nous obtenons de « nouvelles » images en mode radiance, qui peuvent être comparées (cf. Annexe 1.1.1).

Ensuite, nous corrigeons les canaux radiométriquement en les ramenant à la même projection géographique (Universal Transverse Mercator (UTM) 18N, basée sur le système géographique mondial WGS 1984). Puis, nous choisissons les chefs-lieux des municipalités comme points de repère au sol, car ils sont facilement identifiables sur les images et sur les cartes numérisées : ces points de repère sont reportés sur une composition colorée (RVB : canaux 7, 3 et 1, respectivement). Le nouveau cadre de l'image est donné en coordonnées géographiques UTM.

Ce géoréférencement est nécessaire pour la comparabilité des images avec la carte. Nous le réalisons suivant la procédure RESAMPLE (Eastman, 2001), en tenant compte d'une fonction quadratique et de l'interpolation selon *le plus proche voisin*. L'erreur (RMS) « acceptable » ne doit pas dépasser 0.5 fois l'unité du pixel (soit environ 15 m sur le terrain), tout en respectant un minimum de six points de repère.

Le calcul du RMS optimal ou admissible est fonction de l'échelle de la carte de référence et de l'erreur acceptable sur le terrain (Eastman, 2001). Le RMS optimal varie selon l'échelle et la précision de la carte de référence. Par exemple, pour une carte 1/100 000 dont l'erreur acceptable sur le terrain est de 50.8 mètres, le RMS optimal serait d'environ 30 mètres, c'est-à-dire 1 pixel du satellite Landsat (Estman, 2001). Pour une carte 1/50 000, le RMS optimal serait d'environ 0.5 pixels (Southworth, 2004; Tottrup, 2004). Dans notre cas, les cartes 1/100 000 de référence sont le résultat d'une mosaïque de cartes 1/25 000 obtenues par photo-interprétation dans les années 1960. Le changement d'échelle et la numérisation des cartes peuvent être une première source d'erreur dans cette cartographie de référence. Puis, le géoréférencement engendre une deuxième erreur qui est minimisé en adoptant un RMS inférieur à 0.5 pixels, c'est-à-dire de 15 mètres sur le terrain.

Vu que le géoréférencement s'appuie sur une analyse visuelle de la composition colorée, des erreurs de saisie des points de repère sont possibles. C'est pourquoi le nombre de points de repère est maximisé et le RMS minimisé. Dans cette démarche itérative, les points qui contribuent le plus à l'erreur sont omis tout en respectant le nombre minimum demandé par la procédure de recalage quadratique (*cf.* Tableau 3.1).

Tableau 3.1 Erreur de géoréférencement

Scène	Points saisis	Points retenus	RMS (pixel)
TM96	16	10	0.44
ETM02	16	9	0.46
ETM03	15	9	0.39

Conception : J. A. Polanco López de Mesa, 2007

L'effet topographique auquel nous sommes confrontés correspond au changement d'humidité du sol selon l'altitude. Nous avons réduit cet effet grâce à une partition de l'image, en tenant compte d'un modèle numérique de terrain (MNT). Tous les canaux des scènes étudiées sont partitionnés à l'aide d'un masque topographique, que nous avons défini en fonction des « zones de vie » (cf. 1.1.1). Le masque topographique partitionne l'espace en deux zones : la première est définie de 275 mètres à 2000 mètres et la deuxième de 2001 mètres à 3 300 mètres d'altitude. Compte tenu des résultats des classifications (cf. 3.1.2), 2000 mètres constitue l'isohypse (courbe de niveau) de charnière

entre les climats *tropicaux secs et tempérés* et les climats *tropicaux froids*, où l'humidité du sol entraîne un changement perceptible par l'image. Dans notre zone d'étude, les climats *tropicaux secs et tempérés* ont une pluviométrie moyenne annuelle inférieure à 2 000 mm et une température moyenne annuelle supérieure à 20°C. En revanche, les climats *tropicaux froids* ont une pluviométrie moyenne annuelle supérieure à 2 000 mm et une température moyenne inférieure à 20°C.

Une fois les images corrigées, nous avons effectué une première approche d'identification des classes d'occupation du sol. C'est le processus de classification non supervisée dont les résultats sont présentés ci-dessous.

3.1.1.2 Classes non supervisées

Au cours de la classification non supervisée, les pixels sont regroupés de manière itérative en un nombre prédéfini de classes non connues en termes thématiques. La classification non supervisée est réalisée selon la méthode ISOCLUST (Eastman, 2001) qui est une variante de la méthode ISODATA²². Le processus ISOCLUST est réalisé suivant deux étapes :

- 1. Identification du nombre de classes selon l'histogramme des fréquences de pixels par classes, issu d'une classification selon *le plus proche voisin*;
- 2. Affectation des pixels aux classes par le critère d'agrégation du *maximum de vraisemblance* et dans l'hypothèse de la loi normale²³.

Puis, nous avons regroupé les classes non supervisées à l'aide de l'algorithme SEPSIG (Eastman, 2001), afin d'améliorer leur distinction radiométrique. Ce regroupement a été fait en tenant compte de la « distance » entre les signatures spectrales des classes. Pour la « distance » utilisée (« divergence transformée »), il est empiriquement démontré que deux

J. A. Polanco López de Mesa, 2007

²² ISODATA est une méthode itérative de classification selon la technique des moyennes mobiles. De manière générale, il s'agit d'affecter les pixels à un nombre de classes prédéterminé, tout en réduisant la distance entre les dits pixels et la moyenne des classes dans l'espace radiométrique. Dans le cas où cette distance est euclidienne, le processus itératif d'affectation s'arrête lorsque la somme au carré de l'erreur n'excède pas une quantité définie *a priori* (Ball et Hall, 1965, cités par Richards, 1994).

²³ Pour faire l'hypothèse de la loi normale, il faut que le nombre de pixels par classe soit dix fois supérieur au nombre de canaux intervenant dans la classification (Eastman, 2001 et Richards, 1994).

classes se distinguent bien en termes radiométriques si cette « distance » est d'environ 2000 (valeur sans dimension). Au contraire, si la « distance » entre classes est d'environ 1600 ou inférieure, il est supposé que les deux classes ne sont pas suffisamment distinctes et peuvent être regroupées (Richards, 1994).

A l'issue de la démarche ISOCLUST, nous avons retenu six classes non supervisées (*cf.* Annexe 1.2). Ensuite, nous avons regroupé ces classes deux fois, en retenant d'abord cinq et ensuite quatre classes. La « distance » moyenne entre les signatures spectrales des classes a été maximisée, tout en respectant le même nombre de classes par scène et la « distance » minimum entre classe égale à 1600. Pour les six et les quatre classes, cette « distance » moyenne est passée respectivement de :

```
- 1935.7 à 1964.3 : TM 96 ;
```

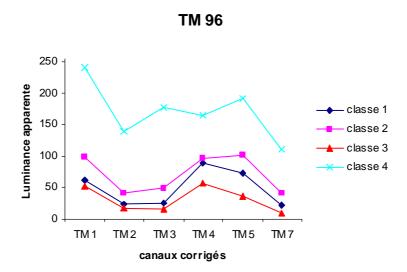
- 1884.7 à 1933.5 : ETM 02 ;
- 1880.1 à 1936.7 : ETM 03.

Afin d'identifier les thématiques d'occupation du sol, nous avons réalisé une analyse visuelle des classifications et des signatures spectrales des classes préliminaires. La présence de végétation est dominante et les nuages sont bien distingués : plusieurs types de végétation semblent se différencier malgré quelques confusions avec l'eau (notamment du barrage Río Grande II) et l'ombre des nuages. Dans le cas de la scène TM96 par exemple (cf. Figure 3.2)²⁴, les classes 1, 2 et 3 représentent trois types de végétation, alors que la classe 4 représente les nuages. Les types de végétation des classes 1 et 2 sont bien distincts et ne semblent pas être confondus avec d'autres thématiques, compte tenu de leurs signatures spectrales. C'est le type de végétation de la classe 3 qui se confond avec l'eau et l'ombre des nuages, étant donné leur emplacement dans l'espace géographique et les faibles valeurs radiométriques dans tout le spectre électromagnétique par rapport aux autres types de végétation. Nous avons enfin déterminé les types de végétation tout en réduisant la confusion entre la végétation, l'ombre et l'eau à l'aide d'une classification supervisée.

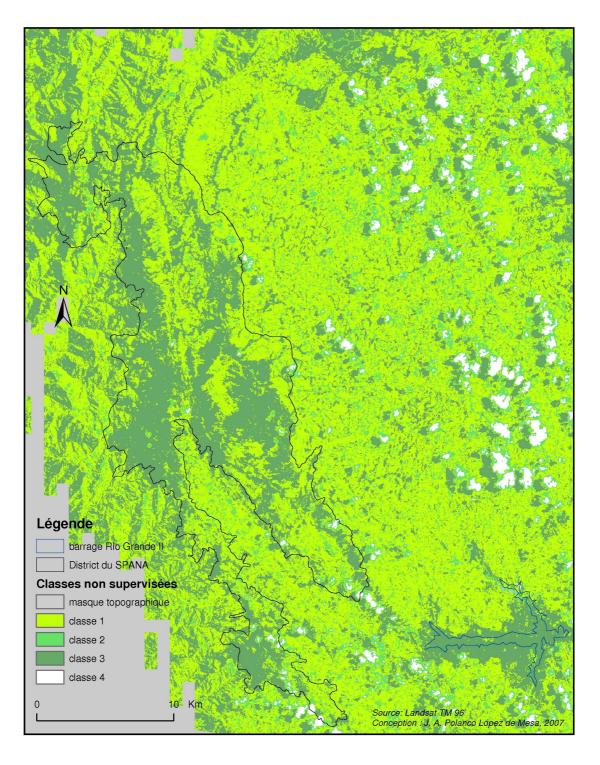
_

²⁴ Les signatures spectrales moyennes et les classifications non supervisées des scènes ETM 02 et ETM 03 sont présentées en annexe 1.2.

Figure 3.2 Signatures spectrales moyennes des classes non supervisées et classification non supervisée de la scène TM 96



Classification non supervisée de la scène TM 96



3.1.2 La cartographie de la forêt

Nous avons identifiée puis cartographiée la forêt grâce à une classification supervisée. Des sites test ont été construits sur la base des résultats préliminaires et d'une composition colorée tout en réduisant la confusion évoquée sur les nouvelles classes. Afin d'identifier la forêt, nous avons estimé l'accord entre les classes supervisées et les relevés terrain. Enfin, nous avons réduit l'erreur des classifications supervisées.

3.1.2.1 Construction des sites test

Pour toutes les prises de vue, nous avons construit les sites test sur la base d'une composition colorée de type RVB 453 et des classes non supervisées. Cinq classes supervisées ont été considérés : « végétation 1 », « végétation 2 », « eau », « ombre des nuages » et « nuages ». Les sites test des classes « eau », « ombre des nuages » et « nuages », ont été construits sur la base de la composition colorée, alors que ceux des deux autres sur les classes préliminaires.

Le nombre de sites construits par classe dépend essentiellement de l'erreur accumulée lors de la classification supervisée (cf. 3.1.2.2). C'est-à-dire que, dans le but de minimiser le nombre de pixels mal classés, il a été nécessaire d'augmenter le nombre de sites (voire le nombre de pixels) dans certaines classes. Dans le cas de la scène ETM 03 par exemple (cf. Tableau 3.2), nous avons doublé le nombre de sites test par rapport aux autres scènes, pour la plupart des classes supervisées. Ceci parce qu'il existe une confusion entre la « végétation », l'« ombre des nuages » et l'« eau » qui s'accentue sur cette scène en raison de la présence de « nuages ». Ces sites test ont donc contribué à la distinction des classes dans le processus de classification supervisée présenté ci-dessous.

Tableau 3.2 Nombre de sites test

SCÈNES	CLASSES SUPERVISÉES								
	Végétation 1 Végétation 2 Eau Ombres Nuages								
TM96	5	6	3	4	7				
ETM02	7	8	4	4	5				
ETM03	14	10	4	8	11				

3.1.2.2 Les thèmes de la carte : « forêt » et « non-forêt »

Nous avons déterminés les thèmes de la carte grâce à une classification supervisée, qui est réalisée à l'aide des sites test, pour toutes les prises de vue, suivant l'algorithme MAXLIKE (Eastman, 2001). Tous les pixels sont regroupés dans les classes définies par ces sites test, selon le *maximum de vraisemblance* et en affectant la même probabilité à toutes les classes. Les thèmes sont déterminés à l'aide des signatures spectrales des classes et des relevés terrain, et l'erreur des classifications est estimée suivant l'algorithme ERRMAT.

Les résultats des classifications supervisées se traduisent par une carte « forêt » & « non-forêt » (*cf.* Figure 3.6) où les modes d'occupation du sol « forêt » et « arbustes », issus des relevés terrain, ont été attribués à la thématique « forêt », et les autres (« sols nus », « pâturages », « páramo » et « cultures ») l'ont été à la thématique « non forêt ». L'eau, l'ombre et les nuages sont bien distingués sur la carte, la confusion entre l'eau, l'ombre et la végétation ayant été corrigée (*cf.* Figure 3.5)²⁵.

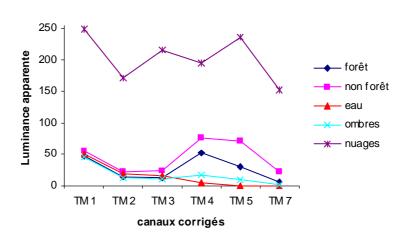
En effet, le comportement radiométrique montre une claire distinction des classes supervisées sur toutes les scènes (*cf.* Figure 3.3). Les classes « forêt » et « non forêt » se différencient entre elles, par exemple, dans le rouge et l'infrarouge : la chlorophylle de la végétation « forêt » absorbe plus le rouge et cette végétation est plus humide que la végétation « non forêt ». La classe « nuages » a la réponse spectrale la plus élevée dans tous les canaux. La réponse spectrale de la classe « eau » est faible dans l'infrarouge, mais la présence de sédiments rehausse un peu cette valeur radiométrique.

La classe « ombres » a une réponse spectrale faible et descendante le long du spectre électromagnétique en raison de la diffusion atmosphérique : les objets à l'ombre sont éclairés par le phénomène de diffusion de Rayleigh notamment dans la partie visible du spectre électromagnétique, et les ombres apparaissent d'autant plus sombres qu'on se rapproche du proche infrarouge où cette diffusion est négligeable (Robin, 1998).

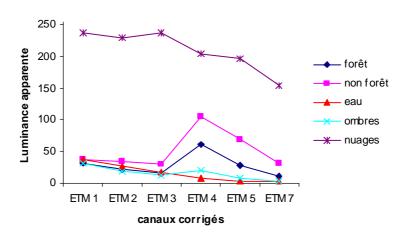
²⁵ Les classification supervisées des scènes ETM 02 et ETM 03 sont présentées en annexe 1.2.2.

Figure 3.3 Signatures spectrales moyennes des classes supervisées

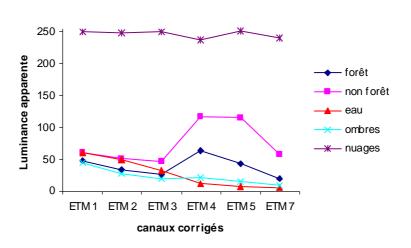




ETM 02



ETM 03



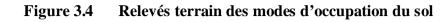
Compte tenu de la nomenclature des plans municipaux d'aménagement du territoire (cf. Figure 1.8), nous avons distingué cinq modes d'occupation du sol en fonction de 70 points prélevés en octobre 2002 avec un système de positionnement global (GPS)²⁶ : « Sols nus » (15 points), « Cultures » (11 points), « Pâturages » (27 points), « Arbustes » (17 points) et « Forêt » (18 points). La catégorie « pâturages » inclut celle de « páramo » et la catégorie « sol nu » inclut celle d' « urbain » (cf. Tableau 3.3). En ce qui concerne la zone au dessus de 2 000 mètres d'altitude de la scène ETM02, l'accord entre la classification supervisée et ces observations de terrain est acceptable (coefficient de Cohen (1960) : Kappa = 0.8), lorsque la « forêt » et les « arbustes » sont attribués à la classe supervisée « forêt ». Cet accord a aussi été accepté parce que la prise de vue et les relevés terrain sont du même mois et de la même année. Quant aux scènes TM96 et ETM03, nous acceptons que ces classes supervisées représentent aussi les mêmes modes d'occupation du sol, compte tenu des canaux corrigés et de leurs signatures spectrales.

