



HAL
open science

Prospective environnementale et géographie : Apports de la dimension spatiale

Thomas Houet

► **To cite this version:**

Thomas Houet. Prospective environnementale et géographie : Apports de la dimension spatiale. Géographie. Institut National Polytechnique de Toulouse, 2015. tel-01237691

HAL Id: tel-01237691

<https://univ-tlse2.hal.science/tel-01237691>

Submitted on 3 Dec 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Habilitation à diriger des Recherches

présentée à

L'Institut National Polytechnique Toulouse – ENSAT

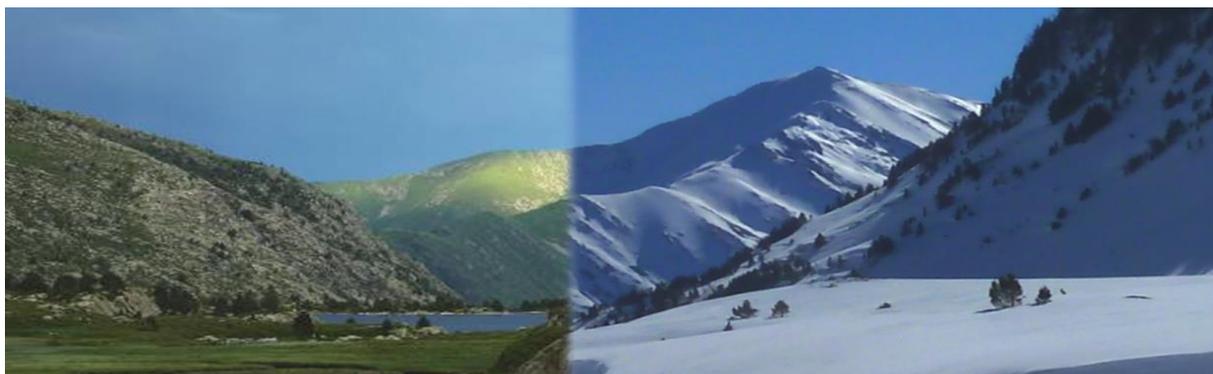
par

Thomas HOUET

Chargé de recherches

Laboratoire GEODE – UMR 5602 CNRS – Université Toulouse Jean Jaurès

Prospective environnementale et géographie : Apports de la dimension spatiale



Le 1^{er} décembre 2015

Thierry JOLIVEAU
Philip ROCHE
Lena SANDERS
Laurence HUBERT-MOY
Raphael MATHEVET
Gérard BALENT

Professeur des universités, Saint-Etienne
Directeur de recherche IRSTEA, Aix-en Provence
Directrice de Recherche CNRS, Paris
Professeure des universités, Rennes
Directeur de recherche CNRS, Montpellier
Directeur de recherche INRA, Toulouse (Garant)

Rapporteur
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur

REMERCIEMENTS

Une fois n'est pas coutume, je tiens tout d'abord à remercier la personne sans qui tout cela n'aurait pas été possible : Aurore, ma femme.

Je remercie ensuite bien chaleureusement les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail, de venir le commenter, le discuter et le critiquer : Laurence Hubert-Moy, Thierry Joliveau, Lena Sanders, Raphaël Mathevet, Philip Roche et Gérard Balent. J'aurais une pensée particulière pour ce dernier qui m'a fait confiance et accepté d'être mon garant, ainsi que pour m'avoir fait part de précieuses remarques et conseils. Je ne saurais oublier Laurence qui, en ayant été ma directrice de thèse, m'a en quelque sorte mis sur cette trajectoire.

A travers ce mémoire, il sera possible de constater la grande diversité de personnes que j'ai pu croiser au cours de cette trajectoire professionnelle : étudiants, collègues et autres partenaires scientifiques. Aussi, j'ai peur de ne pas être exhaustif ... et chaque personne citée dans ce mémoire doit voir cela comme un remerciement (si je les oublie ici).

Néanmoins, je ne saurais oublier en premier chef, mes deux "chefs", Jean-Paul Métaillié (ex-DU du GEODE) et Didier Galop (DU du GEODE), pour leur accueil, leur gentillesse, leur professionnalisme, (tes dessins Jean-Paul), leur modélo-septicisme, leurs histoires, leur connaissance des Pyrénées... et tout le reste (notamment lors de ce printemps 2007).

En second lieu, j'aurai une pensée toute particulière à tous les « jeunes chercheurs » avec qui j'ai pu collaborer, aller sur le terrain, débattre, apprendre, etc. ... et tout cela dans une ambiance humaine saine et de confiance (dans le désordre) : Florence Mazier, David Sheeren, Anaëlle Simonneau, Simon Gascoin, Cédric Gaucherel, Stéphane Binet, Vanessa Py, Mehdi Saqalli, Rahim Aguejdad, Julia Hidalgo, Grégoire Pigeon, Aude Lemonsu, Melanie Kolb, Anne Mimet, Marine Grémont, Jean-François Dejoux, Gaël Leroux... et merde j'en oublie plein ! Il est rare qu'autant de collaborations professionnelles aillent au-delà, et franchissent même le seuil de l'amitié. Ce qui ne gâche rien, bien au contraire, à la qualité et à l'ambiance dans laquelle est réalisé le travail.

Ensuite, merci aux jeunes « padawans » (étudiants) que j'ai eu la chance d'encadrer ou de côtoyer, notamment d'avoir toujours su apprécier (?) mon sens de l'humour... et donc de travailler autant pour certains (Laure, David, Renaud, Olivier, Juliette, Thierry, Sébastien, Yann, Julien, Christelle...). Bien sûr, doivent se sentir concernés les autres doctorants du laboratoire (passés et présents) : Nicolas, Mélodie, Elodie, Fred, France, Fanny, Ugo, Tibi *et al.*

Je remercie également tous mes autres collègues du laboratoire GEODE (Martin, Dominique, Emilie, Hugues, Sandrine, Gilles, Emilie, et tous les autres), ceux des équipes et réseaux avec qui j'ai pu travailler (CESBIO, Dynafor, ONERA, Ecolab, BRGM, IRSTEA, LIVE, LETG, MAPS, MAGIS, et j'en passe...) ainsi que Philippe et Dominique Dupui (du refuge de Bassiès).

Enfin, je terminerai par une mention toute particulière à Romane, Raphaëlle, Valentine, mes filles que j'aime tant, ainsi qu'à Aurore, et à qui je dédie ma propre prospective. Sans vous, je ne serais pas ce que je suis.

Sommaire

SOMMAIRE	3
PRÉAMBULE	5
1 CURRICULUM VITAE	6
1.1 ETAT CIVIL / RENSEIGNEMENTS PERSONNELS	6
1.2 ACTIVITÉS D'ENCADREMENT DE LA RECHERCHE ET D'ENSEIGNEMENT	7
1.3 ADMINISTRATION ET ANIMATION DE LA RECHERCHE	10
1.4 EVALUATION DE LA RECHERCHE	15
2 PRODUCTION SCIENTIFIQUE	17
2.1 ARTICLES DANS DES REVUES SCIENTIFIQUES À COMITÉ DE LECTURE	18
2.2 DIRECTION / CO-DIRECTION DE NUMÉROS SPÉCIAUX	21
2.3 OUVRAGES, CONTRIBUTIONS À OUVRAGES	21
2.4 ACTES DE COLLOQUES À COMITÉ DE LECTURE	21
2.5 COMMUNICATIONS ORALES	22
2.6 VULGARISATION	27
3 RÉSULTATS SCIENTIFIQUES	29
3.1 CONTEXTE, THÉMATIQUES ET STRATÉGIES DE RECHERCHE	29
3.2 MODÉLISATION PROSPECTIVE DES CHANGEMENTS D'OCCUPATION ET D'USAGES DE SOLS : ÉTAT DE L'ART ET PROPOSITIONS	35
3.3 ÉTALEMENT URBAIN ET CLIMAT : CARACTÉRISATION DU CLIMAT URBAIN ET SCÉNARIOS PROSPECTIFS	49
3.4 ESPACES MONTAGNARDS PYRÉNÉENS ET PROSPECTIVE : APPORTS DE LA DIMENSION SPATIALE	63
4 PERSPECTIVES DE RECHERCHE	79
4.1 LA CARACTÉRISATION ACTUELLE DES MILIEUX POUR MIEUX ÉVALUER LES IMPACTS FUTURS : RÔLE DE LA TÉLÉDÉTECTION	83
4.2 EVALUATION SPATIALISÉE « MULTI-PROXY » : POUR UN MEILLEUR ÉCLAIRAGE PROSPECTIF	87
4.3 DÉVELOPPEMENTS FUTURS : MODÉLISATION (RÉTRO-)PROSPECTIVE ET ACTEURS	89
5 CONCLUSION GÉNÉRALE	91
6 BIBLIOGRAPHIE	93
7 ANNEXES	99
8 SÉLECTION D'ARTICLES	119
9 TABLES	293

Préambule

Cette habilitation à diriger des recherches est l'aboutissement de huit années de recherches réalisées depuis ma prise de fonction en tant que chargé de recherche CNRS en 2007 au sein du laboratoire GEODE UMR 5602 CNRS/UT2J à Toulouse. Elle porte sur les développements et les avancées scientifiques issus du croisement de la géographie et de la prospective environnementale, et tente de synthétiser les apports de la dimension spatiale pour explorer le futur.

L'exploration du futur à des fins environnementales et sociales avait été identifiée, dans les années 2000, comme stratégique par les Instituts des Sciences Humaines et Sociales (Section 39) et Ecologie et Environnement du CNRS. L'émergence des demandes sociétales pour la gestion à moyen et long terme des milieux et des ressources corroborait cet enjeu scientifique. Le besoin repose notamment sur une approche finement spatialisée permettant une évaluation quantitative. Il s'agissait alors d'aller plus loin que la prospective territoriale et invitait à revisiter, voire inventer les méthodes à mettre en œuvre.

Ces recherches, émergentes, concilient des activités d'encadrement et d'enseignement, de l'administration et de l'animation et des projets de recherches. En effet, pour être partagées et éprouvées, il me semblait fondamental de les promouvoir au sein de projets et de réseaux de recherches, mais également de les diffuser dans l'enseignement et dans la formation à et par la recherche. Le fait même d'arriver dans un environnement scientifique nouveau et inconnu ne résulte pas que du hasard (et/ou de la naïveté). Cela illustre aussi la volonté de s'éprouver soi-même, tant personnellement que professionnellement.

Fondamentalement méthodologiques, ces recherches peuvent s'appliquer à une multitude de thèmes de recherches (gestion de l'eau, biodiversité, risques, climat, etc.). Au travers ce mémoire, et les différents exemples abordés, j'espère démontrer de l'intérêt même de ces recherches, et plus précisément de l'apport de la dimension spatiale à la prospective. Si (de façon probablement peu objective) j'en suis intimement persuadé, un indicateur fondamental à mes yeux me permet d'en faire l'auto-évaluation et la veille : le devenir des jeunes chercheurs que j'encadre, co-encadre ou accompagne dans leurs recherches. Il m'est ainsi possible de vérifier le caractère porteur ou novateur des thèmes / méthodes développés.

Ce mémoire d'habilitation à diriger des recherches présente ainsi successivement :

1. Mon curriculum vitae. Cette partie synthétise mon investissement dans la formation à et par la recherche, dans l'administration et l'animation de la recherche dans ce domaine.
2. Ma production scientifique.
3. Les principaux résultats des recherches réalisées. Une première partie présente un état de l'art et des propositions relatives aux méthodes permettant d'intégrer la dimension spatiale dans la démarche prospective. Ensuite, deux autres parties présentent des applications sur des milieux et des thématiques environnementales différentes : les milieux urbains et les milieux montagnards.
4. Les perspectives de recherches qui s'articulent autour des trois axes préférentiels : un retour vers la télédétection pour faciliter la prise en compte de la dimension spatiale ; une évaluation environnementale « multi-proxy » pour un meilleur éclairage prospectif ; et d'autres développements méthodologiques pour explorer le passé et mieux intégrer les acteurs.

1 Curriculum vitae

1.1 Etat civil / Renseignements personnels

HOUET Thomas

Date de naissance : 28 / 01 / 1978
Marié, 3 enfants (7 ans, 4 ans et 1 an)

Adresse :
36 rue du prilloume, 31100 Toulouse
Téléphone : 05 61 50 36 28 / 06 84 64 92 24
@ : thomas.houet@univ-tlse2.fr

Chargé de Recherches 1^{ère} classe (section 39)

Date entrée au CNRS : Octobre 2007

Laboratoire de rattachement : Laboratoire GEODE UMR 5602 CNRS
Université Toulouse Le Mirail
5 allée Antonio Machado
31058 Toulouse Cedex

Diplôme universitaire le plus élevé

2006 – **Doctorat** de Géographie

Occupation des sols et gestion de l'eau : Modélisation prospective en paysage agricole fragmenté
(Application au SAGE Blavet), Université de Rennes 2

Mention très honorable avec les félicitations du jury à l'unanimité

Distinctions

2012 – Prime d'Excellence Scientifique CNRS

Activités professionnelles

2011 - ... : Chargé de Recherches 1^{ère} classe CNRS – GEODE UMR 5602 CNRS

2007-2011: Chargé de Recherches 2^{ème} classe CNRS – GEODE UMR 5602 CNRS

2006-2007: ATER Université Rennes 2

2006 : Post-Doc CNRS – COSTEL UMR 6554

2002-2006 : Doctorat en Géographie – Université Rennes 2

1.2 Activités d'encadrement de la recherche et d'enseignement

Mes activités d'administration et d'animation de la recherche m'ont rapidement amené à la formation à et par la recherche, ainsi qu'à l'encadrement d'étudiants en master, en doctorat et de post-doctorants. Soucieux de leur devenir, tant dans le domaine de la recherche qu'au sein d'autres secteurs professionnels, il m'importe de leur proposer des sujets scientifiques novateurs, mobilisant des techniques nouvelles et en adéquation avec leur profil, qui s'insèrent dans les projets de recherches auxquels je participe et qui supportent la bonne réalisation de leurs travaux. Ainsi, les recherches des doctorants et post-doctorants que j'ai pu encadrer ou que j'encadre actuellement, s'insèrent toutes dans l'étude des méthodes de caractérisation des types d'occupation et d'usage des sols et de leurs dynamiques (T. Erudel, R. Marti, R. Agujedad, L. Vacquié), de leur modélisation prospective (L. Vacquié, O. Doukari, D. Takou) et de l'évaluation de leurs impacts (J. Grimaldi). Au final, dès lors que les conditions le permettent, un sujet de recherche est proposé à des étudiants motivés, suivant une approche qui se veut limitée mais de qualité. Mon investissement au cours leur encadrement est à la hauteur de l'exigence demandée dans leur travail.

Le tableau ci-dessous synthétise mon activité d'encadrement. Il est à noter que :

- Parmi les post-doctorants encadrés, un a été recruté en tant que Chargé de Recherche CNRS et l'autre en tant qu'Enseignant-Chercheur dans une école d'ingénieur ;
- L'étudiante ayant fini sa thèse bénéficie d'un contrat post-doctoral d'un an ;
- Parmi les Masters 2 encadrés, deux ont bénéficié d'une bourse de thèse et une est actuellement en CDD dans une autre université.

Diplômes / Post-docs	Soutenus / achevés	En cours	En CDD / CDI*
Master 1	5	-	-
Master 2	10	1	6
Thèses	1	4	1
Post-doctorats	2	1	2

* ayant trouvé un débouché en lien avec leur formation, dans l'année après leur diplôme (les Master 1 ne sont pas comptabilisés ici car ils ont tous poursuivis leurs études en Master 2).

1.2.1 Thèses et post-doctorats

1.2.1.1 Post-doctorats

AGUEJDAD Rahim, (18 + 12 mois) 2010-2013 – Projet de recherche ACCLIMAT, Modélisation prospective de l'étalement urbain de l'agglomération toulousaine.

