



AGROCAMPUS OUEST- Centre d'Angers  
2, rue Le Nôtre  
F-49045 ANGERS cedex 01  
tél. : +33 (0)2 41 22 54 54  
fax : +33 (0)2 41 22 55 99



# PAYTAL – PAYSage et éTALement urbain : dynamiques physique et culturelle et modélisation

Rapport final

Programme PDD2 - MEDDTL - Convention  
n°11-MUTS-PDD-3-CVS-019

24/10/2014

Élise ATHANÉ<sup>a</sup>, Julie BOURBEILLON<sup>b</sup>, Thomas COISNON<sup>c</sup>, Thomas  
GUYET<sup>d</sup>, Anaïs MARSHALL<sup>e</sup>, Hervé NICOLAS<sup>a</sup>, Walid OUESLATI<sup>c</sup>,  
Damien ROUSSELIÈRE<sup>c</sup> et Julien SALANIÉ<sup>c,f,\*</sup>

\* Coordinateur - e-mail : [julien.salanie@univ-st-etienne.fr](mailto:julien.salanie@univ-st-etienne.fr)

<sup>a</sup> SAS UMR 1069 (INRA & Agrocampus Ouest)

<sup>b</sup> IRHS UMR 1345 (INRA, Agrocampus Ouest & Université d'Angers)

<sup>c</sup> GRANEM UMR MA49 (Université d'Angers & Agrocampus Ouest)

<sup>d</sup> Laboratoire d'Informatique Agrocampus Ouest

<sup>e</sup> CRESC EA 2356 (Université de Paris 13) et UMR 8586 PRODIG

<sup>f</sup> UMR 5824 GATE Lyon Saint-Étienne

## Résumé

Ce projet propose d'étudier les liens entre l'étalement urbain et l'évolution des paysages. Il s'inscrit pleinement dans une démarche pluridisciplinaire qui vise à coupler des méthodes d'analyse économique (économie urbaine et économétrie), spatiale (géomatique et télédétection) et de perception paysagère (analyses textuelles et sémantiques). En s'appuyant sur des outils informatiques (fouille et classification des données), le projet vise à décrire finement les formes de l'étalement urbain et des dynamiques du paysage.

D'abord nous construisons un modèle économique théorique qui rend compte à la fois de la valeur d'aménité des paysages agricoles du périurbain, dont nous faisons varier la "qualité" dans l'espace, et des modifications engendrées par l'urbanisation, en introduisant des externalités entre les résidents du périurbain.

Nous élaborons une ontologie géographique à partir des Atlas des Paysages disponibles en France sous forme numérique. Cet exercice permet non seulement de capturer une information sur les paysages plus riche que les taxonomies classiques, mais aussi d'inférer de nouvelles connaissances. Cette ontologie nous permet de générer des indicateurs des paysages perçus de manière automatisée à l'échelle des unités paysagères.

Nous utilisons la télédétection pour mesurer finement l'urbanisation sur quatre aires urbaines (Angers, Brest, Lorient et Rennes) à trois dates (1990, 2000 et 2010).

À partir des informations générées par l'ontologie et par la télédétection, nous analysons les liens entre étalement urbain et paysages. D'abord, nous mobilisons des techniques de fouille de données et montrons comment elles peuvent être mobilisées pour caractériser l'étalement urbain. Ensuite, nous utilisons des techniques d'analyse discriminante pour détecter les différences territoriales à l'échelle d'une aire urbaine.

Enfin, nous estimons un modèle économétrique d'allocation des usages du sol sur la base des données générées par les étapes précédentes. Le modèle estimé intègre plusieurs dimensions classiques comme l'accès à l'emploi, la consommation de foncier résidentiel, les zonages et la localisation d'aménités paysagères et culturelles. Il est appliqué à l'aire urbaine d'Angers et permet de prédire à un niveau fin (pixels de 100m de côté) les probabilités d'urbanisation en fonction de ces déterminants mais aussi de descripteurs physiques et sensibles du paysage. Ainsi, nous pouvons identifier l'importance relative de chacune de ces deux dimensions dans l'étalement urbain et nous pouvons identifier les caractéristiques physiques et sensibles des paysages qui jouent sur l'étalement urbain. Nos résultats montrent que ces deux éléments jouent un rôle non négligeable et qu'en conséquence les politiques de planification urbaine, les politiques de gestion des paysages et les politiques sectorielles devraient tenir compte de chacune de ces dimensions.

Ainsi, nous proposons une méthodologie pluridisciplinaire, flexible et reproductible, d'analyse du lien entre étalement urbain et paysage. Nous montrons, par sa mise en œuvre, toute son originalité et tout son intérêt. Enfin, nous identifions plusieurs points d'amélioration de cette méthodologie.

**Mots-clés :** Paysages, étalement urbain, ontologie géographique, modèles d'allocation des usages du sol, approches multi-échelle, classifications, analyse des politiques publiques.

# Table des matières

<b>Synthèse</b>	<b>5</b>
Objectifs . . . . .	7
Définitions . . . . .	9
Résultats . . . . .	12
Apports théoriques . . . . .	12
Construction d'une ontologie de la perception des paysages . . . . .	17
Estimation d'un modèle de changement d'allocation des usages du sol . . . . .	23
Implications . . . . .	32
Production scientifique et valorisation . . . . .	34
<b>Introduction générale</b>	<b>36</b>
Objectifs . . . . .	38
Méthodologie . . . . .	39
Définitions . . . . .	41
Urbanisation et étalement urbain . . . . .	41
Paysage(s) . . . . .	45
Plan du rapport . . . . .	48
<b>I Modèle théorique</b>	<b>49</b>
<b>1 Un modèle économique de ville à aménité périurbaine endogène</b>	<b>50</b>
1.1 Introduction . . . . .	50
1.2 Revue de littérature sur la Nouvelle Economie Urbaine et les choix de localisation résidentielle . . . . .	51
1.2.1 Les modèles statiques de la Nouvelle Economie Urbaine . . . . .	51
1.2.2 Modélisation dynamique de la conversion des terres agricoles . . . . .	55
1.3 Construction d'un modèle statique de ville monocentrique dans un contexte agricole hétérogène . . . . .	57
1.3.1 Structure de la ville . . . . .	59
1.3.2 Équilibre spatial . . . . .	65
1.4 Formes d'étalement urbain . . . . .	69
1.4.1 Statique comparative . . . . .	69
1.4.2 Simulations numériques du modèle . . . . .	70
1.5 Conclusion . . . . .	78
<b>2 Incorporation d'une politique paysagère</b>	<b>79</b>
2.1 Introduction . . . . .	79
2.2 Un modèle théorique de localisation résidentielle en présence d'aménités endogènes	83
2.2.1 Comportement des agriculteurs . . . . .	83
2.2.2 Politique agri-environnementale . . . . .	84

2.2.3	La production jointe d'externalités agricoles . . . . .	87
2.2.4	Localisation des ménages dans les zones urbaines et péri-urbaines . . . . .	88
2.2.5	Les aménités agricoles . . . . .	89
2.2.6	Équilibre spatial . . . . .	90
2.2.7	Statique comparative . . . . .	92
2.3	Modèle numérique . . . . .	93
2.4	Effets de la politique agri-environnementale . . . . .	95
2.4.1	Effets sur la structure urbaine . . . . .	95
2.4.2	Effets redistributifs de la politique . . . . .	98
2.5	Conclusion . . . . .	100
 <b>II Création des données</b>		<b>103</b>
 <b>3 Mesure de l'étalement urbain par télédétection</b>		<b>104</b>
3.1	Introduction . . . . .	104
3.2	Prétraitements des images (ENVI <sup>®</sup> ) . . . . .	105
3.2.1	Images SPOT . . . . .	105
3.2.2	Images RapidEye . . . . .	107
3.2.3	Bandes nécessaires pour la classification . . . . .	108
3.3	Classification orientée objet (eCognition <sup>®</sup> ) . . . . .	109
3.3.1	Segmentation . . . . .	109
3.3.2	Échantillonnage pour la calibration et la validation . . . . .	110
3.3.3	Classification . . . . .	111
3.4	Post-traitements . . . . .	113
3.5	Evaluation globale de la classification . . . . .	114
3.6	Conclusion . . . . .	118
 <b>4 Construction semi-automatique d'une ontologie de la perception des paysages</b>		<b>119</b>
4.1	Contexte . . . . .	119
4.2	Objectif . . . . .	120
4.3	État de l'art . . . . .	120
4.4	Corpus documentaire . . . . .	122
4.4.1	Documents contenant des informations de perception . . . . .	122
4.4.2	Les Atlas des Paysages . . . . .	123
4.4.3	Pré-traitements des Atlas . . . . .	124
4.4.4	Premières analyses . . . . .	126
4.5	Construction de l'ontologie . . . . .	128
4.5.1	Construction de l'ontologie à partir de l'Atlas des Paysages du Maine-et-Loire . . . . .	128
4.5.2	Raffinement de la méthode de construction de l'ontologie . . . . .	134
4.6	Caractérisation et discrimination des unités paysagères . . . . .	145
4.6.1	Approches mises en place . . . . .	145
4.6.2	Méta-données . . . . .	145
4.6.3	Analyse sémantique grâce au logiciel Tropes . . . . .	146
4.6.4	Construction ad-hoc de matrices thèmes-documents . . . . .	149
4.7	Conclusion et perspectives . . . . .	151
4.7.1	Préliminaires . . . . .	151
4.7.2	Considérations concernant le corpus documentaire . . . . .	151
4.7.3	Considérations concernant l'ontologie de perception des paysages . . . . .	152



4.7.4	Considérations concernant la caractérisation des unités paysagères . . .	152
<b>III</b>	<b>Analyses empiriques</b>	<b>154</b>
<b>5</b>	<b>Caractérisation du lien entre paysage et urbanisation</b>	<b>155</b>
5.1	Introduction . . . . .	155
5.2	Données traitées . . . . .	155
5.2.1	Cartes d'occupation du sol . . . . .	156
5.2.2	Calcul des cartes d'urbanisation . . . . .	158
5.3	Vers une méthodologie d'analyse des paysages par des graphes spatiaux . . . .	160
5.3.1	Préparation des données . . . . .	161
5.3.2	Programmation Logique Inductive . . . . .	163
5.3.3	Construction d'un jeu d'apprentissage . . . . .	166
5.3.4	Inférence de règles . . . . .	170
5.3.5	Expérimentations . . . . .	170
5.3.6	Discussions . . . . .	172
5.4	Entretiens sur l'aire urbaine d'Angers . . . . .	172
5.4.1	Objectifs . . . . .	172
5.4.2	Méthode d'entretien . . . . .	173
5.4.3	Liste des entretiens . . . . .	176
5.4.4	Conclusions . . . . .	177
5.5	Analyse statistiques du lien entre urbanisation et paysage à l'aide d'indices du paysage . . . . .	178
5.5.1	Matériel et méthode . . . . .	178
5.5.2	Analyses statistiques . . . . .	184
5.5.3	Résultats . . . . .	186
5.5.4	Discussions . . . . .	197
5.6	Conclusion . . . . .	198
<b>6</b>	<b>Modèle de changement d'affectation des usages du sol</b>	<b>199</b>
6.1	Introduction . . . . .	199
6.2	Cadre de modélisation . . . . .	201
6.2.1	Cadre théorique . . . . .	201
6.2.2	Modèle empirique de changement d'affectation des usages du sol . . . . .	203
6.2.3	Méthodologie d'évaluation du rôle des aspects culturels des paysages sur l'urbanisation . . . . .	205
6.3	Application à l'aire urbaine d'Angers pour la période 2000-2010 . . . . .	208
6.3.1	Données socio-économiques . . . . .	212
6.3.2	Données Paysagères . . . . .	215
6.3.3	Données relatives aux perceptions . . . . .	217
6.4	Résultats des estimations . . . . .	220
6.4.1	Première étape : Estimation du modèle d'allocation du sol . . . . .	220
6.4.2	Deuxième étape : Analyse du rôle des perceptions . . . . .	224
6.5	Conclusion . . . . .	228
	<b>Conclusion générale</b>	<b>232</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>257</b>

<b>A</b>	<b>Conditions relatives à l'équilibre spatial de notre modèle théorique de ville monocentrique en présence d'une agriculture hétérogène</b>	<b>258</b>
A.1	Existence de la frontière urbaine . . . . .	259
A.2	Conditions d'apparition d'une zone périurbaine . . . . .	261
A.3	Conditions d'apparition de mitage ou d'extension urbaine . . . . .	262
<b>B</b>	<b>Statique comparative</b>	<b>263</b>
<b>C</b>	<b>Production et valorisation scientifique du programme PAYTAL</b>	<b>271</b>
C.1	Articles et documents de travail . . . . .	271
C.1.1	Articles . . . . .	271
C.1.2	Documents de travail . . . . .	271
C.2	Conférences . . . . .	272
C.2.1	Conférences et colloques . . . . .	272
C.2.2	Séminaires . . . . .	273
C.3	Rapports et mémoires diplômant . . . . .	273
C.3.1	Thèse de doctorat . . . . .	273
C.3.2	Mémoires de Master ou niveau équivalent . . . . .	273

# Synthèse

Depuis la seconde guerre mondiale, le développement urbain est rapide, surtout dans les pays en développement, et effectué au détriment des zones naturelles et agricoles périurbaines. Selon l'Organisation des Nations Unies (ONU, 2009), pour la première fois dans l'histoire de l'humanité, plus de 50% de la population mondiale vit en zone urbaine. Ce seuil a été atteint en 2008. En 1950 cela ne concernait que 29,1% de la population. Les prévisions de l'ONU évaluent à 70% la part des habitants de la planète qui vivront en zone urbaine en 2050. En France, la part de la population urbaine est passée de 55% en 1950 à 77% aujourd'hui, et elle devrait atteindre les 87% en 2050 (ONU, 2009). Aux États-Unis, ce sont 84% de la population qui vivent dans une *Metropolitan Area* (Mackun & Wilson, 2011). A l'échelle européenne, les aires rassemblent 75 % de la population (EEA, 2006).

L'urbanisation<sup>1</sup> trouve sa source dans le développement économique, sous les effets conjugués de la baisse de la part des dépenses en produits agricoles et agro-alimentaires, comme le prédit la loi d'Engel, et de l'augmentation de la productivité agricole. Cela engendre des différentiels de niveaux de vie entre les zones rurales et les agglomérations urbaines et donc l'exode rural (Polèse & Shearmur, 2005). En parallèle de l'urbanisation, un autre fait majeur de l'évolution des villes au 20<sup>ème</sup> siècle est l'étalement urbain.

Après la seconde guerre mondiale, la forte croissance de la population urbaine, combinée avec d'autres facteurs tels que l'augmentation des niveaux de revenu, l'amélioration des technologies de transport - en particulier l'avènement de la voiture individuelle - et la recherche de nouveaux cadres de vie, ont incité les ménages à se localiser à des distances de plus en plus éloignées des centre-villes, conduisant ainsi les aires urbaines à s'étaler toujours plus dans l'espace.

Parmi les problèmes généralement associés à l'étalement urbain, on recense entre autres une consommation excessive des ressources naturelles et d'énergie - impliquant des problèmes de pollution de l'air, des eaux et l'émission de gaz à effet de serre -, l'artificialisation des sols<sup>2</sup>, la perturbation des écosystèmes, la perte de terres agricoles, la dégradation des paysages, le mitage, la ségrégation sociale, le surinvestissement dans les services collectifs<sup>3</sup> ou encore l'ac-

---

1. C'est-à-dire l'accroissement de la part de la population vivant en ville.

2. Bien que l'artificialisation des sols soit aussi due au développement des réseaux, d'infrastructures et d'activités commerciales ou industrielles, l'habitat individuel compte à lui seul pour la moitié des superficies artificialisées entre 1992 et 2004 en France (Bisaut, 2009).

3. cf. Carruthers & Ulfarsson (2003)

croissement des temps de trajets<sup>4</sup> (EEA, 2006). Il faut aussi noter que la densité favorise la productivité en permettant un meilleur partage entre entreprises de facteurs de production coûteux, en améliorant la flexibilité du marché du travail, et donc les appariements employé-employeur, et en favorisant la diffusion des technologies et des savoirs (OCDE-CEMT, 2007). L'étalement urbain a donc des effets néfastes sur l'emploi, la productivité et les revenus (Fallah *et al.*, 2011).

Pour ces différentes raisons, l'étalement urbain est devenu une préoccupation majeure des pouvoirs publics depuis plusieurs décennies. Différentes politiques ont donc été mises en place pour lutter contre ce phénomène. La loi SRU<sup>5</sup> de 2000 est probablement le point d'orgue de cette volonté puisqu'elle se fixe comme objectifs de lutter contre la périurbanisation et de protéger l'espace agricole et les paysages en favorisant le renouvellement urbain et la mixité sociale.

La littérature économique (et géographique) sur les mécanismes de l'étalement urbain est relativement abondante, surtout aux États-Unis (Mieszkowski & Mills, 1993; Brueckner, 2000; Brueckner *et al.*, 2001; Nechyba & Walsh, 2004) mais aussi plus récemment en France (Cavailhès *et al.*, 2009b). Parmi les principales causes de l'étalement urbain, entendu comme l'emprise au sol croissante de la ville, on trouve l'accroissement de la population urbaine et l'augmentation des revenus (Wheaton, 1974). En revanche, l'accroissement des coûts de transport et l'augmentation des prix des terres agricoles tendent à contraindre cet étalement (Wheaton, 1974). Par ailleurs, la nature irréversible de l'étalement urbain laisse supposer que la structure de risque des marchés du foncier agricole et urbain (commercial et résidentiel) joue un rôle fondamental dans l'étalement urbain (Capozza & Helsley, 1990; Capozza & Li, 2002). Les décisions d'urbanisation sont affectées par l'appréciation du rapport entre les bénéfices de l'urbanisation et ceux de l'activité agricole. Burchfield *et al.* (2006) ont réalisé une analyse systématique de l'étalement urbain entre 1976 et 1992 aux États-Unis. Ils testent une série d'hypothèses issues des analyses économiques précédemment citées à l'échelle nationale. Leurs résultats permettent de confirmer la plupart de ces hypothèses, à savoir que l'étalement urbain est bien relié à la dispersion de l'emploi, aux coûts des transports individuels, à l'absence de régulation des usages du sol par les politiques de planification et à la fiscalité locale.

Burchfield *et al.* (2006) notent que l'inclusion d'indicateurs paysagers pourrait améliorer significativement la compréhension des phénomènes d'étalement urbain, ce qui est effectivement suggéré par la théorie économique. Cependant, Irwin & Bockstael (2007) montrent que l'analyse de Burchfield *et al.* (2006) reste partielle parce qu'elle ne rend pas compte de l'urbanisation par densification (fill-in). Sur des données encore plus fines, elles confirment que la présence d'aménités a joué un rôle important pour l'urbanisation dans le Maryland et que l'urbanisation joue un rôle fondamental dans la structuration des paysages en en réduisant la diversité. Ceci suggère une approche dynamique des paysages.

---

4. En fait, en France le temps de trajet domicile-travail est constant ( $\approx 55$ mn) mais les distances parcourues augmentent (9 km en 1982 contre 14,2 en 1994) - Source : Ministère des transports.

5. Loi n°2000-1208 du 13 décembre 2000 relative à la solidarité et au renouvellement urbains.

Plusieurs auteurs ont démontré que l'existence de services environnementaux (écologiques et esthétiques) à la périphérie des villes pouvait non seulement engendrer l'étalement urbain mais aussi générer l'apparition d'un habitat discontinu – phénomène de mitage – (Cavallès *et al.*, 2004; Turner, 2005; Wu, 2006). Ces aménités sont aussi la source d'une ségrégation spatiale des ménages (Wu, 2006) au même titre que la fiscalité, la criminalité et les services publics (Nechyba & Walsh, 2004).

En Europe, et en particulier en France, on ne dispose pas d'une information similaire sur la nature de l'étalement urbain, le rôle joué par les paysages et les conséquences sur la structuration, la répartition et la modification des paysages. Pourtant, les processus d'urbanisation y sont plus anciens et plus importants qu'aux États-Unis où seulement 2% des terres sont artificialisées (Burchfield *et al.*, 2006) contre 9% en France CGDD (2010). Selon Antrop (2004), l'urbanisation en Europe fragmente les paysages qui perdent de leur valeur écologique et culturelle. Même s'ils partagent certaines caractéristiques (Patacchini & Zenou, 2009), les processus d'urbanisation et d'étalement urbain diffèrent entre l'Europe et les États-Unis (Schneider & Woodcock, 2008), aboutissant à des formes urbaines différentes. Brueckner *et al.* (1999) ont aussi montré des différences portant sur la répartition spatiale des ménages expliquées par le rôle que peuvent jouer les aménités.

## Problématique et objectifs

Dans ce contexte, notre proposition de recherche vise à améliorer notre compréhension du lien entre étalement urbain et paysage et à identifier les éléments de leur dynamique conjointe. En particulier, on se demande si les paysages influent sur l'urbanisation et si oui comment ? On s'interroge aussi sur le poids des paysages dans les mécanismes d'étalement urbain en comparaison des autres facteurs (coûts de transport, revenus, ...). Quelles sont les conséquences de l'étalement urbain sur la formation des paysages périurbains ? Les paysages influencent-ils les formes générales de l'étalement urbain (mitage, habitat compact, etc.) ? Les politiques de planification (SCoT, PLU, etc.) et de protection des espaces naturels (ZNIEFF, ZPPAUP, Natura 2000, etc.) permettent-elles de contrôler l'étalement urbain et quelles sont leurs conséquences sur les formes d'urbanisation ?

Notre objectif est avant tout méthodologique et nous souhaitons initier, et tester, une méthodologie reproductible, applicable à l'échelle pertinente des phénomènes d'étalement urbain (les aires urbaines) qui tienne compte des différentes dimensions du paysage :

- physique, qui la dimension la plus explorée,
- sensible, dont l'étude n'a pas été faite à cette échelle.

Le projet PAYTAL repose sur un travail de représentation spatiale des paysages et de la

ville pour alimenter l'analyse de la dynamique urbaine. Ceci impose trois dimensions interdisciplinaires. D'abord, nous devons construire un outil de mesure, aussi fin que possible, de l'étalement urbain. Ensuite, sur le même territoire, nous devons avoir un outil de représentation des dimensions physiques et sensibles des paysages. Enfin, nous devons nous munir d'un cadre théorique suffisamment général qui permette de relier les deux outils.

Les modèles théoriques et empiriques (statistiques) de l'économie urbaine offrent un cadre suffisamment général pour la compréhension des phénomènes d'étalement urbain qui résultent des arbitrages de localisation des ménages et des entreprises sous contrainte des politiques publiques mises en œuvre. Toutefois, dans ces modèles, les aménités, ou le cadre de vie, sont résumés à un élément exogène, comme par exemple chez Wu & Plantinga (2003) et Wu (2006). C'est précisément cette limite que nous souhaitons relever dans PAYTAL. Les travaux théoriques approchant le cadre de vie sous un angle endogène, c'est-à-dire où il dépend du comportement des agents, sont rares. Chez Bento *et al.* (2011), les paysages du périurbain sont réduits à une quantité totale d'espace agricole qui varie quand la taille de la ville s'accroît. Chez Cavailhès *et al.* (2004), ils sont approchés plus finement par la part que l'agriculture, différenciable par un paramètre, occupe en tout point de l'espace. Dans le modèle de Cavailhès *et al.* (2004), les ménages périurbains bénéficient des paysages agricoles mais en les urbanisant, ils les modifient. Il émerge donc une construction des paysages périurbains qui résulte des choix de localisation des ménages, qui recherchent l'espace et la proximité aux paysages agricoles, et de la profitabilité de l'agriculture. C'est certainement le modèle le plus élaboré. Ils nous servira de point de départ. Comme Cavailhès *et al.* (2004), nous approcherons les paysages périurbains par l'agriculture comme seul usage alternatif au résidentiel mais une interprétation plus générale peut être faite de leur modèle, comme du nôtre, dès lors que le cadre de vie périurbain est modifié par l'urbanisation et les activités économiques qui s'y localisent. En outre, on cherchera à introduire des politiques publiques d'entretien et d'amélioration des paysages, agricoles donc, et à comprendre leurs effets sur les formes d'urbanisation et le bien-être des populations. Enfin, on cherchera à partir de données à vérifier le fonctionnement du modèle proposé.

Pour cela, nous aurons besoin de mesurer les phénomènes d'urbanisation dans différentes villes. Nous avons choisi de le faire à partir d'images satellite à haute résolution sur une période longue (20 ans dans notre cas). Comme notre centre d'intérêt premier est l'urbanisation, nous développons les méthodologies adéquates de traitement de ces images pour mesurer, le plus finement possible, l'urbanisation et, en particulier, être capables de détecter l'urbanisation diffuse ce que ne permettent pas, par exemple, les sources de données comme Corine Land Cover dont la précision est trop faible pour détecter l'habitat individuel isolé. Nos analyses ont lieu sur les aires urbaines de Angers, Brest, Lorient et Rennes qui représentent quatre archétypes d'évolution des aires urbaines en France (CGDD, 2010).

Pour caractériser les paysages périurbains, nous utilisons des descripteurs physiques plus ou moins grossiers. Il s'agit bien sûr de l'occupation du sol mais aussi d'indicateurs plus fins d'éco-

logie des paysages qui nous permettent de mesurer l'agencement de leurs différents éléments physiques. Comme nous l'avons exprimé, notre ambition est d'intégrer la dimension sensible et perçue des paysages. A l'échelle qui est la nôtre (une ou plusieurs aires urbaines), il n'est pas possible de réaliser un travail d'analyse paysagère de terrain exhaustif. Ce n'est pas non plus souhaitable dans la mesure où nous souhaitons construire une méthodologie reproductible qui s'affranchisse, au moins partiellement, de cette approche. C'est pourquoi nous optons pour la construction d'une ontologie géographique des paysages. Il s'agit d'un système de représentation des connaissances que l'on peut abonder et modifier avec un ensemble d'informations relatives à la perception des paysages, notamment. Cette information doit être spatialisée de manière à ce que l'on puisse la mettre en relation avec les identifications de l'étalement urbain obtenues par télédétection.

L'avantage d'une ontologie, par rapport à d'autres outils, est double. Elle nous permet d'utiliser l'information existante sur les paysages et son cadre est suffisamment flexible pour que l'on puisse l'enrichir de nouvelles informations régulièrement. Pour créer cette ontologie, nous choisissons de nous baser sur les Atlas des Paysages pour plusieurs raisons. D'abord, l'information contenue dans les Atlas des Paysages est relativement homogène puisque créée sur la base d'une méthodologie commune (Brunet-Vinck, 2004) qui bien qu'imparfaite s'avère être un outil riche de connaissance des paysages (?). En outre, l'information contenue dans les Atlas des Paysages est géolocalisée par un découpage en unités territoriales bien identifiées : les Unités Paysagères. Enfin, les Atlas des Paysages couvrent une très large partie du territoire et constituent donc une masse d'information importante qui est mobilisable pour la construction de l'ontologie. L'avantage d'une ontologie est que l'on pourra l'enrichir d'autres sources d'information sur les paysages comme des enquêtes, des documents d'urbanismes qui contiendraient une information paysagère (PLU, SCoT, PADD, PLH, ...) ou encore de documents de justice relatifs à des conflits pourtant sur des éléments paysagers comme les oppositions à des permis de construire, des contentieux territoriaux, etc.

## Définitions

Dans le but de ne pas nous contraindre dans nos analyses, nous acceptons pleinement la diversité des définitions de l'étalement urbain et du paysage. Nous nous plaçons donc dans un cadre élargi.

L'étalement urbain, ou *urban sprawl* en anglais, est un phénomène d'abord observé aux Etats-Unis après la seconde guerre mondiale. Il désigne la croissance des aires métropolitaines nord-américaines, caractérisée par un développement résidentiel de faible densité, largement influencée par l'importance de l'usage de la voiture individuelle, et s'effectuant autour d'une ville-centre souvent en déclin. L'étalement urbain nord-américain est ainsi étroitement lié à l'émergence considérable de zones périurbaines ou *suburbs*, associées à un mode de vie en expansion : la maison individuelle et son jardin privatif. En 1950, 40% de la population des dix

premières aires métropolitaines aux Etats-Unis vivait à l'extérieur de la ville-centre, c'est-à-dire dans les *suburbs*. Cette proportion s'est accrue au cours de la deuxième moitié du vingtième siècle jusqu'à atteindre 60% en 1990 (Couch *et al.*, 2007).

Très vite, ce phénomène prend également toute son importance en Europe où la croissance de la population et le nouvel essor économique d'après-guerre se traduisent par des observations similaires en ce qui concerne l'étalement urbain. La croissance périurbaine des villes européennes a débuté entre la fin des années soixante et le milieu des années soixante dix, selon les villes. Aujourd'hui, l'Europe est un continent fortement urbanisé où 75% de la population vit dans une aire urbaine et où un quart du territoire est caractérisé par un usage urbain (EEA, 2006). Les préoccupations autour des dynamiques du développement périurbain sont toujours d'actualité. À partir de la base de données Corine Land Cover (CLC), mise à disposition par l'Agence Européenne de l'Environnement (EEA)<sup>6</sup>, qui regroupe des données SIG<sup>7</sup> d'occupation du sol pour 37 pays européens<sup>8</sup>, on observe que l'artificialisation pour l'usage résidentiel est prédominante et concerne plus de 46 000 hectares par an, pour l'ensemble du territoire européen couvert par CLC. Près de 78% des terres converties entre 2000 et 2006 étaient initialement agricoles (terres arables ou prairies). A l'échelle de la France par exemple, toujours d'après les données CLC, les espaces artificialisés de la France métropolitaine ont augmenté de près de 80 000 hectares, dont 88% étaient initialement des terres agricoles. Dans le cas européen, l'étalement urbain se fait donc essentiellement au détriment des terres agricoles.

Cependant, l'étalement urbain ne peut se résumer à la mesure de la superficie artificialisée sur un territoire. L'étalement urbain, au sens géographique comme économique, est un processus multi-dimensionnel. Il n'existe pas de définition consensuelle généralement donnée. Cependant, certaines notions sont utilisées de manière récurrente. On parle souvent de l'étalement urbain comme d'une extension spatiale excessive et incontrôlée des villes (Brueckner, 2000). L'étalement urbain est également souvent caractérisé selon sa forme : emprise spatiale, gradient de densité ou encore degré de fragmentation. ? proposent à ce sujet huit dimensions distinctes pouvant définir l'étalement urbain et en caractériser les formes<sup>9</sup>. Nous retiendrons la définition de l'Agence Européenne de l'Environnement (EEA) dans le sens où elle regroupe l'ensemble des caractéristiques citées habituellement dans la littérature. Elle considère que l'étalement urbain est la caractérisation physique d'un développement de faible densité des grandes aires urbaines, dans des conditions de marché, principalement dans les milieux agricoles environnants<sup>10</sup>. Ce développement de faible densité est également qualifié de discontinu, entraînant l'apparition d'un espace mité caractérisé par le maintien d'enclaves agricoles. Ainsi,

---

6. <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/land-take-2/assessment-2> (dernière visite : 16 février 2014).

7. Système d'Information Géographique

8. UE 28 moins la Grèce, plus Suisse, Norvège, Islande, Balkans et Turquie.

9. "*Sprawl is a pattern of land use in a UA [Urbanized Area] that exhibits low levels of some combination of eight distinct dimensions : density, continuity, concentration, clustering, centrality, nuclearity, mixed uses, and proximity.*" Galster *et al.* (2001).

10. "*(...) the physical pattern of low-density expansion of large urban areas, under market conditions, mainly into the surrounding agricultural areas*", p.6 dans EEA (2006)



la définition de l'EEA met en évidence les possibles interactions entre étalement urbain et espace agricole.

On peut également définir l'étalement urbain par les enjeux qui s'y rapportent et ont été mis en évidence par plusieurs auteurs dès la fin des années soixante. Il existe de nombreuses revues de littérature effectuées à ce sujet (Harvey & Clark, 1965; RERC, 1974; Ewing, 1994; Gordon & Richardson, 1997; Nechyba & Walsh, 2004; EEA, 2006).

Le paysage est ici entendu au sens de la Convention Européenne du Paysage, à savoir comme *"une partie de territoire telle que perçue par les populations, dont le caractère résulte de l'action de facteurs naturels et/ou humains et de leurs interrelations"* (Conseil de l'Europe, n.d.). Cette définition fait écho à celle de Price (1978). Elle met également en avant le rôle des actions humaines, souvent involontaires ou non coordonnées, c'est-à-dire à la notion d'externalité en économie qui se définit comme les interrelations entre agents en l'absence de coordination. Dans une acceptation large, nous entendons donc les paysages comme le cadre de vie, qui résulte à la fois des facteurs naturels mais aussi des actions économiques des agents qui habitent le territoire. Comme nous nous plaçons dans l'espace périurbain, nous faisons une place prépondérante à l'agriculture qui représente la majeure partie des territoires périurbains en France. L'ensemble des externalités agricoles fait référence au concept de multifonctionnalité de l'agriculture. Nous allons donc définir la multifonctionnalité de l'agriculture et donner quelques éléments de réflexion sur l'organisation de cette multifonctionnalité en milieu périurbain.

L'OCDE définit la multifonctionnalité de l'agriculture par *"l'existence de produits multiples, de base et autres, qui sont conjointement produits par l'agriculture et le fait que certains produits présentent les caractéristiques d'externalités ou de biens d'intérêt public"* (Maier & Shobayashi, 2001). On considère donc que l'activité agricole, outre sa fonction première de production, génère en parallèle des paysages, des nuisances et donc un cadre de vie.

L'agriculture est source de nombreuses externalités positives ou négatives (Maier & Shobayashi, 2001; Abler, 2004). Les externalités agricoles négatives correspondent essentiellement aux pollutions environnementales et aux nuisances engendrées par certaines activités agricoles. A l'inverse, l'agriculture peut également permettre de limiter certains dégâts environnementaux (barrières naturelles contre les tempêtes, entretien des sols et limitation des inondations). Parmi les externalités positives, notons également la production de biens publics tels que l'entretien des paysages à travers des dimensions esthétiques et culturelles. Bien évidemment, l'ampleur des différentes externalités positives ou négatives créées par l'agriculture est largement dépendante des pratiques agricoles mises en place. On parle alors de jointure de production entre biens agricoles et externalités.

## Résultats

Le présent rapport se découpe en 3 parties. La première partie présente la construction d'un modèle théorique d'économie urbaine qui endogénéise les paysages périurbains. Dans un premier chapitre, nous détaillons le fonctionnement du modèle et nous montrons comment différentes configurations urbaines émergent en fonction des hypothèses faites sur les paramètres du modèle. Dans le deuxième chapitre, nous introduisons une politique paysagère, qui prend ici la forme d'une politique agri-environnementale et nous en étudions les effets sur les formes urbaines et la redistribution des richesses entre les agents.

Nous consacrons la deuxième partie du rapport à la présentation de la méthodologie de création des données sur les quatre aires urbaines. Dans le troisième chapitre nous détaillons la procédure d'identification de l'urbanisation pour chaque date retenue. Le quatrième chapitre est consacré à la construction de l'ontologie géographique des paysages.

Enfin, la dernière partie du rapport présente les analyses empiriques. Le cinquième chapitre présente les analyses de données permettant l'identification des liens entre paysages et étalement urbain. Le sixième et dernier chapitre détaille l'estimation d'un modèle d'allocation et de changement des usages du sol.

La première partie a été intégralement publiée dans les meilleures revues internationales en économie urbaine, en économie agricole et en économie de l'environnement. Les autres parties sont en cours de valorisation. La production scientifique liée au projet PAYTAL est détaillée en Annexe C.

### Apports théoriques

D'abord, nous avons développé un modèle théorique original qui intègre diverses dimensions. Il rend compte des effets de long terme de la dynamique urbaine en intégrant un équilibre spatial qui dépend du comportement de plusieurs agents (des ménages urbains, des ménages périurbains et des agriculteurs). Dans ce modèle, décrit dans la première partie, ce sont les comportements de ces agents qui façonnent le cadre de vie périurbain, ce qui influence la forme des villes. Ce modèle donne une nouvelle explication à l'apparition du mitage qui n'avait jamais été évoquée dans la littérature. D'autre part, on retrouve dans le modèle les grands résultats de la nouvelle économie urbaine à savoir qu'une augmentation des revenus des ménages, ou une diminution des coûts de transports, favorise l'étalement urbain. Ces résultats sont enrichis de nouveaux éléments. D'abord, en introduisant un espace mixte, nous montrons qu'une augmentation des revenus des ménages éloigne la limite de l'aire urbaine, accroît la taille des zones périurbaine et urbaine et augmente la densité dans le périurbain. Une augmentation des coûts de transports ou une diminution des prix agricoles a exactement l'effet inverse. Ensuite, Le modèle montre le rôle des préférences pour le cadre de vie et de la capacité qu'à l'activité économique, l'agriculture donc, à fournir un cadre de vie agréable. Nous identifions les différentes formes d'urbanisation associées à différentes valeurs de ces paramètres.

Dans le modèle théorique que nous développons, les formes du développement urbain (extension urbaine, mitage ou absence de zone périurbaine) ainsi que la densité dans la zone périurbaine, qui est envisagée comme un espace mixte où les ménages et les agriculteurs partagent le sol, dépendent de déterminants économiques (revenus, coûts de transports, prix des biens, etc.) mais aussi de l'intensité de l'activité économique (ici l'agriculture) et de facteurs propres à cette activité qui peuvent varier à l'échelle régionale ou inter-régionale (type d'agriculture, etc.).

Dans notre modèle, des agriculteurs et des ménages se partagent l'usage du sol dans le périurbain. Les agriculteurs valorisent la proximité à la ville, pour y vendre leur production ou pour eux-mêmes (accès aux services, emplois secondaires, etc.). On a donc une agriculture structurée à la von Thünen. Ainsi, les activités agricoles sont influencées par la distance qui les sépare de la ville. Près des villes, les exploitations agricoles ont tendance à être plus intensives, caractérisées par un niveau d'utilisation d'intrants par hectare plus élevé. Plus loin des villes, l'agriculture devient plus extensive, à mesure que le niveau d'utilisation d'intrants non-fonciers diminue. Beckmann (1972) montre que dans le cas où différents types d'agriculture sont présents dans l'espace étudié, on observerait de la même manière un gradient de rentes d'enchère continu et décroissant. L'obtention de gradients décroissants pour l'intensité agricole et la rente d'enchère foncière, par ailleurs cohérents avec les observations empiriques (Katzman, 1974; Heimlich & Barnard, 1992; Cavailhès & Wavresky, 2007), est exclusivement due à notre hypothèse de comportement Von Thünénien de la part des agriculteurs dans notre modèle.

Le poids que fait peser l'urbanisation sur les activités agricoles en renchérissant le foncier agricole et qui amène les agriculteurs à intensifier leur production ce qui a des effets néfastes sur les paysages et le cadre de vie (arrachage de haies, rectifications/modifications de cours d'eau et d'alignements, utilisation plus importante d'intrants, constructions de bâtiments agricoles (serres, etc.), ...). Nous considérerons que les aménités agricoles résultent d'un solde net d'externalités agricoles positives (qualité paysagère, biodiversité) et d'externalités négatives (pollution, nuisances diverses). Les systèmes d'exploitations agricoles extensifs sont susceptibles de produire un haut niveau d'aménités agricoles, de par le fait que leurs itinéraires techniques favorisent la co-production d'externalités positives et que la moindre utilisation d'intrants non fonciers diminue le flux d'externalités négatives. Par conséquent, dans notre économie spatialisée, nous faisons l'hypothèse que les exploitations localisées à proximité de la ville produisent un flux net d'externalités plus faible parce qu'elles utilisent une quantité d'intrants par hectare plus importante. En s'éloignant progressivement de la ville, l'agriculture devient plus extensive et la co-production d'externalités agricoles augmente (voir figure 1).

Les ménages effectuent leur choix de localisation résidentielle en arbitrant entre l'accessibilité au centre ville (CBD), la consommation d'espace résidentiel et le niveau d'aménités dont ils peuvent bénéficier. Les aménités agricoles sont valorisées par les ménages périurbains, lors

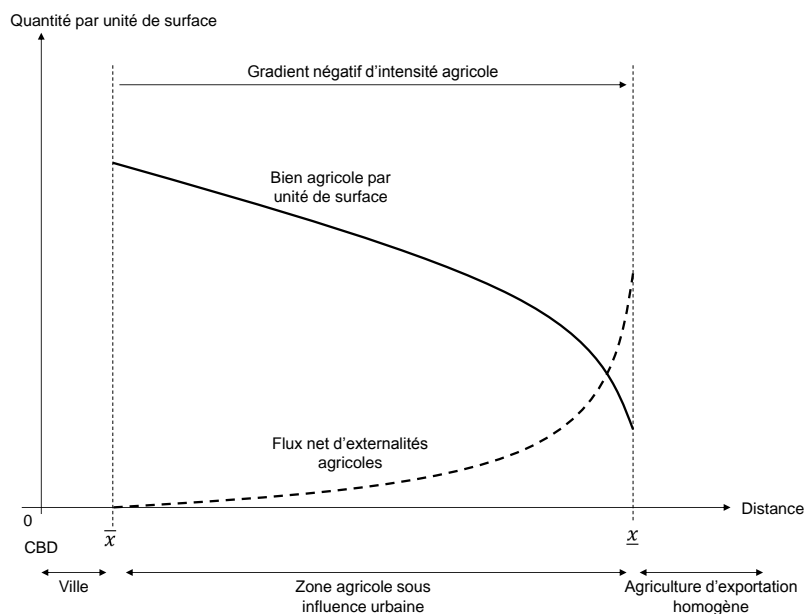


FIGURE 1 – Jointure entre la production agricole et les externalités dans un espace sous influence urbaine

de leur choix de localisation résidentielle. Le niveau des aménités agricoles a un impact sur cet arbitrage dans le sens où les ménages périurbains sont prêts à payer plus cher pour vivre dans un milieu pourvu d'un niveau suffisamment élevé d'aménités. Cependant, la conversion des terres agricoles à l'usage résidentiel engendre la destruction des aménités agricoles. L'artificialisation des terres atteint donc sa limite dans la détérioration de paysages valorisés et de l'environnement agricole, ce qui justifie l'introduction d'une externalité négative de congestion entre les ménages périurbains eux-mêmes.

Ainsi, le niveau des aménités du périurbain est déterminé de manière endogène au modèle est dépend à la fois du comportement des ménages et des agriculteurs et de la confrontation de leurs enchères sur le marché foncier. Ce modèle permet de montrer que 3 configurations spatiales peuvent émerger à l'équilibre, en fonction, notamment, des préférences des ménages pour les aménités et de la capacité de l'agriculture locale à produire des aménités.

La figure 2 montre cela. Lorsque les préférences des ménages ( $\gamma$ ) sont faibles, on n'observe pas de développement périurbain puisque les ménages n'ont pas de raison de s'installer en dehors de la ville s'ils ne valorisent pas beaucoup les aménités agricoles. Pour tout  $\gamma$ , dès que la capacité  $\delta$  de l'agriculture à produire des aménités devient plus élevée, le développement de la ville en mitage disparaît au profit d'une fusion entre la zone urbaine et la zone périurbaine. Le paramètre  $\delta$  échelonne la capacité de différents types d'agricultures à générer un flux net d'externalités. Prenons par exemple les prairies et forêts, où de hauts niveaux d'intensité de production n'empêchent pas que des niveaux d'aménités relativement élevés soient produits. À l'inverse, des activités agricoles telles que l'élevage génèrent de la production de fumier ou peuvent demander la construction de bâtiments de ferme supplémentaires, qui peuvent être

valorisés négativement par les ménages. Dès lors, le niveau d'intensité a un impact plus important sur le niveau d'aménités fourni. Au-delà, l'étalement urbain prend la forme d'extension urbaine car les aménités à la frontière urbaine sont suffisamment élevées pour les ménages périurbains. Le mitage apparaît sous deux conditions : des préférences élevées des ménages pour les aménités agricoles et une capacité modérée de l'agriculture à produire ces aménités.

D'après notre modèle, les villes entourées d'une agriculture fortement pourvoyeuse en aménités (des prairies par exemple) se développeraient par extension urbaine. A l'inverse, les villes entourées d'une agriculture caractérisée par une capacité plus faible à produire des aménités (par exemple, grandes cultures ou élevage), seraient d'avantage sujettes au mitage.

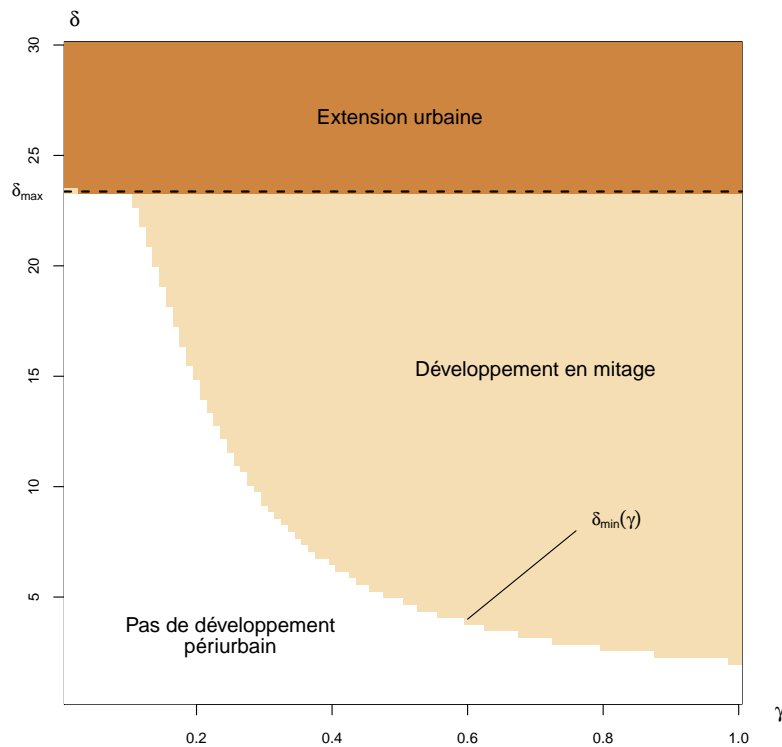


FIGURE 2 – Structure spatiale urbaine selon  $(\delta, \gamma)$

Dans un deuxième temps, nous mobilisons le modèle théorique que nous avons développé pour explorer les effets d'une politique d'amélioration du cadre de vie. Nous prenons l'exemple d'une mesure agri-environnementale. Nous montrons que les politiques de ce type, adoptées de façon volontaire, vont avoir tendance à être spatialisées car elles seront adoptées en fonction de leur coût d'opportunité privé qui est lié au fonctionnement du marché foncier. Cette politique aura alors un impact spatial marqué sur le développement urbain. Si la politique est en outre financée par les ménages, alors elle peut avoir des effets distributifs importants. Ainsi, nous montrons deux résultats importants. D'abord, une politique agri-environnementale (PAE), ou paysagère en général, peut accroître le mitage et le développement périurbain si elle n'est pas coordonnée à des outils de gestion et de planification urbaine. En effet, améliorer la qualité

de l'environnement dans le périurbain revient à le rendre plus attractif et donc à générer du développement périurbain. L'ampleur de ce phénomène dépend de la taxe nécessaire au financement de la politique, prélevée sur les ménages, et à l'ambition de la politique qui définira les agriculteurs adoptants. Enfin, la politique a des effets redistributifs importants en faveur des agriculteurs et des ménages résidents dans la zone ciblée par la politique et en défaveur des autres ménages qui financent la politique publique sans en bénéficier. Face à cela, on ne peut que recommander la coordination des politiques agricoles et des politiques d'urbanisme dans les zones sous influence urbaine.

La présence d'aménités naturelles est un facteur fort d'étalement urbain et nous nous sommes donc appuyés sur un modèle de ville monocentrique dans lequel les aménités et le cadre de vie sont modifiés par les agriculteurs dont le comportement est endogénéisé. L'introduction du comportement des agriculteurs dans un modèle de ville monocentrique est innovant et notre modèle permet de comprendre les interconnexions potentielles entre des aménités qui varient dans l'espace et les choix de localisation des ménages, particulièrement dans l'hypothèse où une politique publique est introduite pour encourager les agriculteurs à produire des aménités. Nos résultats théoriques sont cohérents avec les analyses empiriques qui ont été menées pour mettre en évidence ces interconnexions (Irwin & Bockstael, 2004; Roe *et al.*, 2004; Towe, 2010; Geniaux & Napoléone, 2011).

En fonction des caractéristiques de la politique agri-environnementale et de l'étendue de son adoption par les agriculteurs, nous identifions plusieurs effets potentiels de la PAE sur les formes du développement urbain. Augmenter la fiscalité sur les ménages, pour financer la politique agri-environnementale, engendre une diminution de leur fonction d'enchère, ce qui dans notre modèle, se traduit par une ville plus petite et une zone péri-urbaine réduite. Toutefois, en fonction de la localisation de la zone régulée, nous identifions également en effet indésirable de la politique lié à l'apparition d'une nouvelle zone de mitage. En effet, si la PAE est largement adoptée par les agriculteurs dans une zone facilement accessible aux ménages, alors le niveau des aménités produites par l'agriculture augmente et donne une incitation aux ménages à venir habiter dans cette zone, ce qui favorise l'urbanisation où elle est rendue possible par les politiques d'urbanisme. L'effet net des politiques agri-environnementales sur l'étalement urbain dépend alors de l'impact négatif de la taxe et de l'effet positif de l'augmentation des aménités.

Bien que le bien-être total ne varie pas du fait de l'hypothèse de ville ouverte, notre analyse des impacts de l'introduction de la PAE dans le modèle nous permet d'identifier plusieurs effets redistributifs, en termes de valeur du foncier, pour les propriétaires terriens. Les ménages urbains sont taxés pour financer la politique mais n'en bénéficient pas, ainsi la valeur des terres dans la zone urbaine tend à diminuer. Cette observation est également valable pour les ménages péri-urbains qui ne bénéficient pas de l'aménité car ils sont localisés en dehors de la zone d'adoption. En revanche, la politique agri-environnementale a des effets positifs pour les agriculteurs contractants qui bénéficient d'une aide et pour les ménages péri-urbains locali-

sés dans la zone d'adoption de la PAE car ils bénéficient d'une amélioration de leur cadre de vie.

Ce travail illustre la non-neutralité des politiques agri-environnementales vis-à-vis de la concurrence pour l'usage du sol. Notre modèle montre que l'introduction d'une politique peut induire des effets redistributifs sur la propriété foncière, pénalisant les propriétaires résidents en faveur des agriculteurs et des propriétaires de résidences situées dans les zones régulées. On peut alors recommander que les politiques agricoles et les politiques d'urbanisme soient coordonnées au sein d'un territoire et tiennent compte de leurs interconnexions dans une approche plus holistique qui reflète ces interdépendances.

### **Construction d'une ontologie de la perception des paysages**

Pour caractériser la dimension sensible des paysages<sup>11</sup> nous nous appuyons sur une ontologie, construite à partir des Atlas des Paysages. Nous montrons qu'une ontologie présente deux avantages décisifs pour l'étude systématique et à grande échelle des paysages : flexibilité et reproductibilité. La flexibilité tient à la possibilité d'utiliser de nombreuses sources d'informations pour construire un corpus de textes dont on peut inférer des connaissances. Nous ne mobilisons que les Atlas des Paysages, par souci d'homogénéité des sources et par économie de moyens, mais il serait tout à fait possible d'améliorer le contenu informationnel de l'ontologie en mobilisant aussi les chartes paysagères, les Plans d'Aménagement et de Développement Durable ou les Programmes Locaux de l'Habitat des Plans Locaux d'Urbanisme et des Schémas de Cohérence Territoriale. On pourrait également utiliser l'information sur les conflits territoriaux renseignées dans les contentieux administratifs et oppositions aux permis de construire ou dans les articles de presse qui s'y rapportent. Il serait également possible d'utiliser l'information contenue dans les légendes des photographies des observatoires photographiques du paysage, dans les brochures touristiques, etc. La localisation géographique de cette information est une question plus délicate mais peut se faire soit en utilisant le découpage administratif à l'échelle de l'information (commune, canton) soit par identification ponctuelle par les noms de lieux contenus dans la BDNYME de l'IGN par exemple. La reproductibilité tient à la possibilité de généraliser l'approche ce qui permet d'envisager un déploiement méthodologique à grande échelle spatio-temporelle, pour faire des études de cas et des analyses comparatives sur plusieurs aires urbaines ou dans le temps. En outre, la méthodologie pourrait être appliquée à d'autres pays pour des analyses et comparaisons internationales.

Notre objectif est de fournir un outil pour l'interprétation fine et généralisable des paysages, axé sur le volet « perception par les populations », et de pouvoir le relier à l'étalement urbain. Il s'agit alors de proposer un outil d'annotation de cartes, pour rendre compte des paysages selon les éléments qui les composent, leur dynamique et leur perception. Pour ce faire, il convient de résoudre quatre problèmes liés :

---

11. Pour leur dimension physique, nous faisons appel à des descripteurs de l'occupation des sols et à des métriques paysagères plus classiques.

- la constitution d'un corpus documentaire d'intérêt, regroupant Atlas des Paysages et documents d'urbanisme,
- l'extraction des informations pertinentes du corpus documentaire,
- la structuration de l'information qu'ils contiennent,
- l'intégration de l'information au reste des données spatialisées.

Nous concevons une ontologie du domaine, qui contribue à une description objective de la perception des paysages et devrait permet les comparaisons entre les paysages décrits et leur classification. Si d'autres approches recourent à des questionnaires (Lelay *et al.*, 2005), nous exploitons ici les "atlas du paysage" (Soufflet-Leclerc, 2007), documents standardisés au niveau national et contenant les informations recherchées (cf. figure 3). Le défi posé par ces documents réside dans la difficulté d'identification des termes spécifiques au champ lexical de la perception.

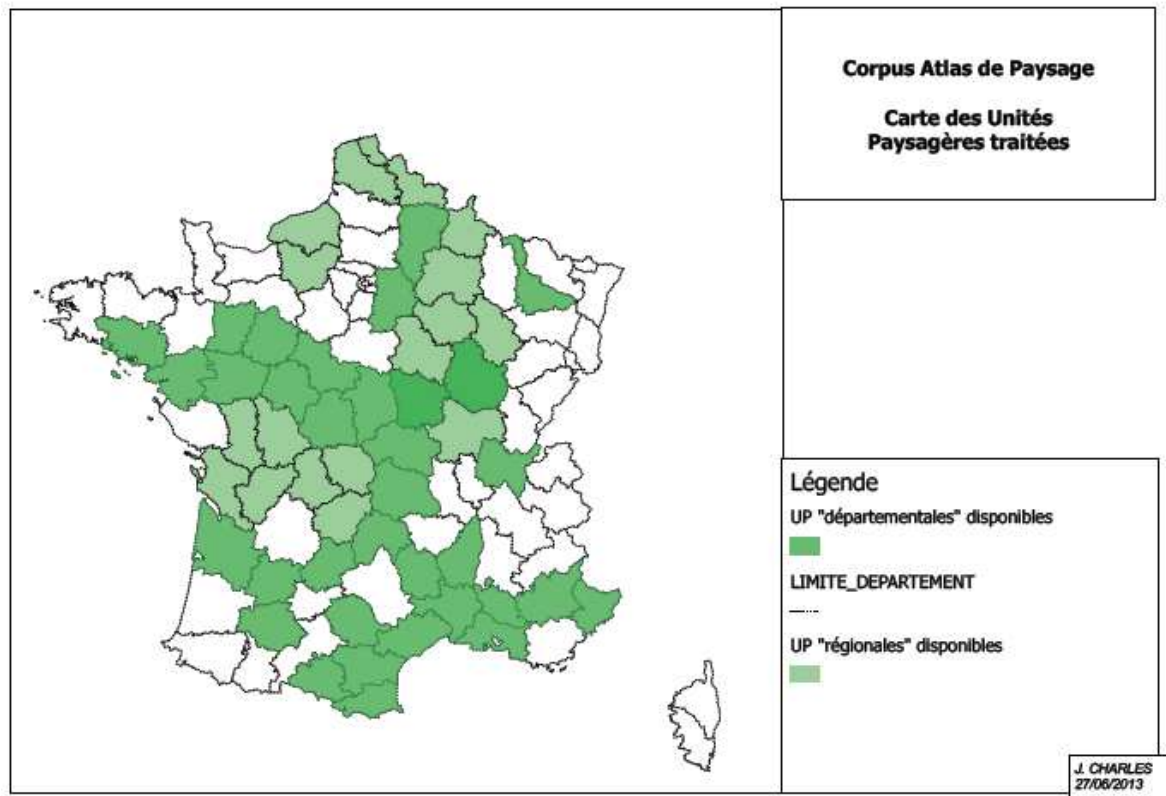


FIGURE 3 – Carte des unités paysagères (UP) qui ont pu être incluses dans le corpus.

Les ontologies, définies comme des spécifications formelles explicites de termes d'un domaine et de relations entre elles (Gruber, 1993), ont « vocation à décrire le monde réel et à rendre les informations modélisées accessibles et partageables » (Cullot *et al.*, 2003). Suivant les personnes, leurs besoins et le contexte, de nombreux points de vue sur un même sujet peuvent se chevaucher ou diverger. Il en résulte un manque de compréhension partagée qui peut



être comblé en réduisant les confusions conceptuelles et terminologiques, afin de construire un cadre unificateur au sein duquel sont fédérés les différents points de vue. L'ontologie, souvent considérée comme une conceptualisation, entraîne ou représente cette sorte de vision du monde pour un domaine donné (Uschold *et al.*, 1996).

Appliquée au paysage, l'ontologie pourrait donc constituer un « moyen de médiation sémantique » (Lepczyk *et al.*, 2008) répondant au problème de polysémie du concept de paysage (Forman & Godron, 1981). Plus particulièrement, l'utilisation d'ontologies permet de créer un réseau de relations et de mettre en évidence la nature des connections clés entre les éléments d'un domaine ou entre différents domaines (Uschold *et al.*, 1996). Or, le paysage a la particularité de ne pas être caractérisé par une seule catégorie d'éléments (physiques, naturels, historiques, ...) mais plutôt de représenter la totalité de ces éléments (Cataldo & Rinaldi, 2010). La connaissance du paysage doit donc prendre en compte ces différentes catégories, qu'il est possible de relier par des ontologies. La perception est l'un de ces éléments constitutifs du paysage, particulièrement concerné par la problématique des différences de point de vue. L'utilisation d'une ontologie peut fournir un modèle normatif qui intègre les différents points de vue, tout en cernant les principales caractéristiques de chacun, afin de donner une vue à la fois globale et locale du domaine de la perception du paysage.

Les documents issus de l'extraction des textes des Atlas des Paysages ont été pré-traités selon la méthodologie suivante :

- import sous forme de vecteur de textes dans  $\mathbf{R}$ ,
- premier nettoyage amenant à la suppression des mots-outils et termes parasites,
  
- découpage du texte de chaque Atlas des Paysages en différentes parties correspondant d'un part aux textes généraux se rapportant à l'ensemble du territoire et d'autre part aux textes relatifs à chaque unité paysagère,
- nettoyage des textes : nous avons procédé à une lemmatisation, grâce à l'algorithme de stemming de Porter et à un dictionnaire personnalisé,
- transformation du corpus en matrice termes/documents, les documents étant les textes des unités paysagères que nous avons découpés,
- ajout de méta-données : à chaque texte sont associées des méta-données telles que l'année de réalisation, le nom de maître d'ouvrage, le nom du ou des maîtres d'œuvre ainsi que les domaines d'expertise de ces derniers.

Afin de mieux comprendre le corpus créé et la place du vocabulaire de la perception en son sein, nous en avons réalisé une première étude avec le logiciel Tropes (Molette, 2009). Il s'agit d'un logiciel d'analyse sémantique et de fouille de textes. La méthode d'extraction terminologique de Tropes repose sur des taxonomies nommées scenarii. Ces scenarii sont conçus pour enrichir et filtrer les classes d'équivalents (les concepts et termes associés) en fonction d'une stratégie d'analyse.

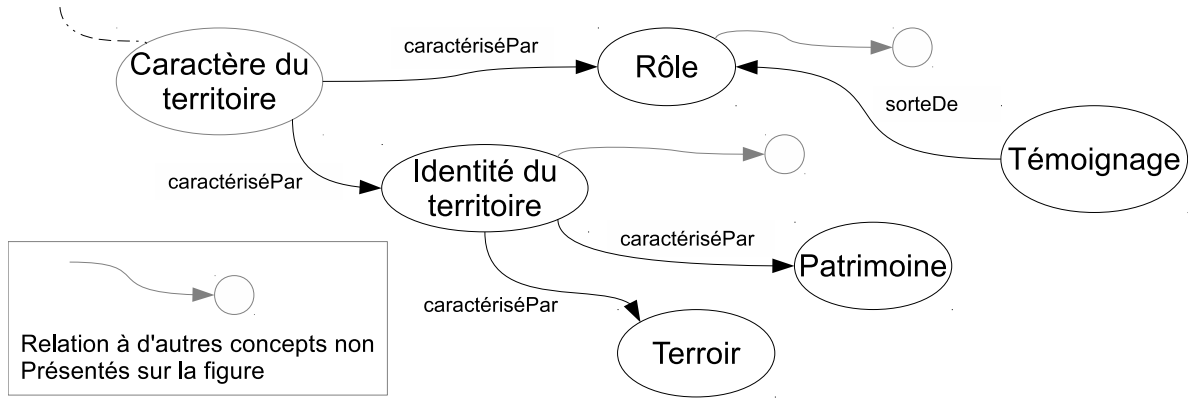


FIGURE 4 – Représentation d'une partie du concept "Caractère"

Sur cette trame, nous avons constitué une première mouture de l'ontologie suivant la méthode de construction de (Bourigault & Aussenac-Gilles, 2003). Elle présente quatre étapes :

1. identification des termes relatifs à la perception du paysage,
2. choix des critères de regroupement des termes,
3. établissement des concepts et relations par une approche experte,
4. enrichissement par étendue du corpus analysé.

L'analyse des termes, suivant leurs ressemblances thématiques et/ou terminologiques, a abouti à la répartition de l'ensemble des mots dans 7 groupes différents, comprenant chacun des noms, des adjectifs, des verbes et parfois des adverbes. Par regroupement, nous avons fait émerger des arborescences de concepts, dont la figure 4 donne une illustration centrée autour du concept de "caractère du paysage".

Ces concepts sont reliés entre eux. Par exemple, le "caractère" est une composante du paysage, à l'origine des sentiments ressentis lorsque le paysage est perçu. Le concept de "caractère" est donc relié aux autres comme présenté sur la figure 5.

Finalement, la première version de l'ontologie, basée sur l'Atlas des Paysages de Maine-et-Loire, comporte 77 concepts au total, reliés par des relations d'hyponymie, de méronymie, d'antonymie ou de causalité. Cette ébauche d'ontologie a été complétée en élargissant l'analyse textuelle aux Atlas des Paysages des départements limitrophes. L'ontologie finale compte 144 concepts et la partie la plus en amont présente la structure illustrée par la figure 6.

La "perception" du "paysage" est ici définie comme le fait de voir ("vue") les différents "aspects" du paysage, mais aussi d'en ressentir ("sentiment") les caractéristiques ("caractère"). De plus, le paysage évolue dans le temps ("évolution"), subissant des "événements" ou des "transformations" qui le modifient et changent la perception qui en est faite. Plus précisément, le concept "aspect" du paysage englobe la "texture", la "lumière", la "couleur" telles

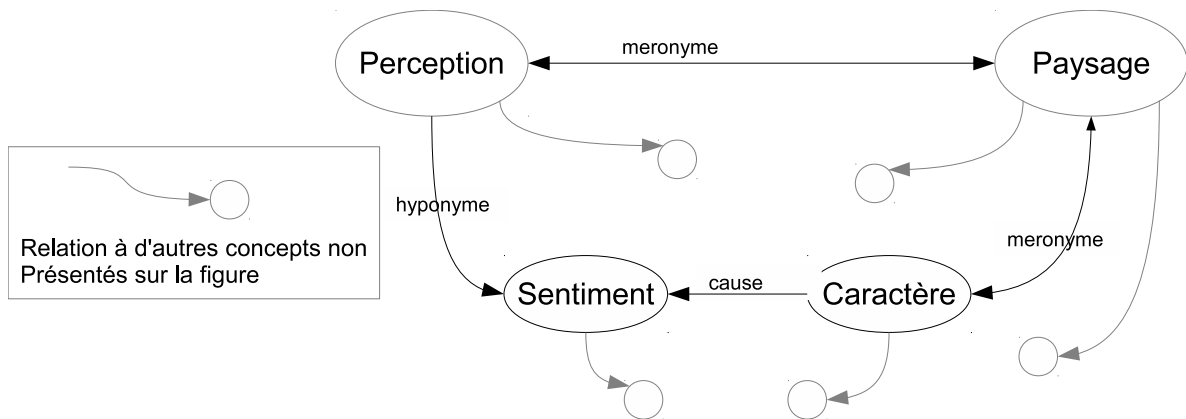


FIGURE 5 – Place du concept 'Caractère' au sein de l'ontologie

qu'elles sont perçues et décrites, ainsi que l'évocation du niveau de "visibilité" ou d' "occlusion" du paysage, et enfin sa "composition". Cette dernière comprend un large vocabulaire relatif aux "formes" et à la "variété" des constituants du paysage, ainsi que des termes décrivant leur "organisation" (répartition, structure) et leur "échelle" (profondeur, ouverture). Le "caractère" du paysage est décliné en différents types de "qualités" qui lui sont attribuées, en diverses "ambiances" qu'il dégage. Il décrit également les "rôles" que le paysage peut revêtir (représentation, expression, capacité d'influence, d'attractivité) et le vocabulaire employé autour de l'aspect identitaire du paysage (singularité, renommée, temporalité).

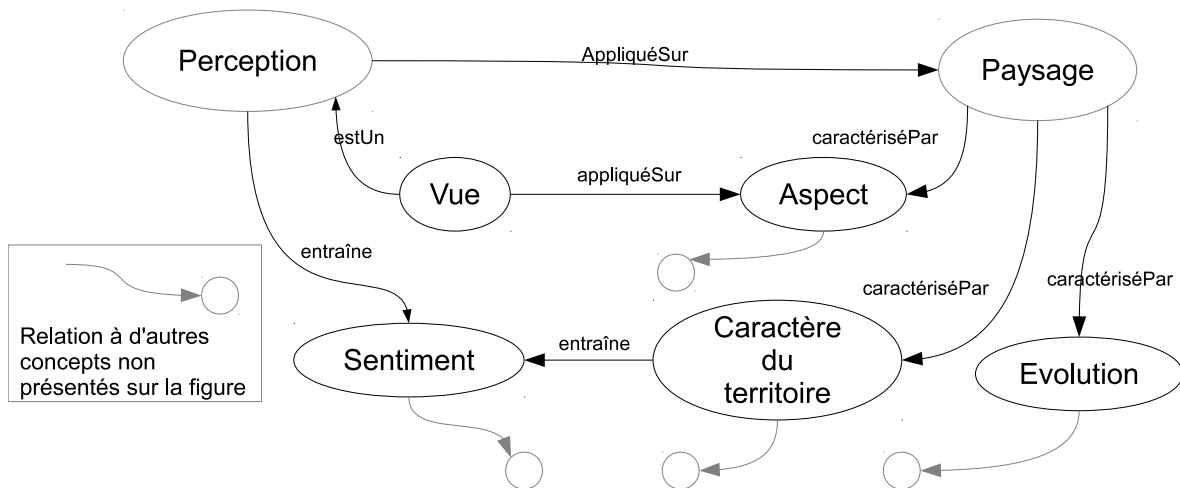


FIGURE 6 – Partie supérieure de l'ontologie de perception du paysage

Une application possible de l'ontologie est l'annotation de cartes des unités paysagères. Il s'agit de rechercher les termes de l'ontologie dans les paragraphes descriptifs de chaque unité pour y associer les concepts pertinents. Cette méthode a été appliquée manuellement sur les paragraphes « Mots clés – Ambiances » de chaque unité paysagère de l'Atlas des Paysages du Maine-et-Loire. Le résultat est présenté sur la carte figure 7.

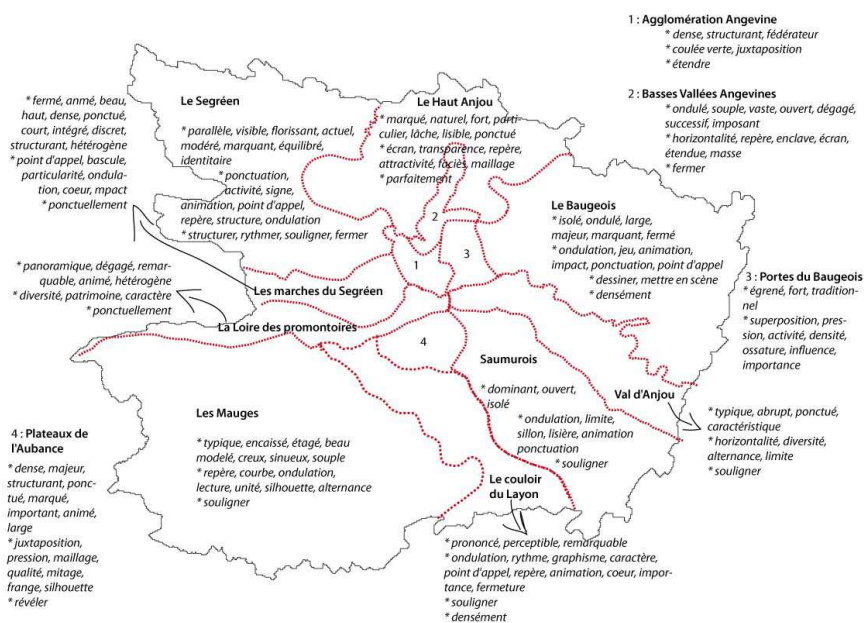


FIGURE 7 – Carte des unités paysagères du Maine-et-Loire annotée avec les concepts de l'ontologie

Cette carte fait apparaître des annotations différentes selon l'unité paysagère considérée, ce qui suggère des différences de perception du paysage selon les territoires.

Par la suite, nous avons développé notre propre ontologie, basée sur la première mouture établie pour le Maine-et-Loire, par une approche experte. Dans le squelette de base de cette ontologie, la "perception" s'applique sur le "paysage" qui est perçu par l'intermédiaire d'un "médiateur", le sens utilisé, qu'il s'agisse d'un "récepteur direct" (toucher) ou "indirect" (ouïe, odorat, vue). Ce "paysage" est composé d' "éléments sensoriels" ("auditifs", "palpables", "olfactifs", "visuels") et "conceptuels" ("ambiance", "valeur", "évolution", "diversité"). La "perception" regroupe les effets d'une "lecture objective" ("organisation spatiale"), d'un "regard subjectif" ("caractère" du paysage) et d'"émotions/affects" "positifs", "négatifs" ou "impassibles".

Nous pouvons toutefois soupçonner un biais de subjectivité introduit par l'auteur de l'Atlas des Paysages, malgré les recommandations énoncées pour sa réalisation. C'est en effet un document chargé de médiatiser la/les perception(s) d'un territoire. Cette médiatisation est nécessairement une interprétation - ce qu'encourage l'approche sensible du paysage - et à ce titre susceptible de « dérives interprétatives » (Lahire, 2007). L'approche collective d'un diagnostic partagé peut répondre en partie à ces problèmes (?) mais ceci au risque de renforcer l'indexicalité du texte (Garfinkel, 1967), les mots utilisés étant alors propres à la communauté

ayant rédigé le document. Nous nous sommes donc proposé de travailler sur l'ensemble des Atlas des Paysages afin de savoir si la nature de l'auteur est susceptible d'influencer le type de vocabulaire utilisé et le cas échéant pour identifier la nature et l'ampleur du biais spécifique à l'Atlas des Paysages.

Finalement, nous avons abouti à la mise en place d'une ontologie de perception des paysages. Cette ontologie, au format OWL, inclut 223 concepts. Le "coeur" de cette ontologie est présenté en figure 8.

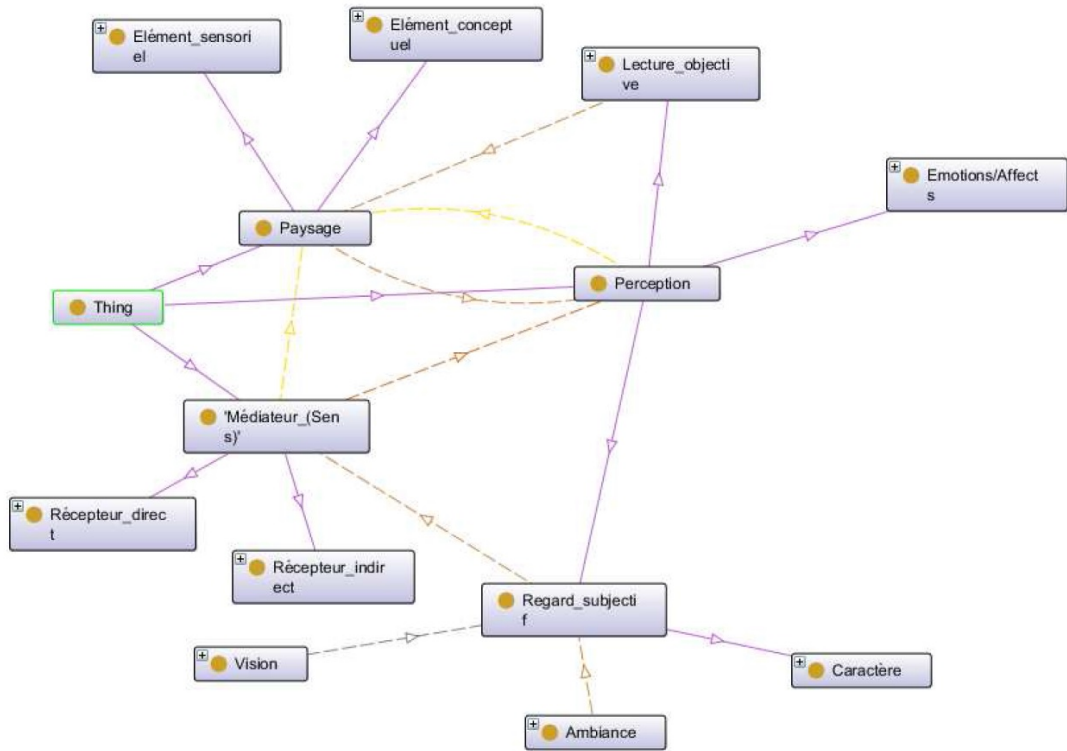


FIGURE 8 – Partie supérieure du squelette d'ontologie mis en place.

## Estimation d'un modèle de changement d'allocation des usages du sol

Enfin, nous estimons un modèle économétrique d'allocation des sols qui rend compte de l'impact des déterminants économiques et paysagers, dans leurs dimensions physique et perceptive, sur l'urbanisation. Le modèle économétrique repose sur une transcription du modèle économique décrit plus haut. Dans ce modèle, on explique la probabilité qu'un pixel soit urbanisé sur une période en fonction de différents descripteurs de la rente d'usage du pixel dans différents usages alternatifs (agricole, forestier et urbain). Ces descripteurs tiennent, en autres, de l'accessibilité aux emplois et services, des coûts de conversion d'un usage à l'autre et de la valeur agronomique des sols. Nous incorporons les externalités entre ménages et des descripteurs physiques du paysage (occupation du sol, métriques paysagères). Ce modèle nous sert à estimer la probabilité conditionnelle qu'un pixel soit urbanisé en fonction de son appartenance

à une unité paysagère. Cette probabilité a été expurgée de la dimension physique des paysages à la première étape. Elle est mise en relation, par une méta-régression, aux descripteurs construits à partir de l'ontologie. Nous pouvons ainsi confirmer que les aspects culturels des paysages jouent un rôle non négligeable sur l'urbanisation et identifier les composantes des perceptions qui jouent le plus sur l'urbanisation.

La première étape nous conduit à l'estimation des 16 modèles logit multinomiaux (MNL) pour l'aire urbaine d'Angers sur la période 2000-2010. Elle est effectuée par maximum de vraisemblance<sup>12</sup>. Les résultats sont présentés pour trois modèles identifiés (1), (6) et (16) représentant 3 spécifications intermédiaires. Le modèle (1) est le modèle réduit. Il ne contient aucune des variables de contrôle expliquant potentiellement les aspects physiques des paysages. À l'opposé, le modèle (16) constitue le modèle complet avec l'ensemble des contrôles. L'inclusion / exclusion de chacune de ces 4 variables de contrôle (métriques paysagères, Orientation Technico-économique des Exploitations (OTEX), Petites Régions Agricoles (PRA), et cantons) permet de construire les 16 modèles. Le modèle (6) est un des 14 modèles intermédiaires, choisi au hasard pour l'illustration. Il tient compte des PRA et des métriques paysagères. Les résultats des estimations pour ces modèles sont présentés dans le tableau 1.

Tous ces modèles montrent des résultats cohérents et très proches. Les coefficients pour un usage du sol final en agriculture (en 2010) sont pris en référence et normalisés à 0. Le tableau 1 présente donc les coefficients estimés pour les deux autres catégories d'usage du sol : forêt et urbain. Un coefficient positif indique<sup>13</sup> que la variable concernée favorise l'usage du sol final concerné par rapport à l'agriculture prise en référence. C'est l'inverse pour un coefficient négatif.

Parmi les 16 modèles estimés, le modèle (1) est le modèle qui ajuste le moins bien les données. Inversement, le modèle complet (16) est le meilleur modèle. C'est donc sur ce modèle que nous fondons la discussion qui suit. Comme nous nous intéressons à la dynamique de l'urbanisation, nous nous limitons à une discussion rapide du signe des coefficients estimés dans le modèle (16) sur les parcelles urbanisées en 2010.

Pour tenir compte d'effet potentiellement non linéaires, nous avons systématiquement introduit un terme quadratique sur les distances. La distance à Angers, c'est-à-dire la distance aux emplois, a un effet linéaire positif et un effet quadratique négatif. Ceci indique une relation concave, en U inversé, entre la distance au CBD et la probabilité d'urbanisation. Ainsi, les parcelles non urbanisées sur la commune même d'Angers ont une probabilité plus faible d'être urbanisées que des parcelles situées à proximité immédiate d'Angers (vers 2 km). Il faut y voir ici deux effets. Le premier est dû au fait que ces espaces ont une très grande valeur dans leur état non-urbanisé, car ils procurent des aménités aux angevins et sont donc très certainement

---

12. Les résultats détaillés de l'estimation des 16 modèles sont disponibles auprès des auteurs.

13. Il est en général plus aisé d'interpréter les coefficients d'un modèle MNL en termes d'effets marginaux, toutefois comme les coefficients de la première étape ne sont pas notre centre d'intérêt, nous nous limitons à une discussion rapide de leur signe.

Variable	modèle (1)		modèle (6)		modèle (16)	
	forêt	urbain	forêt	urbain	forêt	urbain
Constante	-1,9051*** (0,4969)	4,4063*** (0,4994)	-0,9952* (0,5554)	3,2803*** (0,6319)	-16,2558*** (1,0831)	5,4819*** (1,6161)
Distance CBD	-0,1700*** (0,0238)	0,0217 (0,0362)	-0,2052*** (0,0286)	0,1811*** (0,0441)	-0,1027*** (0,0301)	0,1622*** (0,0478)
(Distance CBD) <sup>2</sup>	0,0016*** (0,0003)	-0,0008 (0,0006)	0,0016*** (0,0004)	-0,0035*** (0,0007)	0,0002 (0,0005)	-0,0030*** (0,0008)
Distance SBD	0,3861*** (0,0511)	-1,4226*** (0,0685)	0,3673*** (0,0514)	-1,5972*** (0,0698)	0,5032*** (0,0521)	-1,6261*** (0,0706)
(Distance SBD) <sup>2</sup>	-0,0601*** (0,0115)	0,2284*** (0,0179)	-0,0510*** (0,0116)	0,2575*** (0,0180)	-0,0807*** (0,0118)	0,2617*** (0,0182)
Revenu commune	-0,0737*** (0,0152)	0,0514** (0,0212)	-0,0984*** (0,0197)	0,1049*** (0,0287)	-0,0458** (0,0203)	0,0968*** (0,0299)
Revenu commune × Distance CBD	0,0067*** (0,0008)	-0,0010 (0,0012)	0,0082*** (0,0011)	-0,0037** (0,0016)	0,0055*** (0,0011)	-0,0046*** (0,0016)
Distance route	0,1321*** (0,0167)	-0,1829*** (0,0256)	0,1471*** (0,0175)	-0,1312*** (0,0280)	0,2697*** (0,0181)	-0,1030*** (0,0297)
(Distance route) <sup>2</sup>	-0,0131*** (0,0021)	0,0213*** (0,0032)	-0,0179*** (0,0022)	0,0140*** (0,0035)	-0,0295*** (0,0023)	0,0114*** (0,0037)
Pente	0,0523*** (0,0066)	0,0414*** (0,0133)	0,0601*** (0,0066)	0,0574*** (0,0137)	0,0590*** (0,0066)	0,0566*** (0,0138)
(PEnte) <sup>2</sup>	0,0005 (0,0003)	-0,0028*** (0,0009)	0,0005 (0,0003)	-0,0035*** (0,0009)	0,0004 (0,0003)	-0,0035*** (0,0009)
PNR	-0,1083** (0,0452)	0,3143*** (0,0708)	0,2100** (0,0977)	0,5258*** (0,1290)	0,1875 (0,1183)	0,3394** (0,1464)
Équipements commune	0,0003* (0,0001)	-0,0006*** (0,0002)	0,0014*** (0,0004)	0,0051*** (0,0005)	0,0025*** (0,0004)	0,0034*** (0,0006)
Équip, comm, × Distance SBD	-0,0002*** (0,0001)	0,0003*** (0,0001)	-0,0002*** (0,0001)	0,0004*** (0,0001)	-0,0002*** (0,0001)	0,0004*** (0,0001)
Voisinage urbanisé en 2000	-2,5709*** (0,2617)	10,5417*** (0,2306)	-2,3227*** (0,2618)	10,4405*** (0,2314)	-2,2980*** (0,2621)	10,2813*** (0,2330)
(Voisinage urbanisé en 2000) <sup>2</sup>	4,5150*** (0,4968)	-6,7404*** (0,3464)	4,0270*** (0,5001)	-6,8611*** (0,3480)	3,4987*** (0,5040)	-6,8040*** (0,3502)
Agricole en 2000	-0,5447 (0,3372)	-7,6008*** (0,0966)	-0,5055 (0,3445)	-7,7312*** (0,0975)	-0,4794 (0,3467)	-7,7661*** (0,0977)
Forêt en 2000	4,3465*** (0,3377)	-6,4888*** (0,1299)	4,3437*** (0,3449)	-6,6466*** (0,1309)	4,2310*** (0,3472)	-6,7874*** (0,1317)
Inondable	0,3772*** (0,0739)	-1,7645*** (0,1690)	0,5942*** (0,0773)	-1,7166*** (0,1714)	0,5385*** (0,0773)	-1,6997*** (0,1712)
La Loire des promontoires	-0,3129** (0,1476)	-0,0297 (0,1254)	-0,6866*** (0,1856)	-0,1854 (0,1624)	-0,1755 (0,1878)	0,0507 (0,1646)
Le Beaugois	0,8524*** (0,1397)	-0,1303 (0,1330)	-0,6164*** (0,1713)	-1,2133*** (0,1816)	-0,2581 (0,1749)	-1,1897*** (0,1873)
Le Couloir du Layon	-0,6891*** (0,1529)	-0,3832** (0,1605)	-1,5626*** (0,2077)	-0,9975*** (0,2263)	-0,7630*** (0,2163)	-0,1787 (0,2463)
Le Haut Anjou	0,4870*** (0,1401)	-0,0911 (0,1296)	0,1320 (0,1588)	-0,8230*** (0,1627)	0,4399*** (0,1625)	-0,6516*** (0,1669)
Le Saumurois	0,2472* (0,1476)	-1,0813*** (0,1528)	-0,9861*** (0,1995)	-1,4529*** (0,2149)	-0,3897* (0,2066)	-1,3961*** (0,2321)
Le Segréen	-0,1375 (0,1410)	-0,4902*** (0,1310)	0,2956* (0,1574)	-0,4657*** (0,1539)	0,6877*** (0,1614)	-0,3199** (0,1571)
Le Val d'Anjou	-0,5234*** (0,1527)	-0,5322*** (0,1442)	-1,6716*** (0,1818)	-1,5493*** (0,1790)	-0,7593*** (0,1878)	-1,3475*** (0,1845)
Les Basses vallées angevines	0,1278 (0,1483)	-0,3769** (0,1468)	-0,5458*** (0,1663)	-1,3572*** (0,1738)	-0,2276 (0,1703)	-1,4730*** (0,1791)
Les Marches du segréen	0,0492 (0,1378)	-0,6846*** (0,1245)	0,4735*** (0,1609)	-0,5335*** (0,1493)	0,7876*** (0,1636)	-0,3997*** (0,1517)
Les Mauges	-1,2087*** (0,1998)	-1,0760*** (0,2640)	-2,0887*** (0,2482)	-1,8319*** (0,3195)	-1,2981*** (0,2609)	-0,8835*** (0,3397)
Les Plateaux de l'Aubance	-0,0559 (0,1457)	-0,3900*** (0,1366)	-0,8471*** (0,2009)	-0,7008*** (0,2005)	-0,1555 (0,2083)	-0,0115 (0,2199)
Les Portes du Beaugois	0,3615** (0,1404)	0,0003 (0,1184)	-0,2687 (0,1780)	-0,8539*** (0,1621)	0,2119 (0,1795)	-0,7221*** (0,1674)
PRA		non		non		oui
Cantons		non		oui		oui
OTEX		non		oui		oui
Métriques paysagères		non		non		oui
Observations		221 087		221 087		221 087
logL		-52 842		-52 113		-51 477
pseudo-R <sup>2</sup>		0,647		0,652		0,656
AIC		106 136		105 297		103 227

Les écarts-type sont entre parenthèses.

\*\*\*, \*\* et \* identifient les paramètres significatifs aux seuils de 0,01%, 0,05% et 0,1% respectivement.

TABLEAU 1 – Résultats de l'estimation des modèles logit multinomiaux (MNL)

protégés (par nécessairement par un zonage). Par ailleurs, ces espaces correspondent essentiellement aux bords de Maine, au lac de Maine et à la Plaine de l'Île Saint-Aubin qui sont inondables. Au delà de 2 km, les parcelles ont une probabilité décroissante d'être urbanisées, ce qui traduit bien l'effet de l'augmentation des coûts de transport au lieu de travail. L'effet linéaire de la distance au centre est négatif et l'effet quadratique est positif, ce qui traduit une relation convexe, décroissante mais de moins en moins. La probabilité d'urbanisation est donc plus forte à proximité immédiate des bourgs que lorsque que l'on s'en éloigne, ce qui traduit deux choses : la valeur de la proximité aux services et de la proximité sociale d'une part et, d'autre part, l'effet inobservé des documents de planification qui favorisent la contiguïté de développement urbain. Enfin, on observe la même relation décroissante et convexe pour la proximité au réseau routier principal ce qui traduit bien la valeur de ce réseau qui améliore l'accessibilité à Angers et aux principaux pôles régionaux.

Le revenu communal moyen a un effet positif, ce qui traduit bien la préférence des ménages périurbains pour des voisinages plus aisés et certainement avec moins de désagrément que les problèmes qui surviennent dans les zones plus défavorisées. C'est la manifestation classique des forces qui sous-tendent les situations de ségrégation. Le niveau d'équipement des communes a également un effet positif car les ménages valorisent les services, publics et privés, offerts par les municipalités (école, complexes sportifs, magasins, ...).

Les aménités naturelles jouent également un rôle. D'abord, les communes situées dans le Parc Naturel Régional de Loire-Anjou-Touraine ont une plus grande probabilité d'être urbanisées que les autres. Ceci rend compte des nombreuses aménités offertes par le parc. Inversement, les zones inondables ont une probabilité beaucoup plus faible d'être urbanisées. Les paramètres estimés sur les pentes rendent compte d'un phénomène largement observé, que l'on rencontre également dans l'étude de Cho & Newman (2005). La probabilité d'urbanisation augmente avec le dénivelé observé sur un pixel jusqu'à un point (environ 8 m) où elle diminue. Les ménages valorisent les reliefs et les vues mais les terrains trop accidentés ont des coûts de conversion trop élevés et des valeurs d'agrément plus faibles.

Enfin, les paramètres estimés sur les externalités de voisinage montrent également une relation en U inversé entre la probabilité de conversion d'une parcelle et sa probabilité d'urbanisation. De faibles niveaux d'urbanisation dans le voisinage d'une parcelle sont favorables à l'urbanisation d'une parcelle car ils abaissent les coûts de conversion (viabilisation) du terrain. Au delà d'un environnement urbanisé à 75%, la probabilité d'urbanisation diminue. Au delà, les externalités négatives de la densité (perte de vues, congestion, ...) deviennent alors prépondérants.

Pour l'effet de l'appartenance à une unité paysagère (UP), la référence est l'UP "*Agglomération angevine*". Ainsi, les signes négatifs sur les dummies des UP s'interprètent comme le fait que les paysages dans ces UP sont moins préférés.



Nous utilisons les effets marginaux estimés et leurs écarts-types pour estimer, dans une deuxième étape, le modèle de méta-régression qui nous permet de relier les données issues de l'ontologie et des analyses textuelles des descriptifs d'UP à la probabilité d'urbanisation.

Comme nous l'avons expliqué, nous nous sommes appuyés sur une analyse textuelle des Atlas des Paysages pour construire les données sur les perceptions mobilisées dans la deuxième étape. Deux approches opposées sont possibles (Lebart, 1994) : une approche lexicographique, qui s'appuie sur des dictionnaires *ad hoc* et/ou réduisant *a priori* le sens d'un corpus à la somme des mots qui le compose, et une approche sémantique, correspondant à la démarche d'ontologie dont nous avons parlé précédemment. Ces approches correspondent à des outils d'analyse textuelle différents (Meunier *et al.*, 2005). Quel que soit l'outil mobilisé, extraire des perceptions relatives au paysage via une telle analyse textuelle repose sur une hypothèse qui est que la personnalité de l'auteur n'est pas susceptible d'influencer la nature du vocabulaire utilisé. Autrement dit deux auteurs face à un même paysage le décriront avec les mêmes mots. En effet, les différents outils d'analyse textuelle reposent sur une hypothèse de stabilité interne du corpus (Rousselière & Vézina, 2009) dérivant de celle de répétition (Reinert, 2003). A partir d'une comparaison entre différents Atlas, Davodeau (2009) a souligné que les compétences des auteurs (suivant qu'ils soient paysagistes ou non) sont de nature à influencer la manière dont ils décrivent le paysage.

Pour mesurer le rôle de l'auteur, nous avons choisi une approche quasi-expérimentale. Cette approche consiste en deux étapes : une première réside dans l'identification des éléments observables susceptibles d'influencer le vocabulaire utilisé par les auteurs. Il s'agit ici des compétences que l'on classera en grandes catégories. Dans une seconde étape, on étudiera si les compétences ont une influence sur les différents indicateurs retenus. Une hypothèse implicite est ici que le choix des auteurs selon les compétences dont ils disposent est indépendant des caractéristiques des paysages à décrire. La méthodologie proposée pour la rédaction des Atlas des Paysages rend cette hypothèse relativement raisonnable.

Pour l'entrée lexicographique, des indicateurs de richesse de vocabulaire ont été estimés pour l'ensemble des territoires couverts par les Atlas des Paysages à notre disposition. Nous avons mobilisés différents grands dictionnaires *ad hoc* relatifs à certains thèmes présents dans les textes. L'indicateur retenu est la fréquence des termes relatifs à ces différents dictionnaires (architecture, botanique, économie, élevage, minéralogie, urbanisme, sylviculture, géologie, campagne, viticulture, religion, eau). Il a ensuite été centré-réduit sur l'ensemble des UP numérisées. On a de cette manière un indicateur qui permet de comparer les richesses relatives pour un même dictionnaire entre les différentes UP.

Nous avons ainsi 12 indicateurs de richesse de vocabulaire à notre disposition. L'influence des variables de compétences, ainsi que de la variable d'année de rédaction de l'Atlas des Paysages a été mobilisée par un système d'équations SUREG (Seemingly Unrelated Regression System) Zellner (1962), dont les résultats de l'estimation sont présentés dans le tableau 2.

	architecture	botanique	économie	élevage	minéralogie	urbanisme	sylviculture	géologie	campagne	viticulture	religion	eau
Paysagiste	-0.260	0.867***	0.740***	0.0814	0.437**	-0.867***	0.489**	0.819***	0.0905	0.820***	0.303	0.0258
Aménagement	5.576***	0.893	4.128***	-1.390	0.754	0.240	-1.515	2.804**	2.769**	0.877	2.069	-0.271
Architecte	2.025***	-0.848	1.247**	-0.113	-0.117	0.555	-1.336***	0.635	1.863***	0.288	0.297	-0.199***
Urbaniste	-2.021***	0.619	-2.003***	0.281	0.567	0.00496	2.037***	-0.605	-1.966***	-0.389	0.169	0.103
Géographe	1.892***	-0.706*	0.890**	0.0332	0.200	0.183	-0.664	0.605	1.521***	0.181	0.548	-0.00764
Historien	8.392***	1.253	4.132**	0.491	1.960	0.307	-2.161	4.577**	6.950***	3.399*	2.421	-0.358
Environnementaliste	-7.976***	-1.032	-3.922**	-0.606	-2.703	-0.0919	0.849	-5.203***	-7.113***	-3.531*	-3.367*	0.452*
Biologiste	5.377***	0.135	4.028***	-0.236	3.558***	-1.798	0.413	2.679**	5.278***	4.362***	2.453**	-0.806***
Hydrologue	11.91***	-0.882	9.269***	3.548	7.202**	-3.739	-1.758	5.946**	15.30***	12.71***	6.348**	-1.747***
Géologue	-12.36***	-2.114	-9.200***	-2.581	-6.419**	2.579	0.155	-7.012***	-12.33***	-9.571***	-5.931**	1.292***
Cartographe	-1.955***	-0.890**	-1.258***	-0.954***	-1.799***	0.200	-1.144***	-1.904***	-1.943***	-1.030**	-1.414***	0.156***
Géomaticien	7.306***	2.429*	4.583***	1.617	2.335	0.0147	0.209	4.949***	6.101***	3.159**	3.031**	-0.262
Infographiste	0.801***	0.621***	0.675***	0.424**	0.497*	0.504*	-0.303	0.394*	0.935***	0.360	0.560**	0.0691**
Agriculture	9.365***	1.733	5.506***	0.284	2.930	-0.526	-1.282	5.754***	7.343***	5.305**	4.360**	-0.755***
Design	-0.434	-1.598***	-0.387	-0.995**	-1.389***	0.506	-1.706***	-0.221	-1.188***	-0.566	-0.947***	0.0231
Énergie	8.087***	-0.462	3.545*	1.679	4.484**	-3.262*	-0.0616	4.510***	7.938***	7.947***	3.600**	-1.086***
Médiation	-3.367***	-0.170	-2.298***	-1.390**	-1.403*	1.368**	-0.150	-1.121*	-2.985***	-3.157***	-2.375***	0.378***
Web	-1.728***	-0.938	-1.625**	2.193***	0.399	-0.759	1.179*	-1.349**	-0.449	1.029	0.126	0.0111
Nb. auteurs	-0.963***	-0.226	-0.742***	0.0745	-0.228	0.126	0.172	-0.405*	-0.651***	-0.517**	-0.346	0.0864***
Année	-0.111***	0.0222	0.0140	-0.0739***	0.0335	0.0148	-0.00142	-0.0450*	-0.0530**	-0.0231	-0.00878	-0.00809**
Constante	223.6***	-44.56	-27.77	148.1***	-67.23	-29.56	2.564	90.06*	106.8**	46.07	17.59	17.49**
R <sup>2</sup>	0.303	0.362	0.268	0.488	0.201	0.228	0.330	0.355	0.431	0.244	0.301	0.286
matrice covariance	architecture	botanique	économie	élevage	minéralogie	urbanisme	sylviculture	géologie	campagne	viticulture	religion	eau
architecture	1,000	0.261	0.265	0.283	0.246	0.057	0.095	0.161	0.227	0.247	0.446	0.162
botanique		1,000	0.076	0.286	0.123	-0.170	0.416	0.122	0.229	0.113	0.313	0.094
économie			1,000	0.108	0.120	0.201	-0.008	-0.005	0.057	0.113	0.278	0.165
élevage				1,000	0.145	-0.034	0.173	0.171	0.427	0.154	0.288	0.124
minéralogie					1,000	0.118	-0.020	0.218	0.121	0.196	0.224	0.074
urbanisme						1,000	-0.097	-0.115	-0.003	-0.088	-0.096	0.283
sylviculture							1,000	0.117	0.148	-0.031	0.096	0.169
géologie								1,000	0.092	0.053	0.104	0.055
campagne									1,000	0.122	0.197	0.120
viticulture										1,000	0.215	-0.053
religion											1,000	0.145
eau												1,000

Les écarts-type sont entre parenthèses.

\*\*\*, \*\* et \* identifient les paramètres significatifs aux seuils de 0,01%, 0,05% et 0,1% respectivement.

TABLEAU 2 – Résultats de l'analyse SUREG

La matrice de variance-covariance des résidus montre l'existence de variables inobservables influençant les différents indicateurs de richesse de vocabulaire. Le résultat principal de l'estimation est que les compétences sont de bons prédicteurs des différences dans la richesse du vocabulaire utilisé. Cette analyse, souligne l'importance de contrôler pour ces compétences d'auteurs si l'on souhaite comparer les UP provenant d'Atlas des Paysages ayant des auteurs différents. L'analyse que nous effectuons par la suite n'est pas soumise à ce problème. Toutefois comme elle se focalise sur une aire géographique décrite par un unique Atlas, il est pertinent de ne pas prendre l'indicateur de richesse de vocabulaire que nous venons de tester, mais plutôt de s'appuyer sur l'indicateur provenant du scénario Tropes général. Cela nous conduit toutefois à faire une hypothèse qui est que le biais de subjectivité des auteurs de l'Atlas des Paysages de Maine-et-Loire est uniformément distribué sur l'ensemble des UP. Les travaux qui ont porté sur cet Atlas (voir par exemple (Lambert, 2014)) permettent de supposer que cette hypothèse est raisonnable.

Nous utilisons les effets marginaux estimés et leurs écarts-types pour estimer le modèle de méta-régression. Pour expliquer la variabilité des mesures de probabilités conditionnelles, nous les régressons sur les indicateurs de richesse de vocabulaire se rapportant à plusieurs thématiques (dictionnaire) mais aussi sur l'importance de différents champs sémantiques (scénario Tropes général) tirés de l'ontologie dans la deuxième partie de ce rapport. Les indicateurs de richesse de vocabulaire sont mis à titre indicatif dans l'analyse car on vient de voir que les Atlas des Paysages pouvaient être touchés par un biais de richesse de vocabulaire lié à l'auteur. Nous centrons donc notre analyse sur les champs sémantiques extraits des Atlas des Paysages à partir du scénario Tropes. Les variables créées sont des variables de répartition du vocabulaire en pourcentage. Ainsi la catégorie résiduelle (Autres concepts) n'a pas été introduite dans les analyses. On interprète les résultats de la manière suivante : quel impact a une augmentation de la part du vocabulaire relatif à un concept donné (par rapport à la catégorie résiduelle) sur la probabilité d'urbanisation dans l'UP ? Le vocabulaire est alors vu comme indicateur de la présence ou non d'aménités recherchées par les individus. On fait ainsi une hypothèse implicite qui est que la nature et la richesse de la description qui compte et non la connotation positive ou négative de la description. Si cette hypothèse peut être discutée à un niveau national, Davodeau (2009) a bien mis en évidence que la conception en 2000 de l'Atlas des Paysages en Maine-et-Loire a eu pour objectif de mettre en avant l'approche sensible du paysage qui a eu tendance à réifier des références identitaires "toujours construites et jamais vraiment stabilisées". Les UP sont ainsi nommées selon une approche toponymique faisant recours à une valorisation des paysages traditionnels hérités. Les UP sont décrites comme autant de "paysage identitaire" accentuant le biais d'une description positive du lieu en raison même du sens que les individus y vivant peuvent lui donner.