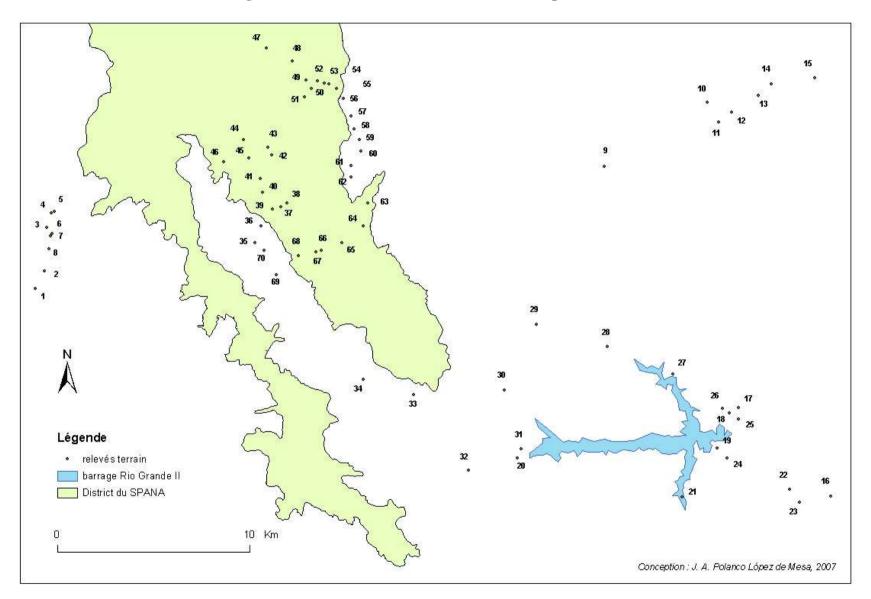
Tableau 3.3 Relevés terrain

Relevés	Occupation	Relevés	Occupation	Relevés	Occupation	Relevés	Occupation
N^o	du sol	N^o	du sol	N^o	du sol	N^o	du sol
1	Pâturages	19	Sols nus	37	Forêt	55	Pâturages
2	Arbustes	20	Forêt	38	Arbustes	56	Arbustes
3	Sol nu (Urbain)	21	Forêt (eau) ²⁷	39	Forêt	57	Arbustes
4	Cultures	22	Pâturages	40	Forêt	58	Pâturages
5	Cultures	23	Pâturages	41	Arbustes	59	Pâturages
6	Cultures	24	Arbustes	42	Forêt	60	Pâturages
7	Cultures	25	Forêt	43	Arbustes	61	Pâturages
8	Cultures	26	Forêt	44	Pâturages (<i>Páramo</i>)	62	Pâturages
9	Sol nu (Urbain)	27	Forêt	45	Pâturages (<i>Páramo</i>)	63	Pâturages
10	Pâturages	28	Pâturages	46	Forêt	64	Pâturages
11	Pâturages	29	Sol nu (Urbain)	47	Pâturages (<i>Páramo</i>)	65	Arbustes
12	Cultures	30	Pâturages	48	Forêt	66	Arbustes
13	Cultures	31	Forêt	49	Forêt	67	Arbustes
14	Sols nus	32	Pâturages	50	Arbustes	68	Arbustes
15	Forêt	33	Pâturages	51	Arbustes	69	Forêt
16	Sol nu (Urbain)	34	Sols nus	52	Forêt	70	Pâturages
17	Arbustes	35	Sol nu (Urbain)	53	Arbustes		
18	Cultures	36	Pâturages	54	Pâturages		

²⁶ Ces relevés terrain ont été effectués dans la limite de l'accessibilité (sécurité) et des moyens matériels disponibles (guide, véhicule, GPS, etc.).

²⁷ Ce relevé a été fait depuis une embarcation.





L'estimation de l'erreur des classifications supervisées à l'aide de l'algorithme ERRMAT, consiste à calculer le nombre de pixels mal classés par rapport aux sites test. Une matrice de confusion établit la relation entre les classes supervisées et les sites test (cf. Tableau 3.4): les colonnes sont associées aux sites test et les lignes aux classes supervisées. Dans l'hypothèse où les classes supervisées sont entièrement représentées par les classes des sites test, la matrice de confusion n'aura des valeurs que sur la diagonale, celles-ci étant équivalentes au nombre de pixels bien classés. Si les classes supervisées ne correspondent pas tout à fait aux sites test, quelques pixels seront mal classés. Le nombre de pixels mal classés est la somme des valeurs situées en dehors de la diagonale de cette matrice.

La qualité du classement supervisée peut être estimée par la méthode de « validation croisée » (Lebart *et al.*, 1998), en calculant le pourcentage de pixels mal classés par classe et puis en les additionnant pour obtenir le total. Ce pourcentage total de pixels mal classés (« taux d'erreur apparent » - TEA) a été réduit en augmentant le nombre de sites test. Parmi les trois classifications supervisées, le taux d'erreur apparent moyen obtenu est de 2%.

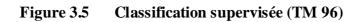
Les cartes « forêt » & « non-forêt » issues des classifications supervisées (*cf.* Figure 3.6), ont été filtrées afin de regrouper les pixels isolés et consolider les frontières. Ce filtrage modifie le pixel situé au centre d'une maille de 3 X 3 pixels, en l'affectant à la classe la plus fréquente (filtre MODE : Eastman, 2001 ; Richards, 1994). C'est une généralisation de la carte qui convient à l'analyse spatio-temporelle car les classes sont plus homogènes.

Tableau 3.4 Matrice de confusion

Colonnes : sites test ; lignes : classes supervisées. Nous calculons les pixels mal classés par classe (% d'erreur) et dans l'ensemble (Taux d'Erreur Apparent (TEA)).

•	·		TM96	•	•			ETM02	•	·
	forêt	non forêt	eau	ombres	nuages	forêt	non forêt	eau	ombres	nuages
forêt	5 824	0	1	10	0	8 274	5	1	8	0
non forêt	18	4 557	0	0	0	20	5 939	0	0	0
eau	0	0	3 823	0	0	0	0	3 221	0	0
ombres	47	0	2	1 991	0	0	0	3	1 006	0
nuages	0	0	0	0	2 698	0	0	4	0	2 969
total	5 889	4 557	3 826	2 001	2 698	8 294	5 946	3 229	1 014	2 969
% d'erreur	1.1	0	0.1	0.5	0	0.2	0.1	0.3	0.8	0
TEA (%)			1.7					1.4		

			ETM03		
	forêt	non forêt	eau	ombres	nuages
forêt	12 352	69	0	23	0
non forêt	149	9 782	1	0	0
eau	0	0	2 504	0	0
ombres	55	0	0	3 756	0
nuages	0	0	0	0	6 699
total	12 556	9 851	2 505	3 779	6 699
% d'erreur	1.6	0.7	0	0.6	0
TEA(%)			2.9		



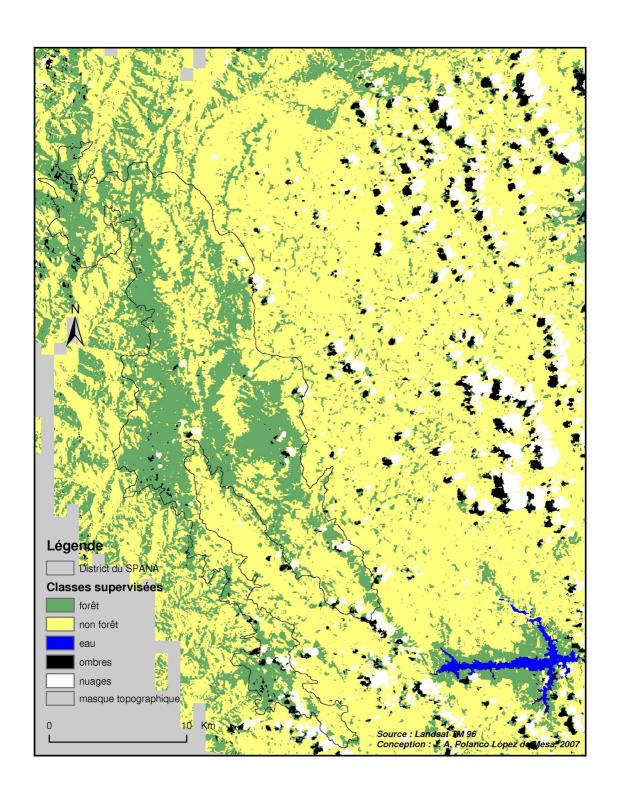
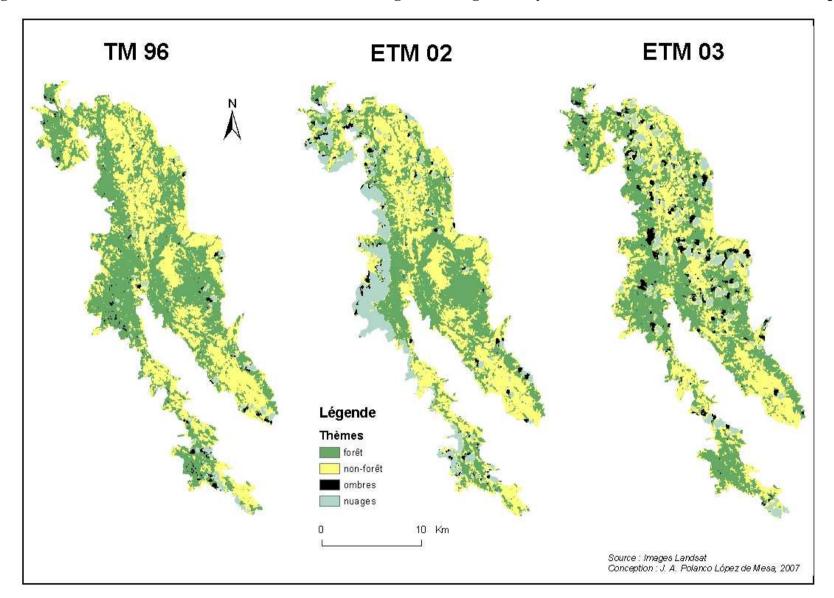


Figure 3.6 Cartes « forêt » & « non-forêt » du district de gestion intégrée du Système de Páramos Hauts-Andins d'Antioquia



3.2 Estimation de la dynamique de la forêt

L'estimation de la « dynamique de la forêt » est le résultat d'une analyse spatio-temporelle considérant à la fois l'information satellitale et cartographique disponible sur l'occupation du sol. Le but est de construire des variables spatiales pouvant mettre en évidence les disparités municipales concernant cette dynamique. Les résultats des classifications supervisées sont à cet effet analysés, compte tenu de la carte officielle d'occupation du sol et de la maille politico – administrative associée aux municipalités concernées par le district de gestion intégrée du Système de Páramos Hauts-Andins d'Antioquia (SPANA).

Le changement de l'occupation du sol est quantifié aux échelles du district de gestion intégrée et des municipalités. Nous discutons l'incertitude de cette dynamique quant à la forêt et sur la base de l'impact de la présence d'ombres et de nuages. Afin de réduire cette incertitude, nous proposons un changement d'échelle d'analyse.

3.2.1 L'analyse spatio-temporelle

Il s'agit d'une étude diachronique des classifications supervisées, compte tenu de la carte officielle d'occupation du sol. Cette étude consiste à identifier la dynamique spatio-temporelle de la classe « forêt » en comparant, soit la carte officielle avec les images satellitales, soit les images satellitales entre elles. Nous étudions d'abord le tableau de correspondances entre les images et la carte, pour ensuite proposer quatre typologies de dynamique spatio-temporelle de la forêt.

3.2.1.1 Le tableau de correspondances des images satellitaires et la carte officielle d'occupation du sol

Afin de comparer la carte officielle avec les images satellitaires, nous avons effectué une analyse du tableau de correspondances des modes d'occupation du sol à l'aide de l'algorithme CROSSTAB (Eastman, 2001). Nous partons de deux hypothèses. D'une part, sur la carte officielle la classe « forêt » des classifications supervisées peut représenter le mode d'occupation du sol « forêt », et la classe « non-forêt » tous les autres. D'autre part, sur la carte la classe « forêt » des classifications supervisées peut aussi représenter les modes d'occupation du sol « forêt » et « arbustes », et la classe « non-forêt » tous les autres. Nous avons retenu la carte la mieux corrélée avec les images pour effectuer l'analyse diachronique.

Nous avons estimé la correspondance entre la carte et les images pour chaque classe (coefficient KIA: Kappa Index of Agreement) et pour toutes les classes (coefficient Overall Kappa). Etant une source d'erreur dans la correspondance, nous avons réduit la présence d'ombres et de nuages sur les images ETM 02 et ETM 03 à l'aide d'une mosaïque d'images. Compte tenu des dates de prise de vue, nous avons construit cette mosaïque en assemblant la zone des plantations de l'image ETM 03 et la zone de production laitière de l'image ETM02 à l'échelle du district (cf. Figure 3.7).

La correspondance de l'image TM 96 et de la mosaïque ETM 02/03 avec la carte officielle d'occupation du sol est plus forte lorsque les modes d'occupation du sol « forêt » et « arbustes » de la carte sont affectés à la classe supervisée « forêt » (*cf.* Tableau 3.5). Cette correspondance existe pour la classe « forêt » ainsi que pour l'ensemble des deux classes. La correspondance entre la carte et la mosaïque ETM 02/03 par exemple, montre que pour la classe « forêt » le coefficient KIA augmente de 0.57 à 0.72, alors que pour l'ensemble des classes le coefficient *Overall Kappa* augmente aussi (mais faiblement) de 0.82 à 0.83.

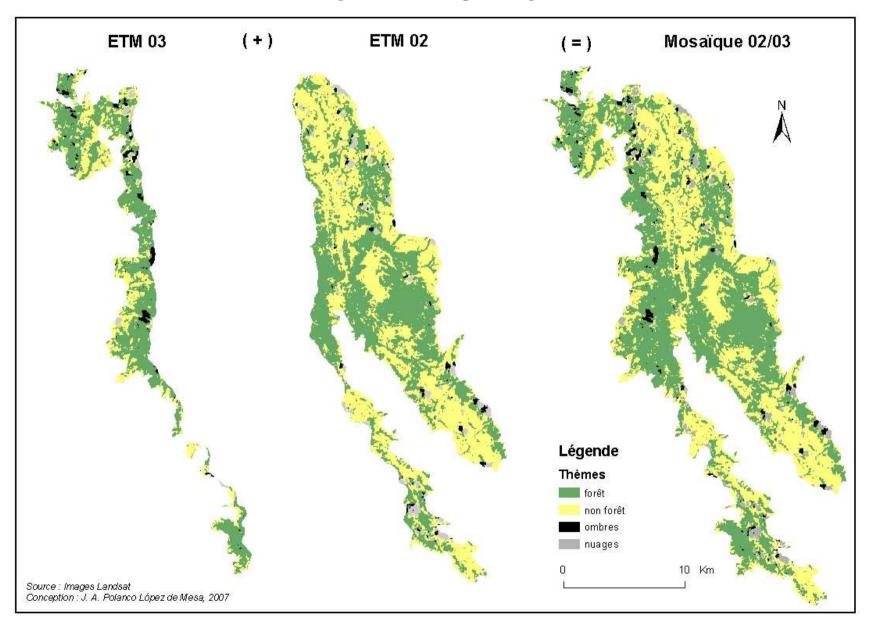
Bien qu'il existe une correspondance entre les images et la carte, elle peut être aussi faible en raison du changement anthropique d'occupation du sol entre 1989 (carte) et 2003 (mosaïque). Afin d'étudier ce changement anthropique d'occupation du sol, nous définissons ci-après quatre typologies d'analyse spatio-temporelle.

Tableau 3.5 Correspondance entre l'image et la carte

Les deux hypothèses sont analysées en considérant l'image comme référence pour le calcul des indices Kappa.

	classe « forêt »	> = catégories « forêt »	classe « forêt » = catégorie « forêt »			
Images	« forêt » (KIA)	« non forêt » (KIA)	Overall Kappa	« forêt » (KIA)	« non forêt » (KIA)	Overall Kappa
TM96	0.71	0.69	0.84	0.55	0.84	0.83
ETM 02/03	0.72	0.68	0.83	0.57	0.83	0.82

Figure 3.7 Mosaïque d'images



3.2.1.2 Typologies de la dynamique spatio-temporelle de la forêt

Les typologies de la dynamique spatio-temporelle de la forêt ont été définies en comparant les images avec la carte et les images entre elles. Abstraction faite de l'ombre et des nuages, les modes d'occupation du sol « forêt » et « non-forêt » ont été comparés à l'aide de la procédure CROSSTAB et selon trois combinaisons des images et de la carte : carte 1989 et image TM96 ; image TM96 et mosaïque 2002/2003 ; carte 1989 et mosaïque 2002/2003. A partir de ces comparaisons, nous avons retenu quatre typologies de la dynamique spatio-temporelle de la forêt (*cf.* Figure 3.8) :

- « Forêt stable » : c'est la « forêt » qui ne change pas ;
- « Non-forêt stable » : c'est la « non-forêt » qui ne change pas ;
- « Déboisement » : c'est la « forêt » qui se transforme en « non-forêt » ;
- « Reboisement » : c'est la « non-forêt » qui se transforment en « forêt ».

L'espace couvert d'ombres et de nuages (« ombres – nuages ») est une source d'incertitude dans l'estimation de la « dynamique de la forêt ». Dans le cas de la comparaison entre l'image TM 96 et la mosaïque 2002/2003 par exemple (*cf.* Figure 3.9), cet espace a une surface (3 073 hectares)²⁸ du même ordre de grandeur que celle du « déboisement » (3 226 hectares) et du « reboisement » (2 497 hectares), rendant incertaine l'estimation de la « dynamique de la forêt ». En outre, cette comparaison peut être aussi incertaine car deux saisons différentes ont été considérées quant à la mosaïque. C'est pourquoi cette comparaison n'a pas été utilisée dans les calculs.

En revanche, nous avons proposé deux périodes afin d'estimer la « dynamique de la forêt », en réduisant cette incertitude liée à la présence d'ombres et de nuages et aux différentes saisons. La première s'étend de 1989 à 1996 et nous l'avons définie par la carte officielle de 1989 et l'image de 1996. La deuxième s'étend de 1989 à 2003 et nous l'avons définie par la carte officielle de 1989 et par la mosaïque des images de 2002 et 2003, supposant que le changement d'occupation du sol entre ces deux images est négligeable (cinq mois séparent les deux prise de vue).

_

 $^{^{28}}$ Tous les calculs de surface ont été effectués en mode raster, ce qui entraı̂ne une erreur d'environ 0.1% de la surface estimée (cf. Annexe 1.3.1).

Nous avons étudié cette relation entre les typologies de dynamique spatio-temporelle de la forêt à l'échelle des municipalités, afin de mettre en évidence leur disparité au sein du district de gestion intégrée. Ce changement d'échelle d'analyse nous a aussi permis de réduire l'incertitude liée à la présence d'ombre et de nuages.