Recruté **CR2 CNRS en 2013** au laboratoire LIVE UMR 7362 CNRS Strasbourg

DOUKARI Omar, (12 mois) 2011-2012 – Projet de Recherche ACCLIMAT, Développement d'un modèle de simulation de l'étalement urbain

Recruté **Enseignant-Chercheur en 2014** Ecole des Grands Projets ESTP Paris

VACQUIE Laure, (12 mois) 2015-2016 – Projet de Recherche ANR SAMCO. Modélisation prospective de changements d'occupation et d'usage des sols contrastés sur le territoire de Cauterets (65).

1.2.1.2 Thèse(s) soutenue(s)

VACQUIE Laure, 2011-2015 Modélisation prospective des changements des modes d'occupation et d'usages des sols. Approche multi-échelles appliquée sur les Pyrénées. GEODE UMR 5602 CNRS. Thèse de géographie. Dir. M. Paegelow, Co-dir. T. Houet (90%) – Soutenance 3 juin 2015

1.2.1.3 Thèses en cours

MARTI Renaud, 2012-2015 - Thèse de géographie, Dynamiques temporelles de la cryosphère dans les Pyrénées. Apports des données à haute résolution spatiale et temporelle. Dir. D. Laffly (15%), Co-dir. S. Gascoin (70%) et T. Houet (15%), Université de Toulouse Jean-Jaurès. Soutenance prévue fin 2015 / début 2016.

TAKOU David, 2013-2016 – Thèse de géographie, Modélisation prospective de l'étalement urbain de la ville de Lomé (Togo). Dir. T. Tchiamé, Co-dir. T. Houet (50%), Université de Lomé (Togo). Soutenance prévue fin 2015 / début 2016.

ERUDEL Thierry, 2014-2017 – Thèse en traitement d'image. Caractérisation de la biodiversité végétale en milieu montagnard et de piedmont par télédétection : apport des données hyperspectrales et lidar. Dir. X. Briottet, Co-dir. T. Houet (30%), Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace / ONERA (Toulouse).

GRIMALDI Juliette, 2014-2017 – Thèse en écologie et agroforesterie, Effet climatique local des trames de végétations arborées, Dir. V. Bustillo, Co-dir. T. Houet (30%) Université Paul Sabatier (Toulouse).

1.2.2 Masters

1.2.2.1 Master 2

PICCININI Benjamin, 2015, Contribution à la détermination de zones climatiques locales (LCZ) par la télédétection, Mémoire de Master 2 A3TA, Université Toulouse Paul Sabatier (Dir. G. Bur ; Co-Dir. T. Houet)

HAUNOLD Sébastien, 2014, Dynamiques de végétation d'altitude dans la réserve naturelle du Néouvielle (Hautes-Pyrénées) entre 1951 et 2008 : Focus sur le Pin à crochets (*Pinus mugo* ssp. *Uncinata*), Mémoire de Master 2 A3TA, Université Toulouse Paul Sabatier, 46 p. (Dir. T. Houet)

FORGET Yann, 2014, Conception d'un modèle prospectif spatialisé pour la simulation de scénarios contrastés en zone de montagne. Mémoire de Master 2 SIGMA, Université Toulouse Le Mirail - Jean Jaurès, 79 p. (Dir. T. Houet)

ROUSSEL Virginie, 2014, Modélisation des dynamiques spatio-temporelles du pin à crochets dans la vallée de Bassiès (Ariège), Mémoire de M2 GEP, Université Toulouse le Mirail - Jean Jaurès, Dir. T. Houet.

GOUTIERRE Mathilde, 2014, Evaluation spatio-temporelle de la vulnérabilité: Application à la vallée de Cauterets de 1950 à nos jours. Mémoire de Master 2 GEP, Université Toulouse Le Mirail - Jean Jaurès, 65 p. (Dir. JM. Antoine, A. Peltier, T. Houet)

WADDLE Julien, 2013, Analyse des dynamiques spatio-temporelles du pin à crochets (*pinus uncinata*) dans le cirque de Bassiès (Ariège), Mémoire de Master 2, Université Toulouse Le Mirail, (Dir: T. Houet), 96 p.

VIGNEAU Christelle, 2013, Cartographie et modélisation des changements d'occupation des sols dans le Haut-Vicdessos 1942-2008, Mémoire de Master 2, Université Toulouse Le Mirail, (Dir: T. Houet), 75 p.

- RIBIERE Olivier**, 2012, Etude des dynamiques d'occupation des sols dans le Haut-Videssos par télédétection (1953-1983). Master 2 Paysage & Environnement, Université Toulouse le Mirail.
- LEGROUX Camila**, 2012, La visualisation d'indicateurs traduisant les impacts du changement climatique sur l'aire urbaine toulousaine à l'horizon 2100. Master 2 SIGMA, Université Toulouse le Mirail.
- RAYNAUD Pierre-Bertrand** et **ALEXIS Yves-André**, 2012, Analyse diachronique des modes d'occupation et d'usage du sol des Garrotxes entre 1942 et 2009 par télédétection. Master 2 Paysage & Environnement, Université Toulouse le Mirail.
- VACQUIE Laure**, 2011, Potentialités des images à très haute résolution spatiale pour la cartographie des zones humides de montagne, Mémoire de Master 2 Paysage & Environnement, Université Toulouse Le Mirail - 100p. Stage CNES - ORFEO-Pléiades. (Mention TB).

1.2.2.2 Master 1

- SOUCHET Rémi**, 2012, Analyse des types d'occupation et d'usages du sol de la Vallée du Videssos en 2008 par photo-interprétation, Master 1 Paysage & Environnement, Université Toulouse le Mirail, 17p. (Mention AB)
- RIBIERE Olivier**, 2011, Analyse de l'évolution de types d'occupation et d'usage du sol de la vallée du Videssos entre 1953 et 1983 par télédétection, Master 1 Paysage & Environnement, Université Toulouse le Mirail, 87 p. (Mention TB)
- RAYNAUD Pierre-Bertrand**, 2011, Cartographie des zones climatiques urbaines dans l'agglomération toulousaine: une approche formalisée et spatialement exhaustive, Master 1 Paysage & Environnement, Université Toulouse le Mirail, 61 p. (Mention TB)
- VACQUIE Laure**, 2010, Mise en place d'une méthode pour la classification automatique de l'occupation des sols à partir de photographies aériennes panchromatiques en zone de montagne. Master 1 Paysage & Environnement, Université Toulouse le Mirail.
- MONIER Arthur**, 2010, Etude des dynamiques d'occupation des sols dans le Haut-Videssos par télédétection (1953-1983). Master 1 Paysage & Environnement, Université Toulouse le Mirail.

1.2.3 Enseignements

Mon activité d'enseignement se concentre sur les Universités de Toulouse, ainsi que sur l'université de Rennes 2 et l'école nationale d'agronomie de Paris-Grignon. Il s'agit principalement d'interventions en Master 2 visant à promouvoir, diffuser et initier aux méthodes de la modélisation prospective spatialisée. Suivant les années, cela représente en moyenne de 50h à 65h / an d'enseignement.

Université Toulouse le Mirail - Master 2 Paysage et Environnement	(25 h / an entre 2010 et 2013)
Université Toulouse le Mirail - Master 1 Paysage et Environnement	(15,5 h / an entre 2010 et 2013)
Université Toulouse le Mirail - Master 2 SIGMA	(5 h / an depuis 2010)
Université Toulouse le Mirail - SED Licence 3	(14,5 h / an depuis 2008 et 2014)
Université Toulouse Paul Sabatier - Master 2 A3TA	(6 h / an depuis 2009 ; 12 h /an depuis 2014)
Université Rennes 2 - Master 2 Gestion de l'Environnement	(6 h / an depuis 2007)
Ecole National Formation Agronomique – Master 1 AgroFoodChain	(10 h / an entre 2010 et 2012)
Ecole National d'Agronomie de Paris – Grignon – DA IDEA	(9 h / an depuis 2012)
ENSEEITH – Master 2 Hydrologie et Hydraulique	(4 h en 2011)
Ecole National Supérieure d'Agronomie Toulouse	(30 h en 2010)

1.2.4 Formations

Prospective et géomatique : construction de scénarios et usages de modèles spatiaux (2,5 jours) - CNRS Formation entreprise

Nov. 2014 – 5 participants

Sept. 2015 – 5 participants

Cette formation, destinée aux professionnels (Collectivités locales, Bureau d'études, etc.), a été élaborée en 2014, et inscrite au catalogue de CNRS Formation entreprise. Elle est reconduite en 2015 (2 sessions prévues en mars et novembre). Elle comprend théorie et exercices pratiques. Un modèle de simulation spatiale de l'étalement urbain est également fourni gratuitement.



Organisation de l'école thématique SCESITE « SCEnarisations, Modélisations et Simulations spatialisées pour le Territoire », Puy, Saint-Vincent 3-11 mars 2016.

Participation à l'école d'été du PRES Toulouse – Brésil « Observation spatiale pour l'Environnement » - Observation spatiale pour l'Environnement : Usages, Occupations et gestion des territoires », 29 juin – 10 juillet 2009, Brasilia, Brésil (3h)

1.3 Administration et animation de la recherche

La rétro-observation et l'amélioration des trajectoires passées des interactions Hommes – Milieux et la modélisation prospective pour l'évaluation environnementale et sociale ont été identifiées comme un des enjeux scientifiques et méthodologiques dans le plan stratégique 2003-07 du CNRS (Section 39). Ils ont été appuyés dans le projet de l'InSHS (2009, p.4) ainsi que lors de la « Prospective de l'InEE » en 2009 (INEE, 2009). Ainsi, depuis mon intégration au CNRS en 2007, au sein du laboratoire GEODE UMR 5602, j'ai pris le parti de promouvoir ce dernier thème de recherche par le biais de travaux de recherches. Mes activités d'administration et d'animation de la recherche se sont donc concentrées dans un premier temps dans la direction et la participation à des projets de recherches dans le but de contribuer à poser des bases méthodologiques et produire des exemples démonstratifs. Ainsi, l'ensemble de mes recherches sont financièrement supportées par plusieurs programmes interdisciplinaires dont, pour certains, j'assume la coordination ou celle d'une tâche (co-coordination), et dont la liste exhaustive est présentée ci-dessous.

Ce faisant, il m'est apparu nécessaire d'y contribuer également par l'animation de la recherche dans ce domaine au travers (i) la promotion et l'animation au sein du laboratoire GEODE d'un axe de recherche depuis 2009, (ii) la structuration et l'animation de réseaux de chercheurs venant de disciplines variées (géographie, agronomie, informatique, écologie, etc.) au sein du GdR MAGIS depuis 2009 et enfin (iii) par le montage et la participation à des formations (cf. parties 1.2.3. et 1.2.4.) et l'organisation de manifestations scientifiques. Ainsi, la prise en charge progressive de responsabilités administratives et collectives, tant au niveau local, régional et national, me paraît-elle indissociable et nécessaire à l'émergence et la généralisation de travaux de recherches en modélisation prospective.

Direction de 9 projets de recherches

Participation à 2 projets de recherche avec la responsabilité de work-packages

Participation à 8 projets de recherche

1.3.1 Direction de programmes de recherche (2007-2015)

Période	Titre du projet / Acronyme	Direction	Organisme / Programme
2013-2014	Occupation et utilisation des sols Actuelles et Futures du Vicdessos (OUAF Vicdessos)	T. Houet	Labex DRIIHM
2013-2017	Society Adaptation for coping with Mountain risks in a global change Context (SAMCO)	G. Grandjean	ANR Soc&Env
2012-2013	Occupation et utilisation des sols Passées, Actuelles et Futures du Vicdessos (OPAF Vicdessos)	T. Houet	OHM Vicdessos
2011-2012	Occupation et utilisation des sols Passées et Actuelles du Vicdessos : bilan des changements contemporains à une échelle spatiale fine (1950-2010) (OPA3)	T. Houet	OHM Vicdessos
2011-2012	Reconstitution cartographique et évolution spatio-temporelle du glacier d'Ossoue (Vignemale - Pyrénées) au cours des 20 et 21ème siècles (Projet Ossoue)	T. Houet	Fondation Eau, Neige, Glace
2010-2015	Modélisation rétrospective et prospective des changements d'occupation des sols dans les Pyrénées (MODE RESPYR)	T. Houet	ANR JCJC
2010-2015	Adaptation au changement climatique de l'agglomération toulousaine (ACCLIMAT)	V. Masson	RTRA STAE
2010-2011	Occupation et utilisation des sols Passées et Actuelles du Vicdessos : bilan des changements contemporains à une échelle spatiale fine (1950-2010) (OPA2)	T. Houet	OHM Vicdessos
2009-2012	Monitoring Human/Nature interactions in the Haut-Vicdessos	T. Houet	Fondation Planet-Action
2009-2010	Occupation et utilisation des sols Passées et Actuelles du Vicdessos : bilan des changements contemporains à une échelle spatiale fine (1950-2010) (OPA2)	T. Houet	OHM Vicdessos
2009-2010	ORFEO-PLIADDES - Evaluation des images à très haute résolution spatiale pour la cartographie des zones humides de montagne	T. Houet	CNES

1.3.2 Participation à des projets

Période	Titre du projet / Acronyme	Direction	Organisme / Programme
2015-2016	PAELOPAYS - Reconstruction dynamique du paysage de la vallée du Vicdessos sur le long terme (200 dernières années)	F. Mazier	Labex DRIIHM
2014-2018	HYEP – Hyperspectral imagery for Environmental urban Planning	C. Weber	ANR Générique
2012-2015	ROCEPAL – Rétro-observation, Evaluation et impact des Changements Environnementaux dans les Pyrénées centrales à partir d'archives lacustres	D. Galop	Région Midi-Pyrénées / Agence de l'eau Adour-Garonne
2009-2012	FluxPyr: Réseau transfrontalier pour la détermination et gestion des flux hydriques, de carbone et d'énergie, en contexte de changement climatique, dans les systèmes agricoles et pastoraux des Pyrénées	M.T. Sebastia	Interreg IV-a
2008-2010	Formes urbaines, modes d'habiter et climat urbain dans le périurbain toulousain. Projet exploratoire de recherche interdisciplinaire	S. Haouès-Jouve	PIRVE
2008-2010	BIA2008-00681 - Simulations géomatiques pour la modélisation des dynamiques environnementales : avancées méthodologiques et thématiques	M.T. Camacho Olmedo	FEDER
2007-2011	BiodivAgriM -	V. Bretagnolle	ANR Biodiversité

1.3.3 Responsabilités administratives et collectives

Au sein du laboratoire GEODE UMR 5602

2010-2015 Responsable de l'Axe 3 « Modélisation des trajectoires spatio-temporelles des paysages » de l'UMR 5602 GEODE - <http://w3.geode.univ-tlse2.fr/axe3.php>

2010-2015 Membre nommé du Conseil de laboratoire - UMR 5602 GEODE

2010-2015 Membre du Conseil d'Orientation Stratégique du laboratoire - UMR 5602 GEODE

Au sein du GdR MAGIS

2013-2016 Responsable de l'Action Prospective Thématique « Analyse et suivi des milieux » du GDR MAGIS - <http://gdr-magis.imag.fr/index.php/aps-thematiques/milieux>

2013-2016 Membre du Bureau du GDR MAGIS

2009-2012 Responsable du Groupe Projet « Géoprospective » du GDR MAGIS

2009-2012 Membre du Bureau du GDR MAGIS

Au sein du paysage scientifique toulousain

2014-2015 Membre du comité de direction du projet de ZA PYGAR (déposé en Fév. 2015)

1.3.3.1 Direction d'axe de recherche

Lors de mon intégration en 2007 au laboratoire GEODE, je me suis impliqué dans le thème transversal « Modélisations géomatiques de dynamiques environnementales » en tant que responsable-adjoint. Identifié initialement comme une composante méthodologique à disposition des sept autres thèmes de recherche du laboratoire, mon arrivée en 2007 plus celle d'un professeur en 2008 ont contribué à en faire un axe de recherche à part entière du laboratoire, intitulé « Modélisation des trajectoires spatio-temporelles des paysages » dans le contrat quinquennal 2009/10-2014/15. Ayant participé activement à la rédaction du bilan pour le contrat quadriennal 2005-2009, j'en ai pris la direction.