Les résultats des estimations sont reportés dans le tableau 3. Comme on peut le voir, les indicateurs du contenu des descriptions des unités paysagères expliquent la quasi-totalité de la variation des effets mesurés. La part de la variance inter-estimations expliquée par le modèle est mesurée par le coefficient  $R^2$  ajusté. Les variables explicatives mises dans les méta-modèles,

permettent donc d'expliquer entre 72% et 76% des différences mesurées entre les UP. Tous les tests montrent que les modèles sont nettement significatifs.

Nous tenons compte des différences entre les modèles estimés dans la première étape pour expliquer la variabilité des effets mesuré. En effet, si l'information qu'ils véhiculent est corrélée à celle véhiculée par les UP, alors leur exclusion peut introduire un biais de variable omise. Ce n'est pas le cas ici. Les coefficients estimés sur les métriques paysagères, les OTEX ou les cantons ne sont pas significatifs. Les dummies sur les UP reflète donc une autre dimension que ces variables que nous interprétons comme la composante culturelle des paysages. Notons toutefois que le découpage en PRA est significatif. Comme nous l'avions pressenti, la construction des PRA reflète bien une dimension historico-culturelle des paysages. Pour tenir compte du fait que parmi les 16 modèles générant les données de cette deuxième étape il y a de meilleurs modèles que d'autres, nous introduisons également le critère d'information d'Akaike (AIC) mesuré pour ces modèles. Il n'est jamais significatif ce qui indique que les effets mesurés sont indépendants de la qualité du modèle estimé à la première étape.

À l'inverse, nos indicateurs textuels et sémantiques du contenu des descriptions des UP de l'Atlas des Paysages du Maine-et-Loire jouent un rôle pour expliquer les différences entre les probabilités d'urbanisation de celles-ci. Des UP décrites avec un vocabulaire plus riche relatif à l'agriculture et l'environnement ont eu une probabilité plus forte d'être urbanisées. Ainsi 1% d'augmentation de la part de ce concept dans l'ensemble du vocabulaire conduit à augmenter de 0,33% la probabilité d'urbanisation. Il est intéressant de souligner que nous retrouvons les mêmes résultats concernant le vocabulaire relatif aux "comportements et sentiments". Molette (2014) ainsi que Piolat & Bannour (2009) ont bien mis en évidence l'intérêt du logiciel Tropes comme logiciel d'analyse sémantique des textes particulièrement pertinent pour repérer les émotions dans le texte. On constate ici que 1% d'augmentation conduit à augmenter la probabilité d'urbanisation de 0,38%. Enfin les UP décrites avec un vocabulaire plus riche relatif à "politique et société" ont vu leur urbanisation augmenter fortement (effet marginal de 0,72%). Si on suit notre hypothèse de lien entre la description des paysages et la nature des aménités produites, on peut ainsi supposer que des aménités relatives à l'agriculture, l'environnement, la dynamique sociale et culture locale ont été des moteurs de l'urbanisation de ces espaces. On retrouve ainsi des résultats validant les hypothèses de notre modèle théorique détaillé en première partie. A l'inverse une part plus importante de vocabulaire relatif à "forces et quantités" conduit à diminuer la probabilité d'urbanisation. On peut penser que ce vocabulaire (où l'on retrouve des termes comme niveau, masse, puissance) décrit des territoires plutôt difficiles à "habiter" ou moins attractifs car moins producteurs d'aménités recherchées par les ménages. Cela peut éventuellement correspondre à des zones difficiles et donc coûteuses à aménager.

Variables	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
	base	Dictionnaire		complet	base	Scénario Tropes		complet
		contrôles	AIC			contrôles	AIC	
Architecture	0,0009 (0,0011)	0,0010 (0,0011)	0,0010 (0,0011)	0,0010 (0,0011)				
Botanique	-0,0256*** (0,0033)	-0,0258*** (0,0033)	-0,0257*** (0,0033)	-0,0258*** (0,0033)				
Économie	0,0079*** (0,0021)	0,0079*** (0,0021)	0,0079*** (0,0021)	0,0079*** (0,0021)				
Élevage	-0,0088** (0,0037)	-0,0090** (0,0037)	-0,0088** (0,0037)	-0,0090** (0,0037)				
Minéralogie	-0,0204*** (0,0059)	-0,0203*** (0,0059)	-0,0204*** (0,0059)	-0,0203*** (0,0059)				
Urbanisme	0,0397*** (0,0067)	0,0397*** (0,0066)	0,0397*** (0,006-)	0,0397*** (0,0067)				
Sylviculture	0,0177*** (0,0018)	0,0178*** (0,0018)	0,0177*** (0,0018)	0,0178*** (0,0018)				
Géologie	0,0250*** (0,0050)	0,0249*** (0,0050)	0,0250*** (0,0050)	0,0250*** (0,0050)				
Campagne	0,0167** (0,0053)	0,0168*** (0,0052)	0,0167** (0,0052)	0,0168*** (0,0053)				
Viticulture	-0,0124*** (0,0036)	-0,0123*** (0,0036)	-0,0124*** (0,0035)	-0,0123*** (0,0036)				
Religion	-0,0528*** (0,0077)	-0,0529*** (0,0077)	-0,0529*** (0,0077)	-0,0529*** (0,0077)				
Eau	-0,1172** (0,0490)	-0,1165** (0,0490)	-0,1172** (0,0490)	-0,1166** (0,0491)				
Agri. / Envt,					0,3302*** (0,0258)	0,3300*** (0,0256)	0,3303*** (0,0258)	0,3301*** (0,0257)
Anim./ Végét,					0,0414** (0,0202)	0,0389* (0,0201)	0,0409** (0,0202)	0,0389* (0,0201)
Arts / Culture					-0,0752 (0,0563)	-0,0806 (0,0560)	-0,0763 (0,0562)	-0,0806 (0,0561)
Caractér.					0,2815*** (0,0394)	0,2812*** (0,0392)	0,2816*** (0,0394)	0,2813*** (0,0393)
Comm. / Médias					0,5594*** (0,0759)	0,5618*** (0,0755)	0,5611*** (0,0759)	0,5619*** (0,0757)
Comport. / Sent,					0,3843*** (0,0385)	0,3849*** (0,0383)	0,3845*** (0,0385)	0,3850*** (0,0384)
Forces / quantités					-0,2905*** (0,0465)	-0,2972*** (0,0463)	-0,2921*** (0,0465)	-0,2974*** (0,0464)
Géographie					0,1500*** (0,0237)	0,1485*** (0,0236)	0,1500*** (0,0237)	0,1485*** (0,0236)
Politique / Société					0,7213*** (0,0555)	0,7214*** (0,0552)	0,7216*** (0,0554)	0,7216*** (0,0553)
Transports					-0,0384 (0,0547)	-0,0421 (0,0544)	-0,0389 (0,0546)	-0,0421 (0,0545)
OTEX		0,0006 (0,0006)		0,0001 (0,0011)		0,0006 (0,0006)		0,0005 (0,0011)
PRA		0,0012** (0,0006)		0,0007 (0,0013)		0,0012** (0,0006)		0,0007 (0,0013)
Cantons		0,0006 (0,0006)		-0,0011 (0,0034)		0,0006 (0,0006)		-0,0011 (0,0036)
Métriques		-0,0001 (0,0006)		-0,0019 (0,0037)		-0,0001 (0,0006)		-0,0020 (0,0038)
AIC			-0,0000 (0,0000)	-0,0000 (0,0000)			-0,0000 (0,0000)	-0,0000 (0,0000)
Constante	0,2474*** (0,0731)	0,2453*** (0,0730)	0,2918*** (0,0813)	0,4139 (0,3459)	-0,1598*** (0,0169)	-0,1600*** (0,0168)	-0,1162* (0,0409)	0,0085 (0,3523)
Observations	208	208	208	208	208	208	208	208
$\tau^2$	1,18e-05	1,21e-05	1,19e-05	1,22e-05	1,31e-05	1,34e-05	1,32e-05	1,35e-05
$I^2$	0,821	0,825	0,822	0,826	0,835	0,838	0,836	0,839
$R^2$ ajusté	0,760	0,755	0,758	0,753	0,734	0,728	0,732	0,727
$\chi^2_c$	584,3	597,3	587,5	598,6	667,0	678,0	669,6	679,3
test LRT ( $\tau^2 = 0$ )	4,93e-05	4,93e-05	4,93e-05	4,93e-05	4,93e-05	4,93e-05	4,93e-05	4,93e-05
test F du modèle	38,52	29,44	35,79	27,62	40,82	30,00	37,32	27,92

Les écarts-type sont entre parenthèses.

\*\*\*, \*\* et \* identifient les paramètres significatifs aux seuils de 0,01%, 0,05% et 0,1% respectivement.

TABLEAU 3 – Résultats de l'estimation de la deuxième étape

## Perspectives et Implications

Ce travail de recherche comporte une forte dimension exploratoire autour de la construction d'une méthodologie d'étude des phénomènes d'étalement urbain en lien avec les aspects physique et culturels des paysages. Notre proposition méthodologique multidisciplinaire est originale mais sa mise en œuvre nous permet d'identifier les principales difficultés liées à sa dimension opérationnelle et d'identifier des pistes d'amélioration, outre l'extension aux aires urbaine de Brest, Lorient et Rennes. Nous n'en proposons ici que deux, mais qui nous paraissent prometteuses.

D'abord, nous avons utilisé différents outils d'analyse de l'information contenue dans les Atlas des Paysages. En particulier, nous avons mobilisé plusieurs scénarios Tropes. Ces scénarios permettent d'identifier l'importance de différents univers lexicaux mais ne donnent pas d'indication quant à leur caractère positif ou négatif. Les analyses pourraient être enrichies par l'utilisation du scénario EMOTAIX<sup>14</sup>, qui est un scénario Tropes pour l'identification du lexique émotionnel et affectif (Piolat & Bannour, 2009). En particulier, EMOTAIX permet de distinguer le vocabulaire se rapportant à des émotions positives ou à des émotions négatives. Une tentative d'utilisation de ce scénario sera faite prochainement pour en tester la pertinence sur nos données.

Enfin, le modèle de changement d'affectation des usages du sol pourrait être amélioré d'un point de vue statistique. D'abord, l'inclusion d'effet fixes (dummies) pour les communes n'a pas été possible car le modèle ne converge pas en un maximum global. Une autre stratégie, plutôt que d'introduire 266 paramètres à estimer, pourrait être d'introduire des effets aléatoires communaux. En outre, cette stratégie permettrait de contrôler plus finement pour les corrélations spatiales que nous n'avons pas traitées pour l'instant. Une deuxième approche pourrait être d'estimer un modèle probit multinomial spatial. Ces deux approches permettraient d'avoir une confiance encore plus élevée dans l'estimation des probabilités conditionnelles utilisées dans la deuxième étape. Enfin, nous pourrions aussi introduire des effets aléatoires par unité paysagère. Ces différentes options et la sensibilité de nos résultats à ces différentes options de modélisation seront testées prochainement.

Le travail présenté dans ce rapport a de nombreuses implications en termes de politiques publiques. Nous en identifions trois qui nous paraissent importantes. La première concerne la méthodologie des Atlas des Paysages, la deuxième concerne la production d'une ontologie sur la perception des paysages et la troisième porte sur la construction des documents de planification.

Les Atlas des Paysages sont prévus pour être renouvelés tous les dix ans. Pour l'instant, ces renouvellements n'ont pas eu lieu et les Atlas n'ont donc pas de dimension dynamique. Si la question de la dynamique de la perception est complexe, elle pourrait être au moins

---

14. qui a été partiellement utilisée pour la construction de l'ontologie

partiellement appréhendée par les différences observées entre deux Atlas couvrant le même territoire à des instants différents. L'identification de ces évolutions permettrait d'améliorer la connaissance de ces dynamiques et d'adapter et mettre en œuvre des méthodologies similaires à la nôtre dans un cadre parfaitement dynamique (dynamique de l'usage du sol et des perceptions). C'est pourquoi nous pensons que la mise à jour régulière des Atlas, même dans l'état actuel de leur méthodologie, est importante. Comme Roche (2009), nous pensons que les Atlas doivent permettre une comparaison entre deux dates de réalisation.

Ensuite, nous souhaitons finir l'élaboration de l'ontologie pour la rendre publique. En soit, cette ontologie pourra alimenter d'autres travaux, de recherche ou d'expertise, dans le domaine du paysage. Surtout, l'ontologie peut constituer un moyen de médiation et de concertation territoriale puisqu'elle est un moyen de confronter les points de vue et les connaissances sur le paysage. En effet, elle peut permettre de rassembler, analyser et synthétiser l'ensemble des connaissances sur les paysages qui sont comprises, pour l'instant, dans des sources très variées avec des auteurs (et des points de vue) très variés et parfois divergents. Il s'agit par exemples des urbanistes maîtres d'œuvre des PLU/ScoT, des paysagistes maîtres d'œuvre des Atlas des Paysages ou des chartes paysagères, des écologues maîtres d'œuvre sur les documents de diagnostics des PNR/ZNIEFF ou encore des architectes/géographes qui interviennent à différents niveaux, par exemple pour ce qui est relatif au patrimoine.

Enfin, nos résultats montrent que les dimensions physiques du paysage (agencement et types d'objets, diversité des occupations du sol, etc.) jouent un rôle non-négligeable dans les mécanismes d'étalement urbain. Ils montrent également que la dimension culturelle joue aussi un rôle. Les documents de planification urbaine (SCoT, PLU, cartes communales, etc.) portent essentiellement sur la première dimension, en tenant compte de la trame verte et bleue, en identifiant des linéaires ou surfaces à conserver mais intègrent finalement assez peu la dimension culturelle des paysages. A ce titre, les chartes paysagères, les contrats de paysage et les plans de paysages sont des documents qui n'ont qu'un caractère volontaire. Pourtant, leur dimension participative pourrait être un complément à celle engagée lors des négociations des PLU et des SCoT et contribuer à améliorer l'ensemble de la démarche de concertation. En outre, les Atlas des Paysages et les documents de protection et de mise en valeur des paysages devraient aussi venir en appui des volets paysagers construits lors des mises en place et négociations de PLU/SCoT. Ils devraient en particulier être utilisés pour participer à l'identification des zones à enjeux, c'est-à-dire les zones pour lesquelles les paysages ont la plus grande valeur patrimoniale (paysages à protéger) et celles pour lesquelles ils ont une dimension de cadre de vie, dégradé ou à préserver (paysages à gérer). Dans tous les cas, nous avons montré que ces politiques et les politiques sectorielles (exemple de MAE) devraient contenir une évaluation des enjeux en termes d'impacts sur l'urbanisation car elles ne sont pas neutres spatialement et que, par le biais du marché foncier, elles ont des impacts qui peuvent être importants en termes de redistribution des richesses, notamment par la valorisation du patrimoine foncier. En particulier, les politiques de protection les plus ambitieuses (classements patrimoniaux, zonages forts, agri-environnementaux ou autres) devraient prévoir les risques d'urbanisation

et être concertées avec les politiques d'urbanisme, dans une approche plus holistique.

## Production scientifique et valorisation

Le projet PAYTAL a déjà fait l'objet de nombreuses valorisations, y compris dans des revues internationales à comité de lecture qui font autorité en économie. Les productions sont recensées dans l'annexe C de ce rapport. Parmi les valorisations les plus marquantes, notons les références suivantes déjà publiées :

Coisnon T., Oueslati W. & Salanié J. (2014). Spatial targeting of agri-environmental policies and urban development. *Ecological Economics*, 101 :33-42.

Coisnon T., Oueslati W. & Salanié J. (2014). Agri-environmental policy and urban development patterns : A general equilibrium analysis. *American Journal of Agricultural Economics*, 96(3) :673-689.

Coisnon T., Oueslati W. & Salanié J. (2014). Urban sprawl occurrence under spatially varying agricultural bid-rent and amenities. *Regional Science and Urban Economics*, 44(1) :38-49.

D'autres valorisations, présentées en colloque, concernent les parties 2 et 3 du rapport. Elles devraient également donner lieu à des publications. On peut noter par exemple :

Bourbeillon, J., Charles, J., Rousselière D., Salanié J. & Sow D. (2013). *(Comment) peut-on isoler la subjectivité de l'auteur dans une analyse des données textuelles ? Étude de la variabilité du vocabulaire dans les Atlas français des paysages*. 5<sup>ème</sup> Congrès de l'Association Française de Sociologie, RT20 « Méthodes », 2-5 septembre, Nantes.

Bourbeillon J., Pastaza A., Rousselière D. & Salanié J. (2014). *Physical and cultural dimensions of landscapes and their impact on urbanization : A land use change model*. 8<sup>èmes</sup> Journées INRA-SFER-CIRAD, 11-12 décembre, Grenoble.

Bourbeillon J., Piel, L., El Ayeb R., Rousselière D. & Guyet T. (2013). *Construction semi-automatique d'une ontologie de la perception des paysages*. Conférence Ingénierie des Connaissances, 1-6 juillet, Lille.

Guyet T., Nicolas H., Ghedamsi B. & Athané E. (2013). *Fouille d'images géoréférencées avec RapidMiner*. Colloque SAGEO2013, 23-26 septembre, Brest.

Marshall A., Guyet T., Athané E., Menghini F. & Nicolas H. (2014). *Paysage, étalement*



*urbain et décisions politiques : Retour sur une approche pluridisciplinaire confrontant analyse spatiale et perceptions des acteurs.* Colloque « Concilier expertise scientifique et participation : le défi posé par la Convention européenne du paysage », 28 et 29 avril, Bruxelles.

La plupart de ces valorisations ont une dimension interdisciplinaire incluant plusieurs membres du programme. Nous valoriserons collectivement la méthodologie. Cela passera par la production d'un chapitre pour l'ouvrage collectif PDD2 et peut-être une publication internationale.

# Introduction générale

Depuis la seconde guerre mondiale, le développement urbain est rapide, surtout dans les pays en développement, et effectué au détriment des zones naturelles et agricoles périurbaines. Selon l'Organisation des Nations Unies (ONU, 2009), pour la première fois dans l'histoire de l'humanité, plus de 50% de la population mondiale vit en zone urbaine. Ce seuil a été atteint en 2008. En 1950 cela ne concernait que 29,1% de la population. Les prévisions de l'ONU évaluent à 70% la part des habitants de la planète qui vivront en zone urbaine en 2050. En France, la part de la population urbaine est passée de 55% en 1950 à 77% aujourd'hui, et elle devrait atteindre les 87% en 2050 (ONU, 2009). Aux États-Unis, ce sont 84% de la population qui vivent dans une *Metropolitan Area* (Mackun & Wilson, 2011). A l'échelle européenne, les aires rassemblent 75 % de la population (EEA, 2006).

L'urbanisation<sup>15</sup> trouve sa source dans le développement économique, sous les effets conjugués de la baisse de la part des dépenses en produits agricoles et agro-alimentaires, comme le prédit la loi d'Engel, et de l'augmentation de la productivité agricole. Cela engendre des différentiels de niveaux de vie entre les zones rurales et les agglomérations urbaines et donc l'exode rural (Polèse & Shearmur, 2005). En parallèle de l'urbanisation, un autre fait majeur de l'évolution des villes au 20<sup>ème</sup> siècle est l'étalement urbain.

Après la seconde guerre mondiale, la forte croissance de la population urbaine, combinée avec d'autres facteurs tels que l'augmentation des niveaux de revenu, l'amélioration des technologies de transport - en particulier l'avènement de la voiture individuelle - et la recherche de nouveaux cadres de vie, ont incité les ménages à se localiser à des distances de plus en plus éloignées des centre-villes, conduisant ainsi les aires urbaines à s'étaler toujours plus dans l'espace.

Parmi les problèmes généralement associés à l'étalement urbain, on recense entre autres une consommation excessive des ressources naturelles et d'énergie - impliquant des problèmes de pollution de l'air, des eaux et l'émission de gaz à effet de serre -, l'artificialisation des sols<sup>16</sup>, la perturbation des écosystèmes, la perte de terres agricoles, la dégradation des paysages, le mitage, la ségrégation sociale, le surinvestissement dans les services collectifs<sup>17</sup> ou encore l'ac-

---

15. C'est-à-dire l'accroissement de la part de la population vivant en ville.

16. Bien que l'artificialisation des sols soit aussi due au développement des réseaux, d'infrastructures et d'activités commerciales ou industrielles, l'habitat individuel compte à lui seul pour la moitié des superficies artificialisées entre 1992 et 2004 en France (Bisaut, 2009).

17. cf. Carruthers & Ulfarsson (2003)

croissement des temps de trajets<sup>18</sup> (EEA, 2006). Il faut aussi noter que la densité favorise la productivité en permettant un meilleur partage entre entreprises de facteurs de production coûteux, en améliorant la flexibilité du marché du travail, et donc les appariements employé-employeur, et en favorisant la diffusion des technologies et des savoirs (OCDE-CEMT, 2007). L'étalement urbain a donc des effets néfastes sur l'emploi, la productivité et les revenus (Fallah *et al.*, 2011).

Pour ces différentes raisons, l'étalement urbain est devenu une préoccupation majeure des pouvoirs publics depuis plusieurs décennies. Différentes politiques ont donc été mises en place pour lutter contre ce phénomène. La loi SRU<sup>19</sup> de 2000 est probablement le point d'orgue de cette volonté puisqu'elle se fixe comme objectifs de lutter contre la périurbanisation et de protéger l'espace agricole et les paysages en favorisant le renouvellement urbain et la mixité sociale.

La littérature économique (et géographique) sur les mécanismes de l'étalement urbain est relativement abondante, surtout aux États-Unis (Mieszkowski & Mills, 1993; Brueckner, 2000; Brueckner *et al.*, 2001; Nechyba & Walsh, 2004) mais aussi plus récemment en France (Cavailhès *et al.*, 2009b). Parmi les principales causes de l'étalement urbain, entendu comme l'emprise au sol croissante de la ville, on trouve l'accroissement de la population urbaine et l'augmentation des revenus (Wheaton, 1974). En revanche, l'accroissement des coûts de transport et l'augmentation des prix des terres agricoles tendent à contraindre cet étalement (Wheaton, 1974). Par ailleurs, la nature irréversible de l'étalement urbain laisse supposer que la structure de risque des marchés du foncier agricole et urbain (commercial et résidentiel) joue un rôle fondamental dans l'étalement urbain (Capozza & Helsley, 1990; Capozza & Li, 2002). Les décisions d'urbanisation sont affectées par l'appréciation du rapport entre les bénéfices de l'urbanisation et ceux de l'activité agricole. Burchfield *et al.* (2006) ont réalisé une analyse systématique de l'étalement urbain entre 1976 et 1992 aux États-Unis. Ils testent une série d'hypothèses issues des analyses économiques précédemment citées à l'échelle nationale. Leurs résultats permettent de confirmer la plupart de ces hypothèses, à savoir que l'étalement urbain est bien relié à la dispersion de l'emploi, aux coûts des transports individuels, à l'absence de régulation des usages du sol par les politiques de planification et à la fiscalité locale.

Burchfield *et al.* (2006) notent que l'inclusion d'indicateurs paysagers pourrait améliorer significativement la compréhension des phénomènes d'étalement urbain, ce qui est effectivement suggéré par la théorie économique. Cependant, Irwin & Bockstael (2007) montrent que l'analyse de Burchfield *et al.* (2006) reste partielle parce qu'elle ne rend pas compte de l'urbanisation par densification (fill-in). Sur des données encore plus fines, elles confirment que la présence d'aménités a joué un rôle important pour l'urbanisation dans le Maryland et que l'urbanisation joue un rôle fondamental dans la structuration des paysages en en réduisant la diversité. Ceci suggère une approche dynamique des paysages.

---

18. En fait, en France le temps de trajet domicile-travail est constant ( $\approx 55$ min) mais les distances parcourues augmentent (9 km en 1982 contre 14,2 en 1994) - Source : Ministère des transports.

19. Loi n°2000-1208 du 13 décembre 2000 relative à la solidarité et au renouvellement urbains.

Plusieurs auteurs ont démontré que l'existence de services environnementaux (écologiques et esthétiques) à la périphérie des villes pouvait non seulement engendrer l'étalement urbain mais aussi générer l'apparition d'un habitat discontinu – phénomène de mitage – (Cavallès *et al.*, 2004; Turner, 2005; Wu, 2006). Ces aménités sont aussi la source d'une ségrégation spatiale des ménages (Wu, 2006) au même titre que la fiscalité, la criminalité et les services publics (Nechyba & Walsh, 2004).

En Europe, et en particulier en France, on ne dispose pas d'une information similaire sur la nature de l'étalement urbain, le rôle joué par les paysages et les conséquences sur la structuration, la répartition et la modification des paysages. Pourtant, les processus d'urbanisation y sont plus anciens et plus importants qu'aux États-Unis où seulement 2% des terres sont artificialisées (Burchfield *et al.*, 2006) contre 9% en France CGDD (2010). Selon Antrop (2004), l'urbanisation en Europe fragmente les paysages qui perdent de leur valeur écologique et culturelle. Même s'ils partagent certaines caractéristiques (Patacchini & Zenou, 2009), les processus d'urbanisation et d'étalement urbain diffèrent entre l'Europe et les États-Unis (Schneider & Woodcock, 2008), aboutissant à des formes urbaines différentes. Brueckner *et al.* (1999) ont aussi montré des différences portant sur la répartition spatiale des ménages expliquées par le rôle que peuvent jouer les aménités.

## Problématique et objectifs

Dans ce contexte, notre proposition de recherche vise à améliorer notre compréhension du lien entre étalement urbain et paysage et à identifier les éléments de leur dynamique conjointe. En particulier, on se demande si les paysages influent sur l'urbanisation et si oui comment ? On s'interroge aussi sur le poids des paysages dans les mécanismes d'étalement urbain en comparaison des autres facteurs (coûts de transport, revenus, ...). Quelles sont les conséquences de l'étalement urbain sur la formation des paysages périurbains ? Les paysages influencent-ils les formes générales de l'étalement urbain (mitage, habitat compact, etc.) ? Les politiques de planification (SCoT, PLU, etc.) et de protection des espaces naturels (ZNIEFF, ZPPAUP, Natura 2000, etc.) permettent-elles de contrôler l'étalement urbain et quelles sont leurs conséquences sur les formes d'urbanisation ?

Notre objectif est avant tout méthodologique et nous souhaitons initier, et tester, une méthodologie reproductible, applicable à l'échelle pertinente des phénomènes d'étalement urbain (les aires urbaines) qui tienne compte des différentes dimensions du paysage :

- physique, qui la dimension la plus explorée,
- sensible, dont l'étude n'a pas été faite à cette échelle.

## Challenges méthodologiques

Le projet PAYTAL repose sur un travail de représentation spatiale des paysages et de la ville pour alimenter l'analyse de la dynamique urbaine. Ceci impose trois dimensions interdisciplinaires. D'abord, nous devons construire un outil de mesure, aussi fin que possible, de l'étalement urbain. Ensuite, sur le même territoire, nous devons avoir un outil de représentation des dimensions physiques et sensibles des paysages. Enfin, nous devons nous munir d'un cadre théorique suffisamment général qui permette de relier les deux outils.

Les modèles théoriques et empiriques (statistiques) de l'économie urbaine offrent un cadre suffisamment général pour la compréhension des phénomènes d'étalement urbain qui résultent des arbitrages de localisation des ménages et des entreprises sous contrainte des politiques publiques mises en œuvre. Toutefois, dans ces modèles, les aménités, ou le cadre de vie, sont résumés à un élément exogène, comme par exemple chez Wu & Plantinga (2003) et Wu (2006). C'est précisément cette limite que nous souhaitons relever dans PAYTAL. Les travaux théoriques approchant le cadre de vie sous un angle endogène, c'est-à-dire où il dépend du comportement des agents, sont rares. Chez Bento *et al.* (2011), les paysages du périurbain sont réduits à une quantité totale d'espace agricole qui varie quand la taille de la ville s'accroît. Chez Cavailhès *et al.* (2004), ils sont approchés plus finement par la part que l'agriculture, différentiable par un paramètre, occupe en tout point de l'espace. Dans le modèle de Cavailhès *et al.* (2004), les ménages périurbains bénéficient des paysages agricoles mais en les urbanisant, ils les modifient. Il émerge donc une construction des paysages périurbains qui résulte des choix de localisation des ménages, qui recherchent l'espace et la proximité aux paysages agricoles, et de la profitabilité de l'agriculture. C'est certainement le modèle le plus élaboré. Ils nous servira de point de départ. Comme Cavailhès *et al.* (2004), nous approcherons les paysages périurbains par l'agriculture comme seul usage alternatif au résidentiel mais une interprétation plus générale peut être faite de leur modèle, comme du nôtre, dès lors que le cadre de vie périurbain est modifié par l'urbanisation et les activités économiques qui s'y localisent. En outre, on cherchera à introduire des politiques publiques d'entretien et d'amélioration des paysages, agricoles donc, et à comprendre leurs effets sur les formes d'urbanisation et le bien-être des populations. Enfin, on cherchera à partir de données à vérifier le fonctionnement du modèle proposé.

Pour cela, nous aurons besoin de mesurer les phénomènes d'urbanisation dans différentes villes. Nous avons choisi de le faire à partir d'images satellite à haute résolution sur une période longue (20 ans dans notre cas). Comme notre centre d'intérêt premier est l'urbanisation, nous développons les méthodologies adéquates de traitement de ces images pour mesurer, le plus finement possible, l'urbanisation et, en particulier, être capables de détecter l'urbanisation diffuse ce que ne permettent pas, par exemple, les sources de données comme Corine Land Cover dont la précision est trop faible pour détecter l'habitat individuel isolé. Nos analyses ont lieu sur les aires urbaines de Angers, Brest, Lorient et Rennes qui représentent quatre archétypes d'évolution des aires urbaines en France (CGDD, 2010).

Pour caractériser les paysages périurbains, nous utilisons des descripteurs physiques plus ou moins grossiers. Il s'agit bien sûr de l'occupation du sol mais aussi d'indicateurs plus fins d'écologie des paysages qui nous permettent de mesurer l'agencement de leurs différents éléments physiques. Comme nous l'avons exprimé, notre ambition est d'intégrer la dimension sensible et perçue des paysages. A l'échelle qui est la nôtre (une ou plusieurs aires urbaines), il n'est pas possible de réaliser un travail d'analyse paysagère de terrain exhaustif. Ce n'est pas non plus souhaitable dans la mesure où nous souhaitons construire une méthodologie reproductible qui s'affranchisse, au moins partiellement, de cette approche. C'est pourquoi nous optons pour la construction d'une ontologie géographique des paysages. Il s'agit d'un système de représentation des connaissances que l'on peut abonder et modifier avec un ensemble d'informations relatives à la perception des paysages, notamment. Cette information doit être spatialisée de manière à ce que l'on puisse la mettre en relation avec les identifications de l'étalement urbain obtenues par télédétection.

L'avantage d'une ontologie, par rapport à d'autres outils, est double. Elle nous permet d'utiliser l'information existante sur les paysages et son cadre est suffisamment flexible pour que l'on puisse l'enrichir de nouvelles informations régulièrement. Pour créer cette ontologie, nous choisissons de nous baser sur les Atlas des Paysages pour plusieurs raisons. D'abord, l'information contenue dans les Atlas des Paysages est relativement homogène puisque créée sur la base d'une méthodologie commune (Brunet-Vinck, 2004) qui bien qu'imparfaite s'avère être un outil riche de connaissance des paysages (Roche, 2009). En outre, l'information contenue dans les Atlas des Paysages est géolocalisée par un découpage en unités territoriales bien identifiées : les Unités Paysagères. Enfin, les Atlas des Paysages couvrent une très large partie du territoire et constituent donc une masse d'information importante qui est mobilisable pour la construction de l'ontologie. L'avantage d'une ontologie est que l'on pourra l'enrichir d'autres sources d'information sur les paysages comme des enquêtes, des documents d'urbanismes qui contiendraient une information paysagère (PLU, SCoT, PADD, PLH, ...) ou encore de documents de justice relatifs à des conflits pourtant sur des éléments paysagers comme les oppositions à des permis de construire, des contentieux territoriaux, etc.

Sur la base de ces données, nous élaborons deux types d'analyses. D'abord, nous caractérisons le lien entre paysage et urbanisation sur les différentes aires urbaines retenues à l'aide de deux méthodes. La première repose sur l'utilisation de techniques d'apprentissage automatique et résulte en la production de graphes spatiaux de représentation des paysages. La deuxième vise à produire des indicateurs de l'organisation spatiale des paysages et de les relier à l'urbanisation observée par des techniques d'analyse factorielle. Les indicateurs retenus, dans un premier temps, sont des indicateurs issus des travaux en écologie du paysage. Il y a d'abord des indicateurs de proportion des usages du sol (périmètre des tâches, ...) mais aussi des indicateurs décrivant l'organisation spatiale des usages du sol (indices de Shannon, ...). La mise en relation de ces indices avec des descripteurs de l'urbanisation permet de mettre en avant les caractéristiques des zones les plus sensibles à l'urbanisation. En particulier, on observe un

lien relativement fort entre urbanisation et diversité des usages du sol, c'est à dire avec des paysages empreints de diversité. Toutefois, cette corrélation varie entre les aires urbaines. Elle est plus fortement marquée à Lorient, Brest ou Angers qu'à Rennes, sans que l'on sache encore si c'est dû à des différences de population ou à des différences de perception de ces paysages au sein de ces territoires. Quelques enquêtes effectuées sur l'aire urbaine d'Angers seront mises en relation de ces analyses.

Enfin nous estimons des modèles économétriques d'allocation et de changement des usages du sol. Il s'agit de modèles de choix discrets (de type *logit multinomiaux*) qui permettent d'expliquer la probabilité d'un type d'usage du sol à un moment donné. Nous retenons les trois types d'usages des sols de la nomenclature retenue pour la télédétection (urbain, forêt et agricole) et nos trois points d'observation (1990, 2000 et 2010). Ces modèles sont construits en cohérence avec la partie théorique dont ils incorporent plusieurs éléments. D'abord, ils incorporent les descripteurs de la fonction d'enchère des ménages urbains comme la distance au centre-ville et aux centres secondaires ou encore le niveau des services fournis localement. Ils tiennent compte des coûts de construction, par exemple à travers les pentes. Ils intègrent également la valeur de la production agricole, par exemple à travers les orientations techniques locales. Enfin, ils tiennent compte du fait que les ménages péri-urbains, en urbanisant, réduisent la valeur d'aménité des espaces périurbains. C'est pourquoi nous faisons dépendre la probabilité de chaque usage du sol de l'urbanisation dans son voisinage proche. Nous tenons compte du contexte paysager par l'appartenance d'une observation à une unité paysagère. Ainsi, nous mesurons l'effet qu'a l'appartenance à une unité paysagère sur la probabilité d'urbanisation. Dans une deuxième étape, nous relient ces effets à un ensemble de descripteurs des perceptions des paysages dans chaque unité paysagère. Ces descripteurs sont tirés de l'ontologie. Cette analyse, menée sur Angers uniquement pour l'instant, permet d'identifier et de comprendre les paysages, et donc les perceptions qui y sont associées, qui sont les plus susceptibles d'être urbanisés. Elle sera étendue prochainement aux trois autres aires urbaines.

## Définitions

Dans le but de ne pas nous contraindre dans nos analyses, nous acceptons pleinement la diversité des définitions de l'étalement urbain et du paysage. Nous nous plaçons donc dans un cadre élargi. Toutefois, nous menons, dans les sections suivantes, une discussion de ce que nous entendons par "étalement urbain" et par "paysage".

### Urbanisation et étalement urbain

L'étalement urbain, ou *urban sprawl* en anglais, est un phénomène d'abord observé aux Etats-Unis après la seconde guerre mondiale. Il désigne la croissance des aires métropolitaines nord-américaines, caractérisée par un développement résidentiel de faible densité, largement influencée par l'importance de l'usage de la voiture individuelle, et s'effectuant autour d'une

ville-centre souvent en déclin. L'étalement urbain nord-américain est ainsi étroitement lié à l'émergence considérable de zones périurbaines ou *suburbs*, associées à un mode de vie en expansion : la maison individuelle et son jardin privatif. En 1950, 40% de la population des dix premières aires métropolitaines aux Etats-Unis vivait à l'extérieur de la ville-centre, c'est-à-dire dans les *suburbs*. Cette proportion s'est accrue au cours de la deuxième moitié du vingtième siècle jusqu'à atteindre 60% en 1990 (Couch *et al.*, 2007).

Très vite, ce phénomène prend également toute son importance en Europe où la croissance de la population et le nouvel essor économique d'après-guerre se traduisent par des observations similaires en ce qui concerne l'étalement urbain. La croissance périurbaine des villes européennes a débuté entre la fin des années soixante et le milieu des années soixante dix, selon les villes. Aujourd'hui, l'Europe est un continent fortement urbanisé où 75% de la population vit dans une aire urbaine et où un quart du territoire est caractérisé par un usage urbain (EEA, 2006). Les préoccupations autour des dynamiques du développement périurbain sont toujours d'actualité. À partir de la base de données Corine Land Cover (CLC), mise à disposition par l'Agence Européenne de l'Environnement (EEA)<sup>20</sup>, qui regroupe des données SIG<sup>21</sup> d'occupation du sol pour 37 pays européens<sup>22</sup>, on observe que l'artificialisation pour l'usage résidentiel est prédominante et concerne plus de 46 000 hectares par an, pour l'ensemble du territoire européen couvert par CLC. Près de 78% des terres converties entre 2000 et 2006 étaient initialement agricoles (terres arables ou prairies). A l'échelle de la France par exemple, toujours d'après les données CLC, les espaces artificialisés de la France métropolitaine ont augmenté de près de 80 000 hectares, dont 88% étaient initialement des terres agricoles. Dans le cas européen, l'étalement urbain se fait donc essentiellement au détriment des terres agricoles.

Cependant, l'étalement urbain ne peut se résumer à la mesure de la superficie artificialisée sur un territoire. L'étalement urbain, au sens géographique comme économique, est un processus multi-dimensionnel. Il n'existe pas de définition consensuelle généralement donnée. Cependant, certaines notions sont utilisées de manière récurrente. On parle souvent de l'étalement urbain comme d'une extension spatiale excessive et incontrôlée des villes (Brueckner, 2000). L'étalement urbain est également souvent caractérisé selon sa forme : emprise spatiale, gradient de densité ou encore degré de fragmentation. ? proposent à ce sujet huit dimensions distinctes pouvant définir l'étalement urbain et en caractériser les formes<sup>23</sup>. Nous retiendrons la définition de l'Agence Européenne de l'Environnement (EEA) dans le sens où elle regroupe l'ensemble des caractéristiques citées habituellement dans la littérature. Elle considère que l'étalement urbain est la caractérisation physique d'un développement de faible densité des grandes aires urbaines, dans des conditions de marché, principalement dans les milieux agri-

20. <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/land-take-2/assessment-2> (dernière visite : 16 février 2014).

21. Système d'Information Géographique

22. UE 28 moins la Grèce, plus Suisse, Norvège, Islande, Balkans et Turquie.

23. "Sprawl is a pattern of land use in a UA [Urbanized Area] that exhibits low levels of some combination of eight distinct dimensions : density, continuity, concentration, clustering, centrality, nuclearity, mixed uses, and proximity." Galster *et al.* (2001).



coles environnants<sup>24</sup>. Ce développement de faible densité est également qualifié de discontinu, entraînant l'apparition d'un espace mité caractérisé par le maintien d'enclaves agricoles. Ainsi, la définition de l'EEA met en évidence les possibles interactions entre étalement urbain et espace agricole.

On peut également définir l'étalement urbain par les enjeux qui s'y rapportent et ont été mis en évidence par plusieurs auteurs dès la fin des années soixante. Il existe de nombreuses revues de littérature effectuées à ce sujet (Harvey & Clark, 1965; RERC, 1974; Ewing, 1994; Gordon & Richardson, 1997; Nechyba & Walsh, 2004; EEA, 2006). On distingue généralement deux grandes catégories d'impacts.

L'enjeu le plus fréquemment soulevé est celui de l'impact environnemental. L'étalement des villes est en effet synonyme d'emprise sur des ressources foncières non renouvelables. L'artificialisation du foncier est un processus quasiment irréversible qui affecte les propriétés bio-physiques des sols tels que leur perméabilité, leur teneur en biodiversité ou encore leur capacité à retenir le carbone. D'autre part, les formes discontinues de développement urbain conduisent à une fragmentation spatiale des paysages et des milieux agricoles et naturels. Cette fragmentation peut avoir de nombreux impacts écologiques (biodiversité, corridors écologiques, ruissellement des eaux, interactions biophysiques au sein des sous-sols). L'augmentation de la distance à la ville implique également une forte augmentation des déplacements et ainsi des émissions de gaz à effet de serre et une consommation accrue en énergie. Enfin se pose également le problème de la raréfaction du foncier, en particulier dans le cas européen. Johnson (2001) propose une vue assez complète des travaux effectués sur la modélisation et l'évaluation des impacts environnementaux de l'étalement urbain.

L'étalement urbain engendre également de nombreux enjeux socio-économiques. Le coût le plus souvent avancé est celui des infrastructures publiques. En effet, l'étalement urbain et le développement d'espaces résidentiels toujours plus éloignés de la ville-centre engendrent des coûts supplémentaires en matière d'infrastructures de transport, d'équipements publics, d'extension des réseaux d'évacuation des eaux usées pour ne citer qu'eux. Ces coûts sont généralement supportés par la communauté dans son ensemble par le biais d'impôts fonciers. Carruthers & Ulfarsson (2003) montrent empiriquement l'impact de différentes formes de développements urbains sur différents postes de dépenses publiques pour 283 aires métropolitaines nord-américaines. Leurs résultats indiquent qu'une baisse de la densité résidentielle a un effet positif sur les dépenses publiques, en particulier dans le domaine des infrastructures routières, de l'éducation ou de la sécurité. Par ailleurs, l'augmentation des flux de transport, notamment via l'utilisation accrue de la voiture individuelle, n'est pas sans conséquences d'une part par rapport aux externalités de congestion aux abords des villes, et d'autre part en termes de coûts pour les ménages. Un autre enjeu important autour de l'étalement urbain est celui de la ségrégation sociale. Le développement résidentiel est souvent associé à des phénomènes

---

24. "(...) *the physical pattern of low-density expansion of large urban areas, under market conditions, mainly into the surrounding agricultural areas*", p.6 dans EEA (2006)

de ségrégation selon le revenu avec notamment la paupérisation des ville-centres aux Etats-Unis suite au déplacement des ménages les plus riches vers les *suburbs* en périphérie des villes (Mieszkowski & Mills, 1993). Glaeser *et al.* (2008) notent que, en 2000, 19,9% de la population des ville-centres vit dans la pauvreté, contre 7,5% de la population suburbaine. Ils soulignent le rôle des caractéristiques du marché immobilier et du réseau de transport public dans ce phénomène. Cette observation est surtout valable aux Etats-Unis. En Europe, l'importance des aménités culturelles et historiques dans les ville-centres y explique le maintien des ménages riches (Brueckner *et al.*, 1999). Cependant, le cloisonnement des populations selon leur niveau de revenu s'observe également dans les villes européennes (Musterd, 2005; Charlot *et al.*, 2009; Goffette-Nagot & Schaeffer, 2011). La ségrégation, qu'elle soit sociale ou ethnique, peut faire apparaître des phénomènes de tension sociale ou d'exclusion, à travers des inégalités d'accès aux services publics ou à des aménités tels que les espaces verts (Brueckner, 2000). Enfin, l'allocation de l'usage du sol déterminée par le marché, combinée avec les mutations de l'activité économique peuvent amener à l'émergence de friches industrielles non valorisées (EEA, 2006). Cet ensemble de conséquences socio-économiques soulève des questions de défaillance du marché foncier reprises par Brueckner (2000).

L'étalement urbain est donc très souvent connoté négativement. Les revues de littérature sur les effets de l'étalement urbain se concentrent essentiellement sur les conséquences négatives. Cependant, certains auteurs soulignent également l'existence d'impacts positifs tels que la progression de la propriété foncière, de moindres coûts d'installation pour les entreprises ou encore l'émergence d'une dynamique économique propre aux espaces périurbains (GAO, 1999; Piorr *et al.*, 2011). Par ailleurs, la supériorité environnementale d'une ville dense par rapport à une ville étalée est encore discutable (Gaigné *et al.*, 2012). L'enjeu politique de l'étalement urbain réside donc globalement davantage dans le contrôle de ce phénomène plutôt que simplement sa limitation.

Les déterminants de l'étalement urbain, sont fortement liés au fonctionnement économique des villes. Historiquement, l'augmentation de la taille des villes est d'abord due à l'augmentation de la population mais l'étalement urbain tel que nous l'abordons ici est le résultat d'une combinaison de différents facteurs.

Les principaux déterminants de l'étalement urbain sont le revenu des ménages et les coûts de transport. Ce sont les deux facteurs mis en évidence par le modèle théorique de la ville monocentrique, traité dans le chapitre suivant. L'essor économique qu'ont connu les pays occidentaux après la seconde guerre mondiale s'est traduit par une augmentation du revenu moyen de la population. Ce phénomène, combiné à des innovations technologiques sur les transports et donc à la baisse de leurs coûts, ont permis à la population d'envisager l'accession à la propriété à une distance de plus en plus éloignée de la ville-centre.

D'autres facteurs ayant un rôle important dans le choix de localisation résidentielle des ménages ont été mis en évidence par la littérature : accès aux services (localisation d'écoles,

d'établissements de santé et autres équipements publics), accès aux réseaux d'assainissement (Irwin & Bockstael, 2004; Burchfield *et al.*, 2006; Wang & Kockelman, 2009).

Par ailleurs, les formes d'étalement urbain sont influencées par les modes de gouvernance et les politiques publiques mises en place sur les territoires concernés, telles que les politiques de transport (Wu *et al.*, 2004) ou les politiques fiscales (Song & Zenou, 2006). Aux Etats-Unis comme en Europe, les pouvoirs publics mettent également en place des politiques de zonage ayant pour objectif de contrôler l'étalement des villes. En France, ces politiques de zonage prennent la forme de Schémas de Cohérence Territoriale (SCoT) à l'échelle d'un territoire et de Plans Locaux d'Urbanisme (PLU) à l'échelle de la commune. Ces documents d'urbanisme se font en concertation avec les acteurs concernés et ont pour objectif de déterminer les stratégies de développement des territoires et les règles générales d'utilisation des sols par zone (autorisation de conversion, limitation de la densité). Aux Etats-Unis, les politiques de régulation de l'usage du sol les plus répandues sont également des politiques de zonage (Pendall *et al.*, 2006). Cependant, les modalités d'application de ces politiques varient sur le territoire puisque ces décisions sont prises à l'échelle des *communities* et *counties*. Les auteurs s'accordent à dire que de manière générale, de telles politiques provoquent une augmentation des prix fonciers urbains (Dawkins & Nelson, 2002). Cependant, dans leur revue de littérature, Quigley & Rosenthal (2005) soulignent la contradiction de certains résultats empiriques et précisent que l'amplitude de ces effets est très variable et fortement dépendante du type de politique mis en œuvre et des caractéristiques du marché foncier local.

Enfin, le cadre de vie est un facteur important : congestion de voisinage, recherche d'un environnement calme, proximités aux aménités naturelles et espaces ouverts (littoral, zones humides, relief, climat, espaces verts ou encore espaces protégés). Si le rôle des aménités naturelles, telles que la proximité au littoral, le relief ou le climat a été étudié dans la littérature empirique (Irwin, 2002; Wu *et al.*, 2004; Burchfield *et al.*, 2006; Kovacs & Larson, 2007), le rôle des paysages agricoles n'apparaît que très peu. Pourtant, c'est justement dans les zones périurbaines que croît la ville, un espace caractérisé par un usage mixte entre résidentiel et agriculture. Le cadre de vie est donc un déterminant majeur de l'étalement urbain, à travers le choix de localisation résidentielle des ménages. Puisque l'artificialisation des terres a principalement lieu dans les milieux agricoles autour des centres urbains, il est important de comprendre le fonctionnement et les caractéristiques de l'agriculture périurbaine, qui constitue une part importante du cadre de vie des ménages périurbains.

## **Paysage(s)**

Le paysage est ici entendu au sens de la Convention Européenne du Paysage, à savoir comme "*une partie de territoire telle que perçue par les populations, dont le caractère résulte de l'action de facteurs naturels et/ou humains et de leurs interrelations*" (Conseil de l'Europe, n.d.). Cette définition fait écho à celle de Price (1978). Elle met également en avant le rôle des actions humaines, souvent involontaires ou non coordonnées, c'est-à-dire à la notion

d'externalité en économie qui se définit comme les interrelations entre agents en l'absence de coordination. Dans une acception large, nous entendons donc les paysages comme le cadre de vie, qui résulte à la fois des facteurs naturels mais aussi des actions économiques des agents qui habitent le territoire. Comme nous nous plaçons dans l'espace périurbain, nous faisons une place prépondérante à l'agriculture qui représente la majeure partie des territoires périurbains en France. L'ensemble des externalités agricoles fait référence au concept de multifonctionnalité de l'agriculture. Nous allons donc définir la multifonctionnalité de l'agriculture et donner quelques éléments de réflexion sur l'organisation de cette multifonctionnalité en milieu périurbain.

L'OCDE définit la multifonctionnalité de l'agriculture par *"l'existence de produits multiples, de base et autres, qui sont conjointement produits par l'agriculture et le fait que certains produits présentent les caractéristiques d'externalités ou de biens d'intérêt public"* (Maier & Shobayashi, 2001). On considère donc que l'activité agricole, outre sa fonction première de production, génère en parallèle des paysages, des nuisances et donc un cadre de vie.

L'agriculture est source de nombreuses externalités positives ou négatives. Le tableau 4 énumère les principales externalités associées aux activités agricoles, d'après Maier & Shobayashi (2001) et Abler (2004). Les externalités agricoles négatives correspondent essentiellement aux pollutions environnementales et aux nuisances engendrées par certaines activités agricoles. A l'inverse, l'agriculture peut également permettre de limiter certains dégâts environnementaux (barrières naturelles contre les tempêtes, entretien des sols et limitation des inondations). Parmi les externalités positives, notons également la production de biens publics tels que l'entretien des paysages à travers des dimensions esthétiques et culturelles. Bien évidemment, l'ampleur des différentes externalités positives ou négatives créées par l'agriculture est largement dépendante des pratiques agricoles mises en place. On doit donc se poser la question de la jointure de production entre biens agricoles et externalités.

Externalités positives	Externalités négatives
Paysage et espaces ouverts	Pollution des aquifères
Patrimoine culturel	Irrigation excessive
Viabilité rurale	Epuisement des sols
Sécurité alimentaire	Epanchages et nuisances olfactives
Prévention des risques naturels	Emission de gaz à effets de serre
Préservation de la biodiversité	Perte de biodiversité

TABLEAU 4 – Principales externalités associées à l'activité agricole

Nous considérons que le niveau des externalités positives ou négatives produites par l'agriculture périurbaine dépend fortement des pratiques agricoles effectives, et notamment de l'intensité agricole. De manière générale, il existe un consensus sur le fait que les systèmes agricoles les plus intensifs ont tendance à générer des paysages moins attractifs et des écosystèmes de moindre qualité environnementale par rapport aux systèmes de production plus extensifs

(Bjaklund *et al.*, 1999; Abler, 2001; Maier & Shobayashi, 2001; Bergstrom & Ready, 2009). On peut expliquer cela par le fait que les itinéraires techniques extensifs favorisent la co-production d'externalités positives et que la moindre utilisation d'intrants non fonciers diminue le flux d'externalités négatives.

Cependant, la relation entre activité agricole et production d'externalités peut être assez complexe, comme le notent Hodge (2000), Harvey (2003) et Wossink & Swinton (2007). Cette relation peut être simplement compétitive, c'est-à-dire qu'une augmentation de l'intensité de production implique une diminution de la qualité environnementale. Dans ce cas, on s'attend à ce que la distribution du flux net d'externalités soit négativement corrélé à l'intensité agricole de manière continue et monotone. D'après Hodge (2000), cette configuration correspondrait au cas de l'agriculture nord-américaine et australienne. Pour l'Europe, la situation est différente. On considère souvent qu'une agriculture excessivement extensive n'assume plus sa fonction d'entretien du paysage. Le maintien de paysages viticoles par exemple requiert un certain niveau d'intensité de production à l'hectare. Il est donc raisonnable de penser qu'au-delà d'un certain seuil, la baisse de l'intensité agricole ne conduit plus à une amélioration du flux net d'externalités. L'abandon des pâturages de montagne par exemple engendre des effets de fermeture du paysage et favorise l'apparition d'avalanches en hiver. Ainsi, dans le cas européen, on considère que la relation entre production agricole et externalités prend la forme d'une "courbe en cloche". Dans un premier temps, une baisse de l'intensité permet d'améliorer le flux d'externalités. Cette amélioration stagne puis devient une dégradation à partir d'un certain seuil d'extensivité. Dans un souci de simplification, nous retiendrons dans notre travail l'hypothèse du cas nord-américain où la relation entre intensité agricole et production nette d'externalités est strictement négative. Nous supposons que cette hypothèse tient dans notre cadre restreint de l'espace périurbain.

Par définition, les externalités sont co-produites par l'activité agricole. En l'absence de politique publique, les agriculteurs ne sont donc pas rémunérés ou taxés pour la production d'externalités positives et négatives. En réalité, il existe des politiques dites agri-environnementales qui consistent à rémunérer les agriculteurs pour les services non marchands qu'ils produisent. Les revues de littérature de Baylis *et al.* (2008) et Wunder *et al.* (2008) donnent un aperçu exhaustif des politiques agri-environnementales dans différents pays.

Aux Etats-Unis, les politiques agri-environnementales (*agri-environmental policies*) prennent essentiellement la forme de plans incitant au gel de terres agricoles, tels que le *Conservation Reserve Program* ou le *Grasslands Reserve Program*, et de plans d'incitation à des pratiques respectueuses de l'environnement tels que le *Environmental Quality Incentives Program*. En 2004, l'ensemble de ces politiques ont représenté un coût d'approximativement 2,7 milliards de dollars pour le gouvernement fédéral (Claassen *et al.*, 2008).

En Europe, la politique agricole est régie par la Politique Agricole Commune (PAC) depuis 1962. Elle fait partie des toutes premières politiques communautaires mises en place lors

de la création de la Communauté Economique Européenne (CEE). Les préoccupations agri-environnementales n'apparaissent cependant qu'avec les réformes de 1992, avec la mise en place des premières politiques consacrées au développement rural et intégrées dans ce qu'on appelle le deuxième pilier de la PAC, par opposition au premier pilier (soutiens directs à la production). Contrairement aux Etats-Unis, les politiques agri-environnementales européennes visent d'avantage à maintenir l'activité agricole dans les zones défavorisées. Une part importante de ce deuxième pilier consiste en des plans d'incitation à des pratiques respectueuses de l'environnement tels que les Mesures Agri-Environnementales (MAE) qui prévoient le versement d'aides aux agriculteurs s'engageant à réaliser des objectifs agro-environnementaux sur une période donnée. En 2012, le budget du Fond Européen Agricole pour le Développement Rural (FEADER) représentait 13,2 milliards d'euros pour l'ensemble des pays membres de l'UE. Les paiements agri-environnementaux (MAE) ont représenté 3,2 milliards d'euros soit près d'un quart du total (CE, 2012). De manière générale, ces politiques s'adressent à l'agriculture dans son ensemble, mais les aides du deuxième pilier sont de plus en plus territorialisées et mises en œuvre en fonction de problématiques locales (Aubert *et al.*, 2007). Il n'existe pas actuellement de politique agricole spécifiquement orientée vers l'agriculture périurbaine.

## Plan du rapport

Le présent rapport se découpe en 3 parties. La première partie présente la construction d'un modèle théorique d'économie urbaine qui endogénéise les paysages périurbains. Dans un premier chapitre, nous détaillons le fonctionnement du modèle et nous montrons comment différentes configurations urbaines émergent en fonction des hypothèses faites sur les paramètres du modèle. Dans le deuxième chapitre, nous introduisons une politique paysagère, qui prend ici la forme d'une politique agri-environnementale et nous en étudions les effets sur les formes urbaines et la redistribution des richesses entre les agents.

Nous consacrons la deuxième partie du rapport à la présentation de la méthodologie de création des données sur les quatre aires urbaines. Dans le troisième chapitre nous détaillons la procédure d'identification de l'urbanisation pour chaque date retenue. Le quatrième chapitre est consacré à la construction de l'ontologie géographique des paysages.

Enfin, la dernière partie du rapport présente les analyses empiriques. Le cinquième chapitre présente les analyses de données permettant l'identification des liens entre paysages et étalement urbain. Le sixième et dernier chapitre détaille l'estimation d'un modèle d'allocation et de changement des usages du sol.

La première partie a été intégralement publiée dans les meilleures revues internationales en économie urbaine, en économie agricole et en économie de l'environnement. Les autres parties sont en cours de valorisation. La production scientifique liée au projet PAYTAL est détaillée en Annexe C.

Première partie

Modèle théorique

# Chapitre 1

## Un modèle économique de ville à aménité périurbaine endogène

### 1.1 Introduction

Dans ce premier chapitre nous décrivons un modèle théorique qui relie l'urbanisation des zones périurbaines à la production d'aménités agricoles dans le périurbain. L'agriculture est le principal déterminant<sup>1</sup> du cadre de vie dans le périurbain peu dense.

La construction du modèle théorique que nous proposons repose sur le modèle monocentrique de la nouvelle économie urbaine. Les ménages travaillent en centre ville et choisissent leur lieu de résidence en arbitrant entre le coût du foncier et les coûts de transport. Cet arbitrage est modifié par l'introduction d'un cadre de vie hétérogène. Une originalité du modèle que nous proposons est de relier les externalités agricoles (pollutions, entretien des paysages, etc.) à l'intensité de l'agriculture qui dépend elle-même du marché foncier. En outre, nous faisons dépendre le cadre de vie l'urbanisation en introduisant des externalités négatives entre les ménages qui se nuisent entre eux lorsqu'ils urbanisent le périurbain. En faisant cela, nous analysons de manière explicite une ville dans laquelle le cadre de vie dépend de deux usages majeurs du sol : l'usage résidentiel et un usage économique (ici l'agriculture). C'est à notre connaissance la première fois qu'un tel modèle est développé.

Dans ce premier chapitre, nous analysons comment les différents paramètres qui régissent le comportement des ménages (revenus, coûts de transports) et des agriculteurs (prix des biens agricoles, coûts des intrants, technologie) modifient l'équilibre de la ville. Nous introduisons des politiques publiques d'amélioration du cadre de vie dans le deuxième chapitre

Ce premier chapitre débouche sur deux résultats forts. Le premier est qu'en spatialisant le comportement des agriculteurs, nous montrons que le mitage est un équilibre possible du modèle, alors que dans la littérature il n'est obtenu qu'en faisant l'hypothèse d'aménités exogènes (un lac, un parc, etc.). Le second est que l'équilibre spatial peut prendre trois formes (absence

---

1. En 1990, sur l'aire urbaine d'Angers, les espaces agricoles occupent 82% du sol, par exemple.



de périurbanisation, extension urbaine et mitage) qui dépendent essentiellement de deux facteurs : la capacité de l'agriculture à fournir des aménités<sup>2</sup> et des préférences des ménages.

La suite de ce chapitre se présente de la manière suivante. Dans une première section nous réalisons une revue de littérature sur la nouvelle économie urbaine. Dans une deuxième section nous développons notre proposition de modèle théorique. La troisième section analyse l'impact des différents paramètres du modèle sur l'équilibre urbain et propose des simulations numériques pour des cas typiques. La dernière section conclue ce chapitre.

## 1.2 Revue de littérature sur la Nouvelle Economie Urbaine et les choix de localisation résidentielle

Branche spécialisée de l'économie géographique, l'économie urbaine s'attache à étudier les choix de localisation de ménages et d'entreprises dans l'espace urbain, suivant des problèmes de maximisation d'utilité ou de profit décrits par la microéconomie. L'économie urbaine connaît un essor important à partir des années soixante-dix, à travers ce qu'on appelle la Nouvelle Economie Urbaine. Richardson (1976) la définit comme une tentative de réunir économie urbaine et économie du bien-être dans un cadre théorique général, impliquant une dimension politique indéniable. Nous présentons dans un premier temps le modèle statique et continu de la ville monocentrique, un modèle incontournable pour aborder l'approche économique du développement urbain.

### 1.2.1 Les modèles statiques de la Nouvelle Economie Urbaine

#### Hypothèses du modèle de la ville monocentrique

Au cours de la deuxième moitié du vingtième siècle, le modèle le plus influent de la Nouvelle Economie Urbaine (NEU) a été celui de la ville monocentrique, issu des travaux de Alonso (1964), Muth (1969) et Mills (1972), à partir de la théorie de la localisation des terres agricoles proposée par Von Thünen en 1826 et présentée dans le chapitre 1. Le modèle de la ville monocentrique, dans sa version la plus simple, repose sur un ensemble d'hypothèses principalement liées au contexte spatial de son objet d'étude : la ville. On considère ainsi que l'espace est complètement homogène, à l'exception d'un point particulier communément appelé le CBD (Central Business District) qui concentre l'ensemble des emplois de l'économie. La ville monocentrique est peuplée de ménages identiques qui vont choisir comment consommer de l'espace résidentiel, en fonction de leur contrainte budgétaire. On considère qu'un membre de chaque ménage va travailler chaque jour au CBD. Ainsi, dans le budget des ménages seront intégrés les coûts engendrés par le *commuting*, c'est-à-dire les déplacements quotidiens domicile-travail. La prise en compte de la distance au CBD pousse les ménages à en valoriser l'accessibilité. La résolution du programme de maximisation des ménages permet d'en dégager leur fonction

---

2. Les formes urbaines doivent donc dépendre des variations spatiales des conditions pédo-climatiques que l'on observe sur un territoire national et qui jouent sur les grandes orientations technico-économiques agricoles régionales.

de rente d'enchère, c'est-à-dire ce qu'ils sont prêts à payer pour une unité d'espace résidentiel localisée à une distance donnée du CBD. Posons la fonction d'enchère  $r(x, w, \tau, \bar{V})$  où  $x$  représente la distance au CBD,  $w$  le revenu des ménages,  $\tau$  les coûts de *commuting* et  $\bar{V}$  le niveau d'utilité atteint par les ménages à l'équilibre. De manière intuitive, la rente d'enchère est une fonction décroissante de la distance au CBD. Autrement dit, les ménages seront prêts à payer plus cher pour une unité d'espace résidentiel localisée à proximité du CBD, mais auront un consentement à payer moins élevé pour une même unité d'espace résidentiel plus éloignée à cause des coûts supplémentaires engendrés par le *commuting*. Pour résumer, l'arbitrage des ménages est le suivant : il s'agit de choisir entre un espace résidentiel réduit mais à proximité du lieu de travail, engendrant ainsi de faibles coûts de *commuting*, et une localisation plus éloignée et plus coûteuse en déplacements mais synonyme d'espace résidentiel plus important.

A l'équilibre spatial, les ménages atteignent tous le même niveau d'utilité  $\bar{V}$  indépendamment de leur localisation résidentielle. Dans une synthèse sur la théorie de l'économie urbaine, Fujita (1989) montre que l'équilibre spatial de la ville monocentrique est efficace économiquement puisqu'il est pareto-optimal sous certaines conditions. A l'équilibre spatial, la frontière de la ville  $\bar{x}$  est définie par le niveau de la rente agricole  $r_a$ , variable exogène au modèle. A partir du moment où le consentement des ménages à payer pour de l'espace résidentiel devient plus faible que le consentement des agriculteurs à payer pour de la terre agricole, la ville atteint sa limite.  $\bar{x}$  est donc défini par  $r(\bar{x}, w, \tau, \bar{V}) = r_a$ . En d'autres termes, on considère que l'usage du sol est attribué au plus offrant. Mathématiquement, la ville est représentée par l'ensemble :  $C = \{x < \bar{x} | r(x, w, \tau, \bar{V}) \geq r_a\}$ .

La deuxième condition d'équilibre permet de s'assurer que l'ensemble de la population ( $N$  ménages) peut être accueillie dans l'espace urbain. On a  $N = \int_0^{\bar{x}} 2\pi x \rho(x) dx$  où  $\rho(x)$  représente le nombre de ménages localisés en  $x$ .

L'interprétation de ces conditions d'équilibre dépend de deux cas de figures - voir tableau 1.1 :

— Ville monocentrique fermée

La taille de la population de la ville est fixe et exogène. A l'équilibre, tous les ménages se répartissent autour du CBD et obtiennent le même niveau d'utilité, endogène au modèle.

— Ville monocentrique ouverte

Le niveau d'utilité d'équilibre est exogène et identique pour l'ensemble des villes de la région. On considère que les ménages peuvent librement migrer d'une ville à l'autre s'ils n'atteignent pas le niveau d'utilité dans leur ville. Ainsi, dans ce cas de figure, la population de la ville est endogène et établie à l'équilibre spatial du modèle.

On considère souvent que l'hypothèse de la ville fermée illustre plutôt le cas de sociétés fortement industrialisées dans lesquelles le mode de vie urbain est largement majoritaire. Le modèle de ville ouverte correspond plutôt à des pays où le mode de vie rural est encore très

répandu et constitue alors un niveau de bien-être de référence exogène (Wheaton, 1974).

	<b>Variables exogènes</b>	<b>Variables endogènes</b>
<b>Ville fermée</b>	<b>Taille de la population <math>N</math></b>	<b>Niveau d'utilité <math>\bar{V}^*</math></b>
	Revenu $w$	Rente résidentielle $r^*(x)$
	Coûts de transport $\tau$	Nb de ménages en chaque point $\rho(x)$
	Rente agricole $r_a$	Frontière de la ville $\bar{x}$
<b>Ville ouverte</b>	<b>Niveau d'utilité <math>\bar{V}^*</math></b>	<b>Taille de la population <math>N</math></b>
	Revenu $w$	Rente résidentielle $r^*(x)$
	Coûts de transport $\tau$	Nb de ménages en chaque point $\rho(x)$
	Rente agricole $r_a$	Frontière de la ville $\bar{x}$

TABLEAU 1.1 – Comparaison ville fermée - ville ouverte

### Statique comparative du modèle de base

Les premières analyses de statique comparative sur le modèle de la ville monocentrique ont été effectuées par Wheaton (1974), rapidement suivi par Hartwick *et al.* (1976); Brueckner (1987); Fujita (1989). La statique comparative permet d'analyser l'effet de variations des paramètres exogènes du modèle sur les paramètres endogènes. Les résultats sont généralement assez intuitifs et permettent de comprendre les mécanismes en œuvre dans le modèle. Le tableau 1.2 présente les principaux résultats mis en avant par Brueckner (1987) dans le cas d'une ville fermée. Une augmentation de la population urbaine, variable exogène au modèle dans ce cas précis, provoque un étalement de la ville dans l'espace, une augmentation de la rente d'enchère des ménages ainsi que de la densité résidentielle. En revanche, l'espace résidentiel consommé par les ménages s'en retrouve réduit. Autre résultat intuitif du modèle, une augmentation du niveau de la rente agricole a un impact négatif sur la taille de la ville et sur l'espace résidentiel consommé par les ménages. En revanche, l'impact est positif sur la fonction d'enchère et sur la densité résidentielle. Enfin, toute chose étant égale par ailleurs, une diminution des coûts de transport et/ou une augmentation du revenu des ménages ont un effet positif sur la taille de la ville. L'effet sur les autres variables endogènes est plus ambigu. Brueckner montre qu'une augmentation du revenu - ou une baisse du coût de transport - tend à baisser l'enchère foncière et la densité résidentielle lorsqu'on est proche du centre, mais que l'effet s'inverse lorsque l'on considère des zones plus éloignées du CBD.

	Frontière de la ville	Rente d'enchère des ménages	Espace résidentiel	Densité résidentielle
Taille de la population	+	+	-	+
Rente agricole	-	+	-	+
Revenu des ménages	+	+/-	+/-	+/-
Coûts de transport	-	+/-	+/-	+/-

TABLEAU 1.2 – Principaux résultats de la statique comparative effectuée par Brueckner (1987) dans le cas d'une ville fermée

A partir des travaux de référence d'Alonso-Muth-Mills, les économistes ont développé, dès la fin des années soixante-dix, des modèles continus et statiques de l'étalement urbain en relâchant progressivement les nombreuses hypothèses du modèle de base telles que la monocentricité de la ville, l'homogénéité de l'espace ou encore l'uniformité des ménages. En effet, le modèle standard tel que nous l'avons décrit dans cette section ne permet pas d'expliquer à lui seul la complexité du processus d'étalement urbain, en particulier dans sa forme fragmentée.

### **Extensions du modèle standard de la ville monocentrique**

**La ville polycentrique** Des modèles de villes polycentriques, impliquant l'existence de centres d'emploi secondaires, ont été développés pour relâcher l'hypothèse d'un point central unique concentrant l'ensemble des emplois de la ville. Dans la réalité, on observe en effet un phénomène de dispersion de l'emploi et l'émergence de centres dits secondaires justifiant de nouveaux questionnements tels que le déclin possible du CBD, l'influence relative de ces centres secondaires ou encore le rôle de la décentralisation et de la multipolarisation des activités économiques. Très rapidement, les économistes ont introduit la possibilité d'une ville non monocentrique - ou polycentrique (Papageorgiou & Casetti, 1971; Romanos, 1977; Ogawa & Fujita, 1980). Le polycentrisme des villes est expliqué dans la théorie comme le résultat des tensions qui s'exercent entre économies d'agglomération, qui poussent les entreprises à se regrouper en *clusters*, et forces de dispersion telles que l'augmentation des prix fonciers, compétition entre entreprises ou externalités liées à la congestion (Irwin & Bockstael, 2006). Dans leur étude empirique de l'aire urbaine de Los Angeles, Giuliano & Small (1991) définissent les centres secondaires par la quantité et la densité brute d'emplois au sein de diverses zones contiguës. De manière plus générale, on peut utiliser différentes formes fonctionnelles multicentriques pour estimer empiriquement les densités résidentielles, d'emplois ou les valeurs foncières (Baumont & Le Gallo, 2000).

**Hétérogénéité du revenu** Le modèle standard de la ville monocentrique suppose que chaque ménage étant identique, le niveau de revenu est le même pour l'ensemble de la population. On peut étendre le modèle à un cas où se côtoient différents groupes de revenus. De nombreux auteurs ont développé cette possibilité dans le but d'étudier les décisions de localisation des ménages de revenus différents (Hartwick *et al.*, 1976; Wheaton, 1977; Wu, 2006). Posons par exemple l'existence de deux groupes de ménages caractérisés par deux niveaux de revenus différents. En appliquant le modèle théorique standard pour chacun de ces groupes, on aboutit à deux fonctions d'enchère foncière distinctes dont on pourra comparer la distribution en fonction de la distance au CBD. A l'équilibre, l'espace résidentiel étant alloué au plus offrant, on peut alors étudier la localisation des ménages selon leur revenu et mettre ainsi en avant des phénomènes de ségrégation sociale dans l'espace observables dans la réalité.

**Introduction d'externalités** L'homogénéité de l'espace dans lequel se développe la ville est une hypothèse forte du modèle standard de la ville monocentrique. Les auteurs ont très vite intégré de l'hétérogénéité spatiale aux modèles urbains, en introduisant des externalités

positives ou négatives. Les problèmes de congestion ont été traités par différentes approches : congestion liée à la densité de voisinage (Richardson, 1977), voisinage et ségrégation raciale (Yinger, 1976) ou encore congestion liée au transport (Solow & Vickrey, 1971; Wheaton, 1998). D'autres auteurs se sont également intéressés à la répartition des biens publics au sein de l'aire urbaine (Arnott, 1979; Brueckner, 1979; Yang & Fujita, 1983; Fujita, 1986; Palmquist, 1992). La présence d'externalités implique que la fonction d'enchère foncière des ménages n'est plus nécessairement strictement décroissante avec la distance au CBD. Ainsi, la non-monotonie de la rente peut expliquer l'apparition d'une forme fragmentée de développement résidentiel.

La prise en compte d'externalités positives ou négatives s'est par la suite généralisée à l'intégration d'aménités naturelles et agricoles, une extension fondamentale du modèle standard pour pouvoir appréhender la question du mitage. Brueckner *et al.* (1999) distinguent trois types d'aménités pouvant conférer à l'espace un caractère hétérogène. Les aménités naturelles correspondent aux caractéristiques topologiques de l'espace - par exemple une rivière, une colline ou un bord de mer. Les aménités historiques caractérisent quant à elles l'aspect esthétique et patrimonial de la ville - par exemple les monuments, l'architecture ou les espaces verts. A ces deux premières catégories d'aménités exogènes, s'oppose l'ensemble des aménités dites modernes, considérées comme endogènes. Il s'agit ici de prendre en compte la situation socio-économique du voisinage, caractérisée par la présence ou l'absence d'équipements publics, restaurants, théâtres, ou encore l'état de rénovation des aménités historiques qui sont autant de variables dépendantes du niveau de revenu moyen dans le voisinage. L'introduction d'une fonction de distribution représentant le niveau d'aménités en tout point de l'espace a été largement utilisé par les auteurs depuis les années 2000 (Wu & Babcock, 2001; Cho, 2001; Wu & Plantinga, 2003; Cavailhès *et al.*, 2003; Kovacs & Larson, 2007; Wu & Irwin, 2008).

### 1.2.2 Modélisation dynamique de la conversion des terres agricoles

Parallèlement à la modélisation statique de l'étalement urbain se sont développées des approches dynamiques du processus de conversion des terres agricoles. La modélisation dynamique implique une vision différente de la structure spatiale urbaine. Le développement urbain est un processus temporel, si bien que les prix fonciers et les densités de développement dépendent de la situation économique à un temps  $t$  donné. Une approche dynamique offre la possibilité d'étudier des phénomènes non observables dans un modèle statique tels que l'abandon, l'usure ou la succession de l'occupation du sol en un point. L'approche dynamique de l'économie urbaine a été initiée dès la fin des années soixante-dix (Anas, 1978; Arnott & Lewis, 1979; Arnott, 1980; Wheaton, 1982) à partir des travaux de référence de la Nouvelle Economie Urbaine d'Alonso-Muth-Mills et de la théorie des investissements appliquée au cas de la terre agricole (Shoup, 1970). Le modèle de Capozza & Helsley (1989) fait figure de référence dans cette approche. Leur modèle s'appuie sur l'approche traditionnelle ricardienne selon laquelle le prix du sol à une date  $t$  est déterminé par la capitalisation de la rémunération attendue de son usage futur. Dans notre cas, la valeur de la terre est donc donnée par la somme des rémunérations agricoles attendues jusqu'à la date de conversion, additionnée de

l'ensemble des rentes urbaines attendues après artificialisation, nette du coût de conversion. Mathématiquement, la valeur foncière actualisée nette d'une parcelle non artificialisée localisée en  $x$  à la date  $t$  peut s'écrire :

$$P_a(t, x) = \int_t^{t^*} r_a e^{-i(\tau-t)} d\tau + \int_{t^*}^{\infty} r(\tau, x) e^{-i(\tau-t)} d\tau - C e^{-i(t^*-t)}$$

où  $r_a$  correspond à la rente agricole constante et exogène,  $r(\tau, x)$  est la rente issue de l'usage résidentiel à la date  $\tau$  et à une distance  $x$  du CBD,  $C$  représente les coûts de conversion de la parcelle de l'usage agricole à l'usage résidentiel,  $i$  est le taux d'actualisation et enfin  $t^*$  est la date de conversion de la parcelle. Le choix de la date de conversion de la parcelle va être effectué par les propriétaires fonciers de manière à maximiser la valeur actualisée de la terre. Capozza et Helsley montrent que la condition de premier ordre nécessaire pour maximiser  $P_a(t, x)$  par rapport à  $t^*$  peut s'écrire :  $r(t^*, x) = r_a + iC$ . Finalement, cela signifie qu'une parcelle est convertie lorsque ce qu'elle peut rapporter pour un usage résidentiel est égal au coût d'opportunité agricole additionné du coût de conversion. La figure 1.1a représente les composantes de la valeur foncière, mis en évidence par Capozza et Helsley : la rente agricole, le coût de conversion, la valeur attribuée à l'accessibilité au CBD et les rentes urbaines anticipées.

Capozza et Helsley ont rapidement étendu leur modèle en y introduisant de l'incertitude dans le choix du propriétaire foncier à artificialiser sa parcelle de terre (Capozza & Helsley, 1990). En effet, l'artificialisation des terres étant caractérisée par un certain degré d'irréversibilité, cela va affecter les choix des investisseurs. En introduisant un mouvement brownien sur les revenus des ménages de leur modèle, Capozza & Helsley (1990) montrent que l'incertitude peut retarder la conversion d'une terre agricole en terre urbanisée, puisqu'elle introduit une valeur d'option dans la valeur foncière, tel que représenté dans la figure 1.1b. Capozza & Li (1994) montrent que lorsque l'incertitude s'applique à l'intensité de l'investissement, on observe une nouvelle composante dans la valeur foncière, liée au niveau d'investissement ("*intensity premium*"), ce qui retarde la date de conversion, mais augmente la rente urbaine au moment de cette conversion. L'incertitude liée aux investissements immobiliers, à leur durée et à l'aboutissement du projet provoquent des décalages dans la décision de conversion des sols et peut expliquer l'apparition de formes d'étalement urbain défragmentées (Bar-Ilan & Strange, 1996).

Dans la suite de ce chapitre, nous proposons un modèle théorique de choix de localisation résidentielle des ménages dans lequel, contrairement aux modèles habituels, l'espace est caractérisé par une agriculture hétérogène. Cela implique deux innovations théoriques : d'une part, la rente agricole n'est plus considérée comme une limite exogène du développement de la ville puisque, l'agriculture variant dans l'espace, la distribution de la rente agricole ne sera plus uniforme. D'autre part, en considérant que l'agriculture produit des externalités potentiellement valorisées par les ménages (e.g. paysage, cadre de vie), chaque point de l'espace sera caractérisé par un niveau d'aménités agricoles dépendant directement du type d'agriculture présent en ce point. La distribution des aménités est donc rendue endogène au modèle. La section suivante présente le modèle et ses mécanismes.

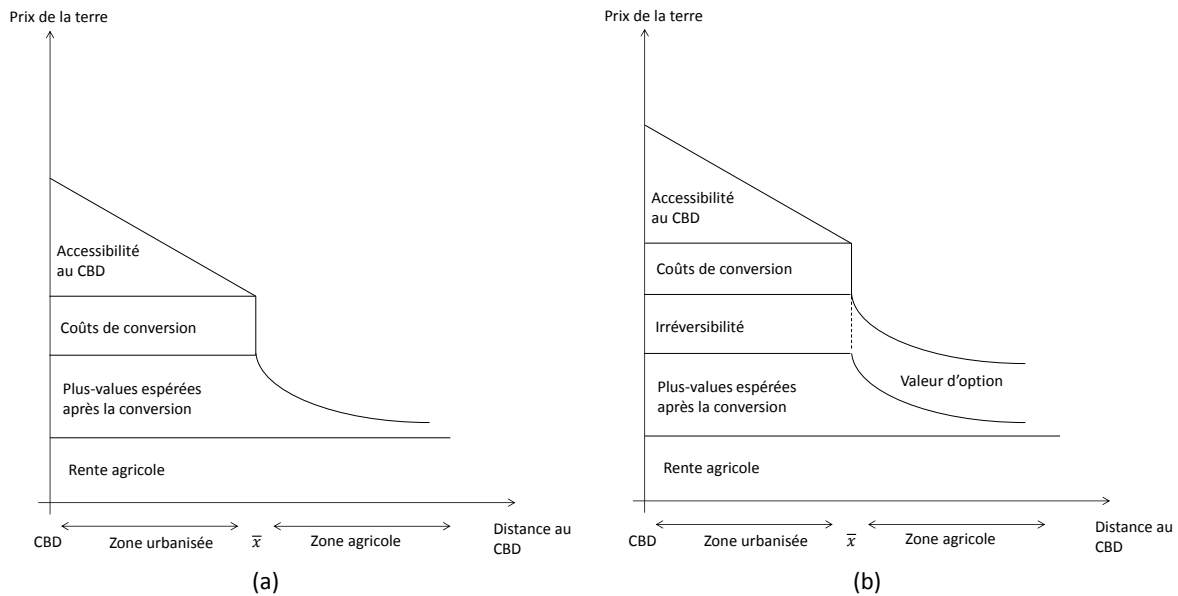


FIGURE 1.1 – Les composantes de la valeur foncière selon (a) Capozza & Helsley (1989) et (b) extension à l'incertitude (Capozza & Helsley, 1990).

### 1.3 Construction d'un modèle statique de ville monocentrique dans un contexte agricole hétérogène

L'objectif de cette partie est de construire un modèle théorique qui met en évidence le rôle de l'agriculture dans les formes d'étalement des villes. La littérature économique traitant du rôle des aménités sur le développement urbain est abondante, mais peu de travaux introduisent les effets spatiaux d'aménités agricoles de manière explicite. A partir du modèle standard de la ville monocentrique, présenté dans la section précédente, Polinsky & Shavell (1976) ont relâché l'hypothèse d'un espace homogène et introduit une aménité environnementale caractérisée par sa distance au CBD. Ils montrent comment l'aménité peut influencer les formes urbaines spatiales. De manière similaire, pour expliquer que dans certaines villes, les ménages les plus pauvres vivent près du centre alors que les ménages les plus riches vivent plutôt en périphérie, Brueckner *et al.* (1999) étendent le modèle de la ville monocentrique pour y inclure des aménités caractérisées également par leur distance au CBD. Dans ces deux travaux, les aménités n'occupent pas physiquement l'espace, mais le caractérisent seulement. En revanche, Mills (1981), Nelson (1985) et Lee & Fujita (1997) analysent les effets de la formation de ceintures vertes ou "*greenbelts*" autour des villes. Dans l'ensemble de ces travaux, les aménités sont homogènes dans l'espace.

Parallèlement, l'introduction d'aménités spatialement hétérogènes a été avancée comme raison possible de la fragmentation de l'espace résidentiel. Ceci est dû au fait que la rente d'enchère foncière des ménages n'est pas obligatoirement monotone par rapport à la distance au CBD (Ogawa & Fujita, 1980; Yang & Fujita, 1983; Fujita & Kashiwadani, 1989). Plusieurs travaux récents proposent des modèles de ville à deux dimensions incluant des aménités environnementales qui montrent les effets de la localisation, la taille et la forme des *open space*

sur l'équilibre spatial d'une ville monocentrique (Wu & Plantinga, 2003; Turner, 2005; Wu, 2006; Kovacs & Larson, 2007; Tajibaeva *et al.*, 2008; Newburn & Berck, 2011). Ces travaux proposent une explication plus intuitive du phénomène de mitage que les études précédentes, mais conservent cependant l'hypothèse d'une rente agricole et d'aménités exogènes.

De manière générale, le modèle de la ville monocentrique considère que la rente agricole, uniforme et exogène, définit seulement la frontière urbaine. Ainsi, ces travaux ne peuvent pas étudier pleinement les interactions à l'œuvre entre ville et agriculture. Les caractéristiques des exploitations agricoles ne peuvent donc pas avoir d'effet sur la conversion des terres agricoles. Certains travaux étudient clairement les variations de la frontière urbaine en relation avec l'espace agricole présent aux environs de la ville (Muth, 1961; Walker, 2001; Cavailhès *et al.*, 2004). Ces études rassemblent des intuitions du modèle de la ville monocentrique et du modèle d'occupation du sol de Von Thünen. Elles ne sont pas exactement orientées vers la question de l'étalement urbain mais offrent un cadre analytique intéressant pour mieux comprendre les interactions entre ville et agriculture.

Bien que l'étalement urbain soit un phénomène dynamique et irréversible, il a été montré que le modèle monocentrique statique est valable empiriquement dans les villes actuelles (McGrath, 2005). Notre modèle se base sur les travaux de Wu & Plantinga (2003), Wu (2006) et Cavailhès *et al.* (2004). Contrairement à Wu & Plantinga (2003) et Wu (2006), nous considérons que les exploitants agricoles ont un comportement von thünénien. Au sein de la zone sous influence urbaine, les exploitations intensives sont localisées à proximité des villes, alors que les grandes exploitations, plus extensives, sont plus éloignées. Cela peut s'expliquer par la pression urbaine qui s'exerce sur le foncier agricole. Plus loin des villes, le foncier devient plus abordable et peut être substitué au capital. Cela peut avoir lieu à quelques kilomètres pour les petites villes, et jusqu'à vingt kilomètres pour les grandes métropoles. Par exemple, Cavailhès & Wavresky (2007) montrent que pour les aires urbaines françaises moyennes (entre 20000 et 50000 habitants), le prix du foncier agricole passe de 5500 €/ha à proximité du centre ville, à 4500 €/ha 5 kilomètres plus loin, et à 1500 €/ha 20 kilomètres plus loin. Ils observent également qu'à culture identique, les itinéraires techniques sont plus intensifs à proximité des villes et que cette intensité décroît avec la distance<sup>3</sup>. Nous soulignons le rôle des aménités agricoles, en tant que co-production de l'activité agricole, dans le bien-être des ménages. Dans Cavailhès *et al.* (2004), les aménités sont proportionnelles à la quantité de terres agricoles, si bien que les exploitations produisent le même niveau d'aménités agricoles, indépendamment de leur intensité. Cette hypothèse ne nous semble pas cadrer avec la réalité. On observe bien souvent une certaine hétérogénéité spatiale des aménités agricoles, qui dépend de l'intensité des pratiques. La variabilité de l'agriculture peut être suffisamment forte pour influencer le développement résidentiel. En effet, plusieurs études empiriques montrent que l'introduction d'une politique publique visant à préserver des paysages traditionnels, ou à promouvoir la production d'externalités positives, peut induire du développement résidentiel dans les alentours

---

3. L'intensité des itinéraires techniques est mesurée à travers la marge brute standard (MBS) par hectare, les unités de travail annuel par hectare et la puissance motorisée par hectare.



(Roe *et al.*, 2004; Irwin & Bockstael, 2004; Towe, 2010; Geniaux & Napoléone, 2011). Ainsi, contrairement à Cavailhès *et al.* (2004), nous faisons l’hypothèse que le niveau d’aménités est défini en chaque point de l’espace selon le niveau d’intensité de l’activité agricole. Au sein de la zone agricole sous influence urbaine, les exploitations intensives produisent moins d’aménités valorisées par les ménages que les exploitations extensives. Cette extension du modèle monocentrique nous permet d’expliquer l’apparition du mitage autour d’une ville de manière endogène. En produisant un certain niveau d’aménités environnementales, les exploitants plus extensifs encouragent d’une certaine manière les ménages à se localiser plus loin de la ville, malgré les coûts supplémentaires en déplacements.

Cette section présente le modèle et son équilibre spatial, et illustre les résultats à l’aide de simulations numériques.

### 1.3.1 Structure de la ville

Pour étudier les formes d’étalement urbain en présence d’une agriculture variant dans l’espace, nous développons un modèle monocentrique statique de ville ouverte. L’espace est représenté dans une dimension  $X = (-\infty, +\infty)$  avec un CBD à son origine. Nous supposons que l’ensemble de l’emploi non-agricole est concentré au niveau du CBD. Deux catégories d’agents économiques sont en compétition pour l’utilisation du foncier :  $N$  ménages identiques travaillant au CBD, pour un usage résidentiel, et  $N_a$  agriculteurs identiques, pour un usage agricole. Nous supposons enfin que les parcelles appartiennent à des propriétaires fonciers absents du modèle.

#### La rente d’enchère foncière agricole

Pour produire  $Y$ , les agriculteurs utilisent deux catégories d’inputs : du foncier ( $L$ ) et des inputs non fonciers ( $K$ ). Les inputs non fonciers représentent l’ensemble des inputs agricoles tels que de l’équipement technique, de la machinerie, des semences, des engrais et autres types d’intrants susceptibles d’être utilisés dans différents types d’activité agricole. La fonction de production est donnée par  $Y = F(K, L)$ . Cette fonction est croissante et concave par rapport à  $K$  et  $L$  et est caractérisée par des rendements d’échelle constants, ce qui nous permet d’écrire que  $y = Y/L = f(k)$ , où  $y$  désigne la production agricole par unité de surface (nous utiliserons l’hectare) et  $k$  représente la quantité d’inputs non fonciers par hectare<sup>4</sup>. Nous supposons que  $f(0) = 0$ ,  $f'(k) > 0$  et  $f''(k) < 0$ . Chaque exploitation agricole vend sa production au sein d’un marché local établi au niveau du CBD, tel que décrit par l’approche de Von Thünen. Nous supposons que les coûts de transports sont proportionnels à la distance au CBD  $x$  et que  $t$  représente le coût par unité de distance. La production agricole, les parcelles de terre et les inputs non fonciers sont échangés sans restriction à des prix déterminés par la compétition du marché,  $p$ ,  $r_a$  et  $p_k$  respectivement.

---

4. Cette spécification s’inspire de Beckmann (1972)

La fonction de profit de l'agriculteur est donnée par :

$$\pi(k, x) = (p - tx) f(k) - p_k k - r_a \quad (1.1)$$

Maximiser le profit par rapport à  $k$  implique que  $(p - tx) f'(k) = p_k$ . Si  $f(k)$  est une fonction de type Cobb-Douglas alors  $f(k) = Ak^\alpha$  avec  $0 < \alpha < 1$ , on en déduit :

$$k^* = \left[ \alpha \frac{A(p - tx)}{p_k} \right]^{\frac{1}{1-\alpha}} \quad (1.2)$$

et

$$y^* = A \left[ \alpha \frac{A(p - tx)}{p_k} \right]^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} \quad (1.3)$$

(1.2) montre que l'utilisation d'intrants non-fonciers  $k$  est continue dans l'espace et diminue au fur et à mesure que la distance à la ville augmente. Les activités agricoles sont influencées par la distance qui les sépare de la ville. Près des villes, les exploitations agricoles ont tendance à être plus intensives, caractérisées par un niveau d'utilisation d'intrants par hectare plus élevé. Plus loin des villes, l'agriculture devient plus extensive, à mesure que le niveau d'utilisation d'intrants non-fonciers diminue. Ce niveau atteint zéro à la distance  $p/t$ . Par conséquent, le niveau de production agricole (1.3) est une fonction décroissante de la distance au centre-ville et s'annule en  $p/t$ .

Puisque la fonction de production  $f(\cdot)$  est caractérisée par des rendements d'échelle constants, à l'équilibre, l'ensemble des exploitants a un profit par hectare nul en tout point  $x$ , d'où :

$$r_a^*(x) = A(1 - \alpha) \left( \frac{\alpha A}{p_k} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} (p - tx)^{\frac{1}{1-\alpha}} \quad (1.4)$$

Notons que  $r_a(x)$  est une fonction continue, décroissante de la distance au centre-ville et s'annule au-delà de  $p/t$ . Dans son modèle, Beckmann (1972) montre que dans le cas où différents types d'agriculture sont présents dans l'espace étudié, on observerait de la même manière un gradient de rentes d'enchère continu et décroissant.

L'obtention de gradients décroissants pour l'intensité agricole et la rente d'enchère foncière, par ailleurs cohérents avec les observations empiriques (Katzman, 1974; Heimlich & Barnard, 1992; Cavailhès & Wavresky, 2007), est exclusivement due à notre hypothèse de comportement Von Thünenien de la part des agriculteurs dans notre modèle.

Des études empiriques aux Etats-Unis et en Europe montrent la validité du comportement Von Thünenien autour de nos villes contemporaines (Plantinga *et al.*, 2002; Cavailhès & Wavresky, 2003; Livanis *et al.*, 2006; Wu & Lin, 2010). On peut expliquer cela par le fait que beaucoup d'infrastructures de stockage et de transport agro-alimentaire sont localisées aux abords des villes, mais aussi par le fait que de nombreux agriculteurs localisés en zone d'influence urbaine mettent en oeuvre des stratégies de commercialisation directe de leurs produits

(Cavaillès *et al.*, 2004). Cependant, il est vrai que dans les villes modernes, cette observation s'explique également par la pression foncière qu'une aire urbaine exerce sur le prix des terres agricoles (Capozza & Helsley, 1989), incitant les agriculteurs à substituer leur input foncier par des inputs non fonciers (fertilisants, pesticides, mécanisation...). Ce processus clairement dynamique ne peut pas être pris en compte dans un modèle statique tel que le nôtre. Cependant, les observations faites dans notre approche statique sont en parfaite cohérence avec les observations liées à un modèle dynamique.

La rente d'enchère agricole est égale à zéro en  $p/t$ . Cependant, ce que nous appellerons l'espace agricole sous influence urbaine s'arrête à partir de la distance  $\underline{x} < p/t$ , au-delà de laquelle l'agriculture devient indépendante de toute influence urbaine et peut être considérée comme une agriculture d'exportation, caractérisée par une rente foncière constante  $\underline{r}_a$ . Ce type d'agriculture ne sera abordé ici qu'à travers son rôle de frontière de l'agriculture périurbaine. La distance  $\underline{x}$  est atteinte lorsque  $r_a(\underline{x}) = \underline{r}_a$  :

$$\underline{x} = \frac{p - \tilde{r}_a^{1-\alpha} A (1 - \alpha)^{\alpha-1} \left(\frac{\alpha}{pk}\right)^{-\alpha}}{t} \quad (1.5)$$

Au delà de  $\underline{x}$ , l'agriculture est donc homogène, caractérisée par une intensité constante  $\underline{k}$ .

### Production d'externalités agricoles

Pour préserver la terre en tant que ressource indispensable pour leur activité, les exploitants agricoles sont amenés à utiliser des méthodes de gestion des sols variées, telles que le maintien de haies et de chemins, le drainage, la limitation de l'érosion et les rotations culturales. Ces pratiques participent à la production de biens et services environnementaux. Ces externalités positives peuvent être considérées comme des aménités agricoles, susceptibles d'être fortement valorisées par des résidents non agricoles (Van Huylenbroeck, 1999). Puisque jusqu'ici, nous considérons que l'agriculture varie dans l'espace, nous pouvons en déduire que la distribution spatiale des externalités agricoles n'est pas un phénomène exogène.

Sans perte de généralités, nous considérerons que les aménités agricoles résultent d'un solde net d'externalités agricoles positives (qualité paysagère, biodiversité) et d'externalités négatives (pollution, nuisances diverses). Les systèmes d'exploitations agricoles extensifs sont susceptibles de produire un haut niveau d'aménités agricoles, de par le fait que leurs itinéraires techniques favorisent la co-production d'externalités positives et que la moindre utilisation d'inputs non fonciers diminue le flux d'externalités négatives. En effet, Hodge (2008) explique que les préférences des ménages s'orientent vers des paysages générés par des systèmes agricoles traditionnels et moins intensifs, plutôt que des systèmes modernes, plus intensifs.

A l'inverse, le lien significatif entre systèmes agricoles intensifs et production d'externalités négatives a été montré dans la littérature empirique (Abler, 2001, 2004). Par conséquent, dans notre économie spatialisée, nous faisons l'hypothèse que les exploitations localisées à proximité

de la ville produisent un flux net d'externalités plus faible parce qu'elles utilisent une quantité d'intrants par hectare plus importante. En s'éloignant progressivement de la ville, l'agriculture devient plus extensive et la co-production d'externalités agricoles augmente (voir figure 1.2).

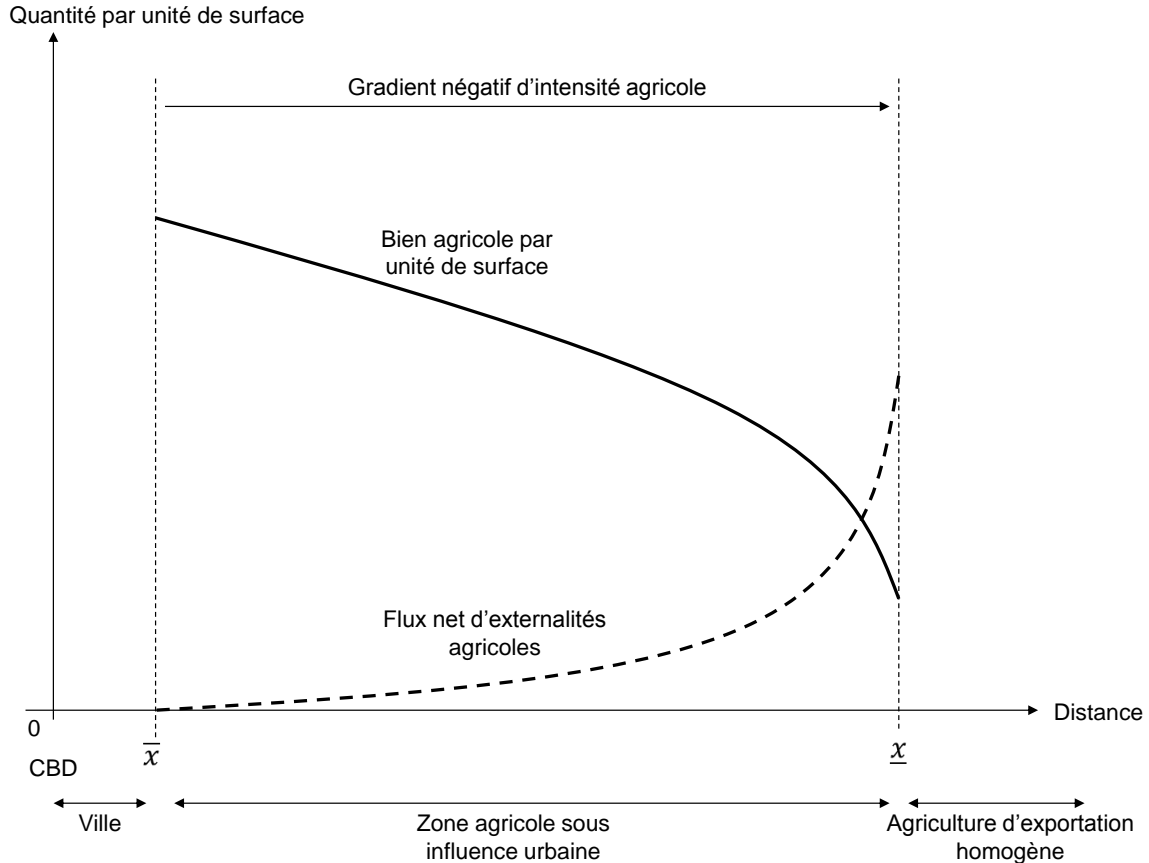


FIGURE 1.2 – Jointure entre la production agricole et les externalités dans un espace sous influence urbaine

En tant que co-produit des activités agricoles, la production d'externalités dépend du niveau d'utilisation d'intrants par hectare  $k$ . Notons cependant que, dans notre modèle, les exploitants agricoles ne sont pas influencés par le niveau d'externalités qu'ils produisent lors de leurs choix de production, puisqu'ils ne sont pas rémunérés pour ces aménités.

Nous proposons la spécification mathématique suivante :

$$e(x) = \frac{\delta}{k(x)} \quad (1.6)$$

où  $\delta$  est une constante positive qui peut être interprétée comme la capacité d'un type d'agriculture donné à fournir des externalités, ou en d'autres termes, le degré de jointure entre la production d'externalités et l'activité agricole. Cela nous permet de considérer par exemple que certaines activités agricoles, telles que la monoculture ou l'élevage hors sol, ont une faible capacité à produire des externalités valorisées par les ménages, quel que soit leur niveau d'in-

tensité (Palmquist *et al.*, 1997). En revanche, la viticulture, l'élevage extensif ou les cultures fruitières sont susceptibles de produire des externalités mieux valorisées, et auraient alors un  $\delta$  plus élevé (Le Goffe, 2000; Irwin, 2002).