Figure 3.8 Dynamique spatio-temporelle de la forêt

District du SPANA

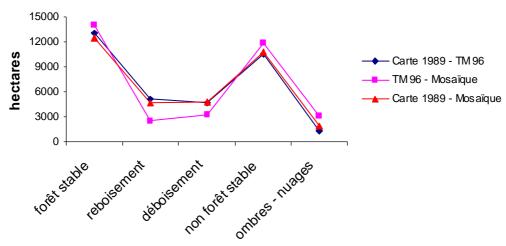
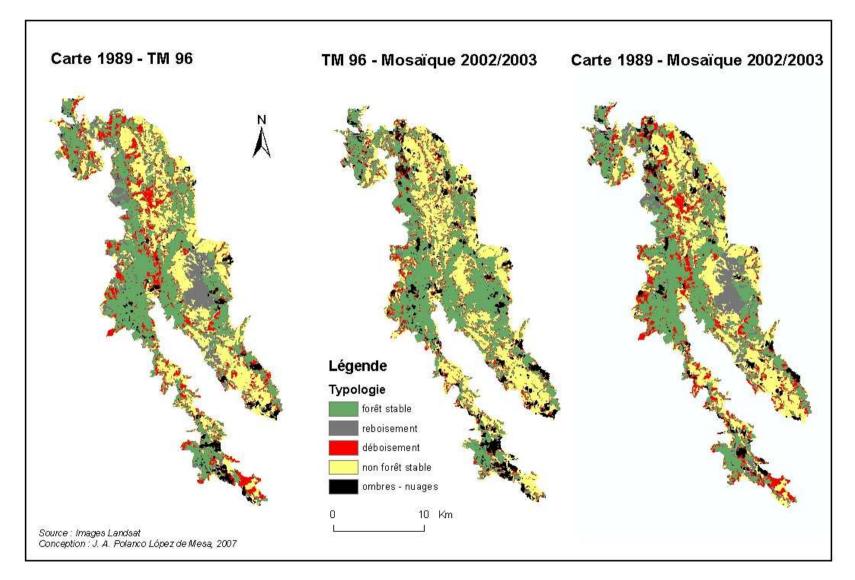


Figure 3.9 Dynamique spatio-temporelle de la « forêt » dans le « district de gestion intégrée » du SPANA



3.2.2 La dynamique de la forêt à l'échelle municipale

La « dynamique de la forêt » est considérablement différenciée entre les municipalités : la typologie de la dynamique et la taille des municipalités entraînent des disparités entre ces entités territoriales. Mais ces disparités peuvent rester incertaines entre quelques entités, en raison de la présence d'ombres et de nuages dans leur espace géographique à l'intérieur du district. Nous allons estimer les disparités pour ensuite discuter leur incertitude.

3.2.2.1 Les disparités municipales de la dynamique de la forêt

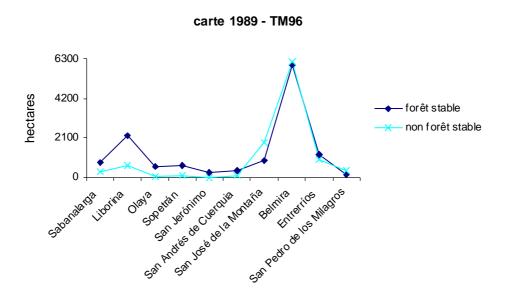
Nous avons identifié les disparités municipales selon la typologie de la « dynamique de la forêt » et selon la période. En ce qui concerne la « forêt stable » et la « non-forêt stable » pour la période 1989 – 1996 par exemple (*cf.* Figure 3.10), Belmira est la municipalité dont la surface concernée par le district a le plus de « forêt stable » (5 965 hectares) et de « non-forêt stable » (6 121 hectares)²⁹. Au contraire, c'est San Pedro de los Milagros qui a le moins de « forêt stable » (185 hectares) et San Jerónimo de « non-forêt stable » (7 hectares) dans le district. San José de la Montaña, Belmira et San Pedro de los Milagros sont les seules municipalités ayant plus de surface en « non-forêt stable » que de surface en « forêt stable » dans le district. Ces disparités ne changent pas pour la période 1989 – 2003.

En ce qui concerne le « déboisement » et le « reboisement » pour la période 1989 – 1996 par exemple (cf. Figure 3.11), Belmira est toujours la municipalité à plus fort « déboisement » (2 109 hectares) et « reboisement » (2 447 hectares), celui-ci étant incertain (cf. 3.2.2.2). Au contraire, c'est San Jerónimo la municipalité ayant moins de « déboisement » (43 hectares) et de « reboisement » (26 hectares) à l'intérieur du district. Le « reboisement » l'emporte sur le « déboisement » dans les municipalités de Sabanalarga, Liborina et Entrerríos. Au contraire, le « déboisement » l'emporte sur le « reboisement » dans les autres municipalités associées au district. Ces disparités ne changent pas pour la période 1989 – 2003.

_

²⁹ La base des données est disponible en annexe 1.3.2.

Figure 3.10 « forêt stable » et « non-forêt stable » dans les municipalités



Carte 1989 - Mosaïque 2002/2003

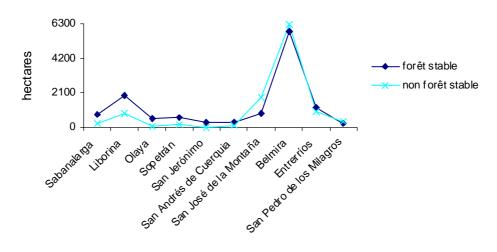
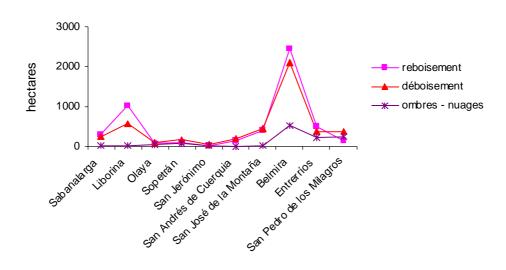
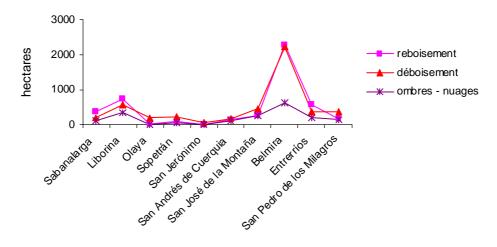


Figure 3.11 « déboisement » et « reboisement » dans les municipalités





Carte 1989 - Mosaïque 2002/2003



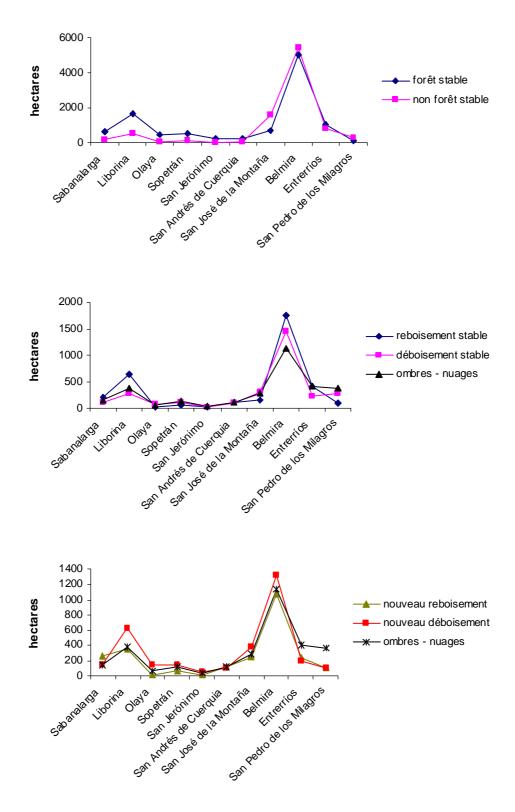
Néanmoins, la « dynamique de la forêt » a montré des changements entre les périodes 1989 – 1996 et 1989 – 2003, qui engendrent d'autres disparités entre les municipalités. Nous avons réduit ces changements en tenant compte de nouvelles typologies (*cf.* Figure 3.12 et annexe 1.3.2) :

- « Déboisement stable » : c'est la surface en « déboisement » pour les deux périodes ;
- « Reboisement stable » : c'est la surface en « reboisement » pour les deux périodes ;
- « Nouveau déboisement » : c'est la surface en « déboisement », survenue entre 1996 et 2003. Nous l'avons obtenue grâce au changement de typologie d'une période à l'autre : de « forêt stable » à « déboisement » ou de « reboisement » à « non-forêt stable » ;
- « Nouveau reboisement » : c'est la surface en « reboisement », survenue entre 1996 et 2003. Nous l'avons obtenue grâce au changement de typologie d'une période à l'autre : de « déboisement » à « forêt stable » ou de « non-forêt stable » à « reboisement ».

D'une période à l'autre, la surface de « forêt stable » du district a diminué dans la plupart des municipalités, à l'exception de San Jerónimo, Entrerríos et San Pedro de los Milagros où cette surface semble avoir augmenté. Ces changements sont liés au « nouveau déboisement » et au « nouveau reboisement ». La plus grande diminution de surface en « forêt stable » a eu lieu à Liborina; elle est d'environ 282 hectares et résulte d'un « nouveau déboisement » d'environ 626 hectares contre un « nouveau reboisement » d'environ 348 hectares. L'augmentation de surface en « forêt stable » d'une période à l'autre ne semble non seulement être une conséquence du reboisement, mais aussi de la présence d'ombres et de nuages, notamment dans les municipalités de San Jerónimo et San Pedro de los Milagros. Bien que la surface en « forêt stable » augmente dans ces deux municipalités, la surface en « nouveau déboisement » l'emporte sur la surface en « nouveau reboisement ». En revanche, c'est bien la surface en « nouveau reboisement » qui entraîne une croissance de la surface en « forêt stable » à Entrerríos. Ces disparités municipales de la dynamique de la forêt peuvent donc être incertaines en raison de la présence d'ombres et nuages. En outre, ces disparités sont sensibles à la taille des entités territoriales. Nous discutons l'incertitude des disparités et l'effet de taille ci-après.

Figure 3.12 Dynamique de la forêt entre 1996 et 2003

La dynamique de la forêt entre 1996 et 2003 est étudiée en tenant compte des changements observés par typologie entre les périodes 1989 – 1996 et 1989 – 2003.



Conception : J. A. Polanco López de Mesa, 2007

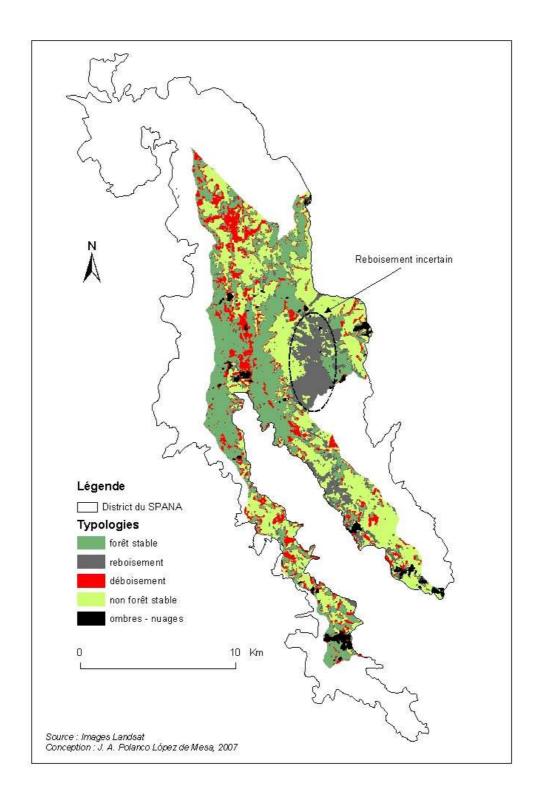
3.2.2.2 L'incertitude et l'effet de taille dans les disparités

Nous considérons que la dynamique de la forêt peut être incertaine dans les municipalités où la surface en « ombres – nuages » est supérieure à celle en « déboisement », « nouveau déboisement », « reboisement » ou « nouveau reboisement ». Pour la période 1989 – 1996, le « reboisement » peut être incertain à San Jerónimo et San Pedro de los Milagros, alors qu'aucune autre typologie de la « dynamique de la forêt » n'est considérée incertaine. Pour la période 1989 – 2003, aucune typologie de la dynamique de la forêt n'est considérée incertaine. D'une période à l'autre, le « nouveau reboisement » peut être incertain dans la plupart des municipalités, à l'exception de Sabanalarga. Le « nouveau déboisement » peut être incertain à San Andrés de Cuerquia, Entrerríos et San Pedro de los Milagros.

Pour ces deux périodes, nous considérons aussi le « reboisement » incertain à Belmira en raison non pas de la présence d'ombres et nuages, mais des erreurs sur la carte officielle d'occupation du sol qui auraient pu être commises lors de la photo-interprétation (Buritica Mira, 2002). Suite à notre enquête de terrain (relevés GPS) et en tenant compte des travaux de León et Giraldo (2000), le secteur Est du district dans cette municipalité aurait déjà été couvert de « forêt » en 1989, date de publication de la carte (*cf.* Figure 3.13). C'est pourquoi il nous semble que cette surface en « reboisement » à Belmira aurait toujours été couverte de « forêt ».

Figure 3.13 Reboisement incertain à Belmira

Dynamique de la forêt entre 1989 et 1996. L'incertitude du reboisement existe aussi au même endroit pour la période 1989 – 2003.



Les disparités municipales de la « dynamique de la forêt » évoquées plus haut changent en raison de l'effet de taille des entités territoriales. Concernant les rapports spatiaux des municipalités dans le district de gestion intégrée du Système de Páramos Hauts-Andins d'Antioquia (SPANA) (*cf.* Figure 3.14), quatre municipalités occupent 82.2% de la surface totale : Belmira (49.4%), Liborina (12.8%), San José de la Montaña (10.5%) et Entrerríos (9.5%). La contribution municipale à la « dynamique de la forêt » dans le district est proportionnelle à ces surfaces.

En revanche, si nous considérons les disparités municipales issues de cette dynamique par rapport à la surface que chaque municipalité occupe dans le district, les relations de proportionnalités évoquées changent. Tenant compte de cet effet de taille, nous avons caractérisé la typologie de la « dynamique de la forêt » pour les deux périodes, par les indices locaux suivants (cf. Figures 3.15 et 3.16) :

- « Indice local de forêt stable » (ilf) : c'est le rapport entre la surface de « forêt stable » d'une municipalité et la surface occupée par cette entité dans le district ;
- « Indice local de non-forêt stable » (ilnf) : c'est le rapport entre la surface de « nonforêt stable » d'une municipalité et la surface occupée par cette entité dans le district;
- « Indice local de déboisement » (ild): c'est le rapport entre la surface en
 « déboisement » d'une municipalité et la surface occupée par cette entité dans le district;
- « Indice local de reboisement » (ilr): c'est le rapport entre la surface en « reboisement » d'une municipalité et la surface occupée par cette entité dans le district.

Tenant compte de la taille des municipalités dans le district, pour la période 1989 – 1996, San Jerónimo et Olaya sont les municipalités ayant respectivement plus de « forêt stable » et moins de « non-forêt stable » ; San José de la Montaña et San Pedro de los Milagros sont les seules municipalités où il y a plus de « non-forêt stable » que de « forêt stable » ; San Pedro de los Milagros est la municipalité la plus « déboisée », alors que c'est Liborina la plus « reboisée ».

Pour la période 1989 – 2003, en termes de « forêt stable » et « non-forêt stable » les disparités municipales ressemblent à celles de la période précédente, alors qu'en termes de « déboisement » et « reboisement », elles sont différentes. San Pedro de los Milagros est toujours la municipalité la plus « déboisée », et Sabanalarga est celle la plus « reboisée ».

Cet effet de taille rend donc les disparités municipales très différenciées. En tenant compte de ces deux perspectives de disparité en termes de dynamique de la forêt, les municipalités à plus grande taille sont soulignées dans le cas du « déboisement », mais ce sont celles à plus petite taille qui émergent quant à l'« indice local de déboisement ». Nous mettons en valeur cette différentiation dans le prochain chapitre, afin d'étudier le « développement économique » en considérant les relations entre la « dynamique de la forêt », la « démographie » et l'impact de la « force centripète » de la vallée d'Aburrá sur les municipalités étudiées.