Ainsi, si l'objectif consistait en la formation d'une véritable équipe au sein du laboratoire, les enjeux sous-jacents étaient de structurer des recherches communes encore trop éparpillées par le passé d'une part, et d'identifier et approfondir des thématiques émergentes et porteuses, dans un contexte humain relativement limité, d'autre part. Le renforcement de l'axe en ressources humaines après 2010 (1 CR, 1 AI) et l'émergence de projets structurants en relation directe (ou non) avec les autres axes du laboratoire, ont conforté la mise en place de cet axe de recherche à forte orientation méthodologique. Composé de membres permanents (5,5 ETP) et d'un total de 4 post-doctorants et 7 doctorants, mon rôle a visé à mettre en œuvre des réunions régulières visant à gérer, collectivement, les moyens mis à disposition, avec une attention toute particulière dédiée aux jeunes chercheurs (soutiens à la formation, à la mobilité, à la valorisation).

En collaboration avec le directeur de l'unité, j'ai veillé à promouvoir l'équipement au travers un plateau technique dédié à la modélisation spatiale (Plateforme AMOS – Analyse Spatiale et Modélisation Spatiale) et impliquant un des membres de l'axe (Direction : D. Laffly). Cette plateforme est aujourd'hui labellisée, ainsi que les deux autres plateformes du laboratoire, par la Région Midi-Pyrénées, ce qui a permis d'être éligible au Contrat de Plan Etat-Région 2015 : près de 190k€ d'équipements sont dédiés à la plateforme AMOS.

Du fait des thèmes et projets de recherches abordés, des moyens humains et techniques disponibles, et mon souci de promouvoir ce thème de recherche au niveau régional et national (cf. partie suivante), cet axe de recherche est désormais reconnu et attractif, et a été par conséquent pérennisé (Axe Géomatique et Modélisation spatiale) dans le futur contrat quinquennal 2016-2020 et structuré autour de membres permanents (7 ETP). J'en assurerai encore la direction.

1.3.3.2 Animation de la recherche

Malheureusement, force est de constater qu'il n'existe pas, au niveau national, une communauté réellement structurée dans le domaine des changements d'occupation et d'usage des sols. Ma formation doctorale et post-doctorale, puis mon intégration au CNRS m'ont permis de rencontrer la majeure partie des personnes travaillant dans le domaine en France. Grâce aux opportunités qui se sont présentées, notamment via le GdR MAGIS, un projet Jeune Chercheur financé par l'ANR et l'organisation de manifestations scientifiques (Colloque RTP Paysage et Environnement, séminaires, Ecole thématique SCEMSITE), j'ai cherché à promouvoir les recherches dans le domaine de la modélisation prospective des changements d'occupation et d'usage des sols.

Le GdR MAGIS

En 2010, un séminaire épistémologique était organisé par le GdR MAGIS sur le thème de la prospective en géographie. La communauté travaillant dans ce domaine étant encore dispersée et pas toujours rattachée à la communauté des géomaticiens, ce séminaire a dû être annulé. Fort de ce constat, j'ai proposé de créer un Groupe Projet « Géopropective » dans le but de structurer la communauté des géographes (et pas uniquement) concernés. Après acceptation, j'ai pris la responsabilité de ce Groupe Projet en collaboration avec Françoise Gourmelon de l'UMR 6554 LETG Brest. De fait, j'ai intégré le bureau du GdR MAGIS.

Deux actions phares sont représentatives de cet effort :

- L'organisation d'un séminaire en avril 2011, à Nice – îles du levant –, sur le thème « Géopropective : apport de la dimension spatiale aux recherches prospectives ». 50 personnes ont participé à ce séminaire (dont 36% de personnel titulaire dans l'enseignement et la recherche toutes disciplines et institutions confondues, 8% d'employés du secteur privé et public – hors recherche, et le reste d'étudiants en thèse ou post-doctorat). Deux numéros spéciaux ont été réalisés suite à ce séminaire (revues *Cybergéo* et *L'espace Géographique*).
- L'organisation d'un workshop en septembre 2012, à Brest, sur le thème « La géo en prospective » visant la formation de jeunes chercheurs dans le domaine. 32 candidatures ont été recensées pour y participer (dont 6 avaient participé au séminaire de Nice) : 17 doctorants / post-doctorants, 12 enseignants-chercheurs et 3 personnes provenant du secteur privé ou de collectivité. La moitié a été retenue, faute de pouvoir les accueillir tous.

Lors de la demande de renouvellement du GdR MAGIS en 2013, ce Groupe Projet a été maintenu dans le projet 2013-2016, en tant qu'Action Prospective « Analyse des milieux et de leurs évolutions » (<http://gdr-magis.imag.fr/index.php/aps-thematiques/milieux>). Lors des Assises du GdR MAGIS à Lyon en 2013, équivalent à un travail de prospective de chacune des actions, cette AP a suscité un réel intérêt pour la communauté des géomaticiens (plus de 40 participants). Face à l'intérêt lié à cette thématique, les conclusions ont mis en exergue un certain nombre de questions méthodologiques et sémantiques. Ainsi, un réel besoin de formalisation et de formation est apparu. Ainsi, l'objectif de l'Action prospective « Analyse des milieux et de leurs évolutions », portant fondamentalement sur la modélisation prospective dans son acception la plus large, est de supporter l'organisation d'une école thématique en 2016.

Organisation de manifestations scientifiques

- **Colloque international “Spatial landscape modelling: from dynamic approaches to functional evaluation”** – Toulouse, 3-5 juin 2008, RTP Paysage et Environnement, MSHS-T, UMR GEODE, S4.
Organisation : **T. Houet** 90 participants – 32 communications orales
Houet T., Verburg P. and Loveland T. (2010), Special issue on Monitoring and modelling landscape dynamics, *Landscape Ecology*, 25(2), Feb 2010, 163-330, <http://www.springerlink.com/content/0921-2973/25/2/>
Gaucherel C and **Houet T** (2009) Special issue on spatially explicit landscape modelling: current practices and challenges. *Ecological Modelling*, Volume 220, Issue 24, Pages 3477-3658 (24 December 2009) - <http://www.sciencedirect.com/science/journal/03043800/220/24>
- **Séminaire « Géoprospective : apport de la dimension spatiale aux recherches prospectives »**, Nice 4-5 avril 2011, GdR Magis, UMR GEODE, UMR LETG, UMR EVS, UMR ESPACE
Organisation : C. Voion, **T. Houet**, F. Gourmelon, T. Joliveau 50 participants
Gourmelon F., **Houet T.**, Voiron C. et Joliveau T. (2012) La géoprospective. Points de vue conceptuels et applicatifs de l’apport du spatial à la prospective. *L’Espace Géographique*, n°2-2012
Houet T. et Gourmelon F. (2014) La géoprospective – Apport de la dimension spatiale aux approches prospectives, *Cybergeo*, 8 p., <http://cybergeo.revues.org/26194>
- **Workshop « La Géo en prospective »**, GdR MAGIS, UMR GEODE, UMR LETG
Organisation : F. Gourmelon, **T. Houet**, C. Tissot 16 participants
- **Séminaires du GEODE**
Pour une étude théorique du paysage – C. Gaucherel, 14 octobre 2014
Organisation : F. Mazier, **T. Houet** 30 participants
Tradeoffs of land abandonment across Europe – P. Verburg, 4 juin 2015
Organisation : **T. Houet** 20 participants
- **Ecole thématique SCEMSITE 2016 : SCEnarisations, Modélisations et Simulations spatialisées pour le Territoire**, Puy-Saint-Vincent, 6-11 mars 2016, Labex DRIIHM, UMR GEODE, UMR LETG, GdR MAGIS
Organisation : **T. Houet**, F. Gourmelon, C. tissot 40 participants

L’émergence d’un réseau de compétences dans le paysage toulousain

A l’échelle du paysage scientifique toulousain, j’ai pu contribuer à faire valoir la place de l’étude des changements d’occupation et d’usage des sols et de la modélisation prospective au travers deux actions :

- La mise en œuvre d’une équipe interdisciplinaire, formée de chercheurs de plusieurs laboratoires toulousains (CESBIO, INRA/ENSAT, GEODE), dans le cadre d’un projet ANR Jeune chercheur MODE RESPYR ;
- Promouvoir les recherches interdisciplinaires où les changements d’occupation des sols contribuent à évaluer l’impact des interactions Hommes – Milieux dans le cadre d’une participation active à l’Observatoire Hommes-Milieux du Haut-Vicdessos et dans le montage du projet de Zone Atelier Pyrénées-Garonne (ZA PYGAR) en tant que membre du comité de direction.

1.4 Evaluation de la recherche

1.4.1 Participation aux instances d'évaluation de la recherche

2011 - Membre CSQ Université Toulouse Paul Sabatier / IUT Auch - MCF Chaire d'excellence

1.4.2 Jury de thèses

2010 – François MIALHE - Le développement de l'aquaculture saumâtre dans l'aire Pacifique Evolution des paysages, dynamiques socio-économiques et impacts environnementaux dans deux territoires au Pérou et aux Philippines. Université Paris Diderot – UMR 8586 PRODIG, Paris (Examineur)

1.4.3 Comité de thèses

LASSEUR Rémy, 2013-2016, Modélisation et cartographie multi-échelles des faisceaux de Services Ecosystémiques, LECA Grenoble UMR Dir. S. Lavorel ; Co-Dir : PY Longaretti.

ALLAIN Sandrine, 2014-2017, La dynamique de changement des services écosystémiques liés à l'élevage au cœur des enjeux de développement durable des territoires de montagne, INRA-SAD Dynafor, Dir. A. Gibon

MOULIN Margot, 2013-2016, Modélisation des dynamiques de production d'huile de palme (Sumatra, Indonésie), INRA-SAD ASTER Dir. M. Benoit

HERRAULT Pierre-Alexis, 2011-2014 Extraction et gestion de données spatiales incertaines pour la cartographie des forêts anciennes. GEODE UMR 5602 CNRS / INRA Dynafor. Dir : M. Paegelow ; Co-Dir : D. Sheeren.

MARTIN Laura, 2010-2013 Réorganisation des territoires agricoles insérant des productions de biomasse énergétique pérennes. INRA-SAD ASTER Dir. M. Benoit

MIMET Anne, 2009-2012 Evolution de la biodiversité et dynamiques d'occupation des sols en Seine-et-Marne : Vers des scénarios prospectifs à l'horizon 2030. INRA-SAD ASTER Dir. M. Benoit

SCHALLER Noémie, 2009-2012, Modélisation conceptuelle de l'organisation spatio-temporelle de l'occupation du sol d'exploitations agricoles au sein de territoires soumis à enjeux environnementaux, INRA-AgroParisTech, Dir : P. Martin

MAESTRIPIERI Nicolas, 2008-2011, Sylviculture et développement soutenable dans le sud chilien. De l'analyse diachronique à la modélisation. GEODE UMR 5602 CNRS, Dir : M. Paegelow

TORO BALBOTIN Dario, 2008-2011, Analyse et modélisation prospective de l'utilisation du sol dans le paysage de la Cordillère de la Côte du sud du Chili : Impacts sur la forêt naturelle et sur le patrimoine culturel. GEODE UMR 5602 CNRS, Dir : M. Paegelow

LAZRAK El Ghali, 2007-2010 Modélisation spatio-temporelle de paysages agricoles complexes : approche par des méthodes de fouille de données. INRA-SAD ASTER Dir. M. Benoit

1.4.4 Conseils scientifiques

2012- ... Membre du Comité Régional Trames Verte et Bleue de Midi-Pyrénées (CRTVB)

1.4.5 Expertises scientifiques

2014-2015 Houet T., Hidalgo J., Îlots de chaleur urbains Stratégies d'adaptation des villes face aux changements climatiques. Le cas de Toulouse Métropole. POPSU Europe Communication orale - Barcelone, 27-28 nov. 2014 et chapitre d'ouvrage

1.4.6 Evaluation d'articles scientifiques

1.4.6.1 Membre de comité éditorial de revue

2013- ... Membre du Comité de Rédaction de la *Revue Internationale de Géomatique*

1.4.6.2 Revues à comité de lecture

2015

1 article pour la revue *Regional Environmental Change*
1 article pour la revue *Fourrages*

2014

1 ouvrage pour la revue *Mountain research and Development*
2 articles pour la revue *Environmental Modelling and Assessment*
1 article pour la revue *Vertigo*

2013

1 article pour la revue *Cybergéo*
1 article pour la revue *Frontiers in Earth Science*

2012

1 article pour la revue *Cybergéo*
1 article pour la revue *Revue Internationale de géomatique*
1 article pour la revue *Water Resources Management*
7 articles pour la revue *International Journal of Geographical Information Science*

2011

1 article pour la revue *Environmental modelling and Software*
1 article pour la revue *Landscape and Urban Planning*
1 article pour la revue *The Geographical Journal*
1 article pour la revue *Revue Internationale de géomatique*
1 article pour la revue *Téledétection*

1.4.6.3 Colloques à comité de lecture

2014

3 articles pour le colloque international SAGEO'2014

2013

3 articles pour le colloque international SAGEO'2013
8 articles pour le colloque IEEE International Geosciences And Remote Sensing 2013

2012

13 articles pour le colloque IEEE International Geosciences And Remote Sensing 2012

2011

11 articles pour le colloque IEEE International Geosciences And Remote Sensing 2011

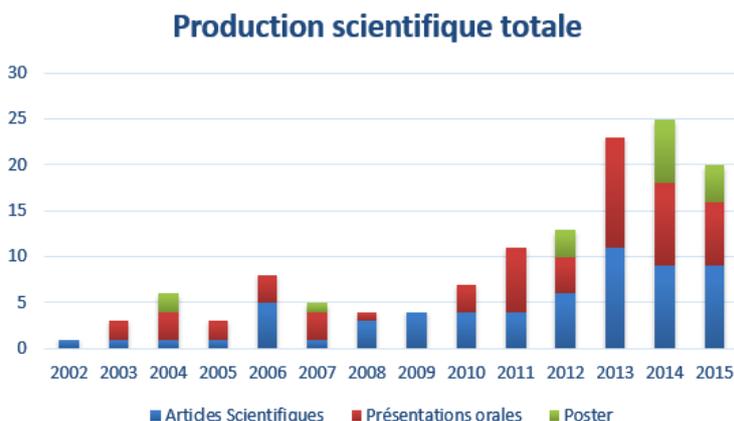
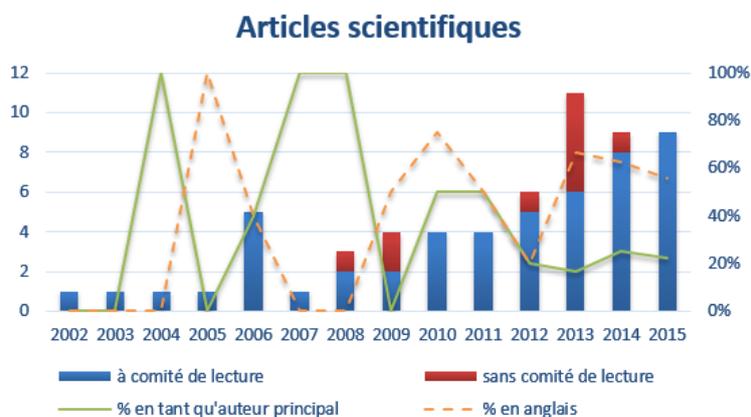
2010

11 articles pour le colloque IEEE International Geosciences And Remote Sensing 2010