### Localisation résidentielle des ménages

Les ménages effectuent leur choix de localisation résidentielle en arbitrant entre l'accessibilité au CBD, la consommation d'espace résidentiel et le niveau d'aménités dont ils peuvent bénéficier. Chaque ménage choisit une combinaison d'espace résidentiel  $q_h$ , de localisation  $x$  et d'un numéraire de biens non liés au logement  $s$  pour maximiser leur niveau d'utilité  $U(s, q_h, a(x))$ , sujet à une contrainte budgétaire :

$$\max_{q_h, s, x} U[s, q_h, a(x)] \quad \text{s.t. } w = r(x)q_h + s + \tau x \quad (1.7)$$

où  $w$  est le revenu des ménages et  $\tau$  représente le coût du déplacement domicile-travail par kilomètre.  $r(x)$  est la rente d'enchère résidentielle en  $x$ . Nous utilisons une fonction d'utilité de type Cobb-Douglas :  $U[s, q_h] = q_h^\beta s^{1-\beta} a(x)^\gamma$  (avec  $\beta \in [0, 1]$  et  $\gamma > 0$ ). Le niveau d'aménités fournies en  $x$  est donné par  $a(x) = a_u(x) + a_p(x)$ , où  $a_u(x)$  représente les aménités urbaines distribuées uniformément dans la ville et égales à un pour simplification ; et  $a_p(x)$  correspond à la fonction de production des aménités agricoles, dont la distribution en dehors de la ville est endogène au modèle. Les aménités périurbaines sont considérées comme des aménités agricoles exclusivement. Elles sont diminuées par l'installation de ménages périurbains, tel que décrit dans la section suivante. Nous faisons l'hypothèse de l'absence d'effets d'entraînement - ou *spillover effects* -, c'est-à-dire que les aménités sont consommées par les ménages en leur lieu de résidence seulement. Cette hypothèse est cohérente avec des éléments empiriques qui montrent que les effets des aménités n'excèdent pas quelques centaines de mètres (Irwin & Bockstael, 2004; Cavailhès *et al.*, 2009a).

Les conditions de premier ordre du programme de maximisation des ménages définissent le choix optimal de consommation d'espace résidentiel et des autres biens non liés au logement en toute localisation :

$$s^* = (1 - \beta)(w - \tau x) \quad (1.8)$$

$$q_h^* = \frac{\beta(w - \tau x)}{r(x)} \quad (1.9)$$

(1.8) montre que les dépenses pour les biens composites diminuent avec la distance au CBD ( $x$ ). Pour chaque unité de distance au CBD supplémentaire, les dépenses en biens composites diminuent de  $(1 - \beta)\tau$ . Nous pouvons alors en déduire les fonctions d'enchère des ménages :

$$r^*(x) = \left[ \frac{\beta^\beta (1 - \beta)^{1-\beta} (w - \tau x)}{\bar{V}} \right]^{\frac{1}{\beta}} a(x)^{\frac{\gamma}{\beta}} \quad (1.10)$$

La fonction d'enchère (1.10) correspond au maximum de ce que les ménages sont prêt à payer pour résider en  $x$ . A l'équilibre, les ménages sont indifférents à leur localisation puisque leur niveau d'utilité à l'équilibre  $\bar{V}$  est exogène et identique en tout point de l'espace. Rappelons qu'à l'intérieur de la ville, nous avons  $a(x) = a_u(x) = 1$  et qu'en dehors  $a(x) = a_p(x)$ . Nous pouvons distinguer deux types de ménages : les ménages urbains et les ménages périurbains. Les ménages urbains vivent dans la ville, bénéficient d'une bonne accessibilité au CBD et jouissent des aménités urbaines seulement. Les ménages périurbains résident en dehors de la ville et ont par conséquent des coûts de déplacement domicile-travail plus élevés ; ils jouissent en revanche de la présence d'aménités agricoles. Les fonctions d'enchères peuvent être écrites comme suit :

$$r_u^*(x) = \left[ \frac{\beta^\beta (1 - \beta)^{1-\beta} (w - \tau x)}{\bar{V}} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (1.11)$$

$$r_p^*(x) = \left[ \frac{\beta^\beta (1 - \beta)^{1-\beta} (w - \tau x)}{\bar{V}} \right]^{\frac{1}{\beta}} a_p(x)^{\frac{\gamma}{\beta}} \quad (1.12)$$

où  $r_u^*(x)$  et  $r_p^*(x)$  représentent respectivement les fonctions d'enchère urbaine et périurbaine. (1.11) et (1.12) laissent clairement apparaître la différence entre les ménages urbains et périurbains. La fonction d'enchère urbaine est strictement décroissante par rapport à la distance au CBD, ce qui compense les ménages pour les coûts de déplacement. Lorsque la distribution des aménités varie dans l'espace, l'évolution de la rente est plus complexe. Les ménages périurbains n'accepteront pas de vivre en milieu périurbain si le niveau d'aménité  $y$  est plus faible qu'en ville, c'est à dire  $a(x) < 1$  ; ils doivent par ailleurs être compensés pour la perte des aménités urbaines et le niveau plus élevés des coûts de déplacement domicile-travail. Dans ce cas, l'agriculture doit alors produire un niveau d'aménités suffisamment élevé pour attirer les ménages.

### Valorisation des aménités agricoles

Les aménités agricoles sont valorisées par les ménages périurbains, lors de leur choix de localisation résidentielle. Le niveau des aménités agricoles a un impact sur cet arbitrage dans le sens où les ménages périurbains sont prêts à payer plus cher pour vivre dans un milieu pourvu d'un niveau suffisamment élevé d'aménités. Cependant, la conversion des terres agricoles à l'usage résidentiel engendre la destruction des aménités agricoles. L'artificialisation des terres atteint donc sa limite dans la détérioration de paysages valorisés et de l'environnement agricole, ce qui justifie l'introduction d'une externalité négative de congestion entre les ménages périurbains eux-mêmes (Irwin & Bockstael, 2002; Roe *et al.*, 2004). Ceci est pris en compte dans le modèle en utilisant le fait qu'en tout point, la terre disponible est égale à une unité de surface. Puisque l'on est dans une situation d'usage mixte du sol, partagé entre ménages et agriculteurs, on peut écrire :

$$\rho_p(x)q_h(x) + \rho_a(x)L(x) = 1 \quad (1.13)$$

où  $\rho_p(x)$  et  $\rho_a(x)$  sont respectivement le nombre de ménages périurbains et le nombre d'agriculteurs au point  $x$ , et  $q_h(x)$  et  $L(x)$  représentent leur consommation foncière. Définissons  $\Theta(x)$  comme la fraction de terre dédiée à l'usage agricole :

$$\Theta(x) = \rho_a(x)L(x) = 1 - \rho_p(x)q_h(x) \quad (1.14)$$

La distribution spatiale des aménités agricoles est endogène au modèle, puisqu'elle dépend directement du flux net d'externalités agricoles en tout point. La distribution des aménités hors de la ville  $a_p(x)$  est donnée par (1.15) :

$$a_p(x) = e(x)\Theta(x) = \delta \frac{\Theta(x)}{k(x)} \quad (1.15)$$

où le flux net d'externalités agricoles  $e(x)$  est donné par (1.6). Au fur et à mesure que l'on s'éloigne du CBD, le niveau d'aménités augmente, tandis que l'agriculture devient plus extensive (i.e.  $k$  plus faible). En l'absence de régulation, les ménages peuvent surenchérir les agriculteurs, impliquant la destruction des aménités à mesure que de nouveaux ménages viennent s'installer, ainsi que le décrit la tragédie des communs de Hardin. L'introduction de  $\Theta(x)$  dans  $a_p(x)$  nous permet de prendre en compte l'externalité négative entre ménages périurbains qui constitue un frein à ce processus. Lorsque  $\Theta(x)$  augmente, c'est-à-dire que la part agricole augmente, le niveau d'aménités augmente également. A l'inverse, lorsque c'est la part résidentielle qui devient plus importante,  $\Theta(x)$  diminue et le niveau d'aménités décroît. Le niveau d'équilibre de  $\Theta^*(x)$  dans  $a_p^*(x)$  est explicité dans la section suivante et donné par (1.20) et (1.26).

Notons qu'au-delà de  $\underline{x}$ , distance à partir de laquelle l'agriculture n'est plus sous influence de la ville, l'intensité agricole devient constante, le niveau d'aménité correspondant est donc le même en tout point. Cet espace peut être décrit comme une zone agricole compétitive, peu soumise à la pression résidentielle et assez rentable par ailleurs pour être maintenue à l'usage agricole (OECD, 2009).

### 1.3.2 Équilibre spatial

Les fonctions de comportement des agriculteurs et des ménages étant explicitées, nous pouvons maintenant présenter les conditions d'existence de la ville et les caractéristiques de l'espace à usage mixte à l'équilibre. L'usage foncier est défini par la compétition entre ménages et agriculteurs.

#### Conditions d'existence de la ville

La ville est définie par la zone au sein de laquelle vivent les ménages urbains. Soit  $\bar{x}$  la limite de la ville. Chaque parcelle de terre étant attribuée à l'agent dont l'enchère est la plus élevée, la ville peut être représentée par l'ensemble  $C$  :

$$C = \{x < \bar{x} \mid r_u^*(x) > r_a^*(x)\} \quad (1.16)$$

La localisation de la frontière urbaine  $\bar{x}$  est donnée par :

$$r_u^*(\bar{x}) = r_a^*(\bar{x}) \quad (1.17)$$

**Condition 1**  $\bar{x}$  existe si les rentes d'enchère des ménages et des agriculteurs se croisent au moins une fois dans l'intervalle  $[0, \underline{x}]$ . Pour que cette configuration soit possible, les paramètres du modèle doivent obéir aux conditions suivantes :

$$w > \Omega p^{\frac{\beta}{1-\alpha}} \quad \text{and} \quad \frac{w}{\tau} < \underline{x} \quad (1.18)$$

où  $\Omega$  est une constante positive. Les calculs sont détaillés dans l'annexe A.1. Ces conditions s'interprètent comme suit : le revenu des ménages doit être suffisamment élevé, par rapport aux prix des produits agricoles, et l'arbitrage entre usage résidentiel et agricole ne peut être fait que dans l'intervalle  $[0, \underline{x}]$ .

### Caractéristiques de la zone périurbaine

Nous définissons ici les caractéristiques de la zone périurbaine, au sein de laquelle l'usage foncier est partagé entre agriculteurs et ménages, ce qui implique qu'ils aient la même enchère. Soit  $P$  une telle zone, elle est définie par :

$$P = \{x \in [\bar{x}, \underline{x}] \mid r_p^*(x) = r_a^*(x)\} \quad (1.19)$$

Dès qu'un ménage périurbain s'installe dans la zone périurbaine, on a  $\Theta(x) < 1$  ce qui entraîne une baisse du niveau d'aménités (1.15). Si la zone périurbaine était complètement artificialisée, on aurait alors  $\rho_p(x)q_h(x) = 1$  et  $\Theta(x) = 0$ , c'est-à-dire pas d'aménités et donc  $r_p^*(x) = 0$  (1.12). Ceci illustre le fait que, si le niveau d'aménités est trop faible, en particulier parce que trop de ménages périurbains se sont installés, leur utilité d'équilibre n'est pas atteinte et ils sont par conséquent amenés à migrer hors de la ville. L'urbanisation totale de la zone périurbaine est donc une configuration impossible dans notre modèle. Un usage mixte du sol dans la zone périurbaine implique que  $\Theta(x) \in ]0, 1[$ , reflétant un certain degré de fragmentation de l'espace, valable dans le cas d'extension urbaine comme du mitage.

Pour rappel,  $r_p^*(x) = r_u^*(x)a_p(x)^{\frac{\gamma}{\beta}}$ . En utilisant (1.19), on peut définir la distribution des aménités à l'équilibre à l'intérieur de la zone d'usage mixte du sol :

$$a_p^*(x) = \left( \frac{r_a^*(x)}{r_u^*(x)} \right)^{\frac{\beta}{\gamma}} \quad (1.20)$$

Nous déduisons le nombre optimal des ménages périurbains en tout point de la zone périurbaine, à partir des équations (1.14), (1.15) and (1.20) :

$$\rho_p^*(x) = \frac{1}{q_h^*(x)} \left[ 1 - \frac{k^*(x)}{\delta} \left( \frac{r_a^*(x)}{r_u^*(x)} \right)^{\frac{\beta}{\gamma}} \right] \quad (1.21)$$



## Conditions d'existence de la zone périurbaine

Déterminons maintenant les conditions d'apparition d'une zone périurbaine  $P$ .

**Condition 2** Une zone périurbaine, ou zone d'usage mixte du sol,  $P$  existe si, toute chose étant égale par ailleurs, la capacité d'une agriculture donnée à fournir des aménités est supérieure à un seuil minimal  $\delta_{\min}$ , donné par :

$$\delta_{\min} = \arg \min_x k(x) \left( \frac{r_a(x)}{r_u(x)} \right)^{\gamma/\beta} \quad (1.22)$$

$\delta_{\min}$  nous assure que l'activité agricole génère suffisamment d'aménités pour compenser les coûts de transports supplémentaires des ménages désireux de s'installer. L'annexe A.2 détaille l'obtention de  $\delta_{\min}$ .

## Conditions pour l'extension urbaine ou le mitage

Selon la localisation de la zone périurbaine, il est possible d'observer différentes formes d'étalement. Le mitage apparaît si et seulement si  $P$  n'est pas simplement connecté à  $C$ . En d'autres termes, le mitage apparaît de manière disjointe à la zone déjà urbanisée. A l'inverse, lorsque  $P$  est connecté à  $C$ , on parlera d'extension urbaine, c'est-à-dire que la zone périurbaine est localisée à la suite de la zone urbaine.

**Condition 3** La capacité d'une agriculture donnée à fournir des aménités détermine la localisation de la zone périurbaine, toute chose égale par ailleurs :

- Si  $\delta \geq \delta_{\max}$ , la zone périurbaine est localisée à la suite de la zone urbaine ( $P$  est connecté à  $C$ ), c'est ce que nous définissons comme de l'extension urbaine.
- Si  $\delta < \delta_{\max}$ , une zone exclusivement agricole sépare la zone périurbaine de la zone urbaine ( $P$  est déconnecté de  $C$ ), c'est ce que nous définissons comme du mitage.

où  $\delta_{\max}$  est donné par :

$$\delta_{\max} = \left[ \alpha \frac{A(p - t\bar{x})}{p_k} \right]^{\frac{1}{1-\alpha}} \quad (1.23)$$

Le calcul de  $\delta_{\max}$  est détaillé dans l'annexe A.3. Mathématiquement parlant, en présence de mitage, on a  $x_1 < x_2 < \underline{x}$ , tel que :

- pour tout  $x \in [\bar{x}, x_1] \cup [x_2, \underline{x}]$ , on a  $r_a^*(x) > r_p^*(x)$ , c'est-à-dire un usage du sol exclusivement agricole.
- pour tout  $x \in [x_1, x_2]$ , on a  $r_p^*(x) = r_a^*(x)$ , c'est-à-dire un usage mixte du sol, avec la présence simultanée d'agriculteurs et de ménages.

$(x_1, x_2)$  sont déterminés de manière endogène, par  $r_a^*(x)$  et  $r_p^*(x)$  tels que spécifiés dans (1.4) et (1.12) respectivement et le niveau d'aménités valorisé par les ménages périurbains étant donné par  $a_p(x) = \frac{\delta}{k(x)}$  (d'après (1.15) avec  $\Theta(x) = 1$ , puisque tout l'espace est agricole à l'origine).

Dans le cas de l'extension urbaine, la première frontière de la zone périurbaine coïncide avec celle de la ville ( $x_1 = \bar{x}$ ). Les caractéristiques de la zone périurbaine en termes de fraction

de terres agricoles, détaillées dans la section suivante, sont similaires pour les deux cas de figure (extension urbaine et mitage). La seule différence entre ces deux configurations est la localisation même de la zone périurbaine.

### Définition de l'équilibre spatial

Résumons l'équilibre spatial de notre aire urbaine. La terre étant allouée à l'agent qui enchérit le plus, l'équilibre spatial est atteint lorsque les conditions suivantes sont respectées :

1. L'équilibre spatial est donné par la rente foncière qui prévaut en  $x$  :

$$r^*(x) = \max \{r_u^*(x), r_p^*(x), r_a^*(x)\} \quad (1.24)$$

où  $r_u^*(x)$  est donné par (1.11),  $r_p^*(x)$  est donné par (1.12) et  $r_a^*(x)$  est donné par (1.4).

2. A l'équilibre, les différentes zones sont délimitées par la frontière de la ville  $\bar{x}$  donnée par (1.17), les bornes de la zone périurbaine  $(x_1, x_2)$  déterminées par les positions relatives de  $r_a^*(x)$  et  $r_p^*(x)$ , et la limite de la zone agricole sous influence urbaine  $\underline{x}$ , donnée par (1.5).

3. La zone urbaine (resp. périurbaine) doit pouvoir fournir suffisamment d'espace résidentiel pour tous les ménages urbains (resp. périurbains), désireux de s'installer dans (resp. en dehors de) la ville. Le nombre de ménages urbains et périurbains est déterminé de manière endogène au modèle :

$$\int_0^{\bar{x}} \rho_u^*(x) 2\pi x dx = N_u ; \quad \int_{x_1}^{x_2} \rho_p^*(x) 2\pi x dx = N_p \quad (1.25)$$

où  $\rho^*(x) = 1/q_h(x)$  est le nombre de ménages localisés en  $x$ , respectivement pour les ménages urbains ( $\rho_u(x)$ ) et pour les périurbains ( $\rho_p(x)$ ). Dans le cas où on s'intéresse à la distribution de la densité résidentielle au sein de l'aire urbaine, on introduit généralement la hauteur des habitations en tout point de l'espace. Cependant, l'introduction de cette nouvelle variable demanderait d'ajouter des *developers* (promoteurs), en tant que troisième agent économique dans le modèle. Puisqu'on ne s'intéresse pas ici à la densité urbaine, nous gardons notre modèle sans *developers*, sans perte de généralités.

La fraction de terres agricoles au sein de la zone périurbaine est donnée par<sup>5</sup> :

$$\Theta^*(x) = 1 - \rho_p^*(x) q_h^*(x) = \frac{k^*(x)}{\delta} \left( \frac{r_a^*(x)}{r_u^*(x)} \right)^{\frac{\beta}{\gamma}} \quad (1.26)$$

---

5. L'hypothèse de rendements d'échelle constants ne nous permet pas de déterminer la demande foncière agricole. Nous ne pouvons donc pas calculer  $\rho_a^*(x)$  et  $L^*(x)$  séparément. Cependant, nous avons la fraction de terres agricoles  $\Theta^*(x) = \rho_a^*(x) L^*(x)$ .

4. A l'équilibre, le niveau d'aménités  $a^*(x)$  est donné par :

$$a^*(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x \in [0, \bar{x}] \\ \left(\frac{r_a^*(x)}{r_u^*(x)}\right)^{\frac{\beta}{\gamma}} & \text{if } x \in [x_1, x_2] \\ \frac{\delta}{k^*(x)} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1.27)$$

## 1.4 Formes d'étalement urbain

### 1.4.1 Statique comparative

	$r_u^*(x)$	$r_p(x)$	$r_a^*(x)$	$k^*(x)$	$\bar{x}$	$x_1$	$x_2$	$e^*(x)$	$\Theta^*(x)$	$N_u^*$	$N_p^*$
$w$	+	+	0	0	+	-	+	0	-	+	+/-
$\tau$	-	-	0	0	-	+	-	0	+	-	+/-
$\bar{V}$	-	-	0	0	-	+	-	0	+	-	-
$\gamma$	0	+	0	0	0	-	+	0	-	0	+
$p$	0	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+/-
$p_k$	0	+	-	-	+	-	+	+	-	+	+/-
$t$	0	+	-	-	+	-	+	+	-	+	+/-
$\delta$	0	+	0	0	0	-	+	+	-	0	+

TABLEAU 1.3 – Statique comparative

On peut montrer analytiquement les mécanismes intrinsèques du modèle, à l'aide de la statique comparative. Notre analyse est cohérente avec les résultats de la littérature autour des modèles monocentriques sans aménités (Wheaton, 1974; Brueckner, 1987). L'introduction d'aménités agricoles améliore le modèle en reliant le comportement des ménages et l'organisation spatiale de l'agriculture. Le tableau 1.3 résume les interactions entre les variables et paramètres principaux. Pour effectuer la statique comparative du modèle, la méthode de Cramer a été appliquée aux équations d'équilibre du modèle. L'annexe B en explique le raisonnement.

Une augmentation des revenus et/ou une baisse des coûts de transports conduisent à l'augmentation de la rente d'enchère des ménages, à la fois en zone urbaine et périurbaine, ayant pour conséquence une ville plus grande mais également une zone périurbaine plus importante. Le nombre total de ménages installés dans la ville et ses environs est donc amené à augmenter. Parallèlement, la fraction de terres agricoles au sein de la zone périurbaine ( $\Theta^*$ ) vient à diminuer. Le niveau d'utilité à l'équilibre a un impact négatif sur la rente d'enchère des ménages, ce qui conduit à un impact négatif sur la frontière urbaine et sur la taille de la zone périurbaine. Ainsi, une augmentation de l'utilité d'équilibre a pour effet de contracter la ville. Si le niveau d'utilité d'équilibre est trop élevé, les ménages peuvent quitter la ville sans coût de migration, pour bénéficier de ce niveau d'utilité ailleurs. La population est donc amenée à diminuer. Enfin, le poids des aménités dans les préférences des ménages ( $\gamma$ ) a, de manière intuitive, un impact positif sur la rente d'enchère périurbaine, sur la taille de la zone périurbaine ( $x_2 - x_1$ ) et sur le nombre de ménages périurbains. Inversement, une augmentation de  $\gamma$  a un impact négatif

sur la fraction de terres agricoles au sein de la zone périurbaine  $\Theta^*$ .

L'impact d'une variation des prix agricoles sur la rente d'enchère des agriculteurs est similaire à celui d'une variation des revenus pour les ménages. Lorsque  $p$  augmente, les agriculteurs voient leur rente d'enchère augmenter. Des prix agricoles plus élevés induisent une meilleure valorisation de la production agricole et donc, à un processus d'intensification des exploitations. Parallèlement, le flux net d'externalités agricoles décroît, ce qui diminue le niveau d'aménités et donc la rente d'enchère périurbaine. Cette combinaison entre l'augmentation de la rente agricole, et la baisse de la rente périurbaine, affecte négativement la taille de la zone périurbaine, mais aussi la taille de la ville. Ainsi, une augmentation des prix agricoles induit une ville plus petite et moins de développement périurbain, c'est-à-dire une diminution de la population totale. A l'inverse, une augmentation des prix des inputs agricoles (hors foncier) a un impact négatif sur la rente des agriculteurs, mais un effet positif sur la rente périurbaine. Si leur prix augmente, un agriculteur sera amené à diminuer le niveau d'utilisation de ses inputs non fonciers, extensifiant ainsi son exploitation, et fournissant alors un meilleur niveau d'aménités. La rente d'enchère urbaine reste inchangée. Par conséquent, une augmentation de  $p_k$  conduit à une ville plus grande, et une zone périurbaine plus développée.

Une augmentation de la capacité de l'agriculture à fournir des aménités ( $\delta$ ) n'affecte pas ni l'intensité agricole, ni les rentes d'enchère urbaine et agricole. Cependant, elle a un impact positif sur le niveau d'aménités engendré par l'activité agricole. Ainsi, un  $\delta$  plus élevé accroît la rente d'enchère périurbaine, la taille de la zone périurbaine et le nombre de ménages installés dans cette zone. Par conséquent, les formes de développement sont fortement dépendantes du degré de jointure entre production agricole et co-production d'aménités.

#### 1.4.2 Simulations numériques du modèle

Pour mieux visualiser les positions relatives de différentes fonctions d'enchère, nous procédons à des simulations numériques de notre ville-modèle en utilisant des données observées. La plupart des données proviennent de la base de données de l'INSEE (Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques)<sup>6</sup> et du RICA (Réseau d'Information Comptable Agricole)<sup>7</sup>. D'après les données de l'INSEE, entre 2000 et 2010, le niveau de revenu moyen des ménages français a été de 33384 €. Environ un quart des dépenses des ménages sont consacrées au logement (25,6% en 2010). Les coûts de transport domicile-travail sont estimés à environ 0,40 €/km par le Trésor Public. En faisant l'hypothèse qu'il y a 1.5 travailleur par ménage, faisant des aller-retours quotidiens entre le lieu de résidence et le CBD toute l'année, on pose  $\tau = 400$  €/km/an/ménage.

En ce qui concerne les paramètres agricoles, le RICA estime la part de coûts non-fonciers par hectare à environ 90% du coût total et donne un niveau moyen de charges  $p_k k^* = 1861$ €/ha

6. <http://www.insee.fr/fr/themes/> (dernière visite : 22 mai 2012).

7. [http://ec.europa.eu/agriculture/rica/database/database\\_en.cfm](http://ec.europa.eu/agriculture/rica/database/database_en.cfm) (dernière visite : 18 janvier 2012)

par exploitation, et un produit brut moyen  $pAk^{*\alpha} = 1714\text{€}/ha$  par exploitation, en 2009. En combinant ces données avec la part estimée de coûts non-fonciers par hectare, on obtient un ratio entre le prix des outputs et les prix des inputs hors terre de 2,85. Nous supposons ce ratio constant pour une exploitation agricole française moyenne. Nous posons  $\alpha = 0.8$ ,  $p_k = 1$  et  $p = 2.62$ . Le service Agreste (Statistiques du Ministère de l'Agriculture)<sup>8</sup> donne un prix foncier agricole moyen de 5000 €/ha en France. En supposant un taux d'actualisation de 0,05, nous posons  $\tilde{r}_a = 250 \text{€}/ha/an$ , ce qui implique que la limite de l'agriculture sous influence de la zone urbaine est localisée à  $\underline{x} = 91.6 \text{ km}$  du centre de la ville. Notons que nous avons bien  $\frac{w}{\tau} < \underline{x} < \frac{p}{t}$ .

La spécification des paramètres du modèle est résumée dans le tableau 1.4. Nous procédons à une analyse pour déterminer  $\{\delta, \gamma, \bar{V}, t\}$ .

Symbole	Interprétation	Valeur
$w$	revenu des ménages	33,000 €/ménage
$\tau$	coût des déplacements domicile-travail	400 €/km/an/ménage
$\beta$	part des dépenses dédiée au logement	0.25
$\bar{V}$	niveau d'utilité à l'équilibre	10 100
$\gamma$	poids des aménités dans les préférences des périurbains	0.2
$p$	prix des biens agricoles	2.62 €/unité de biens agricoles
$p_k$	prix des inputs non-fonciers	1 €/unité d'inputs
$t$	coût de transport agricole	0.02 €/km/unité de biens agricoles
$A$	constante technique	1
$\alpha$	élasticité du facteur de production $k$	0.8
$\delta$	capacité de l'agriculture à produire des aménités	$\begin{cases} 18 \text{ cas du mitage} \\ 22 \text{ cas de l'extension urbaine} \end{cases}$
$\tilde{r}_a$	rente exogène de l'agriculture d'exportation	250 €/ha/an

TABLEAU 1.4 – Valeur des paramètres

Nous pouvons maintenant regarder comment le modèle se comporte avec ces paramètres.

**Capacité de l'agriculture à fournir des aménités  $\delta$**  Le premier paramètre que nous analysons est  $\delta$ , un paramètre technique représentant la capacité d'une agriculture donnée à co-produire des aménités. Un premier ensemble de simulations a été effectué en faisant varier  $\delta$  à un niveau donné de  $\{\gamma, \bar{V}, t\}$ . On a  $\partial r_p / \partial \delta > 0$ , une augmentation de  $\delta$  doit entraîner une augmentation de la rente d'enchère périurbaine. Les enchères urbaines et agricoles sont inchangées. La figure 1.3a montre comment la taille de la zone périurbaine ( $x_2 - x_1$ ) varie lorsque  $\delta$  augmente. Trois configurations apparaissent. Le premier cas de figure consiste en l'absence de développement périurbain. Dans ce cas,  $\delta < \delta_{\min}$ , ce qui signifie que les exploitations fournissent un niveau d'aménités trop faible pour inciter les ménages périurbains à venir s'installer. Le deuxième cas de figure correspond à l'émergence d'une zone périurbaine sous forme de mitage. Dans ce cas, les exploitations agricoles produisent suffisamment d'aménités ( $\delta_{\min} < \delta < \delta_{\max}$ ) pour que certains ménages décident de s'y installer. Entre  $\delta_{\min}$  et  $\delta_{\max}$ , la zone périurbaine est déconnectée de la ville (mitage) et elle s'agrandit au fur et à mesure que

8. <http://agreste.agriculture.gouv.fr/> (dernière visite : 3 août 2012).

la capacité de l'agriculture à produire des aménités  $\delta$  augmente.

Enfin, le dernier cas de figure correspond à l'émergence d'une zone périurbaine connectée à la ville, prenant donc la forme d'extension urbaine. Dans ce cas précis, les exploitations ont une capacité tellement élevée à produire des aménités ( $\delta > \delta_{\max}$ ) que, immédiatement après la frontière urbaine, et malgré une agriculture relativement intensive, le niveau d'aménités incite les ménages à se localiser en cette zone d'usage mixte du sol. La zone périurbaine est donc collée à la ville. Dans notre application numérique, on a  $\delta_{\max} = 23,6$  et  $\delta_{\min} = 14,8$ . Une fois que la zone périurbaine est accolée à la zone urbaine ( $\bar{x} = x_1$ ), sa taille augmente plus lentement, jusqu'à ce que  $x_2 = w/\tau$ , limite de la zone dans laquelle les ménages sont susceptibles d'enchérir. La taille maximale de la zone périurbaine est donc  $(x_2 - x_1)_{\max} = (w/\tau) - \bar{x}$ , vers laquelle  $(x_2 - x_1)$  tend lorsque  $\delta$  augmente.

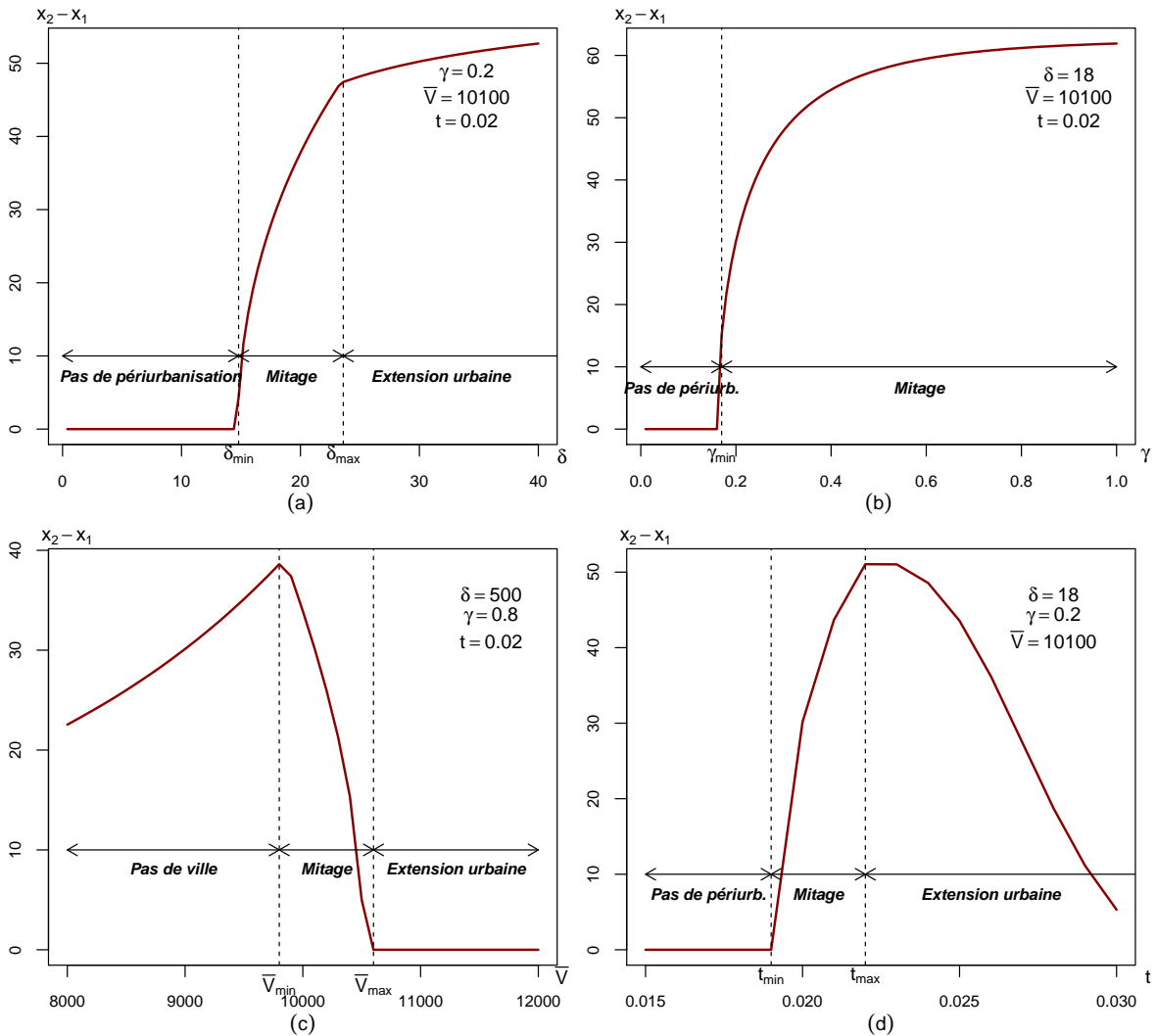


FIGURE 1.3 – Les effets d'une variation de  $\delta$ ,  $\gamma$ ,  $\bar{V}$  et  $t$  sur l'équilibre spatial

**Préférences des ménages  $\gamma$**  Le deuxième paramètre auquel nous nous intéressons est la préférence des ménages périurbains pour les aménités agricoles  $\gamma$ . Ce paramètre fait la différence entre les enchères urbaines et périurbaines. Puisqu'il représente les préférences des ménages pour les aménités, nous pouvons intuitivement s'attendre à ce que son augmentation favorise le développement périurbain ( $\partial r_p / \partial \gamma > 0$ ). La figure 1.3b montre l'impact de  $\gamma$  sur la taille de la zone périurbaine, à un niveau donné de  $\{\delta, \bar{V}, t\}$ . Là encore, seule la rente périurbaine est affectée. Lorsque les préférences sont inférieures à un seuil  $\gamma_{\min}$ , on n'observe pas de développement périurbain puisque les ménages n'ont pas de raison de s'installer en dehors de la ville s'ils ne valorisent pas beaucoup les aménités agricoles. Dans notre application numérique, on a  $\gamma_{\min} = 0,17$ . Au-delà de  $\gamma_{\min}$ , les préférences des ménages sont assez fortes pour constituer un attrait suffisant pour les ménages périurbains, pour un niveau d'aménités donné. La zone périurbaine s'accroît au fur et à mesure que les préférences augmentent.

Il est possible de faire varier  $\gamma$  et  $\delta$  simultanément, en maintenant fixes les autres paramètres. On obtient le diagramme présenté dans la figure 1.4. Pour un couple  $(\gamma, \delta)$  donné, on peut observer la configuration spatiale attendue de la ville.

Pour tout  $\gamma$ , dès que  $\delta$  devient plus élevé que  $\delta_{\max}$ , le développement de la ville en mitage disparaît au profit d'une fusion entre la zone urbaine et la zone périurbaine. La figure 1.4 nous permet d'affiner notre interprétation de  $\delta$ . Le paramètre  $\delta$  échelonne la capacité de différents types d'agricultures à générer un flux net d'externalités. Prenons par exemple les prairies et forêts, où de hauts niveaux d'intensité de production n'empêchent pas que des niveaux d'aménités relativement élevés soient produits. À l'inverse, des activités agricoles telles que l'élevage génèrent de la production de fumier ou peuvent demander la construction de bâtiments de ferme supplémentaires, qui peuvent être valorisés négativement par les ménages. Dès lors, le niveau d'intensité a un impact plus important sur le niveau d'aménités fourni. Au dessus de  $\delta_{\max}$ , l'étalement urbain prend la forme d'extension urbaine car les aménités à la frontière urbaine sont suffisamment élevées pour les ménages périurbains ( $a(\bar{x}) > 1$ ). Notons que  $\delta_{\max}$  ne dépend pas des préférences  $\gamma$ , comme expliqué dans l'annexe A.3. Le mitage apparaît sous deux conditions : des préférences élevées des ménages pour les aménités agricoles et une capacité modérée de l'agriculture à produire ces aménités. Notons enfin que les équations des frontières  $\delta_{\min}(\gamma)$  et  $\delta_{\max}$  visibles sur le diagramme (figure 1.4) sont données par les conditions d'existence de la zone périurbaine, dans (1.22) et (1.23).

D'après notre modèle, les villes entourées d'une agriculture fortement pourvoyeuse en aménités (des prairies par exemple) se développeraient sous la forme extension urbaine. À l'inverse, les villes entourées d'une agriculture caractérisée par une capacité plus faible à produire des aménités (par exemple, grandes cultures ou élevage), seraient d'avantage sujettes au mitage.

**Niveau d'utilité à l'équilibre  $\bar{V}$**  Intéressons nous maintenant au niveau d'utilité d'équilibre. Dans notre ville ouverte, les ménages peuvent s'installer dans la ville ou la quitter librement et sans coût. Ainsi, le niveau d'utilité à l'équilibre est exogène et la population est

déterminée de manière endogène au modèle. La figure 1.3c montre l'impact d'un changement du niveau d'utilité à l'équilibre. sur la taille de la zone périurbaine. D'après le tableau 1.3, on a  $\partial \bar{x} / \partial \bar{V} < 0$ ,  $\partial x_1 / \partial \bar{V} > 0$  et  $\partial x_2 / \partial \bar{V} < 0$ . Ainsi, une augmentation de  $\bar{V}$  devrait logiquement entraîner la réduction de la zone périurbaine. Cependant, on observe que, tant que  $\bar{V}$  est inférieur à  $\bar{V}_{\min} = 9800$ , la taille de la zone périurbaine augmente avec  $\bar{V}$ . Ceci est dû au fait que l'on a  $x_1 = \bar{x}$  (extension urbaine) et la frontière de la ville  $\bar{x}$  se déplace plus rapidement que  $x_2$  vers le CBD. Ceci induit que la zone périurbaine s'agrandit. Au delà de  $\bar{V}_{\max}$ , la ville "disparaît", c'est-à-dire que la rente d'enchère urbaine devient trop faible pour que la zone urbaine se maintienne : l'ensemble des ménages préfère émigrer dans une autre ville où ils pourraient atteindre l'utilité d'équilibre. Toutes choses égales par ailleurs, on a  $\bar{V}_{\max} \simeq 10600$ . Entre  $\bar{V}_{\min}$  et  $\bar{V}_{\max}$ , on est en situation de mitage et la taille de la zone périurbaine diminue avec l'augmentation de  $\bar{V}$ .

**Coûts de transport des biens agricoles  $t$**  Le dernier paramètre que nous devons analyser est le coût de transport pour les agriculteurs. Ce paramètre influence la rente d'enchère agricole, mais également la rente périurbaine *via* le niveau d'intensité agricole  $k^*$  et donc le niveau d'aménités. La figure 1.3d montre que jusqu'à un seuil minimal  $t_{\min} = 0,019$ , il n'y a pas de développement périurbain. Cela s'explique par le fait que les exploitations agricoles deviennent plus intensives lorsque les coûts de transport vers le centre ville sont plus faibles ( $\partial k / \partial t < 0$ ). Cet effet direct des coûts de transport sur la structure des exploitations a un impact sur le niveau d'aménités fourni par l'activité agricole, et donc sur les choix de localisations des ménages. Au dessus de  $t_{\min}$ , un phénomène de mitage apparaît. Le coût supplémentaire pour les agriculteurs provoque la possibilité pour les ménages de surenchérir pour la terre. De plus, cela provoque la diminution du niveau d'inputs utilisé, donc l'augmentation des aménités. Enfin, le seuil maximal  $t_{\max} = 0,022$  représente le moment où la zone périurbaine vient se coller à la zone urbaine, le développement prenant alors la forme d'extension urbaine. A partir de ce seuil, la taille de la zone périurbaine diminue pour deux raisons : la première est que la zone périurbaine est limitée par  $w/\tau$  qui correspond à la distance limite au-delà de laquelle les ménages ne sont plus en mesure d'enchérir tout en respectant leur contrainte budgétaire. La seconde raison est que la frontière de la ville se déplace loin du CBD (puisque la rente d'enchère agricole diminue), laissant ainsi plus de place à la ville, et moins à la zone périurbaine.

Si nous décidons de poser  $\gamma = 0.2$ ,  $\delta = 22$ ,  $\bar{V} = 10100$  et  $t = 0.02$ , nous nous plaçons donc dans un contexte d'extension urbaine tel que représenté dans la figure 1.5a. Les ménages urbains surenchérissent sur les agriculteurs du CBD jusqu'à  $\bar{x}$ . La zone urbaine est immédiatement suivie d'une zone périurbaine qui s'étend jusqu'au point  $x_2$ , au-delà duquel la terre devient à usage agricole uniquement. Le point  $\underline{x}$  représente la séparation entre la zone sous influence de la ville et la zone d'agriculture exogène.

Notons qu'au sein de la zone périurbaine, le niveau d'aménités est plus faible que dans



un cas sans ménages périurbains (voir figure 1.5b). C'est l'effet de l'externalité négative, lié à l'installation des ménages. Notre modèle nous permet de donner la fraction de terre à usage agricole à l'équilibre (figure 1.5c). Avec nos paramètres tels que nous les avons fixés, la fraction de terres agricoles en zone périurbaine décroît jusqu'à 67%, niveau en dessous duquel trop d'aménités seraient détruites, si bien que d'autres ménages ne seraient pas intéressés pour s'installer. Au sein de la zone périurbaine, la fraction de terres agricoles diminue dans un premier temps, traduisant l'accentuation de la fragmentation des usages du sol, puis augmente à nouveau, puisque les ménages sont moins nombreux à venir s'installer à cause de la distance au CBD.

Lorsque  $\delta = 18$ , on atteint une configuration de mitage pour laquelle la zone périurbaine est déconnectée de la zone urbaine. Cette configuration est représentée par la figure 1.6.

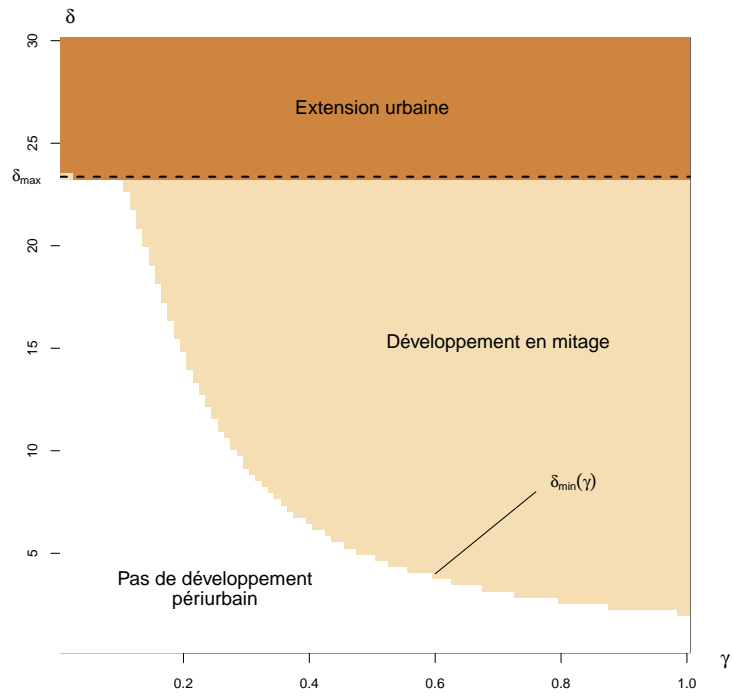


FIGURE 1.4 – Structure spatiale urbaine selon  $(\delta, \gamma)$

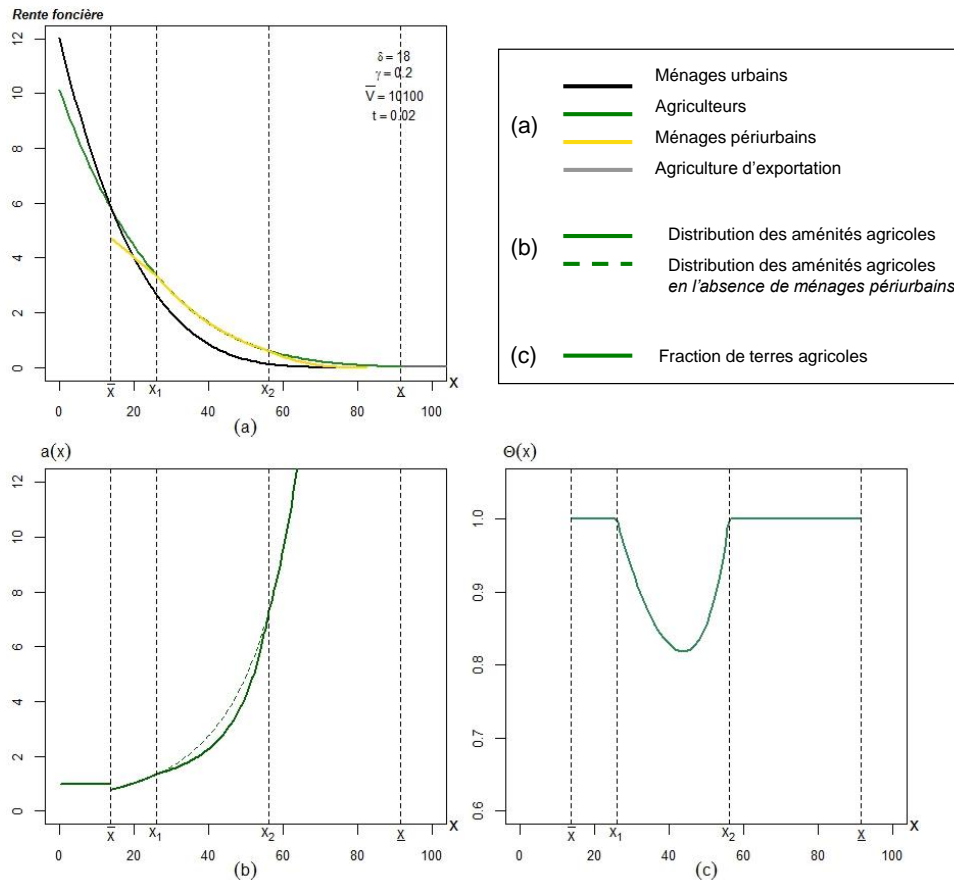


FIGURE 1.5 – Equilibre spatial de la structure urbaine : extension urbaine

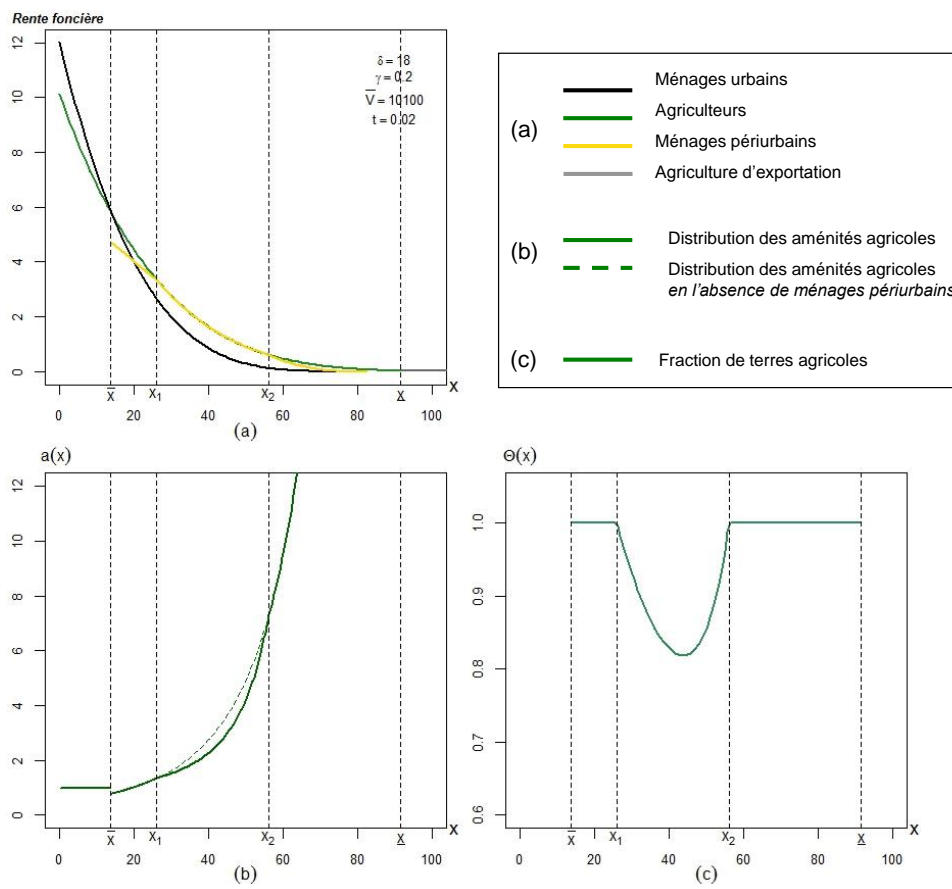


FIGURE 1.6 – Equilibre spatial de la structure urbaine : développement en mitage

## 1.5 Conclusion

Ce chapitre étudie les interactions entre les formes spatiales urbaines et l'agriculture. Pour souligner le rôle des aménités agricoles, nous avons développé un modèle de ville monocentrique dans lequel les agriculteurs ont un comportement von Thünenien et les ménages travaillent dans un CBD prédéterminé. L'équilibre est atteint par un marché foncier compétitif. En endogénéisant les aménités agricoles, nous proposons une explication intuitive quant au rôle de l'agriculture dans le processus d'étalement urbain. Les principaux résultats de ce modèle illustrent des variations possibles de la structure urbaine, en fonction des caractéristiques des exploitations agricoles et de leur distance à la ville. Ainsi, les exploitations proches de la ville sont relativement plus intensives, générant un niveau faible d'aménités agricoles. Plus loin de la ville, le paysage agricole est caractérisé par une agriculture plus extensive, qui procure un niveau d'aménités relativement plus élevé. Certains ménages valorisent la proximité des aménités agricoles et acceptent alors le surcoût engendré par le trajet supplémentaire pour se rendre à leur lieu de travail. Lorsque la fonction d'enchère des ménages est plus élevée que celle des agriculteurs, l'urbanisation par mitage est alors d'avantage susceptible de se produire. Ce qui rend possible un tel scénario est l'existence d'un niveau élevé d'aménités dans la zone d'agriculture extensive, plus éloignée de la ville. L'une des principales contributions de ce travail est le constat que, même en l'absence d'un élément paysager particulier ou d'une autre source exogène d'aménités, l'étalement urbain fragmenté peut être une configuration naturelle pour une ville entourée d'un environnement agricole variant spatialement.

Pour simuler les positions relatives des courbes d'enchère, nous avons appliqué le modèle à des données françaises. Pour chaque paramètre, des seuils minimum et maximum sont évalués pour déterminer l'apparition de mitage. Lorsque les ménages ont des préférences élevées pour les aménités agricoles, et que l'activité agricole est caractérisée par une capacité moyenne à produire des aménités, l'apparition de zones résidentielles isolées est plus probable.

Cette approche peut être utilisée pour étudier l'effet de politiques publiques ayant pour objectif de contrôler l'étalement urbain. Il apparaît de manière évidente qu'une politique publique ignorant la dimension spatiale de l'agriculture peut se confronter à certaines limites. L'introduction d'une activité agricole spatialisée permet également d'étudier l'effet de politiques publiques agricoles spécifiques, c'est l'objet du chapitre suivant.

## Chapitre 2

# Incorporation d'une politique paysagère

### 2.1 Introduction

Le modèle décrit dans le chapitre précédent permet de comprendre le fonctionnement de la zone périurbaine d'une ville, en particulier le rôle joué par des espaces agricoles de "qualité" variable. Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux effets d'une politique à dimension paysagère sur l'évolution de l'urbanisation, la densité d'habitation dans le périurbain et le bien-être des résidents et des bénéficiaires de la politique publique. Ici, en cohérence avec ce que nous avons développé précédemment, nous nous intéressons à une politique agricole paysagère, de type Mesure Agri-Environnementales (MAE). Toutefois, le modèle est suffisamment général pour être interprété de manière plus globale, ce qui inclurait les politiques de zonages environnementaux et paysagers comme les parcs et réserves naturelles par exemple.

À l'instar des rats de La Fontaine<sup>1</sup>, l'agriculture périurbaine et l'agriculture du monde rural isolé ont peu en commun. À la frange urbaine, l'agriculture est intensive en termes d'intrants non-terre comme le travail, les matériels et les pesticides. Plus loin des villes, l'agriculture rurale utilise plus de terre et de façon plus extensive. Cette organisation thünénienne de l'espace a été décrite en détails dans la littérature (Beckmann, 1972; Katzman, 1974; OECD, 2009).

Si l'agriculture est plus intensive aux abords des villes, c'est généralement parce que le foncier agricole y est plus cher et on lui substitue donc d'autres facteurs de production. Il y a deux raisons principales à cela. La première est historique et remonte à von Thünen. Dans un espace économique où les agriculteurs transportent leur production en ville, la rente foncière agricole décroît avec l'accroissement des coûts de transport. Dans un cadre néoclassique, l'assolement et les pratiques culturales sont alors plus intensifs proche des villes (Beckmann, 1972). La seconde raison, plus récente, est liée à la dynamique de la croissance des villes. Les opportunités de conversion des terres agricoles vers des usages résidentiels et l'irréversibilité

---

1. Jean de La Fontaine (1621-1695), *The Town Rat and The Country Rat*, *Fables*, book 1, fable 9. Translated by Walter Thornbury.

de cette conversion génèrent une prime de croissance et une valeur d'option qui décroît avec la distance à la ville et s'ajoute à la composante agricole (la rente agricole) pour former le prix (Capozza & Helsley, 1989, 1990). Les études empiriques menées sur ce sujet aux États-Unis et en Europe montrent que ces deux explications expliquent le gradient négatif de prix du foncier agricole quand on s'éloigne des villes (Plantinga *et al.*, 2002; Cavailhès & Wavresky, 2003; Livanis *et al.*, 2006; Wu & Lin, 2010).

Heimlich & Barnard (1992) aux États-Unis et Cavailhès & Wavresky (2007) en France, montrent que l'agriculture à la frange urbaine consomme plus d'intrants à l'hectare que l'agriculture plus éloignée des centres urbains. Parce que les externalités agricoles positives ou négatives sont considérées comme des produits joints de la production agricole (Abler, 2004; Hodge, 2008), parce que les individus valorisent ces externalités (cf. Bergstrom & Ready (2009) pour une revue de littérature) et parce que le développement urbain a lieu essentiellement sur les terres agricoles on peut s'attendre à ce que l'étalement urbain et l'intensité de l'agriculture soient profondément liés. Ainsi, les problèmes associés aux externalités agricoles (par exemple les odeurs, les flux d'engrais vers les eaux de surface ou les nappes phréatiques, la pollution de l'eau, la perte de haies, les modifications paysagères, etc.) et les conflits d'usage sont susceptibles d'être plus sévères dans les zones périurbaines.

Les externalités agricoles sont devenues une question politique majeure des dernières décennies. Les politiques agri-environnementales<sup>2</sup> (PAE) qui visent à maximiser la valeur sociale de l'agriculture consomment désormais une large part des fonds publics dédiés à l'agriculture dans les pays développés. Bien qu'elles varient en importance et dans leurs modalités à travers le monde, les politiques agri-environnementales sont focalisées sur la préservation du foncier agricole et le maintien des ressources naturelles et culturelles liées à l'agriculture. Aux États-Unis, les deux composantes les plus importantes du *Farm Bill* concernent les programmes de retrait des terres, comme le *Conservation Reserve Program*<sup>3</sup> (CRP) et les programmes visant les pratiques agricoles comme l'*Environmental Quality Incentives Program* (EQIP). En 2004, le gouvernement fédéral américain a dépensé 1,8 et 0,9 milliards de \$ sur ces deux programmes respectivement (Claassen *et al.*, 2008). En Europe, les PAE sont contenues dans le Deuxième Pilier (Développement Rural) de la Politique Agricole Commune (PAC). Au contraire des États-Unis, les programmes de retrait des terres agricoles sont un constituant mineur de la politique européenne et les PAE visent essentiellement à maintenir les activités agricoles dans les zones rurales défavorisées. Une part importante de la PAC est également centrée sur les pratiques agricoles comme les Mesures Agri-Environnementales<sup>4</sup> (MAE). Le Fonds Européen pour le Développement Rural (FEDER), qui finance les PAE en Europe, a été abondé de 96,3 milliards d'euros sur la période 2007-2013 ; dont 8,9 milliards ont été dépensés sur les MAE

---

2. cf. Baylis *et al.* (2008) et Wunder *et al.* (2008) pour des revues de littérature approfondies des politiques agri-environnementales (PAE) dans différents pays.

3. Le CRP vise la protection des terres soumises à un risque d'érosion. D'autres programmes, comme le *Grasslands Reserve Program* ou le *Farm and Ranch Lands Protection Program* visent à maintenir une activité agricole soucieuse de l'environnement et de sa dimension culturelle.

4. Règlement (Commission Européenne) 1698/2005, art.39.

durant les 4 premières années du programme (2007-2010).

De tels ordres de grandeur questionnent l'impact de ces programmes à la frange urbaine. Parce que les politiques agri-environnementales peuvent localement accroître la rareté de la terre et participer à la production d'aménités agricoles valorisées par les populations, il est raisonnable de penser qu'elles peuvent avoir des effets indirects et qu'elles peuvent induire localement du développement urbain. Pour les politiques foncières (Quigley & Rosenthal, 2005) et environnementales (Kiel, 2005), il est avéré qu'elles peuvent générer des effets connexes importants. Quigley & Swoboda (2007) ont montré que les zonages environnementaux, comme ceux du *Endangered Species Act*, ont des effets au-delà des zones réglementées. Parce que les zones ciblées ne peuvent pas devenir constructibles, la croissance urbaine se répercute dans toutes les zones non régulées de la ville. Le prix du foncier urbain s'accroît en dehors des zones ciblées, modifiant les formes urbaines et ayant des impacts importants en matière de distribution de la richesse (capital foncier) des résidents et propriétaires terriens. Les analyses empiriques concernant les effets induits des PAE sont rares, parce que la causalité est difficile à établir<sup>5</sup>. Cependant, il existe un important faisceau de preuves sur le fait que les terres agricoles bénéficiant de PAE sont moins converties à l'urbanisation que les autres (Wu & Cho, 2007; Liu & Lynch, 2011) et que les aménités agricoles sont valorisées de façon significative (par exemple Bastian *et al.*, 2002). En utilisant une analyse conjointe, Roe *et al.* (2004) montrent que la valeur d'aménité des terres agricoles bénéficiant des PAE est élevée en comparaison des coûts de transports à subir pour être localisé à proximité de ces aménités. Leurs résultats renforcent l'idée que les PAE peuvent induire du développement urbain. Irwin & Bockstael (2004) ont montré que la préservation des espaces naturels et agricoles induit l'urbanisation des parcelles adjacentes. Récemment, Towe (2010) a mesuré les effets induits du CRP. En utilisant des techniques d'appariement sur score de propension, il montre que les parcelles traitées (i.e. préservées) par le CRP ont des effets significatifs sur les parcelles avoisinantes, doublant leur probabilité de développement et modifiant ainsi les formes urbaines. En Europe, la préservation des terres agricoles est essentiellement contenue dans les zonages urbains<sup>6</sup>. En utilisant la même méthode, Geniaux & Napoléone (2011) ont montré, en France, que les zonages agricoles des documents d'urbanisme ont des impacts importants sur le développement urbain. Les communes avec d'importants zonages de protection des terres agricoles et des zones naturelles se développent et s'urbanisent plus fortement que les autres. Geniaux & Napoléone (2011) attribuent leurs résultats aux aménités générées par la protection des terres agricoles et des zones naturelles.

Malgré leur importance<sup>7</sup>, les programmes visant les pratiques agricoles ont reçu très peu

---

5. cf. Imbens & Wooldridge (2009) pour une revue récente de la littérature sur les méthodes économétriques pour identifier l'effet causal des politiques publiques.

6. Comme nous l'avons évoqué plus haut, la PAC n'est pas orientée vers la préservation des terres agricoles ou la lutte contre l'urbanisation.

7. En 2011, le programme EQIP a porté sur 5,3 millions d'hectares pour un financement fédéral de 865 millions de \$ (NRCS, USDA) auxquels il faut ajouter les fonds alloués par les États et les gouvernements locaux. Dans l'Union Européenne, les PAE s'élèvent à 46 millions d'hectares et un financement de 14,6 milliards d'euros incluant les fonds nationaux pour la période 2007-2010 (Directorat Général pour l'Agriculture et le

d'attention quant à leurs effets sur les formes de développement urbain. Cependant, les PAE peuvent être suffisamment importantes pour réduire le développement urbain, ou au moins pour le retarder sur la durée des contrats agri-environnementaux<sup>8</sup>. En échange d'un paiement, les agriculteurs s'engagent volontairement, dans des pratiques respectueuses de l'environnement qui minimisent les externalités négatives et fournissent des aménités agricoles et des biens publics. Ces bénéfices peuvent localement accroître la demande de foncier résidentiel. En outre, si du foncier est maintenu dans son usage agricole, la rente résidentielle va s'accroître partout ailleurs en ville. Ainsi, les PAE peuvent avoir pour effet de redistribuer les richesses via les prix du foncier.

Dans ce chapitre, nous construisons une analyse théorique des effets des politiques agri-environnementales, volontaires et visant le changement de pratiques agricoles, sur le développement urbain et la redistribution des richesses. Nous construisons notre analyse sur les travaux précédents de Wu & Plantinga (2003), Cavailhès *et al.* (2004), Wu (2006), Kovacs & Larson (2007) et Bento *et al.* (2011). Toutefois, dans aucun de ces modèles, les aménités agricoles ne dépendent de l'intensité de l'agriculture. Wu & Plantinga (2003), Wu (2006) et Kovacs & Larson (2007) se focalisent sur les formes du développement urbain. Ils décrivent comment des aménités exogènes, comme des parcs naturels, affectent les formes urbaines et la ségrégation des ménages. Dans Bento *et al.* (2011), qui analysent l'efficacité de plusieurs mesures de lutte contre l'étalement urbain, les aménités sont endogènes, dans le sens qu'elles dépendent de surface totale dédiée à l'agriculture en dehors de la ville, laquelle est affectée par le développement urbain. Le modèle développé par Cavailhès *et al.* (2004) ressemble le plus au nôtre. Dans leur approche, le comportement des agriculteurs est à la von Thünen, comme dans la nôtre. Les aménités agricoles dépendent de la proportion de terres à usage agricole à chaque endroit de la zone périurbaine. De notre côté, nous endogénéisons les aménités agricoles et les faisons dépendre de l'intensité de l'agriculture.

Notre analyse a lieu dans un cadre statique de ville monocentrique ouverte, où les aménités agricoles endogènes dépendent à la fois du comportement des agriculteurs et des ménages. Nous introduisons une politique agri-environnementale à caractère volontaire qui a pour but de limiter l'intensité de l'agriculture et qui est financée par les ménages. Nous faisons quelques hypothèses restrictives, mais réalistes, pour obtenir un modèle aussi simple que possible et dont le fonctionnement décrit les faits stylisés soulignés dans cette introduction :

1. le prix des terres agricoles diminue avec la distance au centre ville et la terre, moins chère, est substituée aux intrants non-terre,
2. il existe un gradient d'intensité agricole négatif et l'agriculture extensive procure plus de services environnementaux,
3. les agriculteurs adoptent les contrats agri-environnementaux en fonction du coût d'opportunité du foncier et du niveau de contrainte exigé dans ces contrats,

---

Développement Rural, Commission Européenne).

8. Les contrats agri-environnementaux sont de durée variable : de 10 à 15 ans aux États-Unis et au moins 5 ans en Europe.



4. les ménages tiennent compte des externalités rurales quand ils choisissent leur lieu de vie.

Le reste de ce chapitre est organisé de la façon suivante. D'abord, nous présentons le modèle théorique, nous discutons de l'adoption des PAE par les agriculteurs et nous décrivons les conditions de l'équilibre spatial de notre économie. Ensuite, nous réalisons des illustrations numériques sur la base de paramètres plausibles pour le cas français. Finalement, nous explorons l'impact des PAE sur les structures et les rentes urbaines.

## 2.2 Un modèle théorique de localisation résidentielle en présence d'aménités endogènes

Cette section décrit notre modèle spatial et son équilibre. Comme la configuration spatiale retenue est circulaire et symétrique, nous nous situons sur un segment donc l'origine est le centre d'affaires de la ville (CBD – *Central Business District*) localisé en 0. La distance entre le CBD et un point de l'espace sur la droite réelle  $[0; +\infty[$  est  $x$ . Tout l'emploi non-agricole est concentré au CBD. La terre est utilisée soit dans un usage agricole, soit dans un usage résidentiel, en fonction des rentes offertes par chaque usage. Nous faisons également l'hypothèse que toute la terre est détenue par des propriétaires terriens absents.

### 2.2.1 Comportement des agriculteurs

Les agriculteurs utilisent une quantité  $k = K/L$  d'intrants non-terre à l'hectare, où  $K$  représente les intrants non-terre et  $L$  la terre, pour produire une quantité  $y$  de biens agricoles à l'hectare<sup>9</sup>. La fonction de production agricole est donnée par  $f(k)$  et on fait l'hypothèse qu'elle est de type Cobb-Douglas :  $y = f(k) = Ak^\alpha$  avec  $A > 0$  et  $0 < \alpha < 1$ . La fonction de production est croissante en  $k$  et concave. Les agriculteurs sont prêts à payer un loyer maximal de  $r_a(x)$  pour une parcelle située en  $x$ . Ce loyer dépend de la distance au CBD où l'agriculteur vend sa production. Les coûts de transport sont donnés par  $t$  et sont proportionnels à  $x$ . Les prix des biens agricoles et des intrants, notés respectivement  $p$  and  $p_k$ , sont exogènes et fixés sur des marchés concurrentiels. En l'absence de toute politique publique le programme de maximisation du profit de l'agriculteur est donné par  $\max_k \pi(k, x) = (p - tx)Ak^\alpha - p_k k - r_a(x)$ . La fonction de demande des intrants non-terre est donnée par maximisation du profit  $\pi(k, x)$  par rapport à  $k$  :

$$k^*(x) = \left( \frac{\alpha A (p - tx)}{p_k} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \quad (2.1)$$

où  $k^*(x)$  est une fonction monotone et décroissante en fonction de la distance au CBD. Aux abords des villes, l'agriculture tend à être intensive, caractérisée par un haut niveau d'intrants à l'hectare  $k$ . Plus loin, les exploitations agricoles deviennent progressivement plus extensives,

---

9. Nous faisons l'hypothèse implicite que la fonction de production  $f(K, L)$  est à rendements d'échelles constants.

au fur et à mesure que  $k$  diminue. La concurrence sur le marché foncier annule les profits et on peut dériver la fonction d'enchère des agriculteurs en tout point  $x$  :

$$r_a^*(x) = (p - tx)^{\frac{1}{1-\alpha}} A \left( \frac{\alpha A}{pk} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} (1 - \alpha) \quad (2.2)$$

De (2.2) on déduit  $\partial r_a^*/\partial x < 0$ , ce qui signifie que  $r_a^*(x)$  diminue avec la distance au CBD.  $r_a^*(x)$  tend vers  $\underline{r}_a$  où l'agriculture n'est plus sous influence de la ville. La limite de l'aire d'influence urbaine  $\underline{x}$  est déterminée par  $r_a^*(\underline{x}) = \underline{r}_a$ . Sans perte de généralité, nous fixons  $\underline{r}_a$  de manière exogène.

Dans notre approche, le gradient négatif de la fonction d'enchère des agriculteurs est dû à leur comportement thunénien, comme dans d'autres travaux qui introduisent le comportement des agriculteurs dans un modèle de ville monocentrique (Cavailhès *et al.*, 2004; Caruso *et al.*, 2007). En d'autres termes, l'agriculture à la frange urbaine est intensive en intrants non-terre tels que le travail, le capital, les matériels et équipements agricoles et en engrais et pesticides. Plus loin de la ville, la production agricole repose plus sur la terre. Cette organisation thunénienne de l'espace agricole périurbain a été largement décrite dans la littérature (Beckmann, 1972; Katzman, 1974; OECD, 2009) et il a été montré qu'elle continue à être une configuration spatiale de l'agriculture contemporaine dans les métropoles américaines et européennes (Heimlich & Barnard, 1992; Plantinga *et al.*, 2002; Cavailhès & Wavresky, 2003; Livanis *et al.*, 2006; Cavailhès & Wavresky, 2007; Wu & Lin, 2010). Ceci peut-être expliqué par la localisation des infrastructures de stockage et de transformation des produits agricoles aux abords des villes et au fait que les agriculteurs périurbains s'engagent dans des stratégies de vente directe aux populations périurbaines. Toutefois, comme il est souligné dans ces études, il y a une autre raison qui explique que le prix du foncier agricole décline en s'éloignant des villes. C'est parce qu'aux abords des villes, le foncier agricole contient une prime de croissance qui correspond à l'accroissement des rentes espérées dû aux possibilités d'urbanisation (Capozza & Helsley, 1989). L'introduction d'une prime de croissance dans notre modèle nécessiterait l'inclusion d'un processus temporel qui ne cadre pas avec notre approche statique. Toutefois, notre modèle est parfaitement compatible avec cette explication et devrait également être interprété de cette façon.

### 2.2.2 Politique agri-environnementale

Nous introduisons dans le modèle une version stylisée d'une PAE visant au changement de pratiques agricoles. Notre PAE est représentée par un contrat, souscrit volontairement, entre chaque agriculteur et le gouvernement local (de la métropole) dont l'objet est d'abaisser l'utilisation des intrants non-terre  $k$  à un niveau cible  $\hat{k}$ . En échange, les agriculteurs qui participent au programme reçoivent une aide uniforme  $\sigma$  à l'hectare. Les agriculteurs décident de signer, ou non, un contrat agri-environnemental<sup>10</sup> en fonction de leur coût d'opportunité privé. Le contrat agri-environnemental est donc complètement décrit par le couple  $(\sigma, \hat{k})$ . Cette PAE

10. Comme notre approche est statique, les contrats n'ont pas de durée.

approxime les PAE décrites par Wunder *et al.* (2008) and Baylis *et al.* (2008). Dans de nombreux cas, les PAE ne sont pas uniformes et elles prennent en compte l'hétérogénéité spatiale des territoires et de l'environnement. Nous choisissons de ne pas considérer ici les politiques ciblées territorialement pour ne pas introduire une complexité inutile dans le modèle. Nous nous focalisons sur le cas simplifié où la PAE est appliquée de manière uniforme sur le territoire.

La participation des agriculteurs à la PAE est endogène au modèle et dépend de leur localisation qui, dans notre cas, décrit complètement leur coût d'opportunité. La participation de agriculteurs à une PAE a été bien documentée dans la littérature et il a été démontré qu'elle dépend de facteurs relatifs aux termes contractuels<sup>11</sup> et des caractéristiques des exploitants<sup>12</sup>. Mais de façon surprenant, les revues de littérature sur la participation aux PAE de Knowler & Bradshaw (2007) et Baumgart-Getz *et al.* (2012) suggèrent que la plupart de ces facteurs ne permettent de décrire que de manière très incomplète la participation des agriculteurs aux PAE. Notons également qu'aucune de ces deux revues de littérature n'identifie d'études où la proximité aux centres urbains serait un déterminant de la participation des agriculteurs aux PAE<sup>13</sup>. En effet, ces études sont rares mais tendent à montrer de façon univoque que la probabilité de participation d'un agriculteur à une PAE est plus faible aux abords des villes que pour les exploitations les plus éloignées (Lynch & Lovell, 2003; Van Huylenbroeck *et al.*, 2005; Bertoni *et al.*, 2011).

Dans notre modèle, le programme de maximisation du profit des agriculteurs qui participent à la PAE peut être réécrit de la façon suivante :

$$\max_k \pi(k, x) = (p - tx)Ak^\alpha - p_k k - r_a(x) + \sigma \quad \text{s.t.} \quad k(x) \leq \widehat{k} \quad (2.3)$$

Nous faisons l'hypothèse supplémentaire que les autorités locales connaissent<sup>14</sup> l'utilisation d'intrants par les exploitants en tout point de l'espace. Pour des raisons d'efficacité, seuls les agriculteurs qui changent effectivement de pratiques, en limitant leurs intrants non-terre, se voient accorder l'aide. Rappelons que  $k(x)$  est une fonction strictement décroissante avec la distance au CBD. Nous faisons donc l'hypothèse que les agriculteurs localisés au delà de  $\widehat{x}'$  ne peuvent pas se voir accorder d'aide, bien que ce serait intéressant pour eux d'adopter la PAE puisqu'ils utilisent déjà un niveau d'intrants non-terre inférieur aux restrictions de la PAE (cf. figure 2.1). Cette distance critique est donnée par  $k^*(\widehat{x}') = \widehat{k}$ , de laquelle on dérive :

$$\widehat{x}' = \frac{1}{t} \left( p - \frac{p_k}{\alpha A} \widehat{k}^{1-\alpha} \right) \quad (2.4)$$

11. Ce sont les facteurs comme la durée du contrat, le paiement offert, la mise en œuvre de mécanismes de contrôle, l'accompagnement agronomique au changement de pratiques, etc.

12. Lesquelles incluent l'âge, le niveau d'éducation, le statut du foncier, l'importance des revenus non-agricoles, la taille de l'exploitation, l'appartenance à des réseaux agricoles professionnels etc.

13. Notons toutefois que des facteurs reliés à la proximité urbaine comme le capital, le revenu ou l'intensité agricole ont généralement des effets significatifs allant dans le sens de nos hypothèses

14. Ce qui veut dire qu'il n'y a pas de coûts de transaction liés à la mise en place de la politique. Cela signifie également qu'il n'y a pas d'asymétries d'information entre les contractants. On considère généralement que les rentes informationnelles altèrent l'efficacité des PAE (Latacz-Lohmann & Van der Hamsvoort, 1997; Ozanne *et al.*, 2001; Canton *et al.*, 2009).

Les agriculteurs localisés entre la ville et  $\hat{x}$  n'adoptent pas la PAE car l'aide ne compense pas leur perte de profit liée à la mise en place de la politique.  $\hat{x}$  est solution de :

$$A \left( \frac{\alpha A}{p_k} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} (1-\alpha) (p-t\hat{x})^{\frac{1}{1-\alpha}} - A\hat{k}^\alpha (p-t\hat{x}) + p_k\hat{k} - \sigma = 0 \quad (2.5)$$

Les agriculteurs localisés entre  $\hat{x}$  et  $\hat{x}'$  adoptent le contrat agri-environnemental et reçoivent l'aide (cf. figure 2.1). La distribution spatiale de l'intensité de l'agriculture est alors donnée par :

$$k(x) = \begin{cases} \hat{k}, & \text{si } x \in [\hat{x}, \hat{x}'] \\ k^*(x), & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.6)$$

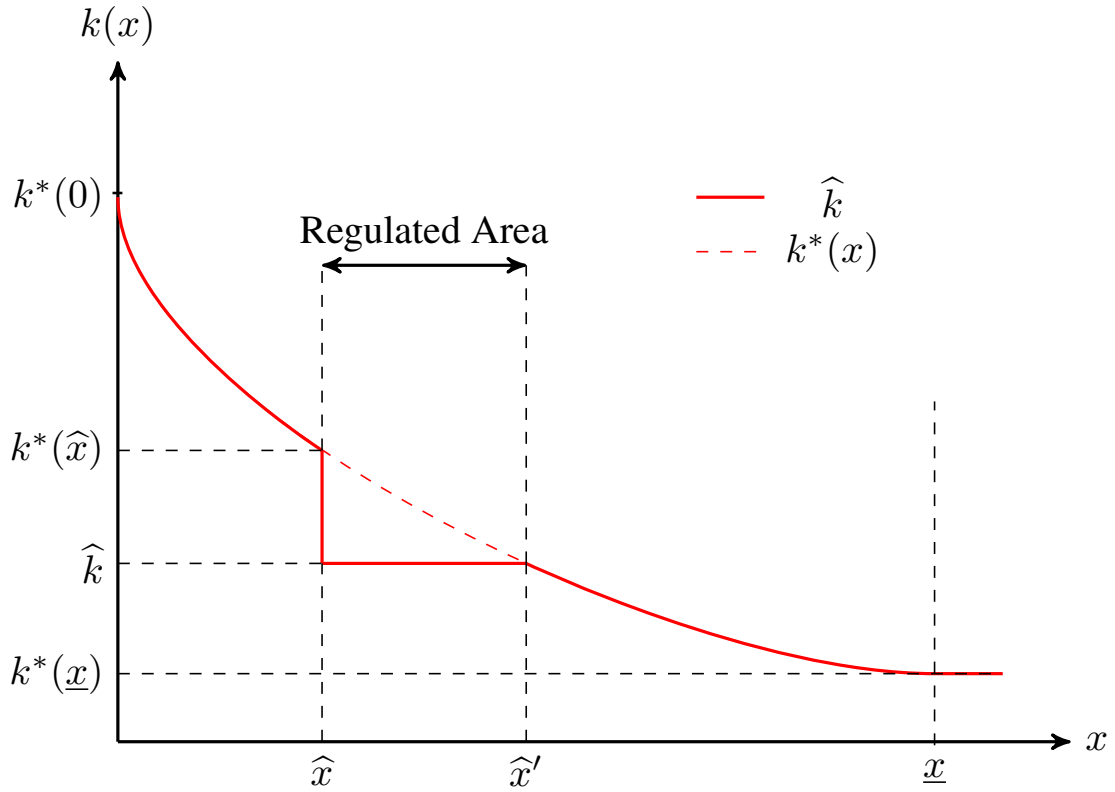


FIGURE 2.1 – Définition de la zone régulée

Comme on le décrit dans la figure 2.1, choisir  $\hat{k}$  est équivalent à choisir la distance d'adoption  $\hat{x}'$ , et choisir  $\sigma$  revient à déterminer la profondeur  $(\hat{x} - \hat{x}')$  de la zone régulée.

(2.6) permet de dériver la fonction d'enchère des agriculteurs :

$$r_a^*(x) = \begin{cases} (p-tx) A\hat{k}^\alpha - p_k\hat{k} + \sigma, & \text{si } x \in [\hat{x}, \hat{x}'] \\ (p-tx)^{\frac{1}{1-\alpha}} A \left( \frac{\alpha A}{p_k} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} (1-\alpha), & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.7)$$

### 2.2.3 La production jointe d'externalités agricoles

Nous considérons, comme dans le chapitre précédent, que l'activité agricole génère un flux d'externalités qui sont un produit joint de l'activité agricole. Ce flux d'externalités  $e(x)$  produit par l'agriculture en un point  $x$  représente le solde des externalités positives (i.e. la qualité paysagère, l'entretien d'éléments culturels, le maintien de la biodiversité) et des externalités négatives (i.e. la pollution, les nuisances), et qu'il est directement lié au niveau des intrants non-terre utilisés  $k(x)$ , c'est-à-dire de l'intensité de l'agriculture :

$$e(x) = \frac{\delta}{k(x)} \quad (2.8)$$

où  $\delta$  est le paramètre représentant la capacité d'un type donné d'agriculture à fournir des aménités.

Il est communément accepté que les systèmes productifs agricoles intensifs génèrent des paysages et des environnements d'une moindre qualité que l'agriculture plus extensive (Abler, 2001; Maier & Shobayashi, 2001; Bergstrom & Ready, 2009). Toutefois, la relation entre activités agricoles et externalités peut être complexe, comme cela est discuté par Hodge (2000), Harvey (2003) et Wossink & Swinton (2007). Cette relation peut être concurrentielle : un accroissement du niveau des intrants engendre une diminution de la qualité environnementale, comme c'est souvent le cas aux États-Unis ou en Australie. Dans le contexte européen, la relation entre niveau de production agricole et les services environnementaux et paysagers peut ne pas être monotone. En spécifiant une fonction de production d'externalités comme dans (2.8), nous choisissons une relation de type concurrentielle, plus proche de la situation des pays anglo-saxons. Dans notre modèle, l'introduction d'une politique agri-environnementale limitant l'utilisation des intrants non-terre aura donc un effet direct sur la production d'aménités par l'agriculture, ce qui est confirmé empiriquement par les études menées par Glebe (2007) ou Duke *et al.* (2012). La zone réglementée par la PAE est alors caractérisée par un flux net d'externalités plus important.

D'autre part, l'introduction de  $\delta$  nous permet de faire l'hypothèse que certains types d'agriculture sont plus à même de fournir des aménités que d'autres, à n'importe quel niveau donné d'utilisation d'intrants non-terre.  $\delta$  décrit le degré de jointure de production entre les aménités et l'agriculture. Dans notre modèle, les exploitations en monoculture (céréales, etc.) ou hors-sol (porcins et volailles par exemple) génèrent peu d'aménités qui sont valorisées positivement par les ménages ( $\delta$  faible). *A contrario*, l'élevage extensif ou l'horticulture fruitière (vergers) génèrent de nombreuses aménités, indépendamment d'un niveau d'intrants non-terre qu'elles mobilisent ( $\delta$  élevé). La valeur de  $\delta$  varie potentiellement entre les villes en fonction de l'orientation de l'agriculture et des caractéristiques culturelles. Pour prendre des exemples américains, au Kentucky, les ranchs avec des murets en pierre et des barrières en bois, des granges emblématiques et des prairies sont associés à un  $\delta$  élevé, comme le décrivent Ready *et al.* (1997). Dans le Wyoming (Bastian *et al.*, 2002), ce serait le cas des grandes prairies qui constituent l'habitat des élans. Fausold & Lilieholm (1999), McConnell & Walls (2005)

et Bergstrom & Ready (2009) fournissent des revues de littératures éclairantes sur les valeurs sociales associées au foncier agricole et à l'agriculture.

$\delta$  est fixe parce que notre modèle ne considère qu'un seul type d'agriculture pour une ville donnée. Le modèle pourrait être étendu à plusieurs types d'agriculture avec plusieurs  $\delta$ . En fonction de leur fonction d'enchère, ces différents types d'agriculture apparaîtraient de manière continue par ordre décroissant d'intensité, comme le montre Beckmann (1972). Notons, cependant, que la répartition inégale du climat, des sols et des conditions agronomiques, ainsi que l'existence d'économies d'agglomération dans la production et les filières agricoles, favorisent un certain degré d'homogénéité et de spécialisation de l'agriculture à l'échelle d'une ville. D'autre part, l'introduction de différents types d'agriculture introduirait une complexité inutile au modèle qui ne sert pas à déterminer l'occurrence d'un type d'agriculture dans une zone métropolitaine.

#### 2.2.4 Localisation des ménages dans les zones urbaines et péri-urbaines

La fonction d'utilité des ménages est déterminée par l'arbitrage usuel entre l'accessibilité au CBD, la consommation d'espace résidentiel et d'aménités. Chaque ménage choisit une combinaison d'espace résidentiel  $q_h$ , un localisation  $x$  et une quantité de bien composite (hors foncier résidentiel)  $s$  pris pour numéraire, qui maximise son utilité, sous contrainte de son budget  $w = r(x)q_h + s + \tau x + \eta$ ; où  $w$  est le revenu du ménage,  $\tau$  est le coût de transport aller-retour par unité de distance,  $r(x)$  est le prix du foncier résidentiel en  $x$  et  $\eta$  est une taxe forfaitaire, appliquée à tous les ménages, qui permet de financer la PAE.

Nous spécifions une fonction d'utilité de type Cobb-Douglas  $U(s, q_h, a(x)) = q_h^\beta s^{1-\beta} a(x)^\gamma$ , où  $a(x)$  représente les aménités. En ville,  $a(x)$  représente les aménités urbaines normalisées à l'unité ( $a(x) = 1$ ). En dehors de la ville,  $a(x)$  correspond aux aménités agricoles et varie spatialement de la manière décrite dans la section suivante. Nous faisons l'hypothèse, sans perte de généralité, que les aménités ne sont consommées qu'en un point de l'espace, sur le lieu de résidence. Cette hypothèse est valide tant que l'on considère des externalités localisées, comme les paysages (haies, bâti, arbres, ...) et les nuisances localisées (odeurs, ...). La littérature empirique montre par ailleurs que la valeur des aménités agricoles diminue très rapidement avec la distance (Irwin & Bockstael, 2004; Cavailhès *et al.*, 2009a) pour devenir insignifiante au-delà de quelques centaines de mètres. Par opposition, notons que les aménités diffuses, comme la biodiversité, la qualité de l'eau ou la protection contre l'érosion des sols, peuvent avoir une dimension spatiale très large et pour lesquelles, l'hypothèse de consommation localisée ne tient plus. Ce ne sont donc pas les aménités dont nous traitons ici.

Le programme d'optimisation des ménages définit la demande d'espace résidentielle et de numéraire en tout point de l'espace :

$$s^*(x) = (1 - \beta)(w - \tau x - \eta) \tag{2.9}$$

$$q_h^*(x) = \frac{\beta(w - \tau x - \eta)}{r(x)} \quad (2.10)$$

La fonction d'enchère des ménages dépend de leur localisation. En accord avec notre définition des aménités urbaines et péri-urbaines, nous avons donc deux fonctions d'enchères. Notons  $r_u(x)$  et  $r_p(x)$  les enchères en  $x$  dans les zones urbaine et péri-urbaine respectivement :

$$r_u^*(x) = \left[ \frac{\beta^\beta (1 - \beta)^{1-\beta} (w - \tau x - \eta)}{\bar{V}} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (2.11)$$

$$r_p^*(x) = \left[ \frac{\beta^\beta (1 - \beta)^{1-\beta} (w - \tau x - \eta)}{\bar{V}} \right]^{\frac{1}{\beta}} a(x)^{\frac{\gamma}{\beta}} \quad (2.12)$$

Ces fonctions d'enchère décrivent le consentement à payer maximal des ménages pour le foncier en  $x$ . A l'équilibre, les ménages sont indifférents quant à leur localisation parce que le niveau d'utilité d'équilibre est le même en tout point de l'espace et il est exogène car on considère une ville ouverte. De (2.11), on remarque que la fonction d'enchère urbaine décroît avec la distance et vaut zéro  $x = (w - \eta)/\tau$ . La pente de la fonction d'enchère péri-urbaine (2.12) est plus difficile à prévoir. D'abord, ce n'est pas nécessairement une fonction décroissante de la distance au CBD parce que les ménages pourraient enchérir au dessus des agriculteurs pour des localisations qui, bien qu'éloignées avec des coûts de transport importants, offriraient des niveaux d'aménités élevés. Cette fonction d'enchère est similaire à celle que l'on retrouve dans les autres travaux incluant une ville monocentrique et des aménités (Brueckner *et al.*, 1999; Wu & Plantinga, 2003; Wu, 2006).

### 2.2.5 Les aménités agricoles

Nous faisons l'hypothèse que les aménités agricoles valorisées par les ménages péri-urbains dépendent directement du flux net d'externalités  $e(x)$  produit par l'activité agricole (2.8) et qu'elles sont définies par (2.13) :

$$a(x) = e(x)\Theta(x) \quad (2.13)$$

où  $\Theta(x)$  est la fraction d'espace agricole en  $x$ , par opposition à l'espace résidentiel. A travers  $\Theta(x)$ , la fonction d'aménités tient compte du fait que l'urbanisation nuit au cadre de vie. Ainsi, en urbanisant, les ménages se nuisent mutuellement et détruisent la qualité de leur cadre de vie. Cette externalité négative entre les ménages a été documentée par Irwin (2002) et Roe *et al.* (2004), notamment. Dans notre modèle, elle apparaît à l'équilibre (cf. la section suivante). Au fur et à mesure que les ménages péri-urbains urbanisent,  $\Theta(x)$  décroît ce qui diminue le niveau des aménités agricoles et fait donc baisser l'enchère des ménages péri-urbains jusqu'à ce quelle soit égale à celle des agriculteurs ce qui amène à un espace mixte où les ménages agricoles et péri-urbains se partagent l'espace. Quand  $\Theta(x) = 0$  il n'y a plus du tout d'agriculture donc plus d'aménités agricoles. Cette configuration est impossible dans l'espace péri-urbain car sans aménités agricoles, les ménages n'ont plus d'incitation à se localiser dans l'espace péri-urbain. Quand  $\Theta(x) = 1$ , toute la terre est à usage agricole.

## 2.2.6 Équilibre spatial

Après avoir dérivé les fonctions de comportement des ménages et des agriculteurs, nous caractérisons maintenant l'équilibre spatial dans la zone urbaine. Les prix du foncier résidentiel sont tirés vers le haut dans les localisations désirables, de telle façon qu'à l'équilibre aucun ménage ne souhaite déménager. Cette condition est vérifiée quand les prix du foncier sont donnés par (2.11) et (2.12) et que la fonction d'enchère des agriculteurs est donnée par (2.7). La terre est occupée par l'enchère la plus élevée. La rente foncière en tout lieu est donnée par  $\max \{r_u^*(x), r_p^*(x), r_a^*(x)\}$ .

**Définition de la ville** Comme nous l'avons défini auparavant, la zone d'influence urbaine est limitée par  $\underline{x}$ , la distance à laquelle la rente agricole devient exogène. La limite de la ville  $\bar{x} \in [0, \underline{x}]$  résout  $r_u^*(\bar{x}) = r_a^*(\bar{x})$ . La ville est représenté par l'ensemble des localisations  $C = \{x < \bar{x} \mid r_u^*(x) > r_a^*(x)\}$ .  $\bar{x}$  est donc déterminé par la concurrence pour le foncier entre les ménages et les agriculteurs<sup>15</sup>. Le nombre de ménages  $\rho_u^*(x)$  en tout lieu de la zone urbaine est défini par :

$$\rho_u^*(x) = \frac{D(x)}{q_h^*(x)} \quad (2.14)$$

où  $q_h^*(x)$  la taille d'une parcelle résidentielle (en  $m^2/\text{ménage}$ ) et  $D(x)$  est la quantité de foncier résidentiel par unité de terre (surface construite par hectare en  $m^2/ha$ ). Pour simplifier, nous supposons que  $D(x)$  est exogène. Cette hypothèse nous permet d'éviter l'introduction d'un aménageur urbain, comme cela est fait dans d'autres modèles (Wu, 2006; Quigley & Swo-boda, 2007; Bento *et al.*, 2011). Cette hypothèse n'induit aucune spécificité d'interprétation du modèle. Notons cependant que cela nous empêche de dériver des changements dans la densité de construction.

**Définition de la zone péri-urbaine** Dans la zone péri-urbaine, la terre est partagée entre les agriculteurs et les ménages. La zone mixte péri-urbaine est l'ensemble des localisations  $P = \{x > \bar{x} \mid r_p^*(x) = r_a^*(x)\}$ . Deux configurations peuvent émerger :

(1) Extension urbaine : la zone péri-urbaine se développe directement après la limite de la ville  $\bar{x}$ . Dans ce cas, il doit exister  $x_2$  tel que pour tout  $x \in [\bar{x}, x_2]$ , nous avons  $r_p^*(x) = r_a^*(x)$ . Au-delà de  $x_2$ , la terre est purement en usage agricole ( $r_a^*(x) > r_p^*(x)$ ).

(2) Mitage : dans notre contexte, nous définissons le mitage comme une forme d'urbanisation déconnectée de la ville.  $P$  n'est pas connecté à  $C$  si  $x_1 < x_2 < \underline{x}$  existe tel que pour  $x \in [\bar{x}, x_1] \cup [x_2, \underline{x}]$ , nous avons  $r_a^*(x) > r_p^*(x)$ , c'est-à-dire un usage agricole uniquement, et pour  $x \in [x_1, x_2]$ , nous avons  $r_p^*(x) = r_a^*(x)$ .

---

15. Les conditions d'existence des configurations spatiales sont disponibles en annexe A.



**Caractéristiques de la zone péri-urbaine** Dans la zone d'usage mixte du sol, la proportion de terre agricole en un point  $x$  est égale à :

$$\Theta^*(x) = \rho_a^*(x)L^*(x) = 1 - \rho_p^*(x)q_h^*(x) \quad (2.15)$$

où  $\rho_a(x)$  et  $\rho_p^*(x)$  sont, respectivement, le nombre d'agriculteurs et de ménages en  $x$  dans la zone péri-urbaine, et  $L(x)$  et  $q_h^*(x)$  leur consommation d'espace respective. Les rendements d'échelles constants ne nous permettent pas de déterminer  $\rho_a^*(x)$  et  $L^*(x)$  séparément. Ainsi, le nombre total d'agriculteurs  $N_a^*$  est indéterminé. Cependant, cela ne pose pas de difficulté à la caractérisation de l'équilibre du modèle, puisque nous ne nous focalisons pas sur le nombre de propriétaires terriens ou d'agriculteurs. La terre agricole pourrait être cultivée par un seul exploitant ou par une multitude d'agriculteurs, l'usage du sol serait le même. Comme  $r_p^*(x) = r_u^*(x)a(x)^{\frac{\gamma}{\beta}}$  et  $r_p^*(x) = r_a^*(x)$  dans la zone mixte d'usage du sol, nous dérivons le niveau d'aménités péri-urbaines en  $x$  à l'équilibre :

$$a^*(x) = \left( \frac{r_a^*(x)}{r_u^*(x)} \right)^{\frac{\beta}{\gamma}} \quad \text{at any } x \in [x_1, x_2] \quad (2.16)$$

En combinant (2.16), (2.13) et (2.15), nous obtenons la proportion de terres agricoles à l'équilibre en tout point  $x$  de la zone péri-urbaine :

$$\Theta^*(x) = \frac{k^*(x)}{\delta} \left( \frac{r_a^*(x)}{r_u^*(x)} \right)^{\frac{\beta}{\gamma}} \quad \text{at any } x \in [x_1, x_2] \quad (2.17)$$

**Population à l'équilibre** Dans une ville ouverte, le niveau d'utilité est exogène et identique dans toutes les villes parce que les ménages peuvent migrer sans coût d'une ville à l'autre. À l'équilibre, la zone développée doit fournir de l'espace résidentiel pour tous les ménages dont le nombre est donc endogène et déterminé par :

$$N_u^* = \int_0^{\bar{x}} \rho_u^*(x)2\pi x dx ; N_p^* = \int_{x_1}^{x_2} \rho_p^*(x)2\pi x dx \quad (2.18)$$

**Budget de l'autorité locale à l'équilibre** Pour financer la PAE, l'autorité locale collecte une taxe forfaitaire  $\eta$  auprès de tous les ménages. L'équilibre budgétaire de la PAE requiert que nous ayons :

$$\eta^* (N_u^* + N_p^*) = \sigma 2\pi \int_{\hat{x}}^{\hat{x}'} \Theta^*(x) x dx \quad (2.19)$$

où le terme de droite de (2.19) est l'aide (en €/ha) multipliée par la surface agricole contractualisée par le programme  $S_a^*$  (en ha).

**Équilibre général spatial** L'équilibre général spatial peut-être simplifié au 8-uple  $\{r_u^*, \bar{x}, x_1, x_2, \Theta^*, N_u^*, N_p^*, \eta^*\}$  défini par (2.11), (2.17), (2.18) et (2.19), les limites entre les zones étant définies dans le texte.

		$r_a^*$	$k^*$	$\hat{x}'$	$\hat{x}$
$\sigma$	si $x \in [\hat{x}, \hat{x}']$	+	0	0	-
	sinon	0			
$\hat{k}$	si $x \in [\hat{x}, \hat{x}']$	+	+	-	-
	sinon	0	0		

TABLEAU 2.1 – Effets de  $(\sigma, \hat{k})$  sur les variables agricoles

### 2.2.7 Statique comparative

La statique comparative complète du modèle a été effectuée sans la PAE<sup>16</sup>. Les résultats sont en accord avec les effets habituels mis en évidence dans les modèles de ville monocentrique : Un revenu plus élevé et des coûts de transports plus faibles accroissent le développement des aires urbaines et péri-urbaines. L'hypothèse d'une agriculture hétérogène dans l'espace conduit à des variations des paramètres agricoles qui ne sont pas neutres sur la fonction d'enchère péri-urbaine et donc sur la taille et la location de la zone d'usage mixte du sol. Quand les prix des intrants et produits agricoles varient, les arbitrages des ménages péri-urbains peuvent être affectés par le changement de l'intensité agricole et donc par les aménités.

Cependant, dans notre modèle, l'introduction d'une PAE implique un espace segmenté où plusieurs configurations peuvent apparaître en termes de positionnement relatif des zones régulées par la PAE et de l'espace mixte. Ceci génère des relations non-linéaires complexes et des effets opposés qui ne peuvent être résolus de manière analytique. Les principaux mécanismes à l'œuvre impliqués par l'introduction de la PAE sont les suivants. Comme la PAE est financée par une taxe sur les ménages, une zone régulée plus grande implique une taxation plus importante. De (2.11), nous avons  $\partial r_u / \partial \eta < 0$ , c'est-à-dire que les ménages urbains sont affectés négativement par la mise en place de la PAE. Il s'en suit que l'impact sur les équilibres urbains, comme la localisation de la limite de la ville et la population urbaine, est similaire. L'effet sur les ménages péri-urbains est plus difficile à prédire. L'effet négatif de la taxe peut être contrebalancé par un accroissement de l'offre d'aménités locales en conséquence de la mise en place de la PAE. Ceci a un effet positif sur la fonction d'enchère péri-urbaine (d'après (2.12), nous avons  $\partial r_p / \partial a(x) > 0$ ). Bien sûr, l'effet global dépend de la localisation de la zone régulée qui détermine également les effets sur  $\Theta^*(x)$  et  $N_p$ .

L'analyse statique comparative sur l'équilibre agricole concernant les paramètres de la PAE est plus simple à déterminer. D'après (2.4), (2.5), (2.6) et (2.7), nous obtenons les résultats présentés dans le tableau 2.1.

Étant donnée la complexité du modèle, nous choisissons de visualiser les différents effets de la PAE à travers des simulations numériques.

16. Le lecteur intéressé pourra s'y référer en annexe B.

## 2.3 Modèle numérique

À la suite de Wu & Plantinga (2003), Bento *et al.* (2006) et Wu (2006), nous menons un ensemble de simulations numériques pour visualiser les effets paramètres sur l'équilibre du modèle. Ces effets peuvent être directs ou indirects.

Les paramètres structurels du modèle sont choisis de manière à générer une ville française de taille moyenne plausible, à partir des données de l'Insee<sup>17</sup> et du Réseau d'Information Comptable Agricole (RICA)<sup>18</sup>. Les valeurs des paramètres sont présentées dans le tableau 2.2. Selon les données de l'Insee sur les revenus entre 2000 et 2009, le revenu moyen pour un ménage français métropolitain est de 33384 euros. Environ un quart des dépenses des ménages sont consacrées à l'immobilier (25,6% en 2010). Les coûts de transports pour les ménages sont évalués d'après la Direction Générale des Impôts à près de 0,4 €/km. En faisant l'hypothèse qu'un ménage compte en moyenne 1,5 travailleur faisant l'aller retour au CBD tout au long de l'année, nous fixons  $\tau = 400$  €/km/year. Finalement, de façon à générer une fonction d'enchère urbaine réaliste au centre ville, nous fixons l'utilité d'équilibre à  $\bar{V} = 10100$ . Étant donné le manque de données pertinentes sur les préférences des ménages pour les aménités associées à la PAE, nous fixons arbitrairement  $\gamma = 0,2$ .