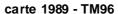
San Pedro de los Sabanalarga 4.9% Milagros 3.8% Liborina Entrerríos 12.8% Olaya 9.5% 2.4% Sopetrán 3.2% San Jerónimo 1.1% San Andrés de Cuerquia 2.5% Belmira 49.4% San José de la

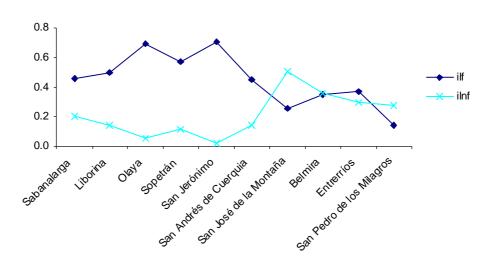
Figure 3.14 Pourcentage de la surface des municipalités dans le district du SPANA

Conception : J. A. Polanco López de Mesa, 2007

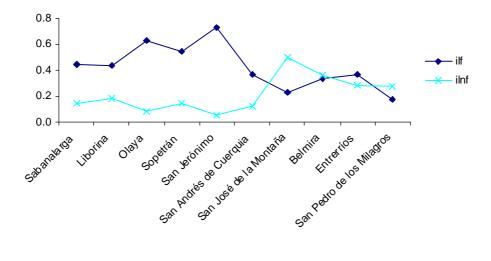
Montaña 10.5%

Figure 3.15 Indices locaux de « forêt » (ilf) et « non-forêt » (ilnf)





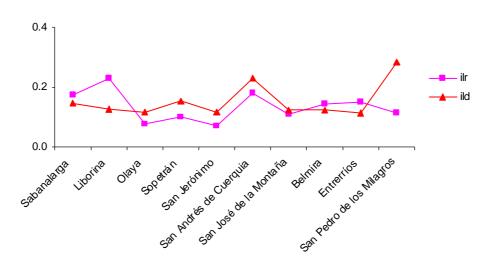
Carte 1989 - Mosaïque 2002/2003



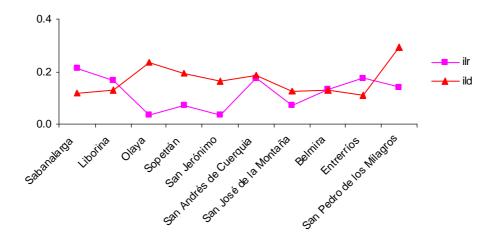
Conception : J. A. Polanco López de Mesa, 2007

Figure 3.16 Indices locaux de « déboisement » (ild) et « reboisement » (ilr)





Carte 1989 - Mosaïque 2002/2003



Conception : J. A. Polanco López de Mesa, 2007

4 Scénarios de « développement économique » et de « protection dans le district »

Nous voulons comprendre la relation entre le « développement économique » et la « protection dans le district » en considérant l'espace géographique des municipalités. Trois scénarios sont à cet effet proposés, dans lesquels les municipalités sont hiérarchisées par le biais d'une « analyse spatiale multiobjectif » (Malczewsky, 1999). Le premier objectif est de hiérarchiser les municipalités en tenant compte des critères de « développement économique » et, le deuxième, de les hiérarchiser en considérant les critères de « protection dans le district ». La base de données de l'analyse est un tableau de type variables – individus, où les lignes (individus) sont les municipalités et les colonnes (variables) sont les critères qui déterminent le « développement économique » et la « protection dans le district ». Comme les municipalités sont des entités spatiales, ce tableau peut être aussi représenté par un tableau de cartes. Ces cartes concernent l'ensemble des municipalités associées au district du Système de Páramos Hauts-Andins d'Antioquia, mais dans chaque carte une seule unité d'analyse est représentée par un seul critère. Les vecteurs ligne (L_p) du tableau représentent l'ensemble des critères pour une seule municipalité, et les vecteurs colonne (C_n) représentent la distribution spatiale d'un seul critère dans l'ensemble des municipalités (cf. Figure 4.1).

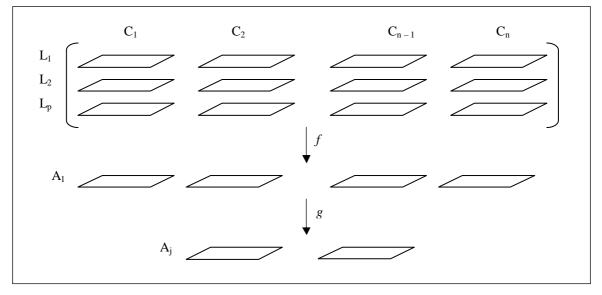
La hiérarchisation des municipalités se fait par le couplage d'une « analyse exploratoire multidimensionnelle » (Lebart $et\ al.$, 1998) du tableau, et d'un croisement des cartes. Ce couplage s'effectue en distinguant deux logiques d'agrégation successives : une pour les lignes (f) et une pour les colonnes (g). Comme résultat des agrégations, les alternatives (A_j) représentent l'organisation spatiale des municipalités hiérarchisées. L'agrégation des lignes se réalise par une classification hiérarchique, puis celle des colonnes par une comparaison des moyennes des groupes issus de la première agrégation. Les municipalités sont donc classées deux fois, d'abord avec tous les critères (règle de décision f) et ensuite avec quelques uns des critères regroupés (règle de décision g). Parce que les critères sont dans un deuxième temps regroupés, les alternatives obtenues sont définies par un nombre réduit de cartes.

L'avantage de cette technique de couplage est qu'une vision d'ensemble peut être établie grâce à l'utilisation d'une première fonction d'agrégation pour tous les critères : le comportement d'une ou plusieurs unités spatiales peut ainsi être observé selon tous les critères sélectionnés. Deux inconvénients sont toutefois à signaler. D'une part, des modes de comportement des critères ne peuvent pas être observés dans l'espace géographique des municipalités, car celles-ci ont été classées avec l'information de tous les critères. D'autre part, le choix des critères de « développement économique » et de « protection dans le district », ainsi que le processus de hiérarchisation des municipalités peuvent engendrer de l'incertitude dans les scénarios.

Dans ce chapitre, nous expérimentons une vue d'ensemble de l'espace géographique des municipalités, en les hiérarchisant par une analyse multiobjectif en deux phases. Dans la première phase, les critères sont proposés et les objectifs sont déterminés en tenant compte de la réalité terrain pour les premiers et de la corrélation des critères pour les seconds. Dans la deuxième phase, trois scénarios sont proposés, nous permettant de mettre en relation le « développement économique » et la « protection dans le district » dans l'espace géographique des municipalités. Enfin, l'incertitude des scénarios est minimisée.

Figure 4.1 Schéma d'analyse spatiale multiobjectif

Dans le tableau de cartes d'ordre (p, n), les lignes (L_p) sont regroupées en une première alternative (A_I) selon la classification hiérarchique (f). Puis, les colonnes (C_n) sont regroupées en une autre alternative (A_j) selon la règle de comparaison (g) des moyennes groupales de A_I .



Source : adapté de van Herwijinen et Rietveld (1999)

4.1 Expérimentation d'une vue d'ensemble

L'expérimentation d'une vue d'ensemble dans le processus de hiérarchisation des municipalités est abordée par la proposition des critères et la mise en évidence des objectifs. Déterminés par la corrélation des critères, les objectifs orientent l'analyse spatiale vers la construction des scénarios. En effet, la hiérarchisation des municipalités est faite par objectifs, c'est-à-dire qu'un choix de critères est nécessaire selon un objectif précis. Les critères et les objectifs ont une relation de réciprocité : le choix des critères dépend de leurs corrélations, qui définissent aussi les objectifs. C'est pourquoi, leur mise en évidence exige un processus itératif dans lequel des critères sont proposés et ensuite leurs corrélations étudiées, pour déterminer les objectifs selon l'intérêt de notre étude.

4.1.1 La proposition des critères

Les critères sont des variables spatialisées et contextuelles qui aident à la formation de gradients et d'organisations spatiales, comme des opérateurs, pour établir une vue d'ensemble (Haining, 2003). D'une part, grâce aux gradients, les municipalités peuvent être comparées en tenant compte d'un critère en particulier. D'autre part, la mise en commun de plusieurs critères dans l'espace des municipalités, détermine l'organisation spatiale de ceux-ci.

La proposition des critères tient compte de ces opérateurs afin de mieux établir la relation entre le « développement économique » et la « protection dans le district ». C'est le cas des critères concernant la « dynamique de la forêt », la « démographie », l'impact de la « force centripète » de la vallée d'Aburrá et les « efforts » de protection dans le district.

4.1.1.1 La dynamique de la forêt et la démographie

Le *déboisement* et le *reboisement* sont les critères considérés pour la « dynamique de la forêt » (cf. 3.3); la *population*, la *densité de population* et le *taux de croissance de population rurale* sont ceux considérés pour la « démographie » municipale. Les critères *population* et *densité de population* se rapportent aux recensements de population en 1993 et 2005, et le critère *taux de croissance de population rurale* se rapporte aux périodes entre les recensements de 1985, 1993 et 2005. Le choix de ces critères s'inspire des travaux de l'Institut d'Hydrologie, Météorologie et d'Etudes Environnementales colombien (IDEAM, 1998), sur l'impact du développement économique rural en terme d'une « pression de la population sur la forêt ». Cette pression, mesurée à l'échelle municipale, est issue de la corrélation entre la densité de population, le pourcentage de surface en forêt et le taux de croissance de population rurale.

Nous avons adapté cette « pression de la population sur la forêt », sans tenir compte du pourcentage de surface en forêt dans toute la municipalité, mais en considérant soit le *déboisement* soit l'*indice local de déboisement* dans l'espace municipal affecté au district du Système de Páramos Hauts-Andins. En outre, nous avons considéré le *reboisement* et l'*indice local de reboisement* dans ce même espace, à la recherche d'une corrélation négative avec les critères démographiques évoqués.

Les gradients issus des critères démographiques (cf. Figure 4.2) aident à distinguer quatre groupes de municipalités en termes de population en 1993 et 2005 :

- Municipalités de moins de 5 000 habitants : Olaya et San José de la Montaña ;
- Municipalités entre 5 000 et 10 000 habitants : Sabanalarga, Liborina, San Andrés de Cuerquia, Belmira et Entrerríos ;
- Municipalités entre 10 000 et 15 000 habitants : Sopetrán et San Jerónimo ;
- Municipalités de plus de 15 000 habitants : San Pedro de los Milagros.

Cette hiérarchie change compte tenu de la densité démographique, en raison de l'effet de taille. Quatre groupes peuvent être ainsi distingués, mais ceux-ci sont plus sensibles au changement de densité de population entre 1993 et 2005 :

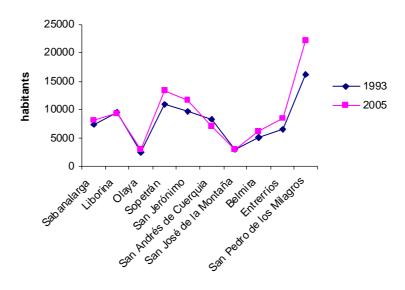
- Municipalités entre 20 et 40 habitants au Km²: Sabanalarga, Olaya, San José de la Montaña, Belmira et Entrerríos ;
- Municipalités entre 40 et 60 habitants au Km²: Liborina, Sopetrán (1993) et San Andrés de Cuerquia;
- Municipalités entre 60 et 80 habitants au Km² : Sopetrán (2005), San Jerónimo et San Pedro de los Milagros (1993) ;
- Municipalités de plus de 80 habitants au Km² : San Pedro de los Milagros (2005).

Les gradients associés aux *taux de croissance de la population rurale* sont très différentiés entre les périodes 1985 – 1993 et 1993 – 2005. Pour la première période, la plupart des municipalités présentent une croissance de la population rurale, à l'exception de Olaya et Belmira où il y a eu décroissance de cette population. Au contraire, pour la deuxième période, la plupart des municipalités présentent une décroissance de la population rurale, à l'exception aussi de Olaya et Belmira. La différence entre les deux *taux de croissance de la population rurale* est très contrastée principalement dans les municipalités de Sabanalarga, Olaya, San Andrés de Cuerquia, San José de la Montaña, Entrerríos et San Pedro de los Milagros. Il existe un fort peuplement rural à Olaya et, au contraire, un fort dépeuplement rural à Sabanalarga, San Andrés de Cuerquia, San José de la Montaña, Entrerríos et San Pedro de los Milagros. Les municipalités « stables » pour les deux périodes sont Liborina, Sopetrán, San Jerónimo et Belmira.

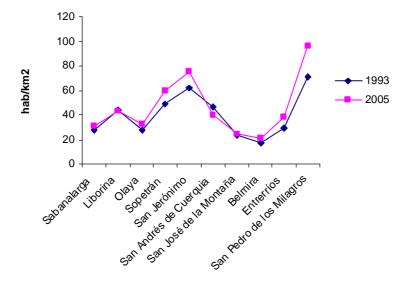
C'est-à-dire que la croissance démographique totale entre 1993 et 2005 a eu lieu notamment dans les chefs-lieux, à l'exception des municipalités de Olaya et Belmira, qui se sont aussi peuplées au niveau rural. San Andrés de Cuerquia est la seule municipalité où la population totale décroît entre ces deux dates.

Figure 4.2 Gradients des critères démographiques

Population municipale

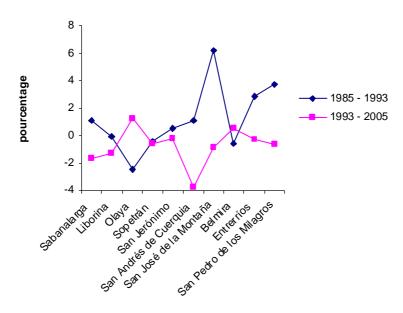


Densité de population



(Suite Figure 4.2)

Taux de croissance population rurale



Source : Département Administratif National de Statistique (DANE)

4.1.1.2 L'impact de la « force centripète » de la vallée d'Aburrá

Les critères choisis pour décrire l'impact de la « force centripète » exercée par la vallée d'Aburra (dominée par la ville de Medellín) sur les dix municipalités rurales pourraient être la distance et la pauvreté. Le critère de distance correspond au temps de parcours entre les chefs-lieux des municipalités rurales et la ville de Medellín, alors que celui de pauvreté correspond à l'indicateur synthétique des besoins de base non satisfaits (Necesidades Básicas Insatisfechas — NBI). Le choix de ces critères s'inspire des travaux de spatialisation de la pauvreté (Schuschny et Gallopín, 2004) et des revenus ménagers (Sánchez et Nuñez, 1999, cités par Moncayo Jiménez, 2004).

Vue dans une « économie monocentrique » (Fujita *et al.*, 1999), la relation entre les dix municipalités agricoles et la vallée d'Aburra (centre manufacturier), subit une « force centripète » qui se manifeste par une baisse de la rente de la terre au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la vallée. Dans cette lecture du modèle classique de von Thünen, ces auteurs attribuent la diminution de la rente au coût du transport des marchandises. De ce fait, nous adoptons la *distance* comme critère pour estimer l'effet du coût de transport, et la

pauvreté pour estimer l'effet de perte de revenu. L'impact de la « force centripète » peut donc être un indicateur de la relation économique entre les municipalités rurales et la ville de Medellín en termes de développement agricole.

L'inconvénient de cette simplification est que l'indicateur des « besoins de base non satisfaits » (NBI) est plus un instrument de caractérisation que de mesure de la pauvreté (Feres et Mancero, 2001) : il ne mesure pas les revenus ménagers. En revanche, cet indicateur estime directement la satisfaction des besoins de base que les ménages peuvent atteindre grâce au revenu. La satisfaction des besoins du ménage est estimée à l'aide d'un recensement des biens et des services disponibles, considérant un « minimum » nécessaire fixé selon le « standard » de vie colombien (cf. Tableau 4.1).

L'avantage lorsqu'on utilise le NBI est, d'une part, la disponibilité de l'information à l'échelle municipale, distinguant la population habitant à l'intérieur (population urbaine) et à l'extérieur (population rurale) du chef-lieu et, d'autre part, l'estimation de la satisfaction de quatre besoins de base des ménages (*cf.* Tableau 4.1) : logement, services publics, éducation et dépendance économique.

Tableau 4.1 Indicateur des besoins de base non satisfaits (NBI) en Colombie

Besoins de base	Paramètres	Standard de vie « minimum »				
		Urbain	Rural			
Accès au logement	Logement inadéquat	Sans logement fixe ou logement fabriqué avec des matériaux périssables, sol en terre	Sans logement fixe ou logement fabriqué avec des matériaux périssables, sol en terre			
	Entassement	Plus de trois personnes par chambre	Plus de trois personnes par chambre			
Accès aux services publics	Eau potable et égout	Eau courante ou égout indisponibles	Eau courante et égout indisponibles			
Accès à l'éducation	Scolarisation des enfants	Au moins un enfant (7 – 11 ans) n'est pas scolarisé	Au moins un enfant (7 – 11 ans) n'est pas scolarisé			
Capacité économique	Dépendance économique	Plus de trois personnes par membre actif, dont la formation ne dépasse pas les deux ans d'éducation primaire	Plus de trois personnes par membre actif, dont la formation ne dépasse pas les deux ans d'éducation primaire			

Sources: Feres et Mancero (2001) et DANE (2005)

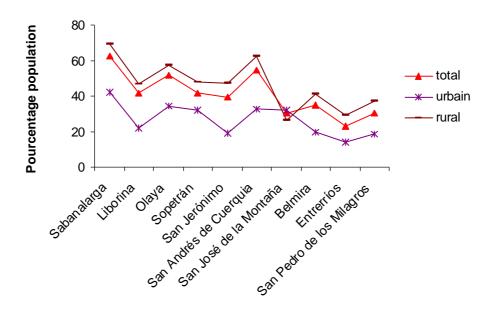
Les ménages sont considérés « pauvres » si au moins un de ces besoins de base n'est pas satisfait. Selon cet indicateur, le nombre de colombiens « pauvres » est passé de 11.85 millions (35.8%) en 1993 à 11.62 millions (27.6%) en 2005. Dans le département d'Antioquia, le nombre d'habitants « pauvres » a varié de 1.34 millions (31%) en 1993 à 1.28 millions (22.6%) en 2005. Parmi les habitants des chefs-lieux du département, environ 663 000 personnes (21.2%) étaient « pauvres » en 1993, contre 668 000 (15.4%) en 2005. Quant à la population habitant en dehors des chefs-lieux, environ 681 000 personnes (56.3%) étaient « pauvres » en 1993 et 628 000 (47.1%) l'étaient en 2005. Le pourcentage de population « pauvre » est plus important en dehors des chefs-lieux et il baisse entre les deux recensements.

Ce comportement du NBI est aussi présent dans notre zone d'étude, sauf deux exceptions (cf. Figure 4.3) : les municipalités de San José de la Montaña et Olaya. Dans le cas de la première, le pourcentage de population « pauvre » des habitants du chef-lieu est plus élevé que celui des habitants ruraux, tous les deux diminuant entre les deux recensements. C'est aussi le cas pour la deuxième municipalité en ce qui concerne la relation entre le NBI urbain et rural, mais au contraire, le pourcentage de population pauvre des habitants du chef-lieu s'accroît.