2 Production scientifique

	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Total
1. Bibliographie	1	1	1	1	5	1	3	4	4	4	6	11	9	9	60
1.1. Articles internationaux (Rang A) à comité de lecture (ACLI)			1	1	1	2	1	2	1	3	4	4	6	7	36
1.2. Articles nationaux à comité de lecture (ACLn)		1			1								1		3
1.3. Direction d'ouvrage / de numéros spéciaux (DO)								1	1		1	1	1		5
1.4. Ouvrages de recherche (OR) ou de synthèse (OS)	1				1										2
1.5. Chapitres d'ouvrage à comité de lecture (COCL)					1							1		2	4
1.6. Articles de revues sans comité de lecture (ASCL)							1	2			1	5	1		10
1.7. Chapitres d'ouvrages sans comité de lecture (COSL)															
2. Communications orales	0	2	5	2	3	4	1	0	3	7	7	12	16	11	73
2.1. Conférences sur invitation						3			1	1		1	4	2	12
2.2. Communication orale		2	3	2	3		1		2	6	4	11	5	5	44
2.3. Communication affichée (poster)			2			1					3		7	4	17
3. Rapports	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	0	5
3.1. Rapports scientifiques ou de recherche			2							1		2			5
4. Autres produits de la recherche	0	1	0	0	2	0	3								
4.1. Logiciels										1			2		3
4.2. Base de données															
4.3. Productions audiovisuelles															
4.4. Collections															
4.5. Catalogues d'expositions															
5. Interactions avec l'environnement social, économique	0	1	6	2	0	9									
5.1. Brevets / Propriété intellectuelle													1		1
5.2. Publications techniques ou de vulgarisation											1	5			6
5.3. Organisation ou animation de formations professionnelles													1		1
5.4. Expertises / contrats d'expertise / transfert de technologie															
5.5. Participations et actions au sein de manifestations scientifiques															
5.6. Commissariat ou participation à des expositions															
5.7. Conférences grand public												1			1
Total															150

https://www.researchgate.net/profile/Thomas_Houet/
<http://scholar.google.fr/citations?user=mDvRuMIAAAAJ&hl=fr>



2.1 Articles dans des revues scientifiques à comité de lecture

SOUJES EN COURS D'ÉVALUATION

- [1] **Houet T.**, Doukari O., Aguejdad R., Clarke K. (Submitted), A non path-dependent model for projecting contrasting urban growth futures, *Cybergeo*
- [2] **Houet T.**, Marchadier C., Bretagne G., Moine M.P., Aguejdad R., Viguié V., Bonhomme M., Lemonsu A., Avner P., Hidalgo J., Masson V. (Submitted). Linking modeling and narrative approaches to simulate long-term urban evolution: an integrated method to build urban scenarios for climate adaptation. *Environmental Modelling and Software*
- [3] Lemonsu A., **Houet T.**, Pigeon G., Dessailly B., Béringuier P., Legain D., Hidalgo J., Gaudio N. (Submitted). Multiscale analysis of variability in temperature and landscaping for a residential area study case, *Landscape and Urban Planning*
- [4] Vacquié L., **Houet T.**, Sheeren D., de Munnik N., Roussel V., Waddle J., (Submitted) Adapting grazing practices to limit the reforestation of mountainous summer pastures: an agent-based model (SHIELD), *Environmental Modelling and Software*
- [5] Aguejdad R., Doukari O., Avner P., **Houet T.**, Viguié V., (Soumis). Etalement urbain et géoprospective : apports et limites des modèles de spatialisation. *Cybergeo*.
- [6] Mimet A., Pellissier V., **Houet T.**, Julliard R., Simon L. (Submitted) A holistic landscape description reveals that configuration changes more over time than composition: Implications for landscape ecology studies

2015 / SOUS PRESSE

- [7] **Houet T.**, Vacquié L., Sheeren D., (2015) Evaluating the spatial uncertainty of future land abandonment in a mountainous valley (Vicdessos, Pyrenees - France): insights from model parameterization and experiments. *The Journal of Mountain Science*, 12(5), 1095-1112
<http://dx.doi.org/10.1007/s11629-014-3404-7>
- [8] Marti R., Gascoin S., **Houet T.**, Ribière O., Laffly D., Condom T., Monnier S., Schmutz M., Camerlynck C., Tihay J. P., Soubeyroux J. M., and René P. (2015) Evolution of Ossoue Glacier (French Pyrenees) since the end of the Little Ice Age, *The Cryosphere Discuss.*, 9, 2431-2494,
<http://www.dx.doi.org/10.5194/tcd-9-2431-2015>
- [9] Vacquié L., **Houet T.**, Sohl T., Reeker R., Saylor K., (2015) Developing scenarios to project LULC changes in the Pyrenees (France): a model-based approach to assess land abandonment and reforestation dynamics. *The Journal of Mountain Science*, 12(4), 905-920. <http://dx.doi.org/10.1007/s11629-014-3405-6>
- [10] Magliocca N. R., van Vliet J., Brown C., Evans T., **Houet T.**, Messerli P., Messina J., Nicholas K., Ornetsmüller C., Sagebiel J., Schweizer V., Verburg P., Yu Q., (2015) From meta-studies to modeling: Using synthesis knowledge to build broadly applicable process-based land change models, *Environmental Modelling and Software*, 72, 10-20,
<http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.06.009>
- [11] **Houet T.** (2015), Usages de modèles spatiaux pour la prospective, *Revue Internationale de Géomatique*, Vol. 25/1, 123-143.
- [12] Szczypta C., Gascoin S., **Houet T.**, Vigneau C., Fanise P. (2015), Impact of climate and land-use changes on snow cover in a small headwater catchment in the Pyrenees, France, *Journal of Hydrology*, 521, 84-99, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.060>
- [13] Doukari O., Aguejdad R., **Houet T.** (Accepté) SLEUTH* : un modèle d'expansion urbaine pour une approche scénario-dépendante. *Revue Internationale de Géomatique*, sous presse
- [14] **Houet T.**, Galop D., (2015) Book review - Atlas du Parc National Suisse – Les 100 premières années. Recherches scientifiques au Parc national Suisse 99/II. Berne : Edition Haupt. 248 pp. € 59,00. ISBN 978-3-258-07837-3. In: Mountain Research and Development, 35(1). pp. 98-99
<http://dx.doi.org/10.1659/mrd.mm152>

2014

- [15] Masson V., Marchadier C., Adolphe L., Aguejdad R., Avner P., Bonhomme M., Bretagne G., Briotter X., Bueno B., de Munck C., Doukari O., Hallegatte S., Hidalgo J., **Houet T.**, Lemonsu A., Long N., Moine M.P., Morel T., Nologues L., Pigeon G., Salagnac J.L., Zibouche K., (2014). Adapting Cities to

- Climate change: a systemic modelling approach, *Urban Climate*. 10(2), 407-429
<http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2014.03.004>
- [16] Paegelow M., Camacho Olmedo M.T., Mas J.F., **Houet T.**, (2014) Benchmarking of LUCC modelling tools by various validation techniques and error analysis, *Cybergeo*, n°701,
<http://cybergeo.revues.org/26610>
- [17] **Houet T.**, Schaller N., Castets M., Gaucherel C., (2014) Improving the simulation of fine scale landscape changes coupling top-down and bottom-up land use and cover changes rules. *International Journal of Geographical Science*. 28(9), 1848-1876,
<http://dx.doi.org/10.1080/13658816.2014.900775>
- [18] Gaucherel C., Houllier F., Auclair D., **Houet T.** (2014) Dynamic landscape modelling: towards a unifying theory? *Living Reviews in Landscape Research*. 8, <http://www.livingreviews.org/lrlr-2014-2>
- [19] **Houet T.** et F. Gourmelon (2014) La géoprospective – Apport de la dimension spatiale aux approches prospectives, *Cybergéo*, 8 p., <http://cybergeo.revues.org/26194>
- [20] Mas J.F., Kolb M., Paegelow M., Camacho Olmedo MT, **Houet T.** (2014) Modelling Land use / cover changes: a comparison of conceptual approaches and softwares. *Environmental Modelling and Software*, Vol. 51, pp. 94-111, <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.09.010>
- [21] Marti R., Gascoin S., **Houet T.**, Laffly D., René P., (2014) Evaluation du modèle numérique d'élévation (MNE) d'un petit glacier de montagne généré à partir d'images stéréoscopiques Pléiades : cas du glacier d'Ossoue, Pyrénées françaises. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, vol. 208, pp. 57-62

2013

- [22] Paegelow M., Camacho Olmedo M.T., Mas J.M., **Houet T.** and Pontius R.G. (2013). Land change modeling: moving beyond projections. *International journal of Geographical Information Science*, Vol. 27, No. 9, 1691–1695, <http://dx.doi.org/10.1080/13658816.2013.819104>
- [23] Caillaud S., Delmotte S., Kêdowidé C., Mialhe F., Vannier C., Amblard F., Bécu N., Gautreau P., Etienne M. And **Houet T.** (2013) Assessing the influence of social and economical networks on land use and land cover changes: a neutral model based approach, *Environmental Modelling and Software*, vol.45, pp.64-73 <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.11.003>
- [24] Simonneau A., Chapron E., Courp T., Tachikawa K., Le Roux G., Di Giovanni C., Montelica-Heino M., Mazier F., Foucher A., **Houet T.**, Desmet M., (2013) Recent climatic and anthropogenic imprints on lacustrine systems in Pyrenean Mountains inferred from minerogenic and organic clastic supply (Videssos valley, Pyrenees, France). *The Holocene*, Vol. 23, Iss. 12, pp. 1762-1775
<http://dx.doi.org/10.1177/0959683613505340>
- [25] Mimet A., **Houet T.**, Julliard R., Simon L., (2013) Assessing functional connectivity: a landscape approach for handling multiple ecological requirements. *Methods in Ecology and Evolution*. Vol. 4, Iss. 5, 453-463 <http://dx.doi.org/10.1111/2041-210x.12024>

2012

- [26] **Houet T.**, Ribière O., Vacquié L., Vidal F. et Galop D. (2012) Analyse spatiale de l'évolution des modes d'occupation et d'usages des sols sur le Videssos de 1942 à nos jours, *Sud-Ouest Européen*. N°33, pp. 41-56.
- [27] Gourmelon F., **Houet T.**, Voiron C. et Joliveau T. (2012) La géoprospective. Points de vue conceptuels et applicatifs de l'apport du spatial à la prospective. *L'Espace Géographique*, n°2-2012, pp. 97-98
- [28] Vacquié L. et **Houet T.** (2012) Détection et caractérisation des zones humides de montagnes par télédétection : évaluation de l'apport de la Très Haute Résolution Spatiale. *Revue Internationale de Géomatique*
- [29] Gaucherel C., Boudon F., **Houet T.**, Castets M. and Godin C. (2012) Understanding patchy landscape dynamics: Towards a landscape language, *PLoS ONE*, 7(9): e46064. doi:10.1371/journal.pone.0046064

2011

- [30] Mas JF, Kolb M, **Houet T.**, Paegelow M, Camacho Olmedo MT (2011) Eclairer le choix des outils de simulation des changements des modes d'occupation et d'usages des sols. Une approche comparative. *Revue Internationale de Géomatique*, n°3, 405-430.
- [31] **Houet T.** and Pigeon G. (2011), Mapping Urban Climate Zones And Quantifying Climate Behaviors - An Application On Toulouse Urban Area (France), *Environmental Pollution*, Vol 159, Iss 8-9, 2180-2192, <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2010.12.027>

- [32] **Houet T.**, Hubert-Moy L. and Tyssot C., (2011) Fine scale spatialised prospective modelling - a methodological approach. Application to water management in Brittany, *Revue Internationale de Géomatique, European Journal of Geomatics and Spatial Analysis*, vol. 21, pp. 67-93
- [33] Galop D., **Houet T.**, Mazier F., Leroux G. & Rius D., (2011) Grazing activities and biodiversity history in the Pyrénées – the use of paleoecology and historical ecology to provide new insights on high-altitude ecosystems in the framework of a Human-Environment Observatory, *PAGES news*, vol 19, n°2, pp. 53-56

2010

- [34] **Houet T.**, Verburg P. and Loveland T. (2010), Monitoring and modelling landscape dynamics, *Landscape Ecology*, 25(2), 163-167 <http://dx.doi.org/10.1007/s10980-009-9417-x>
- [35] Gaucherel C, Griffon S, Misson L and **Houet T** (2010) Combining process-based models for future biomass assessment at landscape scale, *Landscape Ecology*, 25(2), 201-215, <http://dx.doi.org/10.1007/s10980-009-9400-6>
- [36] **Houet T.**, Loveland T. R., Hubert-Moy L., Napton D., Gaucherel C. and Barnes C. (2010) Exploring subtle land use and land cover changes: a framework based on future landscape studies, *Landscape Ecology*, 25(2), 249-266, <http://dx.doi.org/10.1007/s10980-009-9362-8>

2009

- [37] Gaucherel C and **Houet T** (2009) Preface to the selected papers on spatially explicit landscape modelling: current practices and challenges. *Ecological Modelling*, 220(24), 3477-3480 <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.06.025>

2008

- [38] **Houet T.**, Hubert-Moy L. et Tyssot C., 2008, « Modélisation prospective spatialisée à l'échelle locale : approche méthodologique », *Revue Internationale de Géomatique*, Vol. 18/3, pp. 345-373
- [39] **Houet T.**, Hubert-Moy L., Corgne et Marchand J.-P., 2008, « Approche systémique du fonctionnement d'un territoire agricole bocager », *L'espace géographique*, Vol. 2008-3, pp. 270-286

2007

- [40] **Houet T.** et Gaucherel C., 2007, « Simulation dynamique et spatialement explicite d'un paysage agricole bocager : Validation sur un petit bassin versant breton sur la période 1981-1998 », *Revue Internationale de Géomatique*, vol. 17/3-4, pp. 491-516

2006

- [41] Gaucherel C., Giboire N., Viaud V., **Houet T.**, Baudry J. and Burel F., 2006, "A domain specific language for patchy landscape modelling: the Brittany agricultural mosaic as a case study", *Ecological Modelling*, vol. 194, n°1-3, pp. 233-243
- [42] **Houet T.** and Hubert-Moy L., 2006, "Modelling and projecting land-use and land-cover changes with a cellular automaton considering landscape trajectories : an improvement for simulation of plausible future states", *EARSeL eProceedings*, n°5, pp. 63-76 http://las.physik.uni-oldenburg.de/eProceedings/vol05_1/05_1_houet1.pdf
- [43] **Houet T.**, 2006, « Modélisation prospective de l'occupation du sol en zone agricole intensive : Evaluation par simulations dynamiques de l'impact de l'évolution des exploitations agricoles dans la France de l'Ouest », *Norois*, n°198, 2006/1, pp. 35-47.

2005

- [44] Mercier G., Hubert-Moy L. and **Houet T.**, 2005. "Assessing winter vegetation cover change with fusion of SPOT Vegetation and SPOT XS/Xi images", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 43, n°2, February, pp. 348-354.