La proportion des coûts non-terre à l'hectare annoncée dans le RICA est d'environ 90% des coûts totaux et correspond à des charges moyennes d'approximativement  $p_k k^* = 1861$  €/ha par exploitation et à une revenu brut moyen de  $p A k^{*\alpha} = 1714$  €/ha par exploitation, en 2009. En combinant cela à l'estimation de la proportion des coûts non-terre à l'hectare, nous avons un ratio du prix des biens agricoles au prix des intrants non-terre d'environ 2,85. Nous faisons l'hypothèse que ce ratio est constant pour une exploitation française moyenne. Nous fixons  $\alpha = 0,8$ ,  $p_k = 1$  et  $p = 2,62$  pour générer des valeurs réalistes. Les coûts de transports des agriculteurs sont fixés à  $t = 0,02$  €/km/unité de bien agricole, de telle manière que le rayon de la zone sous influence urbaine vaut  $\underline{x} = 91,6$  km.

Les formes de développement urbain sont illustrées par la figure 2.2. Elle permet d'identifier deux formes de développement urbain : l'extension urbaine et le mitage. L'occurrence de l'un ou de l'autre dépend, dans une certaine mesure, de la capacité de l'agriculture à fournir des aménités ( $\delta$ ). La figure 2.2a illustre le cas où la zone d'usage mixte du sol est déconnectée de la zone urbaine. C'est la forme d'urbanisation que nous qualifions de mitage. Elle apparaît quand  $\delta$  est relativement faible (i.e  $\delta = 18$ ). La zone d'usage mixte du sol est donc déconnectée de la ville si l'agriculture dans l'aire urbaine n'a qu'une faible capacité à produire des aménités. La deuxième configuration de référence montrée dans la figure 2.2b est caractérisée par une zone péri-urbaine connectée à la zone urbaine. Cette extension urbaine apparaît quand la jointure de production entre l'agriculture et les aménités est forte.

---

17. <http://www.insee.fr/fr/themes/> (accédé : 22 mai 2012).

18. Le RICA est une base données européenne fournissant de l'information comptable sur les revenus et les pratiques agricoles. <http://ec.europa.eu/agriculture/rica/> (accédé : 22 mai 2012).

Paramètre		Valeur
$w$	Revenu	33000 €
$\tau$	Coûts de transport	400 €/km/year
$\beta$	Part du budget pour l'immobilier	0,25
$\bar{V}$	Niveau d'utilité d'équilibre	10100
$\gamma$	Préférence pour les aménités	0,2
$p$	Prix des biens agricoles	2,62 €/unité
$p_k$	Prix des intrants non-terre	1 €/unité
$\alpha$	Élasticité de production	0,8
$t$	Coûts de transports des biens agricoles	0,02 €/km/unité/an
$A$	Constante technique	1
$\delta$	Jointure de production des aménités	
	<i>Cas de l'extension urbaine</i>	24
	<i>Cas du mitage</i>	18

TABLEAU 2.2 – Valeur et signification des paramètres

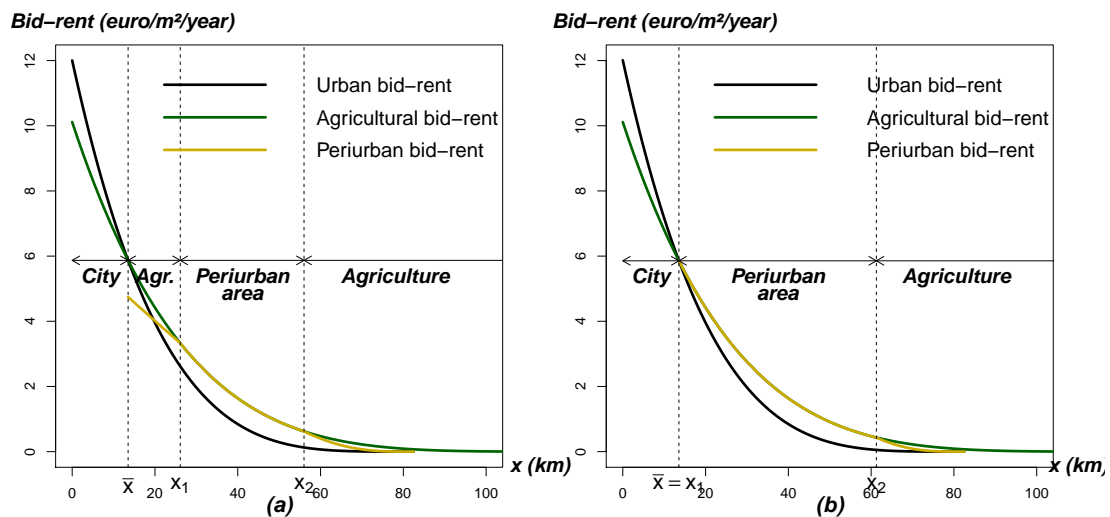


FIGURE 2.2 – Formes de développement de référence : (a) mitage et (b) extension urbaine

Description variable		Benchmark	
		<i>Extension urbaine</i>	<i>Mitage</i>
$\delta$	Capacité de l'agriculture à produire des aménités	24	18
$\bar{x}$	Rayon de la ville ( <i>km</i> )	13,61	13,61
$(x_2 - x_1)$	Taille de la zone péri-urbaine ( <i>km</i> )	47,67	30,17
$N_u$	Nombre de ménages urbains	240 505	240 505
$N_p$	Nombre de ménages péri-urbains	254 527	66 944
$\Theta^*$	Part de l'agriculture dans la zone mixte (%)	0,88	0,73

TABLEAU 2.3 – Caractéristiques de nos deux villes de référence

Les principales caractéristiques des deux villes de référence sont résumées dans le tableau 2.2. La taille de la zone d'usage mixte du sol et le nombre de ménages péri-urbains sont plus importants dans le cas de l'extension urbaine. C'est dû au fait que les préférences pour les aménités ( $\gamma$ ) sont maintenues égales dans les deux cas. Une augmentation de la capacité de l'agriculture à fournir des aménités encourage fortement les ménages à venir s'installer dans la zone péri-urbaine.

## 2.4 Effets de la politique agri-environnementale

Les exploitations agricoles qui sont proches de la ville sont plus intensives et les exploitants peuvent ne pas être intéressés par la réduction de leurs intrants non-terre à moins qu'ils ne reçoivent une compensation financière substantielle. Dès lors, une politique agri-environnementale peut être mise en place pour contractualiser les exploitations qui sont plutôt proches ou plutôt éloignées des limites de la ville. Cette décision dépend du niveau du paiement effectué aux agriculteurs ( $\sigma$ ) et des restrictions placées sur les intrants non-terre ( $\hat{k}$ ). Ainsi, les politiques agri-environnementales ont le potentiel d'être impliquées dans l'organisation spatiale aux abords des villes et elles peuvent jouer un rôle dans le développement des zones péri-urbaines.

### 2.4.1 Effets sur la structure urbaine

Cette section examine l'effet des PAE sur les structures urbaines à travers quelques variables clés : la localisation de la limite de la ville et la taille de la zone péri-urbaine.

**Limite de la ville ( $\bar{x}$ )** Les effets des PAE sur la taille de la ville sont illustrés dans les figures 2.3a et 2.3b pour les cas de l'extension urbaine et du mitage respectivement. Comme les ménages urbains ne valorisent<sup>19</sup> pas les aménités agricoles, leur fonction d'enchère urbaine n'est pas affectée par un changement de production des aménités. Cependant, les ménages urbains sont taxés pour financer le programme et une augmentation du niveau des aides entraîne une diminution de leur fonction d'enchère ( $\partial r_u^* / \partial \eta < 0$ ). En conséquence, comme la

19. Auxquelles ils n'accèdent pas.

taille de la zone régulée par la PAE augmente (i.e.  $\hat{k}$  faible et  $\sigma$  élevé), la localisation de la limite urbaine tend à se contracter vers le CBD, comme on l’observe dans les figures 2.3a et 2.3b pour approximativement  $\sigma > 100$  €/ha et  $\hat{k} < 5$  unités d’intrants non-terre.

En outre, les exploitants qui acceptent de participer à la PAE capitalisent l’aide dans leur fonction d’enchère de sorte que celle-ci augmente. Quand les exploitants qui participent sont localisés près de la ville (i.e.  $\hat{k}$  élevé et  $\sigma$  élevé), ils peuvent enchérir sur les ménages urbains. Ceci explique l’impact négatif de  $\sigma$  entre 200 et 300 €/ha, couplé avec  $\hat{k} > 20$  unités d’inputs non-terre.

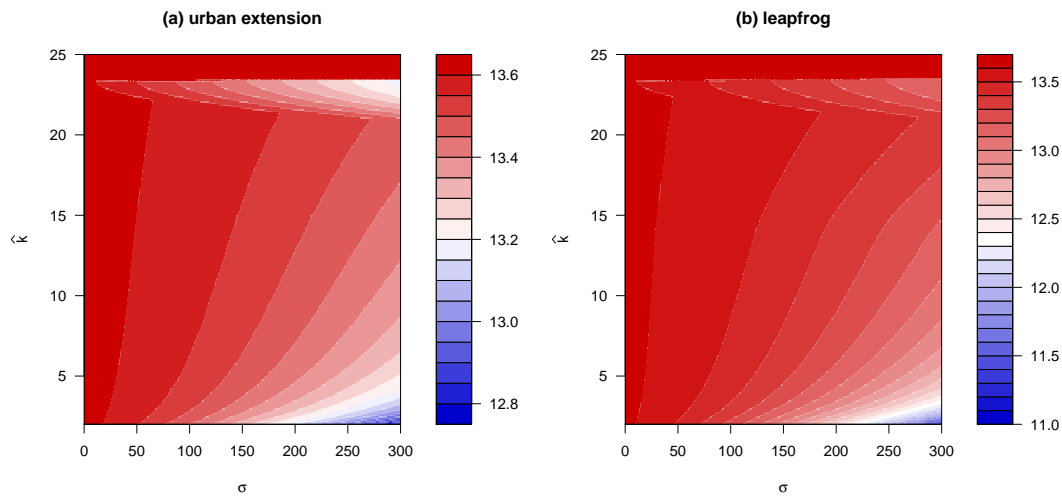


FIGURE 2.3 – Effet de la PAE  $\bar{x}$  en km

D’après cette simulation, on constate qu’une politique agri-environnementale ambitieuse, financée par tous les habitants, peut théoriquement réduire la taille de la ville. En pratique, cela peut freiner fortement le développement urbain dans nos deux scénarios de référence. Ce résultat dépend en partie de l’hypothèse d’une ville ouverte qui autorise des migrations sans coût depuis et vers la ville. Toutefois, ce résultat illustre bien la non-neutralité des politiques publiques en matière d’amélioration du cadre de vie par la fourniture d’un bien public comme des aménités agricoles.

**Taille de la zone péri-urbaine et forme de développement** L’effet de la PAE sur la zone péri-urbaine est plus complexe. Les Figures 2.4a et 2.4b montrent la variation de la taille de la zone péri-urbaine ( $x_2 - x_1$ ) en fonction de différentes combinaisons  $(\sigma, \hat{k})$ , pour chaque cas de référence. Nous considérons ces variations pour les cas de mitage et d’extension urbaine respectivement. Nous observons deux effets antagonistes suite à la mise en place de la PAE. Le premier effet est la réduction de la taille de la zone d’usage mixte du sol sous l’effet de la taxation des ménages péri-urbains pour financer la politique. La diminution de la rente péri-urbaine, combinée avec l’augmentation de la rente agricole suite à la capitalisation de l’aide peut amener les agriculteurs à enchérir sur les ménages péri-urbains. En conséquence,

la zone péri-urbaine tend à être plus petite. Toutefois, l'accroissement local des aménités agricoles incite les ménages péri-urbains à venir habiter l'endroit où le cadre de vie s'est amélioré ( $\partial r_p^*/\partial a > 0$ ). En fonction de la localisation et de l'étendue de la zone contractée par la PAE, l'impact négatif de la taxation requise pour financer la politique peut être contrecarré par l'amélioration des aménités fournies par les agriculteurs. Les agriculteurs localisés dans la zone d'option de la PAE peuvent alors être enchéris par les ménages péri-urbains, ce qui induit une augmentation de la taille de la zone péri-urbaine.

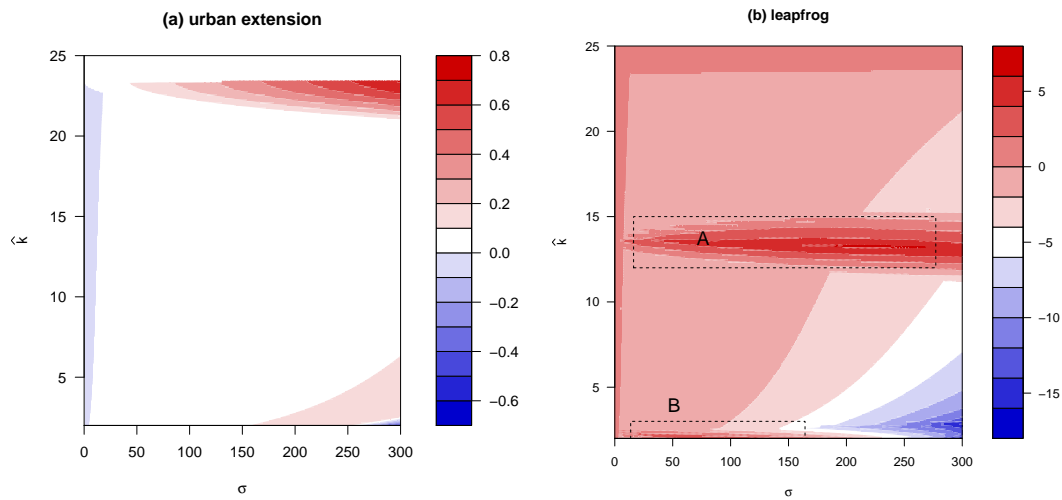


FIGURE 2.4 – Effet de la PAE sur  $(x_2 - x_1)$  en %

Dans le cas du mitage (Figure 2.4b), l'effet négatif de la taxe est clairement visible pour un niveau élevé d'aide ( $\sigma > 150$  €/ha) et des limites d'intrants non-terre de niveau intermédiaire ou bas ( $\hat{k} < 10$ ). Ces combinaisons  $(\sigma, \hat{k})$  assurent une large zone d'adoption et donc que la politique coûtera beaucoup ce qui engendre un besoin de financement élevé auprès des ménages et donc une taxe forfaitaire importante. L'effet négatif prévaut alors. Cependant, on observe deux zones distinctes, notées A et B sur la figure 2.4b, en  $\hat{k}$  entre 12 et 15 pour  $\sigma > 10$  €/ha, et en  $\hat{k} < 3$  pour  $\sigma$  entre 10 et 200 €/ha. Dans chaque cas A et B, la zone d'adoption de la PAE est à côté de la zone péri-urbaine, mais proche de la ville. Le niveau d'aménités avant la PAE était trop faible pour amener les ménages à venir dans ces zones. L'adoption de la PAE a permis d'accroître ces aménités suffisamment pour que les ménages enchérissent sur les agriculteurs pour ces terres ce qui élargit la taille de la zone péri-urbaine ou, dans les cas extrêmes, peut engendrer l'apparition d'une seconde zone péri-urbaine.

Les aménités supplémentaires compensent les ménages pour les coûts de transports additionnels de telle sorte qu'ils acceptent d'être localisés loin de la ville. Ces résultats illustrent un effet néfaste potentiel lié à l'introduction de la PAE. Celle-ci peut favoriser l'apparition de mitage et l'étalement urbaine.

Dans le cas de l'extension urbaine (Figure 2.4a), la variation de la taille de la zone péri-urbaine résultant des différentes combinaisons des paramètres de la PAE est plus limitée. Elle varie seulement de  $-0,6$  à  $0,8\%$  (quand la variation peut aller de  $-15$  à  $5\%$  dans la configuration de mitage). Cette différence est due à l'existence préalable d'une plus grande zone péri-urbaine. La contraction de la zone urbaine explique une majeure partie de l'effet positif car elle libère du foncier pour les ménages péri-urbains. Ceci arrive pour les combinaisons  $(\sigma, \hat{k})$  qui ont un effet négatif sur  $\bar{x}$ .

#### 2.4.2 Effets redistributifs de la politique

Dans cette section nous discutons de l'impact des différentes combinaisons des paramètres de la PAE sur la valeur du foncier. Nous définissons la valeur agrégée du foncier pour chaque agent de la façon suivante :

$$R_u = 2\pi \int_0^{\bar{x}} r_u^*(x) x dx ; R_a = 2\pi \int_{\bar{x}}^x \Theta^*(x) r_a^*(x) x dx ; R_p = 2\pi \int_{x_1}^{x_2} (1 - \Theta^*(x)) r_p^*(x) x dx \quad (2.20)$$

La valeur totale des terres est définie par  $R = R_u + R_a + R_p$ . Le tableau 2.4 montre l'impact de quatre combinaisons différentes des paramètres  $(\sigma, \hat{k})$  sur la valeur totale des terres dans la zone étudiée pour chacune de nos deux configuration spatiales de référence. Nous constatons que la PAE n'a aucun effet sur la valeur totale des terres  $R$ . La mise en place d'une PAE n'a pas d'effet significatif sur le niveau de bien être agrégé des agents en comparaison de la référence en l'absence de politique. Cela est dû à notre hypothèse de ville ouverte où le niveau d'équilibre de l'utilité est exogène et où les ménages peuvent migrer sans coût en dehors de la ville s'ils n'atteignent pas ce niveau d'utilité après la mise en place de la PAE. Remarquons également que notre mesure de la valeur totale des terres  $R$  implique seulement  $r_u$  et  $r_a$ , sans tenir compte de  $r_p$  pour la simple raison que  $r_p = r_a$  dans la zone péri-urbaine d'usage mixte du sol. Ainsi, la mesure de la valeur totale des terres est neutre par rapport à la proportion d'usage résidentiel du sol dans la zone péri-urbaine. Nous ne pouvons donc pas, dans le cadre de notre hypothèse de ville ouverte, discuter des effets sur le bien-être des agents, mais nous pouvons en revanche les discuter en termes d'impact sur la redistribution des rentes entre les agents.

La valeur de la terre dépend de son usage ( $R_u, R_p, R_a$ , ce qui implique que d'importants effets redistributifs peuvent être observés entre les usages du sol, dans le tableau 2.4). Nous remarquons que les propriétaires urbains sont systématiquement pénalisés par l'introduction de la PAE.  $R_u$  décroît dans chaque scénario ce qui est dû au fait que les ménages urbains financent une politique dont ils ne bénéficient pas, cela diminue leur fonction d'enchère.

Concernant le foncier péri-urbain, nous observons que l'impact de la PAE sur  $R_p$  peut être soit positif, soit négatif. Nous expliquons ce résultat par deux mécanismes antagonistes. D'un côté, les ménages péri-urbains sont taxés, ce qui a pour effet direct de diminuer leur fonction



Paramètre	Référence	Scénarios agri-environnementaux			
<i>Extension urbaine</i>					
$(\sigma, \widehat{k})$	(0,0)	(50, 5)	(50, 22)	(250, 5)	(250, 22)
$\eta$	-	2,80	0,94	68,00	10,39
$S_a^*$	-	277	93	578	202
$R_u$	4 441	4 427	4 437	4 086	4 312
$R_p$ pour $x \in [\widehat{x}, \widehat{x}']$	-	256	38	311	56
$R_p$ sinon	5 176	4 927	5 147	4 704	5 106
$R_a$ pour $x \in [\widehat{x}, \widehat{x}']$	-	364	526	755	1 176
$R_a$ sinon	16 547	16 190	16 016	16 299	15 510
$R$	26 164	26 162	26 164	26 155	26 161
$\Delta R_u$ en %	-	-0,31	-0,091	-3,52	-2,89
$\Delta R_p$ en %	-	0,14	0,17	-0,57	-0,26
$\Delta R_a$ en %	-	0,042	-0,028	1,12	0,84
$\Delta R$ en %	-	-0,006	-0,0007	-0,07	-0,01
<i>Mitige</i>					
$(\sigma, \widehat{k})$	(0,0)	(50, 5)	(50, 22)	(250, 5)	(250, 22)
$\eta$	0	6,05	1,63	69,45	17,96
$S_a^*$	-	370	100	780	212
$R_u$	,441	4,410	4 433	3 560	4 278
$R_p$ pour $x \in [\widehat{x}, \widehat{x}']$	-	134	0	85	0
$R_p$ sinon	1,414	1,284	1,409	904	1,358
$R_a$ pour $x \in [\widehat{x}, \widehat{x}']$	-	486	564	980	1,232
$R_a$ sinon	20 310	19 847	19 758	20 571	19 289
$R$	26 164	26 161	26 164	26 101	26 156
$\Delta R_u$ en %	-	-0,70	-0,17	-8,15	-3,67
$\Delta R_p$ en %	-	0,31	-0,36	-7,32	-3,93
$\Delta R_a$ en %	-	0,11	0,06	2,18	1,04
$\Delta R$ en %	-	-0,014	-0,002	-0,15	-0,029

Note :  $\sigma$  en €/ha,  $\eta$  et  $R$  en €, et  $S_a^*$  in  $km^2$

TABLEAU 2.4 – Effets de 4 scénarios de PAE sur les rentes foncières

d'enchère, à l'instar des ménages urbains. D'un autre côté, la PAE accroît les aménités agricoles et améliore leur cadre de vie ce qui a pour effet d'augmenter leur enchère foncière. Si des ménages péri-urbains sont localisés dans la zone régulée par la PAE  $[\hat{x}, \hat{x}']$ , ils peuvent augmenter leur fonction d'enchère ce qui bénéficie directement aux propriétaires de ces parcelles. Cependant, en ce qui concerne les terres localisées en dehors de la zone régulée, l'impact sur le prix des terres est négatif. Ainsi, l'effet global de la PAE sur  $R_p$  dépend du poids relatif de ces deux mécanismes.

Par exemple, nous observons que, dans le cas où la taxe est faible et où la zone régulée peut être urbanisée, l'impact global de la PAE sur les propriétaires terriens de la zone péri-urbaine est positif tandis qu'il est négatif si on considère une taxe élevée ou bien la zone régulée est très éloignée du CBD.

Finalement, nous soulignons le fait que l'impact de la PAE sur les propriétaires agricoles est globalement positif. Cela est dû au fait que les agriculteurs dans la zone régulée par la PAE bénéficient d'une aide. Évidemment, plus la zone régulée est importante, plus cet effet positif sur  $R_a$  est important. En outre, les agriculteurs non-bénéficiaires de la PAE bénéficient de son introduction parce que la taxe sur les ménages non-agricoles abaisse leur enchère foncière ce qui engendre une augmentation de l'usage agricole du sol. Toutefois, dans le cas de l'extension urbaine, pour  $\sigma = 50$  €/ha et  $\hat{k} = 22$ , l'impact sur  $R_a$  est négatif. Cette combinaison  $(\sigma, \hat{k})$  fait que la zone régulée par la PAE est située juste à proximité de l'aire urbaine. Du fait de l'amélioration du cadre de vie et de la très bonne accessibilité au CBD, cette zone devient très attractive pour les ménages et la part des terres agricoles décroît, ce qui explique l'effet négatif sur  $R_a$  malgré l'aide financière perçue par les agriculteurs.

## 2.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons identifié les effets spatiaux d'une politique agri-environnementale volontaire dans un contexte péri-urbain. La présence d'aménités naturelles est un facteur fort d'étalement urbain et nous nous sommes donc appuyés sur un modèle de ville monocentrique dans lequel les aménités et le cadre de vie sont modifiés par les agriculteurs dont le comportement est endogénéisé. L'introduction du comportement des agriculteurs dans un modèle de ville monocentrique est innovant et notre modèle permet de comprendre les interconnexions potentielles entre des aménités qui varient dans l'espace et les choix de localisation des ménages, particulièrement dans l'hypothèse où une politique publique est introduite pour encourager les agriculteurs à produire des aménités. Nos résultats théoriques sont cohérents avec les analyses empiriques qui ont été menées pour mettre en évidence ces interconnexions (Irwin & Bockstael, 2004; Roe *et al.*, 2004; Towe, 2010; Geniaux & Napoléone, 2011).

En fonction des caractéristiques de la politique agri-environnementale et de l'étendue de son adoption par les agriculteurs, nous identifions plusieurs effets potentiels de la PAE sur les formes du développement urbain. Augmenter la fiscalité sur les ménages, pour financer la poli-

tique agri-environnementale, engendre une diminution de leur fonction d'enchère, ce qui dans notre modèle, se traduit par une ville plus petite et une zone péri-urbaine réduite. Toutefois, en fonction de la localisation de la zone régulée, nous identifions également en effet indésirable de la politique lié à l'apparition d'une nouvelle zone de mitage. En effet, si la PAE est largement adoptée par les agriculteurs dans une zone facilement accessible aux ménages, alors le niveau des aménités produites par l'agriculture augmente et donne une incitation aux ménages à venir habiter dans cette zone, ce qui favorise l'urbanisation où elle est rendue possible par les politiques d'urbanisme. L'effet net des politiques agri-environnementales sur l'étalement urbain dépend alors de l'impact négatif de la taxe et de l'effet positif de l'augmentation des aménités.

Bien que le bien-être total ne varie pas du fait de l'hypothèse de ville ouverte, notre analyse des impacts de l'introduction de la PAE dans le modèle nous permet d'identifier plusieurs effets redistributifs, en termes de valeur du foncier, pour les propriétaires terriens. Les ménages urbains sont taxés pour financer la politique mais n'en bénéficient pas, ainsi la valeur des terres dans la zone urbaine tend à diminuer. Cette observation est également valable pour les ménages péri-urbains qui ne bénéficient pas de l'aménité car ils sont localisés en dehors de la zone d'adoption. En revanche, la politique agri-environnementale a des effets positifs pour les agriculteurs contractants qui bénéficient d'une aide et pour les ménages péri-urbains localisés dans la zone d'adoption de la PAE car ils bénéficient d'une amélioration de leur cadre de vie.

Ce travail illustre la non-neutralité des politiques agri-environnementales vis-à-vis de la concurrence pour l'usage du sol. Notre modèle montre que l'introduction d'une politique peut induire des effets redistributifs sur la propriété foncière, pénalisant les propriétaires résidents en faveur des agriculteurs et des propriétaires de résidences situées dans les zones régulées. On peut alors recommander que les politiques agricoles et les politiques d'urbanisme soient coordonnées au sein d'un territoire et tiennent compte de leurs interconnexions dans une approche plus holistique qui reflète ces interdépendances.

Notre modèle peut être amélioré de différentes façons, notamment au niveau des hypothèses sur la nature de la jointure de production entre la production agricole et le cadre de vie. Comme nous en avons discuté plus haut, les interactions entre les activités agricoles et les services environnementaux sont complexes, alors que dans notre approche nous avons simplifier celles-ci pour les limiter au cas où les activités agricoles et les services environnementaux sont en concurrence, comme c'est plutôt le cas aux États-Unis ou en Australie. Nous pourrions également améliorer le modèle en introduisant des externalités diffuses localement qui auraient un effet spatial au delà du point considéré. C'est typiquement le cas pour la préservation de la biodiversité, la pollution de l'eau ou l'érosion des sols dont les effets sont diffus, au moins localement. Des travaux ultérieurs pourront également considérer d'autres politiques en tenant compte de l'hétérogénéité spatiale de l'environnement. C'est particulièrement le cas des politiques agri-environnementales territoriales qui ont pour objectif de protéger une zone en particulier contenant des paysages remarquables ou des espèces menacées. Enfin, une

extension intéressante du modèle serait sa transposition à un cadre dynamique représentant explicitement les arbitrages inter-temporels en présence d'irréversibilité de la conversion du sol à un usage résidentiel.

Deuxième partie

Création des données

## Chapitre 3

# Mesure de l'étalement urbain par télédétection

### 3.1 Introduction

L'objectif est de cartographier l'étalement urbain à partir d'images de télédétection à trois dates représentant deux décennies sur quatre aires urbaines : Angers, Rennes, Lorient et Brest.

La nomenclature retenue comprend les surfaces artificialisées, agricoles, boisées et en eau des aires urbaines. La méthode mise en œuvre est une classification orientée objet qui s'inspire des travaux de Aguejda 2009. Elle comporte trois étapes :

1. Les prétraitements des images satellites
2. Le traitement ou classification des images
3. Les post-traitements nécessaires à l'obtention de la classification finale

Les logiciels qui ont été utilisés sont eCognition<sup>®</sup>, ENVI<sup>®</sup> et ArcGIS<sup>®</sup>.

Les images de télédétection qui ont été retenues proviennent du satellite SPOT pour les périodes 1990 et 2000 et du satellite RapidEye pour la période 2010. Les images SPOT ont une résolution spatiale de 20m × 20m, compatible avec l'étude de l'étalement urbain et ces images sont accessibles à des conditions intéressantes via le programme CNES-SpotImage ISIS.

Les images RapidEye sont mises à disposition gratuitement grâce au dispositif GEOSUD. Leur résolution spatiale est de 5m × 5m. Cette résolution a été modifiée pour atteindre 20m × 20m pour devenir identique à celle des images SPOT et obtenir ainsi une homogénéité dans les résultats pour chaque date.

Le tableau 3.1 résume les images satellites utilisées pour le programme PAYTAL.

Les images SPOT sont acquises avec un niveau de prétraitement 1B qui inclue une correction des distorsions dues aux écarts de sensibilité entre les détecteurs élémentaires de l'ins-

	Aire urbaine de Rennes	Aire urbaine d'Angers	Aire urbaine de Brest	Aire urbaine de Lorient	Total
Nombre de communes	190	133	52	29	
Période 1990	2 images Spot2 de 1991 et 1 image Spot2 de 1990	1 image Spot1 de 1989 et 1 image Spot2 de 1990	1 image Spot1 de 1989	2 images Spot1 de 1992	8
Période 2000	2 images Spot1 de 2000 et 2 images Spot2 de 2000	1 image Spot2 de 2000 et 1 image Spot4 de 2000	1 image Spot2 de 1999	2 images Spot2 de 2000	9
Période 2010	4 images RapidEye de 2010	4 images RapidEye de 2010	2 images RapidEye de 2010	2 images RapidEye de 2010	12
Total	11	8	4	6	29

TABLEAU 3.1 – Récapitulatif des images disponibles

trument de prise de vue et des effets systématiques (courbure et rotation de la Terre). Elles ne sont pas orthorectifiées. Les images RapidEye n'ont pas de prétraitement radiométrique et sont orthorectifiées.

Le tableau 3.2 synthétise les caractéristiques des images.

	Taille du pixel	Couverture	Bleu (nm)	Vert (nm)	Rouge (nm)	Red-edge (nm)	Proche Infrarouge (nm)
SPOT	20m × 20m	60km × 60km	-	500-590	610-680	-	780-890
RapidEye	5m × 5m	77km × 77km	440-510	520-590	630-685	690-730	760-850

TABLEAU 3.2 – Caractéristiques des images

Des prétraitements géométriques sont nécessaires sur les images SPOT et des prétraitements radiométriques sont nécessaires sur les deux types d'images pour restituer finalement la luminance des objets au sol. C'est l'objet de la première étape du traitement des images décrite dans la partie suivante. La figure (3.1) résume la méthodologie de traitement des images retenue.

## 3.2 Prétraitements des images (ENVI®)

### 3.2.1 Images SPOT

#### Corrections géométriques

Les seize images SPOT ont été géoréférencées et orthorectifiées en utilisant comme référence géographique les images RapidEye et comme référence altimétrique le Modèle Numérique de Terrain (MNT) issue de la BDalti 25m de l'IGN. Chaque image est ensuite rééchantillonnée

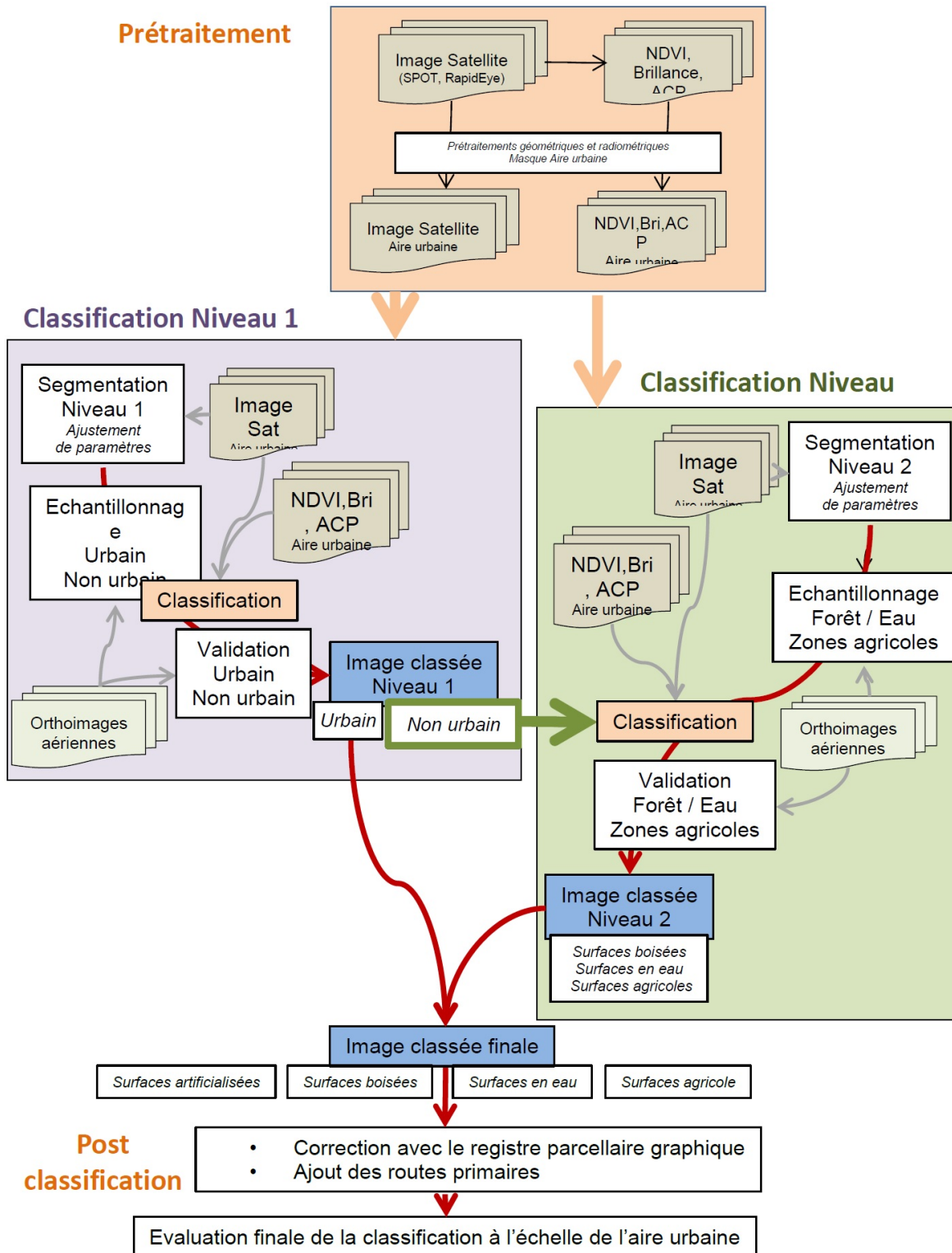


FIGURE 3.1 – Schéma général du traitement des images à l'échelle des aires urbaines



par la méthode du plus proche voisin, la seule à ne pas créer de nouvelles données contrairement aux méthodes bilinéaire ou cubique.

L'erreur est estimée avec le RMSE (Root Mean Square Error) : Il est calculé après l'orthorectification d'une image et indique la divergence entre les coordonnées de points connus (points d'amer) et les coordonnées calculées après transformation [5]. Le géoréférencement d'une image est accepté dès lors que le RMSE est inférieur à 1 pixel. Pour les quatre aires urbaines, le RMSE se situe entre 0,08 et 0,81 pixel, ce qui est satisfaisant.

### **Corrections radiométriques : conversion en luminance**

Les valeurs des comptes numériques des pixels de l'image initiale ont été transformées en luminance ( $W/m^2/sr$ ) par la relation (3.1)

$$L = \frac{\text{Compte numérique}}{\text{Coefficient d'étalonnage}} \quad (3.1)$$

Les valeurs en compte numérique sont comprises entre 0 et 255. Le coefficient d'étalonnage (ou gain d'étalonnage) est disponible dans les métadonnées des images et est propre à chaque bande spectrale. Les images SPOT n'ont pas été converties en réflectance car cette transformation n'est pas nécessaire pour effectuer les classifications et les comparer entre elles (Kergomard, 2000).

Enfin, pour chaque aire urbaine, les images ont été découpées selon le vecteur des contours de l'aire. Les images SPOT sont alors utilisables pour l'étape de classification.

### **3.2.2 Images RapidEye**

#### **Corrections radiométriques : conversion en luminance**

Les valeurs des pixels (compte numérique) ont été transformées en luminance avec la relation suivante :

$$L = \text{Compte numérique} \times F \times 257 \quad (3.2)$$

avec  $F = 0,01$  le facteur d'échelle.

Par similitude avec les images SPOT, seules les bandes Vert, Rouge et Proche infrarouge sont conservées sur les images RapidEye.

#### **Corrections géométrique : ajustement des résolutions spatiales**

L'ajustement de la résolution spatiale des images RapidEye (5m) à celle des images SPOT (20m) a été effectué par agrégation de 16 pixels RapidEye en retenant pour le pixel final la moyenne des valeurs initiales.

Comme pour les images SPOT, les images RapidEye ont finalement été découpées selon le vecteur des contours des aires urbaines (cf. Figure 3.2).

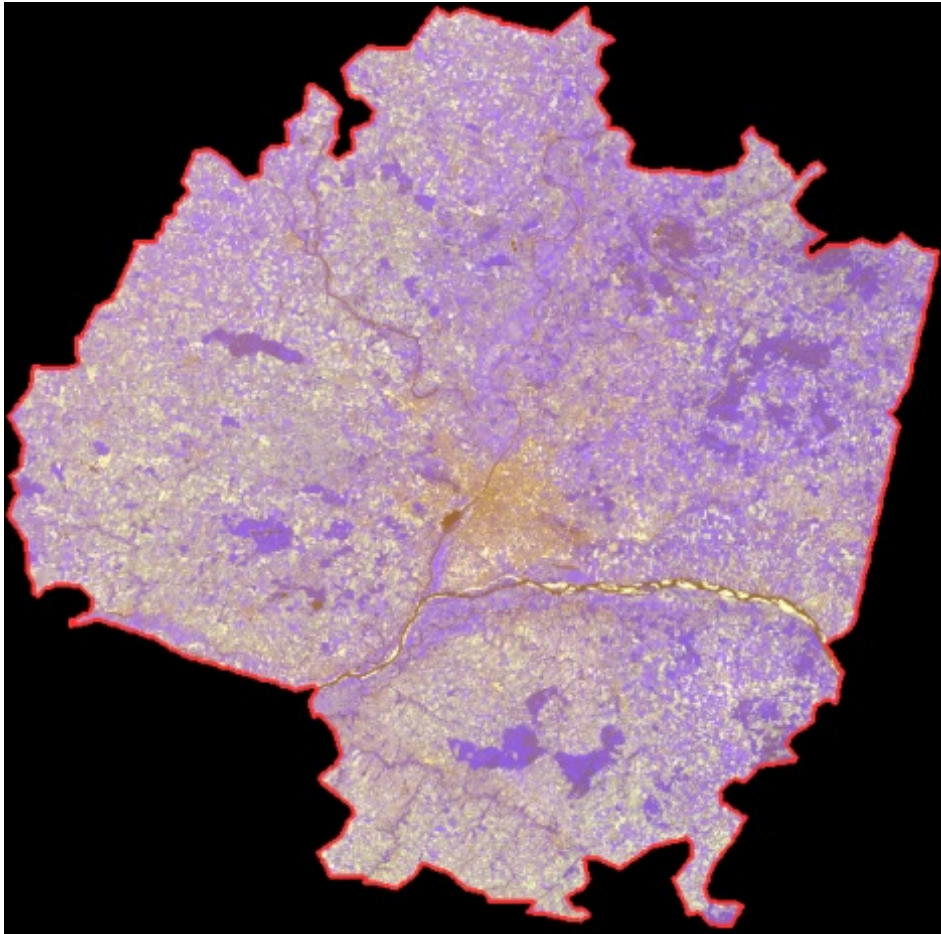


FIGURE 3.2 – Image RapidEye prétraitée et découpée aux contours de l’aire urbaine d’Angers

Les zones de recouvrement entre deux images ont été partitionnées en créant des lignes de coupure afin de n’obtenir qu’une seule valeur radiative à utiliser par date et par site.

### 3.2.3 Bandes nécessaires pour la classification

En plus des trois bandes de chaque image (V, R, PIR), des pseudo-bandes sont calculées à partir des valeurs de luminance de chacune des images du projet pour être intégrées à la classification :

- NDVI(Lum) (1 bande) (Normalized Difference Vegetation Index)

$$\text{NDVI(Lum)} = \frac{(\text{PIR} - R)}{(\text{PIR} + R)} \quad (3.3)$$

- Brillance(Lum) (1 bande)

$$\text{Brillance(Lum)} = \sqrt{\frac{R^2 + \text{PIR}^2}{2}} \quad (3.4)$$

- ACP (3 bandes) (Analyse en Composantes Principales)

La bande NDVI(Lum) reflète la présence de végétation dans un pixel et la bande Brillance(Lum) reflète la présence de surface minérale et son aspect sombre à clair.

Ces images sont réduites aux aires urbaines en utilisant des masques construits à partir des images SPOT ou RapidEye précédemment découpées aux contours des aires urbaines. Ces masques (images binaires) sont requis pour mettre en œuvre la méthode de classification orientée objet décrite dans la partie suivante.

### 3.3 Classification orientée objet (eCognition<sup>®</sup>)

La nomenclature retenue comprend quatre classes :

- surfaces artificialisées
- surfaces agricoles
- surfaces boisées
- surfaces en eau

La détermination de ces classes est effectuée en deux étapes : la première (classification de niveau 1) partitionne les images en deux classes, "urbain" et "non urbain" ; la seconde (classification de niveau 2) partitionne la classe "non urbain" en trois classes, les surfaces agricoles, boisées et en eau.

Les classifications de niveaux 1 et 2 sont conduites selon des schémas identiques (cf. Figure 3.1) : elles comportent une phase de segmentation, suivie d'une phase d'échantillonnage, de classification puis finalement d'une phase de validation.

#### 3.3.1 Segmentation

L'étape de segmentation consiste à partitionner l'image en polygones selon des critères prédéfinis : taille, couleur, texture, forme et compacité.

L'attribution d'une valeur à chacun de ces critères est effectuée par ajustements successifs en s'appuyant sur des valeurs initiales habituellement retenues pour segmenter les zones urbaines (Aguejdad, 2009) et en observant les résultats obtenus sur les images satellites et des

ortho-images aériennes acquises à une date proche.

Les valeurs retenues pour les deux niveaux de classification sont représentées dans le tableau 3.3.

	Classification	
	Niveau 1	Niveau 2
Taille	13	6
Couleur	0,8	0,9
Forme	0,2	0,1
Texture	0,3	0,8
Compacité	0,7	0,2

TABLEAU 3.3 – Paramètres des segmentations

L'étape de segmentation ne s'appuie que sur les bandes Vert (V), Rouge (R) et du proche infrarouge (PIR) des images SPOT et RapidEye. La taille minimale des polygones est fixée à 9 pixels, soit 0,36 ha. Une illustration des résultats de la segmentation est fournie en figure 3.3.

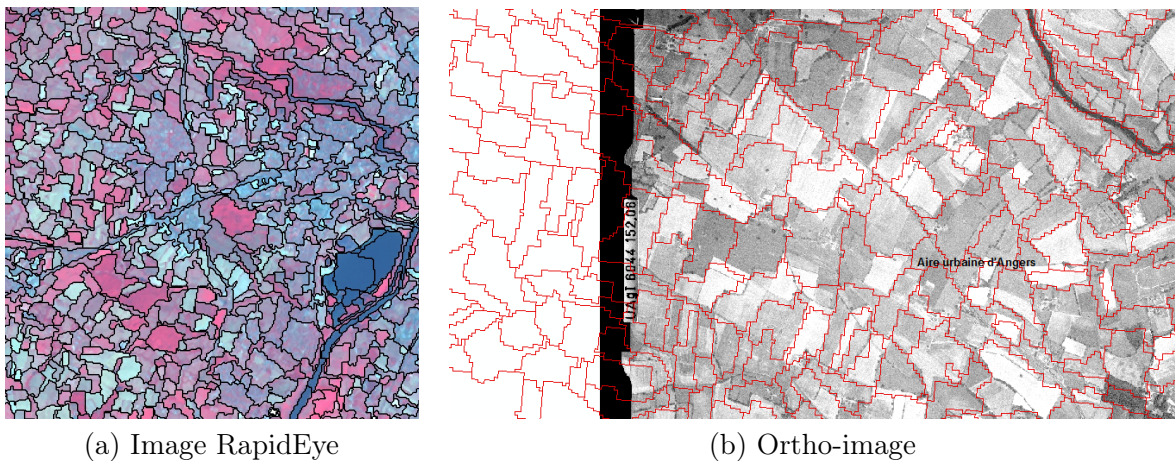


FIGURE 3.3 – Résultats de la segmentation de niveau 1 (a) sur une image RapidEye et (b) sur une ortho-image aérienne (Aire urbaine d'Angers)

La segmentation pour la classification de niveau 1 diffère de celle pour la classification de niveau 2 en liaison avec les valeurs différentes des paramètres retenus. La segmentation pour le niveau 2 aboutit à des polygones de plus petite taille que pour le niveau 1 mais qui restent inclus dans les polygones plus grands de niveaux 1 : les contours des polygones du niveau 1 (grands polygones) se retrouvent dans la segmentation de niveau 2 (figure 3.4).

### 3.3.2 Échantillonnage pour la calibration et la validation

Après l'étape de segmentation, les classifications de niveaux 1 et 2 consistent à affecter un nom de classe à chaque polygone. Il est nécessaire d'établir un ensemble d'apprentissage et un

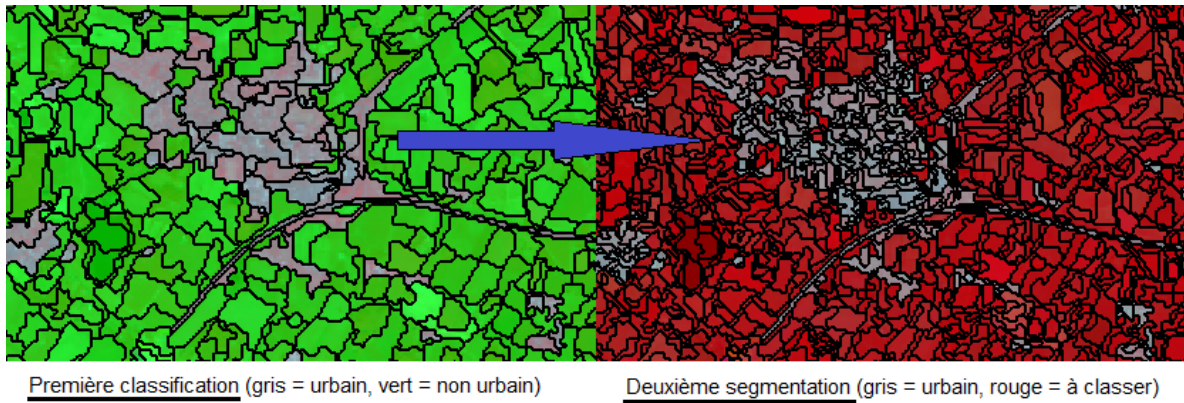


FIGURE 3.4 – Résultats des segmentations de niveau 1 et de niveau 2 (Aire urbaine d'Angers)

ensemble de validation à partir d'un échantillonnage de polygones.

Pour cela, au moins 700 polygones par image satellite sont sélectionnés de façon aléatoire et bien répartis sur l'image (Figure 3.5). À chacun de ces polygones est attribué un nom de classe à partir de l'observation du contenu de ces polygones sur une ortho-image aérienne.

Par exemple, pour la classification de niveau 1, chacun des 700 polygones est classé manuellement en urbain ou non urbain. Cet ensemble de polygones est ensuite divisé en échantillons pour l'apprentissage (2/3 des polygones) et pour la validation (1/3 des polygones). Cette étape d'échantillonnage pour l'apprentissage et la validation doit nécessairement être effectuée manuellement et elle est longue et fastidieuse à réaliser.

Pour la classification de niveau 1, l'apprentissage consiste à affecter la classe "urbain ou "non urbain" à l'ensemble de l'image restreinte aux aires urbaines. Pour la classification de niveau 2, il consiste à affecter l'une des classes "surfaces agricoles", "surfaces boisées" et "surface en eau" à l'ensemble de l'image également restreinte aux aires urbaines. Pour les aires urbaines côtières, Brest et Lorient, une classe supplémentaire, « Plages » a été définie.

### 3.3.3 Classification

A une période donnée et à l'exception de Brest en 1990 et 2000, une aire urbaine est recouverte par plusieurs images satellites. Les classifications sont alors réalisées par image puis fusionnées ultérieurement. Les classifications de niveau 1 et 2 s'appuient sur les images V,R, PIR et sur les cinq pseudo bandes : ACP1, ACP2, ACP3, NDVI(Lum) et Brillance(Lum).

A partir de ces 8 images initiales, de nouvelles valeurs sont calculées par polygone d'apprentissage :

- les rapports de bandes à bandes
- les valeurs de moyenne, écart-type, minimum et maximum
- le quantile 50



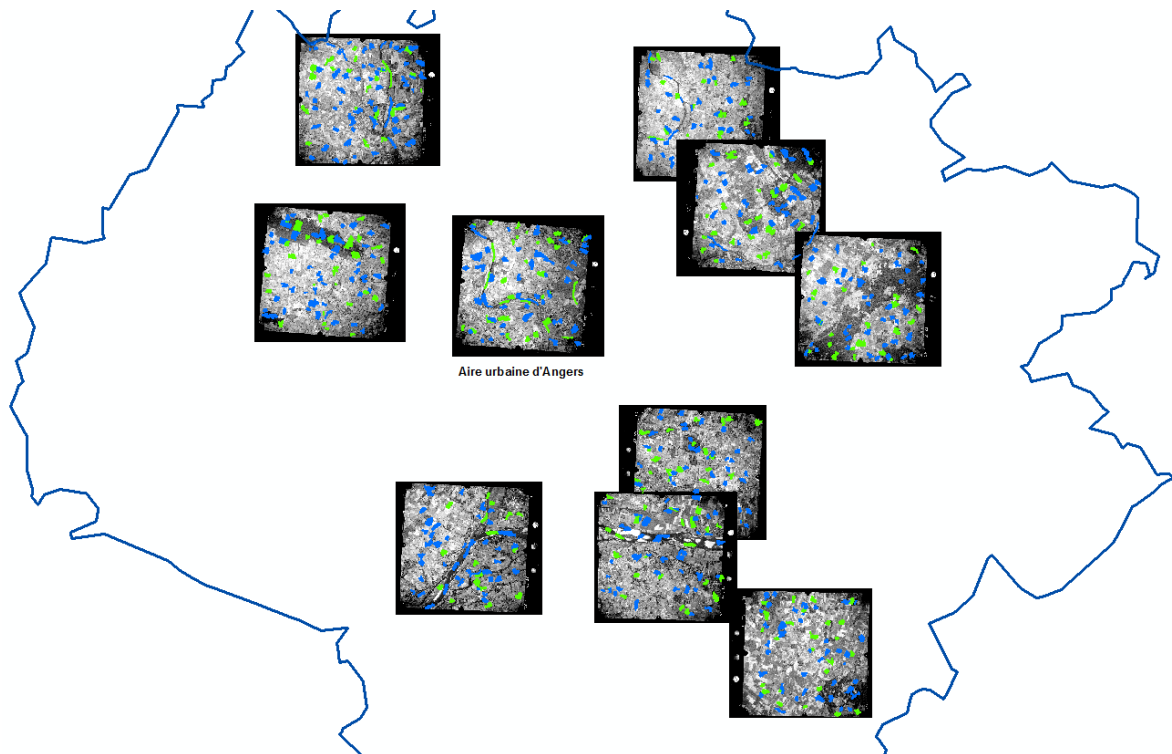


FIGURE 3.5 – Répartition des échantillons pour l'apprentissage (en bleu) et pour la validation (en vert) de la classification de niveau 1 sur fond d'ortho-images aériennes sur l'aire urbaine d'Angers pour la période 1990.

La classification est ensuite une optimisation qui consiste à trouver la meilleure combinaison des caractéristiques des polygones pour différencier au mieux deux classes représentées dans l'ensemble d'apprentissage. Cette combinaison optimale étant établie, elle est appliquée à l'ensemble des polygones de l'image ; une classe est affectée à chaque polygone par la méthode des plus proches voisins.

À l'issue de la classification, les classes affectées aux polygones de validation sont comparées à celles affectées manuellement. À cette étape, s'il reste des erreurs, les ensembles d'apprentissage et de validation peuvent être complétés si nécessaire pour améliorer les résultats. La précision de la classification est obtenue par la matrice de confusion et par le coefficient kappa qui en est déduit.

Pour la classification de niveau 2, la classification consiste à affecter l'une des classes "surfaces agricoles", "surfaces boisées" et "surface en eau" à l'ensemble de l'image restreinte d'une part aux aires urbaines et d'autre part aux polygones déjà classés comme "non urbain" par la classification de niveau 1.

La dernière étape de la classification consiste à assembler les images classées issues de chaque image satellite initiale. À chacune des jonctions entre deux images (Figure 3.6), la

continuité des classes obtenues sont observées. Sur l'ensemble des traitements effectués, les continuités très bonnes et peu de correction ont été nécessaires.

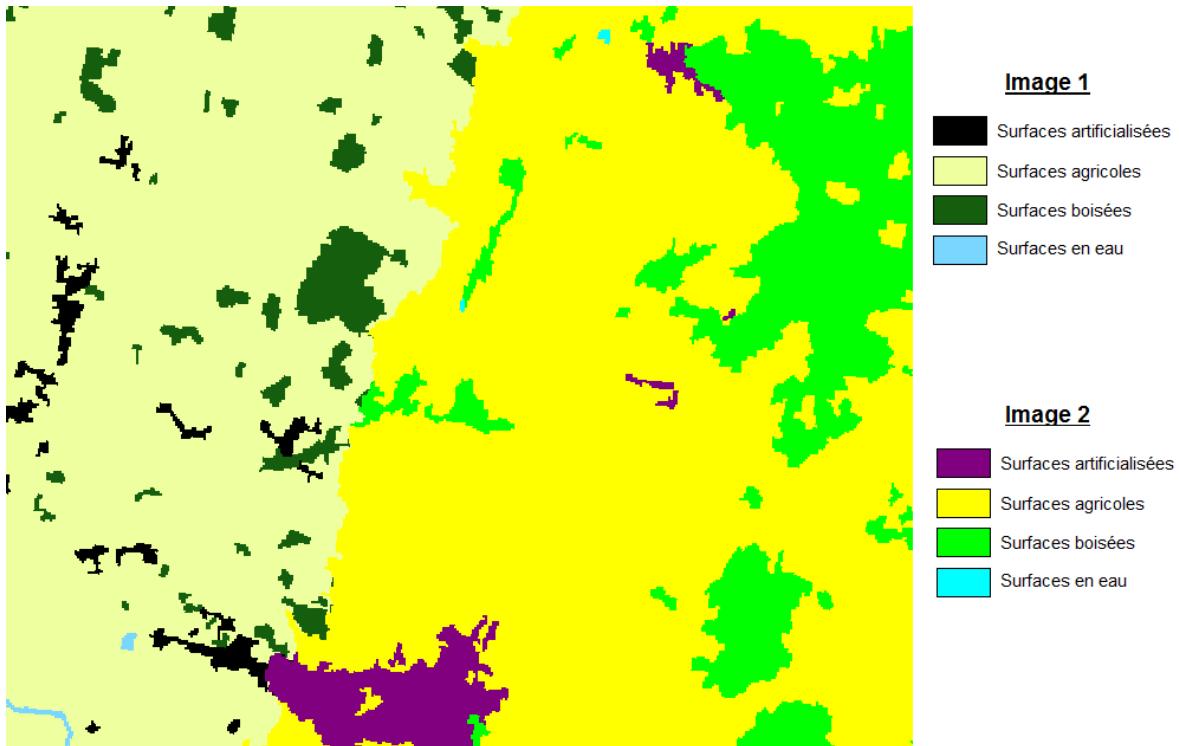


FIGURE 3.6 – Illustration de la jonction entre deux classifications

### 3.4 Post-traitements

Deux opérations de post-traitement ont été appliquées aux images classées de chacune des aires urbaines :

#### La correction de la classification avec le RPG (Registre parcellaire graphique)

Elle consiste à comparer les classes obtenues à l'issue de la classification aux polygones du RPG. Les pixels classés en surfaces artificialisées, surfaces boisées ou surfaces en eau qui sont contenus dans un polygone du RPG sont reclassés en surfaces agricoles. Cette correction est effectuée pour la période 2010, la seule année où les RPG est disponible, sur les quatre aires urbaines (cf. Figure 3.7a).

#### Ajout des routes primaires sur la classification (BD Topo IGN)

Les routes principales sont généralement classées en surfaces artificialisées par la méthode orientée objet mais quelques tronçons routiers sont classés différemment. Pour y remédier, la couche route primaire de la BD Topo © de l'IGN est utilisée : chaque pixel de l'image classée

qui contient un segment de la couche "Routes primaires" est affecté à la classe "surfaces artificialisées".

Seules les routes primaires de 2010 sont disponibles pour chaque aire urbaine (et non les routes primaires pour 1990 et 2000), celles-ci sont donc utilisées pour les trois périodes d'étude (cf. Figure 3.7a).

### Report de l'urbain sur les années suivantes

Les surfaces artificialisées de 1990 sont reportées sur la classification de 2000 et les surfaces artificialisées de 2000 sont reportées sur 2010. Ceci est important car d'une année à l'autre, la forme des objets peut être légèrement différente ce qui engendre une progression ou une diminution des surfaces artificialisées là où il n'y en a pas. De plus, après de nombreuses comparaisons entre les classifications de 1990 et 2010 sur Angers, il s'avère que seulement très peu de surfaces artificialisées disparaissent entre les deux périodes, l'impact de ce post traitement sur les analyses est jugé négligeable.

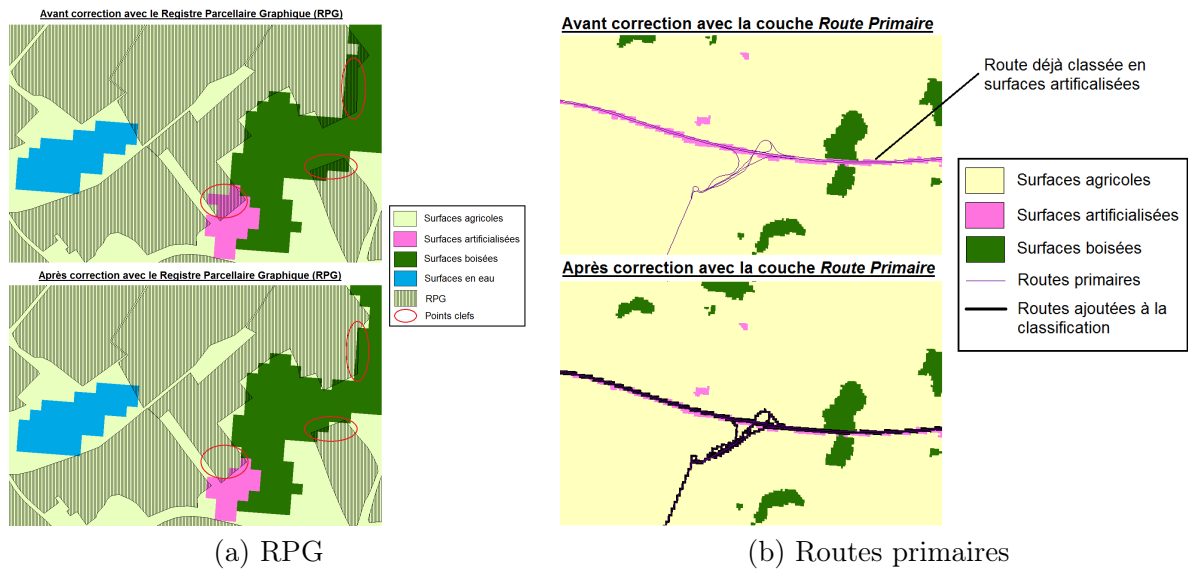


FIGURE 3.7 – Correction des images classées à l'aide du RPG (a) et du réseau des routes primaires (b)

### 3.5 Evaluation globale de la classification

L'évaluation globale de la classification est requise sous la forme de la précision globale (Overall accuracy) et du coefficient  $\kappa$ .



$$\text{Overall accuracy} = \frac{\text{Nombre d'objets correctement classés}}{\text{Nombre total d'objets}}$$

$$\kappa = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \times x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \times x_{+i})}$$

avec :

- $N$  = nombre total d'observations
- $r$  = nombre de lignes de la matrice de confusion (= nombre de classes)
- $x_{ii}$  = nombre d'observations dans la ligne  $i$  de la colonne  $i$
- $x_{i+}$  et  $x_{+i}$  = totaux marginaux de la ligne  $i$  et de la colonne  $i$  respectivement

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Aire urbaine	Période					
	1990		2000		2010	
Rennes	89%	( $\kappa=0,83$ )	91%	( $\kappa=0,85$ )	91%	( $\kappa=0,85$ )
Angers	94%	( $\kappa=0,90$ )	93%	( $\kappa=0,89$ )	95%	( $\kappa=0,92$ )
Lorient	95%	( $\kappa=0,93$ )	94%	( $\kappa=0,91$ )	95%	( $\kappa=0,92$ )
Brest	92%	( $\kappa=0,85$ )	91%	( $\kappa=0,87$ )	90%	( $\kappa=0,83$ )

TABLEAU 3.4 – Précision globale des classifications : Overall accuracy en % et coefficient kappa ( $\kappa$ )

Les résultats sont très satisfaisants : la précision globale est comprise entre 89% et 95% (Overall accuracy) et le coefficient kappa est compris entre 0,83 et 0,93. Les matrices de confusion sont représentées dans les tableaux ci-dessous.

		Urbain	Eau	Forêt	S. agricoles	Total
1990	Urbain	296	0	0	35	331
	Eau	0	125	10	1	136
	Forêt	0	2	249	62	313
	S. agricoles	22	0	46	842	910
	Total	318	127	305	940	1690
2000	Urbain	376	0	0	28	404
	Eau	0	103	5	0	108
	Forêt	0	1	305	71	377
	S. agricoles	28	0	46	1015	1089
	Total	404	104	356	1114	1978
2010	Urbain	355	0	0	35	390
	Eau	0	89	2	0	91
	Forêt	0	3	258	58	319
	S. agricoles	28	0	38	874	940
	Total	383	92	298	967	1740

TABLEAU 3.5 – Matrice de confusion pour Rennes

		Urbain	Eau	Forêt	S. agricoles	Total
1990	Urbain	65	0	0	8	73
	Eau	0	27	0	0	27
	Forêt	0	0	109	7	116
	S. agricoles	6	0	8	260	274
	Total	71	27	117	275	490
2000	Urbain	90	0	0	11	101
	Eau	1	35	0	0	36
	Forêt	0	0	135	12	147
	S. agricoles	7	0	11	275	293
	Total	98	35	146	298	577
2010	Urbain	84	0	0	9	93
	Eau	1	27	1	0	29
	Forêt	0	0	147	8	155
	S. agricoles	5	0	5	245	255
	Total	90	27	153	262	532

TABLEAU 3.6 – Matrice de confusion pour Angers

		Urbain	Eau	Forêt	S. agricoles	Plage	Total
1990	Urbain	52	0	0	2	0	54
	Eau	0	15	0	0	0	15
	Forêt	0	0	79	4	0	83
	S. agricoles	2	0	5	142	1	150
	Plage	1	0	0	0	15	16
	Total	55	15	84	148	16	318
2000	Urbain	68	0	0	2	1	71
	Eau	0	11	0	0	0	11
	Forêt	0	0	68	6	0	74
	S. agricoles	3	0	4	135	1	143
	Plage	2	0	0	0	15	17
	Total	73	11	72	143	17	316
2010	Urbain	96	0	0	3	0	99
	Eau	0	23	0	0	0	23
	Forêt	0	0	79	11	0	90
	S. agricoles	4	0	3	203	1	211
	Plage	1	0	0	0	19	20
	Total	101	23	82	217	20	443

TABLEAU 3.7 – Matrice de confusion pour Lorient

	Urbain	Eau	Forêt	S. agricoles	Plage	Total
Urbain	142	0	0	15	4	161
Eau	0	32	1	0	0	33
Forêt	0	0	77	28	0	105
S. agricoles	6	0	10	528	1	545
Plage	2	0	0	1	16	19
Total	150	32	88	572	21	863
Urbain	351	0	4	22	5	382
Eau	1	50	1	0	3	55
Forêt	0	0	222	22	0	244
S. agricoles	15	2	34	524	1	576
Plage	1	2	1	0	30	34
Total	368	54	262	568	39	1291
Urbain	260	0	0	22	5	287
Eau	0	37	0	0	0	37
Forêt	0	0	212	45	0	257
S. agricoles	13	2	45	689	1	750
Plage	0	2	0	0	13	15
Total	273	41	257	756	19	1346

TABLEAU 3.8 – Matrice de confusion pour Brest

### 3.6 Conclusion

La figure 3.8 représente en exemple de carte finale produite pour une aire urbaine (Angers) et une période (1990).

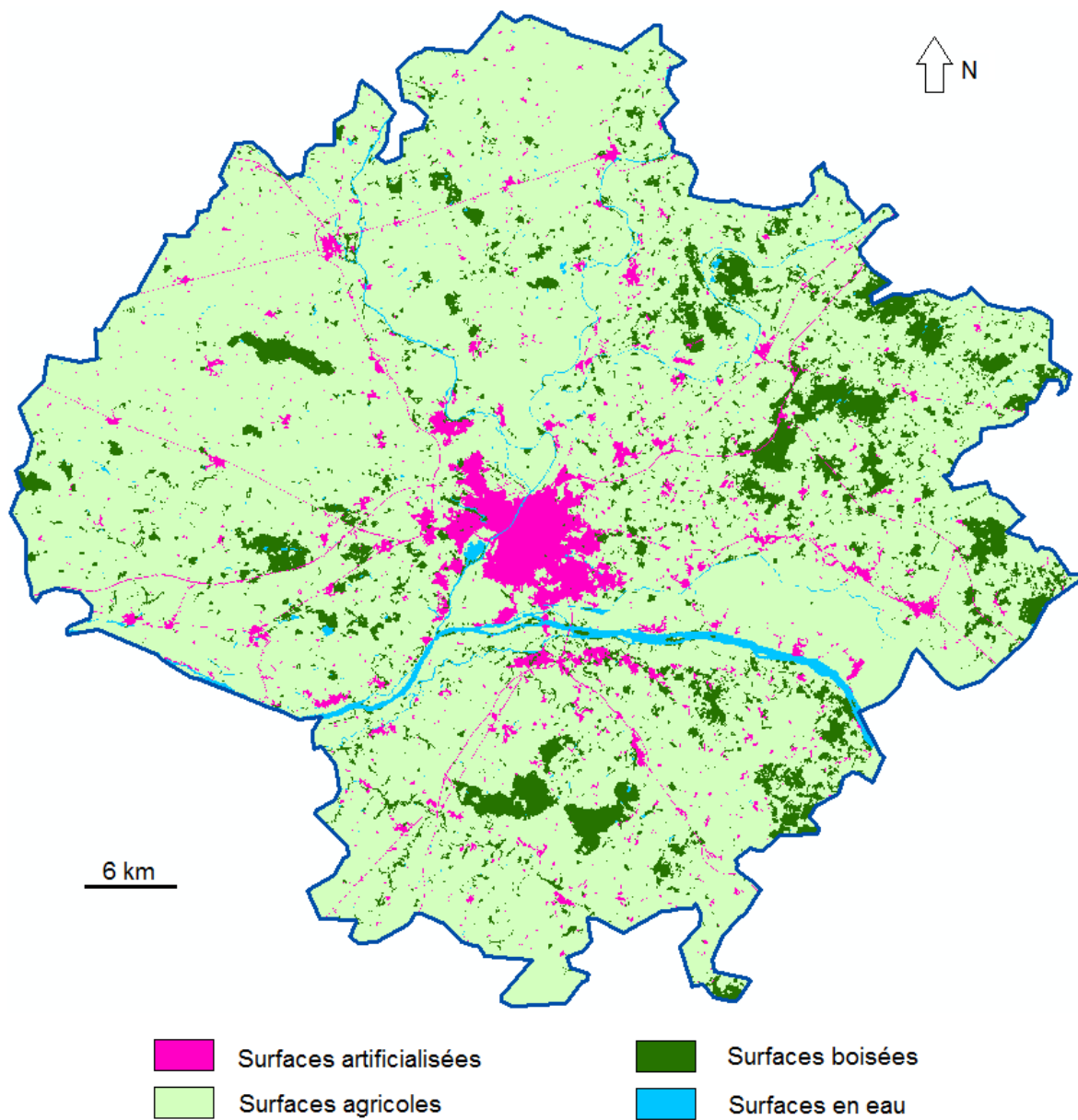


FIGURE 3.8 – Image classée finale (Angers, 1990)

## Chapitre 4

# Construction semi-automatique d'une ontologie de la perception des paysages

### 4.1 Contexte

Les politiques de planification (SCoT<sup>1</sup>, PLU, etc.) et de protection des espaces naturels (ZNIEFF, ZPPAUP, Natura 2000, etc.) visent entre autres à préserver les paysages qu'ils constituent. Dans ce contexte, les pouvoirs publics ont besoin d'outils d'aide à la planification territoriale capables de prendre en compte la dimension paysagère de leur territoire et, en premier lieu, d'être capable de qualifier les paysages.

Au delà de leur description physique, les aspects perceptifs sont indispensables à la connaissance et la compréhension des paysages. Les systèmes de classification classiques tels que LCCS<sup>2</sup> ne s'intéressent qu'à la description physique de l'espace. Il qualifient les paysages par les objets qui les composent et par l'agencement de ces objets. Mais, selon la Convention Européenne du Paysage, le paysage est défini comme « une partie de territoire telle que perçue par les populations, dont le caractère résulte de l'action de facteurs naturels et/ou humains et de leurs interrelations » (Conseil de l'Europe, n.d.). La perception par la population est au centre de cette définition du paysage et doit donc être prise en compte dans la caractérisation des paysages. « Les scientifiques admettent que la notion de paysage est autant une perception humaine et une représentation de l'espace qu'un espace matériel objectif » (Donadieu, 2009). Effectivement, dans la mesure où le paysage n'est pas seulement un objet physique mais aussi « le rapport sensible de l'Homme au milieu » (Luginbühl, 1994), la connaissance et la compréhension du paysage ne prennent sens qu'à travers la perception. « L'érection du paysage dépend alors conjointement des compétences des personnes à se rapporter de manière adéquate au monde environnant et de l'environnement en tant qu'il donne prise à cette composition visuelle de l'espace » (Trom, 2001). La perception permet le passage de la réalité

---

1. SCoT : Schéma de cohérence territoriale, PLU : Plan local d'urbanisme, ZNIEFF : Zone naturelle d'intérêt écologique, faunistique et floristique, ZPPAUP : Zone de protection du patrimoine architectural, urbain et paysager

2. Land Cover Classification System de l'Organisation des Nations Unies pour l'Agriculture et l'Alimentation

objective de l'espace à l'interprétation de celui-ci en tant que paysage : « the understanding of space is anchored in the experience of people's perception of space, and spatial cognition and behaviour. » Thomson & Béra (2007). « People's perceptions turn land into the concept of landscape » (Swanwick, 2002).

Cette forme d'information est disponible dans les Atlas des Paysages qui intègrent cet aspect dans leur construction, ainsi que dans d'autres documents paysagers et d'urbanisme. Actuellement, ces sources restent sous-exploitées, du fait de la diversité sémantique de description des paysages de leurs différents maîtres d'œuvre.

## 4.2 Objectif

Notre objectif est de fournir un outil pour l'interprétation fine et généralisable des paysages, axé sur le volet « perception par les populations », et de pouvoir le relier à l'étalement urbain. Il s'agit alors de proposer un outil d'annotation de cartes, pour rendre compte des paysages selon les éléments qui les composent, leur dynamique et leur perception. Pour ce faire, il convient de résoudre quatre problèmes liés :

- la constitution d'un corpus documentaire d'intérêt, regroupant Atlas des Paysages et documents d'urbanisme,
- l'extraction des informations pertinentes du corpus documentaire,
- la structuration de l'information qu'ils contiennent,
- l'intégration de l'information au reste des données spatialisées.

La solution proposée est de concevoir une ontologie du domaine, qui contribuera à une description objective de la perception des paysages et devrait permettre les comparaisons entre les paysages décrits et leur classification. Si d'autres approches recourent à des questionnaires (Lelay *et al.*, 2005), nous exploitons ici les "atlas du paysage" (Soufflet-Leclerc, 2007), documents standardisés au niveau national et contenant les informations recherchées. Le défi posé par ces documents réside dans la difficulté d'identification des termes spécifiques au champ lexical de la perception.

## 4.3 État de l'art

Les ontologies, définies comme des spécifications formelles explicites de termes d'un domaine et de relations entre elles (Gruber, 1993), ont « vocation à décrire le monde réel et à rendre les informations modélisées accessibles et partageables » (Cullot *et al.*, 2003).

Suivant les personnes, leurs besoins et le contexte, de nombreux points de vue sur un même sujet peuvent se chevaucher ou diverger. Il en résulte un manque de compréhension partagée qui peut être comblé en réduisant les confusions conceptuelles et terminologiques, afin de

construire un cadre unificateur au sein duquel sont fédérés les différents points de vue. L'ontologie, souvent considérée comme une conceptualisation, entraîne ou représente cette sorte de vision du monde pour un domaine donné (Uschold *et al.*, 1996).

Appliquée au paysage, l'ontologie pourrait donc constituer un « moyen de médiation sémantique » (Lepczyk *et al.*, 2008) répondant au problème de polysémie du concept de paysage : « Landscapes surround us, yet curiously it is hard to find people with the same concept of a landscape » (Forman & Godron, 1981). Plus particulièrement, l'utilisation d'ontologies permet de créer un réseau de relations et de mettre en évidence la nature des connections clés entre les éléments d'un domaine ou entre différents domaines (Uschold *et al.*, 1996). Or, le paysage a la particularité de ne pas être caractérisé par une seule catégorie d'éléments (physiques, naturels, historiques, ...) mais plutôt de représenter la totalité de ces éléments (Cataldo & Rinaldi, 2010). La connaissance du paysage doit donc prendre en compte ces différentes catégories, qu'il est possible de relier par des ontologies. La perception est l'un de ces éléments constitutifs du paysage, particulièrement concerné par la problématique des différences de point de vue. L'utilisation d'une ontologie peut fournir un modèle normatif qui intègre les différents points de vue, tout en cernant les principales caractéristiques de chacun, afin de donner une vue à la fois globale et locale du domaine de la perception du paysage.

Des ontologies ont été développées en géographie (Lepczyk *et al.*, 2008), traitant principalement d'occupation des sols et topographie (pour une liste, voir : (Minard, 2008)), mais seuls quelques travaux se sont intéressés aux ontologies du paysage. Les travaux de (Lepczyk *et al.*, 2008) exposent les concepts clés du paysage en écologie. (Cataldo & Rinaldi, 2010) se sont penchés sur le concept de « paysage culturel » qu'ils ont formalisé par une approche linguistique (définition des concepts et relations sémantiques), à partir d'un glossaire de termes issus de documents internationaux et officiels. Ces ontologies abordent des aspects consensuels de la notion de paysage, mais ne sont pas ancrées dans les territoires. Cet ancrage géoréférencé consiste généralement en classifications des différents types de paysages rencontrés. Tel est le cas, par exemple, pour la classification hiérarchique des paysages de République tchèque, proposée par (Chuman & Romportl, 2010), où chaque type de paysage est défini par une combinaison spécifique de variables, issues de données nationales facilement accessibles, décrivant des éléments physiques. Un travail similaire, réalisé en Belgique, présente une typologie des paysages prenant la forme d'un zonage des caractéristiques paysagères, basé essentiellement sur des éléments dits « naturels » (géologie, sol, morphologie...). Des informations complémentaires concernant les thèmes culturels et esthétiques peuvent être ajoutées à la base de données construite pour l'étude, mais elles ne sont pas directement utilisées pour distinguer les types de paysages et délimiter les unités paysagères (Van Eetvelde & Antrop, 2009).

Le constat commun aux différentes études citées précédemment, pour les ontologies comme pour les classifications, est l'absence de prise en compte de la dimension sensible du paysage, c'est-à-dire sa perception. La plupart des auteurs justifient ce manque par la rareté des données disponibles relatives à ce thème, leur qualité insuffisante (parfois reliée à la subjectivité

des informations), ainsi que leur couverture adaptée au niveau local mais peu adaptable à une évaluation du paysage à l'échelle du territoire (Van Eetvelde & Antrop, 2009) (Chuman & Romportl, 2010). Regardant la perception en tant que telle, les ontologies existantes sont rares. Elles relèvent plutôt de domaines proches, comme les émotions (Mathieu, 2005). Nous visons donc à proposer une ontologie de la perception des paysages, premier pas vers une qualification formalisée du domaine sensible du paysage.

Les approches actuelles de construction d'ontologies oscillent entre l'interrogation d'experts et le traitement informatisé de corpus textuels du domaine. Les méthodes automatisées sont basées sur des principes statistiques, linguistiques ou associent les deux (Bourigault & Aussenac-Gilles, 2003). Par exemple, Termostat (Drouin, 2003) compare corpus spécialisés et non-spécialisés en vue de l'identification des termes. De plus, certains outils implémentent une méthode globale, comme Terminae (Szulman *et al.*, 2002). IRAMUTEQ (Ratinaud, 2009), complété par les paquet [R] `tm` Feinerer *et al.* (2008), FactoMiner Lê *et al.* (2008) ou `topicmodels` Grün & Hornik (2011), ainsi que le logiciel Tropes (Molette, 2009) sont utilisés conjointement. La pertinence de cette combinaison est fondée sur les différences théoriques de ces deux approches :

- lexicométrie d'inspiration benzécriste pour IRAMUTEQ/ALCESTE et les différents paquets [R] utilisés, *i.e.* les thématiques émergent du texte,
- sémiométrie pour Tropes, *i.e.* les thématiques du texte sont confrontées à des univers posés a priori.

L'association de ces deux méthodes a montré son intérêt en sociologie (Jenny, 1996).

Méthodes et outils statistiques, linguistiques ou mixtes font l'hypothèse que les termes du domaine et leurs associations sont fréquents (idée de répétition d'ALCESTE (Reinert, 2003)). Or, même si le volet perception du paysage est présent dans les documents considérés, on peut supposer qu'il n'est pas le cœur du discours et risque d'être difficile à identifier, comme nous l'avons montré dans l'analyse de rapport d'activité d'une coopérative (Rousselière & Vézina, 2009). Il nous faut donc étudier plus précisément le corpus pour vérifier cette hypothèse et adapter la méthodologie mise en place.

## 4.4 Corpus documentaire

### 4.4.1 Documents contenant des informations de perception

Dans un premier temps, un inventaire des documents sources de vocabulaire sur la perception des paysages a été réalisé. Parmi les documents contenant des éléments quant à l'attachement des individus à des lieux emblématiques, nous avons identifié :

- documents d'urbanisme (SCOT, PLU, etc.), de protection des espaces naturels, etc. : le volet perception est intrinsèquement peu présent et comporte un biais vers le point



- vue des pouvoirs publics,
- documents touristiques : ils présentent un biais appréciatif, leur objectif étant d’attirer les visiteurs,
  - documents recensant des conflits d’usage (sites internet militants, actes judiciaires, etc.) : s’ils présentent des éléments intéressants quant à l’attachement des individus à des lieux emblématiques, ils sont biaisés du fait de l’implication émotionnelle des intervenants,
  - Atlas des Paysages : la perception des paysages est présente et objectivée par construction.

Pour réduire l’introduction d’un vocabulaire biaisé par un intérêt des rédacteurs, nous nous sommes limités aux Atlas des Paysages.

#### 4.4.2 Les Atlas des Paysages

Les Atlas des Paysages sont destinés « à dresser l’état des lieux des paysages et des dynamiques qui les transforment » (Luginbühl, 1994). Ils sont réalisés à l’échelle du département ou de la région, le plus souvent à l’initiative de la Direction Régionale de l’Environnement, et par une équipe généralement pluridisciplinaire. La Direction de l’Architecture et de l’Urbanisme a proposé en 1994 une méthode de rédaction, qui inclut une analyse de la dimension sensible, afin que ces Atlas constituent « un état de référence partagé » (Brunet-Vinck, 2004).

Cette méthodologie suggère notamment trois parties - la délimitation des unités paysagères, définissant ainsi l’échelle d’étude (Roche, 2007), les perceptions et les évolutions des paysages - permettant ainsi de traduire la définition que la Convention Européenne donne du paysage : « partie de territoire telle que perçue par les populations, dont le caractère résulte de l’action de facteurs naturels et/ou humains et de leurs interrelations » (Conseil de l’Europe, n.d.). Les Atlas doivent couvrir l’ensemble du territoire qu’ils concernent en traitant de tous les types de paysages, qu’ils soient remarquables ou ordinaires (?).

De plus, selon la méthodologie de 1994, la caractérisation des paysages « ne doit pas se contenter d’une description de l’utilisation du sol, mais tenter de restituer les caractères de l’ensemble de l’aspect du territoire et de ce que l’on en perçoit », notamment par le biais d’une analyse de la dimension sensible du paysage : « l’approche dite ‘sensible’ venant qualifier en termes d’effets visuels, sonores ou d’ambiances les composantes concrètes et tangibles de l’espace qui interviennent » (Luginbühl, 1994).

Les Atlas des Paysages peuvent finalement être considérés comme « un outil d’identification et de qualification des paysages [...] afin d’intégrer le paysage dans les politiques sectorielles » (Ambroise, 2010). Ils représentent donc une somme de connaissances sur les paysages, et plus particulièrement leur perception, s’intégrant dans le cadre de notre étude.

### 4.4.3 Pré-traitements des Atlas

Parmi les départements et régions français, nous avons pu constituer un corpus d'Atlas des Paysages exploitables par des outils informatiques constitué de :

- 34 Atlas départementaux,
- 6 Atlas régionaux.

Ceci correspond à la couverture de 51 départements, comme présenté sur la carte de la Figure 4.1.

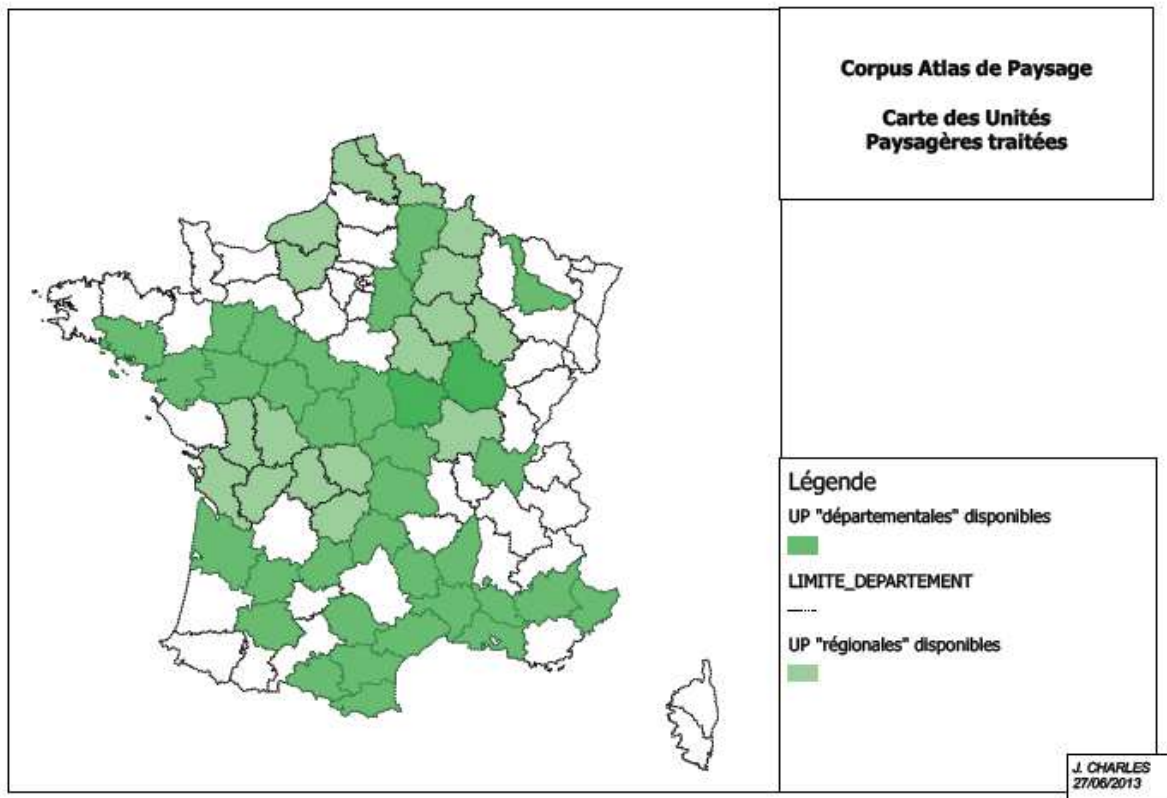


FIGURE 4.1 – Carte des unités paysagères (UP) qui ont pu être incluses dans le corpus.

Ces documents ont ensuite été pré-traités selon la méthodologie suivante :

- import sous forme de vecteur de textes dans [R]. Les Atlas des Paysages présentent un contenu iconographique important, avec de nombreux éléments de type cartes, schémas et photographies, comme nous pouvons le voir Figure 4.2, extraite de l'Atlas de Paysage du Maine et Loire. Cette première phase conduit donc à une perte d'information. Pour la limiter, les légendes de figure ont été conservées. Ces légendes, en particulier des photos, sont susceptibles de contenir du vocabulaire "perceptif" pertinent pour notre travail.
- premier nettoyage :

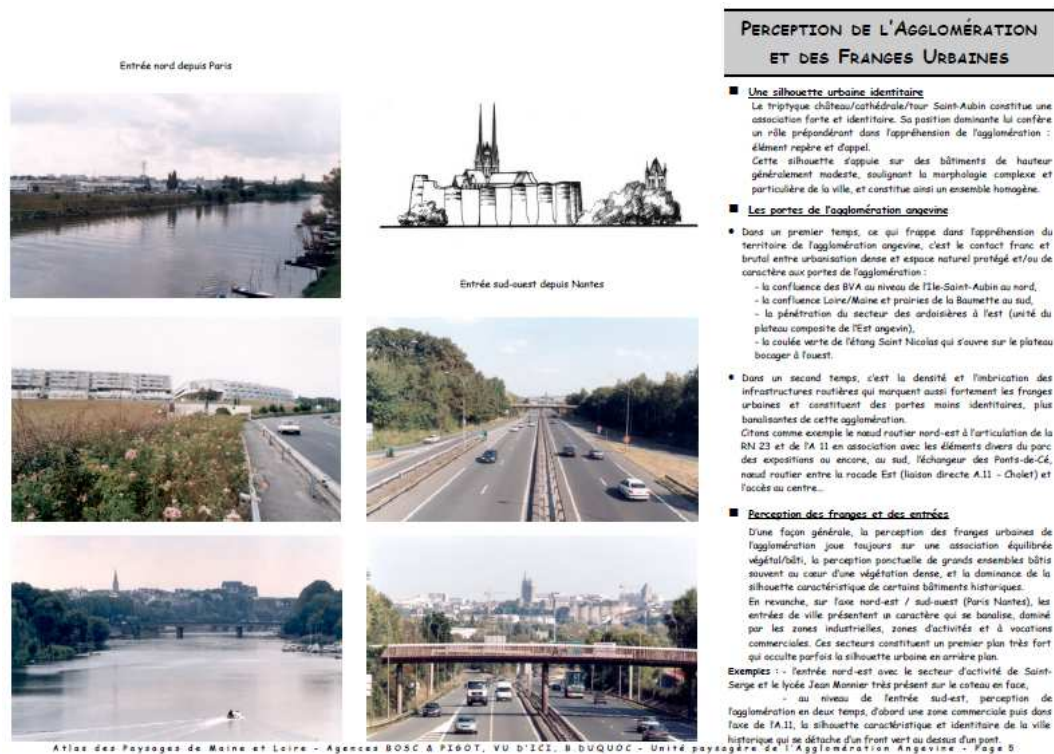


FIGURE 4.2 – Extrait de l'Atlas des Paysages du Maine et Loire

- suppression des erreurs liées à l'import (caractères mal lus, ponctuations, espaces vides, sauts de ligne, etc.),
  - passage du texte en minuscules,
  - suppression des mots-outils (stopwords) et termes parasites.
- découpage du texte de chaque Atlas en différentes parties correspondant d'un part aux textes généraux se rapportant à l'ensemble du territoire et d'autre part aux textes relatifs à chaque unité paysagère. Cette tâche est difficile du fait de l'hétérogénéité des Atlas et doit faire appel à un traitement manuel en complément de la reconnaissance d'expressions régulières. Le résultat est un vecteur de textes correspondant au découpage, individualisant la description de 625 unités paysagères,
  - nettoyage des textes : nous avons procédé à une lemmatisation, grâce à l'algorithme de stemming de Porter et à un dictionnaire personnalisé, puis supprimé chiffres et ponctuations sauf les tirets des mots composés,
  - transformation du corpus en matrice termes/documents, les documents étant les textes des unités paysagères que nous avons découpés. Notons que plusieurs stratégies ont été choisies selon les objectifs visés. Ainsi, nous avons utilisés plusieurs tailles de n-grammes ou encore plusieurs types de pondération pour réaliser ces matrices,
  - ajout de méta-données : à chaque texte sont associées des méta-données telles que l'année de réalisation, le nom de maître d'ouvrage, le nom du ou des maîtres d'œuvre ainsi



Proportionnelle du Discours (APD) et de l'Analyse Cognitivo-Discursive (ACD), développées par R. Ghiglione. Il s'inscrit dans le domaine du Traitement Automatique du Langage Naturel (TALN), discipline reliant linguistique, informatique et intelligence artificielle. Chaque texte (article, discours, ouvrage, etc.) est analysé de manière à faire apparaître l'ossature du texte, son sens. Pour cela, Tropes s'appuie sur un ensemble de modèles théorique, qui visent à mettre en retrait de l'analyse la subjectivité de l'utilisateur. L'étude des textes repose sur une analyse morphosyntaxique, un lexique et un réseau sémantique. Il permet d'évaluer, entre autres : les styles et mises en scène du texte, les propositions remarquables, le contexte global (« les univers de références »), les références utilisées, les relations entre éléments, les listes de verbes et adjectifs utilisées (ainsi que leurs occurrences), etc.

La méthode d'extraction terminologique de Tropes repose sur des taxonomies nommées scenarii. Ces scenarii sont conçus pour enrichir et filtrer les classes d'équivalents (les concepts et termes associés) en fonction d'une stratégie d'analyse. Une fois l'analyse effectuée, il est possible de générer un rapport complet du texte étudié. Le dictionnaire de référence, nommé « scénario standard », regroupe un lexique très large regroupant 28 catégories de base. Le logiciel permet ainsi l'analyse de n'importe quel type de discours à travers plus de 60 000 termes du vocabulaire francophone de base, organisés hiérarchiquement selon ces catégories.

Le corpus constitué des descriptions de l'ensemble des unités paysagères a été classifié selon les concepts définis dans le « scénario standard ».

Thème	Nombre de mots	Pourcentage de mots
Géographie	106525	18%
Caractéristiques	93441	16%
Agriculture et environnement	90880	15%
Autres concepts	86089	14%
Politique et société	38313	6%
Forces et quantités	23022	4%
Animaux et végétaux	19029	3%
Comportements et sentiments	18597	3%
Arts et culture	17285	3%
Transports, aéronautique et espace	17041	3%
Autres (<3%)	86559	15%
Total	596781	100%

TABLEAU 4.1 – Analyse Tropes avec le scénario standard - Thèmes principaux. Les « Autres concepts » correspondent à des concepts n'entrant dans aucune autre catégorie, les « Caractéristiques » correspondent à des termes définissant les propriétés d'autres concepts, la ligne « Autres » regroupe les thèmes peu fréquents.

La Table 4.1 présente la répartition des mots pour chaque catégorie de premier niveau représentant au moins 3% des mots. Ces premiers résultats font apparaître la prédominance des thèmes qui sont au cœur des Atlas des Paysages, tels que la géographie, l'agriculture et l'environnement, ainsi que leur caractérisation. Par contre, les éléments relevant de la perception sont rares : ils représentent une fraction des thèmes « Caractéristiques », « Comportements et sentiments » ou « Forces et quantités ».

Nous avons aussi cherché à évaluer la connexion entre les termes relevant de la perception. Pour ce faire, nous avons étudié les relations (co-occurrences) existant entre catégories de mots, en prenant comme point central quelques termes emblématiques du domaine de la perception des paysages. Ainsi, le concept de « Paysage » est impliqué dans près de 12000 relations. Mais ces relations n'impliquent des concepts de perception que pour une dizaine de pourcents en volume et seuls 5 autres concepts de perception sont concernés. Le concept de « vision » n'implique qu'environ 2000 relations ou celui d'« ambiance » uniquement quelques centaines, et la moitié des co-occurrences de termes ne concerne pas d'autres concepts de perception.

Ces analyses préliminaires nous ont permis de mettre en évidence la faible fréquence et le peu de connexion des termes de perception du paysage. Nous pouvons en déduire qu'un traitement automatique serait difficile, car les hypothèses sous-jacentes aux approches classiques ne sont pas vérifiées. Nous avons donc mis en place une approche semi-automatique que nous avons mise au point sur le territoire d'étude du Maine-et-Loire. Des Atlas de départements limitrophes partageant des territoires adjacents (Indre-et-Loire, Loire-Atlantique et Sarthe) et l'Atlas du Morbihan ont été ajoutés au corpus dans un but d'enrichissement de l'ontologie initiale. Puis nous avons étendu la méthode à l'ensemble du territoire couvert par des Atlas des Paysages.

## 4.5 Construction de l'ontologie

Dans cette section, nous présentons :

- la méthode de construction de l'ontologie de perception des paysages, développée à partir de l'Atlas du département de Maine-et-Loire en nous focalisant sur les parties relatives aux unités paysagères, ainsi que ses limites,
- l'amélioration de la méthode et sa généralisation à l'ensemble du corpus.

### 4.5.1 Construction de l'ontologie à partir de l'Atlas des Paysages du Maine-et-Loire

#### Méthode générale

La méthode de construction mise en place, inspirée de (Bourigault & Aussenac-Gilles, 2003), présente quatre étapes :

1. Identification des termes relatifs à la perception du paysage, elle-même décomposée en trois étapes :
  - Extraction automatique de termes,
  - Élagage de la liste des termes par le biais d'outils informatiques,
  - Raffinement de la liste des termes par la lecture et l'analyse manuelle des documents textuels.

2. Choix des critères de regroupement des termes,
3. Établissement des concepts et relations par une approche experte,
4. Enrichissement par étendue du corpus analysé.

Nous allons exposer par la suite ces différentes étapes.

### **Identification des termes pertinents**

En première intention, nous avons procédé à une extraction purement statistique des termes à l'aide d'IRAMUTEQ. Les faibles occurrences des termes d'intérêt nous ont conduit à ne pas réaliser d'élagage lié à la fréquence des termes. Par contre, nous avons procédé à une lemmatisation et à une mise de côté des mots outils, basées sur les données de la base Lexique3 (New *et al.*, 2001). Cette première extraction a conduit à une liste de 3687 termes. Parmi ceux-ci, comme vu précédemment, nous trouvons, d'une part, des termes relevant de thèmes sans rapport avec le paysage (économie, société, etc.) et, d'autre part, des termes associés au thème du paysage mais pas à sa perception (géographie, occupation des sols, etc.).

Nous avons ensuite éliminé automatiquement tous les termes de la taxonomie du scénario standard de Tropes éloignés du domaine de la perception ou présents dans les vocabulaires Eurovoc<sup>3</sup> et GEMET<sup>4</sup>. Nous avons alors obtenu une liste de 2721 termes.

Les termes non pertinents restants ont été éliminés manuellement. Une lecture parallèle de l'Atlas a permis d'identifier une cinquantaine de termes qui avaient été éliminés à tort et qui ont été réintégrés à la liste. Il s'agissait principalement de termes polysémiques ("charme", "franc", etc.) ou effectivement empruntés à d'autres domaines ("religieux", "sauvage", "violence", etc.), que ce soit à usage imagé ou non. Finalement, 384 termes du domaine de la perception des paysages, issus de l'Atlas des Paysages du Maine-et-Loire, ont été listés.

### **Choix de critères de regroupement**

L'ensemble des termes ainsi sélectionnés a été catégorisé manuellement en différents groupes au sein desquels les mots présentaient des rapports de synonymie, d'antonymie, de méronymie, d'hypo- ou d'hyponymie. De cette façon ont émergés les concepts propices à l'élaboration d'une première version de l'ontologie, chacun étant désigné par un terme présent dans un groupe et englobant les autres termes de la même thématique (ces derniers étant triés en noms, adjectifs, verbes et adverbes). Ces groupes de termes ont ensuite été reliés entre eux par des relations sémantiques telles que « a », « est un composant de », « dépend de », « entraîne ».

---

3. Thésaurus multilingue de l'Union Européenne, <http://eurovoc.europa.eu/>

4. GEneral Multilingual Environmental Thesaurus, thésaurus dans le domaine environnemental développé par l'Agence Européenne pour l'Environnement. <http://www.eionet.europa.eu/gemet>

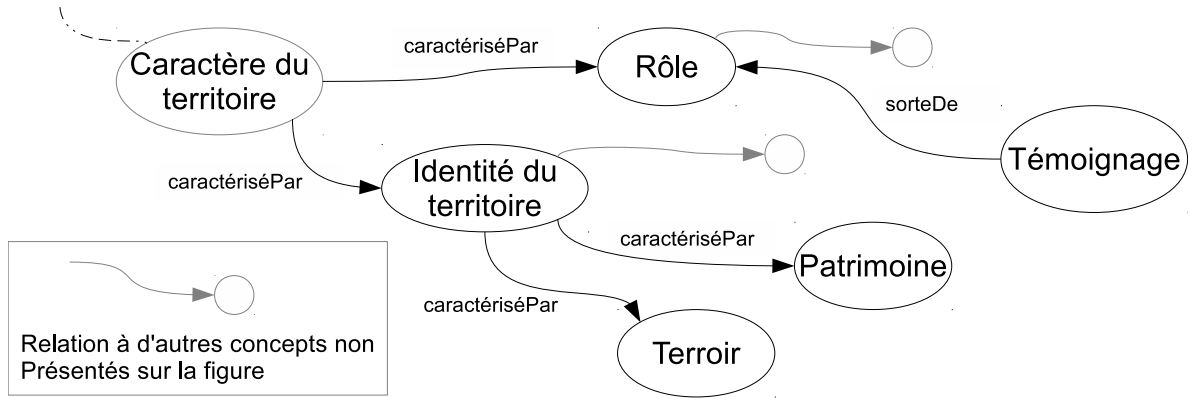


FIGURE 4.4 – Représentation d'une partie du concept "Caractère"

## Établissement des concepts et de leurs relations

**Regroupements de termes et établissement des concepts** L'analyse des termes, suivant leurs ressemblances thématiques et/ou terminologiques, a abouti à la répartition de l'ensemble des mots dans 7 groupes différents, comprenant chacun des noms, des adjectifs, des verbes et parfois des adverbes.

Prenons l'exemple du groupe de termes réunis autour du thème général du caractère d'un paysage :

- Adjectifs : spécifique, typique, particulier, local, identitaire,
- Noms : caractère, témoin, trace, caractéristique, témoignage, vocation, rôle, identité, visage, terroir, faciès, patrimoine, profil,
- Verbes : spécialiser, caractériser, identifier, réputer.