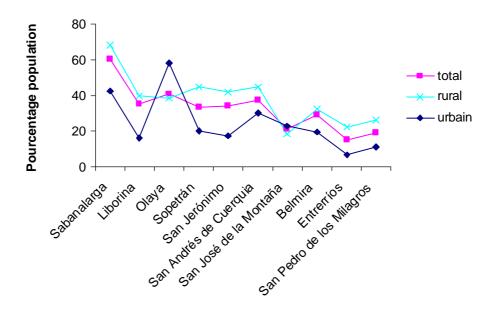
Le gradient défini par cet indicateur permet de considérer une municipalité comme étant plus « pauvre » ou plus « riche » que d'autres, que ce soit à l'intérieur ou à l'extérieur du chef-lieu, ou des deux. Dans notre zone d'étude par exemple, Sabanalarga est la municipalité la plus « pauvre » à tous le niveaux et pour les deux recensements. Au contraire, Entrerríos est la municipalité la plus « riche » en zone urbaine, alors que c'est San José de la Montaña la plus « riche » en zone rurale, ces deux cas étant récurrents en 1993 et 2005.

Figure 4.3 Critère de pauvreté

Besoins de base non satisfaits (NBI) en 1993



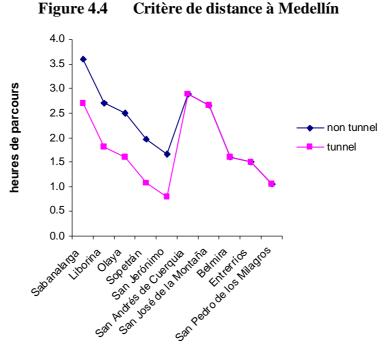
Besoins de base non satisfaits (NBI) en 2005



Source : Département Administratif National de Statistique (DANE)

Le critère de *distance* est calculé en deux temps, en tenant compte de la durée de déplacement entre les chefs-lieux des municipalités et la ville de Medellín. Ces deux temps se différentient par la prise en compte du fonctionnement du tunnel d'Occidente dans les calculs de la *distance*. Ce nouvel équipement, qui n'est pas encore ouvert, réduira de 20 Km le trajet et permettra d'augmenter la vitesse de déplacement autorisée de 40 à 60 Km/h, selon un rapport présenté par le Gouvernement d'Antioquia (2003). San Jerónimo, Sopetrán, Olaya, Liborina et Sabanalrga sont les municipalités qui bénéficieront du tunnel.

La distance en temps de parcours est calculée en fonction de la distance en Km et de la vitesse réglementaire des trajets. Dans le premier cas, la *distance* (T₁) est calculée sans considérer le tunnel. Une vitesse moyenne de déplacement de 40 Km/h pour toutes les municipalités est supposée, sauf pour San Andrés de Cuerquia et pour San José de la Montaña où une vitesse de 60 Km/h est adoptée pour les trajets Medellín – Hatillo et Río Grande – Llanos de Cuivá. Dans le deuxième cas, la *distance* (T₂) est calculée en considérant le tunnel : 20 Km sont déduits du trajet et une vitesse réglementaire moyenne de 60 Km/h est adoptée pour le trajet Medellín – San Jerónimo (*cf.* Figure 4.4). La réduction du temps de déplacement est d'environ une heure, grâce au tunnel. Le gradient défini par ce critère permet de déterminer les municipalités les plus ou moins éloignées de Medellín avant et après la mise en fonctionnement du tunnel d'Occidente.



Conception: J. A. Polanco López de Mesa, 2007

Dans notre analyse multiobjectif, les critères de *distance* T₁ et T₂, sont utilisés séparément, afin d'étudier l'influence du tunnel sur la relation entre le développement agricole et la ville de Medellín. Les mesures totale et rurale de l'indicateur de *pauvreté* (NBI) sont privilégiées parce qu'elles correspondent aux échelles géographiques des critères précédents, et parce qu'elle sont utilisées pour représenter la « protection dans le district ».

4.1.1.3 Les efforts de protection dans le district

L'investissement public décentralisé, l'investissement environnemental municipal et la gestion environnementale municipale sont trois critères permettant de déterminer les efforts du gouvernement local à la protection du Système de Páramos Hauts-Andins d'Antioquia dans le cadre du « district de gestion intégrée ». Nous considérons en effet que ces critères résultent de la coordination entre acteurs du gouvernement local dans le processus de gouvernance du district. Le critère investissement public décentralisé concerne les ressources financières mobilisées par la Corporation Autonome Régionale du Centre d'Antioquia (CORANTIOQUIA), alors que celui investissement municipal environnemental concerne les ressources mobilisées par les municipalités elles-mêmes. Le critère gestion environnementale municipale concerne les actions entreprises par cette entité territoriale dans le but de se renforcer institutionnellement, de formuler et de mettre en œuvre les projets destinés à la « protection dans le district ».

En ce qui concerne le critère *investissement public décentralisé*, la source étudiée des ressources mobilisées se rapporte notamment aux transferts du secteur électrique (taxes sur l'eau) réalisés entre 1995 et 1999 (*cf.* 1.2.1.1). Dans ce choix, deux hypothèses sont à l'œuvre quant à l'allocation de ces ressources financières. D'une part, cette allocation peut être un indicateur du prisme institutionnelle de la CORANTIOQUIA, quant aux projets financés dans les municipalités pour la « protection dans le district ». D'autre part, cette allocation peut être considérée comme un indicateur de la redistribution des ressources dans les municipalités, compte tenu des disparités régionales en termes de développement hydroélectrique (*cf.* Chapitre 1). Le nom de ce critère est déterminé en considérant que la CORANTIOQUIA est une institution publique décentralisée qui réalise une médiation entre les niveaux national et local de l'Etat.

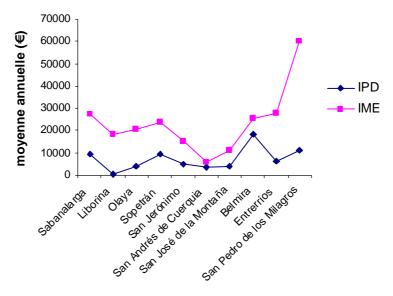
Le critère *investissement municipal sur l'environnement* (IME) se rapporte aux investissements effectués dans la gestion environnementale municipale et la protection de la forêt entre 2000 et 2006 (*cf.* 1.2.1.2). Ce critère est choisi pour mettre en évidence les volontés municipale et intermunicipale de protection de l'environnement dans le cas du Système de Páramos Hauts-Andins d'Antioquia.

Les gradients issus des critères d'investissements (cf. Figure 4.5) aident à déterminer les différences régionales en termes d'efforts de protection. Par exemple, les efforts de « protection dans le district », réalisés par la CORANTIOQUIA, se concentrent principalement dans les municipalités de Belmira et San Pedro de los Milagros. Ces deux municipalités développent elles-mêmes une « volonté » de protection élevée par rapport à celle des autres entités. Au contraire, l'allocation de ressources de la CORANTIOQUIA sur les municipalités de Liborina et Entrerríos contraste avec l'investissement municipal : moins de financement pour les projets de protection leur est attribué par la CORANTIOQUIA, par rapport à celui que les municipalités dédient aux projets.

Figure 4.5 Critère d'investissements sur l'environnement

La moyenne annuelle de l'investissement public décentralisé (IPD) est calculée pour la période 1995 – 1999, alors que celle de l'investissement municipal sur l'environnement (IME) est calculée pour la période 2000 – 2006.

Investissements sur l'environnement



Sources: CORANTIOQUIA (2005); Contraloría General de Antioquia (2000-2006)

Le critère *gestion environnementale municipale* (GEM) est choisi dans le but de rechercher des corrélations avec les critères de protection précédents. Nous construisons ce critère (variable numérique) à partir d'un jugement qualitatif. L'estimation de GEM est un travail d'identification et de caractérisation de plusieurs paramètres en fonction de l'information disponible. Nous avons analysé plusieurs sources d'information secondaire afin de créer ces paramètres.

La première source est l'enquête gouvernementale « Environnement et Qualité de vie dans les municipalités » (*Medio Ambiente y calidad de vida en los municipios*), réalisée en 2000 et 2004 par le bureau départemental chargé des audits (Contraloría General de Antioquia, 2000 et 2004). Cette enquête propose des données sur la genèse institutionnelle et l'application des procédures de gestion environnementale municipale. La deuxième source d'information est le répertoire d'investissements de la CORANTIOQUIA entre 1995 et 1999 (CORANTIOQUIA, 2005), issus des transferts de fonds du secteur électrique (taxes sur l'eau). Ce répertoire propose des données sur le type de projet financé et le montant des ressources financières mobilisées par municipalité. Les dernières sources d'information sont les recherches universitaires réalisées par Gutiérrez *et al.* (2003) et Delgado Gómez *et al.* (2003). Les données issues de ces recherches sont complémentaires de celles obtenues au moyen des enquêtes gouvernementales évoquées.

Le critère de gestion est spatio-temporel : la dimension spatiale est définie par la distribution de GEM dans l'espace géographique des municipalités, et la dimension temporelle est définie par la comparaison des enquêtes gouvernementales de 2000 et de 2004. Les données issues du répertoire de la CORANTIOQUIA et des recherches universitaires, sont supposées constantes entre 2000 et 2004.

Les paramètres suivants sont proposés :

 « Bureau » : disponibilité d'une équipe d'administration municipale spécialisée en environnement (différente du bureau municipal de conseil technique agricole – Unidad Municipal de Asistencia Técnica Agropecuaria – UMATA)³⁰. Données acquises grâce à Gutiérrez et al (2003) et à Delgado Gómez et al (2003);

- « Gouvernement » : participation du « Bureau » ou de la UMATA, dans le Conseil de gouvernement municipal. Données acquises grâce à Gutiérrez et al (2003) et à Delgado Gómez et al (2003);
- « But » : existence d'objectifs « clairs » en termes de protection de la forêt, compte tenu du développement touristique et agricole envisagé. Données acquises grâce à Gutiérrez et al (2003), à Delgado Gómez et al (2003) et à Contraloría General de Antioquia (2000 et 2004);
- « Politiques » : existence d'actions précises du gouvernement municipal pour le reboisement. Données acquises grâce à Gutiérrez et al (2003), à Delgado Gómez et al (2003) et à Contraloría General de Antioquia (2000 et 2004);
- « Instruments » : disponibilité du Plan Environnemental Municipal (PAM). Données acquises grâce à Contraloría General de Antioquia (2000 et 2004);
- « Formation » : mise en œuvre de programmes de formation de fonctionnaires, financés par la Corporation Autonome Régionale du Centre d'Antioquia (CORANTIOQUIA) entre 1995 et 1999. Données acquises grâce à CORANTIOQUIA (2005);
- « Projet 1 » : projets mis en œuvre entre 1995 et 1999 sur le programme Aires protégées (district du SPANA), financés par la CORANTIOQUIA. Données acquises grâce à CORANTIOQUIA (2005);
- « Projet 2 » : projets de protection de bassins versants tributaires des aqueducs municipaux, financés par les municipalités. Données acquises grâce à Contraloría General de Antioquia (2000 et 2004);

_

³⁰ La UMATA est le bureau municipal responsable du soutien professionnel aux activités agroalimentaires. Suite à la loi 99 de 1993 (nommée loi environnementale), l'environnement lui a été imposé en tant que domaine supplémentaire d'intervention au sein de la municipalité.

- « Projet 3 » : projets de reboisement, financés par les municipalités. Données acquises grâce à Contraloría General de Antioquia (2000 et 2004).

Ces paramètres sont codés de manière booléenne : zéro (0) pour les réponses négatives et un (1) pour les réponses affirmatives. En absence d'information (AF) une réponse négative est adoptée, prenant la valeur zéro (0) pour le calcul. La valeur choisie pour AF est un jugement conservateur dans la mesure où l'absence d'information n'est pas seulement la conséquence d'une omission de la part des municipalités, mais aussi de l'impossibilité de la fournir (cf. 4.2.2). La GEM est ensuite calculée pour chaque municipalité par la somme de tous les paramètres en 2000 et 2004 (cf. Tableau 4.2).

Tableau 4.2 Estimation de la Gestion Environnementale Municipale (GEM)

GEM 2000

Municipalites	Bureau	Gouvernement	But	Politiques	Instruments	Formation	Projets 1	Projets 2	Projets 3	Total
Sabanalarga	AF	1	AF	1	0	1	0	1	0	4
Liborina	0	1	1	1	1	0	0	1	1	6
Olaya	0	AF	1	1	0	0	0	1	1	4
Sopetrán	AF	1	AF	1	0	0	0	1	1	4
San Jerónimo	1	AF	1	1	1	1	0	1	0	6
San Andrés de	0	AF	0	1	1	0	1	1	1	5
Cuerquia										
San José de la	0	1	0	1	AF	0	1	1	1	5
Montaña										
Belmira	0	1	AF	1	0	1	1	1	1	6
Entrerríos	0	0	1	1	0	0	0	1	1	4
San Pedro de los	1	1	1	1	0	1	0	1	1	7
Milagros										

AF: Absence d'information

GEM 2004

Municipalités	Bureau	Gouvernement	But	Politiques	Instruments	Formation	Projets 1	Projets 2	Projets 3	Total
Sabanalarga	AF	1	1	1	1	1	0	0	0	5
Liborina	0	1	1	1	1	0	0	AF	AF	4
Olaya	0	AF	1	1	0	0	0	0	0	2
Sopetrán	AF	1	1	1	0	0	0	0	0	3
San Jerónimo	1	AF	1	1	1	1	0	1	1	7
San Andrés de	0	AF	1	1	1	0	1	1	1	6
Cuerquia										
San José de la	0	1	1	1	AF	0	1	1	1	5
Montaña										
Belmira	0	1	1	1	AF	1	1	AF	AF	5
Entrerríos	0	0	1	1	0	0	0	1	1	4
San Pedro de los Milagros	1	1	1	1	0	1	0	0	0	5

AF: Absence d'information

Conception : J. A. Polanco López de Mesa, 2007

Toutes les municipalités ont ainsi une notation hiérarchique qui détermine le gradient du critère de gestion environnementale municipale (*cf.* Figure 4.6) : plus la notation est élevée, plus la GEM est considérée comme performante. Par exemple, San Pedro de los Milagros en 2000 et San Jerónimo en 2004 sont les municipalités ayant la « meilleure » GEM. Au contraire, Olaya est la municipalité la moins « performante » pour les deux dates en terme de GEM.

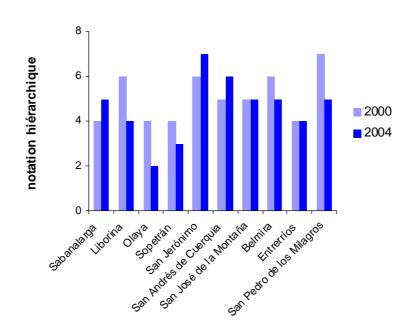


Figure 4.6 Critère de gestion environnementale municipale (GEM)

Conception : J. A. Polanco López de Mesa, 2007

Finalement, tous les critères sont mis en relation en représentant le « développement économique » à l'aide des critères de « dynamique de la forêt », de « démographie » et d'impact de la « force centripète » d'une part, et la « protection dans le district » à l'aide des critères sur l'« effort » de protection, d'autre part. Les relations entre les critères définissent les objectifs de l'analyse.

4.1.2 Formulation des objectifs par deux approches complémentaires

Les objectifs sont définis par des relations statistiques entre les critères. L'analyse factorielle en composantes principales et la classification hiérarchique de Ward sont les deux méthodes complémentaires utilisées pour étudier ces relations : la classification aide à compléter et à nuancer les résultats issus de l'analyse factorielle. L'analyse en composantes principales normée (ACP) synthétise la représentation des données en les projetant dans des espaces à plus faible dimension, mais cette vue d'ensemble de l'information est difficile à interpréter au-delà du plan principal. La classification hiérarchique va compléter l'analyse par ACP en tenant compte de tous les critères.

4.1.2.1 Première approche : le plan factoriel principal

La corrélation linéaire entre les critères de l'analyse spatiale est représentée par la matrice des corrélations (*cf.* Annexe 2.1). Sa lecture nous donne une première idée des relations entre ces critères (variables). Dans l'analyse factorielle en composantes principales (ACP), le pourcentage de variance d'un facteur définit son pouvoir explicatif de l'information considérée. Mais l'appréciation de ce pourcentage de variance doit tenir compte du nombre de variables : 10% de variance peut être considéré faible pour un facteur si le tableau possède environ 10 variables, et important si le tableau en a 100 (Lebart *et al*, 1998). Notre étude comprend 24 variables, donc le pouvoir explicatif des facteurs se concentre notamment sur le plan factoriel principal : 55.75% de notre information est résumée par les deux premiers axes factoriels. Au-delà du plan factoriel principal, l'interprétation de l'ACP est délicate.

Les coordonnées des critères d'analyse sur les axes factoriels traduisent les relations de ces critères avec chaque facteur : les critères « fortement » corrélés contribuent à la définition des axes factoriels. La lecture du plan factoriel principal est donc faite en tenant compte des critères fortement corrélés. Nous considérons dans cette étude une corrélation forte entre un critère et un facteur lorsque la coordonnée du critère sur l'axe factoriel est supérieure à 0.6 ou inférieure à -0.6. Les critères dont la coordonnée sur un axe factoriel est positive et supérieur à 0.6 peuvent être liés entre eux, ainsi que les critères dont la

coordonnée sur cet axe factoriel est inférieure à -0.6. Ces deux familles de critères sont opposées sur cet axe.