2004

- [45] **Houet T.**, Hubert-Moy L., Mercier G., 2004, "A neural network method to model spatial and temporal changes in remote sensing: a case study on the winter land cover in Brittany", *Cybergéo*, n°271 <http://www.cybergeu.eu/index3617.html>

2.2 Direction / Co-direction de numéros spéciaux

- [46] Paegelow M., Camacho Olmedo M.T., Mas J.M., **Houet T.** and Pontius R.G. (2013). Land change modeling: moving beyond projections. *International journal of Geographical Information Science*, Vol. 27, No. 9, http://www.tandfonline.com/toc/tgis20/27/9#.UpMcbid_hdl
- [47] Gourmelon F., **Houet T.**, Voiron C. et Joliveau T. (2012) La géoprospective. Points de vue conceptuels et applicatifs de l'apport du spatial à la prospective. *L'Espace Géographique*, n°2-2012
- [48] **Houet T.**, Verburg P. and Loveland T. (2010), Special issue on Monitoring and modelling landscape dynamics, *Landscape Ecology*, 25(2), Feb 2010, 163-330, <http://www.springerlink.com/content/0921-2973/25/2/>
- [49] **Houet T.** et Gourmelon F. (2014) La géoprospective – Apport de la dimension spatiale aux approches prospectives, *Cybergéo*, 8 p., <http://cybergeo.revues.org/26194>
- [50] Gaucherel C and **Houet T** (2009) Special issue on spatially explicit landscape modelling: current practices and challenges. *Ecological Modelling*, Volume 220, Issue 24, Pages 3477-3658 (24 December 2009) - <http://www.sciencedirect.com/science/journal/03043800/220/24>

2.3 Ouvrages, contributions à ouvrages

- [51] Hidalgo J., **Houet T.** (2015) Îlots de chaleur urbains et stratégies d'adaptation des villes face aux changements climatiques : le cas de Toulouse Métropole. POPSU
- [52] **Houet T.** et Hubert-Moy L., (2013). La géoprospective : approche méthodologique pour la modélisation prospective spatialisée à une échelle fine des changements d'usages des sols, *in* Ouvrage « Paysage et Environnement : de la reconstitution du passé aux modèles prospectifs, Ed. Didier Galop, Presses Universitaires de Franche Comté, pp. 467-487
- [53] Narcy J.-B., Poux X. et **Houet T.**, 2006, Méthode et apports d'une intervention prospective dans une problématique de gestion des eaux: le cas du Blavet, *in* Qualité de l'eau en milieu rural : savoirs et pratiques dans les bassins versants, Ed. P. Mérot, Editions Cemagref, Cirad, Ifremer, Inra, pp. 287-296

2.4 Actes de colloques à comité de lecture

- [54] Grémont M. and **Houet T.**, (2015) Downscaling socio-economic prospective scenarios with a participatory approach for assessing the possible impacts of future land use and cover changes on the vulnerability of societies to mountain risks, *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 17, EGU2015-5914, 2015, Vienne, 13-17 April 2015
- [55] Puissant A., Schlosser A., Gazo A., Malet J.-P., Lissak C., Goutierre M., Peltier A. and **Houet T.**, (2015) Downscaling socio-economic prospective scenarios with a participatory approach for assessing the possible impacts of future land use and cover changes on the vulnerability of societies to mountain risks, *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 17, EGU2015-1, 2015, Vienne, 13-17 April 2015
- [56] Weber C., X Briottet, C. Malet, J. Chamussot, S. Gadal, Y. Deville, **T Houet**, (2015) HYEP - Hyperspectral imagery for Environmental urban Planning, ISPRS
- [57] Ouerghemmi W., S. Gadal, C Weber, X Briottet, C. Malet, J. Chamussot, Y. Deville, **T Houet**, (2015) Morpho-Spectral Recognition of Dense Urban Objects by Hyperspectral Imagery, ISPRS
- [58] **Houet T.** (2013), Usages de modèles spatiaux pour la prospective, Actes du colloque national SAGEO, 23-26 septembre 2013, Brest, France. pp.101-112
http://sageo2013.sciencesconf.org/conference/sageo2013/pages/SAGEO_2013_actes.pdf
- [59] Vacquié L., **Houet T.**, Vigneau C. (2013), Caractérisation des trajectoires d'évolution de l'occupation et de l'usage des sols. Approche multi-scalaire appliquée aux Pyrénées. Actes du colloque national SAGEO, 23-26 septembre 2013, Brest, France. pp. 155-167
http://sageo2013.sciencesconf.org/conference/sageo2013/pages/SAGEO_2013_actes.pdf

- [60] Maestriperi N., **Houet T.**, Paegelow M. (2013), Comparaison de deux approches pour la spatialisation de scénarios prospectifs normatifs. Actes du colloque national SAGEO, 23-26 septembre 2013, Brest, France. pp. 453-466
http://sageo2013.sciencesconf.org/conference/sageo2013/pages/SAGEO_2013_actes.pdf
- [61] Sheeren D., Ribiere O., Raynaud B., Ladet S., Paegelow M., **Houet T.** (2012) Assessing land cover changes in the French Pyrenees since the 1940s: a semi-automatic GEOBIA approach using aerial photographs, Proceedings of the AGILE'2012 conference, 23-27 April, Avignon, France, pp.318-320, ISBN: 978-90-816960-0-5.
- [62] **Houet T.**, Galop D., Mazier F., Sheeren D., Dejoux J-F. (2012) Modelling past and future land cover changes. A multi-scale approach applied in the Pyrenees, Proceedings of the AGILE'2012 conference, 23-27 April, Avignon, France, pp. 336-338, ISBN: 978-90-816960-0-5.
- [63] Aguejda R., Hidalgo J., Doukari O., Masson V., **Houet T.**, (2012). Assessing the influence of long term urban growth on urban climate. 6th International Congress on Environmental Modelling and Software, July 1–5, 2012, at the UFZ in Leipzig, Germany.
http://www.iemss.org/iemss2012/proceedings/F3_0527_Aguejda_et_al.pdf
- [64] Mas, J.F., Kolb M., **Houet T.**, Paegelow M. y Camacho Olmedo M.T., (2011) Una comparación de programas de modelación de cambios de cobertura / uso del suelo Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE, pp. 5801-5808.
- [65] Hubert-Moy L., Corgne S., **Houet T.** et Tyssot C., 2006, « Modélisation prédictive et prospective des changements de l'occupation des sols », Colloque international « Interactions Nature-Sociétés : Analyse et modèles », UMR LETG 6554 CNRS, La Baule, 3-6 mai 2006, 6 p.
- [66] **Houet T.**, Hubert-Moy L., Mercier G. and Gouery P., July 2003, "Estimation and Monitoring of Bare Soil/Vegetation Ratio with SPOT Vegetation and HRVIR", *IEEE International Geoscience And Remote Sensing Symposium*, July, Toulouse, France, Vol. 5, pp. 3248 – 3250

2.5 Communications orales

2.5.1 Conférencier invité

- [67] **Houet T.** (2015), Villes futures et climat urbain : quels leviers pour l'adaptation ? Colloque de prospective régionale sur les changements climatiques – Région Nord-Pas-de-Calais, Lille, 4 avril 2015.
- [68] **Houet T.** (2015), MODE RESPYR : MODELisations Rétrospective et prospective des changements d'occupation des Sols dans les PYRénées. Colloque GESSOL – Gestion durable des sols, 28-30 avril 2015
- [69] **Houet T.**, (2014), Modélisation prospective pour les OHM: principes et perspectives à partir de premiers résultats sur le Haut-Videssos, Séminaire du ROHM, Montpellier, 18-19 juin 2014.
- [70] **Houet T.**, (2014), Usages de modèles spatiaux en prospective : objectifs, avantages et limites, Colloque du réseau Payote « Modélisation de paysages agricoles pour la simulation et l'analyse de processus », Paris 16-17 septembre 2014
- [71] **Houet T.**, Portier T., Plainecassagne L., Barcet H., Vidal F., Burens A., Mazier F., Loyau A., Schmeller D., Leroux G., Chapron E et Galop D. (2011) OHM Haut-Videssos : Informations hétérogènes et infrastructures de données spatiales, *Séminaire « Données d'observation, informations environnementales hétérogènes : archivage, catalogage, diffusion. Quels enjeux pour les observatoires scientifiques pluridisciplinaires? »*, IUEM, Brest, 24 mai 2011
- [72] **Houet T.**, (2007), « Changements récents et simulation prospective des usages des sols à une échelle locale », Séminaire scientifique CESBIO UMR 5126, 30 novembre 2007
- [73] **Houet T.**, (2007), « La géo-prospective: une approche générique pour la construction de scénarios prospectifs à une échelle fine ? », Journée Convergence de la MSH de Toulouse – Axe 4 Modélisation, Simulation, Spatialisation, 12 novembre 2007, Maison de la Recherche – Université Toulouse 2.

2.5.2 Colloques

Communication orale (Co) – Poster (Po)

2015 / ACCEPTEE

- [74] Houet & al (2015) MODE RESPYR : MODELisations Rétrospective et prospectivE des changements d'occupation des Sols dans les PYRénées. Colloque ANR « Faire face aux changements climatiques : les apports de la recherche collaborative sur projets », 6 juillet 2015, Paris. **(Po)**
- [75] Masson V., Marchadier C., Adolphe L., Aguejda R., Avner P., Bonhomme M., Bretagne G., Briotter X., Bueno B., de Munck C., Doukari O., Hallegate S., Hidalgo J., Houet T., Lemonsu A., Long N., Moine M.P., Morel T., Nologues L., Pigeon G., Salagnac J.L., Zibouche K., (2015). Adapting Cities to Climate change: a systemic modelling approach, ICUC 9th International Conference on Urban Climate, Toulouse, 20-24th July. **(Po)**
- [76] Grémont M. and **Houet T.**, (2015) Downscaling socio-economic prospective scenarios with a participatory approach for assessing the possible impacts of future land use and cover changes on the vulnerability of societies to mountain risks, Geophysical Research Abstracts, Vol. 17, EGU2015-5914, 2015, Vienne, 13-17 April 2015 **(Co)**
- [77] Puissant A., Schlosser A., Gazo A., Malet J.-P., Lissak C., Goutier M., Peltier A. and **Houet T.**, (2015) Downscaling socio-economic prospective scenarios with a participatory approach for assessing the possible impacts of future land use and cover changes on the vulnerability of societies to mountain risks, Geophysical Research Abstracts, Vol. 17, EGU2015-1, 2015, Vienne, 13-17 April 2015 **(Po)**
- [78] **Houet T.**, Vacquie L., Sheeren D., (2015) Evaluating the spatial uncertainty of future land abandonment in a mountainous valley (Vicdessos, Pyrenees - France): insights from model parameterization and experiments. *Perth III: Mountains of Our Future Earth*, Perth, Scotland, 4th-8th October 2015. **(Co)**
- [79] Vacquie L., **Houet T.**, Sohl T., Reeker R., Saylor K., (2015) Developing scenarios to project LULC changes in the Pyrenees (France): a model-based approach to assess land abandonment and reforestation dynamics. *Perth III: Mountains of Our Future Earth*, Perth, Scotland, 4th-8th October 2015. **(Co)**
- [80] **Houet T.** (2015), Usages de modèles spatiaux en prospective : avantages et limites dans une démarche d'aide à la décision, *52ème colloque de l'ASRDLF*, Montpellier, 7-9 Juillet 2015. **(Co)**
- [81] Vacquie L., **Houet T.**, Sohl T., Reeker R., Saylor K., (2015) Utilisation d'un modèle spatialement explicite (FORE-SCE) pour simuler les changements d'occupation et d'usages des sols dans les Pyrénées française. *52ème colloque de l'ASRDLF*, Montpellier, 7-9 Juillet 2015. **(Co)**
- [82] Vacquie L., **Houet T.**, Sheeren D. (2015) Adapting grazing practices to limit the reforestation of mountainous summer pastures: a process-based approach (SHIELD). *Perth III: Mountains of Our Future Earth*, Perth, Scotland, 4th-8th October 2015. **(Po)**
- [83] Marti R., S. Gascoin, **T. Houet**, D. Laffly, O. Ribiere, T. Condom, S. Monnier, M. Schmutz, C. Camerlynck, J.P. Tihay, J.M. Soubeyroux, P. René (2015) Evolution of Ossoue glacier (Pyrenees, southwest Europe) since the end of the Little Ice Age – IUGG - 22 June - 2 July 2015, Pragues **(Co)**
- [84] Marti R., S. Gascoin, **T. Houet**, D. Laffly, P. René (2015) A new inventory of the glaciers in the Pyrenees (southwest Europe) – IUGG - 22 June - 2 July 2015, Pragues **(Po)**
- [85] Szczypta C., Gascoin S., **Houet T.**, Fanise P. (2015) Impact of climate and land-use changes on snow cover in a small headwater catchment in the Pyrenees, France. IUGG - 22 June - 2 July 2015, Pragues

2014

- [86] Vacquie L., Sheeren D., **Houet T.**, (2014) Identifying the leverages of grazing practices to limit the encroachment of mountainous summer pastures using an agent-based model (SHIELD), Global Fair and Workshop on Long-Term Observatories of Mountain Social-Ecological Systems, Reno (USA), 16-19th July 2014. **(Co)**
- [87] **Houet T.**, Galop D., Vacquie L., Vidal F., Sheeren D., (2014) Monitoring LUCC in the Human-Nature mountain observatory of the Haut-Vicdessos (Pyrenees, France) from the 1940s using aerial photographs, Global Fair and Workshop on Long-Term Observatories of Mountain Social-Ecological Systems, Reno (USA), 16-19th July 2014. **(Co)**
- [88] Gascoin S., Szczypta C., **Houet T.**, Hagolle O., Dejoux JF., Vigneau C., Fanise P., (2014) Effects of projected land cover and climate changes on snow cover in the Vicdessos mountain observatory - Application on the Bassiès valley (Pyrenees, France), Global Fair and Workshop on Long-Term Observatories of Mountain Social-Ecological Systems, Reno (USA), 16-19th July 2014 **(Co)**

- [89] Vacquié L., Sohl T., Reker R., Sayler K., **Houet T.** (2014) Using the FORE-SCE model to project land-cover changes in the Pyrenees mountains (France). Global Land Project open science meeting: Land transformations: between global challenges and local realities. 23-25 mars, Berlin, Allemagne. **(Co)**
- [90] **Houet T.**, Mazier F., Sheeren D., Dejoux J-F., Vacquié L., Ducrot D., Hagolle O., Galop D. (2014) Modeling past and future land cover changes in the Pyrenean Mountains: A multi-scale / multidisciplinary approach. Global Land Project open science meeting: Land transformations: between global challenges and local realities. 23-25 mars, Berlin, Allemagne. **(Po)**
- [91] Mazier F., Galop D., **Houet T.** (2014) Differences in time and space in vegetation patterning of the Pyrenean Mountains: the impact of past land-use change on floristic biodiversity. Global Land Project open science meeting: Land transformations: between global challenges and local realities. 23-25 mars, Berlin, Allemagne. **(Po)**
- [92] **Houet T.**, Gaucherel C., Castets M., Schaller N. (2014) Combining process-based and optimization approaches for simulating fine scale agricultural LUCC. Global Land Project open science meeting: Land transformations: between global challenges and local realities. 23-25 mars, Berlin, Allemagne. **(Po)**
- [93] Vacquié L., **Houet T.**, Sheeren D. (2014) An agent-based model to simulate encroachment dynamics in Pyrenean agro-pastoral ecosystems Global Land Project open science meeting: Land transformations: between global challenges and local realities. 23-25 mars, Berlin, Allemagne. **(Po)**
- [94] **Houet T.**, Doukari O., Aguejda R., Clarke K. (2014) Simulating backcasting futures of urban growth: the SLEUTH* model. Global Land Project open science meeting: Land transformations: between global challenges and local realities. 23-25 mars, Berlin, Allemagne. **(Po)**
- [95] **Houet T.** (2014) How validating future LUCC based on scenario-based modeling approach?. Global Land Project open science meeting: Land transformations: between global challenges and local realities. 23-25 mars, Berlin, Allemagne. **(Po)**
- [96] Ducrot D., Dejoux J.-F., Kadiri M., Masse A., **Houet T.** (2014) Natural vegetation land cover method in mountain context and wide area with multitemporal satellite images, 5th Workshop of the EARSeL Special Interest Group on Land Use and Land Cover - Frontiers in Earth Observation for Land System Science, Berlin, 17-18th march 2014. **(Po)**

2013

- [97] **Houet T.** (2013) Usages de modèles spatiaux pour la prospective, Actes du colloque national SAGEO, 23-26 septembre 2013, Brest, France. **(Co)**
- [98] Grandjean G., Bernardie S., Malet J.-P., Puissant A., **Houet T.**, Fort M., Pierre D., (2013) SAMCO: Society Adaptation for coping with Mountain risks in a global change Context, EGU general Assembly 2013, Vienne, Autriche. **(Co)**
- [99] Grandjean G., Bernardie S., Malet J.-P., Puissant A., **Houet T.**, Fort M., Pierre D., (2013) SAMCO: Adaptation de la société aux risques en montagne dans un contexte de changement global, Journées Aléas Gravitaires, France. **(Co)**
- [100] Bernardie S., Grandjean G., Puissant A., Malet J.-P., **Houet T.**, Berger F., Fort M., Pierre D., (2013) Society Adaptation for coping with Mountain risks in a global change Context, 8th IAG International Conference on Geomorphology, France. **(Co)**
- [101] Vacquié L., **Houet T.**, Vigneau C. (2013), Caractérisation des trajectoires d'évolution de l'occupation et de l'usage des sols. Approche multi-scalaire appliquée aux Pyrénées. Actes du colloque national SAGEO, 23-26 septembre 2013, Brest, France. **(Co)**
- [102] Maestripiéri N., **Houet T.**, Paegelow M. (2013) Comparaison de deux approches pour la spatialisation de scénarios prospectifs normatifs. Actes du colloque national SAGEO, 23-26 septembre 2013, Brest, France. **(Co)**
- [103] **Houet T.**, Gaucherel C., Schaller N., Castets M., (2013), Simulation contrôlée des changements d'occupation des sols en milieu agricole intensif à une échelle fine. Couplage d'approches d'optimisation et à base de processus, Atelier Représentation et Raisonnement sur le Temps et l'Espace, Colloque national SAGEO, 23 septembre 2013, Brest, France. **(Co)**
- [104] Marti R., Ribière O., **Houet T.**, Gascoin S., Laffly D., René P., (2013) Ossoue glacier mass balance reconstruction : 1924-2012. *17th Alpine Glaciology Meeting*, Grenoble, France. **(Co)**
- [105] Szczypta, C., Gascoin, S., **Houet, T.**, Fanise, P. Impact of climate versus land-use changes on snow cover in Bassiès, Pyrenees. (2013) International Snow Science Workshop Grenoble, France. **(Co)**