Les groupes de synonymes suivants ont été identifiés par un expert du paysage :

1. "caractère" et "caractéristique"
2. "rôle" et "vocation"
3. "témoin", "trace" et "témoignage"
4. "identité", "visage", "faciès" et "profil"
5. "spécifique", "typique", "particulier"

Les termes du groupe 1 peuvent être reliés aux adjectifs du groupe 5 ainsi qu'aux verbes "caractériser" et "spécialiser". De même, le groupe 4 est relié aux termes "identitaire", "local", "identifier" et "réputer". Des relations de type hiérarchique sont ensuite identifiées : 'caractère' est le terme le plus général, tandis que l' "identité" et le "rôle" sont des types de caractéristiques. De plus, "témoignage" est une sorte de rôle ; "terroir" et "patrimoine" sont deux types d' "identité" et ainsi de suite. De cette façon émergent les concepts présentés dans la Figure 4.4.



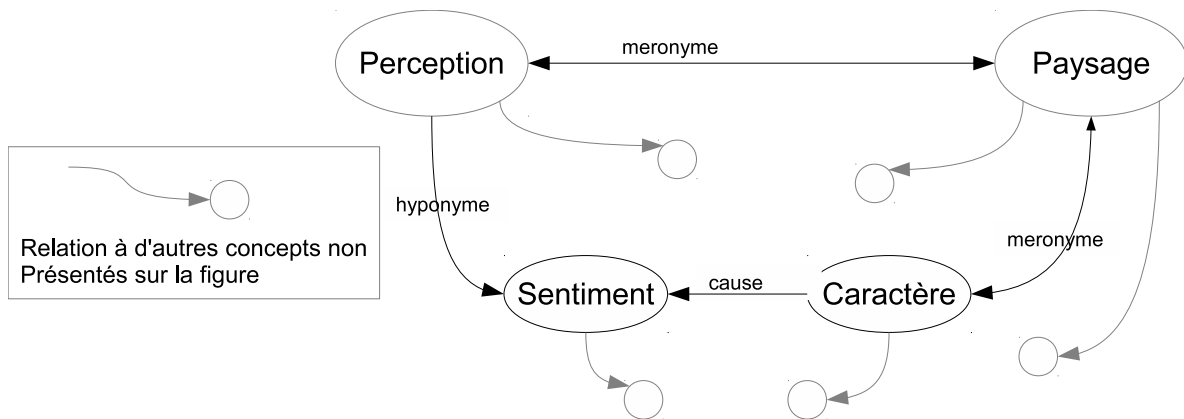


FIGURE 4.5 – Place du concept 'Caractère' au sein de l'ontologie

**Relations entre concepts** Poursuivons avec l'exemple précédent : le "caractère" est une composante du paysage, à l'origine des sentiments ressentis lorsque le paysage est perçu. Le concept de "caractère" est donc relié aux autres comme présenté Figure 4.5.

Finalement, la première version de l'ontologie, basée sur l'Atlas de Maine-et-Loire, comporte 77 concepts au total, reliés par des relations d'hyponymie (Y est une sorte de X), de méronymie (Y est une partie de X), d'antonymie (Y est le contraire de X) ou de causalité (X entraîne Y).

### Enrichissement de l'ontologie

Nous avons ensuite cherché à compléter cette ontologie en élargissant l'analyse textuelle aux Atlas des départements limitrophes. Les unités paysagères décrites dans l'Atlas de Maine-et-Loire ne s'arrêtent pas aux limites du département, mais se prolongent dans les départements limitrophes. Parmi ceux-ci, les départements d'Indre-et-Loire, de Loire-Atlantique et de la Sarthe sont les seuls possédant un Atlas des Paysages disponible.

Les parties relatives aux unités paysagères directement reliées à celles du Maine-et-Loire ont été utilisées pour enrichir la première version de l'ontologie. L'extraction des termes, selon la même méthodologie, a permis l'établissement d'une liste de 316 termes déjà identifiés et de 247 termes pertinents supplémentaires. Ces derniers ont pu être facilement intégrés au sein des concepts existants, venant les enrichir sans en changer l'agencement. Par exemple, le concept "caractère" s'est vu compléter par trois synonymes : "typicité", "particularité", "apanage" ; ainsi que deux adjectifs associés : "typé" et "caractéristique".

Un travail identique a été effectué sur la base de l'Atlas du Morbihan, qui a permis de retrouver 296 termes déjà rencontrés et d'identifier 1120 termes supplémentaires. Les nouveaux termes ont d'abord enrichis le contenu des concepts existants. Mais certains termes supplémentaires ont entraîné l'émergence de nouveaux concepts, majoritairement plus généraux que

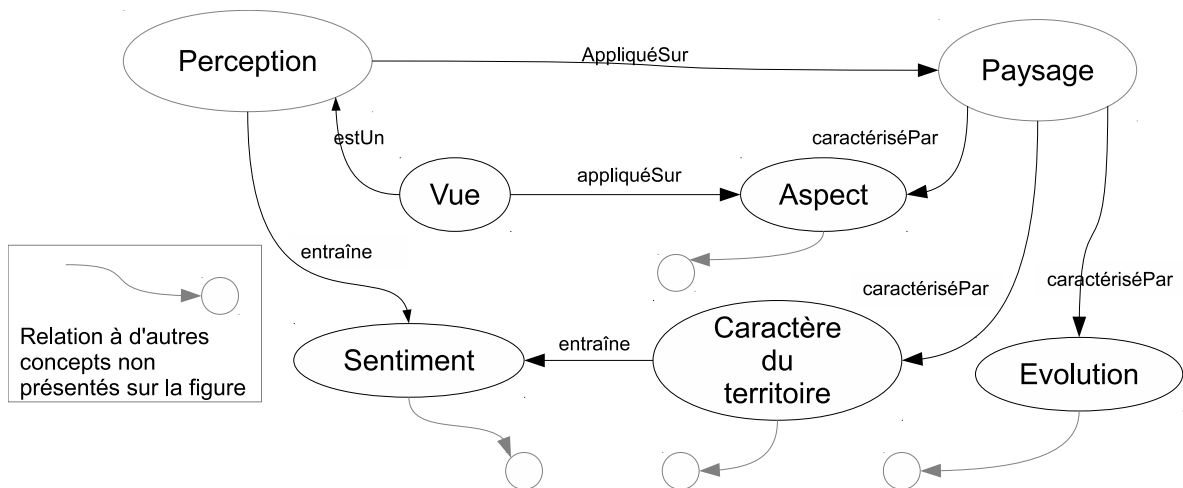


FIGURE 4.6 – Partie supérieure de l'ontologie de perception du paysage

ceux précédemment établis.

### L'ontologie "perception du paysage"

L'ontologie finale compte 144 concepts et la partie la plus en amont présente la structure illustrée par la Figure 4.6.

La "perception" du "paysage" est ici définie comme le fait de voir ("vue") les différents "aspects" du paysage, mais aussi d'en ressentir ("sentiment") les caractéristiques ("caractère"). De plus, le paysage évolue dans le temps ("évolution"), subissant des "événements" ou des "transformations" qui le modifient et changent la perception qui en est faite. Plus précisément, le concept "aspect" du paysage englobe la "texture", la "lumière", la "couleur" telles qu'elles sont perçues et décrites, ainsi que l'évocation du niveau de "visibilité" ou d' "occlusion" du paysage, et enfin sa "composition". Cette dernière comprend un large vocabulaire relatif aux "formes" et à la "variété" des constituants du paysage, ainsi que des termes décrivant leur "organisation" (répartition, structure) et leur "échelle" (profondeur, ouverture). Le "caractère" du paysage est décliné en différents types de "qualités" qui lui sont attribuées, en diverses "ambiances" qu'il dégage. Il décrit également les "rôles" que le paysage peut revêtir (représentation, expression, capacité d'influence, d'attractivité) et le vocabulaire employé autour de l'aspect identitaire du paysage (singularité, renommée, temporalité).

### Application à l'annotation des unités paysagères du Maine-et-Loire

Une application possible de l'ontologie est l'annotation de cartes des unités paysagères. Il s'agit de rechercher les termes de l'ontologie dans les paragraphes descriptifs de chaque unité pour y associer les concepts pertinents. Cette méthode a été appliquée manuellement sur les paragraphes « Mots clefs – Ambiances » de chaque unité paysagère de l'Atlas du Maine-et-Loire. Le résultat est présenté sur la carte Figure 4.7.

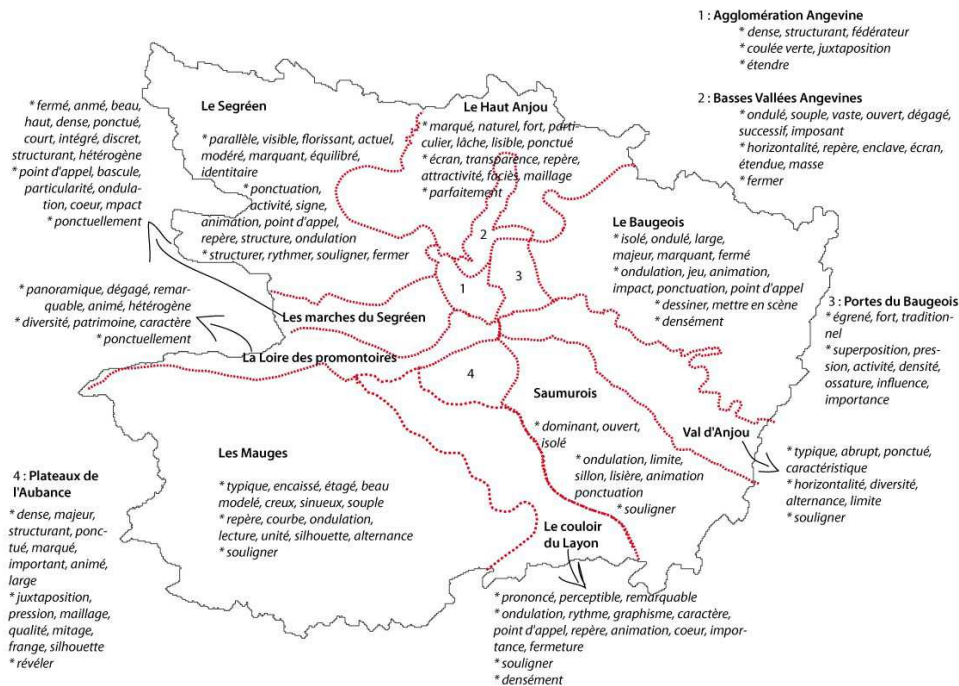


FIGURE 4.7 – Carte des unités paysagères du Maine-et-Loire annotée avec les concepts de l'ontologie

Cette carte fait apparaître des annotations différentes selon l'unité paysagère considérée, ce qui suggère des différences de perception du paysage selon les territoires.

### Limites de la méthode

La méthode présentée nous a permis de :

- construire une première ontologie de la perception des paysages à partir d'Atlas des Paysages,
- valider l'intérêt de cet outil pour caractériser les unités paysagères.

Nous sommes parvenus à pallier la faible fréquence et le peu de connexions des termes pertinents dans le corpus utilisé par une approche semi-automatique impliquant un regard expert et en limitant l'espace d'étude. Mais cette rareté des termes des éléments de perception du paysage et la limitation de l'espace d'étude ne sont pas sans conséquences.

Tout d'abord, les extractions automatiques réalisées présentent des performances limitées : la précision de la méthode est de 12,1% et le rappel de 85,9%. Ceci nous a conduit à mettre

en place une importante phase manuelle, ce qui réduit les possibilités de passage à l'échelle. Pour y remédier, nous avons envisagé d'améliorer l'automatisation, d'une part en complétant l'élagage avec d'autres vocabulaires, d'autre part en prenant en compte les aspects morpho-syntaxiques en conjonction avec l'ontologie existante.

De plus, partir du vocabulaire présent dans un nombre limité d'Atlas, sans définition préalable d'un squelette général, conduit à la mise en place d'une structure d'ontologie présentant une vue tronquée du domaine. Pour y remédier, nous nous sommes proposé de construire tout d'abord ce squelette général de l'ontologie par une approche experte, puis de l'enrichir à l'aide du vocabulaire extrait des Atlas des Paysages.

Enfin, nous pouvons soupçonner un biais de subjectivité introduit par l'auteur de l'Atlas des Paysages, malgré les recommandations énoncées pour sa réalisation. C'est en effet un document chargé de médiatiser la/les perception(s) d'un territoire. Cette médiatisation est nécessairement une interprétation - ce qu'encourage l'approche sensible du paysage - et à ce titre susceptible de « dérives interprétatives » (Lahire, 2007). L'approche collective d'un diagnostic partagé peut répondre en partie à ces problèmes (Davodeau, 2009) mais ceci au risque de renforcer l'indexicalité du texte (Garfinkel, 1967), les mots utilisés étant alors propres à la communauté ayant rédigé le document. Nous nous sommes donc proposé de travailler sur l'ensemble des Atlas des Paysages afin de savoir si la nature de l'auteur est susceptible d'influencer le type de vocabulaire utilisé et le cas échéant pour identifier la nature et l'ampleur du biais spécifique à l'Atlas des Paysages.

Des tests de subjectivité sont effectués dans le chapitre 6. Le reste de ces éléments font l'objet de la suite de cette partie.

## **4.5.2 Raffinement de la méthode de construction de l'ontologie**

### **Amélioration de la méthode générale**

Les raffinements proposés à la méthode de construction précédente consistent en :

- Ajout de la mise en place d'un squelette d'ontologie par une approche experte,
- Automatisation plus poussée de l'identification des termes relatifs à la perception du paysage et des relations existant entre eux en combinant différentes approches.

### **Mise en place d'un squelette d'ontologie**

Cette étape a été réalisée selon une approche experte se basant sur :

- la première version d'ontologie construite à partir de l'Atlas des Paysages du Maine-et-Loire,
- la liste des termes extraits du corpus,

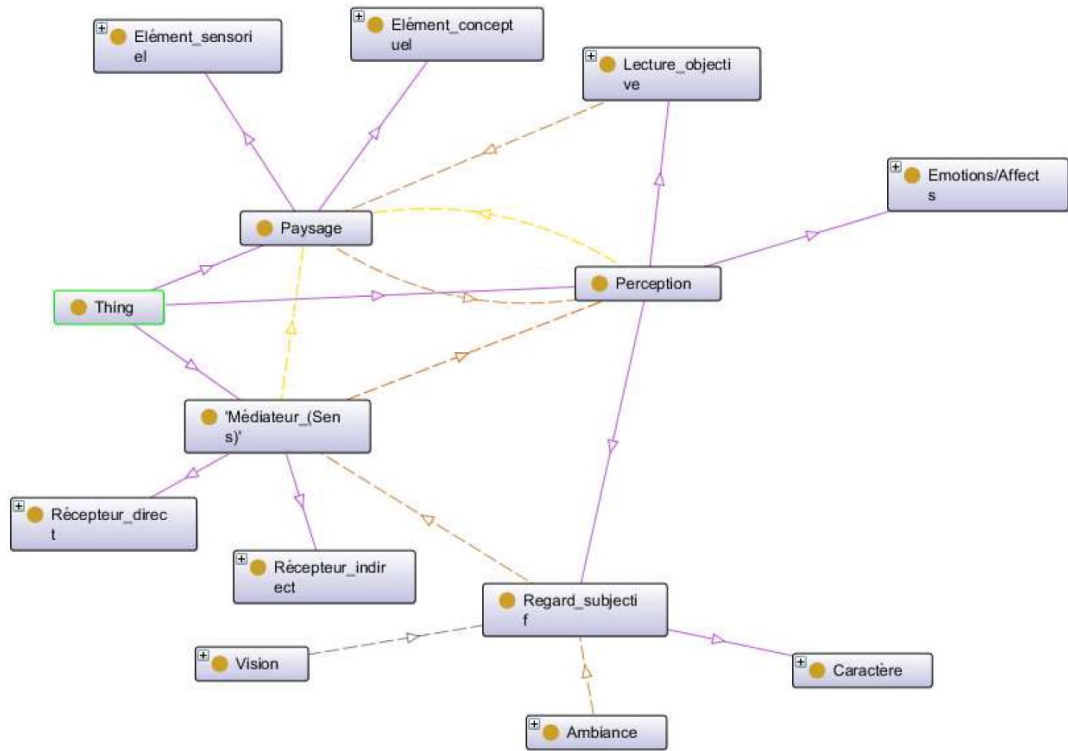


FIGURE 4.8 – Partie supérieure du squelette d'ontologie mis en place.

- un ensemble de sources bibliographiques se rapportant au domaine du paysage et au domaine de la perception.

Le cœur de ce squelette d'ontologie est présenté Figure 4.8.

La "perception" s'applique sur le "paysage" qui est perçu par l'intermédiaire d'un "médiateur", le sens utilisé, qu'il s'agisse d'un "récepteur direct" (toucher) ou "indirect" (ouïe, odorat, vue). Ce "paysage" est composé d' "éléments sensoriels" ("auditifs", "palpables", "olfactifs", "visuels") et "conceptuels" ("ambiance", "valeur", "évolution", "diversité"). La "perception" regroupe les effets d'une "lecture objective" ("organisation spatiale"), d'un "regard subjectif" ("caractère" du paysage) et d'"émotions/affects" "positifs", "négatifs" ou "impassibles".

### Approche générale pour l'automatisation de l'extraction

Pour extraire le vocabulaire lié à la perception, nous prenons comme point de départ :

- une liste de termes fréquents rencontrés dans les documents,
- les termes du squelette de l'ontologie.

Pour chaque terme nous mesurons la corrélation avec les autres termes. Ainsi, chaque terme aura un lot de termes avec lesquels il est corrélé. Nous utilisons des tables de hachages pour stocker ces relations qui en outre ont une mesure. L'étape suivante se résume à transformer

ces termes en une matrice carrée, où les individus en lignes et en colonnes sont tous les termes corrélés entre eux, qu'ils soient issus de nos dictionnaires ou non. Nous fixons un seuil de significativité pour permettre une visualisation progressive des liens. Ce seuil est à l'appréciation de l'expert qui peut le faire varier selon ses besoins. Cette méthode peut surtout permettre de généraliser sur les concepts. En effet, cette méthode nous permet de découvrir de nouveaux liens terme à terme et même parfois entre concepts, mais aussi de découvrir de nouveaux concepts. Ces termes et concepts ont été structurés afin de faire évoluer la nouvelle ontologie en ajoutant des concepts, termes et nouveaux liens entre concepts.

La deuxième approche exploitée est une utilisation des règles d'associations afin d'associer un terme ou un groupe de termes à d'autres. Un seuil de support, confiance et lift ont été définis. À partir de là plusieurs règles ont été extraites. L'analyse de ces règles aussi est soumise à l'avis de l'expert qui peut décider de retenir certaines pour les structurer dans l'ontologie ou d'en rejeter d'autres.

La troisième méthode explorée est l'extraction de phrases clés. Il peut arriver en effet qu'on passe à côté de termes importants, à cause de leur rareté surtout, ce qui a justifié l'utilisation d'extraction. Cette partie nécessite toutefois un corpus relativement vierge, où les traitements sont presque absents, pour que l'on puisse maximiser les résultats. Des premiers tests ont été réalisés sur quelques unités paysagères qui nous ont permis d'isoler quelques mots clés. À terme, nous devrions pouvoir extraire les phrases faisant suite à des entités nommées comme des lieux habités.

### **Détection des termes de la première version de l'ontologie**

Dans un premier temps, nous avons cherché à évaluer la pertinence de la première version de l'ontologie. Pour cela, nous avons regroupé les termes présents dans l'ontologie sous-forme de dictionnaires, chaque concept représentant un dictionnaire. En utilisant la librairie `stringr`, nous avons détecté pour chaque concept les termes qui ont été utilisés dans l'ontologie et avons compté le nombre d'occurrences pour chaque document. Il s'est avéré que certains termes étant considéré comme faisant partie d'un concept n'apparaissaient que très peu ou pas du tout, d'où la nécessité pour nous de mettre en place de nouveaux dictionnaires en nous basant sur les matrices termes documents. Ainsi, nous avons ajouté des termes manuellement pour les différents concepts afin de garantir une plus grande exhaustivité d'une part mais aussi afin de pouvoir les utiliser pour dégager des relations entre les termes.

### **Utilisation des termes fréquents**

Pour constituer une première liste de termes pertinents, nous nous sommes basés sur les matrices termes documents que nous avons obtenues en utilisant la librairie `tm` et nous avons adopté une approche simpliste à savoir :

1. choisir une pondération (dans ce cas un choix entre le `tfidf` et le `tf`),

2. détection et élagage des termes non pertinents,
3. enrichissement des dictionnaires de concepts.

**Pondération** Nous avons choisi de travailler avec le **tf**(term frequency) et le **tf-idf** pour la phase de l'élagage. D'une part les termes les plus fréquents sont le plus souvent ceux qui sont le plus utilisés dans le langage courant. En effet, outre les mots-outils d'autres termes peuvent parasiter le corpus. D'autre part, nous avons aussi envie de faire apparaître les termes rares : il a été démontré que les termes les plus pertinents dans la détection du vocabulaire lié à la perception sont souvent les plus rares ce qui nous a poussé à utiliser la fréquence inverse des documents.

$$tf(t, d)_{i,j} = \frac{n_{i,j}}{\sum_k n_{k,i}}$$

$$idf_i = \log \frac{|D|}{|d_j : t_i \in d_j|}$$

$|D|$       (La totalité des documents)  
 $\{d_j : t_i \in d_j\}$       (Le nombre de documents où le terme  $t_i$  apparaît)

où  $i$  étant le document,  $j$  le terme et  $k$  tous les termes présents dans le document.

**Détection et Élagage des termes non pertinents** Pour l'élagage des termes non pertinents, nous avons déjà à notre disposition des vocabulaires tels que GEMET ou Eurovoc, mais pour des raisons pratiques, nous avons décidé de réaliser un dictionnaire personnel, basé sur ces vocabulaires, qui a été enrichi manuellement en visualisant les résultats que nous a donnés la fonction `findFreqTerms()`, ce qui a permis d'enrichir le dictionnaire des mots à élaguer. Puis nous avons relancé le programme en prenant en compte ce dictionnaire pour supprimer les termes non pertinents grâce à la fonction `removewords`.

### Relations entre les termes

Par la suite, nous avons cherché à identifier les relations entre les termes pour chaque concept. Pour cela, nous avons exploité le paquet `lsa`, plus précisément la fonction `associate` et la librairie `hash` pour les tables de hachage. Partant de ces termes, nous avons utilisé la fonction `associate` qui utilise une mesure de similarité terme à terme, le cosinus en l'occurrence, et qui renvoie tous les termes qui sont au dessus d'un seuil fixé. Ces termes sont ordonnés par ordre décroissant de proximité. L'utilisation de la table de hachage nous permet de stocker ces termes avec comme clé le terme rentré en paramètre et comme valeur(s) le(s) terme(s) retourné(s) par la fonction `associate`. Il arrive que des termes ne soient corrélés avec aucun autre terme, ces derniers sont supprimés au fur et à mesure du traitement pour ne garder en fin de compte que ceux qui sont en relation avec d'autres.

Pour visualiser les liens entre ces termes, nous avons décidé d'utiliser les graphes. Ainsi, les sommets deviennent tous les termes issus de nos concepts reliés à au moins un terme, à

cela on ajoute, tous les termes qui sont reliés à au moins un terme issu de nos concepts. Ce choix n'est pas gênant car pour créer la matrice d'adjacence, nous partons d'un tableau carré avec comme noms de colonnes et noms de lignes tous ces termes rempli de 0, lorsque deux termes ne sont pas en relation aucun modification n'est apporté et lorsque deux termes sont en relations leur intersection prend la valeur du cosinus qui a été calculé.



terme à terme	développement	occupation	regard	paysage	village	visuel	eau	forme	limite	aménagement	étang	échelle
développement	0.00	0.00	0.934	0.928	0.94	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
occupation	0.00	0.00	0.930	0.90	0.936	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
regard	0.934	0.93	0.00	0.917	0.915	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
paysage	0.928	0.90	0.917	0.00	0.913	0.00	0.00	0.91	0.93	0.00	0.00	0.916
village	0.94	0.936	0.91	0.91	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
visuel	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.92	0.00	0.967	0.00	0.00	0.00
eau	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.92	0.00	0.00	0.93	0.00	0.00	0.00
forme	0.00	0.00	0.00	0.91	0.00	0.00	0.00	0.00	0.92	0.00	0.00	0.00
limite	0.00	0.00	0.00	0.93	0.00	0.967	0.93	0.91	0.0	0.00	0.00	0.00
aménagement	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.93	0.00
étang	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.93	0.00	0.00
échelle	0.00	0.00	0.00	0.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

TABLEAU 4.2 – Tableau de similarité terme à terme

La table 4.2 montre le lien terme à terme pour un concept donné. Ce qui serait intéressant outre le fait d'analyser les relations terme à terme ce serait d'étudier la relation concept à concept, ce qui se fait en prenant comme dictionnaire de départ, un dictionnaire qui serait un mélange entre 2 ou plusieurs concepts en même temps.

Pour la visualisation nous avons décidé d'utiliser `igraph`. Ici, les sommets sont donc les termes et on a assigné un poids pour les relations, ce poids étant la valeur du cosinus qui a été calculée. Plusieurs sortes de représentations ont été utilisées pour une question d'ergonomie, telle que celle présentée Figure 4.9.

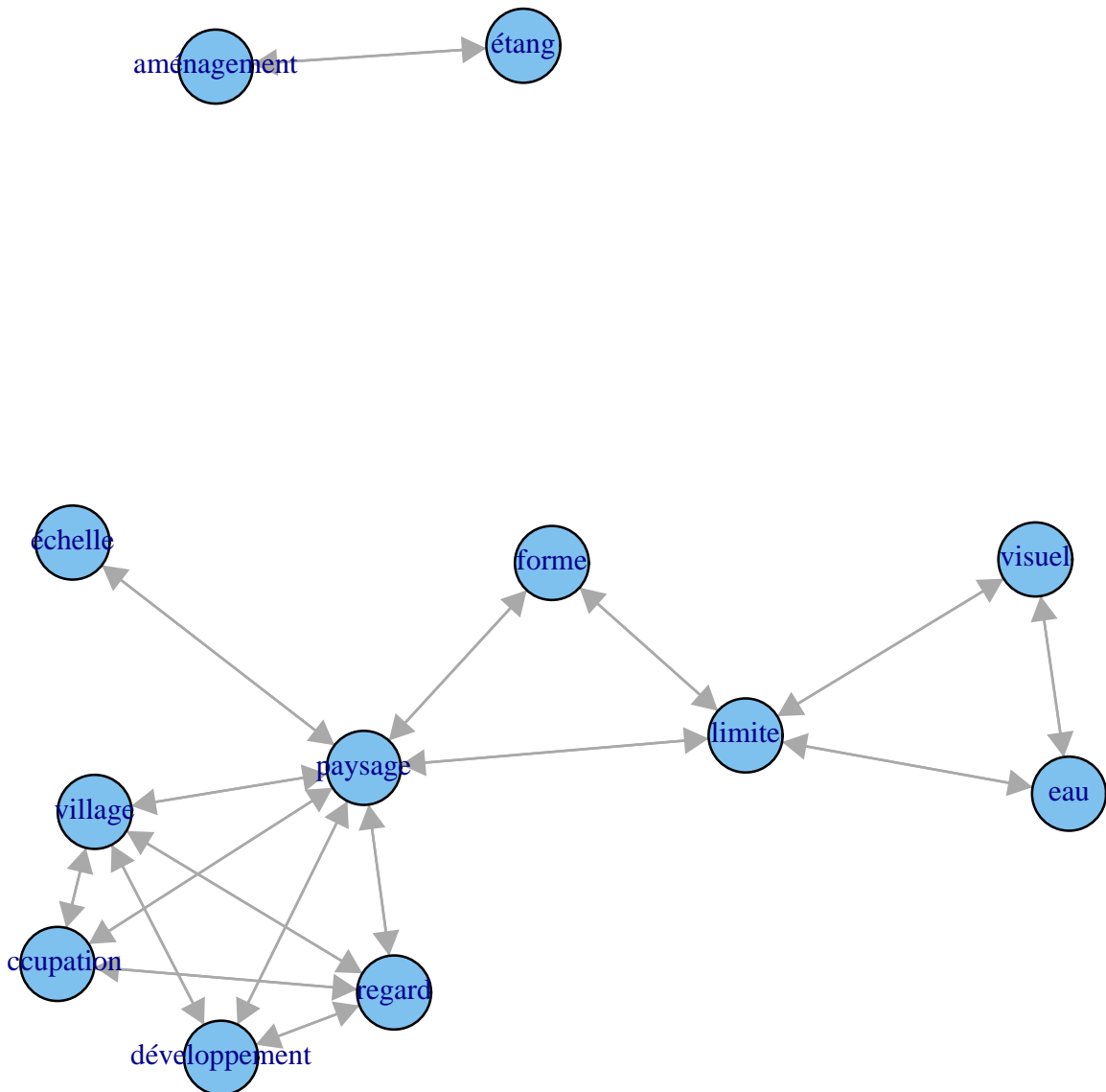


FIGURE 4.9 – Relations termes à termes

## Règles d'associations

Comme approche complémentaire, nous avons aussi utilisé les règles d'associations afin d'enrichir notre ontologie. Les règles d'association ont pour but de découvrir des relations entre plusieurs variables. Dans notre contexte ces variables sont les termes présents dans nos unités paysagères. Nous supposons donc que lorsque un terme  $t$  apparaît dans un document, un terme ou un groupe de termes que l'on nommera  $t'$  a de fortes chances d'apparaître, nous permettant ainsi de découvrir des règles. Nous supposons aussi qu'il y a de fortes chances que ces termes soient issus du même concept.

Une règle d'association est mesurée par son support et sa confiance qui sont définis tels que :

$$\text{Support}(X \rightarrow Y) = P(X \cup Y)$$
$$\text{Confiance}(X \rightarrow Y) = \frac{\text{Support}(X \cup Y)}{\text{Support}(P(X))}$$

Pour mettre cette approche en œuvre sur [R] nous avons fait appel au paquet `arules` Hahsler *et al.* (2005). Il faut aussi noter que nous nous sommes appuyés sur les matrices termes documents obtenues grâce à la librairie `tm` via la fonction `TermDocumentMatrix`. Nous avons travaillé avec des n-grammes de taille 1 tout ceci suite à la lemmatisation et au nettoyage des mots outils.

En ce qui concerne la démarche, celle-ci s'est faite en plusieurs étapes :

1. transformer la matrice en `dataframe` afin de pouvoir l'exploiter grâce à la commande `inspect`,
2. définir un seuil de fréquence d'apparition des termes,
3. tout terme supérieur ou égal à ce seuil prend la valeur 1, 0 sinon,
4. transformer le `dataframe` avec les valeurs binaires en objet `Itemmatrix`,
5. définir un seuil de support et le seuil de confiance,
6. appliquer ensuite l'algorithme a priori ce nouvel objet,
7. visualiser les règles grâce à la commande `inspect`.

**Extraction des règles** Nous avons appliqué la démarche d'extraction de règles à la matrice termes-documents en utilisant comme pondération le `tf-idf`. Néanmoins, une fonction généraliste a été créée prenant en paramètre la fréquence minimale pour la création de la matrice binaire, ce qui permet de traiter n'importe quelle matrice termes-documents sans se soucier de sa pondération, qui prend aussi en entrée le seuil de support et le seuil de confiance. Cette fonction nous retourne toutes les règles qui ont été découvertes.

Par défaut, la librairie `arules` utilise comme mesure de qualité le lift, défini comme étant le support de l'itemset divisé par le produit des probabilités de chaque objet de l'itemset.

$$\text{Lift}(X \rightarrow Y) = \frac{\text{Support}(X \cup Y)}{\text{Support}(X) \times \text{Support}(Y)}$$

Un lift à 1 signifie l'indépendance, au delà il existe une corrélation positive entre  $X$  et  $Y$ .

Il existe aussi d'autres mesures comme le cosinus donné par la formule :

$$\text{Cosinus} = \frac{P(X \cup Y)}{\sqrt{P(X) \times P(Y)}}$$

Compris entre 0 et 1 plus il est grand, meilleure est la règle.

L'utilisation de ces mesures de qualité va nous permettre de filtrer nos règles en fixant un seuil pour la mesure de qualité qui a été choisie.

Dans l'exemple qui suit, où l'on a appliqué cette extraction de règle à l'Indre-et-Loire, nous avons fixé le lift à 1.3. Les résultats sont consignés dans le tableau 4.3. Outre l'utilisation des mesures de qualité, la pertinence de ces règles doit être évaluée par un expert du domaine pour en mesurer la réelle pertinence.

Pour aller plus loin, nous pouvons grâce à une simple boucle extraire des règles d'associations pour chaque unité paysagère, ce qui viendrait en complément des autres méthodes développées pour caractériser nos unités paysagères.

lhs	rhs	support	confidence	lift
1. commune	⇒ château	0,5000	1,0000	1,4545
2. château	⇒ commune	0,5000	0,7273	1,4545
3. river	⇒ droite	0,5000	1,0000	1,7778
4. droite	⇒ river	0,5000	0,8889	1,7778
5. bâti	⇒ château	0,5000	1,0000	1,4545
6. château	⇒ bâti	0,5000	0,7273	1,4545
7. droite	⇒ coteau	0,5000	0,8889	1,5802
8. coteau	⇒ droite	0,5000	0,8889	1,5802
9. moins	⇒ autour	0,5000	0,8889	1,5802
10. autour	⇒ moins	0,5000	0,8889	1,5802
11. chromatique	⇒ palette	0,5625	1,0000	1,6000
12. palette	⇒ chromatique	0,5625	0,9000	1,6000

TABLEAU 4.3 – Règles pour l'Indre-et-Loire support=0,5,Confiance=0,7,lift>1,3

**Règles d'associations à partir des termes de l'ontologie** À la suite de l'extraction et du filtrage de nos règles, nous avons cherché à identifier les termes déjà présents dans notre ontologie et qui sont présents dans les règles d'associations soit comme prémisse soit comme conclusion (left-hand-side lhs,right-hand-side rhs)). Ceci permet d'identifier d'une manière

plus efficace les termes issus des concepts que l'on a déjà afin de rajouter dans ces concepts les termes en relation si ce n'est déjà fait.

Comme toutes les autres démarches, l'analyse de la pertinence de chacune de ces règles est à l'appréciation de l'expert. Néanmoins, la manipulation des fonctions mis en place en jouant notamment sur les paramètres comme le support, la confiance et le lift, devrait faciliter cette extraction.

### **Extraction des mots clés**

Afin de rajouter un peu plus de précision en terme de perception des unités paysagères, nous avons aussi utilisé le paquet `RKEA` permettant l'extraction de mots clés. En effet, certains termes peuvent qu'une seule fois dans un texte, alors que la valeur caractéristique du point de vue de la perception est forte.

### **Enrichissement de l'ontologie**

L'enrichissement de l'ontologie s'est fait au fur et à mesure des approches développées. Dans un premier temps nous nous sommes appuyés sur les termes fréquents, tout en sachant que cette approche s'est avérée très vite laborieuse. Pour pallier ce problème nous nous sommes tournés vers diverses solutions comme le dictionnaire Wolf (Wordnet français) développé par l'Inria<sup>5</sup> qui est disponible en téléchargement sous format XML. Cette ontologie est une structure en forme de graphe où les nœuds sont les concepts et les arêtes sont les relations entre les différents concepts. Il fonctionne sur le principe de Synsets (ensemble de synonymes), chaque ensemble représentant un concept, qui contient tous les mots synonymes. Cette version française utilise les mêmes identifiants que les Synsets du Wordnet développé par Princeton qui a inspiré ce projet. Nous nous sommes rapidement rendu compte en essayant de le manipuler avec la librairie XML que ce dictionnaire n'était pas encore utilisable sous [R]. Ceci nous a poussés à créer nos propres dictionnaires afin de pouvoir caractériser nos unités paysagères. Nous avons donc définis plusieurs dictionnaires sur la perception du paysage, en nous appuyant sur l'ancienne ontologie, que nous avons enrichis avec de nouveaux termes. L'utilisation de la librairie `stringr` nous a permis pour la suite de créer des matrices termes-documents pour chaque concept. Ainsi, les termes rajoutés et ayant une fréquence non nulle vont servir dans un premier temps à enrichir l'ontologie d'une part, mais l'utilisation de l'ensemble de ces termes permet en même temps une caractérisation des unités paysagères. Notons que c'est la même approche qui a été utilisée en puisant nos termes cette fois dans les dictionnaires thématiques.

Pour bien identifier les relations qui peuvent exister entre les concepts, nous avons utilisé l'ensemble des termes pour déterminer les corrélations qui pouvaient exister entre eux. En effet, deux termes issus de concepts différents et étant en relation signifie que ces deux concepts sont en relation via ces termes. L'utilisation de ces relations permet de mieux appréhender les

---

5. L'Institut national de recherche en informatique et en automatique

relations qui peuvent exister entre nos concepts et de les ajouter à l'ontologie si cette relation n'existait pas déjà.

Et en dernier lieu, le recours aux règles d'associations nous ont permis d'enrichir cette ontologie. Ceci en nous appuyant sur les règles extraites. En prenant en compte tous les unités paysagères des milliers de règles ont pu être générés. Il faut noter parmi ces règles plusieurs redondances toutefois.

### **Ontologie résultat et limites**

L'ontologie de perception des paysages résultant de ces approches s'inscrit dans le squelette déjà présenté Figure 4.8.

Cette ontologie, au format OWL, inclut 223 concepts qui sont reliés par des relations de type :

- EstUn,
- AppliqueSur,
- Determine,
- EstConstituePar,
- Modifie.

Chaque concept est assorti d'une définition et d'un ensemble de termes associés.

Mais cette ontologie présente un certain nombre de limites. Tout d'abord, son usage pour caractériser les unités paysagères est rendu difficile par son format, bien que standard. En effet, nous nous sommes intéressés à la librairie `Ontocat` mais celle-ci a montré des limites quant au parcours de l'ontologie. Nous aurions aimé réaliser un parcours de chaque concept en récupérant pour chacun de ces concepts le vocabulaire associé mais ceci n'est pas faisable avec ce paquet et il existe peu de moyens à notre connaissance pour l'exploitation de ce genre de fichier sous [R].

De plus, comme déjà indiqué précédemment, le vocabulaire de perception reste rare dans les descriptions des unités paysagères. Ainsi, la Table 4.4 présente la fréquence des termes de l'ontologie, organisée selon les trois concepts principaux. Au total, cette terminologie représente moins de 10% du vocabulaire employé et les volets plus particulièrement perceptifs (perception et médiation) se limitent à environ 3% du vocabulaire employé.

Nous pouvons donc supposer que ce vocabulaire risque d'être peu efficace pour discriminer les unités paysagères. Nous avons donc choisi de recourir à d'autres approches pour les caractériser, approches qui seront développées dans la prochaine section.

Thème	Nombre de mots	Pourcentage de mots
Paysage	134087	6,84%
Perception	58207	2,97%
Médiation	2583	0,13%
Total	1959257	9,95%

TABLEAU 4.4 – Fréquence du vocabulaire de l’ontologie dans l’ensemble des textes descriptifs des unités paysagères, organisée selon les 3 concepts principaux

## 4.6 Caractérisation et discrimination des unités paysagères

### 4.6.1 Approches mises en place

Étant donné la faible représentativité du vocabulaire de perception, nous avons fait le choix de nous intéresser à l’ensemble des textes descriptifs des unités paysagères, qu’il s’agisse de vocabulaire de perception ou non. La caractérisation a été conduite selon deux axes :

- caractérisation par des méta-données propre à chaque Atlas des Paysages,
- analyse textuelle.

Cette analyse textuelle a été conduite selon deux approches :

- analyse sémantique grâce au logiciel Tropes,
- construction de matrices thèmes-documents avec une méthodologie ad-hoc exploitant des dictionnaires personnels.

Ces différents éléments font l’objet de la suite de cette section.

### 4.6.2 Méta-données

Parmi les informations générales concernant les Atlas des Paysages, nous avons choisi de conserver les informations suivantes et de les associer aux unités paysagères :

- l’année de réalisation,
- le nom de maître d’ouvrage,
- le nom du ou des maîtres d’œuvre,
- les domaines d’expertise du ou des maîtres d’œuvre.

En effet, chacun de ces éléments est susceptible d’introduire un biais dans la construction de l’Atlas.

En ce qui concerne l’année de réalisation, il est à noter qu’en 2004 a été publié un rapport technique faisant le bilan de 10 ans de réalisations d’Atlas des Paysages (Brunet-Vinck, 2004). Ce document, en complément d’une critique constructive des Atlas déjà réalisés, apporte des précisions méthodologiques visant à pallier les limites identifiées dans les Atlas des Paysages

précédemment réalisés. Une place importante y est dédiée au volet socioculturel. Nous pouvons donc imaginer des différences dans le vocabulaire employé entre les Atlas des Paysages réalisés entre 1999 et 2004 et ceux réalisés après.

En ce qui concerne les maître d'ouvrage et d'œuvre, nous pouvons imaginer un certaine homogénéité entre documents réalisés à la demande d'un même maître d'ouvrage, ou par un même maître d'œuvre. Le cas peut se rencontrer pour les maîtres d'ouvrage, par exemple au sein d'une même région, et pour les maîtres d'œuvre, pour des bureaux d'études ayant participé à la réalisation de plusieurs Atlas des Paysages.

Enfin, en ce qui concerne les domaines d'expertise, nous pouvons supposer que chaque participant à la rédaction d'un Atlas des Paysages apporte une part de subjectivité liée à son champ disciplinaire d'intérêt. Nous avons donc constitué une liste de 24 domaines d'expertises qui peuvent être mobilisés lors de la réalisation d'un Atlas des Paysages : paysagiste, aménagement / planification, architecte, urbaniste, géographe, sociologue, historien, environnementaliste, biologiste, écologue, hydrologue, géologue, démographe, cartographe, géomaticien / SIGiste, infographiste, agriculture / agronomie, design, eau, énergie, habitat, médiation / sensibilisation, transports, web.

Pour chaque maître d'ouvrage, nous avons alors listé parmi ces domaines d'expertise ceux dont il pouvait disposer pour réaliser l'Atlas des Paysages du fait du profil de ses membres actuels. Cette approche est bien sûre plus biaisée pour les Atlas les plus anciens, les équipes ayant pu évoluer, mais elle donne une idée de la variété des auteurs d'Atlas.

### 4.6.3 Analyse sémantique grâce au logiciel Tropes

Nous avons réalisé une analyse du texte descriptif de chaque unité paysagère en utilisant le logiciel Tropes, dont le fonctionnement a déjà été décrit précédemment, en utilisant le « Scenario Standard » pour l'analyse sémantique. Ainsi, la Figure 4.10 présente les résultats pour l'unité Paysagère « Segréen » du département du Maine-et-Loire.

Le nombre d'occurrences de chaque classe d'équivalence, soit des termes de chacune des 28 catégories de termes, ont été extraits. Le résultat est une matrice présentant :

- en lignes, les différentes Unités paysagères,
- en colonnes, les 28 catégories de termes,
- à l'intersection de chaque ligne et colonne le nombre d'occurrences de termes de la catégories.

Un extrait du fichier résultat, centré sur le département du Maine-et-Loire, est présenté figure 4.11.



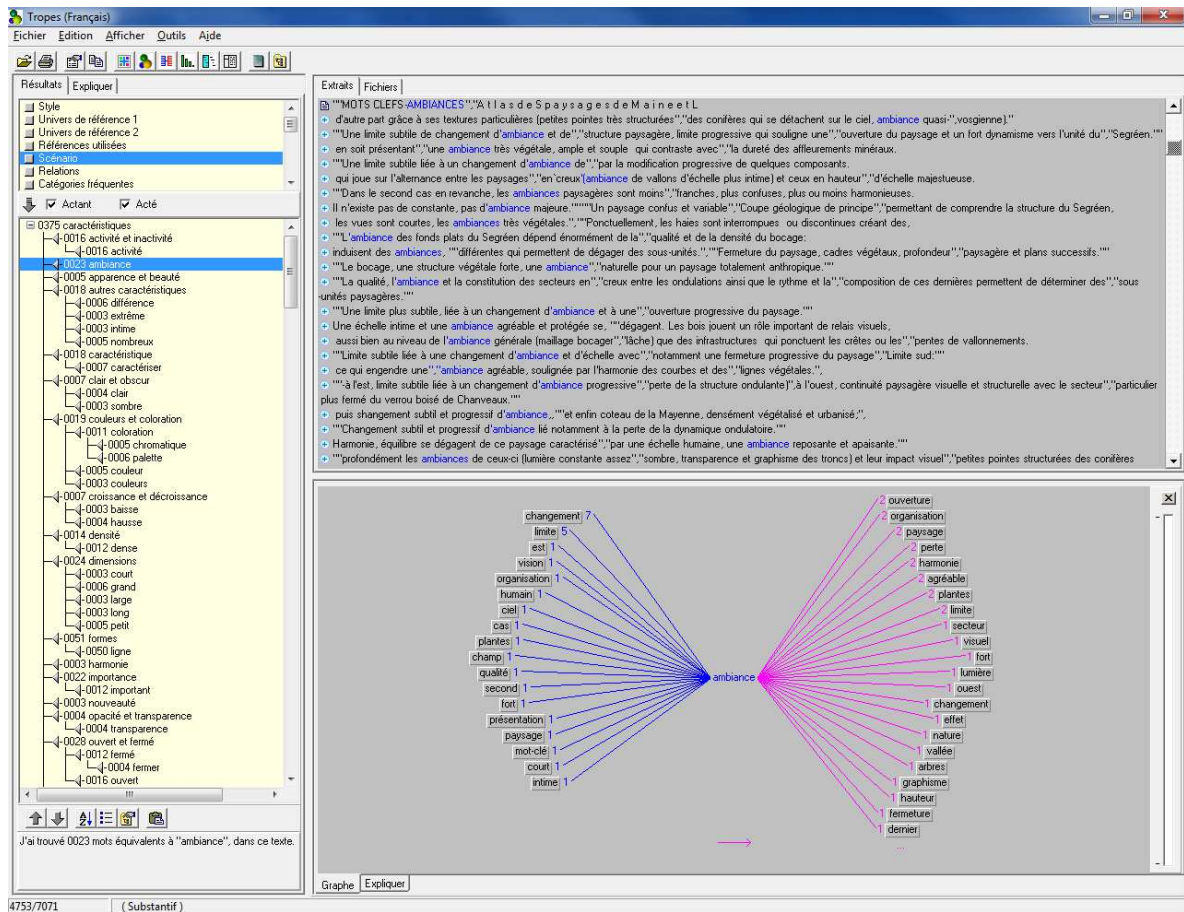


FIGURE 4.10 – Analyse sémantique avec Tropes de l'unité paysagère « Segréen » du département du Maine-et-Loire - La taxonomie en bas à gauche présente le nombre de termes équivalents à chaque concept du scénario qui ont été identifiés dans le texte. Le concept « ambiance » a été sélectionné. En haut à gauche sont présentés des extraits de textes où ont été identifiés des termes équivalents au concept. En bas à droite, apparaissent les relations identifiées entre ce concept d'« ambiance » et d'autres concepts du scénario

ID	Département	Région	Année	N° UP	Nom UP	Agriculture et environnement	Alimentation et viticulture	Arts et culture	Autres concepts	Caractéristiques	Communication et médias	Comportements et sentiments	Corps	Crise et conflits	Enseignement et éducation	Entreprises et industries	Finances et quantités	Forces et quantités	Géographie	Histoire et préhistoire	Immobilier et habitat	Médecine et santé	Objets et substances	Personnes et groupes sociaux	Politique et société	Sciences et techniques	Sports et loisirs	Temps	Texte étranger	Transports, aéronautique et espace	Travail et emploi	Total	
768	49	052	2003	001	Le Segréen	153	4	86	43	316	385	65	97	13	1	3	23	8	104	262	4	32	23	42	15	162	20	5	21	0	25	1 900	
769	49	052	2003	002	Les Marches du Segréen	72	5	22	23	139	22	45	1	1	1	1	12	24	106	4	14	10	6	3	46	5	5	10	0	22	0 724		
770	49	052	2003	003	Le Haut-Anjou	194	5	50	49	200	260	39	101	10	4	3	10	12	76	137	0	17	14	13	11	71	11	12	12	0	16	1 328	
771	49	052	2003	004	Les Basses Vallées Angevines	162	10	126	22	126	187	19	38	6	1	2	14	34	144	5	9	25	3	10	63	2	13	48	0	13	0 1083		
772	49	052	2003	005	Le Beaugois	237	24	188	128	438	573	104	146	10	5	7	23	145	204	25	94	26	46	19	223	30	19	43	0	56	4 290		
773	49	052	2003	006	Les Portes du Beaugois	39	1	28	13	67	105	25	26	4	0	1	11	10	36	71	2	8	19	5	60	9	2	17	0	11	1 600		
774	49	052	2003	007	L'Agglomération Angévine	87	13	30	46	184	189	29	48	15	9	17	24	18	36	283	22	53	18	24	41	204	9	33	0	59	0 609		
775	49	052	2003	008	Le Val d'Anjou	233	18	66	58	235	338	37	54	8	5	1	19	15	33	334	18	142	23	44	26	183	15	12	76	0	58	3 289	
776	49	052	2003	009	La Loire des Promontoires	301	17	66	48	237	320	41	62	23	7	1	7	13	52	324	14	44	17	45	22	194	15	14	39	0	68	0 193	
777	49	052	2003	010	Les Mauges	169	28	75	70	328	317	52	58	12	14	3	30	24	61	179	9	42	20	56	23	162	16	7	37	0	20	3 181	
778	49	052	2003	011	Le Couloir du Layon	209	6	38	35	139	171	38	26	11	4	2	3	10	37	93	10	38	18	24	14	96	5	11	28	0	9	0 1038	
779	49	052	2003	012	Les Plateaux de l'Abance	57	3	13	6	86	85	19	20	5	0	1	1	7	26	42	1	7	9	7	3	36	4	4	0	14	0	488	
780	49	052	2003	013	Le Saumurois	159	20	67	44	181	211	41	42	4	4	4	6	10	64	195	5	17	17	36	13	104	19	1	31	0	16	0 139	
781	63	052	1999	001	Les Marches de Bretagne	115	20	95	16	221	215	30	53	1	4	3	7	6	71	107	1	12	0	18	4	38	15	2	32	0	20	0 1158	
782	63	052	1999	002	Le cru de la Mayenne	249	14	42	57	360	393	32	14	60	1	3	9	42	27	112	636	11	13	5	18	4	21	11	11	80	0	77	0 2848
783	63	052	1999	003	Le Pays andouais	181	4	35	19	118	123	5	19	2	3	2	36	192	5	10	2	23	21	11	11	11	11	11	11	11	11	11	0 142
784	63	052	1999	004	Les collines du Maine	93	10	23	11	152	117	16	27	9	1	3	3	5	48	140	5	10	1	24	6	26	11	2	18	0	26	0 782	
785	63	052	1999	005	Le Haut-Anjou savennais	80	17	31	14	187	211	15	46	2	7	1	4	4	76	186	2	14	1	15	4	36	9	1	18	0	20	0 1008	
786	63	052	1999	006	Le Plateau de Volière	124	10	29	43	97	117	11	13	3	1	0	2	8	31	138	6	4	25	5	10	43	4	2	15	3	6	0 798	
787	63	052	2006	001	Le Pays-Haut	117	2	37	46	153	167	10	24	1	4	1	21	5	20	120	11	6	37	13	9	81	9	1	19	3	12	0 301	
788	63	052	2006	002	Les grandes vallées du Pays-Haut	129	1	16	36	105	145	4	18	3	3	4	35	8	19	156	10	9	30	10	11	87	11	1	19	3	12	0 885	
789	63	052	2006	003	Le plateau de la Haye	260	6	54	48	209	176	20	40	2	14	0	9	12	60	197	9	19	44	12	12	113	7	6	24	6	28	0 1383	
790	63	052	2006	004	Le plateau de la Haye	132	5	44	51	136	106	16	33	4	4	0	9	11	26	241	6	12	29	7	8	76	8	3	17	3	18	0 1005	
791	63	052	2006	005	Les côtes de Toul	172	1	28	47	136	99	13	19	3	4	1	24	5	20	198	8	15	32	10	6	111	11	4	16	3	23	0 1009	
792	63	052	2006	006	La vallée urbanisée de la Moselle	116	4	44	33	92	93	8	18	1	3	0	9	4	16	152	5	4	18	11	6	43	5	2	16	3	8	0 681	
793	63	052	2006	007	Les boucles de la Moselle	87	3	35	33	92	93	8	18	1	3	0	9	4	16	152	5	4	18	11	6	43	5	2	16	3	8	0 681	
794	63	052	2006	008	Le grand courommé	34	4	15	62	119	100	8	31	0	4	2	2	25	78	2	10	26	3	6	62	8	1	8	3	19	0	733	
795	63	052	2006	009	Nancy et sa couronne	176	16	67	44	129	132	10	31	6	1	0	3	8	21	129	7	8	41	9	6	51	7	3	12	3	12	0 872	
796	63	052	2006	010	Le plateau lorrain	156	15	51	39	128	117	24	27	0	0	0	7	30	151	3	5	27	2	3	85	7	1	11	3	17	0 886		
797	63	052	2006	011	Le plateau lorrain	146	13	22	43	117	116	15	31	6	5	0	16	6	21	176	2	19	33	23	11	63	16	4	19	3	26	0 864	
798	63	052	2006	012	La vallée de la Meurthe	175	2	38	38	142	135	13	28	1	5	0	3	7	32	160	3	7	29	4	2	70	9	3	15	6	18	1 946	
799	63	052	2006	013	Entre Moselle et Meurthe	106	4	26	16	89	75	8	12	1	4	0	5	7	15	81	1	3	18	4	6	34	7	2	10	3	5	0	
800	63	052	2006	014	La Moselle sauvage	95	8	34	27	77	86	10	14	0	11	0	2	3	15	50	2	15	23	1	2	55	8	0	9	3	15	0	
801	63	052	2006	015	Le Lunévillois	154	6	58	39	117	115	12	23	1	6	1	5	11	45	109	5	5	28	10	21	57	13	6	16	6	11	0	
802	63	052	2006	016	Le piémont vosgien	154	6	58	39	117	115	12	23	1	6	1	5	11	45	109	5	5	28	10	21	57	13	6	16	6	11	0	

FIGURE 4.11 – Extrait du fichier résultat de l'analyse sémantique avec Tropes

#### 4.6.4 Construction ad-hoc de matrices thèmes-documents

L'approche ad-hoc mise en oeuvre s'appuie sur des dictionnaires thématiques. Ces thèmes sont élaborés en relation avec des experts du domaine, pour analyser les grands traits qui ont été abordés dans les Atlas. Une matrice termes documents est créée et un filtrage est réalisé. Partant de la nouvelle matrice, le but est de mesurer le poids de chaque thématique dans un document. Une pondération globale, définie par l'expert, est donc utilisée en partant de la matrice de comptage.

En pratique, nous avons réalisé des dictionnaires en nous basant sur plusieurs sources à savoir des dictionnaires thématiques disponibles sur internet, tels que le dictionnaire Eurovoc, Gemet ou encore en nous appuyant sur les taxonomies du logiciel Tropes. Nous avons ainsi constitué 13 dictionnaires en rapport avec l'architecture, l'agriculture, l'urbanisme, la religion etc... Nous avons, comme dans les cas précédents, créé une matrice terme-documents grâce la fonction que nous avons créée à cette fin, fonction qui retourne le nombre d'occurrences pour chaque terme répertorié dans un dictionnaire.

Nous avons testé les différentes pondérations que propose la librairie `lsa`. Toutefois, nous nous sommes rendu compte que les résultats étaient plus probants lorsque nous utilisons le `gw_entropy` (global weighting entropy) qui assigne une entropie globale pour un document par rapport à un thème en se basant sur la fréquence des termes. Il s'agit ici de l'entropie de Shannon, à laquelle on ajoute 1, tel que présenté ci-dessous :

$$H_2(X) = - \sum_{i=0}^n P_i \log_2 P_i$$

$P_i$  étant la probabilité qu'un terme  $x_i$  apparaisse.

$$\text{gw\_entropy}(X) = - \sum_{i=0}^n P_i \log_2 P_i + 1$$

Pour chaque document, nous avons calculé l'entropie globale pour un thème donné. Ainsi, si l'entropie est forte, donc tend vers 2, nous pouvons en déduire que plusieurs termes de la thématique caractérisent assez bien l'unité paysagère. Suite à ce traitement, nous obtenons donc un tableau dont les individus sont les unités paysagères (documents) et les variables sont les thèmes.

Un extrait du fichier résultat, centrée sur le département du Maine-et-Loire, est présenté Figure 4.12.

NOM	metadoc.NOM_UP	architecture	economie	elevage	mineralogie	urbanisme	geologie	viticulture	botanique	eau	C
491	Lot-et-Garonne	1,305459789	1,256919985	1,126697712	1,152665168	1,158980573	1,072947604	1,182967852	1,248228531	1,205846832	
492	Maine-et-Loire	1,261819663	1,271236471	1,422532537	1,2281614	1,181216241	1,266786373	1,245173519	1,274064759	1,404614124	X
493	Maine-et-Loire	1,308847711	1,265842605	1,269306845	1,210392174	1,195089474	1,223872784	1,254192678	1,267508887	1,236915498	X
494	Maine-et-Loire	1,279949076	1,272769559	1,341066816	1,187799604	1,160077829	1,186149326	1,242044902	1,284153407	1,293667961	X
495	Maine-et-Loire	1,24349069	1,265576666	1,42867573	1,216416281	1,184725148	1,212395077	1,230902818	1,289786057	1,407758016	X
496	Maine-et-Loire	1,30989932	1,268936591	1,29761507	1,219527555	1,176058002	1,258103422	1,227644423	1,305739634	1,254632699	X
497	Maine-et-Loire	1,203471116	1,255942072	1,304665932	1,272169635	1,201446391	1,252937533	1,22884444	1,273156657	1,202265758	X
498	Maine-et-Loire	1,265239928	1,270766894	1,388396877	1,259914676	1,317758098	1,240739644	1,22936492	1,279953969	1,403233968	X
499	Maine-et-Loire	1,312939159	1,283271451	1,51774288	1,236874453	1,199923352	1,302128023	1,222313359	1,285454148	1,439089963	X
500	Maine-et-Loire	1,289982481	1,27681269	1,45944095	1,255295023	1,193381437	1,294974265	1,220799502	1,272380567	1,375370525	X
501	Maine-et-Loire	1,294819339	1,273146495	1,458906478	1,234700535	1,170174543	1,266649505	1,23332084	1,275230675	1,383531675	X
502	Maine-et-Loire	1,305527273	1,2799613	1,428062777	1,22927561	1,158862828	1,335716494	1,304795246	1,289321954	1,290644746	X
503	Maine-et-Loire	1,259860202	1,268566506	1,344865427	1,261056589	1,198663911	1,229729115	1,298777709	1,280608605	1,119663189	X
504	Maine-et-Loire	1,289260499	1,26479279	1,436428843	1,267750431	1,157497349	1,322150976	1,243724152	1,289013298	1,255744432	X

FIGURE 4.12 – Extrait du fichier résultat de l'analyse sémantique selon la méthodologie ad-hoc.

## 4.7 Conclusion et perspectives

### 4.7.1 Préliminaires

Dans cette partie, nous avons :

- Défini un corpus documentaire, constitué d'Atlas des Paysages, exploitable par des outils informatiques,
- Mis en place une méthodologie de construction d'ontologie à partir de ce corpus et d'un regard expert, afin de constituer une ontologie de perception des paysages,
- Caractérisé le territoire couvert par notre corpus à l'échelle de l'unité paysagère, en utilisant des dictionnaires, les textes descriptifs des unités paysagères, ainsi que des méta-données d'intérêt.

L'intégration de ces éléments avec le reste de données spatialisées devrait permettre l'enrichissement des modèles économiques développés. Les travaux réalisés présentent toutefois des limites.

### 4.7.2 Considérations concernant le corpus documentaire

En ce qui concerne le corpus documentaire, nous pouvons tout d'abord noter que sa couverture du territoire reste partielle. D'une part, à ce jour, la réalisation d'Atlas des Paysages n'a pas été conduite pour l'ensemble des départements ou régions français. En particulier, il n'existe actuellement pas d'Atlas couvrant deux des agglomérations d'étude du projet : Best et Rennes. D'autre part, certains Atlas ne sont disponibles publiquement que sous une forme qui n'est pas exploitable informatiquement : fichier PDF constitué d'images, document non téléchargeable, etc.

De plus, en psychologie, la perception est le résultat d'un processus psychologique complexe qui met en jeu deux phénomènes très différents : Le premier correspond à « l'acte/la fonction par lequel l'esprit se représente les objets et les espaces : regarder, voir, écouter, entendre, sentir. » (Donadieu & Mazat, 2002). La perception suppose ainsi des sensations. Le deuxième phénomène est l'analyse des informations recueillies à travers ces stimulations, pour être reconnues et organisées afin de construire un tout cohérent, une représentation. Cette représentation implique une opération de sélection. « La perception dépend donc de ce qu'il y a 'en nous', de notre expérience, de nos compétences » (Dokic, 2004). Il apparaît alors que chacun d'entre nous possède sa propre vision du paysage et que les représentations qui en découlent, bien que formalisées dans le cas des Atlas des Paysages, peuvent être très fortement influencées par leur auteur.

Afin de pallier ces limites, nous pourrions tout d'abord étendre le corpus d'étude, en incluant :

- d'autres types de documents paysagers que les Atlas. Les éventuels documents pertinents ont été listés. Il s'agirait alors de les collecter et traiter selon la même méthodologie

que les Atlas des Paysages.

- des compte-rendus d'entretiens avec les acteurs du territoire. Une enquête permettant le recueil de tels compte-rendus a été menée dans le cadre du projet mais son exploitation en tant qu'élément du corpus documentaire n'a pas pu être menée à bien, faute de temps.

### 4.7.3 Considérations concernant l'ontologie de perception des paysages

La méthode de construction d'ontologie, dans sa seconde mouture, fonctionne et passe à l'échelle, mais le résultat demande encore à être affiné. Ses limites sont surtout liées à la rareté des éléments de perception du paysage dans le corpus considéré. Les extractions automatiques réalisées présentent encore des performances limitées. Pour y remédier, nous pourrions envisager deux approches. Tout d'abord, il s'agirait d'améliorer l'automatisation, d'une part en complétant l'élagage avec d'autres vocabulaires, tel que le WOLF<sup>6</sup>, d'autre part en prenant mieux en compte les aspects morpho-syntaxiques en conjonction avec l'ontologie existante, soit en multipliant les aller-retour entre l'extraction automatique et le regard expert. L'utilisation d'un corpus centré sur la perception du paysage issu des enquêtes auprès des acteurs territoriaux devrait aussi faciliter la construction de l'ontologie.

L'ontologie résultat, bien que satisfaisante, présente elle-aussi des limites en ce qui concerne sa richesse. En particulier, sa structure sera améliorée par l'apport de regards experts complémentaires et la liste des termes associés à chaque concept sera complétée.

### 4.7.4 Considérations concernant la caractérisation des unités paysagères

La caractérisation des unités paysagères a été menée en employant deux approches :

- une analyse sémantique avec le logiciel Tropes,
- une approche ad-hoc basée sur des méthodes statistiques.

Dans les deux cas, les terminologies utilisées restent génériques. Ainsi, le « Scénario Standard » de Tropes catégorise un ensemble de termes de la langue française. De plus, les dictionnaires personnalisés mis en place pour l'approche ad-hoc ont une couverture thématique partielle : nous n'avons pas eu le temps de constituer l'ensemble des dictionnaires qui auraient été pertinents.

Afin d'améliorer la caractérisation « générale » des unités paysagères, il conviendrait de compléter notre ensemble de dictionnaires personnalisés.

De plus, avec les caractérisations génériques actuelles, nous ne mettons pas en place une caractérisation basée sur la perception des paysages telle qu'elle transparaît dans les Atlas

---

6. Wordnet Libre du Français, <http://alpage.inria.fr/~sagot/wolf.html>

des Paysages. Nous ne pouvons donc envisager de discriminer totalement les unités paysagères selon cet axe. Les travaux menés dans le chapitre 6 montrent toutefois des résultats très encourageants. Pour ce faire, il faudra mener notre caractérisation en utilisant comme dictionnaire l'ontologie de perception des paysages telle qu'elle a été développée.

Troisième partie

**Analyses empiriques**



## Chapitre 5

# Caractérisation du lien entre paysage et urbanisation

### 5.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous caractérisons les paysages, l'étalement urbain et leurs dynamiques en suivant deux méthodologies complémentaires. Nous avons défini une démarche générale qui consiste à identifier des organisations du paysage qui seront favorables à l'étalement urbain au moyen de méthodes automatiques. Il s'agit alors d'être en mesure de discriminer automatiquement des organisations du paysage à une date  $t$  pour lesquelles ont été observé un étalement urbain entre les dates  $t$  et  $t + 1$ .

Le domaine de l'apprentissage automatique supervisé s'intéresse à l'extraction automatique de modèles expliquant une observation par rapport à une autre est une approche dite "discriminante". La démarche générale nécessite d'une part une représentation des données des paysages sur l'état à la date  $t$  et, d'autre part, une information sur l'étalement urbain. Cette dernière est fournie par la télédétection à partir de laquelle nous avons produit une carte d'étalement urbain. Nous avons défini l'utilisation de deux représentations des paysages :

- une représentation des paysages sous la forme de graphes spatiaux,
- l'utilisation d'indices du paysage (e.g. FRAGSTAT (McGarigal *et al.*, 2012)).

### 5.2 Données traitées

Les données fournies par télédétection sont sous la forme d'images raster d'occupation du sol pour trois années d'étude (1990, 2000 et 2010). Ces cartes sont présentées ci-dessous dans la section 5.2.1. On présente ensuite la construction des cartes d'urbanisation utilisées par la suite comme information sur la présence ou non d'urbanisation.

### 5.2.1 Cartes d'occupation du sol

On présente les cartes d'occupation du sol obtenues ci-dessous. Leur résolution spatiale est de 20m. La légende de ces cartes est la suivante<sup>1</sup> :

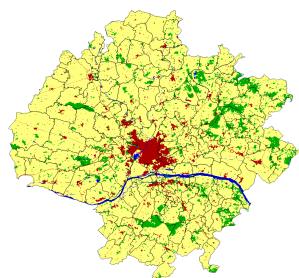
- rouge : surfaces artificialisées
- jaune : surfaces agricoles
- vert : surfaces boisées
- bleu : surfaces en eau

Le nombre réduit de classe facilite leur discrimination à partir des images satellites qui ont permis de les construire. On assure ainsi une bonne précision de la classification (supérieur à 90%).

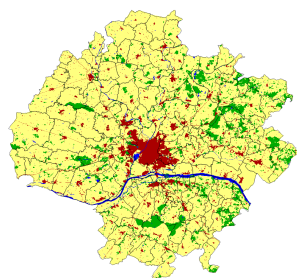
Ces images visualisent grossièrement l'urbanisation sur 20 ans. Pour plus de détails, nous invitons le lecteur intéresser à consulter les cartes disponibles sur le site du projet PAYTAL (<http://www.paytal.fr>) ou sur demande aux auteurs. On peut noter que les échelles spatiales ne sont pas respectées entre les différentes zones urbaines. L'ordre de présentation des aires urbaines est l'ordre alphabétique.

---

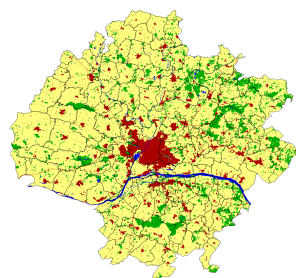
1. Une des 5 classes a été définie spécifiquement pour les plages, mais celles-ci n'étant présentes qu'à Lorient, elles ont été ignorées dans ces analyses.



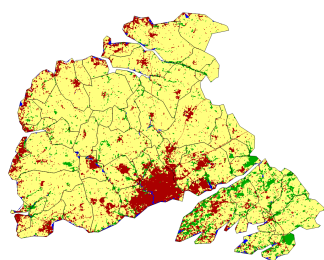
(a) Angers 1990



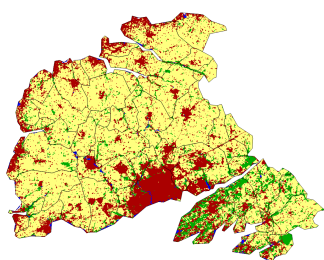
(b) Angers 2000



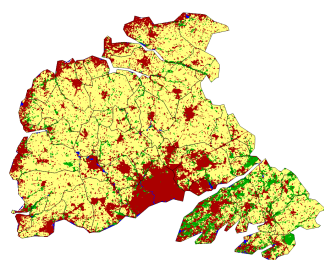
(c) Angers 2010



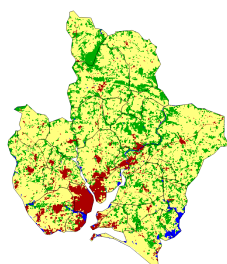
(e) Brest 1990



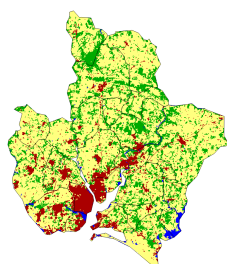
(f) Brest 2000



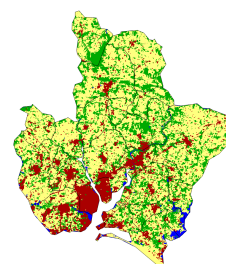
(g) Brest 2010



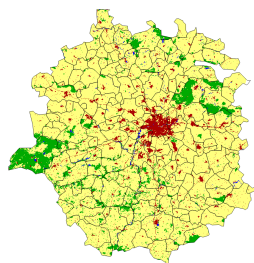
(h) Lorient 1990



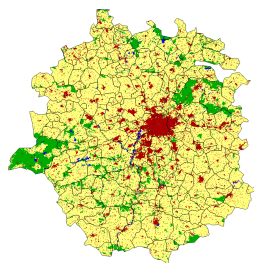
(i) Lorient 2000



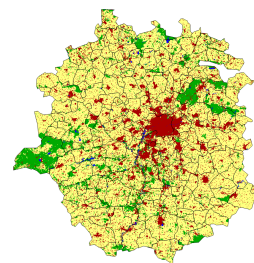
(j) Lorient 2010



(k) Rennes 1990



(l) Rennes 2000



(m) Rennes 2010

FIGURE 5.1 – Occupation du sol dans les 4 aires urbaines

## 5.2.2 Calcul des cartes d'urbanisation

Dans tout ce document, on distingue une **surface artificialisée** des **surfaces urbanisées**. Une surface (ou un pixel) est artificialisée lorsque, à une date  $t$ , l'occupation du sol est classée comme artificielle – principalement des route et bâtis). Une surface est dite urbanisée lorsqu'il y a eu une transformation d'un état non-artificialisé en un état artificialisé. L'urbanisation d'une surface désigne donc une transformation entre deux dates alors que l'"artificialité" désigne un état à une date donnée.

Une carte d'urbanisation entre deux dates est calculée par une transformation pixel à pixel. Un pixel (*i.e.* une localisation donnée) est "urbanisé" lorsqu'il n'était pas artificialisé à la date la plus ancienne mais qu'il était artificialisé à la date la plus récente. Il s'agit donc d'une carte binaire.

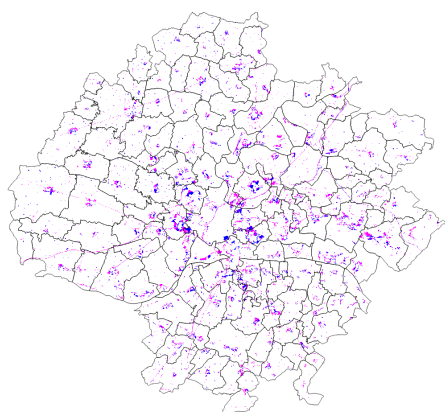
En particulier, toute surface déjà artificialisée n'est pas considérée comme urbanisée. On ne distingue pas non-plus si l'urbanisation se fait au dépend de la forêt, de l'eau ou de surface cultivées.

D'autre part, on ne considère que des changements vers l'urbanisation. On aurait également pu prendre en compte d'autres modifications du paysage (*ex* : transformation des surfaces agricoles en forêts), mais nous nous sommes focalisés sur cette transformation. On peut finalement noter que les surfaces "désurbanisées" ne sont pas représentées dans cette carte.

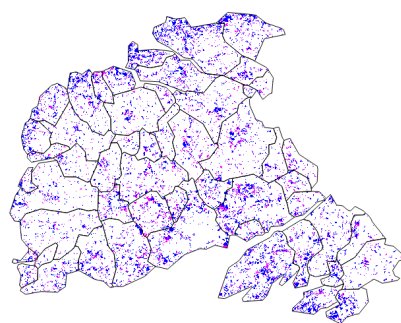
Nous avons fait le choix d'exprimer le plus simplement possible le phénomène d'urbanisation pour mieux le mettre en évidence dans les analyses statistiques. La suite des traitements statistiques ne dépend pas de l'utilisation de cartes binaires et des cartes d'urbanisations alternatives, plus détaillées, pourraient être construites et analysées. Dans le cas extrême, il aurait été possible de construire une carte caractérisant tous les types de transformation d'occupation du sol possible. Avec simplement 5 classes d'occupation du sol, il existe  $5 \times 5 = 25$  transformations possibles de l'occupation du sol. Une telle carte de transformation aurait été très découpée et difficile à analyser.

Les images de la Figure 5.2 donnent les cartes d'urbanisation entre 1990 et 2010 pour les quatre aires urbaines. Chaque pixel mauve correspond à une zone urbanisée entre 2000 et 2010, tandis que les pixels bleus indiquent les zones urbanisées entre 1990 et 2000. Le calcul d'urbanisation ne prenant en compte que les pixels qui deviennent urbanisés, aucun pixel mauve ne masque un pixel bleu. De nouveau, les échelles spatiales ne sont pas respectées entre les différentes zones urbaines.

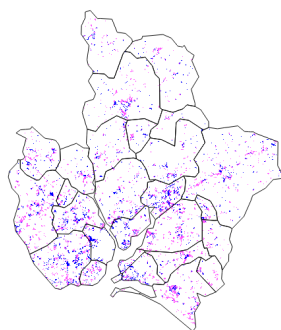
Ces cartes font apparaître des "tâches" d'urbanisation qui peuvent se caractériser, comme pour les occupations du sol, par leur composition et leurs configurations. Les tâches d'urbanisation de grande taille correspondent aux pourtours des villes (apparition de lotissement



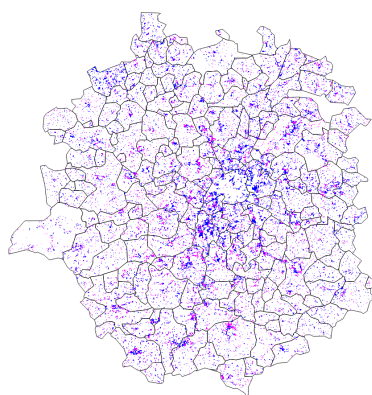
(a) Angers



(b) Brest



(c) Lorient



(d) Rennes

FIGURE 5.2 – Carte d'urbanisation entre 1990 et 2000 (bleu) et entre 2000 et 2010 (violet) pour les 4 aires urbaines. Les traits noirs délimitent les communes des aires urbaines.

ou développement des zones commerciales péri-urbaines), et l'urbanisation en campagne, plus diffus.

Dans le cas d'Angers, on observe une urbanisation peu compacte mais plutôt poly-nucléaire. Les différentes communes aux alentours d'Angers ont connus une urbanisation importante, mais il existe peu de connectivité entre cette urbanisation et la péri-urbanisation d'Angers. On constate que l'attractivité de la ville conduit à une urbanisation des villes jusqu'à des distances importantes du centre ville. Cette urbanisation semble daté majoritairement de 2000 à 2010.

Le cas de Rennes semble correspondre plus à une urbanisation compacte autour de la ville principal. Cette urbanisation compacte a eu lieu date majoritairement entre 1990 et 2000. L'urbanisation entre 2000 et 2010 est beaucoup plus diffus. Les axes de circulations vers Nantes et Saint-Malo se devinent au travers de tâches d'urbanisation de tailles plus importantes.

Le cas de Lorient illustre également la prédominance de l'effet d'un axe routier (axe Lorient-Nantes) sur l'urbanisation. Dans le cas de cette agglomération, l'urbanisation selon cet axe s'est majoritairement fait entre 2000 et 2010. Le reste de l'urbanisation est assez diffus, peu connecté au centre ville de Lorient, mais plutôt attaché à des communes de moindre taille.

Le cas de Brest montre une urbanisation qui mélange l'attractivité pour le centre urbain et celle pour le bord de mer principalement entre 1990 et 2000. L'urbanisation entre 2000 et 2010 est très diffuse et de moindre importance par rapport à celle entre 1990 et 2000.

### **5.3 Vers une méthodologie d'analyse des paysages par des graphes spatiaux**

On s'intéresse à mettre en évidence des organisations du paysage, incluant une dimension spatiale riche. Les représentations des paysages sous la forme d'un graphe spatiaux (ensemble de nœuds geo-référencés liés par des arcs) permet de représenter à la fois les dimensions spatiales et les informations relatives aux éléments du paysage au travers d'annotations des nœuds et des arcs (Dale & Fortin, 2010; Zetterberg *et al.*, 2010). Dans un travail bibliographique préliminaire, nous avons identifié un récent intérêt pour ce type de représentation. Néanmoins, l'usage fait de ces graphes reste assez peu développé. Nous cherchons donc à mettre en place une méthode permettant de mener une analyse discriminante sur des graphes spatiaux.

Si le domaine de l'apprentissage discriminant est bien connu dans le cadre de données attributaires, il est moins balisé dans le cadre de données structurées, en particulier pour les graphes spatiaux. L'importance de l'information de structure dans les données est pourtant primordial pour représenter l'organisation des paysages avec leur dimension spatiale.

Une étude bibliographique préliminaire a permis de mettre en évidence 4 grandes approches permettant de réaliser un apprentissage discriminant de graphes :

- les méthodes basées sur la programmation logique inductive (Malerba, 2008),
- les méthodes basées sur les algorithmes de fouille de motifs fréquents dans les graphes Fan *et al.* (2008).
- les méthodes basées sur les arbres de décision (Huan *et al.*, 2004; Nguyen *et al.*, 2006),
- les méthodes à noyau permettant de généraliser l'utilisation de méthodes d'apprentissage classique comme les SVM à des graphes en modifiant les fonctions noyau (Gaüzère *et al.*, 2012; Borgwardt, 2007).

### 5.3.1 Préparation des données

Les analyses spatiales axées sur les méthodes de fouille de graphes nécessite d'avoir construit des graphes représentant le paysage. Deux outils ont été développés pour construire des graphes à partir des images d'occupation du sol de la télédétection :

- un outil informatique projetant les informations d'occupations du sol sur le cadastre. Chaque parcelle du cadastre se voit ainsi attribuer une occupation du sol en fonction de la classe majoritaire qu'elle contient. Le résultat de ce traitement est une image vectorielle tel que figuré par la figure 5.3.
- Un outil informatique construisant un graphe spatial à partir des parcelles de cadastre contenant les informations d'occupation du sol (voir figures 5.4 et 5.5).



FIGURE 5.3 – Occupation du sol à l'échelle de la parcelle sur la zone urbaine de Lorient



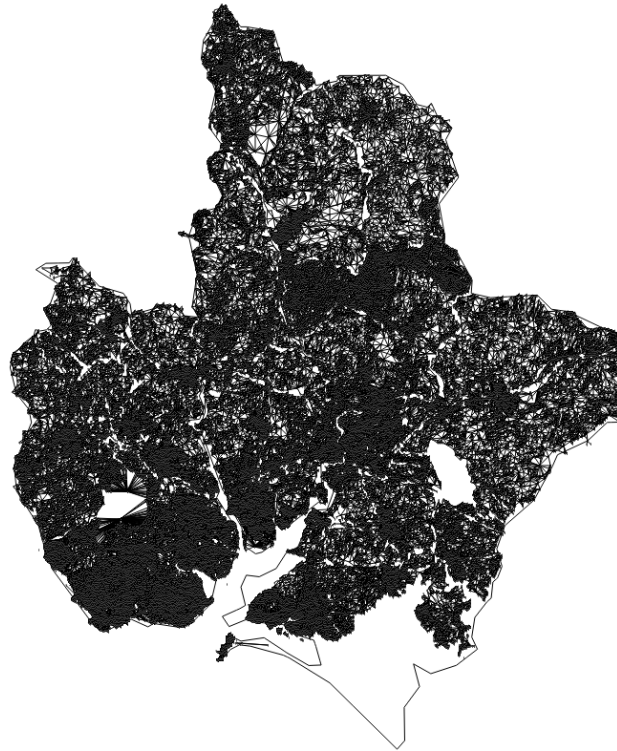


FIGURE 5.4 – Graphe représentant l'occupation du sol sur la zone urbaine de Lorient

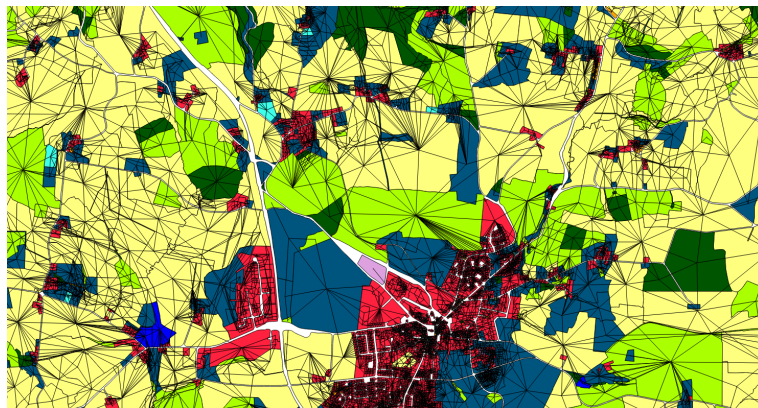


FIGURE 5.5 – Graphe représentant l'occupation du sol sur la zone urbaine de Lorient



Les choix d'utilisation des parcelles cadastrales et des occupations du sol ont été effectués en rapport aux données disponibles pour le projet. Si de nouvelles informations s'avèrent pertinentes à intégrer, elles pourront l'être lors de l'application de la méthode aux zones urbaines. De même le choix d'utiliser uniquement les parcelles cadastrales comme éléments structurant du paysage pourrait être discuté.

Lors de la seconde étape de la construction du graphe d'autres informations géo-référencées issues d'autres sources de données pourront être incluses. Le développement de ces outils conforte le bon déroulement de la suite de cette partie du projet.

### 5.3.2 Programmation Logique Inductive

La PLI (Muggleton & Raedt, 1994) est une technique d'apprentissage supervisé qui permet d'induire des hypothèses, ou règles, à partir d'exemples. Ces exemples sont étiquetés positifs ou négatifs selon qu'ils représentent ou non des observations du concept à inférer. La PLI permet en particulier de dépasser certaines limites des formalismes de représentation des connaissances dans les systèmes d'apprentissage en utilisant la logique du premier ordre. Cette modélisation permet de rendre compte plus naturellement des relations entre objets. La PLI met en œuvre l'induction en logique des prédicats qui est utilisée comme langage de représentation des exemples (faits Prolog) et des hypothèses (clauses de Horn). L'inférence de nouvelles règles correspond à une recherche de clauses dans un espace organisé selon une relation de généralité. Les algorithmes de recherche descendante, comme FOIL (*First-Order Inductive Learner*), partent d'une clause générale vers des clauses plus spécifiques en utilisant des opérations comme l'ajout de littéraux à la clause de départ ou l'application de substitution pour transformer des variables en constantes ou pour unifier plusieurs variables. Les clauses ainsi générées sont ensuite testées sur les exemples de façon à généraliser le maximum d'exemples positifs et peu ou pas d'exemples négatifs.

En PLI, la taille de l'espace de recherche rend nécessaire l'utilisation d'heuristiques afin de guider le parcours de l'espace au cours de la recherche. Un type d'heuristique très utilisé concerne les fonctions d'évaluation, qui mesure en quelque sorte l'utilité de chaque clause examinée. L'utilité d'une hypothèse peut s'exprimer par la quantité d'information apportée, par la compression de la base de connaissance réalisée ou par son pouvoir de discrimination comme l'heuristique Gain de FOIL (Quinlan & Cameron-jones, 1993).

L'algorithme 1 décrit le principe de l'inférence de règles par FOIL (Quinlan & Cameron-jones, 1993; Trépos, 2008).

---

**Algorithme 1** : Algorithme FOIL

---

**Entrées** : Ensemble d'exemples positifs  $E_+$  et négatifs  $E_-$

**Résultat** : Ensemble  $S$  de règles

```
1  $S \leftarrow \emptyset$ 
2  $Pos \leftarrow E_+$ 
3 tant que  $Pos \neq \emptyset$  faire
4    $Neg \leftarrow E_-$ 
5    $r \leftarrow$  nouvelle règle initialisée
6   tant que  $Neg \neq \emptyset$  faire
7     “Trouver” le “meilleur” littéral à ajouter à  $r$ 
8     Retirer de  $Neg$  les exemples non couverts
9   fin
10  Ajouter  $r$  à  $S$ 
11  Retirer de  $Pos$  les exemples couverts
12 fin
```

---

Le littéral à ajouter présente un intérêt soit parce qu'il introduit une nouvelle variable (un nouvel attribut), soit parce qu'il permet de bien discriminer les exemples négatifs des exemples positifs. La formalisation de "bien discriminer" se fait par la définition d'une fonction de gain prenant en paramètres le nombre d'exemples couverts selon que le littéral soit appliqué ou non, que ces exemples soient positifs ou non.

L'utilisation de la PLI pour les données spatiales permet une vue plus claire que la structure de graphe multi-étiqueté. La représentation relationnelle est plus expressive, elle permet par exemple d'exploiter des relations implicites, différents niveaux de granularité dans les relations (Malerba, 2008).

```
zone(z0) .
centre(z0,5,6) .
parcel(p0) .
centre(p0,2,2) .
inzone(z0,p0) .
parcel(p1) .
centre(p1,4,4) .
inzone(z0,p1) .
adjacent(p0,p1) .
adjacent(p1,p0) .
parcel(p2) .
centre(p2,7,7) .
inzone(z0,p2) .
adjacent(p1,p2) .
```

```

adjacent(p2,p1).
locbetween(p1,p0,p2).
tree(t0).
centre(t0,10,4).

distance(A,B,D) :- centre(A,Xa,Ya), centre(B,Xb,Yb), X2 is Xa-Xb,
Y2 is Ya-Yb, D is sqrt(X2*X2+Y2*Y2).

```

L'exemple Prolog présente la déclaration d'une zone  $z_0$ , de parcelles,  $p_0$ ,  $p_1$  et  $p_2$ ; incluses dans cette zone (relation *inzone*), quelques relations entre ces parcelles (adjacence de  $p_0$  et  $p_1$ , adjacence de  $p_1$  et  $p_2$ , le fait que  $p_1$  soit située entre  $p_0$  et  $p_2$ ), d'un arbre  $t_0$ , la définition d'une règle exprimant la distance entre deux entités spatiales (distance entre deux centres, comme le centre de deux parcelles, le centre d'une parcelle et le centre d'une zone. . .).

La figure 5.6 illustre une représentation de cet exemple sous une forme graphique. Seule l'information d'adjacence peut être visualisée et la relation ternaire (*locbetween*) ne peut être ainsi représentée. Les coordonnées des centres seraient des attributs des nœuds et la relation de distance se traduirait par des arêtes entre toutes les paires de nœuds étiquetées par la valeur de la distance.

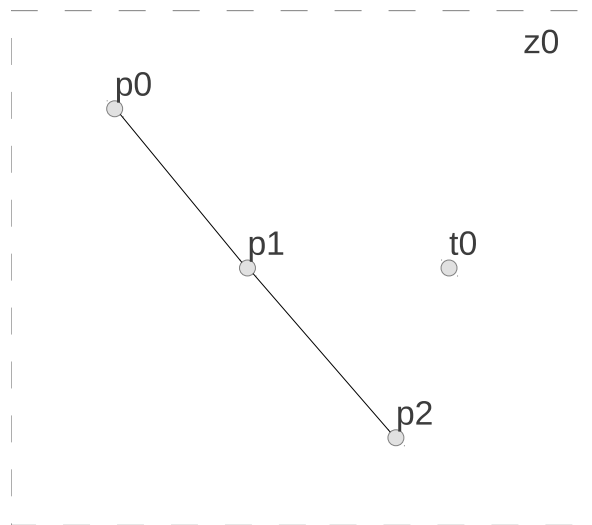


FIGURE 5.6 – Graphe équivalent au Prolog. Un arc indique la relation d'adjacence

La PLI a été utilisé dans des problématiques de classification supervisée de données à caractère spatial : Chelghoum *et al.* (2006) ont implémenté S-TILDE, inspiré de TILDE (*Top-down Induction Logical DEcision tree*) de Blockeel & De Raedt (1998), une méthode de classification par arbre de décision basée sur la logique du premier ordre. S-TILDE a été utilisé pour une classification supervisée d'emplacements de coquillages contaminés (ou non) dans la lagune de Thau. Trépos (2008) a travaillé sur différentes techniques de PLI pour un système d'aide à la gestion des activités agricoles et des aménagements sur un bassin versant.

Frank *et al.* (2009) ont utilisé la PLI dans un cadre de classification spatiale pour déterminer des règles sur les boutiques, centres commerciaux, etc. qui ont été victimes de vol. Leur algorithme, UnMASC (*Unified Multifeature Aggregation based Spatial Classifier*), repose sur FOIL, méthode générale d'inférence de règles. UnMASC inclue des agrégats, *i.e.* des méta-prédicats permettant d'exploiter une fonction sur les mêmes attributs d'un ensemble d'objets, par exemple, exprimer la superficie moyenne des parcelles d'une zone).

L'introduction d'agrégats permet d'avoir des règles qui font appels à de nombreux attributs d'un même exemple de manière synthétique, ce qui confère une plus grande généralité des règles : si `boutique(B), collier(B, C), prix(B, P), P>500` signifie que le prix d'un collier de la boutique considérée est supérieur à 500\$, `boutique(B), min(P, collier(B, C), prix(B, P), MP), MP>500` signifie que le prix de tous les colliers de la boutique est supérieur à 500\$ (car le prix minimum l'est).

Pour plus d'efficacité, UnMASC parallélise l'évaluation des gains des littéraux supplémentaires. Évaluer une règle consiste à déterminer son gain. Les règles peuvent être évaluées en parallèle car ces calculs sont indépendants, ce qui réduit le temps d'exécution. Les expériences de Frank *et al.* (2009) montrent que l'implémentation parallèle sur une machine à huit processeurs est cinq fois plus rapides que l'implémentation série de l'algorithme.

Bien que le point de vue initial sur les données spatiales soit celui d'une structuration en graphes, les approches basées sur la PLI, qui étendent facilement la sémantique des différents composants des graphes (nœuds, arêtes) à l'aide de de moult relations, sont plus convaincantes au niveau de l'expressivité et de l'interprétabilité : vérifier une règle est généralement plus simple que retrouver un sous-graphe.

L'approche qui a été retenue est une adaptation de UnMASC (Frank *et al.*, 2009) à notre problématique. Deux critères, l'expressivité de la méthode (surtout avec l'introduction d'agrégats) et son interprétabilité, ont conduit à ce choix.

### 5.3.3 Construction d'un jeu d'apprentissage

Cette section explique la construction d'un jeu d'exemples d'apprentissage par la PLI à partir des images d'occupation du sol.

Les images d'occupation du sol pour les trois dates sont tout d'abord vectorisées à l'aide du cadastre de 2010. À chaque parcelle ainsi délimitée est attribuée son occupation du sol selon l'occupation majoritaire du sol dans la parcelle cadastrale considérée (voir figure 5.3).

Le cadastre numérisé de 2000 n'a pas pu être récupéré, d'où l'utilisation du cadastre de 2010 pour délimiter des parcelles sur les images de 2000. Même si le cadastre n'a pas subi des modifications drastiques en dix ans, cette utilisation peut engendrer quelques aberrations,

comme la présence d'un lotissement récent qui transforme un champ en 2000 en un ensemble de petites parcelles.

À cette étape, les données sont également enrichies avec des informations qui ont pu être ajoutées automatiquement à l'aide d'autres données librement disponibles (dont la base de données parcellaire de l'IGN), telles que la spécification de certaines zones en écoles, en parcs naturels ou en zones commerciales. La télédétection n'ayant pas fourni ces informations complémentaires, seules les types d'occupation du sol ont été utilisées.

La construction d'un jeu d'apprentissage pour la PLI consiste :

1. à traduire les informations géographiques sous une forme logique (propositionnelle),
2. à construire une base d'exemples qui va décomposer l'espace en un ensemble d'exemples,
3. à attribuer une classe à chacun de ces exemples : positif, si il y a eu urbanisation et négatif dans le cas contraire.

Dans le reste de cette section, on commence par présenter la "propositionnalisation" des données et la création d'une base d'exemple. On revient ensuite sur l'attribution d'une classe à ces exemples.

### **Construction de la base d'exemples**

Un grand graphe d'adjacence est construit à partir des images vectorisées : les nœuds représentent les parcelles et sont munis des attributs déjà calculés (en particulier, le type d'occupation du sol), ainsi que des attributs ajoutés tels que le périmètre et l'aire de la parcelle. Les arêtes désignent les relations entre les parcelles : adjacence, distance entre les barycentres des parcelles, ...

Le graphe construit précédemment ne peut pas être utilisé directement pour la classification. Pour l'apprentissage supervisé, il est nécessaire de construire un ensemble de zones dont certaines représentent des exemples positifs et d'autres des exemples négatifs. Deux questions se posent alors : comment segmenter les zones et attribuer une classe (positive ou négative) aux zones obtenues.

Plusieurs types d'extraction de zones ont été envisagés :

- faire un pavage de l'espace, et définir une zone comme l'ensemble des parcelles incluses dans un élément du pavage.
- sélectionner une parcelle et considérer toutes les parcelles situées dans un certain rayon du centre de la parcelle sélectionnée.
- sélectionner un point et considérer toutes les parcelles situées dans un certain rayon de ce point.

Dans tous les cas, on obtient pour chaque zone un sous-graphe dont les nœuds sont les nœuds associés aux parcelles que la zone contient et les arêtes sont toutes les arêtes entre les différentes paires de nœuds du sous-graphe qui sont définies dans le graphe principal.

Par la suite, on a utilisé la seconde approche qui associe facilement une zone exemple à une classe (urbanisation vs non-urbanisation).

### Urbanisation vs non-urbanisation des parcelles

Le procédé donne aux parcelles un degré d’“urbanisation” compris entre -1 et 1 portant sur la différence de surface urbanisée entre 2000 et 2010 obtenu à partir des images d’urbanisation :

$$d_{urb} = \frac{n_{pixels\ urbanisés\ en\ 2010} - n_{pixels\ urbanisés\ en\ 2000}}{n_{pixels\ urbanisés\ en\ 2010} + n_{pixels\ urbanisés\ en\ 2000}}$$

Ce degré donne la classe de la parcelle : une parcelle de 2000 est classée positivement (*i.e.* considérée comme urbanisée en 2010) si  $d_{urb} > 0$ . Le degré est normalisé pour être inchangé selon l’échelle considérée (car on considère des nombres de pixels). La normalisation choisie évite d’avoir des valeurs considérées comme nulles car trop petites (par exemple si la normalisation était faite par rapport à l’aire de la parcelle).

L’idée de la formalisation de ce degré est de pouvoir donner les classifications suivantes si les parcelles n’avaient qu’un état binaire urbaine/non-urbaine :

- urbaine en 2000 et urbaine en 2010  $\Rightarrow$  classe  $\ominus$
- urbaine en 2000 et non urbaine en 2010  $\Rightarrow$  classe  $\ominus$
- non urbaine en 2000 et urbaine en 2010  $\Rightarrow$  classe  $\oplus$
- non urbaine en 2000 et non urbaine en 2010  $\Rightarrow$  classe  $\ominus$

Différentes possibilités ont été évoquées pour l’attribution des classes aux zones ainsi choisies :

- la classe de la majorité des parcelles (avec éventuellement pondération par les aires)
- la classe de la parcelle centrale (celle qui contient le centre de la zone)

Dans nos expérimentations, nous avons choisi de définir les zones-exemples par une parcelle centrale (seconde méthode de la section précédente) et de leur attribuer la classe de cette parcelle centrale.

L’ensemble de ces sous-graphes est ensuite transcrit automatiquement sous forme logique dans un programme Prolog. On illustre ci-dessous la représentation logique obtenu pour le graphe de la figure 5.7.

```
instance(g1).
positif(g1).
```

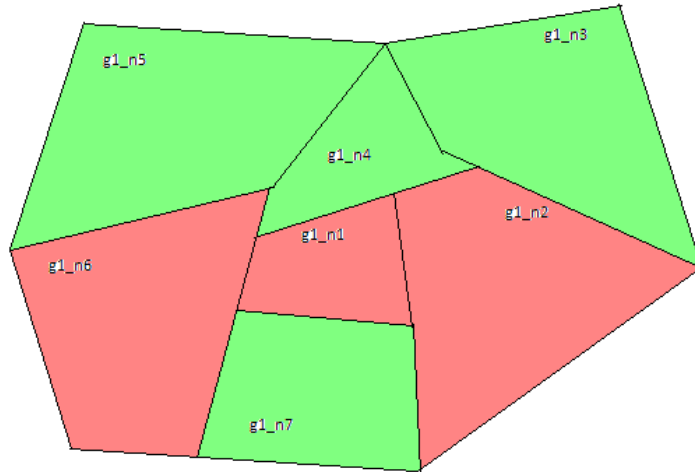


FIGURE 5.7 – Exemple de zone à représenter en Prolog

```

inzone(g1,g1_n1).
inzone(g1,g1_n2).
inzone(g1,g1_n3).
inzone(g1,g1_n4).
inzone(g1,g1_n5).
inzone(g1,g1_n6).
inzone(g1,g1_n7).
touches(g1_n1,g1_n2).
touches(g1_n2,g1_n1).
touches(g1_n1,g1_n4).
touches(g1_n4,g1_n1).
touches(g1_n1,g1_n6).
touches(g1_n6,g1_n1).
touches(g1_n1,g1_n7).
touches(g1_n7,g1_n1).
touches(g1_n2,g1_n3).
touches(g1_n3,g1_n2).
[...]
cdistance(g1_n1, g1_n2, 123).
cdistance(g1_n2, g1_n1, 123).
[...]
area(g1_n1, 45).
[...]
perimeter(g1_n1, 112).
[...]
land_use(g1_n1,1)// 1 = sol artificiel
land_use(g1_n2,1).
land_use(g1_n3,3)// 3 = prairie

```

### 5.3.4 Inférence de règles

Suite à l'étude bibliographique, il a été décidé de concevoir une application qui génère des règles classant les exemples. Les règles obtenues sont exprimées dans un formalisme logique similaire à celui illustré sur les données.

Une implémentation d'un algorithme d'extraction automatique des règles les plus discriminantes a été réalisé en s'inspirant de l'algorithme UnMASC précédemment cité (algorithme FOIL : *first order inductive learner*). Le principe de l'algorithme est de générer les règles de manière incrémentale, littéral par littéral. Le choix du littéral à ajouter à la règle en cours se fait par génération des littéraux possibles, selon les prédicats disponibles et les variables existantes dans la règle en cours, puis l'un d'eux est sélectionné selon le gain apporté.

Le gain d'une extension  $R'$  de  $R$  se calcule de la manière suivante :

$$gain(R, R') = s \times \left( \log \frac{p_{R'}}{t_{R'}} - \log \frac{p_R}{t_R} \right)$$

où  $t_{R/R'}$  désigne le nombre de tuples qui satisfont  $R/R'$ ,  $p_{R/R'}$  le nombre de tuples correspondant à des instances positives qui les satisfont,  $s$  le nombre de tuples qui satisfont  $R$  et qui peuvent être étendus en des tuples qui satisfont  $R'$ .

### Outils et implémentation

Afin de pouvoir mettre en place l'architecture parallèle de l'algorithme, l'un des langages choisis est C++ en sa version C++ 11, munie d'une bibliothèque thread permettant une implémentation efficace simplement.