Les corrélations entre critères selon les deux premiers axes factoriels sont les suivantes (*cf.* Figure 4.7) :

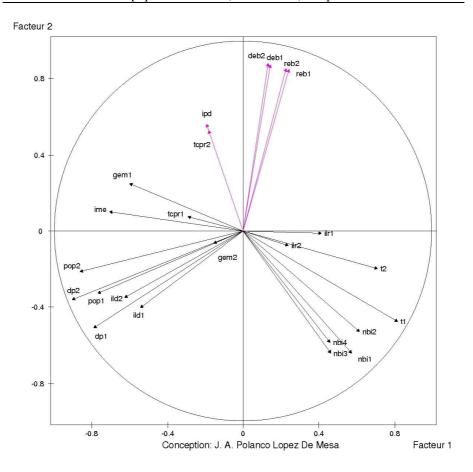
- Facteur 1. Critères dont la coordonnée est supérieure à 0.6 : les densités de population (dp1 et dp2), la population municipale totale (pop1 et pop2), l'indice local de déboisement (ild2) et l'investissement municipal environnemental (ime). Critères dont la coordonnée est inférieure à -0.6 : besoins de base total non satisfaits (nbi2) et distance municipale à Medellín (t1 et t2);
- Facteur 2. Critère dont la coordonnée est supérieure à 0.6 : besoins de base non satisfaits (nbi1 et nbi3). Critères dont la coordonnée est inférieure à -0.6 : déboisement (deb1 et deb2) et reboisement (reb1 et reb2).

Le premier axe factoriel oppose les critères de « démographie » (densité de population – DP- et population totale –POP-) et de « dynamique de la forêt » (indice local de déboisement –ILD-), aux critères d'impact de la « force centripète » (pauvreté –NBI- et distance –T-). Les critères de « démographie » sont donc corrélés positivement avec celui de « dynamique de la forêt », et les critères d'impact de la « force centripète » sont corrélés positivement entre eux. Mais ces deux paires de critères d'analyse (ILD-DP-POP et NBI-T) ont une corrélation négative entre elles. Le deuxième axe factoriel oppose les critères déboisement (ou reboisement) au critère pauvreté. Ces derniers critères ont donc une corrélation négative.

Ces corrélations restent néanmoins floues car quelques-unes demeurent faibles et d'autres critères n'ont pas pu être corrélés, comme par exemple les critères *taux de croissance de la population rurale* et *gestion environnementale municipale*. La classification hiérarchique (de type Ward) de tous les critères peut alors contribuer à la mise en évidence des corrélations recherchées.

Figure 4.7 Coordonnées des critères d'analyse sur le plan factoriel principal

		Fact	eurs
Critère d'analyse		1	2
Déboisement (1989 – 1996)	deb1	-0.142	-0.874
Déboisement (1989 – 2003)	deb2	-0.131	-0.882
Densité de population (1993)	dp1	0.789	0.509
Densité de population (2005)	dp2	0.904	0.362
Gestion environnementale municipale en 2000	gem1	0.599	-0.251
Gestion environnementale municipale en 2004	gem2	0.157	0.064
Indice local de déboisement (1989 – 1996)	ild1	0.544	0.401
Indice local de déboisement (1989 – 2003)	ild2	0.628	0.350
Indice local de reboisement (1989 – 1996)	ilr1	-0.415	0.013
Indice local de reboisement (1989 – 2003)	ilr2	-0.240	0.075
Investissement municipal environnemental	ime	0.705	-0.101
Investissement public décentralisé	ipd	0.192	-0.561
Besoin de base total non satisfait (1993)	nbi1	-0.574	0.640
Besoin de base total non satisfait (2005)	nbi2	-0.613	0.526
Besoin de base rural non satisfait (1993)	nbi3	-0.464	0.641
Besoin de base rural non satisfait (2005)	nbi4	-0.458	0.583
Population municipale totale (1993)	pop1	0.766	0.328
Population municipale totale (2005)	pop2	0.861	0.214
Reboisement (1989 – 1996)	reb1	-0.244	-0.851
Reboisement (1989 – 2003)	reb2	-0.229	-0.853
Distance municipale à Medellín	t1	-0.816	0.476
Distance municipale à Medellín (tunnel)	t2	-0.711	0.198
Taux de croissance de population rurale (1985 – 1993)	tcpr1	0.292	-0.076
Taux de croissance de population rurale (1993 – 2005)	tcpr2	0.183	-0.527



4.1.2.2 Deuxième approche : la classification hiérarchique des critères

Cette méthode procède à l'agrégation des critères sur le principe de la variance minimale. Le résultat est visualisé sous forme de dendrogramme ou d'arbre hiérarchique (agglomération progressive des éléments deux à deux), dont la lecture se fait dans l'ordre des distances croissantes. Les critères d'analyse (variables) se regroupent deux à deux à chaque étape du processus et un coefficient de « distance » (indice de niveau) permet d'estimer le moment du regroupement. Plus vite deux variables se regroupent (indice de niveau bas), plus elles sont corrélées (cf. Figure 4.8).

Le processus de regroupement est analysé visuellement sur le dendrogramme en deux temps. D'abord, quelques variables se regroupent en huit classes dont la variance est minimale et d'autres restent isolées :

- Classe 1 : déboisement (DEB1 et DEB2) et reboisement (REB1 et REB2) ;
- Classe 2 : investissement municipal environnemental (IME) et investissement public décentralisé (IPD)
- Classe 3 : population totale (POP1 et POP2) et densité de population (DP1 et DP2) ;
- Classe 4 : *indice local de déboisement (ILD1 et ILD2)* ;
- Classe 5 : gestion environnementale municipale (GEM1 et GEM2) ;
- Classe 6: besoins de base non satisfaits (NBI1, NBI2, NBI3 et NBI4);
- Classe 7: indice local de reboisement (ILR1 et ILR2);
- Classe 8 : *distance* à Medellín (T1 et T2) ;
- Variables isolées : taux de croissance de population rurale (TCPR1 et TCPR2).

Ensuite, les variables restées isolées dans la première phase du processus, se regroupent avec les classes. Les classes 3 et 4, ainsi que les classes 7 et 8 se regroupent entre elles formant deux nouvelles classes. Nous avons ainsi six nouvelles classes :

- Classe A : c'est la classe 1 de la phase précédente ;
- Classe B : investissement municipal environnemental (IME), investissement public décentralisé (IPD) et taux de croissance de population rurale (TCPR2) ;
- Classe C : elle est formée par les classes 3 et 4 de la phase précédente ;

- Classe D: gestion environnementale municipale (GEM1 et GEM2) et taux de croissance de population rurale (TCPR1);
- Classe E : elle est formée par la classe 6 de la phase précédente ;
- Classe F : elle est formée par les classes 7 et 8 de la phase précédente.

Nous choisissons cette deuxième phase de la classification afin de définir les objectifs de l'analyse spatiale multicritère, parce que nous y trouvons les corrélations recherchées entre les critères. Les objectifs sont définis par les classes (ou groupes) issues de la classification hiérarchique de Ward et par leurs oppositions dans le plan factoriel principal.

Le premier objectif veut représenter le « développement économique », en tenant compte des corrélations entre les critères de « dynamique de la forêt », « démographie » et impact de la « force centripète » de la vallée d'Aburrá. La formulation de cet objectif s'inspire des corrélations positives des critères (classification de Ward) à l'intérieur des classes A, C, E et F. Puis, cet objectif s'inspire des corrélations négatives ou oppositions (plan factoriel principal) entre les critères des classes C et celles des classes E et F respectivement, ainsi que des corrélations négatives entre les critères des classes A et E. Néanmoins, la participation du critère *taux de croissance de population rurale* dans cette lecture du développement peut être incertaine car il n'appartient pas aux classes évoquées (cf. 4.2.2).

Le deuxième objectif veut représenter la « protection dans le district » en considérant la corrélation entre les critères investissement public décentralisé (IPD); investissement municipal environnemental (IME) et le critère gestion environnementale municipale (GEM_1 et GEM_2). Les critères d'investissements sont très proches (classe 2), ainsi que celles de gestion environnementale municipale (classe 5). Ces deux classes ont une corrélation positive sur le premier axe factoriel : c'est notamment le cas des critères investissement municipal environnemental (IME) et gestion environnementale municipale (GEM_1).

Figure 4.8 Dendrogramme

Indice de niveau	0	5	10	15	20	25
Variable	+	-+	+	+	+	+
DEB1	-+					
DEB2	-+	+				
REB1	-+	I				
REB2	-+	+			+	
IME	+	I			I	
IPD	+ +	+			I	
TCPR2	+				I	
POP1	-+				+	+
1012	-++				I	I
DP1	-+ +	+			I	I
DP2	-+ I	I			I	I
1201	+	+			+	I
1100	+	I				I
GEM1	+	I				I
GEM2	+ +	+				I
TCPR1	+					I
11011	-+					I
NBI3	-+	+				I
NBI2	-+	I				I
NBI4	-+	+				+
ILR1	-++	I				
ILR2	-+ +	+				
	-++					
T2	-+					

Légende :

DEB1: Déboisement (1989 – 1996)
DEB2: Déboisement (1989 – 2003)
DP1: Densité de population (1993)
DP2: Densité de population (2005)

GEM1: Gestion environnementale municipale en 2000 GEM2: Gestion environnementale municipale en 2004 ILD1: Indice local de déboisement (1989 – 1996) ILD2: Indice local de déboisement (1989 – 2003) ILR1: Indice local de reboisement (1989 – 1996) ILR2: Indice local de reboisement (1989 – 2003) IME: Investissement municipal environnemental

IME: Investissement municipal environnemental IPD: Investissement public décentralisé
NBI1: Besoin de base total non satisfait (1993)
NBI2: Besoin de base total non satisfait (2005)
NBI3: Besoin de base rural non satisfait (1993)
NBI4: Besoin de base rural non satisfait (2005)
POP1: Population municipale totale (1993)
POP2: Population municipale totale (2005)

REB1: Reboisement (1989 – 1996) REB2: Reboisement (1989 – 2003) T1: Distance municipale à Medellín

T2: Distance municipale à Medellín (tunnel)

TCPR1: Taux de croissance de population rurale (1985 – 1993) TCPR2: Taux de croissance de population rurale (1993 – 2005)

Indice de niveau : « distance » entre variables ; indicateur de leur corrélation linéaire

Conception: J. A. Polanco López de Mesa, 2007

4.2 Scénarios et incertitude

Notre approche du « développement économique » et de la « protection dans le district » est réalisée dans l'espace-temps par le biais de scénarios dont l'incertitude peut être réduite. Les scénarios sont construits en hiérarchisant les municipalités, à partir des classes formées par les fonctions d'agrégation des lignes (fonction f) et des colonnes (fonction g) du tableau de type variables (critères) – individus (municipalités) (cf. Figure 4.1). Ces deux fonctions d'agrégation tiennent compte des critères selon les deux objectifs de notre analyse. La fonction f est une classification hiérarchique, alors que la fonction g est une « règle de décision » basée sur la corrélation des critères.

L'incertitude des scénarios est liée au processus de classification des municipalités selon les deux fonctions d'agrégation. En ce qui concerne la fonction f, l'incertitude a été réduite sur la base de données et sur la contribution des critères à la classification. Quant à la fonction g, l'incertitude a été réduite en tenant compte d'une « caractérisation » des moyennes des classes.

Les perspectives spatio-temporelles de ces deux objectifs sont déterminées en proposant trois scénarios.

4.2.1 Perspectives spatio-temporelles des objectifs par scénarios

Les trois perspectives proposées mettent en évidence le « développement économique » (scénario 1), la « protection dans le district » (scénario 2) et la relation entre le développement et la protection (scénario 3). La dimension spatiale de ces scénarios tient à la variabilité de l'influence des critères d'une municipalité à l'autre, c'est-à-dire à la distribution des gradients dans l'espace géographique des municipalités. La dimension temporelle concerne le changement de cette organisation de l'espace entre deux dates ou périodes données. La manière dont ces trois scénarios ont été construits est présentée cidessous. La discussion des scénarios dans le contexte de la gouvernance du district est toutefois reportée à la troisième partie de ce document.

4.2.1.1 Scénario 1

Le premier scénario représente le changement spatio-temporel du « développement économique » (objectif 1). La dimension spatiale est définie par l'organisation des gradients dans l'espace géographique des municipalités ; ces gradients étant sélectionnés en tenant compte des corrélations entre les critères du premier objectif. La dimension temporelle concerne deux périodes définies en fonction de la « dynamique de la forêt » et du recensement de la population. La première période concerne la « dynamique de la forêt », estimée entre 1989 et 1996, et le recensement effectué en 1993. La deuxième période concerne la « dynamique de la forêt », estimée entre 1989 et 2003, et le recensement effectué en 2005.

Les municipalités sont hiérarchisées selon dix combinaisons de critères, compte tenu des corrélations (cf. Tableau 4.3). Ces critères sont relatifs à la « dynamique de la forêt », à la « démographie » et à l'impact de la « force centripète » de la vallée d'Aburrá. Chaque combinaison est vue comme l'organisation spatiale du « développement économique », selon un ensemble précis de critères corrélés et une période donnée. Les quatre premières combinaisons déterminent les organisations spatiales du « développement économique » pour la première période, puis les quatre suivantes celles pour la deuxième période. Les deux dernières combinaisons définissent l'organisation spatiale du « développement économique » dans le cas du tunnel. Pour chaque organisation spatiale, les municipalités sont classées en un certain nombre de groupes, puis les moyennes des groupes sont hiérarchisées par critère selon leur ordre de grandeur. Chaque municipalité appartenant à une classe est donc caractérisée par le niveau hiérarchique de la valeur moyenne des critères dans cette classe.

Une perspective spatio-temporelle du développement est obtenue en comparant deux organisations spatiales associées à des périodes différentes. C'est-à-dire que le changement de l'organisation spatiale du « développement économique » est observé dans le temps, en tenant compte des tendances à la hausse ou à la baisse du niveau hiérarchique des moyennes des groupes. En effet, une vue d'ensemble est obtenue par le biais du changement entre les deux périodes de la hiérarchie des municipalités selon tous les critères sélectionnés.

Tableau 4.3 Perspectives spatio-temporelles du « développement économique »

Les perspectives spatio-temporelles sont définies par la comparaison de deux combinaisons. Les critères « non corrélés » statistiquement ne font pas partie des combinaisons.

Combinaison	Dynamique de la forêt	Démographie	Besoins de base non satisfaits	Distance à Medellín
1	ILD1	DP1; TCPR1	NBI3	T1
2	ILR1	DP1; TCPR1	NBI3	T1
3	DEB1	non corrélé	NBI1	non corrélé
4	REB1	non corrélé	NBI1	non corrélé
5	ILD2	DP2; TCPR2	NBI4	T1
6	ILR2	DP2; TCPR2	NBI4	T1
7	DEB2	non corrélé	NBI2	non corrélé
8	REB2	non corrélé	NBI2	non corrélé
9	ILD2	DP2; TCPR2	NBI4	T2
10	ILR2	DP2; TCPR2	NBI4	T2

Conception : J. A. Polanco López de Mesa, 2007

Dans les organisations spatiales du « développement économique » déterminées par les combinaisons 1 et 5 par exemple (*cf.* Tableau 4.4), les municipalités sont classées en cinq et trois groupes respectivement, compte tenu de l'incertitude (*cf.* 4.2.2). Le niveau hiérarchique de la valeur moyenne des critères dans chaque classe est ensuite défini, selon le nombre de classes retenu et sans tenir compte des municipalités « isolées ». Une municipalité est « isolée » lorsque les valeurs des critères sont très basses ou très élevées par rapport à l'ensemble des municipalités (moyenne totale).

Pour la combinaison 1, comme les municipalités non isolées forment trois classes (1, 2 et 4), les moyennes des groupes ont trois valeurs : basse, moyenne ou élevée. Pour la combinaison 5, où on a deux classes de municipalités non isolées (1 et 2), les moyennes auront deux valeurs : basse ou élevée. Quant aux municipalités « isolées », la valeur des critères est hiérarchisée par rapport à la moyenne totale, prenant ainsi deux valeurs : inférieure (basse) ou supérieure (élevée). L'organisation spatiale est alors établie pour chaque combinaison en situant, dans l'espace géographique des municipalités, les niveaux hiérarchiques des moyennes des critères.

Il existe aussi une autre corrélation entre les critères. Les municipalités ayant une moyenne élevée du critère *besoins de base non satisfaits au niveau rural* (NBI) sont celles qui ont une moyenne élevée du critère *distance* (T₁) et sont donc les plus éloignées de la ville de Medellín. Par contre, les municipalités les plus « riches » (NBI : moyenne basse) sont celles situées près de la ville (T1 : moyenne basse). Cette corrélation positive entre les moyennes des critères NBI et T se traduit par l'impact de la « force centripète » de la ville

sur les municipalités étudiées : l'impact de la « force centripète » est élevé lorsque les moyennes des critères NBI et T sont basses.

D'autre part, les municipalités dont la moyenne est élevée ou moyenne sur le critère *indice local de déboisement* (ILD), sont aussi celles dont la moyenne du critère *densité de population* (DP) est élevée ou moyenne (les plus peuplées), mais pas toujours celles dont la moyenne du critère *taux de croissance de la population rural* (TCPR) est élevée. En effet, les moyennes groupales de ces trois critères (ILD, DP et TCPR) ne sont directement proportionnelles que dans le cas de la combinaison 5, où la « pression de la population sur la forêt » est élevée lorsque les moyennes des critères ILD, DP et TCPR sont élevées.

Ces deux cas (« force centripète » et « pression de la population sur la forêt ») ne s'opposent que dans le cas de la combinaison 5 : les municipalités où la « pression de la population sur la forêt » est élevée (ILD élevé + DP élevé + TCPR élevé), sont aussi celles où l'impact de la « force centripète » est élevé.

En comparant deux organisations spatiales compatibles, nous obtenons une perspective spatio-temporelle du « développement économique ». Deux organisations spatiales sont compatibles lorsqu'elles sont issues de la même combinaison pour deux périodes différentes. Plusieurs comparaisons ont été effectuées afin d'identifier le changement du niveau hiérarchique des moyennes en termes de tendance. La perspective spatio-temporelle du « développement économique » est donc constituée par les tendances à la hausse ou à la baisse des niveaux hiérarchiques des moyennes dans l'espace géographique des municipalités.