- [106] Simonneau A., Chapron E., Courp T., Tachikawa K., Le Roux G., Di Giovanni C., Montelica-Heino M., Mazier F., Foucher A., **Houet T.**, Desmet M., (2013) Conséquences du climat holocène et des activités hydroélectriques modernes sur les écosystèmes lacustres : comparaison inter-sites (Observatoire Haut-Videssos, France), 14e congrès de français de sédimentologie. (Co)

2012

- [107] Marchadier C., **Houet T.**, Bretagne G, (2012) How to define and assess city adaptation strategies? ICUC8 - 8th International Conference on Urban Climate – ICUC 8 and 10th Symposium on the Urban Environment, August 6-10, 2012, Dublin, Ireland. (Co)
- [108] Moine M.-P., Marchadier C., Morel T., Masson V., Lemonsu A., Avner P., Doukari O., Viguié V. and **Houet T.**, (2012) A multidisciplinary modeling platform to draw possible futures of urban climate, ICUC8 - 8th International Conference on Urban Climate – ICUC 8 and 10th Symposium on the Urban Environment, August 6-10, 2012, Dublin, Ireland. (Po)
- [109] Masson V., A. Lemonsu, G. Pigeon, C. Marchadier, B. Bueno, J. Hidalgo, C. De Munck, V. Viguié, S. Hallegatte, L. Adolphe, M. Bonhomme, K. Zibouche, J.-L. Salagnac, T. Houët, R. Aguejdad, G. Bretagne, L. Nologues, N. Long, T. Morel, M.-P. Moine and X. Briottet, (2012) Adapting Cities to Climate change: a systemic modelling approach, ICUC8 - 8th International Conference on Urban Climate – ICUC 8 and 10th Symposium on the Urban Environment, August 6-10, 2012, Dublin, Ireland. (Co)
- [110] Aguejdad R., Hidalgo J., Doukari O., Masson V., **Houet T.**, (2012). Assessing the influence of long term urban growth on urban climate. 6th International Congress on Environmental Modelling and Software, July 1–5, 2012, at the UFZ in Leipzig, Germany. (Co)
- [111] Sheeren D., Ribiere O., Raynaud B., Ladet S., Paegelow M., **Houet T.** (2012) Assessing land cover changes in the French Pyrenees since the 1940s: a semi-automatic GEOBIA approach using aerial photographs, Proceedings of the AGILE'2012 conference, 23-27 April, Avignon, France, pp.318-320, ISBN: 978-90-816960-0-5. (Po)
- [112] **Houet T.**, Galop D., Mazier F., Sheeren D., Dejoux J.-F. (2012) Modelling past and future land cover changes. A multi-scale approach applied in the Pyrenees, Proceedings of the AGILE'2012 conference, 23-27 April, Avignon, France, pp. 336-338, ISBN: 978-90-816960-0-5. (Po)

2011

- [113] Mas, J.F., Kolb M., **Houet T.**, Paegelow M. y Camacho Olmedo M.T., (2011) Una comparación de programas de modelación de cambios de cobertura / uso del suelo Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE (Co)
- [114] Aguejdad R., **Houet T.**, Bretagne G., Lefevre G., Adolphe L., Viguié V., Masson V., Marchadier C. (2011) La croissance urbaine à l'horizon 2100 : de la rétrospective à la modélisation prospective. Application à l'aire urbaine de Toulouse, *Colloque « La modélisation de la ville : du modèle au projet urbain »*, 23-24 février 2011, ENPC, Marne la Vallée, France. (Co)
- [115] Doukari O., Aguejdad R., **Houet T.**, (2011) Simulation de l'expansion urbaine : vers un modèle orienté scénarios. Application à l'aire urbaine de Toulouse. *Colloque "Images & Villes"*, 12 et 13 décembre 2011, Université Paris-Diderot, Paris 13. (Co)
- [116] Aguejdad R., **Houet T.**, Bretagne G., Luc Adolphe L., Viguié V., Lefevre G., Marchadier C., Masson V., (2011) La croissance urbaine à l'horizon 2100 : de la rétrospective à la modélisation prospective, application à l'aire urbaine de Toulouse. Colloque : "La modélisation de la ville : du modèle au projet urbain", 23-24 février 2011, Marne la Vallée. (Co)

2010

- [117] Gaucherel C., V. Martinet, L. Bamière, D. Shereen, A. Gibon, A. Joannon, M. Castellazzi, H. Boussard, F. Barraquand, P. Inchausti, E.G. Lazrak, J.F. Mari, N. Schaller, **T. Houet**, V. Bretagnolle, (2010) An integrated modelling approach to understand effects of landscape dynamics on biodiversity. *LANDMOD 2010 International conference on Integrative landscape modelling*, Feb 3rd-5th, Montpellier, France. (Co)
- [118] Caillault S., Delmotte S., Kêdowidé C., Mialhe F., Vannier C., Amblard F., Bécu N., Gautreau P., **Houet T.** and Etienne M., (2010) Assessing the influence of social and economical networks on land use and land cover changes: a neutral model based approach, *MAPS2 conference: Teaching of/with agent-based models in social sciences*, April 8th-9th, Paris, France. (Co)

[119] Houet T. and Pigeon G. (2010) Linking urban landscape and urban heat islands using remotely sensed techniques and in situ measurements", *International Symposium Urban Environmental Pollution Overcoming Obstacles to Sustainability and Quality of Life*, Boston, 20-23 June 2010, USA. (Co)

2008

[120] Aguejda R. and Houet T., (2008) Modeling of urban sprawl using the Land Change Modeler on a French metropolitan area (Rennes): foresee the unpredictable, *International Symposium "Spatial landscape Modelling: from dynamic approaches to functional evaluations"*, Toulouse, 3-5 June 2008, France. (Co)

2007

[121] Gaucherel C. et Houet T., (2007) Le langage du paysage : illustration sur la gestion des prairies pour la conservation de la biodiversité, *Colloque IALE France « Le paysage à l'interface des activités agricoles et forestières », 4^{ème} journées de l'association française d'Ecologie du Paysage*, Toulouse, 20-23 novembre 2007, France. (Co)

2006

[122] Hubert-Moy L., Corgne S., Houet T. et Tyssot C., (2006), Modélisation prédictive et prospective des changements de l'occupation des sols, *Colloque international « Interactions Nature-Sociétés : Analyse et modèles »*, UMR LETG 6554 CNRS, La Baule, 3-6 mai 2006, 6 p. (Co)

[123] Houet T., (2006), Approche méthodologique pour une modélisation prospective spatialisée à une échelle fine : application à la gestion de l'eau en paysage agricole bocager, *Colloque du Réseau Thématique Pluridisciplinaire du CNRS « Paysage et Environnement : de la reconstitution du passé au modèles prospectifs »*, Chilhac, France, 27-30 Sept. (Co)

2005

[124] Houet T., Gaucherel C. et Giboire N., (2005) Validation d'une simulation dynamique et spatialement explicite d'un paysage agricole bocager : le cas d'un petit bassin versant breton sur la période 1981-1998, 26-28 Janvier, Besançon. (Co)

2004

[125] Houet T. and Hubert-Moy L., (2004) Modelling and projecting land-use and land-cover changes with a cellular automata in considering landscape trajectories: an improvement for plausible future states, Dubrovnik, Croatia, 28-29 May http://www.isn-oldenburg.de/projects/earsel-land-abstracts/17_ab_B_Houet.html (Co)

[126] Baudry J., Dupont C., Thenail C., Viaud V. et Houet T., 2004, Aménagement du paysage et pratiques agricoles : quelles combinaisons dans la gestion des bassins versants ?, *Chambre Régionale de Bretagne*, pp. 117-124. (Co)

[127] Poux X., Narcy J.-B. et Houet T., (2004) La conception de scénarios de gestion des eaux à l'échelle d'un bassin versant : enjeux méthodologiques et pratiques. Le cas du Blavet, *Colloque BV Futur Savoirs et savoir-faire sur les bassins versants*, Chambre Régionale de Bretagne, pp. 295-296. (Co)

[128] Clément B., Hubert-Moy L., Houet T. et Aidoud A., (2004) Délimiter pour évaluer et spatialiser les fonctions des zones humides de fonds de vallées, *Colloque BV Futur Savoirs et savoir-faire sur les bassins versants*, Chambre Régionale de Bretagne, pp. 183-184. (Po)

[129] Houet T., Guérillot C. et Quêté Y., (2004) Les SIG, outils de diagnostic et de gestion de territoires agricoles. Application aux bassins versants de la Chèze-Canut et des Drains de Rennes 1, *Colloque BV Futur Savoirs et savoir-faire sur les bassins versants*, Chambre Régionale de Bretagne, pp. 173-174. (Po)

2003

[130] Houet T., Hubert-Moy L., Mercier G. and Gouery P., (2003) Estimation and Monitoring of Bare Soil/Vegetation Ratio with SPOT Vegetation and HRVIR, *IEEE International Geoscience And Remote Sensing Symposium*, July, Toulouse, France. (Co)

[131] Houet T., Hubert-Moy L. et Mercier G., (2003) Modélisation du changement d'échelles en télédétection par une méthode neuronale – Application à l'occupation hivernale des sols en Bretagne, *Colloque Theoquant 2003*, 20-21 Février 2003, Besançon (Co)

2.5.3 Séminaires

- [132] Gascoin S., Szczypta C., **Houet T.** (2014) Quel futur pour la neige dans les Pyrénées ? Impacts croisés du changement climatique et du changement d'occupation des sols. Séminaire Département de Géographie de l'Université du Québec à Trois-Rivières, Juillet. (Invité)
- [133] Gascoin S., **Houet T.**, Szczypta C., Fanise P., (2014) Impacts croisés du changement climatique et du changement d'occupation des sols sur l'enneigement ans le Haut-Vicdessos, Séminaire de restitution de l'OHM, Toulouse, 8 décembre 2014
- [134] Vacquié L. et **Houet T.** (2012) Cartographie des zones humides de montagne par télédétection : évaluation des potentialités des images à THRS – application sur la vallée du Haut-Vicdessos (Pyrénées). Séminaire « Approches méthodologiques en géomatique pour la cartographie de la Trame Verte et Bleue (TVB) » - GDR MAGIS, 24 janvier 2012, AgroParistech Paris.
- [135] **Houet T.** (2011) La géoprospective en question – Un regard sur les méthodes mobilisables pour la géoprospective : Apports, Approches, Limites, Perspectives et Réciproque, *Séminaire « La Géoprospective : Apports de la dimension spatiale aux recherches prospectives »*, Ile sainte-Marguerite, Cannes, 4-5 avril 2011
- [136] Aguejdad R., Viguié V., Doukari O., **Houet T.**, Avner P., (2011) Etalement urbain et géoprospective : apports et limites des modèles de spatialisation. Application à l'aire urbaine de Toulouse. *Séminaire « La géoprospective : Apports de la dimension spatiale aux recherches prospectives »*, 4 et 5 Avril 2011, Nice-Cannes.
- [137] **Houet T.**, Hubert-Moy L. et Vannier C., 2006, « Recensement des pratiques agricoles par télédétection », Séminaire du programme ADD COPT-OTPA, Rennes, 14-15 novembre 2006
- [138] **Houet T.** et Hubert-Moy L., 2006, « Potentialités et limites de la télédétection au suivi des pratiques agricoles territorialisées : cas de l'enrésinement dans le PNR de Millevaches en Limousin », Séminaire du programme ADD COPT-OTPA, Eymoutiers, 15-16 juin 2006
- [139] **Houet T.**, 2006, "Modeling and projecting landcover changes in French and US agricultural areas", Seminar at the USGS EROS National Data Center, 19th of august, Sioux Falls, South Dakota, USA <http://landcover.usgs.gov/seminararchive.php>

2.6 Vulgarisation

2.6.1 Conférencier invité séminaires

- Houet T.** (2014) Usages des modèles spatiaux en prospective: objectifs, avantages, limites. Workshop Occupation des sols de la Zone Atelier Environnementale Urbaine de Strasbourg (ZAEUS), 1er juillet 2014, Strasbourg. (Invité)
- Houet T.** et al., (2014) Villes futures et climat urbain Quels leviers pour l'adaptation? Synthèse du projet ACCLIMAT. Fédération Nationale des Agences d'Urbanisme, Séminaire « Observer l'environnement en Ville : ressources et nuisances », Paris, 4 décembre 2014
- Houet T.**, Hidalgo J., (2014) Ilots de chaleur urbains Stratégies d'adaptation des villes face aux changements climatiques. Toulouse Métropole. POPSU Europe, Barcelone, 27-28 nov. 2014
- Houet T.**, (2007) « Approche prospective spatialisée à l'échelle locale : outil d'aide à la gestion de l'eau », Séminaire de Master 1 et 2, Université de Lyon 2, 6 mars 2007
- Houet T.**, (2006) « Scénarios prospectifs spatialisés à l'échelle locale : application à la mise en place du SAGE Blavet dans les Côtes d'Armor », Séminaire à la Chambre d'Agriculture des Côtes d'Armor, Plérin, 11 mai 2006

2.6.2 Interventions publiques

- Houet T.**, 2014, Evolution des paysages du Vicdessos : du passé au futur, Intervention dans l'école Primaire d'Auzat-Vicdessos (09).
- Szczypta, S Gascoin, **Houet T.**, (2013) Quel avenir pour la neige dans les Pyrénées Ariégeoises ? Rencontres scientifiques du PNR Ariège, St Giron, 8 novembre 2013.
- Houet T.**, 2012, Evolution des paysages du Vicdessos entre 1942 et 2003, Intervention dans l'école Primaire d'Auzat-Vicdessos (09).
- Houet T.**, Participation à la Manifestation UniverCité, « Du Satellite à la cartographie de Toulouse en 2050 » - Collège de la Reynerie – Classe de 6ème, Octobre 2011.