Afin de gérer la partie logique du travail, le langage Prolog intervient également naturellement. Il existe plusieurs implémentations de Prolog. Devant le besoin d'inclure du code Prolog à l'intérieur du code C++, l'implémentation choisie devait permettre une interface entre C++ et Prolog. Trois outils, SICStus Prolog, SWI-Prolog et YAP (*Yet Another Prolog*), ont été testés. Les critères de choix ont été le respect d'une norme Prolog (ISO-Prolog, que les trois implémentations testées reconnaissent), les performances du système, la disponibilité (licence publique/privée) et l'interfaçage avec le C++ Demoen & Nguyen (2001). Ainsi, pour ces trois derniers points, le choix s'est porté sur YAP.

### 5.3.5 Expérimentations

Les expérimentations ont été menées sur l'aire urbaine de Lorient.

#### Conditions

Lors des tests, l'ensemble des prédicats suivant a été utilisé :

- `inzone/2` : `inzone(G, X)` signifie que la parcelle  $X$  est dans l'instance  $G$



- `touches/2` : `touches(A, B)` signifie que les parcelles  $A$  et  $B$  sont adjacentes
- `area/2` : `area(X, A)` signifie que l'aire de la parcelle  $X$  vaut  $A$
- `land_use/2` : `land_use(X, N)` décrit l'occupation du sol de la parcelle  $X$  avec l'équivalence pour  $N$  :
  1. sol artificiel
  2. zones agricoles
  3. végétation semi-naturelle/prairie
  4. eau
  5. forêt de conifères
  6. forêt de feuillus
  7. kaolin/sol nu clair
  8. sol nu
  9. estran
  10. plage
  11. voie de communication
- `perimeter/2` : `perimeter(X, P)` signifie que le périmètre de la parcelle  $X$  vaut  $P$
- `cdistance/3` : `cdistance(X, Y, D)` signifie que la distance entre les centroïdes des parcelles  $X$  et  $Y$  vaut  $D$ .
- `</2` : `<(A, B)` si  $A < B$

### Quelques règles

Avec les prédicats de 5.3.5, des règles peuvent être générées à partir d'un jeu d'exemples. Néanmoins, les résultats obtenus ne sont pas très satisfaisants dans l'ensemble. Une règle générée couvre souvent un seul ou deux exemples positifs. Les dernières règles générées couvrent parfois beaucoup d'exemples négatifs. Par exemple, pour un jeu de 200 instances, dont 70 positives, 41 règles ont été générées et la dernière règle couvrirait 70 instances négatives pour 6 instances positives alors non couvertes par les règles précédentes.

`instance(G), inzone(G, X0), land_use(X0, 3), cdistance(X0, X4, 21), land_use(X4, 3)` ne vérifiait qu'un exemple positif. Cette règle signifie que le sous-graphe comporte deux parcelles de prairies dont les centroïdes sont séparés de 21 (unités arbitraires).

`instance(G), inzone(G, X0), land_use(X0, 3), cdistance(X0, X4, 31), touches(X0, X4), land_use(X4, 1)` vérifiait deux exemples positifs. Cette règle signifie que le sous-graphe comporte une parcelle de prairie adjacente à une parcelle urbaine, et les centroïdes de ces deux parcelles sont distants de 31.

On remarque également que l'opération de réduction de règle est à affiner : s'occuper uniquement de la queue de la règle n'est pas suffisant. Par exemple, dans `instance(G), inzone(G,`

`X0), land_use(X0, 1), cdistance(X0, X6, 43), land_use(X6, 1), cdistance(X0, X10, 30), cdistance(X10, X6, X12), land_use(X10, 1)`, le littéral `cdistance(X10, X6, X12` n'apporte pas d'information.

### 5.3.6 Discussions

Les paysages sont des organisations spatiales d'éléments paysagers : ils peuvent être représentés par des graphes ou par la liste des relations qui les décrit. Lors de ce stage, une approche basée sur la PLI a été choisie afin de répondre à un problème d'apprentissage supervisé : peut-on caractériser les paysages qui vont subir une urbanisation dans l'avenir ? Ce choix a été fait en fonction des critères d'expressivité et d'interprétabilité du modèle. Un algorithme proche de FOIL a été implémenté afin de générer un ensemble de règles répondant à la problématique sur des jeux d'exemples obtenus grâce à une analyse diachronique de cartes de Lorient entre 2000 et 2010. Ces cartes ont subi différents traitements (analyse de la composition du sol, segmentation en parcelles, segmentation en sous-graphe et conversion en programme Prolog) pour servir de jeux d'exemples.

Malgré des performances techniques satisfaisantes (temps de calcul et occupation mémoire), l'implémentation courante produit par contre des résultats peu expressifs à cause du peu de prédicats que l'on admet dans les règles. Il manque notamment les prédicats-agrégats qui résumement des situations, par exemple en imposant un minorant d'un ensemble de distance. La gestion des prédicats s'appliquant sur des paramètres numériques est à améliorer. Il faut encore trouver un moyen de paralléliser l'implémentation malgré le support de Prolog choisi (YAP) afin d'avoir des temps de calculs encore meilleurs.

## 5.4 Entretiens sur l'aire urbaine d'Angers

Dans le but de répondre à la question de l'influence du paysage sur les lieux d'étalement urbain, il nous fallait des précisions supplémentaires que seul un travail de terrain pouvait nous apporter.

Quelles formes prend l'étalement urbain dans l'aire urbaine ? Celles-ci sont-elles différentes selon le paysage ? De plus, les Atlas des Paysages ne donnent que certains aperçus de la réalité puisque là encore il y est fait des choix subjectifs. Comme par exemple ne prendre aucune photo lorsque le temps est couvert ou lorsqu'il pleut.

Ce travail a été mené sur l'aire urbaine d'Angers.

### 5.4.1 Objectifs

L'étude du paysage par les documents déjà existants permet d'approfondir des aspects de manière très poussée, probablement plus qu'en allant sur le terrain (histoire des couches géo-

logiques, événements historiques qui ont donné lieu à telle place ou tel bâtiment). Seulement, pour l'étude du paysage actuel, seule sa vue peut nous permettre de réellement l'appréhender et inévitablement de nous faire notre propre perception des lieux. De plus, dans le cadre de son étude en parallèle d'un processus croissant d'urbanisation du territoire, il devient dès lors indispensable de mener une enquête de terrain.

L'analyse des paysages et des formes d'étalement urbain n'était pas la seule motivation. En effet, si le paysage est lié à la personne qui l'observe, il est donc envisageable que la perception personnelle des décideurs et techniciens de l'aménagement puisse avoir un rôle qui détermine les liens d'influences du paysage sur l'étalement urbain. Ce fut l'une des raisons principale des enquêtes menées à Angers.

Les objectifs initiaux étaient :

- rencontrer des élus et des aménageurs pour connaître leur perception paysagère, le rôle du paysage dans l'aménagement du territoire, l'existence d'une demande paysagère de l'État et de la population, et connaître la politique concernant l'étalement urbain,
- observer, mettre des "images sur des cartes" et se faire une idée réelle des lieux,
- corroborer ou non les indices (objectif annulé suite à l'absence des images classées) et les discours des élus avec la réalité,
- analyser les paysages pour compléter ou valider l'analyse par les indices et les Atlas des Paysages qui ne donnent pas toutes les données.

#### 5.4.2 Méthode d'entretien

Nous avons opté pour un questionnaire à but qualitatif et non quantitatif. Mais cette forme d'entretien permet de la souplesse, de rester le temps disponible des élus et son analyse peut dégager bien plus d'informations et plus particulièrement pour le paysage. En effet, du fait de sa notion longtemps sujette à débat et de l'importance de l'observateur, il nous fallait dès lors obtenir des entretiens amenant des réponses construites sur des points précis, tout en laissant libre cours à l'expression personnelle des interrogés.

Amener des réponses à des sujets très politisés comme la place de l'urbain et son impact sur le territoire n'est pas chose évidente. Celles-ci courent le risque d'être souvent convenues. D'autant plus qu'un questionnaire induit souvent un peu de méfiance chez l'allocutaire. C'est pourquoi nous avons construit le nôtre de manière à apaiser et amener progressivement des réponses plus personnelles. Ils sont d'une importance précieuse car ils en appellent à la perception. Les premières questions sur le paysage jouent alors un rôle déterminant, à la fois pour comprendre le discours au fil des réponses, mais aussi en ayant systématiquement eu pour effet de surprendre et faire sourire l'interlocuteur, amenant alors plus de spontanéité.

Voici ci-dessous le questionnaire semi-directif de base tel qu'il fut utilisé. À ceci s'ajoute parfois quelques questions et remarques en fonction de l'interlocuteur et de nos analyses sur le terrain.

## Questionnaire de l'entretien semi-directif utilisé auprès des élus et autres acteurs de l'aménagement de l'aire urbaine de la ville d'Angers.

1. *Pouvez-vous nous présenter dans les grandes lignes votre formation et votre parcours ?*
2. *Depuis combien d'années travaillez-vous à vos fonctions et pour ce territoire ?*

Les deux premières questions sont là pour nous donner un aperçu de l'interlocuteur : son niveau d'étude, son métier, si pour un élu la politique est sa véritable profession, car les réponses suivantes qu'il donnera changeront indubitablement selon ces critères. Pour comprendre ses réponses, il faut un minimum connaître et comprendre la personne qui les donne.

3. *Comment définiriez-vous le paysage ?*
4. *Si vous deviez donner 5 mots pour définir le paysage, quel seraient-ils ?*
5. *Le paysage change-t-il en fonction de l'observateur ?*

Les questions 3, 4 et 5 se concentrent sur la définition du paysage. Si la Convention européenne du paysage fixe la définition et que théoriquement, son application dans la loi en fait la définition officielle en France, qu'en est-il de la définition d'usage ? Nous verrons que toutes les personnes que nous avons rencontrées avaient leur propre définition. Les 5 mots qu'ils utilisaient ensuite pour le définir étaient parfois diamétralement opposés. Cette 4<sup>e</sup> question, rajoutée par la suite, facilite la comparaison entre les entretiens et sera plus facilement utilisable par l'équipe informatique du projet PayTal. La 5<sup>me</sup> met en relief la subjectivité du paysage.

6. *Si vous deviez donner LE paysage emblématique de votre commune, quel serait-il ?*

Demander de définir le paysage emblématique fait appel au ressenti et à l'identité que l'on se fait d'un territoire. Dans le cadre d'un élu, cette question prend de l'importance puisque cela peut ensuite influencer ses choix politiques.

7. *Est-ce que le paysage est pris en compte dans vos projets d'aménagement ? Pourriez-vous nous expliquer de quelles manières ?*

Interroger l'interlocuteur sur la prise en compte du paysage dans les projets d'aménagement permet ensuite de comparer ses dires avec la réalité. Les réponses des élus tendent d'ailleurs souvent vers l'affirmative tandis que celles des techniciens de l'aménagement dont ce sont la profession ont des réponses plus mitigées.

8. *Est-ce qu'il existe une demande en matière de paysage venant des habitants ? De l'Etat ?*

Lorsqu'on étudie des articles publiés par les ministères, ou bien des ouvrages de Y. Luginbühl, lorsque l'on écoute des discours d'hommes politiques, il y est fait le constat

d'une demande de la population en matière de paysage. Qu'en est-il en réalité ? Cette demande existe-t-elle ou sert-elle d'affiche politique ? Une différence existe-t-il selon l'échelle du territoire, ou selon si celui-ci est urbain ou rural ? La question 7 est censée répondre à ces questionnements. L'interrogation 8 à un but proche, vérifier si les acteurs de l'aménagement ressentent vraiment l'appareil étatique dans les questions de paysages.

9. *Quelle est votre vision de l'étalement urbain en général et dans le cadre de votre territoire ?*

Dans le contexte actuel, l'étalement urbain est décrié, pourtant le phénomène est loin de s'arrêter. Nous avons réussi à avoir des entretiens avec des personnes travaillant à différentes échelles de territoire. Tous ne réagissent pas pareil devant le phénomène, et certaines petites agglomérations comptent sur cet étalement comme nous le verrons dans les discours. D'autres au contraire, le décrient, et pourtant le phénomène continue de se propager sur leur territoire.

10. *Pouvez-vous nous donner un exemple d'étalement urbain que vous jugez réussi ?*
11. *A l'inverse, pouvez-vous nous donner un exemple d'étalement urbain que vous jugez moins réussi ?*

Les deux dernières questions furent modifiées par rapport à ce que nous avions prévu. Elles devaient être « Pouvez-vous nous donner un exemple d'étalement urbain pour lequel le paysage fut pris en compte ? » et « Pouvez-vous nous donner un exemple d'étalement urbain pour lequel le paysage ne fut pas pris en compte ? ».

Nous les avons testé sur les deux premiers entretiens, seulement, elles amenaient forcément une réponse liée au paysage. Mais nous avons pensé que laisser plus de liberté serait plus judicieux pour nos recherches. Avec celles-ci, nous aurions eu systématiquement deux exemples, l'un prenant en compte le dit paysage, l'autre non. Ces nouvelles questions, en laissant plus de libertés, apportent des réponses beaucoup plus enrichissantes.

Les critères de l'étalement « réussi » ou « pas réussi » sont laissés à l'interlocuteur. Libre à lui de les définir et de nous les expliquer. Cela permet de savoir réellement si le paysage entre en compte dans les critères d'aménagement. Si nous avions gardé la première forme de l'interrogation, nous aurions eu des réponses axées vers le paysage et le risque eut été de déduire trop hâtivement son rôle majeur dans les caractéristiques de jugement de l'étalement urbain et dans la conception actuelle des projets d'aménagement.

Or, avec le remaniement des deux dernières questions, chacun définit son étalement urbain réussi ou pas. Cela nous apporte, d'une, les critères des interlocuteurs, et de deux, la place réelle du paysage dans leur vision des projets d'aménagement. Si celui-ci

est systématiquement employé comme argument que ce soit pour la réussite ou l'échec, nous pouvons en conclure le rôle d'importance qu'il tient à leurs yeux. En opposition, si tout au long de l'entretien, l'importance du paysage nous est vantée mais que finalement, dans tous les exemples répondant aux questions 11 et 12, le paysage n'apparaît jamais, nous pouvons pondérer le propos.

### 5.4.3 Liste des entretiens

#### Entretiens avec des élus

— **Monsieur Jean-Luc Rotureau**

- Conseiller Général du Maine-et-Loire, Vice-président à l'urbanisme de la communauté d'agglomération Angers Loire métropole,
- Adjoint au Maire de la ville d'Angers, chargé de l'urbanisme et du logement.
- Entretien téléphonique réalisé le 13/06/2013. Durée : 20 minutes.

— **Monsieur Jean-Louis Gascoin**

- Vice-président à l'aménagement et au développement durable des territoires de la communauté d'agglomération Angers Loire
- Métropole,
- Maire de la Membrolle-sur-Longuenée.
- Entretien téléphonique réalisé le 13/06/2013. Durée : 40 minutes.

— **Monsieur Christophe Dilé**

- Président de la communauté de communes Région de Chemillé, Maire de Neuvy-en-Mauges.
- Entretien réalisé le 02/07/2013 à la mairie de Chemillé. Durée : 1 heure et 30 minutes.

— **Monsieur Yves Soupaux**

- Maire de Saint-Sulpice-sur-Loire
- Entretien réalisé le 03/07/2013 à la mairie de Saint-Sulpice-sur-Loire. Durée : 1 heure.

— **Monsieur Dominique Tertrai**

- Maire de Denée.
- Entretien réalisé le 04/07/2013 à la mairie de Denée. Durée : 2 heures.

#### Techniciens ou Ingénieurs

— **Monsieur Jérôme Goulean**

- urbaniste et paysagiste,

- responsable de la partie paysage et biodiversité à la communauté d’agglomération Angers Loire Métropole.
- Entretien réalisé le 01/07/2013 à l’Hôtel d’agglomération. Durée : 1 heure.
  
- **Madame Fabienne Guery**
- chargé de l’aménagement durable à la Direction Départementale des Territoires
- Entretien téléphonique réalisé le 16/07/2013. Durée : 1 heure.
  
- **Monsieur Bruno Letellier**
- directeur du Conseil d’architecture, d’urbanisme et de l’environnement (CAUE) du Maine-et-Loire.
- Entretien téléphonique réalisé le 01/08/2013. Durée : 20 minutes.

#### 5.4.4 Conclusions

L’étalement urbain aujourd’hui combattu modifie l’occupation des sols et tend à menacer l’environnement de manière directe, en réduisant les espaces semi-naturels et en engendrant des nuisances environnementales supplémentaires, mais également de manière indirecte, en fragmentant ces mêmes espaces et en réduisant ainsi la biodiversité.

S’il est communément admis qu’il faut redéfinir des rythmes de croissances à des échelles plus modérées, dans les faits, les changements ne se font que peu sentir sur le terrain puisque l’étalement urbain est encore plus fort dans l’aire urbaine de la commune d’Angers qu’il ne le fut dans les décennies passées. Les formes des extensions urbaines ne sont pas denses, et elles demeurent toujours extrêmement consommatrices d’espace.

En changeant l’occupation du sol, l’accroissement des zones urbaines fait également évoluer les paysages. L’étude de celui-ci en tant que créateur lui-même de processus affectant l’étalement urbain permet d’aborder ces phénomènes autrement, en se servant non pas du paysage comme une clef de lecture et un élément subissant mais comme un élément lui-même générateur de processus de mutations pouvant influencer l’étalement urbain.

S’intégrant à l’ensemble de la recherche du projet PAYTAL, le travail effectué détermine des liens entre le paysage et la valeur qui lui est attribuée, et les trajectoires d’occupation du sol.

Les paysages de Loire protégés par exemple, limitant les extensions urbaines et imposant des contraintes en terme de bâti, furent préservés de par leur paysage et ses aspects (occupation du sol, dynamiques passées et actuelles, perceptions culturelle et personnelle).

Le paysage et la perception qu’en ont les populations et leurs élus peuvent influencer les actions politiques. Les anciennes ZPPAUP instaurées en 1993 (zones de protection du patri-

moine architectural, urbain et paysager) devenues AVAP depuis le Grenelle de 2010 (aire de mise en valeur de l'architecture et du patrimoine) en sont un exemple. Si le mot paysage a disparu de ce droit de l'urbanisme, ces périmètres définis par les communes permettent de protéger des zones jugées comme devant l'être. Le paysage demeure l'une des causes principales d'établissement d'une AVAP. La commune de Denée a ainsi mis en place des ZPPAUP sur son territoire pour le préserver et empêcher la construction de nouveaux bâtis.

La qualité exceptionnelle des paysages a conduit également à la constitution du Parc Naturel Régional Loire Anjou Touraine, et au classement par l'Unesco de la vallée de la Loire en patrimoine mondial de l'humanité au titre des "paysages culturels vivants".

Les dispositions prises dans ces conditions ont un fort impact sur l'occupation du sol et sa conservation. L'urbanisation se fait de manière plus contrôlée sur ces territoires, avec une intégration au paysage définie en amont.

L'étude des paysages sur des proportions plus fines pourrait s'approfondir en parallèle d'une typologie plus différenciée des formes urbaines. L'échelle correspondrait à des paysages de quelques hectares seulement, et en les analysant de la manière la plus détaillée possible (angles de vue ouverts, inclinaison des pentes, visibilité en fonction des points cardinaux : ouverture du paysage vers l'ouest, ou vers le nord?) et en comparant leur attractivité et le développement des zones urbaines qui s'y trouvent.

En point final, nous remarquerons que l'étude du paysage s'associant aux diverses perceptions possibles des observateurs, l'étude de son influence sur l'étalement urbain ne peut se détacher de l'esthétique et de la question du beau paysage. Cette même esthétique renvoyant aux goûts personnels mais également aux éléments d'histoire et de culture.

## 5.5 Analyse statistiques du lien entre urbanisation et paysage à l'aide d'indices du paysage

### 5.5.1 Matériel et méthode

L'approche générale proposée, illustrée par la figure 5.8, comportent 4 étapes principales (quatre blocs de couleurs) :

1. la construction de **cartes d'occupations du sol** à différentes dates (bloc bleu). Cette étape est effectuée à partir d'images satellite. Dans le cadre de notre étude, nous avons les cartes d'occupation du sol à 3 dates (1990, 2000 et 2010) (voir partie télédétection)
2. la construction de **cartes d'urbanisation** par différences des cartes d'occupations du sol (bloc orange)
3. la construction d'**indicateurs régionalisés** des occupations du sol (1 tableau d'indicateurs par date) et d'urbanisation (1 tableau par carte de différence). Les indicateurs



proposés sont dérivés des indices du paysage McGarigal *et al.* (2012) et quantifient la composition et l'organisation du paysage sur des sous-régions de l'aire urbaine. On propose différents types de régionalisation en fonction des études à mener (par communes, par secteurs concentriques).

4. l'**analyse statistique** des tableaux d'indicateurs : établir des liens entre les indicateurs, en particulier entre indicateurs d'occupation du sol et indicateurs d'urbanisation.

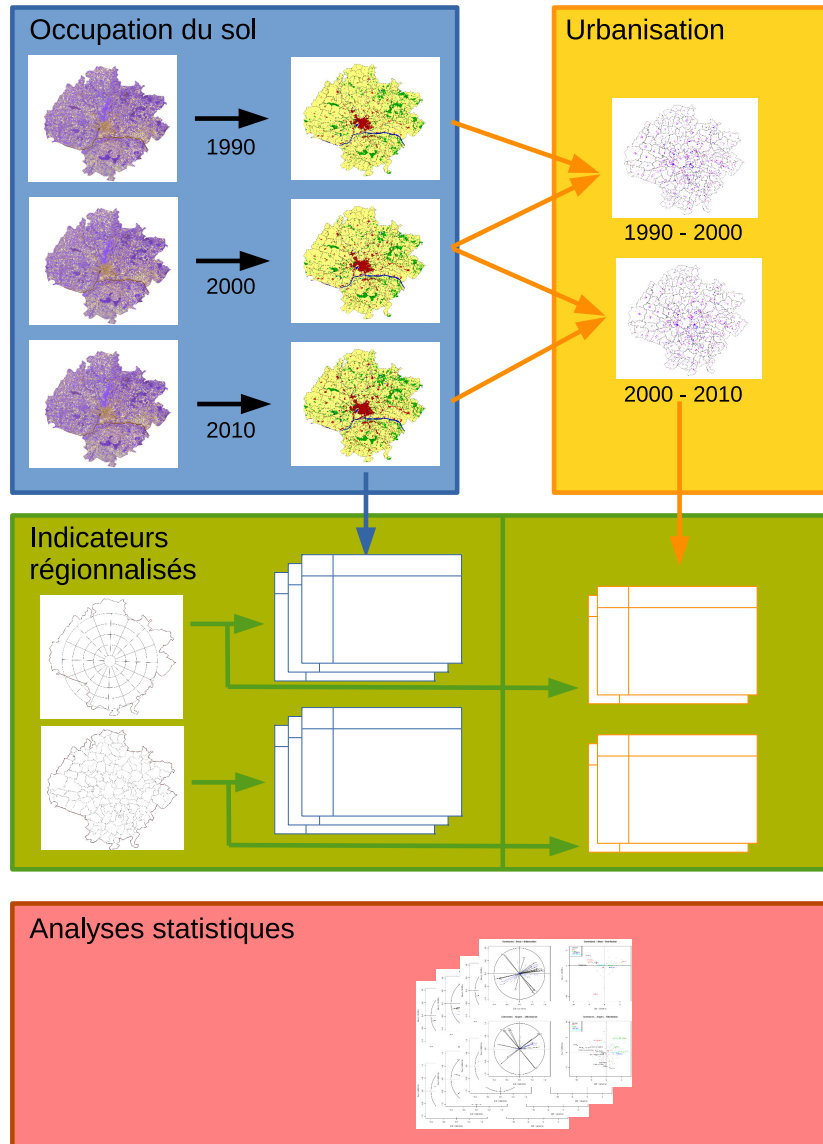


FIGURE 5.8 – Méthodologie

Cette méthodologie est très largement automatisée et est ainsi facilement reproductible à un grand nombre d'aires urbaines. Dans la suite du document, on décrit en détails les différentes étapes.

## Indicateurs régionalisés

La dimension spatiale contenue dans les cartes limite les analyses possibles. Pour palier cette difficulté, il est assez usuelle de transformer les informations spatialisées sous la forme d'indicateurs et de métriques qui vont traduire les caractéristiques des cartes sous une forme plus facilement utilisable pour l'analyse. Les indices du paysages sont communément utilisé principalement pour l'étude des paysages Uuemaa *et al.* (2009a). Développé initialement pour des échelles spatiales fines, ces indices se sont développés pour l'étude des paysages avec la possibilité d'obtenir des classifications des occupations du sol par télédétection.

Leur objectif est quantifier les deux caractéristiques principales du paysage décrit par des cartes d'occupation du sol :

- sa composition : elle décrit la présence et l'abondance de tâches ou de classes d'une occupation du sol,
- sa configuration : elle décrit la distribution (dense vs diffus) et l'arrangement des tâches d'occupation du sol.

À l'instar de Aguejdad (2009), nous les utilisons ici pour caractériser les paysages à l'échelle de l'aire urbaine et nous proposons également de les utiliser comme caractéristiques de l'urbanisation. En effet, les caractéristiques de l'urbanisation peuvent se traduire par des indices du paysages. Galster *et al.* (2001) mentionne 8 dimensions caractérisant l'urbanisation : la densité, la continuité, la concentration, le degré de regroupement (*clustering degree*), la centralité (par rapport au centre urbain), la nucléarité, les usages mixtes et la proximité. Frankhauser (2005) utilise une lecture des formes d'urbanisation par la dimension fractale du phénomène. La plupart de ces caractérisations peuvent être captées à l'aide des différents indices du paysages calculés sur l'image d'urbanisation tel que construite dans la section 5.2.2.

Dans la suite de cette section, on présente les indices du paysages que nous avons utilisés, on décrit ensuite les différentes méthodes de régionalisation et on présente enfin les outils mis en œuvre pour construire automatiquement ces indices.

## Indices du paysage

Pour la réalisation de cette étude, nous avons calculé les indices de paysage décrits ci-dessous (Hilal *et al.*, 2008; McGarigal *et al.*, 2012). Pour chaque classe d'occupation du sol, on calcule les indicateurs suivants :

- **Nombre de tâches.** Pour une classe d'occupation du sol, une tâche est une zone contiguë de cette classe. le nombre de tâche ( $N$ ) est un indicateur de la dispersion d'une classe.
- **Surface totales des tâches.** Pour chaque classe d'occupation du sol, la surface totale de la classe dans le paysage ( $A$ ) quantifie la présence de cette classe dans la région du paysage qui est étudiée.

- **Périmètre moyen des tâches.** Calculé par la moyenne des périmètres  $P$  de chacune des tâches de la classe.
- **Rapport moyen périmètre/aire.** Cet indicateur renseigne sur la forme des tâches (plus ou moins allongées)
- **Indice de contiguïté moyenne.** Cet indicateur mesure le degré de connectivité spatiale, ou contiguïté, des cellules dans un patch pour fournir un indice de la configuration des limites de cellules. De larges patches contigus aboutissent à une plus grande valeur de l'indice. Cet indicateur est obtenu par convolution de la matrice binaire d'une tâche avec un noyau  $3 \times 3$  :  $[[1, 2, 1], [2, 1, 2], [1, 2, 1]]$ , puis est normalisé.
- **Dimension fractale moyenne.** Cet indicateur renseigne sur la "rugosité" des surfaces d'interface entre les tâches. La dimension fractale d'une tâche est calculée à partir de son périmètre  $P$  et de son aire  $A$  par la formule ci-dessous. L'indicateur pour une classe est sa moyenne sur toutes ses tâches.

$$FRAC = \frac{2 \times \log(.25P)}{\log(A)}$$

À ces indices calculés pour chaque classe, s'ajoutent des indices calculées sur l'ensemble du paysage :

- **Indice de diversité de Shannon.** Cet indice quantifie la composition du paysage par sa diversité. L'indice est influencé par deux éléments : la richesse (nombre de classes de tâches présentes) associée à la composition de la diversité et l'équité de distribution ( $p_i$  est la proportion de la surface de la classe  $i$ ) associée à la diversité structurelle. L'indice est égal à zéro quand le paysage ne contient qu'une seule classe de tâches, et il augmente à mesure qu'on augmente le nombre de classes, la distribution de la surface des classes devient plus équitable, ou quand les deux augmentent.

$$SHDI = - \sum_{j=1}^m p_j \log(p_j)$$

- **Indice d'équité de la diversité de Shannon.** L'équité de distribution concerne la proportion de distribution de la surface, de chaque classe de tâches, dans un paysage. L'équité est exprimée par le degré de diversité, divisé par la diversité maximale possible pour une richesse de tâches donnée. La diversité maximale de richesse est basé sur la distribution équitable de surface des différentes classes de tâches. L'indice d'équité de distribution est égal à zéro quand le paysage ne contient qu'une seule tâche (aucune diversité) et il se rapproche de zéro quand la distribution des surfaces entre les différentes classes de tâches devient de plus en plus déséquilibré (dominé par une classe. L'indice est égal à 1 quand la distribution de la surface entre les différentes classes est absolument égale.

$$SHEI = - \frac{1}{\log(m)} \sum_{j=1}^m p_j \log(p_j)$$

- **Indice de diversité de Simpson.** L'indice de diversité de Simpson est une autre

mesure de la diversité empruntée à l'écologie des populations. L'indice de Simpson est moins sensible à la présence de types rares et a une interprétation plus intuitive que l'indice de Shannon. La valeur de l'indice de Simpson représente la probabilité que 2 cellules présent au hasard soit de types de patches différents.

$$SIDI = 1 - \sum_{j=1}^m p_j^2$$

- **Indice d'équité de la diversité de Simpson.** L'indice d'équité de Simpson se construit de façon à ce qu'une répartition équitable des surface de chaque type de tâche résulte en la valeur maximale de l'indice. L'indice d'équitabilité est donc le complément de l'indice de dominance.

$$SIEI = \frac{SIDI}{1 - \frac{1}{m}}$$

### Régionalisation du calcul des indices du paysage

Les indices du paysage sont calculés selon des "zones" d'une aire urbaine. Chaque zone est caractérisée par des valeurs d'indices du paysage. Les indices sont normalisés par la surface des zones.

Trois types de découpages en zones sont étudiés (voir illustration de la Figure 5.9) :

- découpage par les unités paysagères (UP). Les UP sont des régions définies par leurs caractéristiques paysagères spécifiques. Une UP décrit un paysage homogène sur toute sa surface. Nous nous servons de ce découpage comme indicateur de la pertinence de l'utilisation des indices du paysage,
- découpage par "secteurs" concentriques, centrés sur la ville. L'objectif de ce découpage est de mettre en évidence, indépendamment de la ville étudiée, des comportements liés à la distance à la ville, à l'influence d'axes principaux de déplacement,
- découpage en communes. Ce découpage permet une comparaison avec des dires d'acteurs ou d'autres statistiques collecté à cette échelle.

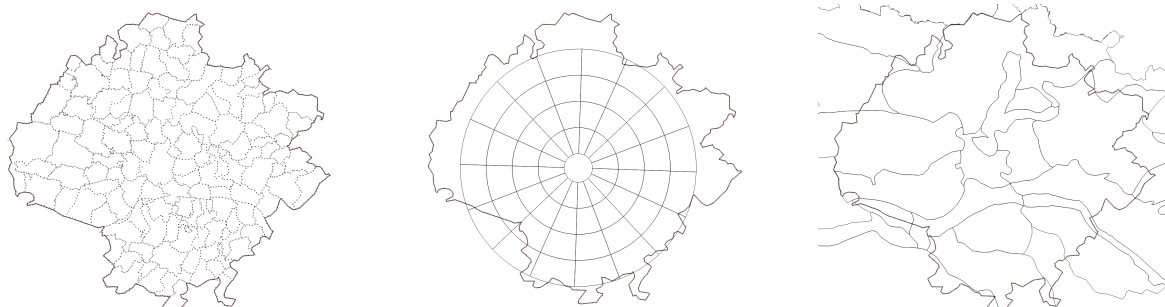


FIGURE 5.9 – Illustration des différents types de zones utilisées pour analyser le lien entre les paysages et l'urbanisation. Exemple à partir du cas de l'agglomération angevine.

L'utilisation d'un découpage en secteurs permet de caractériser les différentes types d'urbanisation selon la catégorisation proposée par Besussi *et al.* (2010) (voir table 5.1). Lorsqu'il

existe un axe radial selon lequel peut se développer l'urbanisation, le découpage capte ce comportement en faisant apparaître des séries de secteurs avec le même angle pour lesquels l'urbanisation est plus importante (relativement aux autres secteurs). À l'opposé, une urbanisation compacte mettra en évidence des secteurs équidistants du centre (mais avec des angles différents).

Type	High density	Low density
Compact contiguous	Circular or radial using mass transit	Possible but rare ?
Linear strip corridor	Corridor development around mass transit	Ribbon development along radial routes
Polynucleated nodal	Urban nodes divided by green belts	Metro regions with new towns
Scattered/discontiguous	Possible but rare ?	Metro regions with edge cities

TABLEAU 5.1 – Types d'urbanisation (d'après Besussi *et al.* (2010))

## Réalisations

Pour effectuer les calculs des indices de paysages régionalisés, Nathalia Penna-Cruzato<sup>2</sup> et Thomas Guyet ont développé des programmes Python.

Le programme se compose de trois modules principaux<sup>3</sup> :

- un module de calcul des images d'urbanisation à partir des images d'occupation du sol.
- un module de calcul d'un découpage en secteurs concentriques. Ce module génère un fichier *shapefile* définissant des secteurs concentriques. Le centre, les rayons et les nombres de secteurs sont paramétrables.
- un module de calcul des indices du paysage régionalisés qui prend en entrée d'une part une image d'urbanisation et, d'autre part, une couche vectorielle (fichier *shapefile*) décrivant les zones sur lesquels calculer les indices. Le module engendre un fichier CSV donnant la valeur de chacun des indices pour chaque zone.

Finalement, l'ensemble de ces modules sont connectés dans un outil pouvant traiter l'ensemble des données, pour toutes les dates et pour toutes les aires urbaines, très facilement.

Pour des raisons pratiques, les outils ont été développés pour traiter les données de manière efficace. En effet, les images traitées sont de taille assez importante (pour l'aire urbaine d'Angers, une image est de taille  $3492 \times 3191$  pixels), il est nécessaire de produire des algorithmes propres pour assurer des temps de calcul raisonnables. À titre informatif, le traitement le plus coûteux en temps est le calcul des indices du paysage à la fois pour la nécessité de faire un masquage de zone et, d'autre part, à cause du calcul des indices qui peut être en  $n^3$  (où  $n$  est le nombre de pixels d'une zone). Pour réduire les temps de calcul, le module traite les différentes zones en parallèle sur des architectures multi-cœurs. Sur une architecture à 4 cœurs, le

2. Stage AGROCAMPUS-OUEST 2012 encadré par T. Guyet

3. L'ensemble des outils est disponible sur demande à [thomas.guyet@agrocampus-ouest.fr](mailto:thomas.guyet@agrocampus-ouest.fr).

temps nécessaire pour traiter la zone urbaine d'Angers selon les communes nécessite environ 15 minutes.

### 5.5.2 Analyses statistiques

Les analyses statistiques sont menées sur l'ensemble des zones (les individus) décrites par les indices du paysage calculés d'une part sur les images d'occupation du sol à la date  $t$  et l'image d'urbanisation calculées entre la date  $t$  et  $t + \delta$ .

Chaque zone (individu) est décrite par 18 caractéristiques complétées par les informations liées aux coordonnées géographiques du centroïde de la zone. Pour les analyses, ces coordonnées sont utilisées sous la forme de distance de la zone au centre de la ville et d'angle de l'axe centre-zone par rapport à l'équateur. Les indices étant normalisés par la surface de la zone, on ne prend pas la surface de la zone comme caractéristique.

On utilise des méthodes d'analyse en composantes principales (ACP) pour mettre en évidence des liens statistiques entre les variables caractéristiques.

#### Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales (ou ACP) traite un ensemble d'observations décrites par des attributs quantitatifs. Elle permet de faire une étude exploratoire des plusieurs variables en parallèle. Elle constitue une étape intéressante pour découvrir les déterminants d'un jeu de données ou des liens entre différentes variables. Pour cela, l'objectif de l'ACP est de revenir à un espace de dimension réduite en déformant le moins possible la réalité. Il s'agit donc d'obtenir le résumé le plus pertinent des données initiales.

Plus formellement, l'ACP peut être définie comme la recherche des combinaisons linéaires de plus grande variance, des variables initiales. Ces combinaisons linéaires de variables sont appelées des valeurs propres ou composantes principales. Ces transformations linéaires de l'espace répartissent la dispersion des données selon les axes de manière à l'optimiser. Dans ce nouvel espace de représentation des données (totalement équivalent), il est donc plus facile de discriminer les données.

L'ACP s'accompagne d'un outil de visualisation, le cercle de corrélation, pour interpréter facilement les résultats. Le cercle de corrélation est défini par les deux premières composantes principales. C'est la représentation graphique des variables en fonction de leurs coefficients de corrélation avec les composantes principales. Chaque variable du jeu de données est représentée par une flèche.

Le cercle de corrélation s'interprète selon les règles suivantes :

- une pointe de flèche proche du cercle caractérise bien la variable correspondante, en revanche, une pointe de flèche proche du centre indique une variable dont les propriétés

- ne sont pas mises en évidence par le cercle de corrélation
- deux pointes de flèches proches du cercle et l'une de l'autre indiquent une forte corrélation positive entre les variables qu'ils caractérisent
  - deux pointes de flèches proches du cercle et opposées indiquent une forte corrélation négative
  - deux pointes de flèches proches du centre du cercle ne donnent aucune indication sur la corrélation des variables qu'elles représentent

Pour toutes les calculs, l'ACP utilise des variables centrées et normalisées, les interprétations se font donc par rapport au comportement moyen du jeu de données. Si une corrélation entre une variable et une composante principale est fortement positive (resp. négative), alors la valeur de la variable observée sur un individu dont la composante principale est positive et élevée sera vraisemblablement largement supérieure (resp. inférieure) à la moyenne.

Dans l'ACP, il est possible distinguer deux types de variables :

- les variables explicatives : ce sont les variables classiquement utilisées en ACP
- les variables supplémentaires : ce sont des variables qui ne contribuent pas à la construction des axes de l'ACP mais qu'il est possible de visualiser dans le cercle de corrélation

Lors de la visualisation des individus dans le plan de l'ACP (plan définis par les deux axes principaux), il est possible d'interpréter la localisation des individus dans le plan en se reportant au cercle de corrélation. Un individu ayant une valeur positive (resp. négative) importante selon un axe aura des valeurs positive (resp. négative) pour les variables fortement corrélées positivement à cet axe qui sont supérieures (resp. inférieures) à la moyenne.

### **Facteurs d'occupation du sol explicatifs de l'urbanisation**

Dans cette expérimentation, on utilise les indices calculés sur l'image d'occupation du sol comme des variables explicatives et les indices calculés sur l'image d'urbanisation sont utilisés comme des variables supplémentaires. On cherche à mettre en évidence que les variables discriminantes du point de vue des occupations du sol (le paysage) sont corrélées avec les variables de description de l'urbanisation (et en particulier la surface totale urbanisée).

### **Classification des types d'urbanisation**

On utilise une classification hiérarchique ascendante (CHA) sur les représentations ACP des données pour construire des groupes de zones "homogènes". L'espace de représentation des données maximisant la variance selon les premiers axes, une CHA conduit à une bonne discrimination des individus dans cet espace.

Les groupes d'individus s'interprète de la même manière qu'un individu en interprétant la localisation du centroïde d'un groupe dans le plan de l'ACP.

## Réalisations

Les analyses statistiques ont été menées au moyen de scripts R<sup>4</sup>. Nous utilisons le package FactoMiner Lê *et al.* (2008) pour mener les analyses en composantes principales.

### 5.5.3 Résultats

#### Analyse par secteurs concentriques

On commence par présenter les résultats obtenus par l'analyse des aires urbaines par des zones artificielles construites comme des cercles concentriques sur le centre de l'aire urbaine.

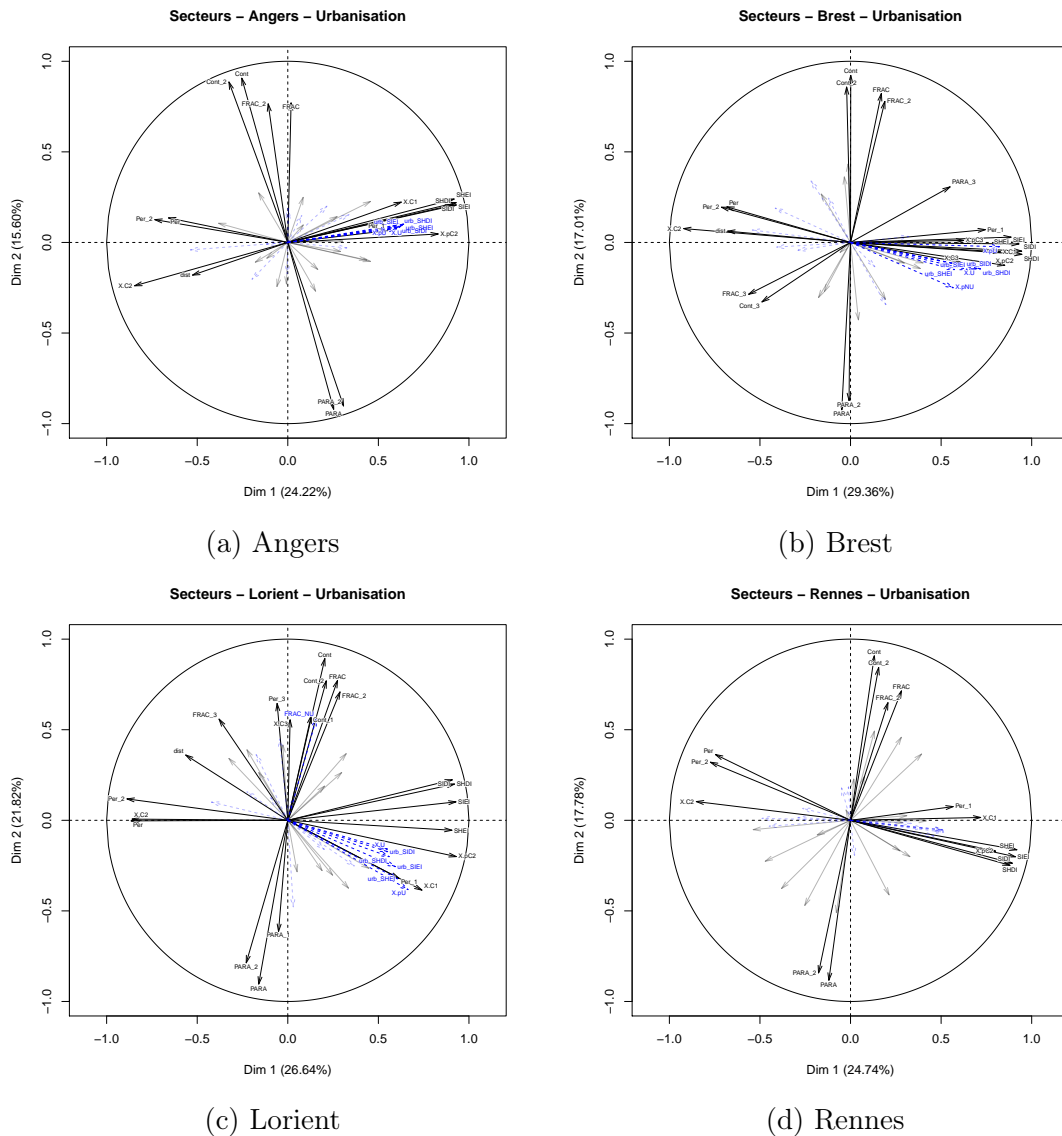


FIGURE 5.10 – Plans des ACP obtenus par analyse des occupations du sol en 2000 en lien avec les variables descriptives de l'urbanisation entre 2000 et 2010

La figure 5.10 donne une visualisation du cercle de corrélation de l'analyse en composante

4. L'ensemble des outils est disponible sur demande à [thomas.guyet@agrocampus-ouest.fr](mailto:thomas.guyet@agrocampus-ouest.fr).



principale (ACP) construit à partir des variables calculées sur l'occupation du sol en 2010. Dans ces figures, on visualise les différentes variables projetées selon les deux axes principaux : chaque axe,  $x$  ou  $y$ , est obtenu comme une combinaison linéaire des variables. Plus la projection d'une variable (représentée par une flèche) est importante, et plus cette variable contribue à cet axe. Lorsque deux variables sont dans des direction et norme similaires, les deux variables peuvent être considérées comme corrélée pour le jeux de données. Dans ces représentations, les variables pour lesquels le  $\cos^2$  est inférieur à 0,5 sont visibles uniquement en arrière plan et grisé. Ce sont des variables peu significatives pour l'ACP.

Les figures illustrent également les variables d'urbanisation. Ces variables ne sont pas utilisées pour construire le plan de l'ACP, mais leur visualisation permet de les mettre en lien avec les axes principaux des données. Lorsqu'on visualise une des variables supplémentaires dans le plan de l'ACP, celle-ci peut être considérée comme corrélée aux variables qui lui sont proches (en direction et norme). Plus la norme de ces variables est importante et plus cette variable peut être corrélée aux variables explicatives utilisées pour construire le plan de l'ACP. Pour ces variables, on s'intéressera principalement à la variable  $X.U$  qui indique la surface urbanisée dans un secteur donné.

Les pourcentages indiqués entre parenthèses sont des indicateurs de la pertinence de la décomposition de l'espace selon les axes proposés. Il indique le pourcentage de la variance expliquée par une dimension. Dans le cas des analyse présentées, un plan à deux dimensions permet d'expliquer environ 40% de la variance. Compte tenu du nombre de variable d'entrée (50 variables), ce pourcentage est élevé et indique que le plan ACP représente bien l'ensemble des variables du jeu de données.

Dans le cas d'Angers, l'urbanisation est corrélée avec le premier axe de l'ACP mais pas avec le second. Ce second axe est décrit principalement par les variables suivantes :

- **SIDI/SHDI, SIEI/SHEI** : valeurs globales des indices de diversité des occupations du sol. Plus le paysage est diversifié et plus il y a de l'urbanisation.
- positivement par **X.pC2**, nombre de tâches de cultures, mais négativement avec **X.C2**, la surface en culture, et **Per2**, le périmètre moyen des tâches de culture : il faut donc un secteur dans lequel il y a beaucoup de "petite" tâches de culture pour favoriser l'urbanisation. Les cultures étant la classe dominante, ceci reprend l'idée de diversité : il faut que le paysage soit très décomposé.
- **X.C1** : nombre de pixels d'urbain. on peut en conclure que plus il y a d'urbain et plus il y a d'urbanisation.
- **Dist** : on trouve que ainsi la distance en centre d'Angers influe négativement sur l'urbanisation.

Le second axe de l'ACP est caractérisé par les variables suivantes :

- **Frac/Frac2** : dimension fractale moyenne et dimension fractale des tâches de culture.

- **Cont/Cont2** : indice de contiguïté moyen et des tâches de culture.
- **PARA/PARA2** (négativement) : rapport périmètre/aire des tâches ou uniquement des tâches de culture.

Ces trois indices décrivent un paysage fortement découpé par opposition à des paysages pour lesquels il y aurait de grandes tâches uniformes et au bords lisses. La discrimination des secteurs selon ces caractéristiques d'occupation du sol ne permet pas d'expliquer l'urbanisation. On peut simplement en déduire qu'il y a de grandes disparités entre les secteurs de ces variables.

Dans les trois autres cas (Brest, Lorient et Rennes), on retrouve des résultats très similaires. L'urbanisation est très corrélée au seul premier axe de l'ACP. Et cet axe est décrit principalement par les mêmes variables corrélées (négativement ou positivement) d'un secteur. Le second axe est également décrit selon les mêmes variables discriminantes.

Entre ces différentes villes, il existe donc des dénominateurs communs de l'influence de l'organisation et de la composition du paysage sur l'urbanisation.

Quelques différences peuvent néanmoins être notées. Dans le cas de Rennes, cette corrélation est moins forte. Même si les comportements globaux sont identifiés, ils sont moins discriminants. Dans le cas de Lorient et de Brest, on constate que la classe de forêt prend une importance plus grande que pour les autres villes. L'attribut **Frac3** est corrélé négativement avec l'urbanisation pour Lorient. Les secteurs dans lesquels la forêt est constituée de tâches de forêt peu découpées favorisent l'urbanisation.

### Analyse par communes

Dans cette section, on illustre les résultats obtenus sur des ACP calculées à partir d'indicateurs calculées en utilisant les limites de communes comme région. Les caractéristiques de paysages sont donc spécifiques à une commune et correspondent également à des évaluations plutôt selon une organisation poly-nucléiques de l'urbanisation : chaque commune peut être vue comme un centre-ville et ses alentours moins urbanisés. En fonction des communes, certaines on subit des urbanisations massives, compactes, d'autres plus diffuses.

De même que pour les secteurs, les figures 5.11 et 5.12 visualisent le plan ACP qui établit les déterminants principaux des organisations des occupations du sols et les liens entre ces variables. D'autre part, on visualise, pour chaque aire urbaine, les communes les plus représentatives des différents axes de l'ACP. Dans le plan de l'ACP, les communes proches sont des communes qui ont des caractéristiques similaires. Ici, les caractéristiques utilisées pour construire le plan ACP sont les indices calculés sur les occupations du sol en 2000. Les communes affichées sont celles qui sont les plus représentatives des axes principaux ( $\cos^2 > 0,7$ ).

Chacune des communes du plan de l'ACP est associée à une couleur. Celle-ci correspond à un "degré" d'urbanisation : très peu, peu, moyen, important et très important (voir la légende pour la correspondance des couleurs). Ces degrés d'urbanisation sont obtenus par une discrétisation en 5 classes des valeurs de l'attribut X.U. Ces discrétisations ne sont pas identiques d'une aire urbaine à l'autre.

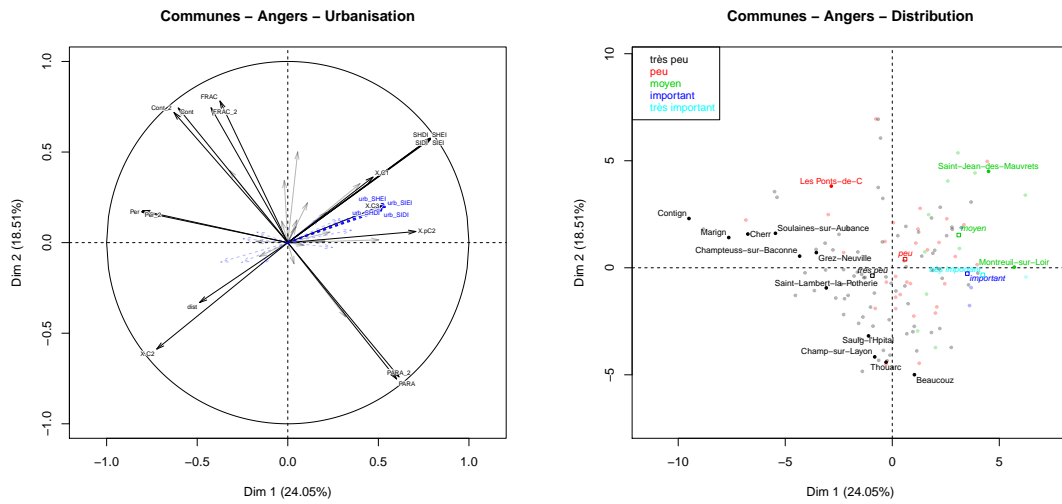
Une première constatation peut être faite par rapport aux résultats précédents. Contrairement à l'analyse en secteur, les axes principaux de l'ACP effectué sur les communes ne permettent d'expliquer correctement l'urbanisation (variable p.U) que pour Rennes et Lorient. Seul Rennes permet d'obtenir un plan ACP assez similaire aux analyses précédentes.

Dans le cas de la commune de Brest, il y a assez peu de variables communes. Les variables liés à la diversité du paysage restent des facteurs prépondérant pour discriminer les différentes communes, mais comme indiqué précédemment, il n'y a plus de corrélation avec l'urbanisation. Dans la visualisation des communes, on constate que toutes les classes sont mélangées.

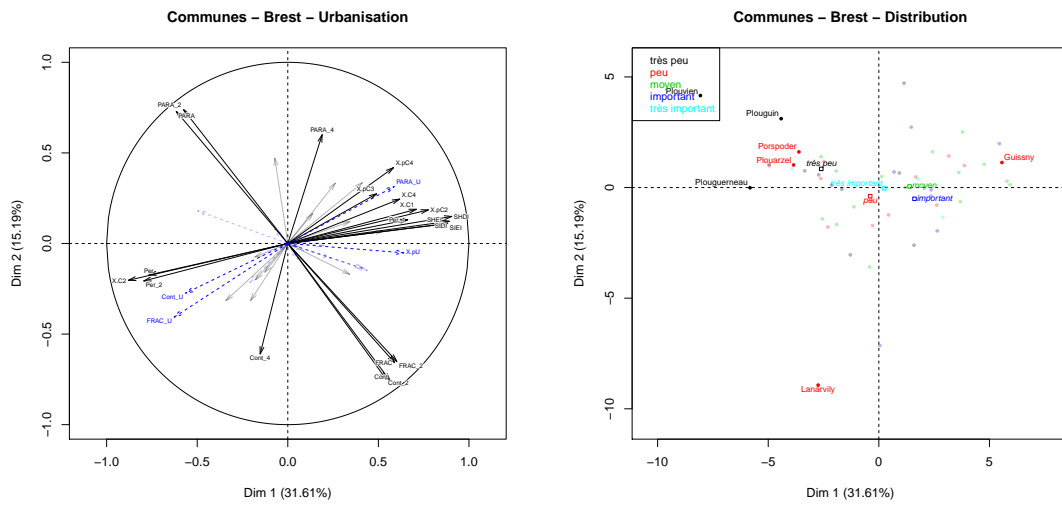
Les villes de Plouguin et Plouvien qui sont voisines dans le plan ACP sont également voisines dans l'aire urbaine. Il s'agit de deux villes intérieures de l'aire urbaine, sans accès à la mer. Guissény est en revanche une ville de la côte nord qui est représentative d'une occupation du sol très diversifiée (car corrélée positivement aux indices de diversité).

Dans le cas de Rennes, on retrouve, à l'opposé du cas précédent, une organisation des degrés d'urbanisation dans le plan : les urbanisations importantes sont en haut, à droite et les urbanisations faibles sont en bas à gauche. Une seule ville a été indiquée comme ayant une urbanisation très importante. La ville de Rennes est classée comme peu urbanisée, mais c'est principalement en raison du fait qu'elle est déjà très artificialisée (mais contrairement aux autres aires urbaines, la ville principale n'est pas uniquement composée de surface artificialisées). En dehors de ce cas particulier et de Thorigné-Fouillard, les autres villes peu urbanisées les plus caractéristiques sont des petites communes assez rurales (corrélées à la variable X.C2 indiquant une grande quantité de cultures).

Dans le cas de Lorient, deux communes se dégagent particulièrement. Larmor-Plage, ville très proche du centre de Brest et qui est très corrélé à la variable du nombre de tâches de culture. Ce nombre de tâche est lié à une très forte décomposition par des forêts et de l'urbain, plus qu'à une grande surface de culture. La commune de Pont-Scorff est également très spécifique dans l'ensemble des communes. Les indicateurs montrent une commune dont le paysage est très séparé : régions contiguës avec peu de diversité et peu de tâches. Contrairement aux autres communes, elle comporte très peu de forêts qui découpent les zones agricoles et de ce fait elle est très contiguë.

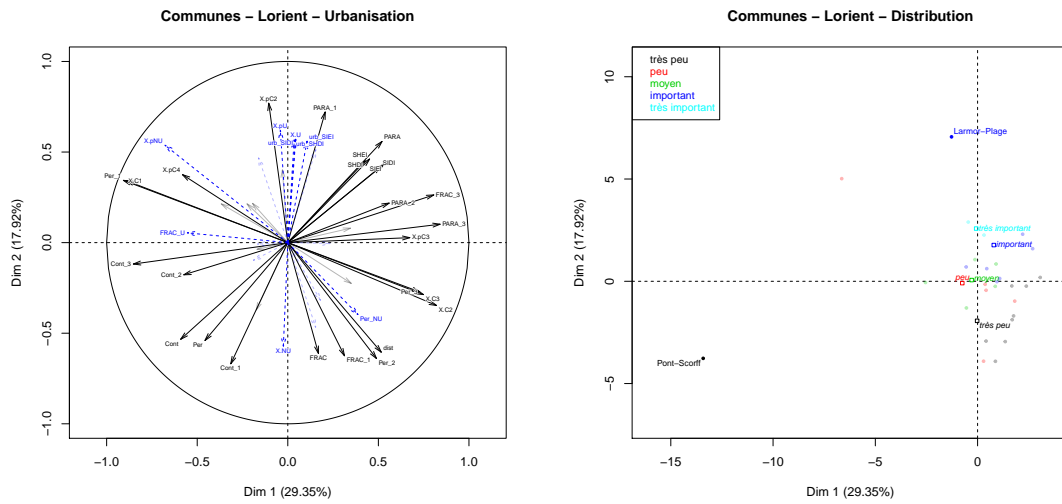


(a) Angers)

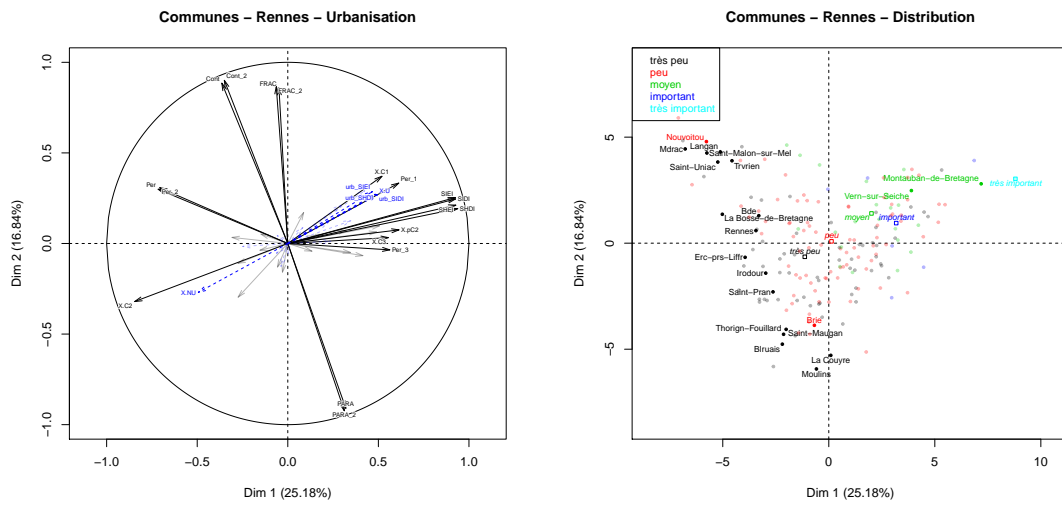


(b) Brest)

FIGURE 5.11 – Urbanisation de Angers et Brest entre 2000 et 2010



(a) Lorient



(b) Rennes

FIGURE 5.12 – Urbanisation de Lorient et Rennes entre 2000 et 2010

## Classification des secteurs par type d'urbanisation

Dans les Figures 5.13 et 5.14, on illustre l'analyse des **types d'urbanisation par secteur**. Pour chaque aire urbaine, on donne trois graphiques (en colonne) : le cercle de corrélation, la répartition des individus dans le plan ACP avec une classification et la visualisation des classes dans l'espace.

La décomposition ACP selon les variables décrivant l'urbanisation uniquement (les variables d'occupation du sol ne sont pas utilisées dans cette analyse). Les flèches noires du cercle de corrélation indique maintenant les variables liées à l'urbanisation.

La répartition dans le plan ACP des secteurs ainsi que leur classification en 5 classes (choix du nombre de classe arbitraire). Cette figure permet d'apprécier la signification des classes par rapport aux axes principaux de l'ACP et donc des variables originelles. Dans ce plan, les classes sont mieux discriminées que dans les expérimentations précédentes dans la mesure où les données sont classées selon la décomposition des axes.

On visualise enfin une carte localisant ces classes sur l'aire urbaine en associant à chacun des secteurs une couleur correspondant à sa classe. Les couleurs vont du rouge foncé (pour la classe 1) au bleu foncé (pour la classe 5). La signification des couleurs dépend des résultats de l'ACP. Celles-ci étant menées de manière indépendantes sur les différentes zones, les couleurs de deux cartes différentes ne sont pas comparables. En revanche, les dimensions des cercles concentriques sont les mêmes pour toutes les aires urbaines.

Dans le cas d'Angers, les deux axes principaux correspondent, pour le premier axe, à la diversité corrélée à la quantité d'urbanisation (variable  $X.U$ ), et pour le second axe à son fractionnement (qui s'oppose au rapport périmètre/surface des tâches urbanisées).

Dans ce cas, on peut interpréter les classes obtenues par la classification de la manière suivante :

- Cluster 1 (rouge) : secteur peu urbanisé,
- Cluster 2 (orange) : secteur moyennement urbanisé, avec une urbanisation en tâches plutôt compactes,
- Cluster 3 (jaune) : secteur moyennement urbanisé, avec une urbanisation plutôt fractionnée,
- Cluster 4 (vert) : secteur moyennement urbanisé, à la compacité moyenne,
- Cluster 5 (bleu) : secteur plus urbanisé que la moyenne.

Sur la carte, on constate une grande disparité entre le nord et le sud. Les régions du nord se sont peu urbanisées par rapport à la moyenne, tandis que les régions du sud ont globalement été plus urbanisées. Il est très intéressant de constater qu'un axe se distingue par un développement urbain plus important. Cet axe correspond à l'axe autoroutier (A85) Angers-Saumur

qui a été finalisé en 2007.

Dans le cas de Brest, les deux axes principaux correspondent, pour le premier axe, à la diversité corrélée à la quantité d'urbanisation (similaire au cas d'Angers) et, pour le second axe, à un fractionnement des régions non-urbanisées. L'image étant binaire, cela correspond peut s'interpréter également comme un fractionnement de l'urbanisation.

Dans ce cas, on peut interpréter les classes obtenues par la classification des secteurs dans le plan de l'ACP de la manière suivante :

- Cluster 1 (rouge) : secteur très peu urbanisé (un seul secteur),
- Cluster 2 (orange) : secteur peu urbanisé, avec une urbanisation en tâches plutôt compactes,
- Cluster 3 (jaune) : secteur peu urbanisé, avec une urbanisation plutôt fractionnée,
- Cluster 4 (vert) : secteur moyennement urbanisé, avec une urbanisation en tâches plutôt compactes,
- Cluster 5 (bleu) : secteur plus urbanisé que la moyenne.

Sur la carte, les secteurs les plus urbanisés se trouvent à proximité du centre urbain, et selon l'axe routier N165 vers l'est. A contrario, l'axe routier vers Morlaix ne semble pas avoir d'influence sur l'urbanisation puisque se sont des régions relativement peu urbanisées.

Dans le cas de Lorient, pour lequel moins de données sont disponibles, les résultats sont plus difficiles à interpréter. Le premier axe principal de l'ACP s'interprète ici plutôt par la diversité de l'urbanisation (ie un équilibre relatif entre urbanisation et non-urbanisation), mais moins directement par la présence d'urbanisation. Le second axe, est majoritairement décrit par le périmètre des tâches non-urbanisées. Ceci est plus difficile à relier avec l'une des formes d'urbanisation discutées précédemment.

En revanche, la carte fait apparaître de manière très nette des comportements différents en fonction des directions. Dans le cas de cette aire urbaine, les directions sont plus prégnantes que la distance au centre. Ceci s'explique certainement par le caractère côtier de l'aire urbaine.

Dans le cas de Rennes, on retrouve des axes qui s'interprètent de manière similaire aux axes des aires urbaines de Angers et Brest. Le premier axe est lié à la quantité/diversité de l'urbanisation et le second axe est lié au fractionnement de l'urbanisation.

Dans ce cas, on peut interpréter les classes obtenues par la classification des secteurs dans le plan de l'ACP de la manière suivante :

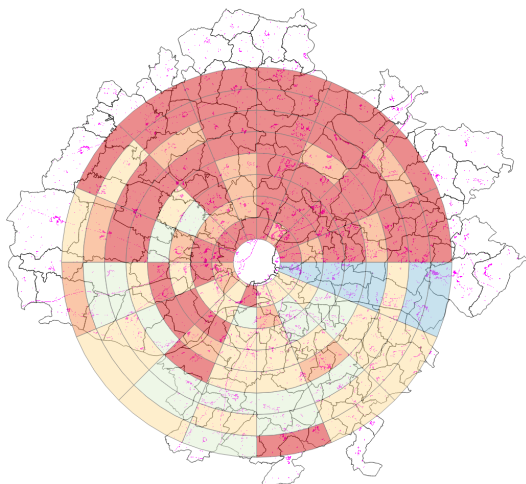
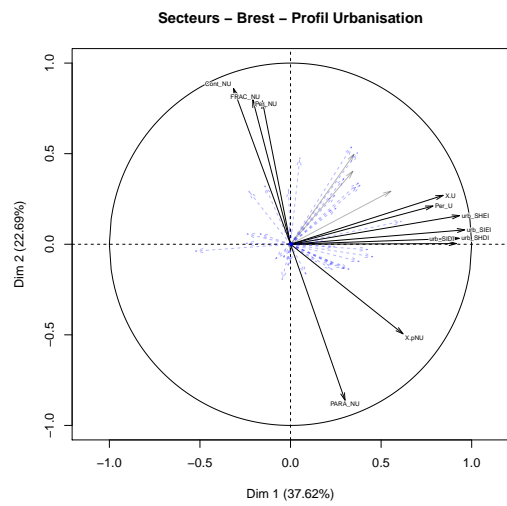
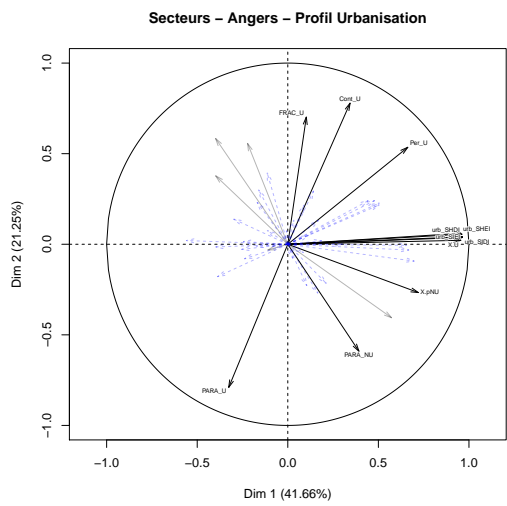
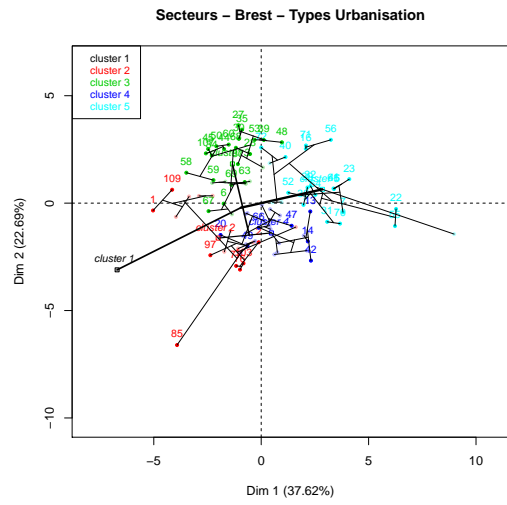
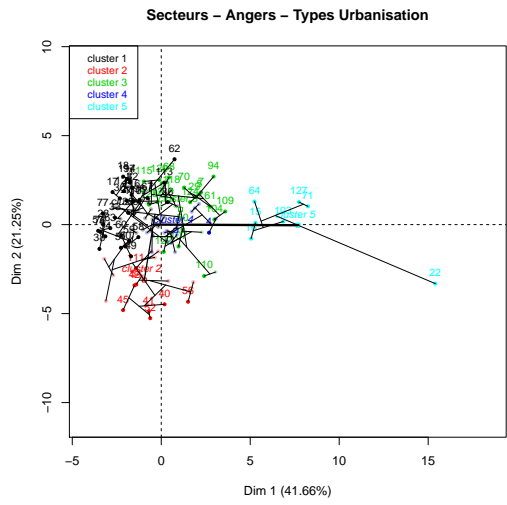
- Cluster 1 (rouge) : secteur très peu urbanisé,
- Cluster 2 (orange) : secteur peu urbanisé, avec une urbanisation en tâches plutôt fractionnée,

- Cluster 3 (jaune) : secteur moyennement peu urbanisé, avec une urbanisation plutôt fractionnée (un seul secteur),
- Cluster 4 (vert) : secteur plutôt urbanisé, avec une urbanisation en tâches plutôt fractionnée,
- Cluster 5 (bleu) : secteur plus urbanisé que la moyenne, avec une urbanisation en tâches plutôt compactes.

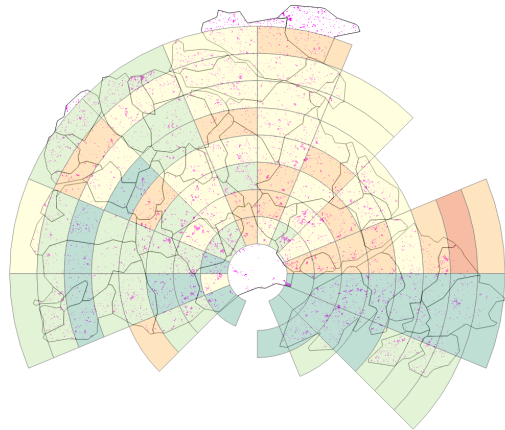
De même que pour Lorient, on constate également des effets directionnels importants :

- le quartier nord-est est majoritairement composé sur cluster 1, c'est à dire qu'il est relativement peu urbanisé,
- le quartier nord-ouest, avec l'influence des axes vers St-Malo et St-Brieux est un peu plus urbanisé,
- le quartier sud-est subit l'axe routier Rennes-Nantes, l'urbanisation est plus importante mais diffuse,
- le quartier sud-ouest correspond à une urbanisation plus importante avec des tâches d'urbanisation plus compactes.



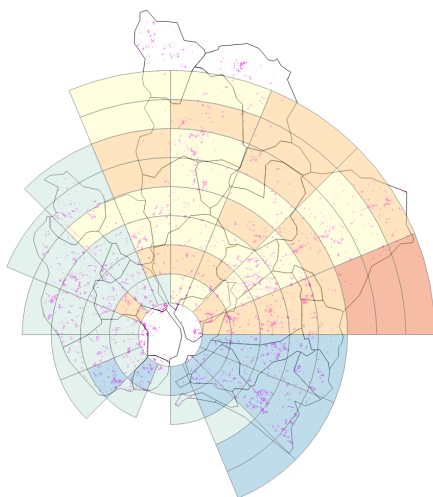
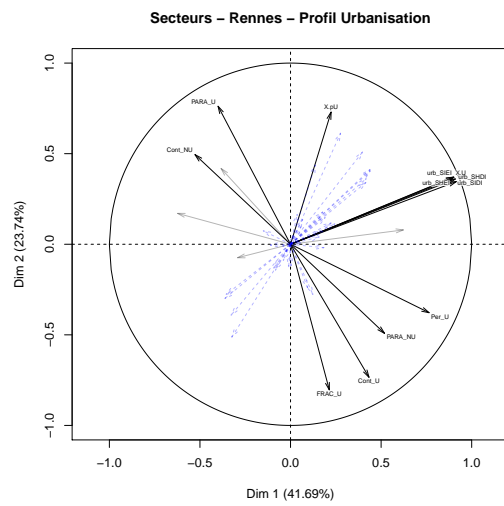
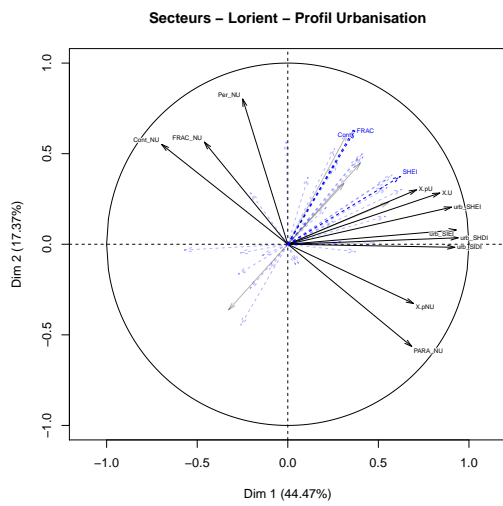
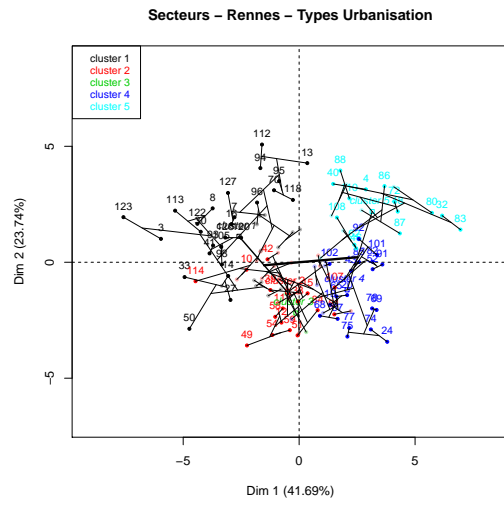
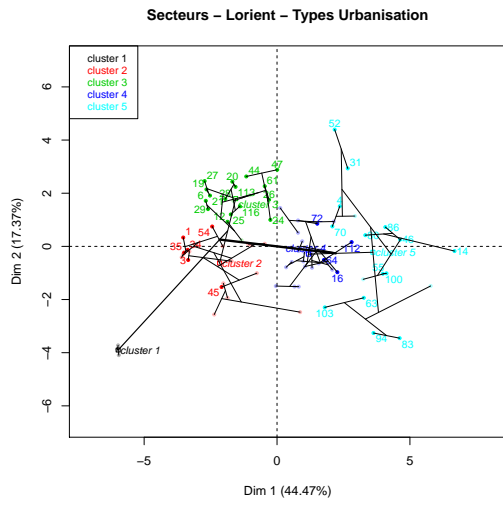


(a) Angers

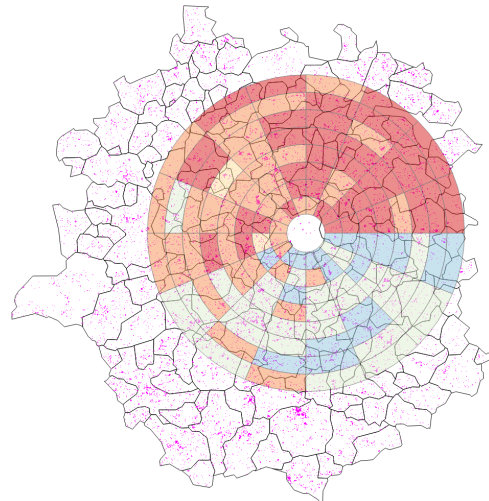


(b) Brest

FIGURE 5.13 – Classification des secteurs en types d'urbanisation (2000-2010) – Angers et Brest.



(a) Lorient



(b) Rennes

FIGURE 5.14 – Classification des secteurs en types d'urbanisation (2000-2010) – Rennes et Lorient.

### 5.5.4 Discussions

L'approche proposée pour analyser le lien entre urbanisation et paysage est originale. Nous avons introduit l'utilisation d'indices du paysage sur des cartes d'urbanisation comme outil de caractérisation des différents types d'urbanisation. L'intérêt de cette approche est de pouvoir quantifier, en utilisant les mêmes outils, à la fois l'urbanisation et l'occupation du sol. De ce point de vue, cela a permis de mettre en place des méthodes statistiques (ACP) permettant d'analyser les dépendances relatives entre les deux phénomènes dans les deux sens (influence de l'urbanisation sur l'occupation du sol et influence de l'occupation du sol sur l'urbanisation).

Nous avons également généraliser l'approche d'analyse d'Aguejdad (2009) en formalisant l'étude statistique par trois type d'études utilisant un découpage de l'espace spécifique : l'utilisation des unités paysagères, l'utilisation des communes (découpage administratif) et l'utilisation d'un découpage abstrait basé sur des régions concentriques. Ces derniers découpages permettent une interprétation géographique des modifications de l'occupation du sol.

L'utilisation de méthodes telles que l'ACP, avec ses outils graphiques, facilite les interprétations des résultats obtenus. Nous avons complété l'utilisation des ACP avec la génération de carte de profils d'urbanisation. Ces cartes peuvent être des outils d'aide à la compréhension d'une dynamique urbaine pour les décideurs. Un travail important reste à faire dans le choix, géographiquement adéquat, de la configuration des régions concentriques et des nombres de classe. Des développements allant en ce sens seront poursuivis dans des travaux ultérieurs.

Sur le choix des indices du paysage : beaucoup ont été calculés, mais finalement seuls un petit nombre ressortent des analyses. Ce résultat n'était pas particulièrement attendu et la démarche de calcul d'un ensemble plus complet d'indices avec une ACP sélectionnant les plus pertinents montrent qu'on aurait pu se limiter à un sous-ensemble réduit d'indices (indices agrégés de diversité, dimensions fractales et quantités de chaque classe).

En l'état, avec tous les indices, les résultats apparaissent finalement assez difficile à interpréter dans le détail. L'analyse statistique permet de mettre en évidence les comportements les plus généraux, mais lisse les cas particuliers.

Finalement, en l'état, l'approche proposée utilise une vision assez spécifique de la notion de paysage, dans tous les cas à la marge par rapport aux définitions telles que proposées par la convention européenne des paysages. La perception au travers d'images satellite à base résolution (20m) conduit à une description très incomplète des éléments paysagers et à un point de vue différent de ceux qui vivent le paysage. L'utilisation des images satellite comme seule information de description des paysages semble assez incomplet. Tout comme Aguejdad (2009), nous négligeons des éléments du paysage fins en utilisant une nomenclature très simplifiée des occupations du sol. Ceci amène certainement à une sous estimation des indices diversité et de fragmentation. Cette nomenclature était nécessaire au traitement de manière homogène des

images aux trois dates avec un focus sur l'urbain. Mais, l'homogénéité des classifications n'est pas nécessairement une bonne chose.

Pour l'instant, les contributions à la construction et à la représentation spatiale de données sur l'étalement urbain et les paysages, par les méthodes de classification, restent partielles car elles reposent uniquement sur les informations issues de la télédétection. Mais on peut noter que l'intégralité de l'approche proposée pourrait être adaptée facilement aux données pour lesquels on dispose d'une classification des images plus fines, ou des informations spatialisées complémentaires.

En outre, la perception du paysage comprend des dimensions plus riches que la simple description physique des éléments qui le compose à un instant donné. Des indicateurs sur les dimensions de la perception ont été mis en évidence dans la partie précédente sur la construction d'une ontologie de la perception du paysage à partir des Atlas des Paysages Bourbeillon *et al.* (2013b). Nous pourrions développer une méthodologie qui tienne compte de cette information et de la richesse de la notion de perception du paysage.

Néanmoins, pour les approches les plus structuralistes de la notion de paysage, l'organisation spatiale des éléments du paysage permet de donner des informations sur la représentation qu'on peut s'en faire. On peut imaginer arriver à mettre en place des méthodes capables de prendre en compte cette information structurelle de composition du paysage pour s'approcher de la perception des paysages, mais cela nécessitera de disposer de descriptions plus fines (et plus riches) des éléments du paysage (en particulier, pour les paysages agricoles, de la description du bocage).

Finalement, si les résultats proposés dans ce chapitre restent assez préliminaires, ils ouvrent la voie à un couplage avec les données issues de l'ontologie et des enquêtes de terrains qui apportent une autre connaissance du contexte géographique et socio-économique. Cette confrontation permettrait d'identifier dans la classification des zones à enjeux et pourrait donc permettre de mettre en perspective les stratégies adoptées dans le cadre de documents de planification collective comme les plans locaux d'urbanisme intercommunaux ou les schémas de cohérence territoriale.

## 5.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous proposons une méthodologie reproductible d'analyse spatiale de description des déterminants paysagers de l'étalement urbain. Si nous n'avons pas encore pu mettre en relation cette méthodologie et les données relatives aux perceptions des paysages, nous voyons bien qu'il s'agit d'une piste prometteuse et qui sera poursuivie dans des travaux ultérieurs.

## Chapitre 6

# Modèle de changement d'affectation des usages du sol

### 6.1 Introduction

Ce dernier chapitre propose l'estimation d'un modèle empirique reliant la conversion des sols à un usage urbain aux aspects culturels du paysage. L'application est faite pour l'aire urbaine d'Angers<sup>1</sup>. La modélisation rend compte de l'arbitrage entre les rentes agricoles et péri-urbaines d'une localisation en un point de l'espace, en accord le modèle théorique développé dans la première partie. En outre, le modèle est dynamique en ce sens que pour expliquer un usage du sol à un instant  $t$ , le modèle tient compte de son usage à la période précédente  $t - 1$ . Le modèle présenté est un modèle probabiliste à utilité aléatoire.

En France, en Europe, en Amérique du Nord et dans de nombreux pays, l'essentiel de l'accroissement de l'emprise des villes au sol se fait sur les terres à usage agricole. L'ampleur du phénomène résulte de deux forces. D'abord, il y a la croissance urbaine, sous l'effet naturel de la croissance de la population mais également de l'exode rural engendré par les différences de niveau de vie entre la ville et la campagne (Polèse & Shearmur, 2005). Ensuite, il y a la déconcentration urbaine. Aux États-Unis, en 1950, environ 40% de la population des villes résidait dans les *suburbs*, ces territoires mixtes rendus accessibles notamment par l'avènement de la voiture individuelle. En 1990, cette part était montée à 60% (Couch *et al.*, 2007). En Europe, alors que près de 75% de la population vit en ville, l'usage urbain du sol couvre un quart du territoire (EEA, 2006). Les données Corine Land Cover<sup>2</sup> qui regroupent des données SIG pour 37 pays européens et mises à disposition par l'Agence Européenne de l'Environnement (EEA) permettent d'apprécier l'importance de la pression effectuée par les villes sur les espaces agricoles, forestiers et naturels. Au total, les usages urbains du sol (résidentiel, commercial, ...) ont, à l'échelle européenne, entraîné l'artificialisation de près de 640 000 ha de terres agricoles, de forêts et d'espaces naturels entre 2000 et 2006. Cela correspond à la

---

1. Le traitement des données étant assez lourd, les estimations pour les aires urbaines de Brest, Lorient et Rennes ne sont pas encore disponibles.

2. <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/land-take-2/assessment-2/> - dernier accès le 10 octobre 2014.

taille d'un département français moyen, comme le Loire-et-Cher, la Drôme ou la Vendée par exemple. À l'échelle européenne environ 46% de cette artificialisation a eu lieu sur des terres arables, près de 32% sur des prairies, environ 13% sur des forêts et le reste (9%) sur divers espaces naturels (landes, friches, zones humides, ...). Il y a bien sûr une très forte hétérogénéité à l'échelle européenne inhérente aux caractéristiques des différents pays. Ainsi, en Finlande, l'artificialisation a eu lieu à 75% sur les espaces forestiers quand en Irlande elle a massivement eu lieu sur les prairies (70%) et sur les terres arables en Pologne (67%) et en Italie (74%). La situation française est très proche de la situation moyenne européenne. Entre 2000 et 2006, ce sont ainsi 35 000 ha de terres arables qui ont été artificialisées, soit 45% de l'artificialisation, quasiment la même surface de prairies et 9% de forêt. À eux seuls, ces trois usages du sols ont absorbé la quasi-totalité (97%) de l'artificialisation des sols.

Les déterminants principaux de l'urbanisation sont bien connus et nous les avons détaillés dans la première partie. Pour que l'usage du sol d'une parcelle soit affecté d'un usage à un autre, il faut que ce dernier devienne relativement plus intéressant. Cela peut arriver soit quand l'usage actuel devient moins intéressant soit quand l'usage alternatif le devient particulièrement. Dans le péri-urbain, l'usage alternatif majeur est le résidentiel. Le modèle théorique que nous avons développé dans la première partie de ce rapport montre comment la rentabilité des deux principaux usages alternatifs, l'usage agricole et l'usage résidentiel, évoluent spatialement. Nous avons notamment montré qu'en plus des déterminants classiques des rentes associées à ces usages, les aménités et le cadre de vie peuvent jouer un rôle important.

Bien qu'il existe une littérature empirique relativement conséquente sur la formation du prix des terres agricoles, le prix des terres urbaines et sur les déterminants des changements d'affectation du sol, cette littérature ne rend pas compte, à notre connaissance, de la dimension culturelle du cadre de vie qui fonde l'analyse du paysage en géographie culturelle (Cosgrove, 2003). Dans ce chapitre, nous couplons un modèle d'affectation des sols à des descripteurs de cette dimension culturelle que nous tirons de l'ontologie décrite dans la deuxième partie de ce rapport. Cette approche nous permet de montrer que la dimension culturelle des paysages, par opposition à leur dimension physique, joue également un rôle dans les processus d'étalement urbain et devraient donc être pris en compte dans les politiques d'aménagement.

Le reste de chapitre est organisé de la manière suivante. Dans une première partie, nous développons notre cadre de modélisation. Dans une deuxième partie nous présentons les données que nous utilisons et les résultats de l'estimation des modèles. Une troisième partie nous permet de faire le lien entre les probabilités d'urbanisation et les données sur les aspects culturels des paysages. Nous concluons en évoquant les limites de notre approche et les opportunités de recherches futures qui s'offrent suite à ces travaux.

## 6.2 Cadre de modélisation

### 6.2.1 Cadre théorique

Pour simplifier l'exposition du modèle théorique, nous nous plaçons dans un espace péri-urbain dans lequel il n'existe que deux usages du sol possibles : l'agriculture et le résidentiel. Chaque parcelle de l'espace est détenue par un propriétaire terrien qui décide de l'allocation de l'usage de sa parcelle. Ces propriétaires sont neutres vis-à-vis du risque et le choix d'urbaniser la parcelle est irréversible. Chaque propriétaire doit alors décider de la date  $t^*$  à laquelle il convertira sa parcelle d'un usage agricole à un usage résidentiel. Chaque propriétaire cherche à maximiser la valeur actuelle nette ( $\text{VAN}_{it}$ ) de sa parcelle à un instant  $t$  sur un horizon de temps infini. Le moment auquel un propriétaire choisira d'urbaniser sa parcelle est donc solution de :

$$\max_{t^*} \text{VAN}_{it} \equiv \int_t^{t^*} R_a(x_{ai}, \tau) e^{-r\tau} d\tau + \int_{t^*}^{+\infty} R_u(x_{ui}, \tau) e^{-r(\tau-t)} d\tau - C(y_i, t^*) e^{-r(t^*-t)} \quad \forall t \in [0, t^*] \quad (6.1)$$

où  $R_a(x_{ai}, \tau)$  est la rente foncière instantanée à l'instant  $\tau$  de la parcelle  $i$  en usage agricole,  $R_u(x_{ui}, \tau)$  est la rente foncière de la parcelle  $i$  en usage urbain au même instant,  $C(y_i, t^*)$  est le coût de conversion d'une parcelle à usage agricole en une parcelle à usage urbain au moment optimal  $t^*$  de sa conversion et  $r$  le taux d'actualisation du propriétaire terrien, supposé identique pour tous les propriétaires.  $x_{ai}$ ,  $x_{ui}$  et  $y_i$  sont des vecteurs de caractéristiques propres à la parcelle  $i$  qui affectent respectivement la rente agricole  $R_a$ , la rente résidentielle  $R_u$  et le coût de conversion  $C$  pour cette parcelle, nous les discutons plus bas.

Le problème de maximisation (6.1) stipule qu'un propriétaire choisira la date  $t^*$  de conversion de la parcelle  $i$  de telle manière que la somme des revenus agricoles actualisés avant la date de conversion et de ceux issus de l'usage urbain après cette date soit maximale une fois diminuée des coûts de conversion de la parcelle. La solution de ce problème d'optimisation a été établie par de multiples auteurs dont Capozza & Helsley (1989), Stavins & Jaffe (1990), Irwin & Bockstael (2002) et Carrion-Flores & Irwin (2004). Les conditions du premier ordre de ce problème d'optimisation requièrent qu'une parcelle n'est convertie que lorsque ce qu'elle peut rapporter en usage résidentiel est égal à la somme du coût d'opportunité de l'usage alternatif (agricole ici) et du coût de conversion nécessaire à sa transformation en usage résidentiel. En  $t^*$ , au moment de la conversion de la terre, on a donc l'équation (6.2).

$$R_u(x_{ui}, t^*) = R_a(x_{ai}, t^*) + rC(y_i, t^*) \quad (6.2)$$

Si  $R_u(x_{ui}, t^*) \geq R_a(x_{ai}, t^*) + rC(y_i, t^*)$ , alors la parcelle est urbanisée en  $t^*$ . De nombreux facteurs viennent influencer cet arbitrage.

La rente foncière agricole  $R_a$  dépend d'un ensemble de déterminants  $x_{ai}$  au premier rang desquels figurent les composantes ricardiennes de la valeur du foncier agricole, c'est-à-dire celles qui déterminent la productivité agricole. Il s'agit des déterminants pédologiques de la qualité

agronomique des sols, comme la profondeur, la texture, la battance, la capacité d'échange cationique ou encore le taux de matière organique qui, conjointement et différemment, affectent les rendements des productions agricoles. Il s'agit également des propriétés géologiques des sols, dont la pente, qui rend plus difficile la mécanisation et favorise l'érosion. Ces composantes jouent un rôle déterminant sur le marché foncier et leur valeur agronomique se reflète dans les prix du foncier agricole. Une étude récente de Ay *et al.* (2012) en Côte-d'Or, alimentée par des données très fines sur la qualité des sols, montre que, pris ensemble, ces facteurs expliquent de 30% à 65% du prix des terres agricoles. Les attributs topographiques jouent un rôle plus déterminant que les attributs pédologiques dans leur étude. Ay *et al.* (2012) montrent également que les relations entre les différents attributs pédologiques sont complexes et présentent de nombreux effets croisés qui illustrent la substituabilité complexe entre les attributs des sols. Le climat, notamment le volume des précipitations, leur période, l'ensoleillement et le nombre de jours de gel jouent aussi un rôle important et permettent d'expliquer les variations, à plus grande échelle, du prix des terres agricoles. La taille et la géométrie des parcelles peuvent également jouer un rôle important en jouant sur la mécanisation et les coûts de transaction à l'achat (Le Goffe & Salanié, 2005). Outre, les déterminants ricardiens du prix des terres, la localisation des parcelles et les politiques agricoles vont aussi jouer un rôle important. Les droits à produire (quotas laitiers par exemple) ou encore la réglementation environnementale (zones d'épandage par exemple) peuvent venir influencer le prix des terres agricoles (Le Goffe & Salanié, 2005). Latruffe & Le Mouël (2009) proposent une revue de la littérature sur la capitalisation des politiques agricoles dans les prix du foncier. La localisation des parcelles peut également jouer un rôle important, notamment par l'accessibilité aux marchés urbains de vente directe, dans l'esprit de l'analyse de Von Thünen. Les ménages agricoles peuvent également valoriser l'accessibilité pour eux-mêmes. On comprend donc que ces facteurs, qui viennent augmenter ou diminuer la valeur des terres agricoles jouent un rôle important dans la conversion des terres. D'après (6.2), on constate que les facteurs qui viennent augmenter la valeur des terres agricoles vont retarder leur conversion. Par exemple, Towe *et al.* (2008) montrent que les programmes d'achat d'options de non-urbanisation<sup>3</sup> des terres agricoles permettent de retarder la conversion des terres agricoles de près de 6 ans.

Les coûts de conversion  $C$  d'une terre à usage urbain dépendent également de facteurs  $y_i$  variés. Il s'agit d'abord des coûts de viabilisation des terrains, ce qui inclut les frais de raccordement aux réseaux (électrique, eaux usées, voirie, ...). Éventuellement, des coûts de terrassement, de nettoyage ou de dépollution peuvent venir s'ajouter. Les coûts de terrassement et de nettoyage dépendent fortement de la pente du terrain et des propriétés biomécaniques des sols. Ainsi, la pente joue souvent un rôle négatif important sur la probabilité d'urbanisation (Kline, 2003; Newburn *et al.*, 2006; Polyakov & Zhang, 2008a). À cela, viennent s'ajouter les éventuels frais notariés, taxes de raccordement au réseau d'eaux usées et autres obligations financières afférentes au changement d'affectation de la parcelle.

Enfin, la rente résidentielle  $R_u$  dépend aussi de nombreux facteurs  $x_{ui}$ . Son déterminant le

---

3. *Development easements* aux États-Unis.



plus important est certainement l'accessibilité aux emplois et aux services. Ainsi, la distance au centre-ville de l'agglomération joue un rôle crucial, comme il en est fait l'hypothèse dans le modèle monocentrique (cf. première partie de ce rapport). D'innombrables études de la valeur du foncier résidentiel par la méthode des prix hédoniques confirment empiriquement cette relation majeure, notamment en France (Cavaillès, 2005) ou sur l'aire urbaine d'Angers (Choumert & Travers, 2010). Dans l'espace périurbain, l'accessibilité aux bourgs, et donc aux services, est également valorisée, de même que l'accessibilité aux grands axes routiers inter-cités et à des infrastructures majeures (lycées, centres hospitaliers, complexes sportifs, complexes de loisir, ...). Les éléments locaux du cadre de vie vont également jouer sur la rente urbaine. Les caractéristiques socio-démographiques du voisinage sont généralement importantes. Par exemple, les violences et la criminalité déprécient les prix de l'immobilier (Lynch & Rasmussen, 2001; Gibbons, 2004). Les caractéristiques environnementales jouent également un rôle déterminant (Boyle & Kiel, 2001). D'autres externalités de voisinage liées à la densité de population influencent la rente urbaine. À l'échelle du voisinage, l'urbanisation a deux effets négatifs. D'une part elle augmente l'encombrement des services publics et naturels localement et d'autre part, elle détériore les vues. (Cavaillès *et al.*, 2009a) montrent que les différentiels de prix des logements peuvent être importants entre le centre bourg, sans vue, et les bordures de village du fait de l'existence de vues sur les espaces naturels et agricoles. Roe *et al.* (2004) montrent que les individus préfèrent généralement des voisinages de faible densité à proximité d'espaces naturels et agricoles. L'urbanisation à proximité immédiate d'une parcelle a donc tendance à diminuer sa valeur en usage urbain. C'est donc logiquement que Irwin & Bockstael (2002), Irwin & Bockstael (2004) et Carrion-Flores & Irwin (2004) montrent qu'en milieu périurbain, la probabilité de développement d'une parcelle est liée négativement au niveau d'urbanisation et de développement des parcelles avoisinantes. À l'inverse, la protection d'une parcelle contre l'urbanisation par un zonage ou une servitude empêchant la construction de la parcelle favorise le développement des parcelles voisines dont la valeur s'en trouve préservée (Roe *et al.*, 2004; Geniaux & Napoléone, 2011).

### 6.2.2 Modèle empirique de changement d'affection des usages du sol

L'ensemble des facteurs qui influencent  $R_a$ ,  $R_u$  et  $C$  ne sont pas observables. En l'absence d'informations détaillées sur les propriétaires terriens, il est impossible de tenir compte de l'hétérogénéité de leurs anticipations quant à  $R_a$  et  $R_u$ . En outre, il existe souvent un ensemble de caractéristiques importantes des parcelles que le chercheur ne peut pas observer. Ceci donne lieu à l'apparition d'une règle probabiliste de conversion des sols, tirée de (6.2). Remarquons d'abord que la règle d'allocation optimal de l'usage des sols peut être généralisée au cas de  $K$  usages alternatifs du sol, comme le montrent Lubowski *et al.* (2006) ou Lewis & Plantinga (2007) par exemple. On obtient alors que le propriétaire d'une parcelle  $i$  en usage  $j$  choisira, à un instant  $t$ , l'usage  $k$  si :

$$\arg \max_k (R_k(x_{ki}, t) - rC_{jk}(y_i, t)) \geq R_j(x_{ji}, t) \quad \text{avec } j, k \in \{1, \dots, K\} \quad (6.3)$$

où  $x_{\ell i}$  est le vecteur de facteurs influençant la rente  $R_\ell$  d'usage  $\ell$  (avec  $\ell = j, k$ ) pour

la parcelle  $i$ .  $C_{jk}$  est le coût de conversion de la parcelle  $i$  de l'usage  $j$  à l'usage  $k$  et  $y_i$  le vecteur de facteurs qui influencent ces coûts et  $r$  le taux d'actualisation. Le revenu net<sup>4</sup> de l'usage du sol  $k$  pour la parcelle  $i$  initialement en usage  $j$  dépend d'une composante aléatoire non-observée par le chercheur notée  $\varepsilon_{jkit}$  et d'une composante observable, notée  $\bar{R}_\ell(x_{\ell i}, t)$  et la règle (6.3) peut être réécrite de la manière suivante :

$$\arg \max_k (\bar{R}_k(x_{ki}, t) + \varepsilon_{jkit}) \geq \bar{R}_j(x_{ji}, t) + \varepsilon_{jjit} \quad \text{avec } j, k \in \{1, \dots, K\} \quad (6.4)$$

On en déduit la probabilité qu'une parcelle  $i$  soit convertie de l'usage  $j$  à l'usage  $k$  à un instant  $t$  :

$$\text{Prob}_i(k|j, t) = \text{Prob}_i(\varepsilon_{jkit} - \varepsilon_{jjit} > \bar{R}_j(x_{ji}, t) - \bar{R}_k(x_{ki}, t)) \quad (6.5)$$

En faisant l'hypothèse que les termes aléatoires  $\varepsilon_{jkit} - \varepsilon_{jjit}$  sont indépendamment et identiquement distribués (*i.i.d.*) selon une loi des valeurs extrêmes généralisée de type I, on obtient le modèle logit multinomial (Greene, 2003; Train, 2009). Et en spécifiant,  $\bar{R}_\ell(x_{\ell i}, t) \equiv \beta'_\ell x_{\ell i}$  de manière linéaire, on obtient :  $\text{Prob}_i(k|j, t) = \text{Prob}_i(\varepsilon_{jkit} - \varepsilon_{jjit} > \beta'_j x_{ji} - \beta'_k x_{ki})$ . On en déduit la probabilité qu'une parcelle  $i$  soit convertie de l'usage  $j$  à l'usage  $k$  à un instant  $t$  :

$$\text{Prob}_i(k|j, t) = \frac{e^{\beta'_k x_{ki}}}{\sum_{\ell=1}^K e^{\beta'_\ell x_{\ell i}}} \quad (6.6)$$

où  $\beta'_\ell$  et  $\beta'_k$  sont des vecteurs de paramètres à estimer spécifiques aux alternatives. Dans notre application, les co-variables du modèle MNL sont spécifiques aux individus (les pixels) et on peut donc retirer leurs indices. Par ailleurs, dans un modèle MNL il est toujours possible de normaliser les coefficients d'une alternative (Greene, 2003; Train, 2009). Une pratique courante, consiste à normaliser à 0 ceux d'une alternative et d'interpréter les coefficients estimés des  $K-1$  autres alternatives par rapport à la classe de référence. (6.6) devient alors (6.7).

$$\text{Prob}_i(k|j, t) = \frac{e^{\beta'_k x_{ki}}}{1 + \sum_{\ell=1}^{K-1} e^{\beta'_\ell x_{\ell i}}} \quad (6.7)$$

L'estimation du modèle logit multinomial (MNL) décrit dans (6.7) peut se faire par la méthode du maximum de vraisemblance (Train, 2009). Le modèle MNL souffre de la propriété d'indépendance des alternatives non-pertinentes (IIA<sup>5</sup>) qui implique que le rapport de probabilité entre deux alternatives est indépendant de la présence ou absence d'autres alternatives. Dans un modèle d'allocation des usages du sol, cela revient à dire que le rapport des probabilités (*odds ratio*) entre un usage agricole et un usage forestier est indépendant de la possibilité de convertir le sol à un usage urbain. À partir de (6.7), il est en effet direct de constater que  $\frac{\text{Prob}_i(k|j, t)}{\text{Prob}_i(\ell|j, t)} = \frac{e^{\beta'_k x_{ki}}}{e^{\beta'_\ell x_{\ell i}}} = e^{(\beta'_k - \beta'_\ell) x_{ki}}$ . Cette propriété du modèle MNL est parfois trop restrictive et on lui préfère alors le modèle probit multinomial qui fait l'hypothèse que les termes aléatoires de (6.5) sont *i.i.d.* selon une loi normale multivariées. Pour relever l'hypothèse IIA, on peut éga-

4. i.e. une fois retenus les coûts de conversion, c'est-à-dire que  $\bar{R}_k(x_{ki}, t) = R_k(x_{ki}, t) - rC_{jk}(y_i, t)$ .  
5. pour *Independance of Irrelevant Alternatives*.

lement utiliser un modèle logit multinomial emboîté (c.f. par exemple Lubowski *et al.* (2006)) ou un modèle logit multinomial à effets aléatoires (c.f. par exemple Polyakov & Zhang (2008c)).