Deux types de comparaisons sont étudiés afin de connaître les modifications de l'organisation spatiale du « développement économique » (cf. Annexe 2.2.1) : l'une considère le « développement économique » sans l'effet du tunnel, l'autre avec l'effet du tunnel.

a. « Développement économique » sans l'effet du tunnel

Quatre comparaisons ont été effectuées : combinaisons 1 et 5 ; 2 et 6 ; 3 et 7 ; 4 et 8. Reprenant l'exemple des combinaisons 1 et 5, le niveau hiérarchique des moyennes des critères indice local de déboisement, densité de population et taux de croissance de population rural augmente (ou reste toujours élevé), dans les municipalités où le niveau hiérarchique du critère besoins de base non satisfait diminue (ou reste toujours bas). Au contraire, le niveau hiérarchique des moyennes groupales des critères indice local de déboisement, densité de population et taux de croissance de population rural diminue, dans les municipalités où le niveau des moyennes du critère besoins de base non satisfaits augmente (ou reste toujours élevé). C'est-à-dire que la « pression de la population sur la forêt » s'intensifie (ou reste toujours élevée), dans les municipalité où l'impact de la « force centripète » augmente et vice-versa.

b. « Développement économique » sous l'effet du tunnel

Deux comparaisons ont été effectuées afin d'identifier le changement de l'organisation spatiale du « développement économique » dans le cas de la mise en service du nouveau tunnel : combinaisons 5 et 9 ; 6 et 10. Dans ce dernier cas, les critères de « dynamique de la forêt » et « démographie », ainsi que le critère *pauvreté* (NBI) ont été supposés constants pour la dernière période, mais le critère distance a été modifié compte tenu du tunnel d'Occidente. Pour la comparaison des combinaisons 5 et 9 par exemple, le niveau hiérarchique de la moyenne du critère distance (T) augmente, dans les municipalités où le niveau des moyennes groupales des critères indice local de déboisement (IPD), densité de population (DP) et taux de croissance de population rural (TCPR) diminue. Par contre, le niveau hiérarchique de la moyenne du critère distance (T) diminue (ou reste toujours bas), dans les municipalités où le niveau des moyennes des critères IPD, DP et TCPR augmente (ou reste toujours élevé). C'est-à-dire que la mise en service du tunnel pourrait se traduire par l'intensification de la « pression de la population sur la forêt », dans les municipalités proches de Medellín, et par l'affaiblissement de cette « pression » dans les municipalités lointaines. Aucun jugement sur le critère pauvreté (NBI) n'est mis en avant, parce qu'il est peu probable que ce critère contribue à la perspective spatio-temporelle du « développement économique » dans le cas du tunnel (cf. 4.2.2).

Il n'y a pas toujours de corrélation entre les moyennes dans le cas des municipalités « isolées ». L'interprétation des organisations spatiales et des perspectives spatiotemporelles du « développement économique » y est délicate, car les moyennes sont hiérarchisées par rapport à la moyenne totale (*cf.* chapitre 5).

Dans ce premier scénario, nous avons présenté la démarche sur un exemple précis afin de montrer comment les corrélations entre les critères du « développement économique » peuvent se traduire dans l'espace géographique, tout en permettant de hiérarchiser les municipalités. Dans le cas de la « protection dans le district » (scénario 2), la démarche est présentée, en considérant tous les critères d'analyse.

Tableau 4.4 Organisations spatiales de « développement économique »

Combinaison 1

Municipalités	Classes	ILD1 (89 - 96)	DP1 (1993)	TCPR1 (85 – 93)	NBI3 (1993 : rural)	T1
Sabanalarga	1	élevé	moyenne	moyen	élevé	élevée
Liborina	2	moyen	élevée	bas	moyen	moyenne
Olaya	2	moyen	élevée	bas	moyen	moyenne
Sopetrán	2	moyen	élevée	bas	moyen	moyenne
San Jerónimo	2	moyen	élevée	bas	moyen	moyenne
San Andrés de Cuerquia	1	élevé	moyenne	moyen	élevé	élevée
San José de la Montaña	3	bas (isolée)	basse (isolée)	élevé (isolée)	bas (isolée)	élevée (isolée)
Belmira	4	bas	basse	élevé	bas	basse
Entrerríos	4	bas	basse	élevé	bas	basse
San Pedro de los Milagros	5	élevé (isolée)	élevée (isolée)	élevé (isolée)	bas (isolée)	basse (isolée)

Combinaison 5

Municipalités	Classes	ILD2 (89 - 02/03)	DP2 (2005)	TCPR (93 - 05)	NBI4 (2004 : rural)	T1
Sabanalarga	1	bas	bas	bas	élevé	élevé
Liborina	2	élevé	élevé	élevé	bas	bas
Olaya	2	élevé	élevé	élevé	bas	bas
Sopetrán	2	élevé	élevé	élevé	bas	bas
San Jerónimo	2	élevé	élevé	élevé	bas	bas
San Andrés de Cuerquia	1	bas	bas	bas	élevé	élevé
San José de la Montaña	2	élevé	élevé	élevé	bas	bas
Belmira	2	élevé	élevé	élevé	bas	bas
Entrerríos	2	élevé	élevé	élevé	bas	bas
San Pedro de los Milagros	3	élevé (isolée)	élevé (isolée)	élevé (isolée)	bas (isolée)	bas (isolée)

Combinaison 9

Municipalités	Classes	ILD2 (89 - 02/03)	DP2 (2005)	TCPR (93 - 05)	NBI4 (2004 : rural)	T2 (tunnel)
Sabanalarga	1	moyen	moyen	bas	élevé	élevé
Liborina	2	bas	bas	moyen	bas	moyen
Olaya	3	élevé	élevé	élevé	moyen	bas
Sopetrán	3	élevé	élevé	élevé	moyen	bas
San Jerónimo	3	élevé	élevé	élevé	moyen	bas
San Andrés de Cuerquia	1	moyen	moyen	bas	élevé	élevé
San José de la Montaña	2	bas	bas	moyen	bas	moyen
Belmira	2	bas	bas	moyen	bas	moyen
Entrerríos	2	bas	bas	moyen	bas	moyen
San Pedro de los Milagros	4	élevé (isolée)	élevé (isolée)	élevé (isolée)	bas (isolée)	bas (isolée)

Conception : J. A. Polanco López de Mesa, 2007

4.2.1.2 Scénario 2

Le deuxième scénario représente le changement spatio-temporel de la « protection dans le district » (objectif 2). La dimension spatiale est définie par l'espace géographique des municipalités. La dimension temporelle est définie par les années 2000 et 2004, en supposant que les moyennes annuelles des critères *investissement public décentralisé* (IPD : 1995 – 1999) et *investissement municipal environnemental* (IME : 2000 – 2006) sont constantes. Les municipalités sont hiérarchisées selon deux combinaisons différentes de critères : l'une pour les critères d'investissements (IPD et IME) et l'autre pour le critère gestion environnementale municipale (GEM1 et GEM2). Ces deux combinaisons ont été différentiées car leur corrélation est faible.

La classification hiérarchique par les critères d'investissements, se traduit par un regroupement des municipalités en trois classes, dont une municipalité « isolée » : les moyennes ont donc deux valeurs : élevée ou basse. Quant au critère *gestion environnementale municipale*, les municipalités sont affectées à quatre classes, dont une municipalité « isolée » : les moyennes prennent donc trois valeurs (élevée, moyenne ou basse) (cf. Tableau 4.5).

Les niveaux hiérarchiques des moyennes des critères d'investissements sur l'environnement (IPD et IME) ont une corrélation positive : les municipalités dont la moyenne du critère investissement public décentralisé prend une valeur basse sont aussi celles dont la moyenne du critère investissement municipal environnemental est basse. C'est le cas, par exemple, des municipalités de Liborina, Olaya, San Andrés de Cuerquia et San José de la Montaña. Au contraire, les municipalités dont la moyenne du critère investissement public décentralisé prend une valeur élevée, sont aussi celles dont la moyenne du critère investissement municipal environnemental est élevée. C'est le cas, par exemple, des municipalités de Sabanalarga, Sopetran et Entrerríos. Belmira et San Pedro de los Milagros sont considérées comme des municipalités « isolées » car elles bénéficient d'une valeur des deux critères d'investissements considérablement plus élevée que les autres municipalités.

Le niveau hiérarchique des moyennes du critère *gestion environnementale municipale* montre à la fois une « amélioration » (tendance à la hausse) et une « détérioration » (tendance à la baisse) de cette gestion entre 2000 et 2004. Par exemple, la gestion s'est « améliorée » dans les municipalités de Sabanalarga, San Andrés de Cuerquia et San José de la Montaña, alors qu'elle s'est « détériorée » à Liborina, Belmira et San Pedro de los Milagros. Le niveau hiérarchique de la moyenne du critère *gestion environnementale municipale* est considéré stable mais bas entre ces deux dates dans les municipalités de Olaya, Sopetrán et Entrerríos. La municipalité de San Jerónimo est considérée comme « isolée », parce qu'elle a une valeur du critère *gestion environnementale municipale* considérablement plus élevée que les autres municipalités à ces deux dates.

Tableau 4.5 Organisations spatiales des investissements et de la gestion municipale

Municipalités	Classes	IPD (1995 – 1999)	<i>IME</i> (2000 – 2006)	Classes	GEM1 (2000)	GEM2 (2004)
Sabanalarga	1	élevé	élevé	1	moyenne	élevée
Liborina	2	bas	bas	2	élevée	moyenne
Olaya	2	bas	bas	3	basse	basse
Sopetrán	1	élevé	élevé	3	basse	basse
San Jerónimo	2	bas	bas	4	élevée (isolée)	élevée (isolée)
San Andrés de Cuerquia	2	bas	bas	1	moyenne	élevée
San José de la Montaña	2	bas	bas	1	moyenne	élevée
Belmira	3	élevé (isolée)	élevé (isolée)	2	élevée	moyenne
Entrerríos	1	élevé	élevé	3	basse	basse
San Pedro de los Milagros	4	élevé (isolée)	élevé (isolée)	2	élevée	moyenne

Conception: J. A. Polanco López de Mesa, 2007

La comparaison des organisations spatiales des critères d'investissements et de la gestion municipale détermine l'organisation spatiale de la « protection dans le district » pour les deux dates, selon la règle de décision suivante (*cf.* Tableau 4.6) :

- Protection élevée = investissement (IPD et IME) élevé + gestion (GEM) élevée ;
- Protection basse = investissement (IPD et IME) bas + gestion (GEM) basse ;
- Protection moyenne = investissement (IPD et IME) moyen + gestion (GEM) moyenne (ou niveau investissement ≠ niveau gestion).

Dans cette règle de décision, nous supposons que la « protection dans le district » a une corrélation positive avec les critères d'investissements (IPD et IME) et de gestion (GEM). Cette hypothèse est basée sur la corrélation positive entre les critères d'investissements et de gestion, qui existe dans le cas des critères IME et GEM₁ mais qui est faible sur le premier axe factoriel. D'après cette règle, un niveau élevé d'investissements et de gestion

se traduit par un niveau élevé de « protection dans le district » et, au contraire, un niveau bas d'investissements et de gestion se traduit par un niveau bas de « protection dans le district ».

Les critères d'investissements et de gestion sont aussi supposés complémentaires. Si leurs niveaux hiérarchiques des moyennes sont moyens ou ne sont pas les mêmes, alors le niveau de « protection dans le district » est considéré moyen. C'est ainsi que l'organisation spatiale de la « protection dans le district » en 2000 par exemple, met en évidence un niveau bas de « protection dans le district » à Olaya et un niveau élevé à Belmira et San Pedro de los Milagros, alors que le niveau de « protection dans le district » des autres municipalités est considéré moyen.

La perspective spatio-temporelle de la « protection dans le district » est enfin déterminée en comparant les dates de 2000 et de 2004. Les tendances à la hausse ou à la baisse du niveau hiérarchique des moyennes définissent respectivement l'« amélioration » ou la « détérioration » de la « protection dans le district » entre ces deux dates. Si aucun changement des moyennes n'est observé, la « protection dans le district » est considérée stable. Par exemple, la « protection dans le district » s'est « améliorée » entre 2000 et 2004 à Sabanalarga, alors qu'elle s'est « détériorée » à Belmira et San Pedro de los Milagros. Les autres municipalités présentent un niveau de « protection dans le district » stable entre ces deux dates. Le niveau de « protection dans le district » est stable mais bas à Olaya, alors qu'il est stable et moyen dans le reste des municipalités.

Tableau 4.6 Organisation spatiale de la « protection dans le district »

Municipalités	Protection (2000)	Protection (2004)
Sabanalarga	moyenne	élevée
Liborina	moyenne	moyenne
Olaya	basse	basse
Sopetrán	moyenne	moyenne
San Jerónimo	moyenne (isolée)	moyenne (isolée)
San Andrés de Cuerquia	moyenne	moyenne
San José de la Montaña	moyenne	moyenne
Belmira	élevée (isolée)	moyenne (isolée)
Entrerríos	moyenne	moyenne
San Pedro de los Milagros	élevée (isolée)	moyenne (isolée)

Conception : J. A. Polanco López de Mesa, 2007

Dans le scénario 3 ci-dessous, nous allons prendre l'exemple cité dans le premier scénario, afin de montrer comment le « développement économique » et la « protection dans le district » ont été comparés.

4.2.1.3 Scénario 3

Le troisième scénario représente le changement spatio-temporel de la relation entre les deux scénarios précédents. La dimension temporelle est aussi déterminée par les années 2000 et 2004, en supposant le « développement économique » constant : le changement temporel est notamment dû à l'« amélioration » ou à la « détérioration » du niveau de « protection dans le district » entre ces deux dates. La relation entre le « développement économique » et la « protection dans le district » se traduit par une « tension », que nous qualifions en comparant les niveaux des moyennes de l'un par rapport à l'autre. L'organisation de la « tension » entre le « développement économique » et la « protection dans le district » dans l'espace géographique des municipalités, constitue la dimension spatiale du scénario. Les tendances à la hausse ou à la baisse du niveau des moyennes de cette « tension » entre 2000 et 2004 déterminent la perspective spatio-temporelle du scénario.

En reprenant l'exemple du scénario 1, le « développement économique » peut se traduire par l'augmentation ou la diminution de la « pression de la population sur la forêt » (PPF). Il peut exister une « tension » entre cet impact du « développement économique » et la « protection dans le district », dont le niveau d'intensité varie selon la règle de décision suivante (*cf.* Tableau 4.7) :

- Tension élevée = PPF augmente + protection basse ;
- Tension moyenne = PPF augmente + protection moyenne;
- Tension basse = PPF augmente (diminue) + protection élevée (élevé, moyenne ou basse).

Le niveau de « tension » augmente au fur et à mesure que la « pression de la population sur la forêt » augmente et que la « protection dans le district » diminue. En ce qui concerne l'organisation spatiale de la « tension » en 2000 par exemple, la « pression de la population sur la forêt » augmente à Olaya et Entrerríos, mais le niveau de « tension » est considéré plus élevé dans la première que dans la deuxième, en raison de la différence du niveau de protection. Entrerríos protège « mieux » qu'Olaya et subit donc une « tension » plus faible

entre le « développement économique » et la « protection dans le district ». Lorsque le niveau de « pression de la population sur la forêt » diminue, la « tension » entre le « développement économique » et la « protection dans le district » est toujours considérée basse : c'est le cas des municipalités de Sabanalarga et San Andrés de Cuerquia.

Dans la perspective spatio-temporelle définie entre 2000 et 2004, la « tension » entre le « développement économique » et la « protection dans le district » augmente dans la municipalité de Belmira et San Pedro de los Milagros, en raison de la « détérioration » de la « protection dans le district ». Ce jugement est toutefois délicat car ces municipalités sont considérées comme « isolées » dans les classifications issues des scénarios 1 et 2. Par ailleurs, la « tension » est considérée stable, mais :

- au niveau bas, pour les municipalités de Sabanalarga et San Andrés de Cuerquia ;
- au niveau moyen, pour Liborina, Sopetrán, San Jerónimo (« isolée »), San José de la Montaña (« isolée ») et Entrerríos ;
- et au niveau élevé, pour Olaya.

Ce scénario concerne aussi la comparaison de la « protection dans le district » avec deux autres perspectives spatio-temporelles du « développement économique » (cf. Annexe 2.2.2). La première est issue de la comparaison des combinaisons 3-7, incluant les critères déboisement et besoins de base non satisfaits. La deuxième est issue de la comparaison des combinaisons 5-9, intégrant l'influence du tunnel d'Occidente.

Tableau 4.7 Organisations spatiales de la « tension » entre « développement économique » et « protection dans le district », dans le cas de la « pression de la population sur la forêt »

Municipalités	Développement (PPF)	Protection (2000)	Protection (2004)	Tension (2000)	Tension (2004)
Sabanalarga	diminue	moyenne	élevée	basse	basse
Liborina	augmente	moyenne	moyenne	moyenne	moyenne
Olaya	augmente	basse	basse	élevée	élevée
Sopetrán	augmente	moyenne	moyenne	moyenne	moyenne
San Jerónimo	augmente	moyenne (isolée)	moyenne (isolée)	moyenne (isolée)	moyenne (isolée)
San Andrés de Cuerquia	diminue	moyenne	moyenne	basse	basse
San José de la Montaña	augmente (isolée)	moyenne	moyenne	moyenne (isolée)	moyenne (isolée)
Belmira	augmente	élevée (isolée)	moyenne (isolée)	basse (isolée)	moyenne (isolée)
Entrerríos	augmente	moyenne	moyenne	moyenne	moyenne
San Pedro de los Milagros	augmente (isolée)	élevée (isolée)	moyenne (isolée)	basse (isolée)	moyenne (isolée)

Conception : J. A. Polanco López de Mesa, 2007

Les trois scénarios présentés ci-dessus permettent notamment de mettre en évidence des disparités municipales de « développement économique » et « protection dans le district », ainsi que de la « tension » entre ces deux phénomènes. Mais l'inconvénient est l'existence d'incertitudes liées à la simplification de la réalité et à la manière dont les municipalités ont été hiérarchisées. Nous pouvons cependant minimiser ces incertitudes.