2.6.3 Publications

- [140] **Houet T.** et René P. (2014) Evolution récente du glacier d'Ossoue (Hautes-Pyrénées), *La météorologie*, n° 84, p. 4-5
- [141] Wagner M.J., **Houet T.**, Koopman D., O'neill Dunne J. (2013) Classified Success, *The American surveyor*, vol. 10, n°3
http://www.amerisurv.com/PDF/TheAmericanSurveyor_Wagner-ClassifiedSuccess_Vol10No3.pdf
- [142] Wagner M.J., **Houet T.**, Koopman D., O'neill Dunne J. (2013) Planet-Action empowers Work-Study success, *Earth Imaging Journal*, Iss. Jan-Feb, <http://eijournal.com/2013/planet-action-empowers-work-study-success>
- [143] Kirtland S., **Houet T.**, Koopman D., O'neill Dunne J. (2013) Action for our planet, *Technology & More*, Iss. 2013-1, <http://www.trimble.com/technologyandmore/i1-2013/>
- [144] **Houet T.**, Ribière O., Vacquié L., Vidal F. et Galop D. (2013), La fermeture des paysages dans les Pyrénées depuis les années 1940, Ariège, terre de science. Coll. Petit Illustré, n°19 ; pp. 20-21
- [145] Masson V., A. Lemonsu, G. Pigeon, C. Marchadier, B. Bueno, J. Hidalgo, C.De Munck, V.Viguié, S. Hallegatte, L. Adolphe, M. Bonhomme, K. Zibouche, J.-L. Salagnac, **T. Houet**, R. Aguejda, G. Bretagne, L. Nolorgues, N. Long, T. Morel, M.-P. Moine and X. Briottet, (2012) Metropolitan meteorology, *Research Media*, 3 p.
- [146] **Houet T** (2009), Mutations de l'agriculture et politiques de l'eau en région Bretagne, *Géoconfluences*, <http://geoconfluences.ens-lsh.fr/doc/transv/devdur/DevdurScient9.htm>
- [147] **Houet T.**, Narcy J-B. et Poux X. (2009) Apport d'une démarche prospective aux échelles locale et régionale pour la gestion de l'eau à long terme (2030) : le cas du bassin versant du Blavet (Bretagne, France), *Géoconfluences*, <http://geoconfluences.ens-lsh.fr/doc/transv/devdur/DevdurScient10.htm>
- [148] **Houet T.**, Occupation des sols et gestion de l'eau : Modélisation prospective en paysage agricole fragmenté, 2008, *Le monde des cartes*, 198, pp. 59-64

3 Résultats scientifiques

Prospective environnementale et géographie : Apports de la dimension spatiale

3.1 Contexte, thématiques et stratégies de recherche

L'exploration du futur de façon quantitative constitue un enjeu scientifique. En effet, si la prospective ambitionne d'éclairer l'action présente à la lumière des futurs possibles (Godet 1986 ; Hatem 1993), elle le fait la plupart du temps de façon qualitative à l'aide de récits. La dimension spatiale vue au travers la capacité à localiser et à quantifier, tant de façon rétrospective à l'aide de la télédétection, que de façon exploratoire à l'aide de modèles de simulation, peut contribuer à apporter des connaissances particulièrement utiles pour aider les acteurs à prendre des décisions quant à l'avenir de leur territoire. Ainsi, l'apport d'éléments tangibles, localisés, quantifiés et comparables à l'aide de ces modèles, permettant d'évaluer avec précision les conséquences possibles des stratégies (ou de l'absence de stratégies) de gestion, est supposé plus efficace pour définir et justifier des choix d'aménagement et de gestion environnementale à moyen et long terme que s'ils n'étaient pas utilisés. Les interactions entre les actions anthropiques et les milieux sont complexes. L'exploration du futur, à travers la prospective environnementale permet de les prendre en compte, certes de façon probablement incomplète mais suffisante pour apporter des connaissances utiles pour éclairer la prise de décision. En effet, la modélisation de la complexité constitue le paradigme de la prospective. La construction d'un scénario prospectif repose sur la prise en compte de l'ensemble des facteurs (sociaux, économiques, géographiques...) et de leurs interactions dans l'espace au cours d'une période définie au préalable. La complexité, c'est la « recherche d'une possibilité de penser à travers la complication (c'est-à-dire les inter-rétroactions innombrables), à travers les incertitudes et à travers les contradictions » (Morin 1990). Le paradigme de la complexité permet de combiner imprévisibilité et prédictibilité et fonde donc la démarche prospective (Piveteau 1995).

La prise en compte de la dimension spatiale (au sens quantitatif) en prospective, est relativement récente (Kok et al. 2004 ; Alcamo 2008 ; Houet et Gourmelon 2014) et reste délicate, faisant appel à des compétences diverses en géomatique et télédétection pour la reconstitution des trajectoires passées, mais également en modélisation. L'utilisation de modèles, considérés ici comme des modèles spatiaux dynamiques et spatialement explicites, peut s'avérer particulièrement intéressante pour explorer le futur. Depuis les années 2000s, de nombreuses études ont ainsi été réalisées (par exemple Veldkamp and Lambin 2001 ; Lambin and Geist 2006). Bien évidemment, il ne s'agit pas de faire de la science divinatoire : il n'y a pas de modèles parfait. Il ne s'agit pas non plus de faire des prédictions. Ainsi, l'usage de modèles en prospective doit-il être considéré avec prudence, suivant des protocoles adaptés selon les besoins. Ce mémoire propose de faire un bilan sur cette question dans un contexte où la demande sociale en matière de prospective est grandissante.

Une forte demande sociale en matière de prospective

Les changements d'occupation et d'usage des sols survenus au cours de la seconde moitié du 20^{ème} siècle, provoqués par des facteurs anthropiques et naturels, ont des conséquences socio-

économiques, environnementales et écologiques reconnues (Barbault et al. 2004 ; Ramankutty et al. 2006). Ce contexte dynamique et incertain nous fait prendre conscience de notre vulnérabilité, des risques et de l'incertitude qui pèsent sur nos sociétés contemporaines. Cette prise de conscience, attestée par l'apparition de nouvelles notions telles que la durabilité, la résilience ou l'adaptation, et le besoin de lignes directrices, manifesté par la société civile, renouvellent les questions de recherche. Pour les aborder, l'innovation est de règle au niveau notamment des démarches, des méthodes et des outils à mobiliser pour comprendre les processus complexes en jeu, les dynamiques passées et actuelles, et surtout envisager des futurs possibles de manière à anticiper certaines situations souhaitables ou non dans le but d'éclairer l'action présente (Godet 1986).

La prospective, à travers le rapport Meadows (Meadows et al. 1972), a largement contribué à cette prise de conscience, et est utilisée, en tant que démarche, au sein des procédures actuelles visant une planification à moyen ou long terme des territoires. En parallèle, les méthodes et outils permettant d'analyser les changements notamment spatiaux se sont développés de manière significative au cours des deux dernières décennies, accordant à la dimension spatiale une place croissante dans l'exercice de prospective. Ainsi, sont apparus les notions de prospective territoriale (Datar 1971a, 1971b), puis de géoprospective ou prospective spatialisée (Houet 2006a, 2006b ; Voiron 2006 et 2012 ; Houet et Gourmelon 2014).

Paradoxalement, si la demande sociale est effectivement forte pour mieux prendre en compte le futur d'un territoire dans la planification d'aujourd'hui, la prospective présente un certain nombre de limites. La principale est liée au fait que, parmi l'ensemble des outils qu'elle rassemble, peu de méthodes offrent la possibilité de prendre en compte les spécificités des territoires, en terme d'organisation, d'usages ou encore de gouvernance, dans le processus de construction de futurs possibles de ce territoire ; c'est-à-dire de considérer la dimension spatiale comme une dimension essentielle d'un point de vue méthodologique dans l'exercice prospectif, au même titre que les dimensions économique, démographique ou encore historique (Hatem 1993 ; Houet et al. 2008, 2010). Si la prospective territoriale (Delamarre 2002) y pallie en partie, la dimension spatiale n'intervient qu'en tant que support de localisation et de répartition de phénomènes ou d'enjeux. La géoprospective, en tant que posture, peut être assimilée à une forme particulière de prospective, née de l'interdisciplinarité entre géographie, modélisation et prospective (Houet 2006a ; Hubert-Moy et al. 2006 ; Voiron 2006). Elle a ainsi l'objectif d'appréhender le territoire dans toute sa complexité, c'est-à-dire d'identifier et de modéliser des interactions spatiales Hommes-Milieus (multi-échelles, voisinages, simulations ...) que la prospective seule ne permet pas (Gourmelon et al, 2008).

Prospective et géographie : une convergence implicite et un enjeu de recherche

Une convergence implicite entre géographie et prospective s'est opérée avec la dimension spatiale comme dénominateur commun de représentation de la complexité. Dès 1971, la géographie s'est intéressée à l'exploration du futur à long terme (Phlipponneau, 1971). Dans le même temps, la prospective territoriale émerge dans le domaine de l'aménagement et de la planification du territoire, portée par la DATAR (Datar 1971a, 1971b), illustrant cette convergence. La prospective territoriale est définie comme ayant pour objet de définir des faits et des territoires, porteurs d'avenir, dans une perspective opérationnelle programmatique (Delamarre, 2002). La dimension spatiale prend une part importante, sans pour autant être centrale, l'espace étant envisagé plus comme un support pour représenter des phénomènes, notamment socio-économiques, que de façon systémique, tenant compte des interactions spatiales et des jeux d'échelles imbriquées (Emsellem et al. 2012). Par la suite, les développements de méthodes et d'outils suivant le paradigme de l'analyse spatiale ont également contribué à renforcer cette convergence. L'analyse systémique, les méthodes de formalisation de la complexité et de simulation ont ainsi permis de renforcer la place de la dimension spatiale dans le processus prospectif (Voiron, 2012 ; Emsellem et al., 2012).

Parallèlement, les travaux réalisés au sein de la communauté internationale LUCC (Land Use and Cover Changes) ont largement contribué au développement de modèles de simulation spatiale en se focalisant notamment sur les changements d'occupation et d'usages de sols à diverses échelles (Lambin et Geist 2006). Les modèles constituent les méthodes et outils fondamentaux privilégiés pour intégrer et simuler des dynamiques spatio-temporelles des types d'occupation et d'usages du sol de façon dynamique et spatialement explicite. Le projet international LAND, ainsi que son prédécesseur LUCC, ont ainsi permis, riches des travaux de recherches et de développements méthodologiques, de faire émerger la science du *Land Change* (Turner et al. 2007 ; Dearing et al. 2010 ; Van der Leeuw et al. 2011) ou encore la théorie du *Land System* (Kok et al. 2004). Cette dernière postule que « modèles / scénarios / acteurs » doivent être appréhendés simultanément pour comprendre les changements passés et prévoir ceux à venir. Leur finalité vise toujours une évaluation quantifiée des changements et de leurs impacts possibles au travers du prisme de la dimension spatiale (surfaces, localisation, etc.) ainsi que l'aide à la décision pour une gestion à moyen ou long terme des ressources (Gourmelon et al. 2008).

En France, les recherches dans ce domaine ont été identifiées comme des enjeux scientifiques et méthodologiques à investir à partir du milieu des années 2000 dans le plan stratégique 2003-07 du CNRS (Section 39), dans le projet de l'InSHS (2004, 2009) ainsi que lors de la « Prospective de l'InEE » en 2009 (InEE, 2009). Ainsi, le concept de géoprospective apparaît dans le rapport de conjoncture du CNRS (InSHS, 2004) : *Les attentes existant en géoprospective orientent la recherche vers les notions d'imprévisibilité et d'émergence qui constituent les difficultés majeures dans ce domaine. Une des positions de recherche consiste à considérer que les émergences ne sont pas totalement imprévisibles, que les fils du futur sont contenus dans la trame du présent, mais que leur trajectoire précise est imprévisible. L'analyse et la modélisation de l'interaction spatiale permettent d'appréhender la complexité des dynamiques, de simuler les futurs possibles des géosystèmes et de produire des outils d'aide à la décision spatialisés.* Dans le document cadre de l'InEE (2009), un des axes prioritaires concerne la rétro-observation, l'amélioration des reconstitutions passées et la modélisation prospective. Ces enjeux corroboraient les études prospectives globales réalisées par le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (IPCC 2007) et le Millenium Ecosystem Assessment (MEA 2005) mais à des échelles plus fines pour améliorer l'évaluation des impacts possibles. Suivant cette logique, la FRB (Fondation de Recherche pour la Biodiversité) lançait en 2010 le programme « modélisation et scénarios de la biodiversité », qui a pour objectif de fédérer et renforcer la recherche française dans ce domaine.

Dès lors, si la convergence entre la prospective et la géographie s'est réalisée de façon logique et implicite, la question de l'usage de modèles spatiaux en prospective est centrale et constitue le cœur de mes travaux de recherche.

Problématique(s) scientifique(s)

Quel que soit le champ d'application de la prospective, l'usage des modèles de simulation spatiale n'a cessé d'augmenter au cours des 20 dernières années. Ils sont actuellement utilisés soit pour : (1) leur apport à la compréhension et à la formalisation des processus expliquant les changements d'un territoire ; (2) l'évaluation de zones potentiellement dynamiques, dont la plausibilité d'évolution est estimée par un ou plusieurs modèles à travers le degré de probabilité d'un changement sur une portion du territoire ; (3) la stimulation de la participation des acteurs dans le processus de co-construction de scénarios.

L'intérêt des modèles ne réside donc pas exclusivement dans l'aptitude à simuler finement ou le plus précisément possible les changements territoriaux, mais également dans la manière dont ils sont utilisés. Ainsi, il ne s'agit uniquement de considérer une simulation d'un modèle comme un scénario. La prédiction n'étant pas la finalité de la prospective, l'étape de validation dans le

processus de modélisation constitue une problématique en soit. De plus, les modèles n'étant pas toujours adaptés à diverses problématiques, la question de la généricité d'une démarche de modélisation prospective est légitime. En d'autres termes, une démarche générique de modélisation prospective est-elle possible, quel que soit le modèle utilisé, l'échelle d'approche ou encore l'objectif prospectif visé (apport de connaissances, proactivité dans la construction de stratégie de gestion des territoires, etc.) (Harper, 1982) ?

Thématiques, construction et stratégies de recherches

Ma thèse de doctorat avait pour originalité d'avoir tenté de mettre en place une démarche méthodologique visant l'exploration du futur de façon quantitative en se basant sur la méta-méthode des scénarios de Godet (1986). La prise en compte de la dimension spatiale a ainsi été effectuée à chacune des phases de cette méthode. Sa généricité conférait un cadre méthodologique rigoureux et une finalité au couplage des produits issus de la télédétection et de la modélisation. N'ayant, durant mon doctorat, qu'effleuré ce dernier domaine de recherche et travaillé seulement sur des paysages agricoles bocagers, je prenais mon poste de chercheur au CNRS avec une multitude d'objectifs et de doutes. La question de la généricité de la démarche de modélisation prospective spatialisée, terme que je lui avais alors donné, était alors centrale dans mon projet de recherche. Toutefois, les différents types de modèles et leur(s) usage(s) possible(s) en prospective restaient des « territoires » à explorer. A cela, s'ajoutait l'arrivée dans un paysage scientifique et géographique nouveau, où par exemple la montagne constituait pour moi une *terra incognita*. En résumé, cela constituait un contexte scientifique particulièrement favorable pour tester cette généricité à de nouveaux paysages.

Les recherches en modélisation prospective menées au laboratoire GEODE, depuis mon intégration au CNRS le 1er octobre 2007, ont cherché à répondre à ces questions scientifiques, majoritairement méthodologiques, sur des domaines d'applications contrastés et constitutifs de domaines de recherches à part entière. La stratégie reposait donc sur l'application de la démarche de modélisation prospective à différentes thématiques environnementales, sur différents terrains, mobilisant différents types de modèles, dans le but (1) de tester sa généricité, (2) de dresser un état de l'art des approches visant l'usage de modèle en prospective et leur couplage avec des scénarios par exemple, et enfin (3) proposer des solutions pour lever certains jalons.

Un fort parti pris consiste à travailler à des échelles relativement fines, locales (du bassin versant d'ordre 1 jusqu'à des étendues infra-régionales voire régionales au sens administratif), comparativement à la majorité des études faites par d'autres équipes internationales et portant sur des étendues régionales et/ou nationales à continentales (Europe). Ce choix repose sur le fait que les impacts environnementaux se produisent majoritairement aux échelles locales d'une part, et que c'est à ces échelles qu'il est possible de sensibiliser et d'impliquer les acteurs (usagers, décideurs) concernés d'autre part.

Le premier défi a donc été de s'insérer dans le laboratoire GEODE au sein de l'axe transversal « Modélisation géomatique des dynamiques environnementales », considéré alors comme une « boîte à outils » dédiés à assurer la transversalité entre les 7 axes de recherches précédents. La géomatique et l'usage des méthodes quantitatives dans une perspective prospective, conféraient à cet axe de recherche un caractère émergent soutenu par le laboratoire GEODE. Dès 2009, j'ai pris la responsabilité de l'axe de recherche en contribuant à la rédaction du bilan quadriennal 2005-2009 et à la définition du projet de l'axe « Modélisation des trajectoires spatio-temporelles des paysages » pour le contrat quadriennal 2010-2014. S'il s'agissait de promouvoir et renforcer cette thématique de recherche en interne et dans le paysage scientifique toulousain, mon implication au sein du GdR MAGIS en tant que responsable des Groupe Projet « Géo-Pro prospective » (2009-2013) et Action Prospective « Analyse et suivi des milieux » (2013-16) suivait ce même objectif mais à l'échelon national.