Dans le modèle MNL décrit par (6.7), les vecteurs de paramètres  $\beta'_\ell$  contiennent une constante spécifique à l'usage du sol en  $j$  observé en  $t - 1$ . C'est donc un modèle dynamique qui tient compte de l'usage du sol à un instant donné (en  $t - 1$ ) pour en déduire l'usage du sol à un instant ultérieur (en  $t$ ). L'introduction d'une constante spécifique permet de tenir compte des coûts de conversion d'un usage alternatif à un autre (Lewis & Plantinga, 2007; Polyakov & Zhang, 2008b) et assure une meilleure qualité prédictive du modèle (Polyakov & Zhang, 2008a). Comme nous n'observons pas<sup>6</sup> directement  $\bar{R}_\ell(x_i, t)$ , nous estimons donc un modèle réduit contenant des proxies décrites dans la section suivante.

### 6.2.3 Méthodologie d'évaluation du rôle des aspects culturels des paysages sur l'urbanisation

Pour apprécier le rôle des éléments culturels et perceptifs des paysages sur l'urbanisation, nous procédons en deux étapes. L'estimation du modèle MNL (6.7) permet de dériver pour chaque pixel l'effet marginal<sup>7</sup> de chaque variable sur sa probabilité d'urbanisation. Pour les variables continues  $x_i$ , ces effets marginaux sont directement obtenus en dérivant (6.7). On obtient alors (6.8). Pour les variables discrètes, i.e. les dummies, l'effet marginal est donné par la différence de probabilité entre la présence et l'absence ( $X_i^m = 0, 1$ ) de la caractéristique  $m$  de la parcelle  $i$  codée par la dummy  $X_i^m$ . Cet effet est donné par (6.9).

$$\frac{\partial \text{Prob}_i(k|j, t)}{\partial x_i} = \left[ \beta_{k, x_i} - \sum_{\ell=1}^K \beta_{\ell, x_i} \text{Prob}_i(\ell|j, t) \right] \text{Prob}_i(k|j, t) \quad (6.8)$$

$$\frac{\partial \text{Prob}_i(k|j, t)}{\partial X_i^m} = \text{Prob}_i(k|j, t, X_i^m = 0) - \text{Prob}_i(k|j, t, X_i^m = 1) \quad (6.9)$$

Dans le modèle (6.7), en plus de nombreux contrôles, nous introduisons des dummies codant l'appartenance à une des 13 unités paysagères. Parmi nos contrôles, nous introduisons des variables capables de capturer les dimensions physiques des paysages, comme des métriques paysagères ou des indicateurs des spécificités agricoles et topographiques. Nous les décrivons dans la sous-section 6.3.2. En faisant cela, nous pouvons extraire l'effet propre de l'appartenance à chaque unité paysagère de l'Atlas des Paysages du Maine-et-Loire, indépendamment des caractéristiques physiques des paysages de ces unités paysagères qui ont été extraits séparément par l'estimation du modèle MNL. Ainsi nous pouvons estimer l'effet marginal qu'à l'appartenance à une unité paysagère donnée  $UP^m$  avec  $m = \{1, \dots, 13\}$ , sur la probabilité

6. Une autre option de modélisation consiste à procéder en deux étapes, en estimant d'abord différents modèles de prix hédoniques pour expliquer  $\bar{R}_\ell(x_{\ell i}, t)$  et d'utiliser les prédictions de ces modèles dans un modèle MNL. Mais cela requiert des données sur les prix des terres dans les usages alternatifs possibles auxquelles nous n'avons pas accès.

7. C'est-à-dire l'impact qu'à l'augmentation d'une unité de chaque variable sur la probabilité de changement d'usage du sol, pour chaque usage final.

d'urbanisation d'un pixel  $i$  sachant qu'il n'était pas urbanisé à la période précédente, en  $t - 1$ . Cet effet marginal est donné par (6.10).

$$\begin{aligned} \frac{\partial \text{Prob}_i(k = \text{urbain} | j \neq \text{urbain}, t)}{\partial \text{UP}_i^m} = & \text{Prob}_i(k = \text{urbain} | j \neq \text{urbain}, t, \text{UP}_i^m = 0) \\ & - \text{Prob}_i(k = \text{urbain} | j \neq \text{urbain}, t, \text{UP}_i^m = 1) \end{aligned} \quad (6.10)$$

Par exemple, pour la période 2000-2010, le tableau 6.1 indique que sur les 221 087 pixels observés sur l'aire urbaine d'Angers, 19 356 pixels étaient urbanisés en 2000 et que donc 201 731 pixels ne l'étaient pas. Nous utilisons (6.10) pour prédire la probabilité marginale conditionnelle d'urbanisation de ces 201 731 pixels en fonction de leur appartenance à chaque unité paysagère. Nous pouvons alors décrire ces probabilités marginales conditionnelles estimées par leurs deux premiers moments empiriques. On note  $\widehat{P}_{kui}^m \equiv \frac{\partial \text{Prob}_i(k = \text{urbain} | j \neq \text{urbain}, t)}{\partial \text{UP}_i^m}$  l'effet marginal pour le pixel  $i$  d'être dans l'UP  $m$  sur sa probabilité de conversion à un usage urbain  $u$  sachant qu'il était dans un état  $k$  non urbain à la période précédente. On a alors :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{la moyenne empirique de } \widehat{P}_{kui}^m \text{ est donnée par } \mu_P^m = \frac{1}{N^m} \sum_{i=1}^{N^m} \widehat{P}_{kui}^m \\ \text{la variance empirique de } \widehat{P}_{kui}^m \text{ est donnée par } (\sigma_P^m)^2 = \frac{1}{N^m - 1} \sum_{i=1}^{N^m} (\widehat{P}_{kui}^m - \mu_P^m)^2 \end{array} \right. \quad (6.11)$$

où  $N^m$  est le nombre de pixels non-urbanisés en début de période et localisés dans l'unité paysagère  $m$ .

Ces éléments nous permettent d'apprécier les différences entre les UP. Surtout, ils nous permettent de mettre en place une deuxième étape dans laquelle nous expliquons les différences observées des moyennes  $\mu_P^m$  de probabilités marginales conditionnelles estimées pour chaque UP. Nous relierons ces effets marginaux moyens aux mesures issues de l'ontologie des textes des Atlas des Paysages et nous régressons  $\mu_P^m$  sur des indicateurs de richesse lexicale ou sur les scénarios Tropes identifiés qui décrivent les principaux champs sémantiques apparaissant dans les descriptifs des UP.

Nous utilisons dans la première étape des contrôles qui peuvent être corrélés avec les aspects sensoriels et culturels des paysages et donc à la construction sociale dont ils font l'objet. En effet, la revue de littérature de Uuemaa *et al.* (2009b) suggère l'existence d'un lien entre les descripteurs objectifs des paysages et leur contrepartie subjective. Il s'agit en particulier des métriques paysagères empruntées à l'écologie mais aussi des zonages agricoles (en Petites Régions Agricoles - PRA) ou les orientations technico-économiques des exploitations agricoles (OTEX) ou encore les découpages administratifs.

Pour apprécier l'impact des options de modélisation prises dans la première étape sur les résultats de la deuxième étape, nous réalisons une méta-analyse interne. Cette méthode, suggérée par Banzhaf & Smith (2007) nous permet de synthétiser clairement l'impact des options de modélisation retenues sur la mesure des paramètres d'intérêts. En pratique, comme l'ont fait

Banzhaf & Smith (2007) ou Kuminoff *et al.* (2010), on peut estimer un ensemble de modèles correspondant à des inclusions/exclusions différentes de variables explicatives. Dans un deuxième temps, on met en place une méta-régression qui explique l'effet obtenu lors de la première étape en fonction des différentes options de modélisation retenues (i.e. inclusion/exclusion de telle ou telle variable) et en fonction de la qualité du modèle en question Sutton & Higgins (2008). Le *BIC* (Bayesian Information Criterion) (Schwartz, 1978) ou le *AIC* (Aikake Information Criterion) (Burnham & Anderson, 2004) étant des bons critères de qualité du modèle, spécifiquement dans le cadre de base de données de grande taille, ils peuvent alors également introduits comme une simple variable additionnelle dans la régression de cette seconde étape. La fonction de la première étape étant la prédiction d'un effet marginal, on privilégiera alors le *AIC* qui est particulièrement bien adapté à cet objectif prédictif (Gelman *et al.*, 2014). Si le modèle original contient un ensemble de  $K$  variables explicatives, alors il existe  $2^K$  modèles potentiels à estimer. Comme notre résultat est issu du calcul d'effets marginaux sur plus de 200 000 observations, ce type de problème qualifié d'*intractable* en économétrie est extrêmement coûteux en temps de calcul et nécessite des algorithmes adaptés pour être effectuer un temps *raisonnable* (Moral-Benito, 2014). Nous restreignons donc les modèles candidats à ceux qui contiennent les variables susceptibles de représenter d'autres dimensions paysagères que celles approchées par les Atlas des Paysages. Pour nous, il s'agit des OTEX, des PRA, des métriques paysagères et des Cantons. Nous estimons donc  $2^4 = 16$  modèles MNL représentant toutes les combinaisons possibles d'inclusion/exclusion de ces 4 variables. Nous calculons les moments  $\mu_{P_r}^m$  et  $(\sigma_{P_r}^m)^2$  des 13 effets marginaux calculés pour chaque modèle. Nous avons donc  $13 \times 16$  mesures d'effets marginaux. C'est sur ces mesures que nous effectuons une méta-régression pour expliquer l'importance de l'effet mesuré en fonction des descripteurs des UP et des options de modélisation prises lors de la première étape.

Lors de cette deuxième étape, nous utilisons un modèle à effets aléatoires décrit dans (6.12).

$$\mu_{P_r}^m = \theta_R R_r + \theta_D D_r + u_r + \epsilon_r \quad \text{avec } u_r \sim N(0, \tau^2) \quad \text{et } \epsilon_r \sim N(0, (\sigma_{P_r}^m)^2) \quad (6.12)$$

où l'indice  $r$  désigne le  $r$ -ième des 16 modèles estimés dans la première étape,  $R_r$  est un vecteur de variables décrivant les UP et  $D_r$  un vecteur de variables comprenant les descripteurs du modèle, c'est-à-dire la présence ou l'absence d'une variable dans la première étape et  $\theta_R$  et  $\theta_D$  deux vecteurs de paramètres à estimer correspondant.  $u_r$  est un terme aléatoire propre à chaque régression de la première étape et  $\tau^2$  représente donc la variance inter-régression à estimer.  $\epsilon_r$  est un terme aléatoire classique représentant la variance du résultat de la première étape. On a donc  $\mu_{P_r}^m \sim N(\theta_R R_r + \theta_D D_r, \tau^2 + (\sigma_{P_r}^m)^2)$  ce qui permet de constater que la variabilité des résultats est liée aux caractéristiques propres des UP (vecteur  $R_r$ ) et aux options de modélisation de la première étape ( $D_r$ ). La variabilité des résultats s'explique également par deux composantes, la variabilité propre à chaque régression de la première étape ( $(\sigma_{P_r}^m)^2$ ) et une variabilité résiduelle inter-régression ( $\tau^2$ ).

Les paramètres  $\theta_R$ ,  $\theta_D$  et  $\tau^2$  de (6.12) sont estimés par maximum de vraisemblance restreint

(REML ; Thompson & Sharp, 1999), les erreurs standards ayant été corrigées selon la méthode de Knapp & Hartung (2003). La combinaison de ces deux méthodes a été montrée comme particulièrement performante. Nous nous sommes appuyés à cet effet sur la procédure *metareg* du logiciel *Stata13* (Harbord & Higgins, 2008).

### 6.3 Application à l'aire urbaine d'Angers pour la période 2000-2010

Nous estimons le modèle (6.7) sur l'aire urbaine d'Angers sur 2 périodes : 1990-2000 et 2000-2010. Les données d'usage du sol décrivent 3 usages alternatifs : forêt, urbain et agricole. Elles ont été obtenues par télédétection<sup>8</sup> et décrivent l'usage du sol dans ces trois catégories pour des pixels carrés de 100 m de côté. Nous disposons à chaque date de plus de 200 000 observations. L'aire urbaine d'Angers que nous retenons est celle de l'INSEE<sup>9</sup> mise à jour en 2011 sur des données de 2010. Ainsi, notre zone d'étude contient 133 communes.

L'analyse des matrices de transition de l'usage du sol (tableaux 6.1 et 6.2) sur notre zone d'étude montrent que l'urbanisation a essentiellement lieu sur les terres agricoles et qu'elle concerne l'ensemble du territoire étudié (figure 6.1) avec une plus forte pression de conversion aux abords d'Angers.

En 1990, les terres agricoles représentaient 84% des sols sur Angers. Cette part est passée à 82% en 2000 et à 78%. En même temps, l'urbain est passé de 6,9% en 1990 à 8,7% en 2000 et 10,6% en 2010. Dans le même laps de temps, les forêts progressaient également, mais de façon moins importante puisqu'elles représentaient 9,0% du territoire en 1990 et 11,3% en 2010. L'urbanisation est virtuellement irréversible, puisque seules 0,03% des surfaces urbanisées en 1990 sont retournées à un usage agricole ou forestier, un chiffre similaire à celui de Chakir & Parent (2009) qui l'estiment à 0,01% dans le département du Rhône .

Les formes urbaines ont également évolué entre 1990 et 2000 comme le montrent les métriques paysagères calculées sur l'aire urbaine en 1990, 2000 et 2010 pour les différentes classes d'usage du sol et présentées dans le tableau 6.3. Ces métriques sont décrites dans McGarigal *et al.* (2002). Les deux premières métriques (nombre de patches, périmètre) sont des mesures de la fragmentation des classes d'usage du sol. On voit que le paysage a une tendance générale à être moins fragmenté sur l'ensemble des classes dont le nombre de patches diminue alors que leur périmètre augmente. Le ratio périmètre / aire augmente pour l'agriculture et les forêts

---

8. Le raster original fournit l'usage du sol sur des pixels de 20 m de côté. L'aire urbaine faisant environ 60 km de haut sur 60 km de large, cela conduit à l'observation de plus de 3 millions de pixels. Pour faciliter le traitement des données, nous avons agrégé ces données sur un raster dont le pixel de base fait 100 m par 100 m, soit 25 pixels originaux. Lors de l'agrégation, nous avons donné priorité à l'urbain (un pixel est classé urbain si au moins 1/5 est urbanisé et à l'usage majoritaire sinon). Au total, la perte d'information est minime mais permet de réduire le jeu de données à un peu plus de 220 000 observations.

9. La définition de l'INSEE des Aires Urbaines repose essentiellement sur les migrants-alternants, c'est-à-dire les individus qui ne travaillent pas sur leur commune de résidence. Ainsi, sur notre zone d'étude, pour chaque commune, au moins 40% de la population en âge de travailler travaille sur la commune d'Angers.

mais diminue pour l'urbain. Ceci indique que globalement, les deux premiers ont tendance à être moins compact (des formes moins rondes) et les tâches urbaines à s'agglomérer, notamment parce que l'urbanisation a lieu à côté de tâches d'urbanisation existantes. L'indice de forme corrige les appréciations qui peuvent être faites par le ratio périmètre / aire en tenant compte du fait que les pixels sont carrés. On voit alors que la forme des tâches urbaines s'est aussi complexifiée, mais moins que pour les deux autres classes ce qui est finalement confirmé par l'indice de dimension fractale où l'on constate que la complexité des tâches urbaines a en fait peu évolué par rapport aux autres classes.

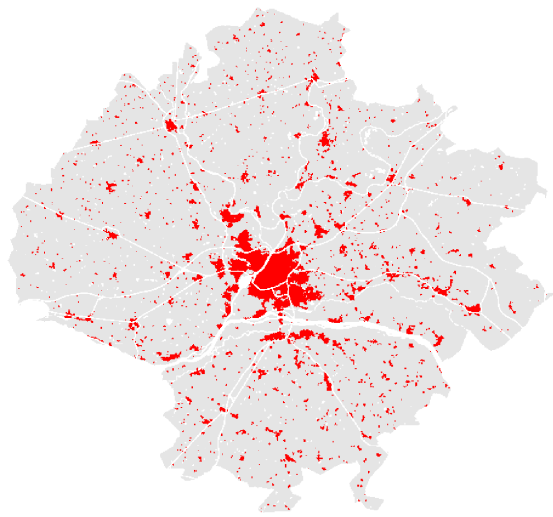
		Fin : 2000			
		agriculture	forêt	urbain	total
Début : 1990	agriculture	177876	3994	3916	185786
	forêt	3511	16331	148	19990
	urbain	11	8	15292	15311
	total	181398	20333	19356	221087
		Fin : 2010			
		agriculture	forêt	urbain	total
Début : 2000	agriculture	169915	7429	4054	181398
	forêt	2634	17530	169	20333
	urbain	125	10	19221	19356
	total	172674	24969	23444	221087
		Fin : 2010			
		agriculture	forêt	urbain	total
Début : 1990	agriculture	170617	7260	7909	185786
	forêt	1998	17699	293	19990
	urbain	59	10	15242	15311
	total	172674	24969	23444	221087

TABLEAU 6.1 – Matrices de transition de l’usage des sols sur l’aire urbaine Angers (pixels)

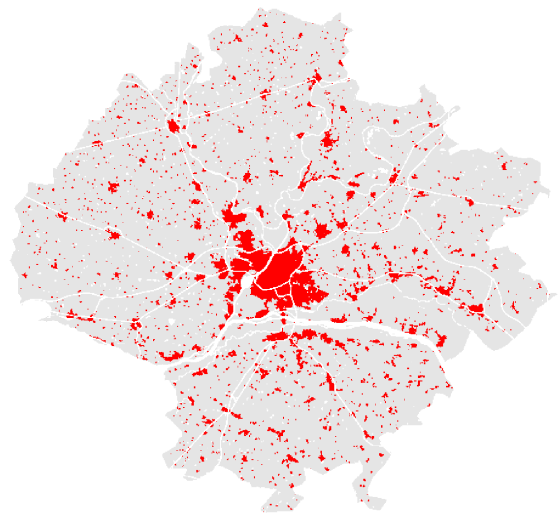
		Fin : 2000			
		agriculture	forêt	urbain	total
Début : 1990	agriculture	80,46	1,81	1,77	84,03
	forêt	1,59	7,39	0,07	9,04
	urbain	0,00	0,00	6,92	6,93
	total	82,05	9,20	8,75	100,00
		Fin : 2010			
		agriculture	forêt	urbain	total
Début : 2000	agriculture	76,85	3,36	1,83	82,05
	forêt	1,19	7,93	0,08	9,20
	urbain	0,06	0,00	8,69	8,75
	total	78,10	11,29	10,60	100,00
		Fin : 2010			
		agriculture	forêt	urbain	total
Début : 1990	agriculture	77,17	3,28	3,58	84,03
	forêt	0,90	8,01	0,13	9,04
	urbain	0,03	0,00	6,89	6,93
	total	78,10	11,29	10,60	100,00

TABLEAU 6.2 – Matrices de transition de l’usage des sols sur l’aire urbaine Angers (%)

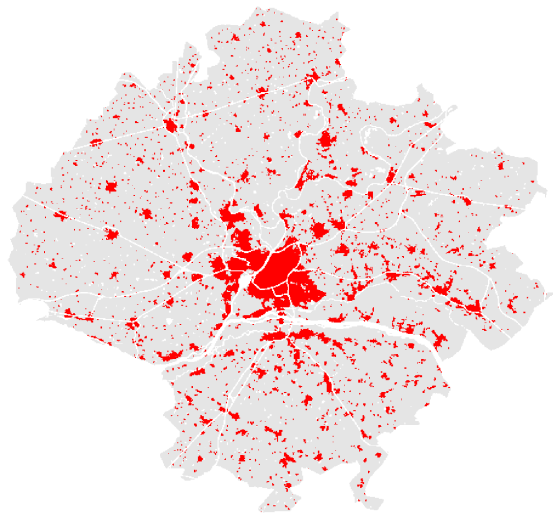




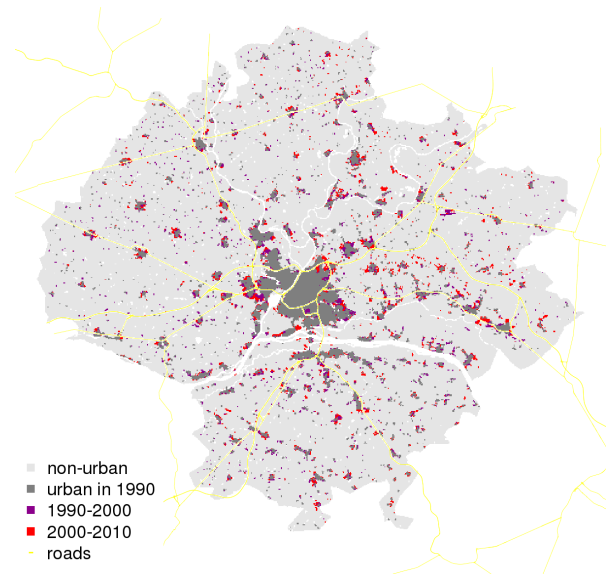
(a) 1990



(b) 2000



(c) 2010



(d) évolution 1990-2010

FIGURE 6.1 – Évolution de l'urbanisation sur l'aire urbaine d'Angers

Usage du sol	1990	2000	2010
Nombre de patchs			
Agriculture	128838	122368	107300
Forêt	5704	6223	6763
Urbain	4839	6220	8027
Périmètre			
Agriculture	55076	56872	64284
Forêt	24122	22914	31240
Urbain	17672	22112	25250
Ratio périmètre / aire			
Agriculture	0,2964	0,3135	0,3723
Forêt	1,2067	1,1269	1,2512
Urbain	1,1542	1,1424	1,0770
Indice de forme			
Agriculture	31,9096	33,3756	38,6322
Forêt	42,6184	40,0594	49,2744
Urbain	35,6290	39,6272	41,1238
Indice de dimension fractale			
Agriculture	1,5710	1,5794	1,6062
Forêt	1,7580	1,7446	1,7704
Urbain	1,7420	1,7461	1,7392

TABLEAU 6.3 – Évolution de quelques métriques sur l’aire urbaine Angers

En schématisant, on peut dire qu’à l’échelle de l’aire urbaine d’Angers, l’étalement urbain s’est donc fait essentiellement sur les terres agricoles et majoritairement par remplissage des vides entre les zones urbanisées existantes et que cette urbanisation s’est accompagnée de patchs plus gros et plus complexes de forêt et d’agriculture.

Dans la suite de cette section, nous présentons d’abord les variables retenues pour tenir compte des déterminants socio-économiques de la conversion des terres. Dans un deuxième temps nous présentons les indicateurs que nous avons retenus pour rendre compte des dimensions physiques et culturelles des paysages.

### 6.3.1 Données socio-économiques

En l’absence de données agronomiques et pédologiques précises, nous apprécions la rente en usage agricole par la pente mesurée sur nos pixels de 100 m de côté à partir du modèle numérique de terrain (MNT) BDALTI de l’IGN de précision métrique pour le Maine-et-Loire. Nous définissons la pente comme la différence entre le point le plus élevé et le point le plus de chacun de nos pixels. Nous apprécions aussi la rente agricole par les différences d’orientation technico-économique (OTEX) des communes du Recensement Agricole de 2000 qui intègre un ensemble de considérations technico-économiques comme la qualité des sols, les opportunités de marché, le prix des intrants et des produits agricoles, les économies d’agglomérations qui influencent les choix des agriculteurs. Cette variable peut poser des problèmes d’endogénéité

si les mêmes variables viennent influencer ces choix et la conversion. Le syndrome d'impermanence<sup>10</sup> est une manifestation connue de ce problème (Lopez *et al.*, 1988). Toutefois, nous pensons que ce risque est mineur ici car l'OTEX est déterminée au niveau agrégé (la commune) et indépendante des décisions individuelles. En outre, cette variable est déterminée au début de la seconde période et est plus susceptible de poser problème pour la première. Différentes estimations avec et sans cette variable sont menées. D'autre part, nous utilisons également la part communale de terres labourables dans la surface agricole utile (SAU) en 1988. Enfin, nous utilisons comme autre indicateur le zonage en Petites Régions Agricoles (PRA) défini en 1946 par le Ministère de l'Agriculture et actualisé en 1981. Ce zonage définit des zones agricoles homogènes et à la date de sa définition l'agriculture restait peu mécanisée et peu consommatrice d'intrants il constitue donc un bon indicateur du potentiel agronomique des différentes zones.

La rente urbaine dépend fortement de l'accessibilité aux emplois et services. Nous utilisons trois proxies pour représenter l'accessibilité. Nous utilisons les distances au centre-ville d'Angers et aux chefs-lieux de commune<sup>11</sup> le plus proche comme proxies de l'accessibilité aux emplois et aux services. Nous ajoutons également la distance au réseau routier principal inter-cités<sup>12</sup> qui permet une accessibilité plus rapide à Angers et offre les meilleurs temps de trajet avec les principales villes régionales qui fournissent également des emplois et des services<sup>13</sup>. Les données disponibles auprès de l'IGN pour calculer les distances par le réseau routier datent de 2010. Il se pose alors problème d'endogénéité puisque nous observons le réseau routier en fin de période, une fois que les décisions d'urbanisation ont été prises (Chomitz & Gray, 1996; Irwin & Geoghegan, 2001; Kline, 2003). Il est possible que certaines routes aient été construites pour faciliter l'accès aux nouvelles zones urbanisées. Pour éviter tout problème d'endogénéité, nous calculons les distances à vol d'oiseau plutôt que par le réseau routier pour les distances à Angers (CBD) aux chefs-lieux de communes (SBD), comme le suggèrent (Chomitz & Gray, 1996). La question de l'endogénéité concerne essentiellement le réseau secondaire pour lequel les maîtres d'ouvrage sont les communes, cantons et départements. Pour le réseau principal inter-cités, le problème est certainement mineur, donc nous introduisons la distance (à vol d'oiseau) à ce réseau.

Comme Irwin & Bockstael (2002), Irwin & Bockstael (2004), Verburg *et al.* (2004), Cho & Newman (2005) ou encore (Newburn *et al.*, 2006), nous tenons compte des externalités de voisinage engendrées par le développement urbain. Irwin & Bockstael (2002) introduisent la part d'usage du sol en état urbain dans un rayon déterminé en début de période. Irwin & Bockstael (2004) introduisent la même variable avec 4 zones définies par des cercles concentriques à 200 m, 400 m, 800 m et 1600 m de distance autour de la parcelle étudiée. Cela leur

---

10. L'*impermanence syndrom* s'observe dans les zones soumises à une forte urbanisation lorsque les agriculteurs sous-investissent dans l'attente d'une plus-value foncière à la conversion d'une parcelle.

11. Pour les coordonnées du chef-lieu de commune, nous utilisons les données GEOFLA de l'IGN. Pour un point dans l'espace, selon la configuration spatiale, le chef-lieu de commune le plus proche n'est pas nécessairement celui de la commune sur laquelle il est situé.

12. Il s'agit du réseau routier principal de la BDTOPO de l'IGN.

13. Notons toutefois, qu'aucune commune de l'aire urbaine d'Angers n'est multipolarisée.

permet de montrer que sur leur zone d'étude (Calvert County, Maryland, USA) les effets de voisinage diminuent très rapidement avec la distance et deviennent non-significatifs au-delà de 400 m. Verburg *et al.* (2004), qui étudient la conversion des sols aux Pays-Bas, introduisent des cercles à 500 m et 1600 m de distance. Au-delà de 500 m, ils ne mesurent plus d'effet significatif de voisinage. Enfin, Cho & Newman (2005) utilisent des variables indicatrices qui codent pour le développement d'une parcelle adjacente. Irwin & Bockstael (2002) montrent que le développement adjacent a un effet négatif le développement d'une parcelle. Ce résultat est confirmé, mais nuancé, par Irwin & Bockstael (2004) dont les résultats suggèrent que le développement de parcelles isolées est plus rapide, mais qu'un développement important des parcelles adjacentes peut également avoir un effet positif, ce qu'elles expliquent par la présence de services et d'infrastructures liées au développement préexistant. Verburg *et al.* (2004) on un résultat inverse. La probabilité de développement d'une parcelle est positivement influencée par la présence de développement à proximité ce qu'on peut expliquer comme l'effet des zonages, qui sont non observés dans leur étude et qui forcent le développement adjacent. Chez Cho & Newman (2005) également, une parcelle localisée près d'autres parcelles développées à une plus grande chance d'être urbanisée. Pour tenir compte des effets de voisinage, nous introduisons également un indicateur d'urbanisation du voisinage. Nous choisissons le pourcentage de pixels urbanisés dans un rayon de 250 m<sup>14</sup>.

Au sud d'Angers se trouve la confluence de la Maine et de la Loire et juste au nord la confluence du Loir, de la Mayenne et de la Sarthe, donnant la Maine qui traverse Angers du nord au sud. Ces importantes confluences et l'endiguement partiel, sur une seule rive, de la Loire créent de larges zones inondables, comme par exemple l'Île Saint-Aubin, dont nous tenons compte en introduisant le zonage en zones d'inondation constatées (ZIC) de la DREAL Pays de la Loire<sup>15</sup>.

En France, les décideurs publics locaux, notamment les maires, peuvent mettre en place des politiques restrictives en matière d'urbanisme. Les principaux outils sont au nombre de 3 et sont listés dans l'Article L124-2 du Code de l'Urbanisme. Des Plans Locaux d'Urbanisme (PLU) peuvent être mis en œuvre et définissent les zones où l'urbanisation sera possible, à l'exclusion des exceptions particulières comme le droit à la construction en zone agricole des exploitants agricoles. Le PLU est un document restrictif dont la modification ou la révision sont encadrés et qui nécessite la mise en place d'un diagnostic territorial poussé et d'un plan de gestion (habitat, espaces protégés,...) argumenté. Ils ont été mis en place par la loi relative à la solidarité et au renouvellement urbains du 13 décembre 2000, dite "loi SRU"<sup>16</sup> en remplacement des Plans d'Occupation des Sols (POS). Certaines communes optent pour une carte communale qui est légèrement moins restrictive et les communes soumises à une pression foncière faible peuvent ne mettre en place aucun zonage et se soumettre au règlement national d'urbanisme (RNU). Le RNU prévoit que les constructions nouvelles doivent favoriser la

---

14. Sur nos données, pour 79,9% des pixels nous avons alors 20 voisins, 13,6% ont entre 15 et 19 voisins, 6,1% ont entre 10 et 14 voisins et seuls 0,4% des pixels ont moins de 9 voisins.

15. <http://www.sigloire.fr/> - dernier accès le 10 octobre 2014.

16. Loi no 2000-1208 du 13 décembre 2000 relative à la solidarité et au renouvellement urbains

cohérence du bâti. Tous ces documents visent à lutter contre le mitage.

Nous n'avons pas l'information sur les différents zonages des 133 communes étudiées mais nous pensons que c'est une limite mineure. D'abord, nous analysons les conversions sur des périodes de 10 ans. Sur ces périodes, les documents d'urbanismes sont largement modifiés ou révisés pour s'ajuster aux besoins de développement des communes. De fait, ces documents ont essentiellement des conséquences de court terme (Boisson, 2005) et présentent de nombreuses inefficacités dans le contrôle de l'urbanisation (Germain & Thareau, 2010; Delattre & Napoléone, 2011). C'est aussi une période qui couvre plusieurs équipes municipales et donc plusieurs stratégies successives. Enfin, les délais de la mise en place de la loi SRU depuis 2000, son anticipation lors de la période précédente et la négociation du Schéma de Cohérence de Territoriale (SCoT) du Pôle métropolitain Loire Angers, qui couvrent 66 de nos 133 communes, ont certainement engendré une période d'instabilité des zonages qui ont été revus au gré des avancées faites par les communes et communautés de communes dans la définition de leur stratégie de développement. Ainsi, nous pensons qu'étant donnée la longueur de nos deux périodes d'observation, les zonages n'ont pas joué un rôle majeur et que les documents d'urbanisme ont été largement ajustés aux besoins stratégiques des communes et aux pressions d'urbanisation auxquelles elles sont exposées. En revanche, nous pensons que les documents d'urbanisme vont jouer sur le niveau de compacité du développement urbain. En particulier, on s'attend plutôt à un développement contigu et donc à observer un effet positif du développement des parcelles voisines, sous l'effet des contraintes du zonage, au moins pour des densités de développement peu importantes. Le zonage a un effet contraire aux externalités de voisinage. Outre le zonage, la fiscalité locale sur le foncier (taxe d'habitation, taxe sur le foncier bâti et taxe sur le foncier bâti) peut avoir un effet significatif sur l'urbanisation. Nous remarquons enfin que l'étude de Kline *et al.* (2001), en Oregon, un État américain pionnier en matière de planification urbaine, ne trouve pas d'effet significatif des zonages sur la probabilité d'urbanisation des parcelles.

Pour tenir compte de cela, nous souhaiterions idéalement introduire des variables communales (*dummies*) qui captureraient les effets de la politique de zonage et de la politique fiscale communale. Toutefois, cela revient à introduire  $133 \times 2 = 266$  variables dans le modèle. Dans les différents modèles que nous avons estimés (cf. section 6.4), cela pose un problème car la fonction de vraisemblance n'est plus globalement concave. C'est pourquoi nous nous limitons à l'introduction de *dummies* cantonales<sup>17</sup>. À défaut de tenir compte de l'intégralité des spécificités communales, nous pensons qu'elles captent une partie de ces effets, notamment du fait de l'existence de comportements stratégiques de mimétisme fiscale (Cassette & Paty, 2006, par exemple).

### 6.3.2 Données Paysagères

Pour mesurer l'impact des caractéristiques physiques et culturelles des paysages, nous introduisons des indicateurs de ces différentes dimensions.

---

17. L'aire urbaine d'Angers est tout de même répartie sur 21 cantons.

Pour extraire les aspects culturels, nous utilisons le découpage en unités paysagères de l'Atlas des Paysages du Maine-et-Loire. La couche SIG de ce découpage est celle créée par Groult & Roche (2009)<sup>18</sup> et disponible sur le site CARMEN. La figure (6.2) présente la répartition des 13 Unités Paysagères (UP) sur le territoire étudié et le décompte communal du nombre d'UP. On code sous forme de dummy son appartenance à une UP pour chaque pixel de l'aire urbaine. Ce sont les paramètres estimés sur ces dummies qui nous permettront, pour chaque pixel, de calculer la probabilité d'urbanisation conditionnellement à la non-urbanisation à la période précédente et à l'appartenance à une UP (cf. section 6.2.3).

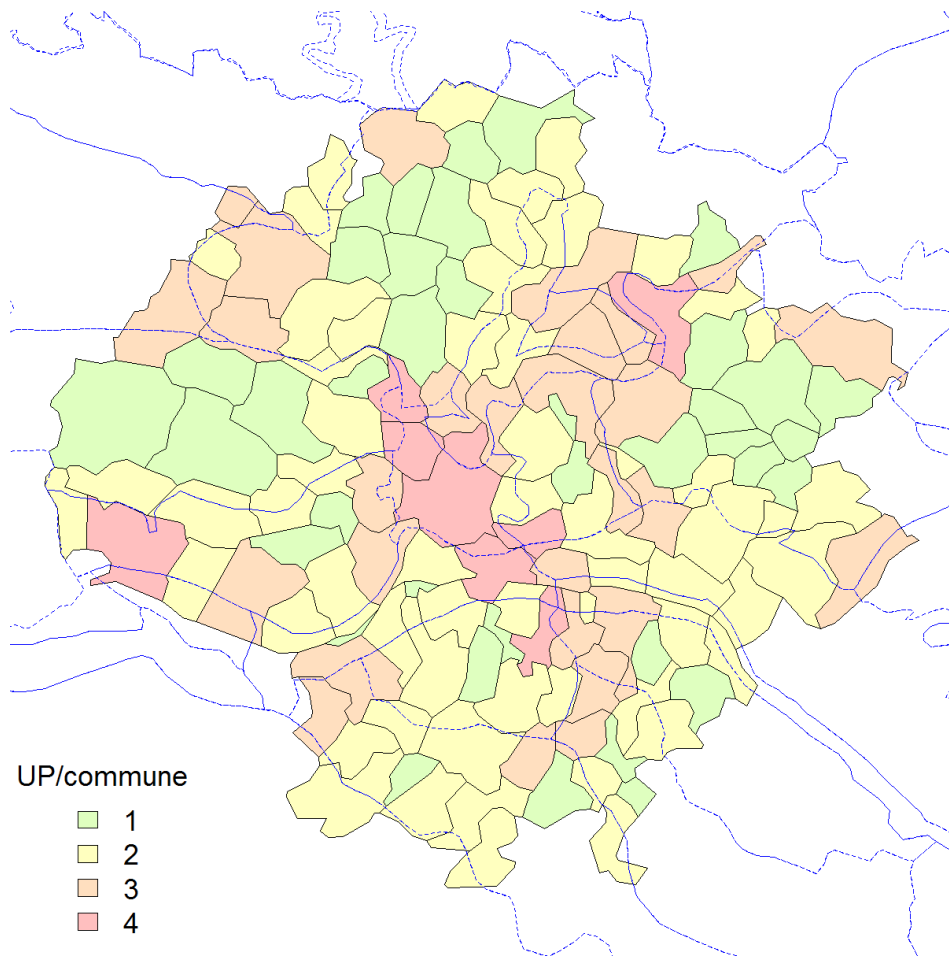


FIGURE 6.2 – Croisement des Unités Paysagères et Communes sur Angers

Nous caractérisons les dimensions physiques des paysages à l'aide de 3 métriques paysagères calculées en début de période : le ratio périmètre / aire, l'indice de forme et l'indice de dimension fractale. Ces indices ont été calculés sur une grille carrée de 3 km de côté. On attribue à chaque pixel les valeurs d'indice de la case de cette grille dans laquelle il se situe. Ces indices permettent de caractériser les formes paysagères dans l'environnement proche, mais certes pas immédiat, de chaque pixel.

18. Nous sommes reconnaissants à Richard Raymond pour son aide précieuse dans l'obtention de ces données.

En outre, certaines proxies que nous utilisons peuvent véhiculer une dimension paysagère. Il s'agit des Petites Régions Agricoles (PRA) qui ont été établies sur la base de l'homogénéité agronomique des territoires. Ce découpage a certainement un lien fort avec les aspects physiques des paysages. Il en va de même pour les orientations technico-économiques des exploitations à l'échelle communale (OTEX) ou du découpage cantonal. C'est pourquoi nous analyserons la sensibilité de nos résultats à l'inclusion / exclusion de ces variables dans le modèle MNL. Le tableau 6.5 présente les statistiques descriptives l'ensemble des variables incluses dans le modèle.

### 6.3.3 Données relatives aux perceptions

Comme expliqué dans la deuxième partie (voir chapitre 4), nous nous sommes appuyés sur une analyse textuelle des Atlas des Paysages. Deux approches opposées sont logiquement possibles (Lebart, 1994) : une approche lexicographique, qui s'appuie sur des dictionnaires *ad hoc* et/ou réduisant *a priori* le sens d'un corpus à la somme des mots qui le compose, et une approche sémantique, correspondant à la démarche d'ontologie dont nous avons parlé précédemment. Ces approches correspondent à des outils d'analyse textuelle différents (Meunier *et al.*, 2005).

Quel que soit l'outil mobilisé, extraire des perceptions relatives au paysage via une telle analyse textuelle repose sur une hypothèse qui est que la personnalité de l'auteur n'est pas susceptible d'influencer la nature du vocabulaire utilisé. Autrement dit deux auteurs face à un même paysage le décriront avec les mêmes mots. En effet, les différents outils d'analyse textuelle reposent sur une hypothèse de stabilité interne du corpus (Rousselière & Vézina, 2009) dérivant de celle de répétition (Reinert, 2003). A partir d'une comparaison entre différents Atlas des Paysages, Davodeau (2009) a souligné que les compétences des auteurs (suivant qu'ils soient paysagistes ou non) sont de nature à influencer la manière dont ils décrivent le paysage.

Différentes approches sont possibles (Bourbeillon *et al.*, 2013a). Une première dite « d'expérience naturelle » s'appuierait sur le fait que de nombreuses unités paysagères débordent les frontières administratives départementales, alors que les Atlas des Paysages sont propres à un département. En raison de cette exogénéité administrative, la différence de vocabulaire utilisé peut être alors raisonnablement attribuée à la personnalité des auteurs. Une deuxième méthode consisterait à apparier sur des caractéristiques observables des territoires (type d'occupation du sol) les unités paysagères proches et de faire une typologie des vocabulaires utilisés d'après les caractéristiques des producteurs d'Atlas des Paysages. Nous avons choisi une troisième approche quasi-expérimentale. Cette approche consiste en deux étapes : une première réside dans l'identification des éléments observables susceptibles d'influencer le vocabulaire utilisé par les auteurs. Il s'agit ici des compétences que l'on classera en grandes catégories. Dans une seconde étape, on étudiera si les compétences ont une influence sur les différents indicateurs retenus.

Une hypothèse implicite est ici que le choix des auteurs selon les compétences dont ils disposent est indépendant des caractéristiques des paysages à décrire. La méthodologie proposée pour la rédaction des Atlas des Paysages rend cette hypothèse relativement raisonnable.

Pour l'entrée lexicographique, des indicateurs de richesse de vocabulaire ont été estimés pour l'ensemble des territoires couverts par les Atlas des Paysages à notre disposition. Nous avons mobilisés différents grands dictionnaires *ad hoc* relatifs à certains thèmes présents dans les textes<sup>19</sup>. L'indicateur retenu est la fréquence des termes relatifs à ces différents dictionnaires (architecture, botanique, économie, élevage, minéralogie, urbanisme, sylviculture, géologie, campagne, viticulture, religion, eau). Il a ensuite été centré-réduit sur l'ensemble des UP numérisées. On a de cette manière un indicateur qui permet de comparer les richesses relatives pour un même dictionnaire entre les différentes UP.

Nous avons ainsi 12 indicateurs de richesse de vocabulaire à notre disposition. L'influence des variables de compétences, ainsi que de la variable d'année de rédaction de l'Atlas des Paysages a été mobilisée par un système d'équations SUREG (Seemingly Unrelated Regression System) Zellner (1962). Cette approche permet de tester l'hypothèse d'une corrélation des résidus des différentes équations composant le système (existence de variables inobservées influençant la richesse du vocabulaire). Soit pour chaque UP  $m$ , il y a  $J$  variables dépendantes  $I_{m1}, \dots, I_{mj}, \dots, I_{mJ}$  disponibles modélisées suivant leur propre modèle de régression linéaire :

$$I_{mj} = C_{mj}\beta_j + \epsilon_{mj} \quad (6.13)$$

Avec  $C_{mj}$  le vecteur des différentes variables de contrôle (compétences des auteurs, comptage du nombre d'auteurs et année de rédaction de l'Atlas) Cette modélisation autorise la présence d'une covariance non nulle entre les termes d'erreurs  $\epsilon_{mj}$  et  $\epsilon_{mk}$  pour une UP  $m$  :

$$Cov(\epsilon_{mj}, \epsilon_{mk}) = \sigma_{mj} \quad (6.14)$$

tout en assumant que

$$Cov(\epsilon_{mj}, \epsilon_{nk}) = 0 \quad (6.15)$$

pour deux UP différentes  $m$  et  $n$ .

---

19. le caractère *ad hoc* de ces dictionnaires, bien que choisis de manière experte, justifie en partie le fait que nous ne centrons pas l'analyse économétrique de l'urbanisation dans ce qui suit sur ce type d'indicateurs.



	architecture	botanique	économie	élevage	minéralogie	urbanisme	ylviculture	géologie	campagne	viticulture	religion	eau
Paysagiste	-0.260	0.867***	0.740***	0.0814	0.437**	-0.867***	0.489**	0.819***	0.0905	0.820***	0.303	0.0258
Aménagement	5.576***	0.893	4.128***	-1.390	0.754	0.240	-1.515	2.804**	2.769**	0.877	2.069	-0.271
Architecte	2.025***	-0.848	1.247**	-0.113	-0.117	0.555	-1.336***	0.635	1.863***	0.288	0.297	-0.199***
Urbaniste	-2.021***	0.619	-2.003***	0.281	0.567	0.00496	2.037***	-0.605	-1.966***	-0.389	0.169	0.103
Géographe	1.892***	-0.706*	0.890**	0.0332	0.200	0.183	-0.664	0.605	1.521***	0.181	0.548	-0.00764
Historien	8.392***	1.253	4.132**	0.491	1.960	0.307	-2.161	4.577**	6.950***	3.399*	2.421	-0.358
Environnementaliste	-7.976***	-1.032	-3.922**	-0.606	-2.703	-0.0919	0.849	-5.203***	-7.113***	-3.531*	-3.367*	0.452*
Biologiste	5.377***	0.135	4.028***	-0.236	3.558***	-1.798	0.413	2.679**	5.278***	4.362***	2.453**	-0.806***
Hydrologue	11.91***	-0.882	9.269***	3.548	7.202**	-3.739	-1.758	5.946**	15.30***	12.71***	6.348**	-1.747***
Géologue	-12.36***	-2.114	-9.200***	-2.581	-6.419**	2.579	0.155	-7.012***	-12.33***	-9.571***	-5.931**	1.292***
Cartographe	-1.955***	-0.890**	-1.258***	-0.954***	-1.799***	0.200	-1.144***	-1.904***	-1.943***	-1.030**	-1.414***	0.156***
Géomaticien	7.306***	2.429*	4.583***	1.617	2.335	0.0147	0.209	4.949***	6.101***	3.159**	3.031**	-0.262
Infographiste	0.801***	0.621***	0.675***	0.424**	0.497*	0.504*	-0.303	0.394*	0.935***	0.360	0.560**	0.0691**
Agriculture	9.365***	1.733	5.506***	0.284	2.930	-0.526	-1.282	5.754***	7.343***	5.305**	4.360**	-0.755***
Design	-0.434	-1.598***	-0.387	-0.995**	-1.389***	0.506	-1.706***	-0.221	-1.188***	-0.566	-0.947***	0.0231
Énergie	8.087***	-0.462	3.545*	1.679	4.484**	-3.262*	-0.0616	4.510***	7.938***	7.947***	3.600**	-1.086***
Médiation	-3.367***	-0.170	-2.298***	-1.390**	-1.403*	1.368**	-0.150	-1.121*	-2.985***	-3.157***	-2.375***	0.378***
Web	-1.728***	-0.938	-1.625**	2.193***	0.399	-0.759	1.179*	-1.349**	-0.449	1.029	0.126	0.0111
Nb. auteurs	-0.963***	-0.226	-0.742***	0.0745	-0.228	0.126	0.172	-0.405*	-0.651***	-0.517**	-0.346	0.0864***
Année	-0.111***	0.0222	0.0140	-0.0739***	0.0335	0.0148	-0.00142	-0.0450*	-0.0530**	-0.0231	-0.00878	-0.00809**
Constante	223.6***	-44.56	-27.77	148.1***	-67.23	-29.56	2.564	90.06*	106.8**	46.07	17.59	17.49**
R <sup>2</sup>	0.303	0.362	0.268	0.488	0.201	0.228	0.330	0.355	0.431	0.244	0.301	0.286
matrice covariance	architecture	botanique	économie	élevage	minéralogie	urbanisme	ylviculture	géologie	campagne	viticulture	religion	eau
architecture	1,000	0.261	0.265	0.283	0.246	0.057	0.095	0.161	0.227	0.247	0.446	0.162
botanique		1,000	0.076	0.286	0.123	-0.170	0.416	0.122	0.229	0.113	0.313	0.094
économie			1,000	0,108	0,120	0,201	-0,008	-0,005	0,057	0,113	0,278	0,165
élevage				1,000	0,145	-0,034	0,173	0,171	0,427	0,154	0,288	0,124
minéralogie					1,000	0,118	-0,020	0,218	0,121	0,196	0,224	0,074
urbanisme						1,000	-0,097	-0,115	-0,003	-0,088	-0,096	0,283
ylviculture							1,000	0,117	0,148	-0,031	0,096	0,169
géologie								1,000	0,092	0,053	0,104	0,055
campagne									1,000	0,122	0,197	0,120
viticulture										1,000	0,215	-0,053
religion											1,000	0,145
eau												1,000

Les écarts-type sont entre parenthèses.

\*\*\*, \*\* et \* identifient les paramètres significatifs aux seuils de 0,01%, 0,05% et 0,1% respectivement.

TABLEAU 6.4 – Résultats de l'analyse SUREG

Le test Breusch-Pagan d'indépendance conduit à rejeter l'hypothèse d'indépendance des équations ( $\chi^2(66) = 1404.351, Pr = 0.0000$ ). La matrice de variance-covariance des résidus montre l'existence de variables inobservables influençant les différents indicateurs de richesse de vocabulaire. Le résultat principal de l'estimation est que les compétences sont de bons prédicteurs des différences dans la richesse du vocabulaire utilisé<sup>20</sup>. Il n'est pas l'objet de notre rapport de nous attarder sur l'interprétation des signes des coefficients en question. Il est toutefois intéressant de souligner que le nombre d'auteurs a également une influence sur cette même richesse. Il conduit notamment à augmenter la fréquence des termes relatifs à l'eau tout en diminuant ceux relatifs à l'architecture, l'économie ou la géologie. Enfin, l'année de rédaction conduit également à baisser la richesse de vocabulaire relatif à certaines catégories, l'effet se comprenant à la moyenne de l'échantillon (qui est 2002). On peut y voir notamment des effets relatifs au changement de méthodologie de la constitution des Atlas des Paysages (Brunet-Vinck, 2004).

D'après cette première analyse, il apparaît nécessaire de devoir contrôler de ces compétences d'auteurs si l'on souhaite comparer les UP provenant d'Atlas des Paysages ayant des auteurs différents. L'analyse que nous effectuons par la suite n'est pas soumise à ce problème. Toutefois comme elle se focalise sur une aire géographique décrite par un unique Atlas, il est pertinent de ne pas prendre l'indicateur de richesse de vocabulaire que nous venons de tester, mais plutôt de s'appuyer sur l'indicateur provenant du scénario Tropes général, puisque nous avons déjà souligné les limites liées à la constitution de notre ontologie (voir chapitre 4). Cela nous conduit toutefois à faire une hypothèse qui est que le biais de subjectivité des auteurs de l'Atlas des Paysages de Maine-et-Loire est uniformément distribué sur l'ensemble des UP. Les travaux qui ont porté sur cet Atlas des Paysages (voir par exemple (Lambert, 2014)) permettent de supposer que cette hypothèse est raisonnable<sup>21</sup>.

## 6.4 Résultats des estimations

### 6.4.1 Première étape : Estimation du modèle d'allocation du sol

Comme l'Atlas des Paysages du Maine-et-Loire a été créé en 2000-2001, l'utilisation de ces données pour la période 1990-2000 pose un problème d'endogénéité si des variables inobservables expliquent le contenu de l'Atlas et influencent l'urbanisation. C'est pourquoi nous présentons ici uniquement les estimations pour la période 2000-2010 où cette question ne se pose pas.

L'estimation des 16 modèles MNL pour cette période est effectuée par maximum de vraisemblance<sup>22</sup>. Les résultats sont présentés pour trois modèles identifiés (1), (6) et (16) re-

---

20. Les  $R^2$  reportés sont assez faibles, mais on sait depuis Blomquist (1980) que le  $R^2$  provenant d'une estimation GLS (Generalized Least Squares) mobilisée pour les modèles SUREG n'a pas les propriétés similaires à celui d'un  $R^2$  provenant d'une estimation OLS (Ordinary Least Squares).

21. Notons toutefois que la force des effets marginaux que nous calculons ensuite font qu'ils sont relativement robustes à l'existence d'un biais non uniforme.

22. Les résultats détaillés de l'estimation des 16 modèles sont disponibles auprès des auteurs.

Variable	Description	Moyenne	Écart-type	Source
Usage du sol en 2010	<i>agricole</i>	0,781	-	Auteurs
	<i>forêt</i>	0,113	-	
	<i>urbain</i>	0,106	-	
Usage du sol en 2000	<i>agricole</i>	0,820	-	Auteurs
	<i>forêt</i>	0,092	-	
	<i>urbain</i>	0,088	-	
Voisinage urbanisé en 2000	Nombre de pixels urbanisés dans un rayon de 200 m	0,088	0,212	Auteurs
Ratio P/A	Ratio périmètre sur aire en 2000	0,468	0,213	
Indice de forme	Indice de forme en 2000	2,799	0,795	
Indice DF	Indice de dimension fractale en 2000	1,312	0,101	
Distance CBD	Distance à Angers (km)	18,951	7,026	IGN <sup>a</sup>
Distance SBD	Distance au bourg le plus proche (km)	1,862	0,875	
Distance SBD	Distance au réseau routier principal (km)	2,729	2,169	
Pente	Dénivelé au sein du pixel (m)	2,663	2,899	
PNR	Commune d'un parc naturel régional (dummy)	0,152	-	
Revenu commune	Revenu moyen de la commune (€/hab.) en 2000	14713	3467	INSEE <sup>b</sup>
Équipements communes	Nombre d'équipements de la commune en 1998	117,6	509,1	
Inondable	Zone d'inondation constatée	0,045	-	DREAL Pays de la Loire
PRA	Petites Région Agricoles de 1981 (dummy)			Agrete <sup>c</sup>
	<i>Beaugeois</i> (référence)	0,220	-	
	<i>Bocage angevin</i>	0,430	-	
	<i>Choletais</i>	0,147	-	
	<i>Saumurois</i>	0,071	-	
	<i>Vallée de la Loire</i>	0,132	-	
OTEX	Orientation technico-économique de la commune en 2000 (dummy)			
	<i>Bovins lait</i> (référence)	0,009	-	
	<i>Bovins mixte</i>	0,040	-	
	<i>Fruits-Cult. Permanentes</i>	0,007	-	
	<i>Grandes Cultures</i>	0,024	-	
	<i>Granivores mixtes</i>	0,059	-	
	<i>Horticulture</i>	0,067	-	
	<i>Maraichage</i>	0,012	-	
	<i>Oléoproteagineux</i>	0,001	-	
	<i>Polyculture-Élevage</i>	0,667	-	
<i>Viticulture</i>	0,102	-		
	<i>Volailles</i>	0,013	-	

<sup>a</sup> : BDALTI, MNT500, BDTPOPO, Geoportail - calculs des auteurs.

<sup>b</sup> : Recensement de la Population, Inventaire communal 1998, Code Officiel Géographique.

<sup>c</sup> : Recensement Agricole de 2000, Zonages en Régions Agricoles.

TABLEAU 6.5 – Statistiques descriptives

Variable	Description	Moyenne	Écart-type	Source
Canton	Appartenance à un canton (dummy)			
	<i>Angers</i> (référence)	0,017	-	INSEE <sup>a</sup>
	<i>Angers-Nord-Est</i>	0,030	-	
	<i>Angers-Est</i>	0,010	-	
	<i>Baugé</i>	0,023	-	
	<i>Beaufort-en-Vallée</i>	0,072	-	
	<i>Chalonnnes-sur-Loire</i>	0,024	-	
	<i>Châteauneuf-sur-Sarthe</i>	0,091	-	
	<i>Doué-la-Fontaine</i>	0,006	-	
	<i>Durtal</i>	0,019	-	
	<i>Gennes</i>	0,029	-	
	<i>Le Lion-d'Angers</i>	0,087	-	
	<i>Le Louroux-Béconnais</i>	0,091	-	
	<i>Les Ponts-de-Cé</i>	0,086	-	
	<i>Saint-Georges-sur-Loire</i>	0,070	-	
	<i>Seiches-sur-le-Loir</i>	0,088	-	
	<i>Thouarcé</i>	0,111	-	
	<i>Tiercé</i>	0,066	-	
	<i>Angers-Trélazé</i>	0,022	-	
	<i>Angers-Ouest</i>	0,016	-	
<i>Angers-Nord</i>	0,037	-		
<i>Angers-Nord-Ouest</i>	0,006	-		
Unité Paysagère	Appartenance à une UP (dummy)			
	<i>L'Agglomération angevine</i> (référence)	0,030	-	LADYSS
	<i>La Loire des promontoires</i>	0,041	-	
	<i>Le Beaugois</i>	0,143	-	
	<i>Le Couloir du Layon</i>	0,077	-	
	<i>Le Haut Anjou</i>	0,211	-	
	<i>Le Saumurois</i>	0,063	-	
	<i>Le Segréen</i>	0,143	-	
	<i>Le Val d'Anjou</i>	0,065	-	
	<i>Les Basses vallées angevines</i>	0,039	-	
	<i>Les Marches du Segréen</i>	0,080	-	
	<i>Les Mauges</i>	0,013	-	
	<i>Les Plateaux de l'Aubance</i>	0,054	-	
	<i>Les Portes du Beaugois</i>	0,040	-	

<sup>a</sup> : Code Officiel Géographique.

TABLEAU 6.6 – Statistiques descriptives (suite)

présentant 3 spécifications intermédiaires. Le modèle (1) est le modèle réduit. Il ne contient aucune des variables de contrôle expliquant potentiellement les aspects physiques des paysages. À l’opposé, le modèle (16) constitue le modèle complet avec l’ensemble des contrôles. L’inclusion / exclusion de chacune de ces 4 variables de contrôle (métriques paysagères, OTEX, PRA, et cantons) permet de construire les 16 modèles. Le modèle (6) est un des 14 modèles intermédiaires, choisi au hasard pour l’illustration. Il tient compte des PRA et des métriques paysagères. Les résultats des estimations pour ces modèles sont présentés dans le tableau 6.7.

Tous ces modèles montrent des résultats cohérents et très proches. Les coefficients pour un usage du sol final en agriculture (en 2010) sont pris en référence et normalisés à 0. Le tableau 6.7 présente donc les coefficients estimés pour les deux autres catégories d’usage du sol : forêt et urbain. Un coefficient positif indique<sup>23</sup> que la variable concernée favorise l’usage du sol final concerné par rapport à l’agriculture prise en référence. C’est l’inverse pour un coefficient négatif.

Parmi les 16 modèles estimés, le modèle (1) est le modèle qui ajuste le moins bien les données, que ce soit en utilisant comme critère de choix la log-vraisemblance (logL) à la convergence du modèle ou les critères d’informations (AIC et BIC). Inversement, le modèle complet (16) est le meilleur modèle. C’est donc sur ce modèle que nous fondons la discussion qui suit. Comme nous nous intéressons à la dynamique de l’urbanisation, nous nous limitons à une discussion rapide du signe des coefficients estimés dans le modèle (16) sur les parcelles urbanisées en 2010.

Pour tenir compte d’effet potentiellement non linéaires, nous avons systématiquement introduit un terme quadratique sur les distances. La distance à Angers, c’est-à-dire la distance aux emplois, a un effet linéaire positif et un effet quadratique négatif. Ceci indique une relation concave, en U inversé, entre la distance au CBD et la probabilité d’urbanisation. Le sommet de la courbe en U inversé est à environ 1,8 km du centre d’Angers. Ainsi, les parcelles non urbanisées sur la commune même d’Angers ont une probabilité plus faible d’être urbanisées que des parcelles situées à proximité immédiate d’Angers (vers 2 km). Il faut y voir ici deux effets. Le premier est dû au fait que ces espaces ont une très grande valeur dans leur état non-urbanisé, car ils procurent des aménités aux angevins et sont donc très certainement protégés (par nécessairement par un zonage). Par ailleurs, ces espaces correspondent essentiellement aux bords de Maine, au lac de Maine et à la Plaine de l’Île Saint-Aubin qui sont inondables. Au delà de 2 km, les parcelles ont une probabilité décroissante d’être urbanisées, ce qui traduit bien l’effet de l’augmentation des coûts de transport au lieu de travail. L’effet linéaire de la distance au centre est négatif et l’effet quadratique est positif, ce qui traduit une relation convexe, décroissante mais de moins en moins. La probabilité d’urbanisation est donc plus forte à proximité immédiate des bourgs que lorsque que l’on s’en éloigne, ce qui traduit deux

---

23. Il est en général plus aisé d’interpréter les coefficients d’un modèle MNL en termes d’effets marginaux, toutefois comme les coefficients de la première étape ne sont pas notre centre d’intérêt, nous nous limitons à une discussion rapide de leur signe.

choses : la valeur de la proximité aux services et de la proximité sociale d'une part et, d'autre part, l'effet inobservé des documents de planification qui favorisent la contiguïté de développement urbain. Enfin, on observe la même relation décroissante et convexe pour la proximité au réseau routier principal ce qui traduit bien la valeur de ce réseau qui améliore l'accessibilité à Angers et aux principaux pôles régionaux.

Le revenu communal moyen a un effet positif, ce qui traduit bien la préférence des ménages périurbains pour des voisinages plus aisés et certainement avec moins de désagrément que les problèmes qui surviennent dans les zones plus défavorisées (délinquance sur la voie publique, dégradation du système scolaire). C'est la manifestation classique des forces qui sous-tendent les situations de ségrégation. Le niveau d'équipement des communes a également un effet positif car les ménages valorisent les services, publics et privés, offerts par les municipalités (école, complexes sportifs, magasins, ...).

Les aménités naturelles jouent également un rôle. D'abord, les communes situées dans le Parc Naturel Régional de Loire-Anjou-Touraine ont une plus grande probabilité d'être urbanisées que les autres. Ceci rend compte des nombreuses aménités offertes par le parc. Inversement, les zones inondables ont une probabilité beaucoup plus faible d'être urbanisées. Les paramètres estimés sur les pentes rendent compte d'un phénomène largement observé, que l'on rencontre également dans l'étude de Cho & Newman (2005). La probabilité d'urbanisation augmente avec le dénivelé observé sur un pixel jusqu'à un point (environ 8 m) où elle diminue. Les ménages valorisent les reliefs et les vues mais les terrains trop accidentés ont des coûts de conversion trop élevés et des valeurs d'agrément plus faibles.

Enfin, les paramètres estimés sur les externalités de voisinage montrent également une relation en U inversé entre la probabilité de conversion d'une parcelle et sa probabilité d'urbanisation. De faibles niveaux d'urbanisation dans le voisinage d'une parcelle sont favorables à l'urbanisation d'une parcelle car ils abaissent les coûts de conversion (viabilisation) du terrain. Au delà d'un environnement urbanisé à 75%, la probabilité d'urbanisation diminue. Au delà, les externalités négatives de la densité (perte de vues, congestion, ...) deviennent alors prépondérants.

Pour l'effet de l'appartenance à une UP, la référence est l'UP "*Agglomération angevine*". Ainsi, les signes négatifs sur les dummies des UP s'interprètent comme le fait que les paysages dans ces UP sont moins préférés. On remarque dans le tableau 6.8, que l'effet sur l'urbanisation de l'appartenance à cette UP est le plus fort.

#### **6.4.2 Deuxième étape : Analyse du rôle des perceptions**

Pour chacun des 16 modèles estimés et pour chaque UP, nous estimons la probabilité marginale qu'un pixel soit urbanisé en 2010 sachant qu'il ne l'est pas en 2000. Le tableau 6.8 présente les statistiques descriptives de ces effets. L'appartenance à l'UP "*Agglomération an-*

Variable	modèle (1)		modèle (6)		modèle (16)	
	forêt	urbain	forêt	urbain	forêt	urbain
Constante	-1,9051*** (0,4969)	4,4063*** (0,4994)	-0,9952* (0,5554)	3,2803*** (0,6319)	-16,2558*** (1,0831)	5,4819*** (1,6161)
Distance CBD	-0,1700*** (0,0238)	0,0217 (0,0362)	-0,2052*** (0,0286)	0,1811*** (0,0441)	-0,1027*** (0,0301)	0,1622*** (0,0478)
(Distance CBD) <sup>2</sup>	0,0016*** (0,0003)	-0,0008 (0,0006)	0,0016*** (0,0004)	-0,0035*** (0,0007)	0,0002 (0,0005)	-0,0030*** (0,0008)
Distance SBD	0,3861*** (0,0511)	-1,4226*** (0,0685)	0,3673*** (0,0514)	-1,5972*** (0,0698)	0,5032*** (0,0521)	-1,6261*** (0,0706)
(Distance SBD) <sup>2</sup>	-0,0601*** (0,0115)	0,2284*** (0,0179)	-0,0510*** (0,0116)	0,2575*** (0,0180)	-0,0807*** (0,0118)	0,2617*** (0,0182)
Revenu commune	-0,0737*** (0,0152)	0,0514** (0,0212)	-0,0984*** (0,0197)	0,1049*** (0,0287)	-0,0458** (0,0203)	0,0968*** (0,0299)
Revenu commune × Distance CBD	0,0067*** (0,0008)	-0,0010 (0,0012)	0,0082*** (0,0011)	-0,0037** (0,0016)	0,0055*** (0,0011)	-0,0046*** (0,0016)
Distance route	0,1321*** (0,0167)	-0,1829*** (0,0256)	0,1471*** (0,0175)	-0,1312*** (0,0280)	0,2697*** (0,0181)	-0,1030*** (0,0297)
(Distance route) <sup>2</sup>	-0,0131*** (0,0021)	0,0213*** (0,0032)	-0,0179*** (0,0022)	0,0140*** (0,0035)	-0,0295*** (0,0023)	0,0114*** (0,0037)
Pente	0,0523*** (0,0066)	0,0414*** (0,0133)	0,0601*** (0,0066)	0,0574*** (0,0137)	0,0590*** (0,0066)	0,0566*** (0,0138)
(PEnte) <sup>2</sup>	0,0005 (0,0003)	-0,0028*** (0,0009)	0,0005 (0,0003)	-0,0035*** (0,0009)	0,0004 (0,0003)	-0,0035*** (0,0009)
PNR	-0,1083** (0,0452)	0,3143*** (0,0708)	0,2100** (0,0977)	0,5258*** (0,1290)	0,1875 (0,1183)	0,3394** (0,1464)
Équipements commune	0,0003* (0,0001)	-0,0006*** (0,0002)	0,0014*** (0,0004)	0,0051*** (0,0005)	0,0025*** (0,0004)	0,0034*** (0,0006)
Équip, comm, × Distance SBD	-0,0002*** (0,0001)	0,0003*** (0,0001)	-0,0002*** (0,0001)	0,0004*** (0,0001)	-0,0002*** (0,0001)	0,0004*** (0,0001)
Voisinage urbanisé en 2000	-2,5709*** (0,2617)	10,5417*** (0,2306)	-2,3227*** (0,2618)	10,4405*** (0,2314)	-2,2980*** (0,2621)	10,2813*** (0,2330)
(Voisinage urbanisé en 2000) <sup>2</sup>	4,5150*** (0,4968)	-6,7404*** (0,3464)	4,0270*** (0,5001)	-6,8611*** (0,3480)	3,4987*** (0,5040)	-6,8040*** (0,3502)
Agricole en 2000	-0,5447 (0,3372)	-7,6008*** (0,0966)	-0,5055 (0,3445)	-7,7312*** (0,0975)	-0,4794 (0,3467)	-7,7661*** (0,0977)
Forêt en 2000	4,3465*** (0,3377)	-6,4888*** (0,1299)	4,3437*** (0,3449)	-6,6466*** (0,1309)	4,2310*** (0,3472)	-6,7874*** (0,1317)
Inondable	0,3772*** (0,0739)	-1,7645*** (0,1690)	0,5942*** (0,0773)	-1,7166*** (0,1714)	0,5385*** (0,0773)	-1,6997*** (0,1712)
La Loire des promontoires	-0,3129** (0,1476)	-0,0297 (0,1254)	-0,6866*** (0,1856)	-0,1854 (0,1624)	-0,1755 (0,1878)	0,0507 (0,1646)
Le Beaugois	0,8524*** (0,1397)	-0,1303 (0,1330)	-0,6164*** (0,1713)	-1,2133*** (0,1816)	-0,2581 (0,1749)	-1,1897*** (0,1873)
Le Couloir du Layon	-0,6891*** (0,1529)	-0,3832** (0,1605)	-1,5626*** (0,2077)	-0,9975*** (0,2263)	-0,7630*** (0,2163)	-0,1787 (0,2463)
Le Haut Anjou	0,4870*** (0,1401)	-0,0911 (0,1296)	0,1320 (0,1588)	-0,8230*** (0,1627)	0,4399*** (0,1625)	-0,6516*** (0,1669)
Le Saumurois	0,2472* (0,1476)	-1,0813*** (0,1528)	-0,9861*** (0,1995)	-1,4529*** (0,2149)	-0,3897* (0,2066)	-1,3961*** (0,2321)
Le Segréen	-0,1375 (0,1410)	-0,4902*** (0,1310)	0,2956* (0,1574)	-0,4657*** (0,1539)	0,6877*** (0,1614)	-0,3199** (0,1571)
Le Val d'Anjou	-0,5234*** (0,1527)	-0,5322*** (0,1442)	-1,6716*** (0,1818)	-1,5493*** (0,1790)	-0,7593*** (0,1878)	-1,3475*** (0,1845)
Les Basses vallées angevines	0,1278 (0,1483)	-0,3769** (0,1468)	-0,5458*** (0,1663)	-1,3572*** (0,1738)	-0,2276 (0,1703)	-1,4730*** (0,1791)
Les Marches du segréen	0,0492 (0,1378)	-0,6846*** (0,1245)	0,4735*** (0,1609)	-0,5335*** (0,1493)	0,7876*** (0,1636)	-0,3997*** (0,1517)
Les Mauges	-1,2087*** (0,1998)	-1,0760*** (0,2640)	-2,0887*** (0,2482)	-1,8319*** (0,3195)	-1,2981*** (0,2609)	-0,8835*** (0,3397)
Les Plateaux de l'Aubance	-0,0559 (0,1457)	-0,3900*** (0,1366)	-0,8471*** (0,2009)	-0,7008*** (0,2005)	-0,1555 (0,2083)	-0,0115 (0,2199)
Les Portes du Beaugois	0,3615** (0,1404)	0,0003 (0,1184)	-0,2687 (0,1780)	-0,8539*** (0,1621)	0,2119 (0,1795)	-0,7221*** (0,1674)
PRA		non		non		oui
Cantons		non		oui		oui
OTEX		non		oui		oui
Métriques paysagères		non		non		oui
Observations		221 087		221 087		221 087
logL		-52 842		-52 113		-51 477
pseudo-R <sup>2</sup>		0,647		0,652		0,656
AIC		106 136		105 297		103 227

Les écarts-type sont entre parenthèses.

\*\*\*, \*\* et \* identifient les paramètres significatifs aux seuils de 0,01%, 0,05% et 0,1% respectivement.

TABLEAU 6.7 – Résultats de l'estimation des modèles logit multinomiaux (MNL)

*gevine*" a l'effet le plus important sur la probabilité de conversion à une usage urbain. Elle de 3,49% alors que l'effet de l'appartenance à n'importe quelle UP est de 2,22%. L'appartenance à cette UP augmente donc la probabilité de conversion d'un pixel de 1,3% environ, par rapport à la moyenne. Les UP "*La Loire des promontoires*", "*Le Haut Anjou*" et "*Les Plateaux de l'Aubance*" ont également des probabilités de conversion plus élevées. A l'inverse, les UP "*Le Saumurois*", "*Les Mauges*" ou "*Le Beaugois*" sont celles où ont observe les probabilités les plus faibles, nettement en dessous de la moyenne. Ainsi, un pixel situé dans le Saumurois à une probabilité de conversion 1,1% inférieure à la moyenne. Comme on peut le voir à travers les écarts-type fournis dans le tableau 6.8, la variabilité des effets mesurés sont faibles, ce qui indique des différences significatives entre les UP.

Unité Paysagère	Effet Marginal		Minimum		Maximum	
	$\mu_P^m$	$(\sigma_P^m)^2$	$\mu_P^m$	$(\sigma_P^m)^2$	$\mu_P^m$	$(\sigma_P^m)^2$
L'Agglomération angevine	0,0349	0,0035	0,0258	0,0024	0,0418	0,0043
La Loire des promontoires	0,0313	0,0025	0,0239	0,0015	0,0399	0,0036
Le Beaugois	0,0191	0,0012	0,0146	0,0009	0,0256	0,0015
Le Couloir du Layon	0,0242	0,0027	0,0173	0,0011	0,0340	0,0048
Le Haut Anjou	0,0255	0,0015	0,0217	0,0009	0,0314	0,0019
Le Saumurois	0,0115	0,0012	0,0075	0,0008	0,0147	0,0018
Le Segréen	0,0256	0,0019	0,0172	0,0008	0,0287	0,0025
Le Val d'Anjou	0,0150	0,0011	0,0128	0,0009	0,0198	0,0013
Les Basses vallées angevines	0,0167	0,0016	0,0116	0,0012	0,0226	0,0018
Les Marches du Segréen	0,0225	0,0019	0,0149	0,0009	0,0270	0,0026
Les Mauges	0,0145	0,0033	0,0100	0,0024	0,0208	0,0050
Les Plateaux de l'Aubance	0,0257	0,0025	0,0185	0,0011	0,0373	0,0044
Les Portes du Beaugois	0,0217	0,0016	0,0162	0,0013	0,0279	0,0022
Total	0,0222	0,0020	0,0075	0,0008	0,0418	0,0050

TABLEAU 6.8 – Statistiques descriptives des effets marginaux estimés ( $\widehat{P}_{kui}^m$ )

Nous utilisons les effets marginaux estimés et leurs écarts-types pour estimer le méta-modèle (6.12). Pour expliquer la variabilité des mesures de probabilités conditionnelles, nous les régressons sur les indicateurs de richesse de vocabulaire se rapportant à plusieurs thématiques (dictionnaire) mais aussi sur l'importance de différents champs sémantiques (scénarios tropes) tirés de l'ontologie dans la deuxième partie de ce rapport. Les indicateurs de richesse de vocabulaire ont été estimés pour l'ensemble des territoires couverts par les Atlas des Paysages à notre disposition. Ils ont été ensuite centrés réduits. Ils sont mis à titre indicatif dans l'analyse car on a vu précédemment que les Atlas des Paysages pouvaient être touchés par un biais de richesse de vocabulaire lié à l'auteur. Nous centrons donc notre analyse sur les champs sémantiques extraits des Atlas des Paysages à partir du scénario Tropes. Les variables créées sont des variables de répartition du vocabulaire en pourcentage. Ainsi la catégorie résiduelle (Autres concepts) n'a pas été introduite dans les analyses. On pourra alors interpréter les résultats de la manière suivante : quel impact a une augmentation de la part du vocabulaire relatif à un concept donné (par rapport à la catégorie résiduelle) sur la probabilité



d'urbanisation dans l'UP ? Le vocabulaire est alors vu comme indicateur de la présence ou non d'aménités recherchées par les individus. On fait ainsi une hypothèse implicite qui est que la nature et la richesse de la description qui compte et non la connotation positive ou négative de la description. Si cette hypothèse peut être discutée à un niveau national, Davodeau (2009) a bien mis en évidence que la conception en 2000 de l'Atlas des Paysages en Maine-et-Loire a eu pour objectif de mettre en avant l'approche sensible du paysage qui a eu tendance à réifier des références identitaires "toujours construites et jamais vraiment stabilisées". Les UP sont ainsi nommées selon une approche toponymique faisant recours à une valorisation des paysages traditionnels hérités. Les UP sont décrites comme autant de "paysage identitaire" accentuant le biais d'une description positive du lieu en raison même du sens que les individus y vivant peuvent lui donner.

Les résultats des estimations de (6.12) sont reportés dans le tableau 6.9. Comme nous réalisons une méta-régression interne, sur les mêmes données et avec des modèles proches, la variance estimée inter-estimations  $\tau^2$  est faible, ce qui est normal pour ce type d'analyse. Comme on peut le voir, les indicateurs du contenu des descriptions des unités paysagères expliquent la quasi-totalité de la variation des effets mesurés. La part de la variance inter-estimations expliquée par le modèle est mesurée par le coefficient  $R^2$  ajusté. Les variables explicatives mises dans les méta-modèles, permettent donc d'expliquer entre 72% et 76% des différences mesurées entre les UP. Par ailleurs, le coefficient  $I^2$  fournit une estimation de la variance totale qui est attribuable aux différences entre les études. Les méta-modèles estimés expliquent donc de 82% à 84% de cette variance. Tous les tests montrent que les modèles sont nettement significatifs.

Nous tenons compte des différences entre les modèles estimés dans la première étape pour expliquer la variabilité des effets mesuré. En effet, si l'information qu'ils véhiculent est corrélée à celle véhiculée par les UP, alors leur exclusion peut introduire un biais de variable omise. Ce n'est pas le cas ici. Les coefficients estimés sur les métriques paysagères, les OTEX ou les cantons ne sont pas significatifs. Les dummies sur les UP reflète donc une autre dimension que ces variables que nous interprétons comme la composante culturelle des paysages. Notons toutefois que le découpage en PRA est significatif. Comme nous l'avions pressenti (cf. 6.3.2), la construction des PRA reflète bien une dimension historico-culturelle des paysages. Pour tenir compte du fait que parmi les 16 modèles générant les données de cette deuxième étape il y a de meilleurs modèles que d'autres, nous introduisons également le critère d'information d'Aikake (AIC) mesuré pour ces modèles. Il n'est jamais significatif ce qui indique que les effets mesurés sont indépendants de la qualité du modèle estimé à la première étape.

À l'inverse, nos indicateurs textuels et sémantiques du contenu des descriptions des UP de l'Atlas des Paysages du Maine-et-Loire jouent un rôle pour expliquer les différences entre les probabilités d'urbanisation de celles-ci. Des UP décrites avec un vocabulaire plus riche relatif à l'agriculture et l'environnement ont eu une probabilité plus forte d'être urbanisées. Ainsi 1% d'augmentation de la part de ce concept dans l'ensemble du vocabulaire conduit à augmenter

de 0,33% la probabilité d'urbanisation. Il est intéressant de souligner que nous retrouvons les mêmes résultats concernant le vocabulaire relatif aux "comportements et sentiments". Molette (2014) ainsi que Piolat & Bannour (2009) ont bien mis en évidence l'intérêt du logiciel Tropes comme logiciel d'analyse sémantique des textes particulièrement pertinent pour repérer les émotions dans le texte. On constate ici que 1% d'augmentation conduit à augmenter la probabilité d'urbanisation de 0,38%. Enfin les UP décrites avec un vocabulaire plus riche relatif à "politique et société" ont vu leur urbanisation augmenter fortement (effet marginal de 0,72%). Si on suit notre hypothèse de lien entre la description des paysages et la nature des aménités produites, on peut ainsi supposer que des aménités relatives à l'agriculture, l'environnement, la dynamique sociale et culture locale ont été des moteurs de l'urbanisation de ces espaces. On retrouve ainsi des résultats validant les hypothèses de notre modèle théorique détaillé en première partie. A l'inverse une part plus importante de vocabulaire relatif à "forces et quantités" conduit à diminuer la probabilité d'urbanisation. On peut penser que ce vocabulaire (où l'on retrouve des termes comme niveau, masse, puissance) décrit des territoires plutôt difficiles à "habiter" ou moins attractifs car moins producteurs d'aménités recherchées par les ménages. Cela peut éventuellement correspondre à des zones difficiles et donc coûteuses à aménager.

## 6.5 Conclusion

Le modèle économétrique d'allocation des sols, application directe du modèle économique de la première partie, a eu pour objectif de rendre compte de l'impact des déterminants économiques et paysagers, dans leurs dimensions physique et perceptive, sur l'urbanisation. Ce modèle nous sert à estimer la probabilité conditionnelle qu'un pixel soit urbanisé en fonction de son appartenance à une unité paysagère. Cette probabilité a été expurgée de la dimension physique des paysages à la première étape. Elle est mise en relation, par une méta-régression, aux descripteurs construits à partir de l'ontologie. Nous pouvons ainsi confirmer que les aspects culturels des paysages jouent un rôle non négligeable sur l'urbanisation et identifier les composantes des perceptions qui jouent le plus sur l'urbanisation.

A notre connaissance, ce travail est pionnier dans ce lien entre économétrie et variables textuelles<sup>24</sup>. Il s'inscrit pleinement dans le développement d'approches dites *mixtes* en sciences sociales (Bryman, 2007). Cette approche est nécessaire en raison de la complexité du fait social "paysage", difficilement réductible à une seule dimension, soit comme éléments physiques (observables et objectivables), soit comme dimension perçues par les individus ou les groupes d'individus (difficilement quantifiables et observables). Notre modélisation permet de faire ce lien, dès lors qu'elle prend bien soin de tester la robustesse des résultats obtenus à différentes hypothèses ou méthodologies de collecte des données (Leamer, 1985). On a vu toutefois que les résultats pour être interprétés nécessitent une théorie amont. Cette théorie amont étant une théorie mettant d'abord l'accent sur les mécanismes économiques individuels a fait que

---

24. En économie, on peut toutefois mentionner les travaux particuliers développés en analyse des marchés financiers (Fagan & Gencay, 2010)

Variables	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
	base	Dictionnaire		complet	base	Scénario Tropes		complet
		contrôles	AIC			contrôles	AIC	
Architecture	0,0009 (0,0011)	0,0010 (0,0011)	0,0010 (0,0011)	0,0010 (0,0011)				
Botanique	-0,0256*** (0,0033)	-0,0258*** (0,0033)	-0,0257*** (0,0033)	-0,0258*** (0,0033)				
Économie	0,0079*** (0,0021)	0,0079*** (0,0021)	0,0079*** (0,0021)	0,0079*** (0,0021)				
Élevage	-0,0088** (0,0037)	-0,0090** (0,0037)	-0,0088** (0,0037)	-0,0090** (0,0037)				
Minéralogie	-0,0204*** (0,0059)	-0,0203*** (0,0059)	-0,0204*** (0,0059)	-0,0203*** (0,0059)				
Urbanisme	0,0397*** (0,0067)	0,0397*** (0,0066)	0,0397*** (0,006-)	0,0397*** (0,0067)				
Sylviculture	0,0177*** (0,0018)	0,0178*** (0,0018)	0,0177*** (0,0018)	0,0178*** (0,0018)				
Géologie	0,0250*** (0,0050)	0,0249*** (0,0050)	0,0250*** (0,0050)	0,0250*** (0,0050)				
Campagne	0,0167** (0,0053)	0,0168*** (0,0052)	0,0167** (0,0052)	0,0168*** (0,0053)				
Viticulture	-0,0124*** (0,0036)	-0,0123*** (0,0036)	-0,0124*** (0,0035)	-0,0123*** (0,0036)				
Religion	-0,0528*** (0,0077)	-0,0529*** (0,0077)	-0,0529*** (0,0077)	-0,0529*** (0,0077)				
Eau	-0,1172** (0,0490)	-0,1165** (0,0490)	-0,1172** (0,0490)	-0,1166** (0,0491)				
Agri. / Envt,					0,3302*** (0,0258)	0,3300*** (0,0256)	0,3303*** (0,0258)	0,3301*** (0,0257)
Anim./ Végét,					0,0414** (0,0202)	0,0389* (0,0201)	0,0409** (0,0202)	0,0389* (0,0201)
Arts / Culture					-0,0752 (0,0563)	-0,0806 (0,0560)	-0,0763 (0,0562)	-0,0806 (0,0561)
Caractér.					0,2815*** (0,0394)	0,2812*** (0,0392)	0,2816*** (0,0394)	0,2813*** (0,0393)
Comm. / Médias					0,5594*** (0,0759)	0,5618*** (0,0755)	0,5611*** (0,0759)	0,5619*** (0,0757)
Comport. / Sent,					0,3843*** (0,0385)	0,3849*** (0,0383)	0,3845*** (0,0385)	0,3850*** (0,0384)
Forces / quantités					-0,2905*** (0,0465)	-0,2972*** (0,0463)	-0,2921*** (0,0465)	-0,2974*** (0,0464)
Géographie					0,1500*** (0,0237)	0,1485*** (0,0236)	0,1500*** (0,0237)	0,1485*** (0,0236)
Politique / Société					0,7213*** (0,0555)	0,7214*** (0,0552)	0,7216*** (0,0554)	0,7216*** (0,0553)
Transports					-0,0384 (0,0547)	-0,0421 (0,0544)	-0,0389 (0,0546)	-0,0421 (0,0545)
OTEX		0,0006 (0,0006)		0,0001 (0,0011)		0,0006 (0,0006)		0,0005 (0,0011)
PRA		0,0012** (0,0006)		0,0007 (0,0013)		0,0012** (0,0006)		0,0007 (0,0013)
Cantons		0,0006 (0,0006)		-0,0011 (0,0034)		0,0006 (0,0006)		-0,0011 (0,0036)
Métriques		-0,0001 (0,0006)		-0,0019 (0,0037)		-0,0001 (0,0006)		-0,0020 (0,0038)
AIC			-0,0000 (0,0000)	-0,0000 (0,0000)			-0,0000 (0,0000)	-0,0000 (0,0000)
Constante	0,2474*** (0,0731)	0,2453*** (0,0730)	0,2918*** (0,0813)	0,4139 (0,3459)	-0,1598*** (0,0169)	-0,1600*** (0,0168)	-0,1162* (0,0409)	0,0085 (0,3523)
Observations	208	208	208	208	208	208	208	208
$\tau^2$	1,18e-05	1,21e-05	1,19e-05	1,22e-05	1,31e-05	1,34e-05	1,32e-05	1,35e-05
$I^2$	0,821	0,825	0,822	0,826	0,835	0,838	0,836	0,839
$R^2$ ajusté	0,760	0,755	0,758	0,753	0,734	0,728	0,732	0,727
$\chi^2_c$	584,3	597,3	587,5	598,6	667,0	678,0	669,6	679,3
test LRT ( $\tau^2 = 0$ )	4,93e-05	4,93e-05	4,93e-05	4,93e-05	4,93e-05	4,93e-05	4,93e-05	4,93e-05
test F du modèle	38,52	29,44	35,79	27,62	40,82	30,00	37,32	27,92

Les écarts-type sont entre parenthèses.

\*\*\*, \*\* et \* identifient les paramètres significatifs aux seuils de 0,01%, 0,05% et 0,1% respectivement.

TABLEAU 6.9 – Résultats de l'estimation de la deuxième étape

nous avons pu faire le lien entre vocabulaire décrivant un paysage et productions d'aménités recherchées par les individus. On pourrait toutefois être en présence de sous-détermination de la théorie par les faits (au sens du logicien Quine (1979)). Nos résultats pourraient en effet être compatibles avec d'autres approches mettant l'accent soit sur les dynamiques de groupes (en sociologie) soit sur l'impulsion que peuvent donner les pouvoirs publics à certains types de développement urbain (en sciences politiques). Ce point mériterait d'être approfondi et nos travaux repris par d'autres perspectives théoriques.

Toutefois il est nécessaire de souligner qu'avant d'arriver à la production de tels faits stylisés, cette approche est non seulement exigeante mais aussi coûteuse en terme méthodologique. Cela nous a en effet conduit à devoir créer deux jeux de données originaux, dont les parties précédentes ont bien montré les difficultés. Un relatif à l'urbanisation nécessitant la mobilisation d'images satellites à 10 ans d'écart et un relatif à des données de perception. Ces jeux de données n'ont eu toutefois un sens que mis en relation avec d'autres bases de données. Notre démarche est en cours de reproduction sur les autres aires urbaines de l'étude, mais sa généralisation est donc soumise à la disponibilité de telles données ou de données similaires. C'est pourquoi un travail de généralisation supposera de trouver des palliatifs à l'absence d'Atlas des Paysages. On peut penser par exemple que l'utilisation des verbatims d'entretiens réalisés avec des élus de différentes communes (voir partie 5.4) peut être un moyen de passer outre ce problème. Ceci pose bien évidemment un problème méthodologique liée à l'unicité du corpus à étudier (la variabilité dans les réponses doit pouvoir être directement imputée au locuteur et non au dispositif interactionniste mise en place par le chercheur, ce dont a bien parlé Dalud-Vincent (2011)).

Deux types de prolongements au moins peuvent être soulignés. Le premier est relatif à la dimension purement économétrique. On a souligné l'incapacité à estimer des modèles avec des effets fixes par communes en raison de problème de convergence. Une voie prometteuse peut être le développement de modèles statistiques prenant en compte plus de variabilité au plan des communes comme un logit multinomial à effets aléatoires. Ce type de modèle peut être estimé par les méthodes bayésiennes récentes particulièrement bien adaptées à des bases de données de grande taille et aujourd'hui disponibles auprès des chercheurs (Leckie & Charlton, 2013). De même nous avons adopté une approche *ad hoc* concernant l'inclusion des régresseurs dans le modèle. Le développement d'algorithmes optimisés que l'on trouve notamment dans le package `mlogitBMA` pour R permet maintenant d'optimiser cette recherche (Sevcikova & Raftery, 2013).

Le second type de prolongement est relatif à la nature même des données textuelles. L'ontologie que nous avons mobilisée doit être en effet enrichie comme cela a déjà été souligné dans le chapitre 4. Elle permettrait notamment de pouvoir différencier entre termes porteurs d'une connotation positive de ceux porteurs d'une connotation négative. Si comme on l'a précisé préalablement, ceci n'est pas nécessaire quand on fait l'analyse d'une seule zone géographique, cela devient indispensable dès lors que l'on s'intéressera à la comparaison entre deux zones géographiques qui ne soit pas la simple juxtaposition de deux analyses séparées. Le travail

engagé dans ce projet sur la constitution d'une ontologie de perception des paysages est une voie prometteuse en ce sens.

# Conclusion générale

Le programme PAYTAL avait pour objectifs de :

1. proposer une méthodologie reproductible d'étude des liens entre l'étalement urbain et les dimensions physiques et sensibles des paysages
2. mettre en œuvre cette méthodologie, au moins partiellement, sur quelques aires urbaines.

Pour atteindre ces objectifs, nous nous sommes appuyés sur un cadre théorique issu de la nouvelle économie urbaine que nous avons transcrit en modèle empirique (opérationnel). La proposition que nous faisons est originale sur plusieurs points.

D'abord, nous avons développé un modèle théorique original qui intègre diverses dimensions. Il rend compte des effets de long terme de la dynamique urbaine en intégrant un équilibre spatial qui dépend du comportement de plusieurs agents (des ménages urbains, des ménages périurbains et des agriculteurs). Dans ce modèle, décrit dans la première partie, ce sont les comportements de ces agents qui façonnent le cadre de vie périurbain, ce qui influence la forme des villes. Ce modèle donne une nouvelle explication à l'apparition du mitage qui n'avait jamais été évoquée dans la littérature.

Dans le modèle théorique que nous développons, les formes du développement urbain (extension urbaine, mitage ou absence de zone périurbaine) ainsi que la densité dans la zone périurbaine, qui est envisagée comme un espace mixte où les ménages et les agriculteurs partagent le sol, dépendent de déterminants économiques (revenus, coûts de transports, prix des biens, etc.) mais aussi de l'intensité de l'activité économique (ici l'agriculture) et de facteurs propres à cette activité qui peuvent varier à l'échelle régionale ou inter-régionale (type d'agriculture, etc.). On retrouve, dans le modèle, les grands résultats de la nouvelle économie urbaine à savoir qu'une augmentation des revenus des ménages, ou une diminution des coûts de transports, favorise l'étalement urbain. Ces résultats sont enrichis de nouveaux éléments. D'abord, en introduisant un espace mixte, nous montrons qu'une augmentation des revenus des ménages éloigne la limite de l'aire urbaine, accroît la taille des zones périurbaine et urbaine et augmente la densité dans le périurbain. Une augmentation des coûts de transports ou une diminution des prix agricoles a exactement l'effet inverse. Ensuite, le modèle montre le rôle des préférences pour le cadre de vie et de la capacité qu'à l'activité économique, l'agriculture donc, à fournir un cadre de vie agréable. Nous identifions les différentes formes d'urbanisation

associées à différentes valeurs de ces paramètres.

La mécanique du modèle repose sur deux phénomènes essentiels qui régissent fortement l'évolution des zones périurbaines. D'une part, il s'agit des externalités entre ménages qui font qu'en urbanisant l'espace périurbain, les ménages lui font perdre de sa valeur. Il s'agit d'autre part du poids que fait peser l'urbanisation sur les activités agricoles en renchérissant le foncier agricole et qui amène les agriculteurs à intensifier leur production ce qui a des effets néfastes sur les paysages et le cadre de vie (arrachage de haies, rectifications/modifications de cours d'eau et d'alignements, utilisation plus importante d'intrants, constructions de bâtiments agricoles (serres, etc.), ...).

Dans un deuxième temps, nous mobilisons le modèle théorique que nous avons développé pour explorer les effets d'une politique d'amélioration du cadre de vie. Nous prenons l'exemple d'une mesure agri-environnementale. Nous montrons que les politiques de ce type, adoptées de façon volontaire, vont avoir tendance à être spatialisées car elles seront adoptées en fonction de leur coût d'opportunité privé qui est lié au fonctionnement du marché foncier. Cette politique aura alors un impact spatial marqué sur le développement urbain. Si la politique est en outre financée par les ménages, alors elle peut avoir des effets redistributifs importants. Ainsi, nous montrons deux résultats importants. D'abord, une politique agri-environnementale, ou paysagère en général, peut accroître le mitage et le développement périurbain si elle n'est pas coordonnée à des outils de gestion et de planification urbaine. En effet, améliorer la qualité de l'environnement dans le périurbain revient à le rendre plus attractif et donc à générer du développement périurbain. L'ampleur de ce phénomène dépend de la taxe nécessaire au financement de la politique, prélevée sur les ménages, et à l'ambition de la politique qui définira les agriculteurs adoptants. Enfin, la politique a des effets redistributifs importants en faveur des agriculteurs et des ménages résidents dans la zone ciblée par la politique et en défaveur des autres ménages qui financent la politique publique sans en bénéficier. Face à cela, on ne peut que recommander la coordination des politiques agricoles et des politiques d'urbanisme dans les zones sous influence urbaine.

Dans une deuxième étape, nous proposons une méthodologie empirique d'analyse du lien entre étalement urbain et dimensions physiques et culturelles du paysage. Cette méthodologie repose sur quatre points. Il s'agit d'abord d'être capables d'identifier le développement urbain à l'échelle d'une aire urbaine, définie par l'intersection entre l'étendue du marché du travail et celle du marché du foncier résidentiel. Ensuite, il faut trouver des outils pertinents pour qualifier les paysages dans leurs dimensions physique et sensible. Enfin, il faut des outils statistiques adaptés, cohérents avec la théorie économique, pour relier ces trois éléments.

Pour identifier l'urbanisation, nous proposons de travailler par télédétection à l'échelle de l'aire urbaine sur des périodes de 10 années (pour mesurer les tendances de fond et éliminer les variations conjoncturelles). L'avantage de la télédétection, par rapport à la photo-interprétation par exemple, est qu'elle permet d'automatiser sur une grande surface (plusieurs

centaines de kilomètres carrés) une procédure de détection de l'urbain. Nous mettons en œuvre sur quatre aires urbaines une méthodologie proche de celle d'(Aguéjda, 2009). L'urbain est détecté sur une grille de 20m de côté, une précision suffisante pour détecter la majorité de l'urbain isolé. Nous montrons également comment il est possible de combiner des images de résolution et de nature différentes prises par des satellites de natures différentes (SPOT1, SPOT2 et RapideEye). Différentes étapes de segmentation permettent d'atteindre un niveau de précision très élevé, contrôlé par photo-interprétation, supérieur à 90% dans quasiment tous les cas.

Pour caractériser la dimension culturelle des paysages<sup>25</sup> nous nous appuyons sur une ontologie, construite à partir des Atlas des Paysages. Nous montrons qu'une ontologie présente deux avantages décisifs pour l'étude systématique et à grande échelle des paysages : flexibilité et reproductibilité.

La flexibilité tient à la possibilité d'utiliser de nombreuses sources d'informations pour construire un corpus de textes dont on peut inférer des connaissances. Nous ne mobilisons que les Atlas des Paysages, par souci d'homogénéité des sources et par économie de moyens, mais il serait tout à fait possible d'améliorer le contenu informationnel de l'ontologie en mobilisant aussi les chartes paysagères, les Plans d'Aménagement et de Développement Durable ou les Programmes Locaux de l'Habitat des Plans Locaux d'Urbanisme et des Schémas de Cohérence Territoriale. On pourrait également utiliser l'information sur les conflits territoriaux renseignées dans les contentieux administratifs et oppositions aux permis de construire ou dans les articles de presse qui s'y rapportent. Il serait également possible d'utiliser l'information contenue dans les légendes des photographies des observatoires photographiques du paysage, dans les brochures touristiques, etc. La localisation géographique de cette information est une question plus délicate mais peut se faire soit en utilisant le découpage administratif à l'échelle de l'information (commune, canton) soit par identification ponctuelle par les noms de lieux contenus dans la BDNYME de l'IGN par exemple. La possibilité de traiter les verbatims d'entretiens systématiques avec des décideurs publics a également été une piste évoquée.

La reproductibilité tient à la possibilité de généraliser l'approche ce qui permet d'envisager un déploiement méthodologique à grande échelle spatio-temporelle, pour faire des études de cas et des analyses comparatives sur plusieurs aires urbaines ou dans le temps. En outre, la méthodologie pourrait être appliquée à d'autres pays pour des analyses et comparaisons internationales.

Pour construire une ontologie de la perception du paysage, nous utilisons le découpage en unités paysagères des Atlas des Paysages dont nous extrayons les descriptifs. L'ensemble des documents ainsi créés est analysé avec le logiciel Tropes ce qui permet d'en caractériser le contenu. Des groupes de termes ont été identifiés et regroupés en 7 ensembles thématiques.

---

25. Pour leur dimension physique, nous faisons appel à des descripteurs de l'occupation des sols et à des métriques paysagères plus classiques, cf. plus bas.



Après plusieurs étapes itératives, nous aboutissons à une ontologie de la perception du paysage où le paysage est perçu par un médiateur à travers ses sens. Ce paysage est constitué d'éléments sensoriels et conceptuels dont la perception est fait l'objet d'une lecture objective (les objets dans l'espace), d'un regard subjectif (le "caractère" du paysage) et d'émotions (positives ou négatives).

L'ontologie est enfin utilisée pour créer des indicateurs, à l'échelle des unités paysagères, résumant l'importance des univers lexicaux utilisés dans la description des unités paysagères.

Sur la base des données construites dans le cadre du projet, nous procédons à deux types d'analyses de l'étalement urbain. La première repose sur des méthodes de fouille de données et de classification. La deuxième repose sur l'estimation de modèles économétriques d'allocation du sol.