4.2.2 Gestion de l'incertitude

L'incertitude dans notre approche multicritère du « développement économique » et de la « protection dans le district » est liée à la base de données et au choix des règles de décision. La gestion de l'incertitude de la base de données se rapporte à l'erreur de la mesure et au choix des critères (Fortheringham *et al*, 2000), alors que celle associée au choix des règles de décision concerne l'étude de la contribution des critères dans la classification (Eastman, 2001; Pardo et Ruiz, 2001). Nous avons fait plusieurs combinaisons de critères afin d'étudier une contribution supposée « faible » d'un ou quelques critères dans la hiérarchisation des municipalités. Ces combinaisons ont été construites après diverses modifications apportées au tableau initial (suppression de critères peu « fiables »), compte tenu des corrélations observées sur plan factoriel principal et sur la classification de Ward.

L'incertitude de la hiérarchisation des municipalités est réduite dans le cas où deux règles de décision compatibles donnent des résultats similaires, et la contribution des critères est testée. Deux règles de décision sont compatibles lorsqu'elles appartiennent à la même famille statistique : c'est le cas des classifications hiérarchiques de Ward et de la Distance Moyenne. Si les résultats des deux classifications sont similaires et la contribution des critères est maximisée, la hiérarchisation des municipalités peut être considérée certaine et la structure de la base de données stable.

4.2.2.1 L'incertitude de la base de données

La première source d'incertitude de la base de données concerne la mesure des critères reboisement (REB), distance (T) et gestion environnementale municipale (GEM). L'incertitude de la mesure du critère REB issu de la « dynamique de la forêt », provient de la carte officielle d'occupation du sol de 1989, faute d'autres sources d'information satellitale. Bien que les modes d'occupation du sol de la carte et des images satellitales sont corrélés, il n'est pas tout à fait certain qu'ils soient les mêmes : les modes d'occupation de la carte ont été identifiés par photo-interprétation de photographies aériennes puis cartographiés par le bureau d'agriculture du département d'Antioquia (CORANTIOQUIA, 2006a; Buriticá Mira, 2002), alors que ceux des images nous les avons obtenus par traitements basés sur la mesure radiométrique (télédétection). Un décalage entre les deux peut de ce fait exister.

Le calcul du critère *distance* (T₁ et T₂) peut être incertain, en raison des considérations suivantes. T₁ et T₂ sont mesurés en heures de parcours et calculés à partir d'estimations selon les caractéristiques du chemin emprunté. Ce temps de parcours dépend de la distance en kilomètres et de la vitesse de déplacement ; or ces deux éléments ne sont pas seulement liés aux spécifications techniques, mais aussi à l'état actuel des routes. Néanmoins, la vitesse de déplacement est considérée comme constante et égale à la vitesse de déplacement autorisée pour chaque trajet considéré. L'incertitude de la mesure de ce critère se rapporte donc aux considérations faites sur la vitesse de déplacement et sur le découpage des trajets.

L'incertitude de la mesure du critère gestion environnementale municipale (GEM) peut être due aux enquêtes gouvernementales utilisées. Ces enquêtes, menées annuellement par l'organisme départemental responsable des audits (Contraloría General de Antioquia), sont souvent utilisées dans les statistiques officielles, bien qu'elles soient très contestées par le milieu universitaire et par le gouvernement lui-même. Le renouvellement fréquent des fonctionnaires municipaux, suite aux changements des équipes politico—administratives (tous les 3 ans), leur faible niveau de formation et la complexité des enquêtes, sont les raisons pour lesquelles ces enquêtes ne sont pas souvent bien menées par la municipalité. Des audits sont néanmoins réalisés par la Contraloría General de Antioquia tous les ans au niveau des municipalités du département, de manière aléatoire, afin de palier à ce disfonctionnement. Suite aux enquêtes malmenées, quelques informations concernant les

paramètres de calcul ne sont pas fournies pour certaines municipalités. Ceci entraîne de l'incertitude sur la mesure de ce critère.

La deuxième source d'incertitude de la base de données est issue du choix des critères pour former les combinaisons de chaque scénario. S'inspirant des corrélations déterminées par le plan factoriel principal et par la classification de Ward, deux types de combinaisons ont été distingués pour le scénario 1 :

- Type 1 : les critères ILD et ILR (« dynamique de la forêt »), DP, POP et TCPR (« démographie ») et NBI (impact de la « force centripète ») ont été combinés, en tenant compte notamment des corrélations positives issues de la classification de Ward et des corrélations négatives issues du premier axe factoriel;
- Type 2 : les critères DEB et REB (« dynamique de la forêt ») et NBI (impact de la « force centripète ») ont été combinés, en tenant compte notamment des corrélations positives issues de la classification de Ward et des corrélations négatives issues du deuxième axes factoriel.

Ces deux types de combinaisons proviennent de corrélations qui, dans le cas du plan factoriel, peuvent être jugées « faibles » étant donné les coordonnées des critères sur les facteurs. Ayant fixé des coefficients assez bas (supérieurs à 0.6 et inférieurs à -0.6), les corrélations des critères, dont les coordonnées sur les axes sont proches de ces valeurs, peuvent être incertaines. C'est notamment le cas du critère *reboisement* et du critère *pauvreté* (NBI). Mais cette incertitude peut être réduite grâce aux corrélations positives observées sur le dendrogramme.

Dans le cas du scénario 2, deux types de combinaisons sont aussi distingués en tenant compte des corrélations : la première concerne les critères IPD et IME (investissements sur l'environnement) et la deuxième concerne le critère *gestion environnementale municipale* (GEM). Ces corrélations ne semblent pas être incertaines en raison de leur faible indice de niveau dans le dendrogramme. C'est plutôt la corrélation positive entre les critères d'investissements et de gestion qui peut être incertaine, en raison de la faible corrélation du critère GEM₁ avec le premier axe factoriel.

Pour tester les corrélations et la contribution des critères dans la hiérarchisation des municipalités, nous avons effectué plusieurs combinaisons. C'est le cas de la gestion de l'incertitude que nous avons réalisée sur les règles de décision.

4.2.2.2 L'incertitude des règles de décision

La hiérarchisation des municipalités est affectée par l'incertitude des règles de décision utilisées. Les scénarios 1 et 2 sont affectés par l'incertitude de la classification hiérarchique. Le scénario 2 est aussi affecté par celle liée à la comparaison des moyennes des classes issues de cette classification. Le scénario 3 n'est affecté que par l'incertitude de la comparaison des moyennes issues des deux scénarios précédents. Ces incertitudes ont été réduites en trois étapes : par le choix des modes de classification hiérarchique, par le test de la contribution des variables à la classification et par la caractérisation des moyennes des classes.

D'abord, la classification hiérarchique peut être mise en œuvre à l'aide de plusieurs critères d'agrégation ou règles de calcul des distances entre groupes. Le critère d'agrégation détermine la qualité de la solution. L'efficacité du critère d'agrégation choisi dépend de la structure des données. Une structure des données est considérée comme stable lorsque la classification hiérarchique réalisée par deux critères d'agrégation de la même famille aboutit à des résultats similaires. Parmi les algorithmes agglomératifs, nous avons sélectionné deux critères d'agrégation sur la base de la distance euclidienne. Le premier est le critère de Ward qui minimise la perte d'information lors de la fusion des groupes, et dont la solution optimale maximise la distance entre groupes (inertie). Le deuxième est celui de la Distance Moyenne car il réduit l'« effet de chaîne » (Lebart *et al.*, 1998) produit par le processus d'agrégation des *voisins les plus proches* et des *voisins les plus lointains*, et dont la solution optimale maximise la distance moyenne entre tous les éléments des groupes.

La similitude des deux solutions est due au nombre de classes retenues et au « degré » de contribution des variables (critères) aux classifications. L'incertitude peut être minimisée de manière itérative, en augmentant ou en réduisant le nombre de classes sur le dendrogramme, et en ajoutant ou en enlevant des variables sur les combinaisons. La « meilleure » solution se traduit par une affectation des municipalités aux mêmes classes par les deux critères d'agrégation. Dans cette solution, la contribution des variables est

maximale. En ce qui concerne le nombre de classes, aucune affectation incertaine n'a été observée dans les classifications choisies (*cf.* Annexe 2.3.1).

La contribution des variables dans les classifications a été estimée par le test ANOVA ou test de Fischer. Ce test est une analyse de la variance *inter* et *intra* des classes par rapport à une variable donnée. Si ces deux variances sont égales, alors la contribution de cette variable à la séparation des groupes est incertaine : si la valeur du test (niveau de signification) est supérieure à 0.05, alors la variable ne contribue guère à la séparation des classes, donc elle est incertaine dans la combinaison. En d'autres termes, une variable contribue à la séparation des groupes lorsque les moyennes des classes sont « suffisamment » distinctes. On utilise le test $F = \sigma_1^2 / \sigma_2^2$ pour cette estimation, où σ_1^2 est la variance *inter* classe et σ_2^2 est la variance *intra* classes. Il s'agit de rejeter l'hypothèse nulle $(\sigma_1^2 = \sigma_2^2)$, c'est-à-dire que les deux variances sont les mêmes. Mais si $\sigma_1^2 > \sigma_2^2$, F est-il significatif? Le niveau de signification étant fixé à 0.05, une valeur en dessous du niveau indique qu'il est peu probable que les variances soient les même (F = 1) et l'hypothèse nulle peut être rejetée (Pardo et Ruiz, 2001).

Les dix combinaisons du scénario 1 et les deux du scénario 2 permettent de hiérarchiser les municipalités en minimisant le nombre d'affectations incertaines et en rendant maximale la contribution des variables (cf. Tableau 4.8). Il est probable (teste de signification ≤ 0.05 ou ≈ 0.05) que la plupart des variables contribue à la mise en évidence des perspectives spatiotemporelles de « développement économique » et de « protection dans le district ». En ce qui concerne le scénario 1, il est peu probable (test de signification > 0.05) que le critère $taux\ de\ croissance\ de\ la\ population\ rurale\ (TCPR)\ contribue\ à\ expliquer\ les\ phénomènes de\ reboisement\ et\ d'impact\ du\ tunnel\ sur\ le\ « développement\ économique ». Il est aussi peu probable (test de\ signification <math>> 0.05$) que le critère $besoins\ de\ base\ non\ satisfaits\ (NBI)\ contribue\ à\ l'explication\ de\ l'impact\ du\ tunnel\ sur\ le\ « développement\ économique ».$

En ce qui concerne le scénario 2, toutes les variables contribuent à l'explication de la « protection dans le district ». Les résultats du test de signification sont présentés en annexe 2.3.2.

Tableau 4.8 Niveaux de signification des variables par scénario

Résultats du test de signification de Fischer pour les combinaisons choisies. Les critères « non corrélés » ne sont pas considérés dans les combinaisons.

Scénario 1

Combinaison	Dynamique de la forêt	Démographie	Besoins de base non satisfaits	Distance à Medellín
1	ILD1 (0.02)	DP1 (0.14); TCPR1 (0.05)	NBI3 (0.01)	T1 (0.04)
2	ILR1 (0.01)	DP1 (0.01); TCPR1 (0.35)	NBI3 (0.04)	T1 (0.06)
3	DEB1 (0)	non corrélé	NBI1 (0)	non corrélé
4	REB1 (0.02)	non corrélé	NBI1 (0.01)	non corrélé
5	ILD2 (0.07)	DP2 (0.06); TCPR2 (0.04)	NBI4 (0.08)	T1 (0.02)
6	ILR2 (0.03)	DP2 (0.02); TCPR2 (0.32)	NBI4 (0.03)	T1 (0.01)
7	DEB2 (0)	non corrélé	NBI2 (0)	non corrélé
8	REB2 (0)	non corrélé	NBI2 (0)	non corrélé
9	ILD2 (0.02)	DP2 (0.03); TCPR2 (0.09)	NBI4 (0.06)	T2 (0.03)
10	ILR2 (0.02)	DP2 (0.03); TCPR2 (0.09)	NBI4 (0.06)	T2 (0.03)

Scénario 2

Combinaison	Investissement sur l'environnement	Gestion environnementale municipale
1	IPD (0); IME (0)	non corrélé
2	non corrélé	GEM1 (0); GEM2 (0.01)

Conception : J. A. Polanco López de Mesa, 2007

Enfin, la « caractérisation » des moyennes des classes du scénario 2 (« protection dans le district ») et du scénario 3 (« tension » entre développement et protection) s'inspire des résultats des classifications hiérarchiques, dont l'incertitude a déjà été réduite. Deux règles de décision peuvent être source d'incertitude, en raison des niveaux attribués aux moyennes : l'une dans le scénario 2 et l'autre dans le scénario 3. Suite à la comparaison des moyennes, trois niveaux (élevé, moyen et bas) de « protection » et de « tension » sont attribués, dans une logique de relations entre critères ayant le même poids dans la règle de décision.

La première règle de décision hiérarchise les municipalités, en comparant le niveau des moyennes des critères sur l'investissement pour l'environnement (IPD et IME) et du critère gestion environnementale municipale (scénario 2). Nous avons supposé que la « protection dans le district » est directement proportionnelle aux investissements et à la gestion. La deuxième règle de décision hiérarchise les municipalités, en comparant le niveau des moyennes des critères du « développement économique » et de la « protection dans le district » (scénario 3). Nous avons supposé qu'il existe une « tension » entre le « développement économique » et la « protection dans le district », dont le niveau est

directement proportionnel à celui du « développement économique » et inversement proportionnel à celui de la « protection dans le district ».

Ces hypothèses peuvent être une source d'incertitude des deux règles de décision évoquées, dans la mesure où le niveau attribué aux moyennes est une « synthèse » des critères considérés. Cette incertitude a été réduite notamment dans le cas du scénario 2, en tenant compte des corrélations positives entre critères (dendrogramme et plan factoriel principal) afin de mettre en avant les hypothèses de proportionnalité. Dans le cas du scénario 3, la réduction de l'incertitude a été acceptée étant donnée que l'incertitude des scénario 1 et 2 a aussi été réduite.

En conclusion, dans ce chapitre nous avons proposé d'analyser, par scénarios, le « développement économique » issu des pratiques agricoles dominantes et le « protection dans le district » du Système de Páramos Hauts-Andins d'Antioquia, en tenant compte du principe de *subsidiarité coordonnée*. Trois groupes de critères ont été à cet effet proposés et leur corrélation étudiée. Une vue d'ensemble des phénomènes de « développement économique » et de « protection dans le district », ainsi que le leur confrontation, a été obtenue sur l'espace géographique des municipalités grâce à la contribution de tous les critères proposés. L'incertitude des scénarios a été réduite en minimisant les affectations incertaines des municipalités aux groupes, en rendant minimale la contribution des critères et en adaptant la « caractérisation » des moyennes aux corrélations. Ces scénarios seront discutés dans la dernière partie de ce document.

REMARQUES II

La relation entre gouvernance et territoire a été étudiée en tenant compte notamment de l'économie « monocentrique » pour le « développement économique », et du principe dominant de *subsidiarité coordonnée* pour la « protection dans le district ». C'est ainsi que le territoire du district a été confronté à deux « forces », dont l'opposition donne comme résultat des niveaux de « tension » différenciés dans l'espace géographique des municipalités pour des périodes temporelles précises. Issue du « développement économique », la première « force » est « contre » le territoire car elle manifeste des menaces dans le processus de consolidation de celui-ci. Ces menaces sont identifiées par exemple, en considérant la « pression de la population sur la forêt » et l'impact de la « force centripète » de Medellín sur les municipalités rurales. Au contraire, issue de la « protection dans le district », la deuxième « force » est « pour » le territoire dans la mesure où des efforts de consolidation de celui-ci sont en effet à l'œuvre. Cette consolidation concerne la mise en commun d'actions dans le gouvernement local, notamment entre les municipalités et la Corporation Autonome Régionale du Centre d'Antioquia (CORANTIOQUIA) : investissement et gestion pour l'environnement.

La méthode que nous avons proposée fait l'état des lieux de ces « forces » et de leur confrontation dans le district. Son avantage est d'établir une vue d'ensemble des niveaux de « tension » entre les « forces », donnant un indice de leur distribution spatiale. Cette distribution des « forces » peut aussi contribuer à identifier des points « forts » ou « faibles » dans le territoire. Dans les points « forts », l'état de la gouvernance contribuerait à la consolidation et à l'efficacité du territoire. Par contre, dans les points « faibles », l'état de la gouvernance entraînerait son affaiblissement. Autrement dit, c'est dans les points « faibles » du territoire où la dégradation de l'environnement aurait plus de possibilités d'accroissement, étant donné que le « développement économique » n'y trouverait pas de forte « protection dans le district ».

L'inconvénient de cette méthode est lié notamment à l'incertitude des scénarios proposés. Bien qu'elle ait été réduite, cette incertitude demeure en raison du manque et de la qualité de l'information. La carte officielle d'occupation du sol et les enquêtes gouvernementales ont été les deux sources d'erreur avec le plus d'impact sur les scénarios proposés, à cause

des erreurs de cartographie pour la première et de l'absence de réponse aux questionnaires pour les deuxièmes.

Dans la dernière partie de ce document, nous mettons cette méthode en valeur afin d'établir un cadre de discussion sur les spécificités territoriales de la gouvernance, non seulement en ce qui concerne la *subsidiarité coordonnée*, mais aussi la *performance négociée* dans le processus de construction du « district de gestion intégrée ». Alors que la *subsidiarité coordonnée* se traduit principalement par une « tension » entre la « protection dans le district » et le « développement économique », cette « tension » peut tout de même donner des indices sur la *performance négociée* quant à la posture adoptée par la CORANTIOQUIA dans la « rationalité relative » des acteurs.