Les méthodes de fouille de données peuvent être utilisées pour caractériser de manière automatique les organisations du paysage et leur évolution. Ces méthodes restent toutefois très peu exploitées dans ce contexte. Ces méthodes sont des techniques d'apprentissage supervisé qui permettent d'extraire des règles par apprentissage sur des échantillons. Ces méthodes sont dites discriminantes car elles discriminent les "bonnes" règles des "mauvaises". Il existe plusieurs variantes de ces techniques. Parmi les possibilités offertes dans la littérature, nous identifions les techniques de programmation inductive comme étant celles qui offrent un bon potentiel pour des applications aux paysages et à l'étude de l'étalement urbain. Concrètement, il s'agit de représenter la zone étudiée comme un ensemble de points/surfaces (des parcelles ou des pixels par exemple) reliés entre eux par des relations de voisinage (distance, etc.) et défini par des caractéristiques (usage du sol, etc.). Les techniques de programmation inductive permettent d'explorer parmi un ensemble de règles<sup>26</sup>, celles qui permettent de représenter au mieux l'organisation observée. Ces règles potentielles sont déterminées de manière automatique sur des zones (graphes) d'apprentissage. Cette approche ne s'est pas avérée performante dans notre contexte, notamment parce que nous n'avons pas mobilisé assez d'information pour générer les règles en nous basant essentiellement sur les occupations du sol à l'échelle du parcellaire et les relations spatiales entre les parcelles. Toutefois, nous tentons d'améliorer cela, par l'ajout d'information, et nous pensons que les techniques de fouille de données ont un potentiel important pour explorer les phénomènes d'urbanisation en lien avec la structure des paysages.

Pour contourner ce problème, nous utilisons également des techniques de classification sur analyse en composantes principales. Nous montrons comment ces techniques permettent de discriminer les types d'urbanisation et de représenter cette information sur des cartes d'urbanisation. Ces cartes pourraient permettre d'identifier des zones à enjeux et donc servir dans la construction de documents de planification. Par ailleurs, nous avons mené une enquête sur

---

26. Par exemple, une règle peut être "une parcelle agricole adjacente à une parcelle urbanisée est urbanisée à la période suivante".

la perception de l'étalement urbain et des paysages par différents élus de communes. Nous n'avons par encore mis en relation ces deux outils mais cela pourrait être fait prochainement, notamment en regardant si les enjeux perçus par les acteurs sont corrélés à ceux identifiés dans la classification. De même, les données issues de l'ontologie pourraient être mobilisées pour renseigner ces outils.

Enfin, nous estimons un modèle économétrique d'allocation des sols qui rend compte de l'impact des déterminants économiques et paysagers, dans leurs dimensions physique et perceptive, sur l'urbanisation. Le modèle économétrique repose sur une transcription du modèle économique décrit plus haut. Dans ce modèle, on explique la probabilité qu'un pixel soit urbanisé sur une période en fonction de différents descripteurs de la rente d'usage du pixel dans différents usages alternatifs (agricole, forestier et urbain). Ces descripteurs tiennent, en autres, de l'accessibilité aux emplois et services, des coûts de conversion d'un usage à l'autre et de la valeur agronomique des sols. Nous incorporons les externalités entre ménages et des descripteurs physiques du paysage (occupation du sol, métriques paysagères). Ce modèle nous sert à estimer la probabilité conditionnelle qu'un pixel soit urbanisé en fonction de son appartenance à une unité paysagère. Cette probabilité a été expurgée de la dimension physique des paysages à la première étape. Elle est mise en relation, par une méta-régression, aux descripteurs construits à partir de l'ontologie. Nous pouvons ainsi confirmer que les aspects culturels des paysages jouent un rôle non négligeable sur l'urbanisation et identifier les composantes des perceptions qui jouent le plus sur l'urbanisation.

## **Limites et Perspectives**

Ce travail de recherche comporte une forte dimension exploratoire autour de la construction d'une méthodologie d'étude des phénomènes d'étalement urbain en lien avec les aspects physique et culturels des paysages. Notre proposition méthodologique multidisciplinaire est originale mais sa mise en œuvre nous permet d'identifier les principales difficultés liées à sa dimension opérationnelle et d'identifier des pistes d'amélioration, outre l'extension aux aires urbaine de Brest, Lorient et Rennes. Nous n'en proposons ici que trois, mais qui nous paraissent prometteuses.

Tout d'abord, la mise en œuvre de la télédétection à l'échelle d'une aire urbaine requiert énormément de temps. Il faut coupler différentes images, obtenues à différentes dates, souffrant parfois de masques (nuages, etc.) et d'une couverture au sol hétérogène entre les périodes (croissance de la végétation, etc.). La validation par photo-interprétation est également coûteuse. Il semble que l'on pourrait se contenter d'un échantillonnage (quelques dizaines/centaines de zones) sur l'aire urbaine à partir d'une grille régulière. Limiter ainsi l'information à traiter permettrait certainement d'être plus fins dans la détection des usages du sol sur de plus nombreuses classes. Par ailleurs, ces données pourraient être couplées de manière plus systématique

avec des données cadastrales et sur les constructions (base MAJIC<sup>27</sup> par exemple). Toutefois, l'absence d'un historique cadastral pose question. Il oblige à se confiner à l'utilisation d'un cadastre récent, qui ne permet pas de rendre compte du découpage des parcelles lors de l'urbanisation, alors que c'est un déterminant de l'étude.

Ensuite, nous avons utilisé différents outils d'analyse de l'information contenue dans les Atlas des Paysages. En particulier, nous avons mobilisé plusieurs scénarios Tropes. Ces scénarios permettent d'identifier l'importance de différents univers lexicaux mais ne donnent pas d'indication quant à leur caractère positif ou négatif. Les analyses pourraient être enrichies par l'utilisation du scénario EMOTAIX<sup>28</sup>, qui est un scénario Tropes pour l'identification du lexique émotionnel et affectif (Piolat & Bannour, 2009). En particulier, EMOTAIX permet de distinguer le vocabulaire se rapportant à des émotions positives ou à des émotions négatives. Une tentative d'utilisation de ce scénario sera faite prochainement pour en tester la pertinence sur nos données.

Enfin, le modèle de changement d'affectation des usages du sol pourrait être amélioré d'un point de vue statistique. D'abord, l'inclusion d'effet fixes (dummies) pour les communes n'a pas été possible car le modèle ne converge pas en un maximum global. Une autre stratégie, plutôt que d'introduire 266 paramètres à estimer, pourrait être d'introduire des effets aléatoires communaux. En outre, cette stratégie permettrait de contrôler plus finement pour les corrélations spatiales que nous n'avons pas traitées pour l'instant. Une deuxième approche pourrait être d'estimer un modèle probit multinomial spatial. Ces deux approches permettraient d'avoir une confiance encore plus élevée dans l'estimation des probabilités conditionnelles utilisées dans la deuxième étape. Enfin, nous pourrions aussi introduire des effets aléatoires par unité paysagère. Ces différentes options et la sensibilité de nos résultats à ces différentes options de modélisation seront testées prochainement.

## Implications

Le travail présenté dans ce rapport a de nombreuses implications en termes de politiques publiques. Nous en identifions trois qui nous paraissent importantes. La première concerne la méthodologie des Atlas des Paysages, la deuxième concerne la production d'une ontologie sur la perception des paysages et la troisième porte sur la construction des documents de planification.

Les Atlas des Paysages sont prévus pour être renouvelés tous les dix ans. Pour l'instant, ces renouvellements n'ont pas eu lieu et les Atlas n'ont donc pas de dimension dynamique. Si la question de la dynamique de la perception est complexe, elle pourrait être au moins partiellement appréhendée par les différences observées entre deux Atlas des Paysages couvrant le même territoire à des instants différents. L'identification de ces évolutions permettrait d'améliorer la connaissance de ces dynamiques et d'adapter et mettre en œuvre des méthodologies

---

27. Mise à Jour des Informations Cadastreales, Ministère des Finances et des Comptes Publics.

28. qui a été partiellement utilisée pour la construction de l'ontologie

similaires à la nôtre dans un cadre parfaitement dynamique (dynamique de l'usage du sol et des perceptions). C'est pourquoi nous pensons que la mise à jour régulière des Atlas, même dans l'état actuel de leur méthodologie, est importante. Comme ?, nous pensons que les Atlas des Paysages doivent permettre une comparaison entre deux dates de réalisation.

Ensuite, nous souhaitons finir l'élaboration de l'ontologie pour la rendre publique. En soit, cette ontologie pourra alimenter d'autres travaux, de recherche ou d'expertise, dans le domaine du paysage. Surtout, l'ontologie peut constituer un moyen de médiation et de concertation territoriale puisqu'elle est un moyen de confronter les points de vue et les connaissances sur le paysage. En effet, elle peut permettre de rassembler, analyser et synthétiser l'ensemble des connaissances sur les paysages qui sont comprises, pour l'instant, dans des sources très variées avec des auteurs (et des points de vue) très variés et parfois divergents. Il s'agit par exemples des urbanistes maîtres d'œuvre des PLU/ScoT, des paysagistes maîtres d'œuvre des Atlas des Paysages ou des chartes paysagères, des écologues maîtres d'œuvre sur les documents de diagnostics des PNR/ZNIEFF ou encore des architectes/géographes qui interviennent à différents niveaux, par exemple pour ce qui e qui est relatif au patrimoine.

Enfin, nos résultats montrent que les dimensions physiques du paysage (agencement et types d'objets, diversité des occupations du sol, etc.) jouent un rôle non-négligeable dans les mécanismes d'étalement urbain. Ils montrent également que la dimension culturelle joue aussi un rôle. Les documents de planification urbaine (SCoT, PLU, cartes communales, etc.) portent essentiellement sur la première dimension, en tenant compte de la trame verte et bleue, en identifiant des linéaires ou surfaces à conserver mais intègrent finalement assez peu la dimension culturelle des paysages. A ce titre, les chartes paysagères, les contrats de paysage et les plans de paysages sont des documents qui n'ont qu'un caractère volontaire. Pourtant, leur dimension participative pourrait être un complément à celle engagée lors des négociations des PLU et des SCoT et contribuer à améliorer l'ensemble de la démarche de concertation. En outre, les Atlas des Paysages et les documents de protection et de mise en valeur des paysages devraient aussi venir en appui des volets paysagers construits lors des mises en place et négociations de PLU/SCoT. Ils devraient en particulier être utilisés pour participer à l'identification des zones à enjeux, c'est-à-dire les zones pour lesquelles les paysages ont la plus grande valeur patrimoniale (paysages à protéger) et celles pour lesquelles ils ont une dimension de cadre de vie, dégradé ou à préserver (paysages à gérer). Dans tous les cas, nous avons montré que ces politiques et les politiques sectorielles (exemple de MAE) devraient contenir une évaluation des enjeux en termes d'impacts sur l'urbanisation car elles ne sont pas neutres spatialement et que, par le biais du marché foncier, elles ont des impacts qui peuvent être importants en termes de redistribution des richesses, notamment par la valorisation du patrimoine foncier. En particulier, les politiques de protection les plus ambitieuses (classements patrimoniaux, zonages forts, agri-environnementaux ou autres) devraient prévoir les risques d'urbanisation et être concertées avec les politiques d'urbanisme, dans une approche plus holistique.

# Bibliographie

- Abler, D. 2001. A Synthesis of Country Reports on Jointness Between Commodity and Non-Commodity outputs in OECD Agriculture. *In : Workshop on multifunctionality*, vol. 2. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), Agriculture, Directorate for Food, Agriculture and Fisheries, Paris, France.
- Abler, D. 2004. Multifunctionality, Agricultural Policy, and Environmental Policy. *Agricultural and Resource Economics Review*, **33**(1).
- Agejdad, Rahim. 2009. *Etalement urbain et évaluation de son impact sur la biodiversité, de la reconstitution des trajectoires à la modélisation prospective. Application à une agglomération de taille moyenne : Rennes Métropole*. Ph.D. thesis, Université Rennes 2.
- Alonso, William. 1964. *Location and Land Use*. Harvard University Press.
- Ambroise, Régis. 2010. Appréhender le paysage sous l'angle de son fonctionnement pour gérer la biodiversité. *Espaces naturels*, **32**, 20–26.
- Anas, A. 1978. Dynamics of Urban Residential Growth. *Journal of Urban Economics*, **5**(1), 66–87.
- Antrop, Marc. 2004. Landscape change and the urbanization process in Europe. *Landscape and urban planning*, **67**(1), 9–26.
- Arnott, R. 1979. Optimal City Size in a Spatial Economy. *Journal of Urban Economics*, **6**(1), 65–89.
- Arnott, R.J. 1980. A Simple Urban Growth Model with Durable Housing. *Regional Science and Urban Economics*, **10**(1), 53–76.
- Arnott, R.J., & Lewis, F.D. 1979. The Transition of Land to Urban Use. *The Journal of Political Economy*, **87**(1), 161–169.
- Aubert, F., Berriet-Sollic, M., & Gaigné, C. 2007. La dimension rurale du deuxième pilier : une politique territorialisée de l'agriculture. *INRA Sciences Sociales*.
- Ay, Jean-Sauveur, Brayer, Jean-Marc, Cavailhès, Jean, Curmi, Pierre, Hilal, Mohamed, & Ubertos, Marjorie. 2012. *La valeur des attributs naturels des terres agricoles de Côte d'Or*. Tech. rept. WP 2012/1. INRA UMR CESAER, Centre d'Economie et Sociologie appliquées à l'Agriculture et aux Espaces Ruraux.

- Banzhaf, H Spencer, & Smith, V Kerry. 2007. Meta-analysis in model implementation : choice sets and the valuation of air quality improvements. *Journal of Applied Econometrics*, **22**(6), 1013–1031.
- Bar-Ilan, A., & Strange, W.C. 1996. Urban Development with Lags. *Journal of Urban Economics*, **39**(1), 87–113.
- Bastian, C.T., McLeod, D.M., Germino, M.J., Reiners, W.A., & Blasko, B.J. 2002. Environmental Amenities and Agricultural Land Values : a Hedonic Model using Geographic Information Systems Data. *Ecological Economics*, **40**(3), 337–349.
- Baumgart-Getz, A., Prokopy, L.S., & Floress, K. 2012. Why Farmers Adopt Best Management Practice in the United States : A Meta-Analysis of the Adoption Literature. *Journal of Environmental Management*, **96**(1), 17–25.
- Baumont, C., & Le Gallo, J. 2000. *Economie Géographique : Les Théories à l'Épreuve des Faits*. Association de Science Régionale de Langue Française. Chap. Les Nouvelles Centralités Urbaines, pages 211–239.
- Baylis, K., Peplow, S., Rausser, G., & Simon, L. 2008. Agri-Environmental Policies in the EU and United States : A Comparison. *Ecological Economics*, **65**(4), 753–764.
- Beckmann, M.J. 1972. Von Thunen Revisited : a Neoclassical Land Use Model. *The Swedish Journal of Economics*, **74**(1), 1–7.
- Bento, A.M., Franco, S.F., & Kaffine, D. 2006. The Efficiency and Distributional Impacts of Alternative Anti-Sprawl Policies. *Journal of Urban Economics*, **59**(1), 121–141.
- Bento, A.M., Franco, S.F., & Kaffine, D. 2011. Welfare Effects of Anti-Sprawl Policies in the Presence of Urban Decline. *Agricultural and Resource Economics Review*, **40**(3), 439–450.
- Bergstrom, J.C., & Ready, R.C. 2009. What Have We Learned From Over 20 Years of Farmland Amenity Valuation Research in North America ? *Applied Economic Perspectives and Policy*, **31**(1), 21–49.
- Bertoni, D., Cavicchioli, D., Pretolani, R., & Olper, A. 2011. Agri-Environmental Measures Adoption : New Evidence from Lombardy region. In : *The Common Agricultural Policy After the Fischler Reform : National Implementations, Impact Assessment and the Agenda for Future Reforms*, ashgate edn. Sorrentino, A., Henke, R., Severini, S. (Eds).
- Besussi, Elena, Chin, Nancy, Batty, Michael, & Longley, Paul. 2010. *The structure and form of urban settlements*. Springer. Pages 13–31.
- Bisaut, J. 2009. La maison individuelle grignote des espaces naturels. *Agreste Primeur*, **219**.
- Bjaklund, J., Limburg, K.E., & Rydberg, T. 1999. Impact of Production Intensity on the Ability of the Agricultural Landscape to Generate Ecosystem Services : an Example from Sweden. *Ecological economics*, **29**(2), 269–291.

- Blockeel, H., & De Raedt, L. 1998. Top-down induction of first-order logical decision trees. *Artif. Intell.*, **101**(1-2), 285–297.
- Blomquist, N Sören. 1980. A Note on the Use of the Coefficient of Determination. *The Scandinavian Journal of Economics*, 409–412.
- Boisson, Jean-Pierre. 2005. *La maîtrise foncière : clé du développement rural*. Notes d'Iéna, informations du conseil économique et social 198. Conseil Économique et Social.
- Borgwardt, Karsten Michael. 2007. *Graph Kernels*. Ph.D. thesis, Ludwig-Maximilians-Universität.
- Bourbeillon, Julie, Charles, Jonathan, Rousselière, Damien, Salanié, Julien, & Sow, Djery. 2013a (Sept.). (Comment) peut on isoler la subjectivité de l'auteur dans une analyse des données textuelles? Etude de la variabilité du vocabulaire dans les atlas français des paysages. *In : Vème Congrès de l'Association Française de Sociologie - Réseau thématique Méthodes*.
- Bourbeillon, Julie, Piel, Laetitia, Ayeb, Ramla El, Rousselière, Damien, & Guyet, Thomas. 2013b. Construction semi-automatique d'une ontologie de la perception des paysages. *In : Ingénierie des connaissances*.
- Bourigault, Didier, & Aussenac-Gilles, Nathalie. 2003. Construction d'ontologies à partir de textes. *Pages 27–47 of : Actes des 10ème conférence sur le Traitement Automatique des Langages Naturelles (TALN)*.
- Boyle, Melissa A, & Kiel, Katherine A. 2001. A survey of house price hedonic studies of the impact of environmental externalities. *Journal of Real Estate Literature*, **9**(2), 117–144.
- Brueckner, J.K. 1979. Spatial Majority Voting Equilibria and the Provision of Public Goods. *Journal of Urban Economics*, **6**(3), 338–351.
- Brueckner, J.K. 1987. The Structure of Urban Equilibria : A Unified Treatment of the Muth-Mills model. *In : Mills, E.S. (ed), Handbook of Regional and Urban Economics, vol II : Urban Economics*. North Holland, Amsterdam.
- Brueckner, J.K. 2000. Urban Sprawl : Diagnosis and Remedies. *International Regional Science Review*, **23**(2), 160 –171.
- Brueckner, J.K., Thisse, J.F., & Zenou, Y. 1999. Why is Central Paris Rich and Downtown Detroit Poor? : An Amenity-Based Theory. *European Economic Review*, **43**(1), 91–107.
- Brueckner, J.K., Mills, E., & Kremer, M. 2001. Urban Sprawl : Lessons from Urban Economics [with Comments]. *Brookings-Wharton Papers on Urban Affairs*, 65–97.
- Brunet-Vinck, Véronique. 2004. *Méthode pour les Atlas de paysages – Enseignements méthodologiques de 10 ans de travaux*. Tech. rept. Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable.

- Bryman, A. 2007. Barriers to integrating quantitative and qualitative research. *Journal of Mixed Methods Research*, **1**(1), 1–18.
- Burchfield, M., Overman, H.G., Puga, D., & Turner, M.A. 2006. Causes of Sprawl : A Portrait from Space. *Quarterly Journal of Economics*, **121**(2), 587–633.
- Burnham, K.P., & Anderson, D.R. 2004. Multimodel Inference. Understanding AIC and BIC in Model Selection. *Sociological Methods and Research*, **33**(2), 261–304.
- Canton, J., De Cara, S., & Jayet, P.A. 2009. Agri-Environmental Schemes : Adverse Selection, Information Structure and Delegation. *Ecological Economics*, **68**(7), 2114–2121.
- Capozza, D., & Li, Y. 1994. The Intensity and Timing of Investment : The Case of Land. *The American Economic Review*, 889–904.
- Capozza, Dennis R, & Li, Yuming. 2002. Optimal land development decisions. *Journal of Urban Economics*, **51**(1), 123–142.
- Capozza, D.R., & Helsley, R.W. 1989. The Fundamentals of Land Prices and Urban Growth. *Journal of Urban Economics*, **26**(3), 295–306.
- Capozza, D.R., & Helsley, R.W. 1990. The stochastic city. *Journal of Urban Economics*, **28**(2), 187–203.
- Carrion-Flores, Carmen, & Irwin, Elena G. 2004. Determinants of residential land-use conversion and sprawl at the rural-urban fringe. *American Journal of Agricultural Economics*, **86**(4), 889–904.
- Carruthers, J.I., & Ulfarsson, G.F. 2003. Urban Sprawl and the Cost of Public Services. *Environment and Planning B*, **30**(4), 503–522.
- Caruso, G., Peeters, D., Cavailhès, J., & Rounsevell, M. 2007. Spatial Configurations in a Periurban City. A Cellular Automata-Based Microeconomic Model. *Regional Science and Urban Economics*, **37**(5), 542–567.
- Cassette, Aurélie, & Paty, Sonia. 2006. La concurrence fiscale entre communes est-elle plus intense en milieu urbain qu'en milieu rural? *Cahiers d'économie et sociologie rurales*, **78**, 6–30.
- Cataldo, Antonia, & Rinaldi, Antonio M. 2010. An ontological approach to represent knowledge in territorial planning science. *Computers, Environment and Urban Systems*, **34**(2), 117–132.
- Cavailhès, J., & Wavresky, P. 2003. Urban Influences on Periurban Farmland Prices. *European Review of Agricultural Economics*, **30**(3), 333–357.
- Cavailhès, J., & Wavresky, P. 2007. Les Effets de la Proximité de la Ville sur les Systèmes de Production Agricoles. *Agreste Cahiers*, **2**, 41–47.



- Cavailhès, J., Peeters, D., & Sékeris, E. 2003. La ville périurbaine. *Revue Economique*, **54**(1), 5–23.
- Cavailhès, J., Peeters, D., Sékeris, E., & Thisse, J.F. 2004. The Periurban City : Why to Live Between The Suburbs and the Countryside. *Regional Science and Urban Economics*, **34**(6), 681–703.
- Cavailhès, J., Brossard, T., Foltête, J.C., Hilal, M., Joly, D., Tourneux, F.P., Tritz, C., & Wavresky, P. 2009a. GIS-Based Hedonic Pricing of Landscape. *Environmental and Resource Economics*, **44**(4), 571–590.
- Cavailhès, J., Hilal, M., P., Wavresky, G., Contesti, & El Yousfi, H. 2009b. *Marché foncier et périurbanisation*. Rapport INRA-CAESER.
- Cavailhès, Jean. 2005. Le prix des attributs du logement. *Économie et statistique*, **381**(1), 91–123.
- CE. 2012. *Rapport de la Commission au Parlement Européen et au Conseil*. Sixième Rapport Financier sur le Fonds Européen Agricole pour le Développement Rural (FEADER) - Exercice 2012. Commission Européenne.
- CGDD. 2010. *L'environnement en France*. IFEN - MEEDTL.
- Chakir, Raja, & Parent, Olivier. 2009. Determinants of land use changes : A spatial multinomial probit approach\*. *Papers in Regional Science*, **88**(2), 327–344.
- Charlot, S., Hilal, M., & Schmitt, B. 2009. La périurbanisation renforce-t-elle la ségrégation résidentielle urbaine en France? *Espace populations sociétés*, **1**, 29–44.
- Chelghoum, N., Zeitouni, K., Laugier, T., Fiandrino, A., & Loubersac, L. 2006. Fouille de données spatiales. Approche basée sur la programmation logique inductive. *Pages 529–540 of : EGC*.
- Cho, C.J. 2001. Amenities and Urban Residential Structure : an Amenity-Embedded Model of Residential Choice. *Papers in Regional Science*, **80**(4), 483–498.
- Cho, Seong-Hoon, & Newman, David H. 2005. Spatial analysis of rural land development. *Forest Policy and Economics*, **7**(5), 732–744.
- Chomitz, Kenneth M, & Gray, David A. 1996. Roads, land use, and deforestation : a spatial model applied to Belize. *The World Bank Economic Review*, **10**(3), 487–512.
- Choumert, Johanna, & Travers, Muriel. 2010. La capitalisation immobilière des espaces verts dans la ville d'Angers. *Revue économique*, **61**(5), 821–836.
- Chuman, Tomáš, & Romportl, Dušan. 2010. Multivariate classification analysis of cultural landscapes : An example from the Czech Republic. *Landscape and Urban Planning*, **98**(3–4), 200 – 209. Climate Change and Spatial Planning.

- Claassen, R., Cattaneo, A., & Johansson, R. 2008. Cost-Effective Design of Agri-Environmental Payment Programs : US Experience in Theory and Practice. *Ecological Economics*, **65**(4), 737–752.
- Conseil de l'Europe. *Convention Européenne du Paysage - Florence, 20 octobre 2000*. Division de l'aménagement du territoire et du paysage, Bruxelles.
- Cosgrove, Denis. 2003. *Handbook of cultural geography*. London : Sage Publications. Chap. Landscape and the European sense of sight-eyeing nature, pages 249–268.
- Couch, C., Leontidou, L., & Petschel-Held, G. 2007. *Urban Sprawl in Europe*. Blackwell Publishing.
- Cullot, Nadine, Parent, Christine, Spaccapietra, Stefano, & Vangenot, Christelle. 2003. Des ontologies pour données généralistes géographiques. *Revue internationale de Géomatique : Les SIG sur le web*, **13**(3), 285–306.
- Dale, M.R.T., & Fortin, M.-J. 2010. From graphs to spatial graphs. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, **41**, 21–38.
- Dalud-Vincent, Monique. 2011. Alceste comme outil de traitement d'entretiens semi-directifs : essai et critiques pour un usage en sociologie. *Langage et Société*, 9–28.
- Davodeau, H. 2009. Les atlas de paysages français ou les difficultés de concilier l'approche sensible et l'approche scientifique. *Revue Italienne de Géographie / Rivista Geografica Italiana*, **2**(2), 173–194.
- Dawkins, C.J., & Nelson, A.C. 2002. Urban Containment Policies and Housing Prices : an International Comparison with Implications for Future Research. *Land Use Policy*, **19**(1), 1–12.
- Delattre, Laurence, & Napoléone, Claude. 2011. Écologiser les documents d'urbanisme pour protéger les terres agricoles et les espaces naturels. *Courrier de l'environnement de l'INRA*, 63–75.
- Demoen, B., & Nguyen, P.-L. 2001. *Odd Prolog benchmarking*. CW Reports CW312. Department of Computer Science, K.U.Leuven, Leuven, Belgium.
- Dokic, Jérôme. 2004. *Qu'est-ce que la perception ?* Vrin - Chemins Philosophiques.
- Donadieu, Pierre. 2009. Quel bilan tirer des politiques de paysage en France? *Projets de paysage*.
- Donadieu, Pierre, & Mazat, Elisabeth. 2002. *Des mots de paysage et de jardin*. Educagri.
- Drouin, Patrick. 2003. Term extraction using non-technical corpora as a point of leverage. *Terminology*, **9**(1), 99–117.

- Duke, J.M., Borchers, A.M., Johnston, R.J., & Absetz, S. 2012. Sustainable Agricultural Management Contracts : Using Choice Experiments to Estimate the Benefits of Land Preservation and Conservation Practices. *Ecological Economics*, **74**, 95–103.
- EEA. 2006. *Urban Sprawl in Europe : The Ignored Challenge*. Report 10. European Environment Agency.
- Ewing, R.H. 1994. Characteristics, Causes, and Effects of Sprawl : A Literature Review. *Environmental and Urban Issues*, **21**(2).
- Fagan, S., & Gencay, R. 2010. *Handbook of Empirical Economics and Finance*. CRC. Chap. An Introduction to Textual Analysis, pages 133–153.
- Fallah, Belal N, Partridge, Mark D, & Olfert, M Rose. 2011. Urban sprawl and productivity : evidence from US metropolitan areas. *Papers in Regional Science*, **90**(3), 451–472.
- Fan, Wei, Zhang, Kun, Cheng, Hong, Gao, Jing, Han, Jiawei, Yu, Philip, , & Verscheure, Olivier. 2008. Direct Mining of Discriminative and Essential Frequent Patterns via Model-based Search Tree. In : *International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD'08)*.
- Fausold, C.J., & Lilieholm, R.J. 1999. The Economic Value of Open Space : A Review and Synthesis. *Environmental Management*, **23**(3), 307–320.
- Feinerer, Ingo, Hornik, Kurt, & Meyer, David. 2008. Text Mining Infrastructure in R. *Journal of Statistical Software*, **25**(5).
- Forman, Richard T. T., & Godron, Michel. 1981. Patches and Structural Components for A Landscape Ecology. *BioScience*, **31**(10), 733–740.
- Frank, R., Ester, M., & Knobbe, A. 2009. A multi-relational approach to spatial classification. *Pages 309–318 of : Proceedings of the 15th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining*. KDD '09. ACM.
- Frankhauser, P. 2005. La morphologie des tissus urbains et périurbains à travers une lecture fractale. *Revue Géographique de l'Est*, **45**.
- Fujita, M. 1986. Optimal Location of Public Facilities : Area Dominance Approach. *Regional Science and Urban Economics*, **16**(2), 241–268.
- Fujita, M. 1989. *Urban Economic Theory : Land Use and City Size*. Cambridge University Press.
- Fujita, M., & Kashiwadani, M. 1989. Testing the Efficiency of Urban Spatial Growth : A Case Study of Tokyo. *Journal of Urban Economics*, **25**(2), 156–192.
- Gaigné, C., Riou, S., & Thisse, J.F. 2012. Are compact cities environmentally friendly ? *Journal of Urban Economics*, **72**(2), 123–136.

- Galster, G., Hanson, R., Ratcliffe, M.R., Wolman, H., Coleman, S., & Freihage, J. 2001. Wrestling Sprawl to the Ground : Defining and Measuring an Elusive Concept. *Housing Policy Debate*, **12**(4), 681–717.
- GAO. 1999. *Extent of Federal Influence on "Urban Sprawl" is Unclear*. Tech. rept. RCED-99-87. United States General Accounting Office, Resources, Community and Economic Development Division.
- Garfinkel, Harold. 1967. *Studies in ethnomethodology*. Upper Saddle River : Prentice-Hall.
- Gaüzère, Benoit, Brun, Luc, & Villemin, Didier. 2012. Noyau de Treelets Appliqué aux Graphes étiquetés. *In : RFIA*.
- Gelman, A., Carlin, J.B., Stern, H.S., Dunson, D.B., Vehtari, A., & Rubin, D.B. 2014. *Bayesian Data Analysis, Third Edition*. Boca Raton : CRC Press.
- Geniaux, G., & Napoléone, C. 2011. Évaluation des Effets des Zonages Environnementaux sur la Croissance Urbaine et l'Activité Agricole. *Économie et Statistique*, **444-445**, 181–199.
- Germain, Pascal, & Thareau, Bertille. 2010. Les agriculteurs face à l'urbanisation. *Préserver l'espace de production agricole, Etudes foncières*, **145**, 13–17.
- Gibbons, Steve. 2004. The Costs of Urban Property Crime\*. *The Economic Journal*, **114**(499), F441–F463.
- Giuliano, G., & Small, K.A. 1991. Subcenters in the Los Angeles region. *Regional Science and Urban Economics*, **21**(2), 163–182.
- Glaeser, E.L., Kahn, M.E., & Rappaport, J. 2008. Why Do the Poor Live in Cities? The Role of Public Transportation. *Journal of Urban Economics*, **63**(1), 1–24.
- Glebe, T.W. 2007. The Environmental Impact of European Farming : How Legitimate are Agri-Environmental Payments? *Applied Economic Perspectives and Policy*, **29**(1), 87–102.
- Goffette-Nagot, F., & Schaeffer, Y. 2011. Accessibilité ou Voisinage ? Une Analyse des Sources de la Ségrégation Résidentielle au Sein des Aires Urbaines Françaises. *Revue Economique*, **64**(5), 857–882.
- Gordon, P., & Richardson, H.W. 1997. Are Compact Cities a Desirable Planning Goal? *Journal of the American Planning Association*, **63**(1), 95–106.
- Greene, W.H. 2003. *Econometric Analysis*. 5th edn. Upper Saddle River, NJ.
- Groult, Mahé, & Roche, Augustin. 2009. *Carte des Unités de Paysage contenue dans les Atlas de Paysage publiés entre 1993 et 2009*. CNRS - UMR 7533 LADYSS, Paris.
- Gruber, Thomas R. 1993. A Translation Approach to Portable Ontology Specifications. *Knowl. Acquis.*, **5**(2), 199–220.

- Grün, Bettina, & Hornik, Kurt. 2011. topicmodels : An R Package for Fitting Topic Models. *Journal of Statistical Software*, **40**(13), 1–30.
- Hahsler, Michael, Gruen, Bettina, & Hornik, Kurt. 2005. arules – A Computational Environment for Mining Association Rules and Frequent Item Sets. *Journal of Statistical Software*, **14**(15), 1–25.
- Harbord, R.M., & Higgins, J.P.T. 2008. Meta-regression in Stata. *Stata Journal*, **8**(4), 493–519.
- Hartwick, J., Schweizer, U., & Varaiya, P. 1976. Comparative Statics of a Residential Economy with Several Classes. *Journal of Economic Theory*, **13**(3), 396–413.
- Harvey, D.R. 2003. Agri-Environmental Relationships and Multi-functionality : Further Considerations. *The World Economy*, **26**(5), 705–725.
- Harvey, R.O., & Clark, W.A.V. 1965. The Nature and Economics of Urban Sprawl. *Land Economics*, **41**(1), 1–9.
- Heimlich, R.E., & Barnard, C.H. 1992. Agricultural Adaptation to Urbanization : Farm Types in Northeast Metropolitan Areas. *Northeastern Journal of Agricultural and Resource Economics*, **21**(1), 50–60.
- Hilal, M., Cavailhes, J., Brossard, T., Joly, D., Tourneux, F. P., & Wayresky, P. 2008. Les métriques paysagères utilisées pour déterminer le prix des paysages. *In : 2èmes journées de recherches en sciences sociales*.
- Hodge, I. 2000. Agri-Environmental Relationships and the Choice of Policy Mechanism. *The World Economy*, **23**(2), 257–273.
- Hodge, I. 2008. To What Extent are Environmental Externalities a Joint Product of Agriculture? Overview and Policy Implications. *Pages 85–118 of : Multifunctionality in Agriculture : Evaluating the Degree of Jointness, Policy Implications*. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), Paris, France.
- Huan, W. Wang, Washington, A., Prins, J., Shah, R., , & Tropsha, A. 2004. Accurate Classification of Protein Structural Families Using Coherent Subgraph Analysis. *J. Pacific Symposium on Biocomputing*, **9**, 411–422.
- Imbens, G.W., & Wooldridge, J.M. 2009. Recent Developments in the Econometrics of Program Evaluation. *Journal of Economic Literature*, **47**(1), 5–86.
- Irwin, E.G. 2002. The Effects of Open Space on Residential Property Values. *Land Economics*, **78**(4), 465–480.
- Irwin, E.G., & Bockstael, N.E. 2002. Interacting Agents, Spatial Externalities and the Evolution of Residential Land Use Patterns. *Journal of Economic Geography*, **2**(1), 31–54.
- Irwin, E.G., & Bockstael, N.E. 2004. Land Use Externalities, Open Space Preservation, and Urban Sprawl. *Regional Science and Urban Economics*, **34**(6), 705–725.

- Irwin, E.G., & Bockstael, N.E. 2006. The Spatial Pattern of Land Use in the United States. *Pages 77–95 of* : Arnott, R.J., & McMillen, D.P. (eds), *A Companion to Urban Economics*. Blackwell Publishing Ltd.
- Irwin, E.G., & Bockstael, N.E. 2007. The Evolution of Urban Sprawl : Evidence of Spatial Heterogeneity and Increasing Land Fragmentation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **104**(52), 20672–20677.
- Irwin, Elena G, & Geoghegan, Jacqueline. 2001. Theory, data, methods : developing spatially explicit economic models of land use change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **85**(1), 7–24.
- Jenny, Jacques. 1996. Analyses De Contenu Et De Discours Dans La Recherche Sociologique Française : Pratiques Micro-Informatiques Actuelles Et Potentielles. *Current Sociology*, **44**(3), 279–290.
- Johnson, M.P. 2001. Environmental Impacts of Urban Sprawl : a Survey of the Literature and Proposed Research Agenda. *Environment and Planning A*, **33**(4), 717–735.
- Katzman, M.T. 1974. The Von Thunen Paradigm, the Industrial-Urban Hypothesis, and the Spatial Structure of Agriculture. *American Journal of Agricultural Economics*, **56**(4).
- Kergomard, Claude. 2000. Pratique des corrections atmosphériques en télédétection : utilisation du logiciel 5S-PC. *Cybergeo : European Journal of Geography*.
- Kiel, K.A. 2005. Environmental Regulations and the Housing Market : a Review of the Literature. *Cityscape*, **8**(1), 187–207.
- Kline, Jeffrey D. 2003. Characterizing land use change in multidisciplinary landscape-level analyses. *Agricultural and Resource Economics Review*, **32**(1), 103–115.
- Kline, Jeffrey D, Moses, Alissa, & Alig, Ralph J. 2001. Integrating urbanization into landscape-level ecological assessments. *Ecosystems*, **4**(1), 3–18.
- Knapp, G., & Hartung, J. 2003. Improved tests for a random-effects meta-regression with a single covariate. *Statistics in Medicine*, **22**, 2693–2710.
- Knowler, D., & Bradshaw, B. 2007. Farmers' Adoption of Conservation Agriculture : A Review and Synthesis of Recent Research. *Food Policy*, **32**(1), 25–48.
- Kovacs, K.F., & Larson, D.M. 2007. The Influence of Recreation and Amenity Benefits of Open Space on Residential Development Patterns. *Land Economics*, **83**(4), 475–496.
- Kuminoff, Nicolai V, Zhang, Congwen, Rudi, Jeta, *et al.* 2010. Are Travelers Willing to Pay a Premium to Stay at a " Green " Hotel ? Evidence from an Internal Meta-Analysis of Hedonic Price Premia. *Agricultural & Resource Economics Review*, **39**(3), 468.
- Lahire, Bernard. 2007. *L'esprit sociologique*. Paris : La Découverte / Poche.

- Lambert, Sandrine. 2014. *La méthodologie des Atlas de paysages, un outil d'aide à la qualification des franges bâties rurales ?* M.Phil. thesis, AGROCAMPUS OUEST.
- Latacz-Lohmann, U., & Van der Hamsvoort, C. 1997. Auctioning Conservation Contracts : a Theoretical Analysis and an Application. *American Journal of Agricultural Economics*, **79**(2), 407–418.
- Latruffe, Laure, & Le Mouël, Chantal. 2009. Capitalization of government support in agricultural land prices : What do we know ? *Journal of economic surveys*, **23**(4), 659–691.
- Lê, Sébastien, Josse, Julie, & Husson, François. 2008. FactoMineR : An R Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software*, **25**(1), 1–18.
- Le Goffe, P. 2000. Hedonic Pricing of Agriculture and Forestry Externalities. *Environmental and Resource Economics*, **15**(4), 397–401.
- Le Goffe, Philippe, & Salanié, Julien. 2005. Le droit d'épandage at-il un prix ? Mesure sur le marché foncier. *Cahiers d'économie et sociologie rurales*, **77**, 36–63.
- Leamer, Edward E. 1985. Sensitivity analyses would help. *The American Economic Review*, 308–313.
- Lebart, Ludovic. 1994. Sur les analyses statistiques de textes. *Journal de la société française de statistique*, **135**(1), 17–36.
- Leckie, George, & Charlton, Chris. 2013. Runmlwin-a program to Run the MLwiN multilevel modelling software from within stata. *Journal of Statistical Software*, **52**(11), 1–40.
- Lee, C.M., & Fujita, M. 1997. Efficient Configuration of a Greenbelt : Theoretical Modelling of Greenbelt Amenity. *Environment and Planning A*, **29**, 1999–2017.
- Lelay, Yves-François, Piegay, Hervé, & Cossin, Mélanie. 2005. Les enquêtes de perception paysagère à l'aide de photographies. In : *Actes des Rencontres de Théo Quant*.
- Lepczyk, Christopher A., Lortie, Christopher J., & Anderson, Laurel J. 2008. An ontology for landscapes. *Ecological Complexity*, **5**(3), 272–279.
- Lewis, David J, & Plantinga, Andrew J. 2007. Policies for habitat fragmentation : combining econometrics with GIS-based landscape simulations. *Land Economics*, **83**(2), 109–127.
- Liu, X., & Lynch, L. 2011. Do Agricultural Land Preservation Programs Reduce Farmland Loss ? Evidence from a Propensity Score Matching Estimator. *Land Economics*, **87**(2), 183–201.
- Livanis, G., Moss, C.B., Breneman, V.E., & Nehring, R.F. 2006. Urban Sprawl and Farmland Prices. *American Journal of Agricultural Economics*, **88**(4), 915–929.
- Lopez, R.A., Adelaja, A.O., & Andrews, M.S. 1988. The Effects of Suburbanization on Agriculture. *American Journal of Agricultural Economics*, **70**(2), 346–358.

- Lubowski, Ruben N, Plantinga, Andrew J, & Stavins, Robert N. 2006. Land-use change and carbon sinks : econometric estimation of the carbon sequestration supply function. *Journal of Environmental Economics and Management*, **51**(2), 135–152.
- Luginbühl, Yves. 1994. *Méthode pour des atlas de paysages. Identification et qualification*. Tech. rept. Strates/CNRS - SEGESA, Direction de l'Architecture et de l'Urbanisme.
- Lynch, Allen K, & Rasmussen, David W. 2001. Measuring the impact of crime on house prices. *Applied Economics*, **33**(15), 1981–1989.
- Lynch, L., & Lovell, S.J. 2003. Combining Spatial and Survey Data to Explain Participation in Agricultural Land Reservation Programs. *Land Economics*, **79**(2), 259–276.
- Mackun, P., & Wilson, S. 2011. *Population Distribution and Change : 2000 to 2010*. Tech. rept. United States Census Bureau.
- Maier, L., & Shobayashi, M. 2001. *Multifunctionality : Towards an Analytical Framework*. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), Paris, France.
- Malerba, Donato. 2008. A relational perspective on spatial data mining. *Int. J. Data Mining, Modelling and Management*, 103–118.
- Mathieu, Yvette Yannick. 2005. Annotation of Emotions and Feelings in Texts. *Pages 350–357 of : Proceedings of the First International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction*. Lecture Notes in Computer Science, vol. 3784. Springer Berlin Heidelberg.
- McConnell, V., & Walls, M.A. 2005. *The Value of Open Space : Evidence from Studies of Nonmarket Benefits*. Rff edn. Resources for the Future, Washington DC, USA.
- McGarigal, K., Cushman, SA, & Ene, E. 2012. *FRAGSTATS v4 : Spatial Pattern Analysis Program for Categorical and Continuous Maps*. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst. Available at the following web site : <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>.
- McGarigal, Kevin, Cushman, Sam A, Neel, Maile C, & Ene, Eduard. 2002. *FRAGSTATS : spatial pattern analysis program for categorical maps*. Tech. rept. University of Massachusetts, Amherst.
- McGrath, D.T. 2005. More Evidence on the Spatial Scale of Cities. *Journal of Urban Economics*, **58**(1), 1–10.
- Meunier, Jean Guy, Forest, Dominic, & Biskri, Ismail. 2005. Classification and categorization in computer assisted reading and analysis of texts. *Handbook of categorization in cognitive science*, 955–978.
- Mieszkowski, P., & Mills, E.S. 1993. The Causes of Metropolitan Suburbanization. *The Journal of Economic Perspectives*, 135–147.



- Mills, D.E. 1981. Growth, Speculation and Sprawl in a Monocentric City. *Journal of Urban Economics*, **10**(2), 201–226.
- Mills, E.S. 1972. *Studies in the Structure of the Urban Economy*. Johns Hopkins Press.
- Minard, Anne-Lyse. 2008. *Etat de l'art des ontologies d'objets géographiques*. Tech. rept. Laboratoire COGIT, Institut National de l'Information Géographique (IGN).
- Molette, Pierre. 2009. De l'APD à Tropes : comment un outil d'analyse de contenu peut évoluer en logiciel de classification sémantique généraliste. *In : Actes du colloque Psychologie sociale de la communication*.
- Molette, Pierre. 2014. *Comportements et sentiments. De l'ambiguïté dans les émotions ? Journées d'étude sur la mesure des émotions dans les corpus textuels*. Tech. rept. Atelier Texto du Labex SMS, Toulouse.
- Moral-Benito, E. 2014. Model Averaging in Economics : An Overview. *Journal of Economic Surveys*.
- Muggleton, S., & Raedt, L. De. 1994. Inductive Logic Programming : Theory and Methods. *Journal of Logic Programming*, **19**(20), 629–679.
- Musterd, S. 2005. Social and Ethnic Segregation in Europe : Levels, Causes, and Effects. *Journal of Urban Affairs*, **27**(3), 331–348.
- Muth, R.F. 1961. Economic Change and Rural-Urban Land Conversions. *Econometrica*, **29**(1), 1–23.
- Muth, R.F. 1969. *Cities and Housing*. The University of Chicago Press.
- Nechyba, T.J., & Walsh, R.P. 2004. Urban Sprawl. *The Journal of Economic Perspectives*, **18**(4), 177–200.
- Nelson, A.C. 1985. A Unifying View of Greenbelt Influences on Regional Land Values and Implications for Regional Planning Policy. *Growth and Change*, **16**(2), 43–48.
- New, Boris, Paller, Christophe, Ferrand, Ludovic, & Matos, Rafael. 2001. Une base de données lexicales du français contemporain sur internet : LEXIQUE<sup>TM</sup>//A lexical database for contemporary french : LEXIQUE<sup>TM</sup>. *L'année psychologique*, **101**(3), 447–462.
- Newburn, D., & Berck, P. 2011. Exurban Development. *Journal of Environmental Economics and Management*, **62**(3), 323–336.
- Newburn, David A, Berck, Peter, & Merenlender, Adina M. 2006. Habitat and open space at risk of land-use conversion : targeting strategies for land conservation. *American Journal of Agricultural Economics*, **88**(1), 28–42.
- Nguyen, Phu Chien, Ohara, Kouzou, Mogi, Akira, Motoda, Hiroshi, & Washio, Takashi. 2006. Constructing Decision Trees for Graph-Structured Data by Chunkingless Graph-Based Induction. *Advances in Knowledge Discovery and Data Mining*, **3918**, 390–399.

- OCDE-CEMT. 2007. *Transports, formes urbaines et croissance économique*. Rapport de la Trable Ronde 137. Organisation pour la Coopération et le Développement Economique - Conférence Européenne des Ministres du Transport.
- OECD. 2009. *Farmland Conversion : the Spatial Dimension of Agricultural and Land-Use Policies*. Tech. rept. Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), Paris, France.
- Ogawa, H., & Fujita, M. 1980. Equilibrium Land Use Patterns in a Nonmonocentric City. *Journal of Regional Science*, **20**(4), 455–475.
- ONU. 2009. *World population prospects - The 2007 Revision*. Economic and Social Affairs. United Nations, Paris.
- Ozanne, A., Hogan, T., & Colman, D. 2001. Moral Hazard, Risk Aversion and Compliance Monitoring in Agri-Environmental Policy. *European Review of Agricultural Economics*, **28**(3), 329–348.
- Palmquist, R.B. 1992. Valuing Localized Externalities. *Journal of Urban Economics*, **31**(1), 59–68.
- Palmquist, R.B., Roka, F.M., & Vukina, T. 1997. Hog Operations, Environmental Effects, and Residential Property Values. *Land Economics*, **73**(1), 114–124.
- Papageorgiou, G.J., & Casetti, E. 1971. Spatial Equilibrium Residential Land Values in a Multicenter Setting. *Journal of Regional Science*, **11**(3), 385–389.
- Patacchini, E., & Zenou, Y. 2009. Urban Sprawl in Europe. *Brookings-Wharton Papers on Urban Affairs*, 125–149.
- Pendall, R., Puentes, R., & Martin, J. 2006. *From Traditional to Reformed : A Review of the Land Use Regulations in the Nation's 50 Largest Metropolitan Areas*. Tech. rept. The Brookings Institution, Metropolitan Policy Program.
- Piolat, Annie, & Bannour, Rachid. 2009. EMOTAIX : un scénario de Tropes pour l'identification automatisée du lexique émotionnel et affectif. *L'Année Psychologique*, **109**, 657–700.
- Piorr, A., Ravetz, J., & Tosics, I. 2011. *Peri-urbanisation in Europe : Towards European Policies to Sustain Urban Rural Futures*. Tech. rept. University of Copenhagen, Academic Books Life Sciences.
- Plantinga, A.J., Lubowski, R.N., & Stavins, R.N. 2002. The Effects of Potential Land Development on Agricultural Land Prices. *Journal of Urban Economics*, **52**(3), 561–581.
- Polèse, Mario, & Shearmur, Richard. 2005. *Économie urbaine et régionale : introduction à la géographie économique*. Economica.
- Polinsky, A.M., & Shavell, S. 1976. Amenities and Property Values in a Model of an Urban Area. *Journal of Public Economics*, **5**(1), 119–129.

- Polyakov, Maksym, & Zhang, Daowei. 2008a. *Global Change and Forestry*. Nova Science Publishers, Inc. Chap. Land-use dynamics along urban-rural gradient : A comparison of modelling approaches, pages 33–46.
- Polyakov, Maksym, & Zhang, Daowei. 2008b. Population growth and land use dynamics along urban-rural gradient. *Journal of Agricultural and Applied Economics*, **40**(2), 649–666.
- Polyakov, Maksym, & Zhang, Daowei. 2008c. Property tax policy and land-use change. *Land Economics*, **84**(3), 396–408.
- Price, Colin. 1978. *Landscape economics*. MacMillan Press Ltd.
- Quigley, J.M., & Rosenthal, L.A. 2005. The Effects of Land Use Regulation on the Price of Housing : What Do We Know? What Can We Learn? *Cityscape*, **8**(1), 69–137.
- Quigley, J.M., & Swoboda, A.M. 2007. The Urban Impacts of the Endangered Species Act : A General Equilibrium Analysis. *Journal of Urban Economics*, **61**(2), 299–318.
- Quine, W.V. 1979. Comments on Newton-Smith. *Analysis Oxford*, **39**(2), 66–67.
- Quinlan, J. R., & Cameron-jones, R. M. 1993. FOIL : A Midterm Report. *Pages 3–20 of : In Proceedings of the European Conference on Machine Learning*. Springer-Verlag.
- Ratinaud, Pierre. 2009. *IRaMuTeQ : Interface de R pour les Analyses Multidimensionnelles de Textes et de Questionnaires*. <http://www.iramuteq.org/>.
- Ready, R.C., Berger, M.C., & Blomquist, G.C. 1997. Measuring Amenity Benefits from Farmland : Hedonic Pricing vs. Contingent Valuation. *Growth and Change*, **28**(4), 438–458.
- Reinert, Max. 2003. Le rôle de la répétition dans la représentation du sens et l’approche statistique par la méthode Alceste. *Semiotica, Journal of the International Association for Semiotic Studies*, 389–420.
- RERC. 1974. *The Costs of Sprawl, Detailed Cost Analysis*. Tech. rept. Real Estate Research Corporation, U.S. Government Printing Office.
- Richardson, H.W. 1976. The New Urban Economics : An Evaluation. *Socio-Economic Planning Sciences*, **10**(4), 137–147.
- Richardson, H.W. 1977. On the Possibility of Positive Rent Gradients. *Journal of Urban Economics*, **4**(1), 60–68.
- Roche, A. 2009. *Éléments pour la réalisation et l’actualisation des Atlas de paysages*. Ministère de l’écologie, de l’énergie, du Développement durable et de la Mer.
- Roche, Augustin. 2007. *Les unités et structures paysagères dans les atlas de paysage*. Tech. rept. Ministère de l’Ecologie, du Développement et de l’Aménagement Durables.

- Roe, B., Irwin, E.G., & Morrow-Jones, H.A. 2004. The Effects of Farmland, Farmland Preservation, and Other Neighborhood Amenities on Housing Values and Residential Growth. *Land Economics*, **80**(1), 55–75.
- Romanos, M.C. 1977. Household Location in a Linear Multi-Center Metropolitan Area. *Regional Science and Urban Economics*, **7**(3), 233–250.
- Rousselière, Damien, & Vézina, Martine. 2009. Constructing the legitimacy of a financial cooperative in the cultural sector : A case study using textual analysis. *International Review of Sociology*, **19**(2), 241–261.
- Schneider, Annemarie, & Woodcock, Curtis E. 2008. Compact, dispersed, fragmented, extensive? A comparison of urban growth in twenty-five global cities using remotely sensed data, pattern metrics and census information. *Urban Studies*, **45**(3), 659–692.
- Schwartz, G. 1978. Estimating the Dimension of A Model. *Annals of Statistics*, **6**, 461–464.
- Sevcikova, Hana, & Raftery, Adrian. 2013. *mlogitBMA : Bayesian Model Averaging for Multinomial Logit Models*. R package version 0.1-6.
- Shoup, D.C. 1970. The Optimal Timing of Urban Land Development. *Papers in Regional Science*, **25**(1), 33–44.
- Solow, R.M., & Vickrey, W.S. 1971. Land Use in a Long Narrow City. *Journal of Economic Theory*, **3**(4), 430–447.
- Song, Y., & Zenou, Y. 2006. Property Tax and Urban Sprawl : Theory and Implications for US Cities. *Journal of Urban Economics*, **60**(3), 519–534.
- Soufflet-Leclerc, Elise. 2007. L'identification et la qualification des paysages en France : les atlas de paysages. *Culture et Recherche*, **111**, 27–28.
- Stavins, Robert N, & Jaffe, Adam B. 1990. Unintended impacts of public investments on private decisions : the depletion of forested wetlands. *The American Economic Review*, **80**(3), 337–352.
- Sutton, Alexander J., & Higgins, Julian P.T. 2008. Recent developments in meta-analysis. *Statistics in medicine*, **27**, 625–650.
- Swanwick, Carys. 2002. *Landscape Character assessment - Guidance for England and Scotland*. Tech. rept. Countryside Agency, Cheltenham and Scottish Natural Heritage.
- Szulman, Sylvie, Biébow, Brigitte, & Aussenac-Gilles, Nathalie. 2002. Structuration de Terminologies à l'aide d'outils d'analyse de textes avec TERMINAE. *Revue Traitement Automatique des Langues*, **43**(1), 103–128.
- Tajibaeva, L., Haight, R.G., & Polasky, S. 2008. A Discrete-Space Urban Model with Environmental Amenities. *Resource and Energy Economics*, **30**(2), 170–196.

- Thompson, Simon G, & Sharp, Stephen J. 1999. Explaining heterogeneity in meta-analysis : a comparison of methods. *Statistics in medicine*, **18**(20), 2693–2708.
- Thomson, M. K., & Béra, R. 2007. Relating Land Use to the Landscape Character : Toward an Ontological Inference Tool. *Pages 83–87 of : Winstanley, A. C. (ed), GISRUK 2007, Proceeding of the Geographical Information Science Research UK Conference.*
- Towe, C. 2010. Testing the Effect of Neighboring Open Space on Development Using Propensity Score Matching. *In : 2010 Annual Meeting, July 25-27, 2010, Denver, Colorado.*
- Towe, Charles A, Nickerson, Cynthia J, & Bockstael, Nancy. 2008. An empirical examination of the timing of land conversions in the presence of farmland preservation programs. *American Journal of Agricultural Economics*, **90**(3), 613–626.
- Train, Kenneth E. 2009. *Discrete choice methods with simulation*. Cambridge University Press.
- Trépos, R. 2008. *Apprentissage symbolique à partir de données issues de simulation pour l'aide à la décision : gestion d'un bassin versant pour une meilleure qualité de l'eau*. Ph.D. thesis, Rennes 1.
- Trom, Danny. 2001. À l'épreuve du paysage. Constructivisme savant et sens commun constructiviste. *Revue du M.A.U.S.S.*, **17**.
- Turner, M.A. 2005. Landscape Preferences and Patterns of Residential Development. *Journal of Urban Economics*, **57**(1), 19–54.
- Uschold, Mike, Gruninger, Michael, Uschold, Mike, & Gruninger, Michael. 1996. Ontologies : Principles, methods and applications. *Knowledge Engineering Review*, **11**, 93–136.
- Uuemaa, Evelin, Antrop, Marc, Roosaare, Jüri, Marja, Riho, & Mander, Ülo. 2009a. Landscape Metrics and Indices : An Overview of Their Use in Landscape Research. *Living reviews in landscape research*, **3**.
- Uuemaa, Evelin, Antrop, Marc, Roosaare, Jüri, Marja, Riho, & Mander, Ülo. 2009b. Landscape metrics and indices : an overview of their use in landscape research. *Living Reviews in Landscape Research*, **3**(1), 1–28.
- Van Eetvelde, Veerle, & Antrop, Marc. 2009. A stepwise multi-scaled landscape typology and characterisation for trans-regional integration, applied on the federal state of Belgium. *Landscape and Urban Planning*, **91**(3), 160–170.
- Van Huylenbroeck, G. 1999. *Countryside Stewardship : Farmers, Policies, and Markets*. 1st ed. edn. Pergamon.
- Van Huylenbroeck, G., Van Hecke, E., Meert, H., Vandermeulen, V., Verspecht, A., Vernimmen, T., Boulanger, A., & Luyten, S. 2005. *Development Strategies for a Multifunctional Agriculture in Peri-urban Areas*. Research contract CP/18. Belgian Science Policy.

- Verburg, Peter H, van Eck, JR Ritsema, de Nijs, Ton CM, Dijst, Martin J, & Schot, Paul. 2004. Determinants of land-use change patterns in the Netherlands. *Environment and Planning B*, **31**(1), 125–150.
- Walker, R. 2001. Urban Sprawl and Natural Areas Encroachment : Linking Land Cover Change and Economic Development in the Florida Everglades. *Ecological Economics*, **37**(3), 357–369.
- Wang, X., & Kockelman, K.M. 2009. Application of the Dynamic Spatial Ordered Probit Model : Patterns of Land Development Change in Austin, Texas. *Papers in Regional Science*, **88**(2), 345–365.
- Wheaton, W.C. 1974. A Comparative Static Analysis of Urban Spatial Structure. *Journal of Economic Theory*, **9**, 223–237.
- Wheaton, W.C. 1977. Income and Urban Residence : An Analysis of Consumer Demand for Location. *The American Economic Review*, **67**(4), 620–631.
- Wheaton, W.C. 1982. Urban Residential Growth under Perfect Foresight. *Journal of Urban Economics*, **12**(1), 1–21.
- Wheaton, W.C. 1998. Land Use and Density in Cities with Congestion. *Journal of Urban Economics*, **43**(2), 258–272.
- Wossink, A., & Swinton, S.M. 2007. Jointness in Production and Farmers' Willingness to Supply Non-Marketed Ecosystem Services. *Ecological Economics*, **64**(2), 297–304.
- Wu, J.J. 2006. Environmental Amenities, Urban Sprawl, and Community Characteristics. *Journal of Environmental Economics and Management*, **52**, 527–547.
- Wu, J.J., & Babcock, B.A. 2001. Spatial Heterogeneity and the Choice of Instruments to Control Nonpoint Pollution. *Environmental and Resource Economics*, **18**(2), 173–192.
- Wu, J.J., & Cho, S.H. 2007. The Effect of Local Land Use Regulations on Urban Development in the Western United States. *Regional Science and Urban Economics*, **37**(1), 69–86.
- Wu, J.J., & Irwin, E.G. 2008. Optimal Land Development with Endogenous Environmental Amenities. *American Journal of Agricultural Economics*, **90**(1), 232–248.
- Wu, J.J., & Lin, H. 2010. The Effect of the Conservation Reserve Program on Land Values. *Land Economics*, **86**(1), 1–21.
- Wu, J.J., & Plantinga, A.J. 2003. The Influence of Public Open Space on Urban Spatial Structure. *Journal of Environmental Economics and Management*, **46**, 288–309.
- Wu, J.J., Adams, R.M., & Plantinga, A.J. 2004. Amenities in an Urban Equilibrium Model : Residential Development in Portland, Oregon. *Land Economics*, **80**(1), 19–32.

- Wunder, S., Engel, S., & Pagiola, S. 2008. Taking Stock : A Comparative Analysis of Payments for Environmental Services Programs in Developed and Developing Countries. *Ecological Economics*, **65**(4), 834–852.
- Yang, C.H., & Fujita, M. 1983. Urban Spatial Structure with Open Space. *Environment and Planning A*, **15**(1), 67–84.
- Yinger, J. 1976. Racial Prejudice and Racial Residential Segregation in an Urban Model. *Journal of Urban Economics*, **3**(4), 383–396.
- Zellner, A. 1962. An efficient method of estimating seemingly unrelated regressions and tests for aggregation bias. *Journal of the American Statistical Association*, **57**, 348–368.
- Zetterberg, Andreas, Mörtberg, Ulla M., & Balfors, Berit. 2010. Making graph theory operational for landscape ecological assessments, planning, and design. *Landscape and Urban Planning*, **95**, 181–191.

## Annexe A

Conditions relatives à l'équilibre spatial de notre modèle théorique de ville monocentrique en présence d'une agriculture hétérogène



## A.1 Existence de la frontière urbaine

Nous montrons qu'à l'équilibre, les rentes d'enchère des ménages et des agriculteurs se croisent au moins une fois dans l'intervalle  $[0, \underline{x}]$ , où  $\underline{x}$  est la distance à partir de laquelle l'agriculture sous influence urbaine est remplacée par l'activité agricole d'exportation. Rappelons que  $\underline{x} < \frac{p}{t}$ , où  $p/t$  est la distance à partir de laquelle la rente foncière agricole est égale à zéro. Analysons les deux fonctions d'enchère :

$$\frac{\partial r_u^*}{\partial x} = -\frac{1}{\beta} \tau \left[ \frac{\beta^\beta (1-\beta)^{1-\beta}}{V} \right]^{\frac{1}{\beta}} (w - \tau x)^{\frac{1}{\beta}-1} < 0 \text{ pour tout } x < \frac{w}{\tau}$$

$$\frac{\partial^2 r_u^*}{\partial x^2} = \frac{1}{\beta} \tau^2 \left[ \frac{\beta^\beta (1-\beta)^{1-\beta}}{V} \right]^{\frac{1}{\beta}} (w - \tau x)^{\frac{1}{\beta}-2} > 0 \text{ pour tout } x < \frac{w}{\tau}$$

$$\frac{\partial r_a^*}{\partial x} = -\frac{1}{(1-\alpha)} t A (1-\alpha) \left( \frac{\alpha A}{p_k} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} (p - tx)^{\frac{1}{1-\alpha}-1} < 0 \text{ pour tout } x < \frac{p}{t}$$

$$\frac{\partial^2 r_a^*}{\partial x^2} = \frac{1}{(1-\alpha)} t^2 A (1-\alpha) \left( \frac{\alpha A}{p_k} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} (p - tx)^{\frac{1}{1-\alpha}-2} > 0 \text{ pour tout } x < \frac{p}{t}$$

Les deux fonctions d'enchère sont continues, décroissantes et convexes dans les intervalles  $[0, \frac{w}{\tau}]$  et  $[0, \frac{p}{t}]$  respectivement.

A l'équilibre, on a :

$$r_u^*(0) = \left[ \frac{\beta^\beta (1-\beta)^{1-\beta} w}{V} \right]^{\frac{1}{\beta}} \text{ et } r_a^*(0) = A (1-\alpha) \left( \frac{\alpha A}{p_k} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} p^{\frac{1}{1-\alpha}}$$

$$r_u^*(0) > r_a^*(0) \Leftrightarrow w > \Omega p^{\frac{\beta}{(1-\alpha)}}$$

$$\text{où } \Omega = \frac{A^\beta (1-\alpha)^\beta \left( \frac{\alpha A}{p_k} \right)^{\frac{\alpha\beta}{1-\alpha}}}{\left[ \frac{\beta^\beta (1-\beta)^{1-\beta}}{V} \right]} > 0$$

On a également :

$$r_u^*(x) = 0 \Leftrightarrow x = \frac{w}{\tau}$$

$$r_a^*(x) = \underline{r}_a \Leftrightarrow x = \underline{x}$$

Il existe un point d'intersection entre les deux courbes si et seulement si l'ensemble des conditions suivantes est respecté :

$$\begin{cases} r_u^*(0) > r_a^*(0) \\ x_{r_u^*=0} < x_{r_a^*=0} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} w > \Omega p^{\frac{\beta}{(1-\alpha)}} \\ \frac{w}{\tau} < \underline{x} \end{cases}$$

Ces conditions peuvent être interprétées ainsi :

1. Le niveau de revenu des ménages doit être relativement élevé par rapport au prix des produits agricoles.
2. L'arbitrage entre usage résidentiel et agricole du sol peut être seulement fait dans l'intervalle  $[0, \underline{x}]$ , puisqu'à partir de  $\underline{x}$ , il n'y a plus d'activité agricole sous influence urbaine.

## A.2 Conditions d'apparition d'une zone périurbaine

Nous cherchons à identifier les conditions sur nos paramètres, qui permettent l'apparition d'une zone périurbaine. Une telle configuration se fait lorsque  $r_p(x) \geq r_a(x)$ , avec  $x \in [\bar{x}, w/\tau]$  :

$$\begin{aligned} r_p(x, \delta, \gamma) - r_a(x) &\geq 0 \\ r_u(x) \left( \frac{\delta}{k(x)} \right)^{\beta/\gamma} &\geq r_a(x) \\ \delta &\geq k(x) \left( \frac{r_a(x)}{r_u(x)} \right)^{\gamma/\beta} \end{aligned}$$

Il existe un niveau minimum de jointure de production entre produits agricoles et aménités  $\delta_{\min}$  pour qu'apparaisse une zone périurbaine. Ce niveau est donné par :

$$\delta_{\min} = \min_x k(x) \left( \frac{r_a(x)}{r_u(x)} \right)^{\gamma/\beta} \quad (\text{A.1})$$

Notons que  $\delta_{\min}$  dépend des autres paramètres du modèle, et plus particulièrement de la préférence des ménages pour les aménités.

### A.3 Conditions d'apparition de mitage ou d'extension urbaine

Nous définissons le mitage comme une forme fragmentée de développement urbain, c'est-à-dire que la ville et la zone périurbaine sont déconnectées l'une de l'autre. En langage mathématique, cela signifie qu'il existe  $x_1 < x_2 < \underline{x}$ , tel que pour tout  $x \in [\bar{x}, x_1] \cup [x_2, \underline{x}]$ , on a  $r_a^*(x) > r_p^*(x)$ , et pour tout  $x \in [x_1, x_2]$ , on a  $r_p^*(x) = r_a^*(x)$ .

Selon notre définition du mitage, en  $\bar{x}$ , on a :

$$\begin{aligned} r_p^*(\bar{x}) &< r_a^*(\bar{x}) \\ \Leftrightarrow r_u^*(\bar{x}) a_p(\bar{x})^{\frac{\gamma}{\beta}} &< r_a^*(\bar{x}) \\ \Leftrightarrow a_p(\bar{x}) &< 1 \end{aligned}$$

Pour que les agriculteurs surenchérisent les ménages à la frontière urbaine, le niveau d'aménités doit être inférieur à un.

$$\begin{aligned} a_p(\bar{x}) &< 1 \\ \Leftrightarrow \delta \left[ \alpha \frac{A(p - t\bar{x})}{p_k} \right]^{-\frac{1}{1-\alpha}} &< 1 \\ \Leftrightarrow \delta &< \delta_{\max} \end{aligned}$$

où :

$$\delta_{\max} = \left[ \alpha \frac{A(p - t\bar{x})}{p_k} \right]^{\frac{1}{1-\alpha}} \quad (\text{A.2})$$

Dès que  $\delta$  devient supérieur à  $\delta_{\max}$ , les ménages surenchérisent les agriculteurs immédiatement après la frontière urbaine. Le mitage tel que nous le définissons ne peut pas avoir lieu. A l'inverse, lorsque  $\delta > \delta_{\max}$ , la ville s'étale sous une forme que nous appellerons extension urbaine : la zone périurbaine est connectée à la zone urbaine. Notons que  $\delta_{\max}$  ne dépend pas seulement des préférences  $\gamma$ , c'est à dire que, même pour de très faibles préférences, si le degré de jointure entre production agricole et aménités est élevé (i.e.  $> \delta_{\max}$ ), certains ménages périurbains pourraient souhaiter surenchériser les agriculteurs juste à la frontière de la ville. Notons que l'on a  $\delta_{\max} = k(\bar{x})$ , ce qui s'explique directement par la spécification de la fonction de production des externalités agricoles.

## Annexe B

# Statique comparative

L'équilibre spatial en l'absence de politiques publiques peut être décrit par le système de neuf équations suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} k^*(x) = \left( \frac{\alpha A(p-tx)}{p_k} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \\ r_a^*(x) = (p-tx)^{\frac{1}{1-\alpha}} A \left( \frac{\alpha A}{p_k} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} (1-\alpha) \\ r_u^*(x) = \left[ \frac{\beta^\beta (1-\beta)^{1-\beta} (w-\tau x)}{V} \right]^{\frac{1}{\beta}} \\ r_u^*(\bar{x}) = r_a^*(\bar{x}) \\ r_u^*(x_1) \left( \frac{\delta}{k(x_1)} \right)^{(\gamma/\beta)} = r_a^*(x_1) \\ r_u^*(x_2) \left( \frac{\delta}{k(x_2)} \right)^{(\gamma/\beta)} = r_a^*(x_2) \\ \Theta^*(x) = \begin{cases} \frac{k^*(x)}{\delta} \left( \frac{r_a^*(x)}{r_u^*(x)} \right)^{(\beta/\gamma)} & \text{si } x \in [x_1, x_2] \\ 1 & \text{si } x \notin [x_1, x_2] \end{cases} \\ N_u^* = \int_0^{\bar{x}} 2\pi D(x) \frac{r_u^*(x)}{\beta(w-\tau x)} x dx = \int_0^{\bar{x}} 2\pi D(x) \left[ \frac{\beta^\beta (1-\beta)^{1-\beta}}{V} \right]^{\frac{1}{\beta}} \frac{1}{\beta} (w-\tau x)^{\frac{1}{\beta}-1} x dx \\ N_p^* = \int_{x_1}^{x_2} 2\pi (1-\Theta^*(x)) \frac{r_a^*(x)}{\beta(w-\tau x)} x dx \end{array} \right.$$

En différentiant chacune des neuf équations du système, on obtient le système matriciel suivant :

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ c_2 & -1 & c_3 & 0 & c_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ c_5 & -1 & c_6 & 0 & 0 & c_7 & 0 & 0 & 0 \\ c_8 & c_9 & c_{10} & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{11} & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & c_{12} & 0 & 0 & c_{13} & c_{14} & c_{15} & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dk \\ dr_a \\ dr_u \\ d\bar{x} \\ dx_1 \\ dx_2 \\ d\Theta \\ dN_u \\ dN_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & m_{11} & m_{13} & m_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_{12} & m_{14} & m_{16} & 0 \\ m_1 & m_4 & m_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_8 & 0 & 0 & 0 & m_{17} \\ 0 & 0 & 0 & m_9 & 0 & 0 & 0 & m_{18} \\ 0 & 0 & 0 & m_{10} & 0 & 0 & 0 & m_{19} \\ m_2 & m_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ m_3 & m_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dw \\ d\tau \\ d\bar{V} \\ d\gamma \\ dp \\ dp_k \\ dt \\ d\delta \end{pmatrix} \quad (\text{B.1})$$

où les coefficients de la matrice de gauche sont donnés par :

$$\begin{aligned}
c_1 &= r'_u(\bar{x}) - r'_a(\bar{x}) < 0 \\
c_2 &= r_u(x_1) \frac{\gamma}{\beta} \left( \frac{\delta}{k(x_1)} \right)^{\frac{\gamma}{\beta}-1} \left( -\frac{\delta}{k(x_1)^2} \right) < 0 \\
c_3 &= \left( \frac{\delta}{k(x_1)} \right)^{\gamma/\beta} > 0 \\
c_4 &\sim r'_p(x_1) - r'_a(x_1) > 0 \\
c_5 &= r_u(x_2) \frac{\gamma}{\beta} \left( \frac{\delta}{k(x_2)} \right)^{\frac{\gamma}{\beta}-1} \left( -\frac{\delta}{k(x_2)^2} \right) < 0 \\
c_6 &= \left( \frac{\delta}{k(x_2)} \right)^{\gamma/\beta} > 0 \\
c_7 &\sim r'_p(x_2) - r'_a(x_2) < 0 \\
c_8 &= -\frac{1}{\delta} \left( \frac{r_a(x)}{r_u(x)} \right)^{\frac{\beta}{\gamma}} < 0 \\
c_9 &= -\frac{k(x)}{\delta} \left( \frac{1}{r_u(x)} \right)^{\frac{\beta}{\gamma}} \frac{\beta}{\gamma} r_a(x)^{\frac{\beta}{\gamma}-1} \\
c_{10} &= \begin{cases} -\frac{k^*(x)}{\delta} \frac{\beta}{\gamma} \left( \frac{r_a^*(x)}{r_u^*(x)} \right)^{\frac{\beta}{\gamma}-1} \left( -\frac{r_a^*(x)}{r_u^*(x)^2} \right) > 0, & \text{si } x \in [x_1, x_2] \\ 0, & \text{si } x \notin [x_1, x_2] \end{cases} \\
c_{11} &= -2\pi D(\bar{x}) \frac{r_u(\bar{x})}{\beta(w-\tau\bar{x})} \bar{x} < 0 \\
c_{12} &= -\int_{x_1}^{x_2} 2\pi(1-\Theta(x)) \frac{1}{\beta(w-\tau x)} x dx < 0 \\
c_{13} &= +2\pi(1-\Theta(x_1)) \frac{r_a(x_1)}{\beta(w-\tau x_1)} x_1 > 0 \\
c_{14} &= -2\pi(1-\Theta(x_2)) \frac{r_a(x_2)}{\beta(w-\tau x_2)} x_2 < 0 \\
c_{15} &= -\int_{x_1}^{x_2} 2\pi(-1) \frac{r_a(x)}{\beta(w-\tau x)} x dx > 0
\end{aligned}$$

et les coefficients de la matrice de droite sont donnés par :

$$\begin{aligned}
m_1 &= \left( \frac{\beta^\beta(1-\beta)^{1-\beta}}{\bar{V}} \right)^{\frac{1}{\beta}} \frac{1}{\beta} (w - \tau x)^{\frac{1}{\beta}-1} > 0 \\
m_2 &= \int_0^{\bar{x}} 2\pi D(x) \left( \frac{\beta^\beta(1-\beta)^{1-\beta}}{\bar{V}} \right)^{\frac{1}{\beta}} \frac{1}{\beta} \left( \frac{1}{\beta} - 1 \right) (w - \tau x)^{\frac{1}{\beta}-2} x dx > 0 \\
m_3 &= \int_{x_1}^{x_2} 2\pi(1 - \Theta(x)) r_a(x) \frac{1}{\beta} \left( -\frac{1}{(w-\tau x)^2} \right) x dx < 0 \\
m_4 &= \left( \frac{\beta^\beta(1-\beta)^{1-\beta}}{\bar{V}} \right)^{\frac{1}{\beta}} \frac{1}{\beta} (-x)(w - \tau x)^{\frac{1}{\beta}-1} < 0 \\
m_5 &= \int_0^{\bar{x}} 2\pi D(x) \left( \frac{\beta^\beta(1-\beta)^{1-\beta}}{\bar{V}} \right)^{\frac{1}{\beta}} \frac{1}{\beta} \left( \frac{1}{\beta} - 1 \right) (-\tau) (w - \tau x)^{\frac{1}{\beta}-2} x dx < 0 \\
m_6 &= \int_{x_1}^{x_2} 2\pi(1 - \Theta(x)) r_a(x) \frac{1}{\beta} \left( -\frac{-x}{(w-\tau x)^2} \right) x dx > 0 \\
m_7 &= (w - \tau x)^{\frac{1}{\beta}} (\beta^\beta(1 - \beta)^{1-\beta})^{\frac{1}{\beta}} \frac{1}{\beta} \left( -\frac{1}{\bar{V}^2} \right) \left( \frac{1}{\bar{V}} \right)^{\frac{1}{\beta}-1} < 0 \\
m_8 &= -r_u(x_1) \frac{1}{\beta} \ln \left( \frac{\delta}{k(x_1)} \right) \left( \frac{\delta}{k(x_1)} \right)^{\frac{\gamma}{\beta}} < 0 \\
m_9 &= -r_u(x_2) \frac{1}{\beta} \ln \left( \frac{\delta}{k(x_2)} \right) \left( \frac{\delta}{k(x_2)} \right)^{\frac{\gamma}{\beta}} < 0 \\
m_{10} &= \frac{k(x)}{\delta} \left( \frac{r_a}{r_u} \right)^{\frac{\beta}{\gamma}} \left( -\frac{\beta}{\gamma^2} \right) \ln \left( \frac{r_a}{r_u} \right) > 0 \quad \text{si } x > \bar{x} \\
m_{11} &= \left( \frac{\alpha A}{p_k} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \frac{1}{1-\alpha} (p - tx)^{\frac{1}{1-\alpha}-1} > 0 \\
m_{12} &= A \left( \frac{\alpha A}{p_k} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} (p - tx)^{\frac{1}{1-\alpha}-1} > 0 \\
m_{13} &= (\alpha A(p - tx))^{\frac{1}{1-\alpha}} \frac{1}{1-\alpha} \left( -\frac{1}{p_k^2} \right) \left( \frac{1}{p_k} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}-1} < 0 \\
m_{14} &= A(1 - \alpha)(p - tx)^{\frac{1}{1-\alpha}} (\alpha A)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} \frac{\alpha}{1-\alpha} \left( -\frac{1}{p_k^2} \right) \left( \frac{1}{p_k} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}-1} < 0 \\
m_{15} &= \left( \frac{\alpha A}{p_k} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \frac{1}{1-\alpha} (-x)(p - tx)^{\frac{1}{1-\alpha}-1} < 0 \\
m_{16} &= A \left( \frac{\alpha A}{p_k} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} (-x)(p - tx)^{\frac{1}{1-\alpha}-1} < 0 \\
m_{17} &= -r_u(x_1) \left( \frac{1}{k(x_1)} \right)^{\frac{\gamma}{\beta}} \frac{\gamma}{\beta} \delta^{\frac{\gamma}{\beta}-1} < 0 \\
m_{18} &= -r_u(x_2) \left( \frac{1}{k(x_2)} \right)^{\frac{\gamma}{\beta}} \frac{\gamma}{\beta} \delta^{\frac{\gamma}{\beta}-1} < 0 \\
m_{19} &= k(x) \left( \frac{r_a(x)}{r_u(x)} \right)^{\frac{\beta}{\gamma}} \left( -\frac{1}{\delta^2} \right) < 0
\end{aligned}$$

L'équation matricielle (B.1) peut être réécrite en termes de signe :

$$\begin{pmatrix} + & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & + & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & + & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & - & + & - & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ - & - & + & 0 & + & 0 & 0 & 0 & 0 \\ - & - & + & 0 & 0 & - & 0 & 0 & 0 \\ - & - & + & 0 & 0 & 0 & + & 0 & 0 \\ 0 & 0 & - & - & 0 & 0 & 0 & + & 0 \\ 0 & - & 0 & 0 & + & - & + & 0 & + \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dk \\ dr_a \\ dr_u \\ d\bar{x} \\ dx_1 \\ dx_2 \\ d\Theta \\ dN_u \\ dN_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & + & - & - & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & + & - & - & 0 \\ + & - & - & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & - & 0 & 0 & 0 & - \\ 0 & 0 & 0 & - & 0 & 0 & 0 & - \\ 0 & 0 & 0 & + & 0 & 0 & 0 & - \\ + & + & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ - & + & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dw \\ d\tau \\ d\bar{V} \\ d\gamma \\ dp \\ dp_k \\ dt \\ d\delta \end{pmatrix} \quad (\text{B.2})$$

Nous utilisons la règle de Cramer pour résoudre le système. Nous avons donc besoin du signe du déterminant de la matrice  $B$ , qui correspond à la matrice de gauche dans l'équation

(B.1). Le déterminant est donné par<sup>1</sup> :

$$|B| = c_1 c_4 c_7 > 0$$

### Exemple de l'effet des paramètres exogènes sur $k(x)$

La règle de Cramer nous donne :

$$dk = \frac{|B'_{i,j}|}{|B|} dj \quad (\text{B.3})$$

où  $|B|$  est le déterminant de la matrice  $B$  définie précédemment.  $|B'|$  est le déterminant de la matrice  $B'$  qui correspond à la matrice  $B$  dans laquelle la colonne  $di$  a été remplacée par la colonne  $dj$  de la matrice de droite dans l'équation (B.1),  $i$  et  $j$  étant respectivement une des variables endogènes et une des variables exogènes du modèle.

Évaluons par exemple l'effet du revenu des ménages  $w$  sur l'intensité de l'agriculture  $k(x)$ . Dans la matrice  $B$ , nous remplaçons la colonne correspondant à  $dk$  par la colonne  $dw$  de la matrice de droite dans l'équation (B.1) :

$$B'_{k,w} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ m_1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & c_3 & 0 & c_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & c_6 & 0 & 0 & c_7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_9 & c_{10} & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ m_2 & 0 & c_{11} & c_{12} & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ m_3 & c_{13} & 0 & 0 & c_{14} & c_{15} & c_{16} & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{B.4})$$

Nous constatons que le déterminant est nul ( $|B'_{k,w}| = 0$ ). En d'autres termes, on a :  $\frac{dk}{dw} = 0$ . Dans notre modèle, le niveau de revenu des ménages n'a pas d'effet sur la distribution de l'intensité agricole.

Détaillons maintenant les effets des prix des produits agricoles  $p$  sur l'intensité agricole. Dans la matrice  $B$ , nous remplaçons la colonne  $dk$  par la colonne  $dp$  dans la matrice de droite de l'équation (B.1) :

---

1. Les déterminants des matrices ont été calculés à l'aide du logiciel de calcul algébrique Maxima, disponible en libre accès à l'adresse suivante <http://maxima.sourceforge.net/>



$$B'_{k,p} = \begin{pmatrix} m_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ m_{12} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & c_3 & 0 & c_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & c_6 & 0 & 0 & c_7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_9 & c_{10} & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{11} & c_{12} & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & c_{13} & 0 & 0 & c_{14} & c_{15} & c_{16} & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{B.5})$$

Nous calculons le déterminant suivant :  $|B'_{k,p}| = c_1 c_4 c_7 m_{11} > 0$ . D'après la règle de Cramer, cela implique que  $\frac{dk}{dp} > 0$ . Autrement dit, une augmentation du prix des produits agricoles provoque une intensification de l'agriculture, toute chose égale par ailleurs.

De la même manière, nous déterminons les effets des paramètres exogènes du modèle sur l'intensité de l'agriculture  $k(x)$  :

$$\frac{dk}{dw} = \frac{dk}{d\tau} = \frac{dk}{d\bar{V}} = \frac{dk}{d\gamma} = \frac{dk}{d\delta} = 0; \frac{dk}{dp} > 0; \frac{dk}{dp_k} < 0; \frac{dk}{dt} < 0$$

#### Les effets des paramètres du modèle sur $r_a(x)$

D'après la règle de Cramer, on a :

$$\frac{dr_a}{dw} = \frac{dr_a}{d\tau} = \frac{dr_a}{d\bar{V}} = \frac{dr_a}{d\gamma} = \frac{dr_a}{d\delta} = 0; \frac{dr_a}{dp} > 0; \frac{dr_a}{dp_k} < 0; \frac{dr_a}{dt} < 0$$

#### Les effets des paramètres du modèle sur $r_u(x)$

D'après la règle de Cramer, on a :

$$\frac{dr_u}{d\gamma} = \frac{dr_u}{dp} = \frac{dr_u}{dp_k} = \frac{dr_u}{dt} = \frac{dr_u}{d\delta} = 0; \frac{dr_u}{dw} > 0; \frac{dr_u}{d\tau} < 0; \frac{dr_u}{d\bar{V}} < 0$$

#### Les effets des paramètres du modèle sur $\bar{x}$

D'après la règle de Cramer, on a :

$$\frac{d\bar{x}}{dw} > 0; \frac{d\bar{x}}{d\tau} < 0; \frac{d\bar{x}}{d\bar{V}} < 0; \frac{d\bar{x}}{d\gamma} = 0; \frac{d\bar{x}}{dp} < 0; \frac{d\bar{x}}{dp_k} > 0; \frac{d\bar{x}}{dt} > 0; \frac{d\bar{x}}{d\delta} = 0$$

#### Les effets des paramètres du modèle sur $x_1$

D'après la règle de Cramer, on a :

$$\frac{dx_1}{dw} < 0; \frac{dx_1}{d\tau} > 0; \frac{dx_1}{d\bar{V}} > 0; \frac{dx_1}{d\gamma} < 0; \frac{dx_1}{dp} > 0; \frac{dx_1}{dp_k} < 0; \frac{dx_1}{dt} < 0; \frac{dx_1}{d\delta} < 0$$

### Les effets des paramètres du modèle sur $x_2$

D'après la règle de Cramer, on a :

$$\frac{dx_2}{dw} > 0; \frac{dx_2}{d\tau} < 0; \frac{dx_2}{d\bar{V}} < 0; \frac{dx_2}{d\gamma} > 0; \frac{dx_2}{dp} < 0; \frac{dx_2}{dp_k} > 0; \frac{dx_2}{dt} > 0; \frac{dx_2}{d\delta} > 0$$

### Les effets des paramètres du modèle sur $\Theta(x)$

D'après la règle de Cramer, on a :

$$\frac{d\Theta}{dw} < 0; \frac{d\Theta}{d\tau} > 0; \frac{d\Theta}{d\bar{V}} > 0; \frac{d\Theta}{d\gamma} < 0; \frac{d\Theta}{dp} > 0; \frac{d\Theta}{dp_k} < 0; \frac{d\Theta}{dt} < 0; \frac{d\Theta}{d\delta} < 0$$

### Les effets des paramètres du modèle sur $N_u$

D'après la règle de Cramer, on a :

$$\frac{dN_u}{dw} > 0; \frac{dN_u}{d\tau} < 0; \frac{dN_u}{d\bar{V}} < 0; \frac{dN_u}{d\gamma} = 0; \frac{dN_u}{dp} < 0; \frac{dN_u}{dp_k} > 0; \frac{dN_u}{dt} > 0; \frac{dN_u}{d\delta} = 0$$

### Les effets des paramètres du modèle sur $N_p$

D'après la règle de Cramer, on a :

$$\frac{dN_p}{d\bar{V}} < 0; \frac{dN_p}{d\gamma} > 0; \frac{dN_p}{d\delta} > 0$$

En revanche, on ne peut pas conclure sur les effets de  $w$ ,  $\tau$ ,  $p$ ,  $p_k$  et  $t$ .

### Les effets des paramètres du modèle sur $q_h(x)$

La consommation d'espace résidentiel est donnée par :

$$q_h^*(x) = \frac{\beta(w - \tau x)}{r(x)}$$

Par conséquent, les effets des paramètres du modèle dépendent de la localisation des ménages.

Pour les ménages urbains, on a  $r(x) = r_u(x)$  :

$$q_{h,u}^*(x) = \frac{\beta(w - \tau x)}{r_u(x)} = \left( \frac{\beta^\beta (1 - \beta)^{1-\beta}}{\bar{V}} \right)^{-\frac{1}{\beta}} \beta (w - \tau x)^{1-\frac{1}{\beta}}$$

Les paramètres agricoles ( $p$ ,  $p_k$ ,  $t$ ,  $\delta$ ) et les préférences pour les aménités  $\gamma$  n'ont pas d'effet sur la consommation d'espace résidentiel dans la ville. Les effets du revenu des ménages et du coût de transport domicile-travail sont donnés par :

$$\begin{aligned} \frac{dq_{h,u}}{dw} &= \left( \frac{\beta^\beta (1 - \beta)^{1-\beta}}{\bar{V}} \right)^{-\frac{1}{\beta}} \beta \left( 1 - \frac{1}{\beta} \right) (w - \tau x)^{-\frac{1}{\beta}} < 0 \\ \frac{dq_{h,u}}{d\tau} &= \left( \frac{\beta^\beta (1 - \beta)^{1-\beta}}{\bar{V}} \right)^{-\frac{1}{\beta}} \beta \left( 1 - \frac{1}{\beta} \right) (-x) (w - \tau x)^{-\frac{1}{\beta}} > 0 \end{aligned}$$

Pour les ménages périurbains, on a  $r(x) = r_p(x) = r_a(x)$  for  $x \in [x_1, x_2]$  :

$$q_{h,p}^*(x) = \frac{\beta(w - \tau x)}{r_a(x)}$$

On en déduit :

$$\frac{dq_{h,p}}{dw} > 0; \frac{dq_{h,p}}{d\tau} < 0$$

Les paramètres agricoles influencent la consommation d'espace résidentiel dans la zone d'usage mixte du sol, à travers le niveau d'aménités. Les effets sur  $q_h(x)$  sont exactement l'inverse de ceux de  $r_a(x)$  :

$$\frac{dq_{h,p}}{dp} < 0; \frac{dq_{h,p}}{dp_k} > 0; \frac{dq_{h,p}}{dt} > 0$$

### Les effets des paramètres du modèle sur $e(x)$

Les effets des paramètres exogènes sur le flux net d'externalités produit par l'agriculture peuvent être déduit aisément des effets sur l'intensité agricoles  $k(x)$ . Puisque le flux d'externalités est donné par  $e^*(x) = \delta/k^*(x)$ , on en déduit que les effets des paramètres du modèle sur  $e(x)$  sont les opposés des effets sur  $k(x)$  :

$$\frac{de}{dp} < 0; \frac{de}{dp_k} > 0; \frac{de}{dt} > 0$$

L'effet de la capacité d'une agriculture donnée à produire des externalités positives  $\delta$  peut être déterminé comme suit :

$$\frac{de}{d\delta} = \frac{1}{k(x)} > 0$$

Les paramètres propres aux ménages tels que le revenu  $w$ , le coûts de déplacement domicile-travail  $\tau$ , les préférences pour les aménités  $\gamma$  et le niveau d'utilité à l'équilibre  $\bar{V}$  n'ont pas d'effets sur le flux net d'externalités agricoles.

### Les effets des paramètres du modèle sur $a(x)$

Le niveau d'aménités à l'équilibre dans la zone d'usage mixte du sol assure l'égalité des rentes foncières agricole et périurbaine. Il est défini par :

$$a^*(x) = \left( \frac{r_a^*(x)}{r_u^*(x)} \right)^{\frac{\beta}{\gamma}} \quad \text{pour tout } x \in [x_1, x_2]$$

L'effet des paramètres agricoles sur  $a(x)$  sont les même que sur  $r_a(x)$  :

$$\frac{da}{dp} > 0; \frac{da}{dp_k} < 0; \frac{da}{dt} < 0$$

L'effet des paramètres propres aux ménages sur  $a(x)$  sont les opposés de ceux sur  $r_u(x)$  :

$$\frac{da}{dw} < 0; \frac{da}{d\tau} > 0; \frac{da}{d\bar{V}} > 0$$

Enfin, l'effet de la préférence des ménages pour les aménités est donnée par :

$$\frac{da}{d\gamma} = -\frac{\beta}{\gamma^2} \ln\left(\frac{r_a}{r_u}\right) \left(\frac{r_a}{r_u}\right)^{\frac{\beta}{\gamma}} < 0$$

Le tableau B.1 récapitule l'ensemble des résultats de la statique comparative du modèle.

	$r_u^*(x)$	$r_a^*(x)$	$k^*(x)$	$\bar{x}$	$x_1$	$x_2$	$e^*(x)$	$\Theta^*(x)$	$N_u^*$	$N_p^*$	$a^*(x)$	$q_h^*(x)$
$w$	+	0	0	+	-	+	0	-	+	+/-	-	$\begin{cases} - \text{ if } x \in [0, \bar{x}] \\ + \text{ if } x \in [x_1, x_2] \end{cases}$
$\tau$	-	0	0	-	+	-	0	+	-	+/-	+	$\begin{cases} + \text{ if } x \in [0, \bar{x}] \\ - \text{ if } x \in [x_1, x_2] \end{cases}$
$\bar{V}$	-	0	0	-	+	-	0	+	-	-	+	0
$\gamma$	0	0	0	0	-	+	0	-	0	+	-	0
$p$	0	+	+	-	+	-	-	+	-	+/-	+	$\begin{cases} 0 \text{ if } x \in [0, \bar{x}] \\ - \text{ if } x \in [x_1, x_2] \end{cases}$
$p_k$	0	-	-	+	-	+	+	-	+	+/-	-	$\begin{cases} 0 \text{ if } x \in [0, \bar{x}] \\ + \text{ if } x \in [x_1, x_2] \end{cases}$
$t$	0	-	-	+	-	+	+	-	+	+/-	-	$\begin{cases} 0 \text{ if } x \in [0, \bar{x}] \\ + \text{ if } x \in [x_1, x_2] \end{cases}$
$\delta$	0	0	0	0	-	+	+	-	0	+	0	0

TABLEAU B.1 – Statique comparative du modèle en l'absence de politiques publiques

## Annexe C

# Production et valorisation scientifique du programme PAYTAL

### C.1 Articles et documents de travail

#### C.1.1 Articles

Coisnon T., Oueslati W. & Salanié J. (2014). Spatial targeting of agri-environmental policies and urban development. *Ecological Economics*, 101 :33-42.

Coisnon T., Oueslati W. & Salanié J. (2014). Agri-environmental policy and urban development patterns : A general equilibrium analysis. *American Journal of Agricultural Economics*, 96(3) :673-689.

Coisnon T., Oueslati W. & Salanié J. (2014). Urban sprawl occurrence under spatially varying agricultural bid-rent and amenities. *Regional Science and Urban Economics*, 44(1) :38-49.

#### C.1.2 Documents de travail

Coisnon T., Oueslati W. & Salanié J. (2013). *Spatial targeting of agri-environmental policies and urban development*. Document de travail du GRANEM – 2013-01-038, 26 pages.

Coisnon T., Oueslati W. & Salanié J. (2012). *Urban sprawl occurrence under spatially varying agricultural bid-rent and amenities*. Document de travail du GRANEM – 2012-02-036, 29 pages.

Coisnon T., Oueslati W. & Salanié J. (2012). *Agri-environmental policy and urban sprawl : A general equilibrium analysis*. CRE (University of Newcastle), Discussion paper n° 31, 39 pages.

## C.2 Conférences

### C.2.1 Conférences et colloques

Bourbeillon, J., Charles, J., Rousselière D., Salanié J. & Sow D. (2013). *(Comment) peut-on isoler la subjectivité de l'auteur dans une analyse des données textuelles ? Étude de la variabilité du vocabulaire dans les atlas français des paysages*. 5<sup>ème</sup> Congrès de l'Association Française de Sociologie, RT20 « Méthodes », 2-5 septembre, Nantes.

Bourbeillon J., Pastaza A., Rousselière D. & Salanié J. (2014). *Physical and cultural dimensions of landscapes and their impact on urbanization : A land use change model*. 8<sup>èmes</sup> Journées INRA-SFER-CIRAD, 11-12 décembre, Grenoble.

Bourbeillon J., Piel, L., El Ayeb R., Rousselière D. & Guyet T. (2013). *Construction semi-automatique d'une ontologie de la perception des paysages*. Conférence Ingénierie des Connaissances, 1-6 juillet, Lille.

Coisnon T., Oueslati W. & Salanié J. (2013). *Spatial targeting of agri-environmental policy and urban development*. 7<sup>èmes</sup> Journées INRA-SFER-CIRAD, 12-13 décembre, Angers.

Coisnon T., Oueslati W. & Salanié J. (2013). *Spatial targeting of agri-environmental policies and urban development*. 20<sup>th</sup> EAERE Annual Conference, June 26-29, Toulouse.

Coisnon T., Oueslati W. & Salanié J. (2012). *Urban sprawl occurrence under spatially varying agricultural bid-rent and amenities*. Journée d'Etude Ville-Environnement, OFCE, 4 décembre, Paris.

Coisnon T., Oueslati W. & Salanié J. (2012) *Agri-environmental policy and urban sprawl patterns : A general equilibrium analysis*, Journées INRA-SFER en Sciences Sociales, 13-14 décembre, Toulouse.

Coisnon T., Oueslati W. & Salanié J. (2012). *Urban sprawl occurrence under spatially varying agricultural bid-rent and amenities*. Journées de l'AFSE, GATE-LSE, 10-11 mai, Saint-Étienne.

Guyet T., Nicolas H., Ghedamsi B. & Athané E. (2013). Fouille d'images géoréférencées avec RapidMiner. Colloque SAGEO2013, 23-26 septembre, Brest.

Marshall A., Guyet T., Athané E., Menghini F. & Nicolas H. (2014). *Paysage, étalement urbain et décisions politiques : Retour sur une approche pluridisciplinaire confrontant analyse spatiale et perceptions des acteurs*. Colloque « Concilier expertise scientifique et participation : le défi posé par la Convention européenne du paysage », 28 et 29 avril, Bruxelles.

## C.2.2 Séminaires

Coisnon T., Oueslati W. & Salanié J. (2013). *Agri-environmental policy and urban sprawl patterns : A general equilibrium analysis*. Journée thématique CESAER « Villes et Environnement », 14 janvier, Dijon.

Coisnon T., Oueslati W. & Salanié J. (2012). *Agri-environmental policy and urban sprawl patterns*. NUBS, Newcastle University Business School, Newcastle – UK, November 27.

Coisnon T., Oueslati W. & Salanié J. (2012). *Land use processes and agricultural amenities*. SRUC - Scotland's Rural University College, Edinburgh – UK, October 30.

Coisnon T., Oueslati W. & Salanié J. (2012). *Agri-environmental policy and urban sprawl patterns : A general equilibrium analysis*. CRE, University of Newcastle upon Tyne, September 26.

Coisnon T., Oueslati W. & Salanié J. (2012). *Urban sprawl occurrence under spatially varying agricultural bid-rent and amenities*. Department of Economics Seminar, SLU, Uppsala, May 25, 2012 – Sweden & Séminaire LARGEZIA, Oniris, Nantes, June 7, 2012.

## C.3 Rapports et mémoires diplômant

### C.3.1 Thèse de doctorat

Coisnon T. (2014). *Politiques d'aménagement, politiques agricoles et étalement urbain*. Thèse de doctorat en sciences économiques de l'Université d'Angers soutenue par Thomas Coisnon (directeur de thèse W. Oueslati / co-encadrant : J. Salanié, soutenue en juin 2014).

### C.3.2 Mémoires de Master ou niveau équivalent

Charles J. (2013). *Les atlas de paysages permettent-ils de définir une référence partagée sur les paysages ?*. Mémoire de Master 1 Paysage, Agrocampus-Ouest (sous la direction de J. Bourbeillon et D. Rousselière).

El Ayeb, R. (2012). *Extraction automatique de connaissances sur le paysage*. Mémoire de Master 2 Informatique, Université d'Angers (sous la direction de J. Bourbeillon).

Javadekar S. (2014). *Determinants of urbanization in Angers (France) using survival analysis techniques*. Mémoire de Master 1 Économétrie, Toulouse School of Economics – Université de Toulouse (sous la direction de D. Rousselière).

Lemarchand J. (2012). *Télé-détection et dynamique de l'étalement urbain et des paysages. Cas de l'aire urbaine de Lorient*. Mémoire de Master 2 TASE, Agrocampus Ouest (sous la direction

de H. Nicolas).

Menghini F. (2013). *Étude de l'influence du paysage sur l'étalement urbain. Application à l'aire urbaine angevine*. Mémoire de Master 1 Territoires et Développement Durable, Université de Paris 13 (sous la direction d'A. Marshall).

Pastaza A. (2014). *A multinomial logit approach to land use changes in Angers Metropolitan Area*. Mémoire de Master 2 Game Theory, Experiments and Applied Econometrics, Université Jean Monnet à Saint-Étienne (sous la direction de J. Salanié).

Piel L. (2012). *Une approche ontologique pour représenter la perception du paysage*. Mémoire de Master 1 Paysage, Agrocampus-Ouest (sous la direction de J. Bourbeillon).

Sow D. (2013). *Extraction et traitement automatique des Atlas de paysage - Caractérisation et Perception des unités paysagères*. Mémoire de Master ECD, Université de Lyon 2 & Polytech' Nantes (sous la direction de J. Bourbeillon).