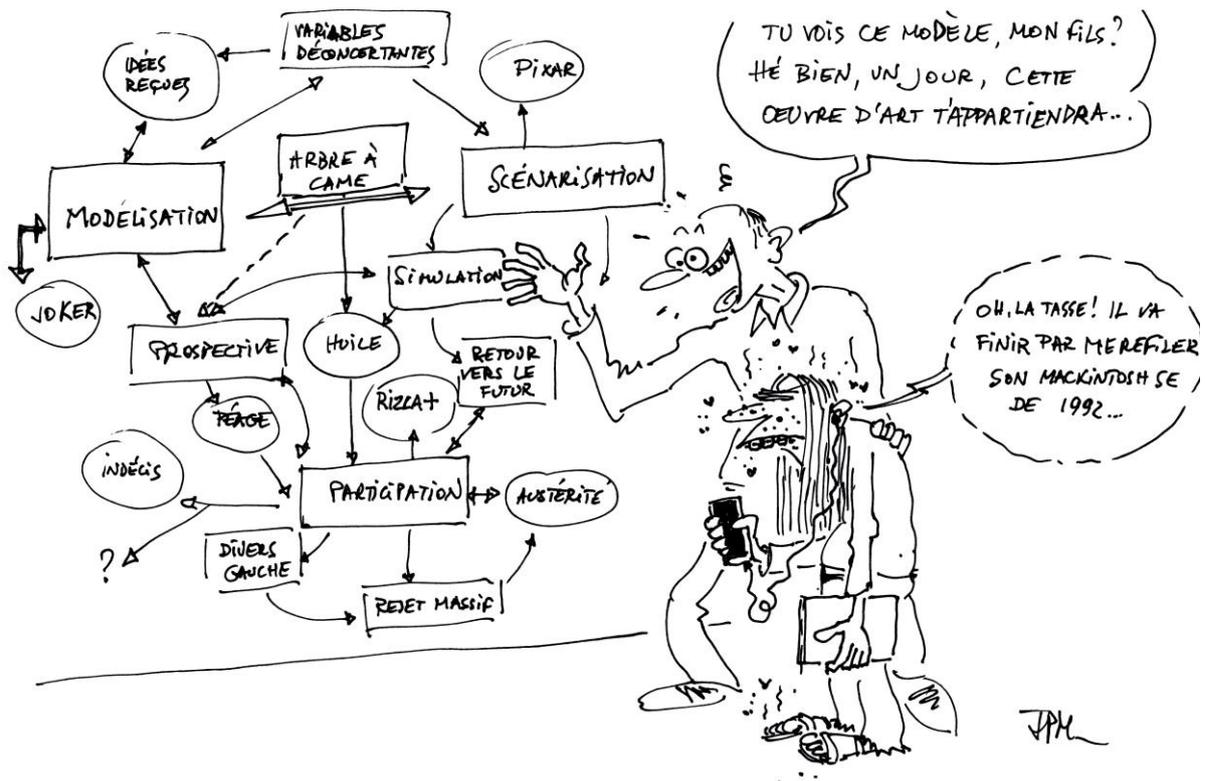
En parallèle, j'ai cherché à m'insérer dans des projets de recherches existants, dans le montage d'autres, portant à la fois sur les milieux urbains et montagnards. Mon implication dans de petits projets annuels (via l'OHM du Haut-Videssos) ou biannuels (PIRVE Hétérogénéité climatique) a été un formidable marchepied : en 2010, mon projet ANR Jeune Chercheur MODE RESPYR était accepté ainsi que le projet ACCLIMAT, financé par le RTRA STAE de Toulouse et dirigé par Météo-France. Ces deux projets structurants, m'ont permis de renforcer et d'élargir mes collaborations scientifiques dans le paysage scientifique Toulousain d'une part, et de former et d'encadrer des étudiants en Master, en doctorat (L. Vacquié, R. Marti, J. Grimaldi) et post-doctorat (R. Aguejdad, O. Doukari) d'autre part. Soucieux de leur devenir, je m'évertue à leur fournir de bonnes conditions pour la réalisation de leurs travaux, à les soutenir pendant et après leur passage au GEODE, de façon à leur fournir toutes les chances de trouver ensuite rapidement un emploi, tant dans la recherche que dans le secteur privé.

Les principaux résultats scientifiques présentés ci-après sont le fruit de projets de recherches collaboratives, financées exclusivement par des organismes de financement (ANR, RTRA) et des dispositifs de recherche (OHM). Ainsi, ils concernent principalement deux types de milieux, la montagne et la ville, et dont les démarches méthodologiques ont ensuite été croisées et comparées entre elles, mais également avec d'autres cas plus ponctuels (théoriques ou non) dans le cadre d'autres projets auxquels j'ai participé. A travers ces exemples, on démontre l'intérêt des sites d'observation à long terme pour l'apport de la pluridisciplinarité dans une démarche prospective et pour l'évaluation, mais également que la démarche n'est pas exclusive à ce type de terrain. Au final, l'ensemble des travaux de recherche réalisés dans le domaine de la modélisation prospective peut être synthétisé par trois grandes thématiques scientifiques, organisant ce mémoire :

- 1. Modélisation prospective des changements d'occupation et d'usage des sols : état de l'art et propositions**
- 2. Etalement urbain et climat : caractérisation du climat urbain et scénarios prospectifs**
- 3. Espaces montagnards pyrénéens et prospective : apports de la dimension spatiale**

Les résultats présentés ci-après sont une tentative de synthèse des travaux de recherches ayant fait l'objet de publications dans des revues nationales et/ou internationales à comité de lecture, et/ou de communications dans des colloques et séminaires. Les références utilisées pour illustrer ces trois thématiques de recherche sont, pour celles issues de travaux originaux auxquels j'ai contribué, cités en fin de chacune des parties correspondantes. Les autres sont listées en fin de mémoire, dans la partie bibliographie.

3.2 Modélisation prospective des changements d'occupation et d'usages de sols : état de l'art et propositions



Colonne vertébrale de mes recherches, cette partie vise à dresser un bilan des avancées méthodologiques relatives à l'usage des modèles en prospective. Suite à mes travaux de doctorat, durant lesquels j'ai tenté de définir une démarche d'exploration du futur où la dimension spatiale était centrale, la question majeure portait sur la généralité de cette démarche. Était-elle transposable à d'autres types de paysages (de milieux et d'usages), de problématiques ou encore d'échelles ? Telles étaient les questions sous-jacentes en suspens. Si l'on ne répond pas directement à cette question dans cette partie, les exemples d'applications fournis dans les deux parties suivantes (en milieu urbain et montagnard) y contribuent. Notons néanmoins que certains aspects méthodologiques ont conduit à travailler également en milieu d'agriculture intensive.

D'un point de vue méthodologique, la démarche de modélisation prospective renvoie à deux étapes clefs, indissociables : (1) la reconstitution des trajectoires d'évolutions des changements d'occupation et d'usages du sol pour comprendre le fonctionnement du système étudié et (2) l'usage des modèles en prospective pour localiser et quantifier les changements futurs, sous-entendu que ces modèles sont implicitement combinés à des scénarios prospectifs. Chacune de ces étapes sous-tend l'usage de méthodes spécifiques (télédétection, modélisation, prospective) qui, prises individuellement, constituent des thèmes de recherche à part entière. Par exemple, la validation des modèles, l'évaluation de l'incertitude liée aux modèles et au futur sont autant de thèmes qui sont abordés ici, mais qui peuvent également être approfondis. Néanmoins, leur utilisation combinée confère à la modélisation prospective un caractère fondamentalement interdisciplinaire, avec tous les avantages et inconvénients associés. C'est le positionnement de ces recherches.

La prospective fournit un cadre conceptuel et méthodologique qui peut notamment contraindre l'usage de modèles spatiaux, définis ici comme dynamiques et spatialement explicites. Si leur utilisation en prospective constitue une étape originale, relativement récente, elle soulève de multiples questions : Comment valider une simulation dans le futur ? Quel degré de confiance peut-on avoir dans les simulations ? Comment bien utiliser un modèle dans une démarche prospective ? Etc. L'objectif de ses recherches a notamment consisté à mieux appréhender les apports et les limites des modèles pour l'exploration du futur. Plus largement, il s'agissait d'évaluer l'apport de la dimension spatiale à la prospective. En effet, si les modèles peuvent constituer des outils puissants, ils restent imparfaits et requièrent une certaine prudence lors de leur utilisation. L'originalité de la démarche a consisté, à l'aide d'exemples appliqués et diversifiés, à prendre du recul, comparer, analyser les résultats obtenus pour produire des synthèses et proposer des protocoles méthodologiques destinés à répondre aux questions citées plus haut.

3.2.1 Usages des modèles en prospective

De l'intégration de la dimension spatiale dans la méthode des scénarios

Du point de vue de la prospective, les modèles peuvent être assimilés à une méthode, parmi d'autres, destinée à explorer le futur. Toutefois, la complexité des interactions à prendre en compte pour faire évoluer le système territorial étudié peut rendre inopérant, inadapté, incomplet, la plupart des modèles. En effet, étant par définition une simplification de la réalité, ils ne permettent pas d'intégrer les particularismes locaux. Seul l'exercice intellectuel permet de prendre en compte l'ensemble des processus et interactions entre des facteurs sociaux, démographiques, politiques, technologiques, économiques, culturels, historiques, géographiques ou encore environnementaux (Huss et Honton, 1983 ; 1987). De plus, en raison de leur architecture et de la formalisation préalable qu'ils requièrent, les modèles peuvent présenter certaines limites pour construire et explorer une plus grande diversité de situations futures contrairement à d'autres méthodes de prospective fondées sur une approche systémique, intellectuelle, logique et qualitative (par opposition aux modèles). Parmi les grandes "écoles" de construction de scénarios qui se distinguent

au niveau international (Amer et al., 2013 ; Bradfield et al., 2005), l'école française de *la prospective* (Godet, 1986) promeut la « méthode des scénarios » qui peut être considérée comme une méta-méthode. Elle définit, sur la base d'une multitude d'outils mobilisables, une démarche méthodologique constituée d'étapes spécifiques dont le nombre peut varier selon les auteurs (Durand, 1972 ; Godet, 1986 ; Schwartz, 1996 ; Schoemaker, 1993 ; 1995 ; Mermet et al., 2003). Toutefois, que les méthodes utilisées soient quantitatives ou qualitatives, les étapes restent globalement identiques : (1) la construction de « la base de connaissances » regroupe l'identification des variables internes et externes au système étudié (les facteurs de changement), la caractérisation de la dynamique passée du système et les enjeux futurs ; (2) la construction des scénarios sous la forme de cheminements (description de la dynamique future du système) et d'images (description du système à diverses dates clefs) reposant sur la définition d'hypothèses (contrastées par exemple) pour chacun des facteurs identifiés préalablement. Une troisième étape, l'action, distingue la prospective « à la française » des autres écoles, qui se limitent à la construction des scénarios. Après évaluation et comparaison des conséquences des scénarios, cette étape doit permettre de définir des préconisations, règles ou encore mesures favorisant la gestion du système par les acteurs (phase de *proactivité*).

Un des premiers objectifs de mes recherches a consisté à intégrer la dimension spatiale tout au long du processus prospectif, avec l'hypothèse sous-jacente que cela contribue à la compréhension de la complexité des socio-écosystèmes et à l'évaluation quantitative des changements futurs, notamment à travers l'usage de modèles spatiaux. La seconde hypothèse sous-jacente est que cette approche, permet d'affiner plus fidèlement l'évaluation des scénarios prospectifs car la localisation des changements d'occupation et d'usage des sols est fondamentale, largement sous-estimée (Lambin and Geist, 2006 ; Houet et al, 2010) : *Location matters !* (P. Verburg, Communication personnelle 2015). Ainsi, la méthode proposée au cours de mes recherches doctorales (Houet 2006 ; Houet et al. 2008) a été testée depuis lors à différents terrains et types de paysages (Houet et al. 2010), confrontée à la bibliographie, et constitue le cadre de travail de l'ensemble de mes travaux. Cette démarche, présentée en figure 3.2.a, est une adaptation de la méthode des scénarios de Godet (1986) qui intègre, à chaque étape, la dimension spatiale. Autrement dit, chacune des étapes de la méthode de Godet est réalisée en mobilisant l'ensemble des méthodes existantes en géographie (géomatique et télédétection, analyse spatiale, analyse systémique, modélisation, etc.).

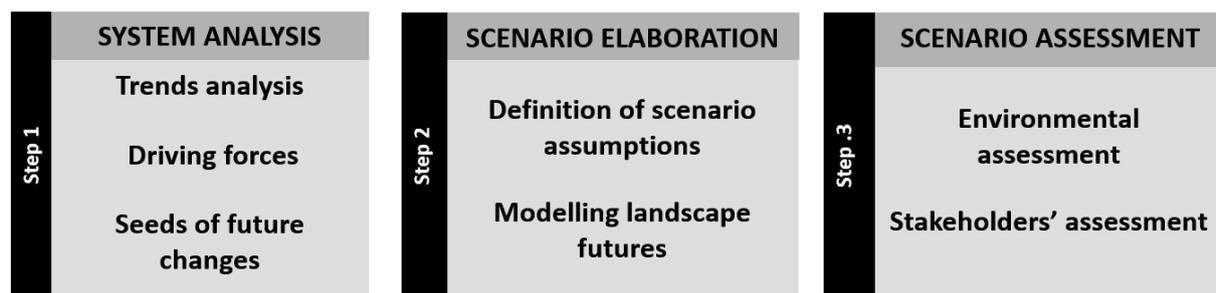


Figure 3.2.a. Adaptation de la méthode des scénarios de Godet (1986) de façon à intégrer la dimension spatiale tout au long du processus (source : Houet, 2010)

Elle se caractérise par trois étapes, partant de l'hypothèse qu'un ou plusieurs territoires d'étude ont été préalablement choisis. La première étape – la construction de la base – consiste à faire une analyse du système. D'une part, il s'agit de recréer les trajectoires d'évolution de l'occupation et des usages du sol et, d'autre part, d'identifier et de hiérarchiser à partir de ces trajectoires l'ensemble des processus et facteurs explicatifs qui les ont fait et les font encore évoluer voire constituent des germes de changements futurs. Cette phase doit permettre de mettre en lumière la structuration et le fonctionnement du système territorial, de définir clairement l'ensemble des interactions spatio-temporelles existantes entre les contraintes spatiales (climat, pédologie, topographie, etc.), les

facteurs anthropiques (facteurs politico-économiques, réglementaires, socioculturels, historiques, etc.) et les modes d'usages des sols. La seconde étape consiste à définir les scénarios et à spatialiser les changements futurs. Une multitude d'approches de modélisation et de méthodes sont mobilisables et soulève la question du couplage entre scénarios, modèles et participation (cf. partie 3.2.2.). Enfin la dernière étape porte sur l'évaluation des scénarios produits. En effet, s'il existe des enjeux méthodologiques, intéressant principalement les chercheurs, les scénarios et leurs conséquences intéressent essentiellement les acteurs et les décideurs. Deux types d'évaluations se distinguent : (1) celle relative à l'estimation des changements futurs et leurs impacts sur le plan environnemental et/ou socio-économique qui pourra être réalisée par déduction et/ou par le couplage des images du futurs, c'est-à-dire des cartographies, avec d'autres modèles (simulations de transferts de flux d'eau, de nutriments ou encore de biodiversité) ; (2) celle relative à l'apport des connaissances aux gestionnaires et décideurs locaux et préalable à la co-construction de stratégies de gestion et de développement territorial, pouvant aboutir à la création d'un ou plusieurs nouveaux scénarios, c'est-à-dire de la phase de proactivité (Fig. 3.2.b).

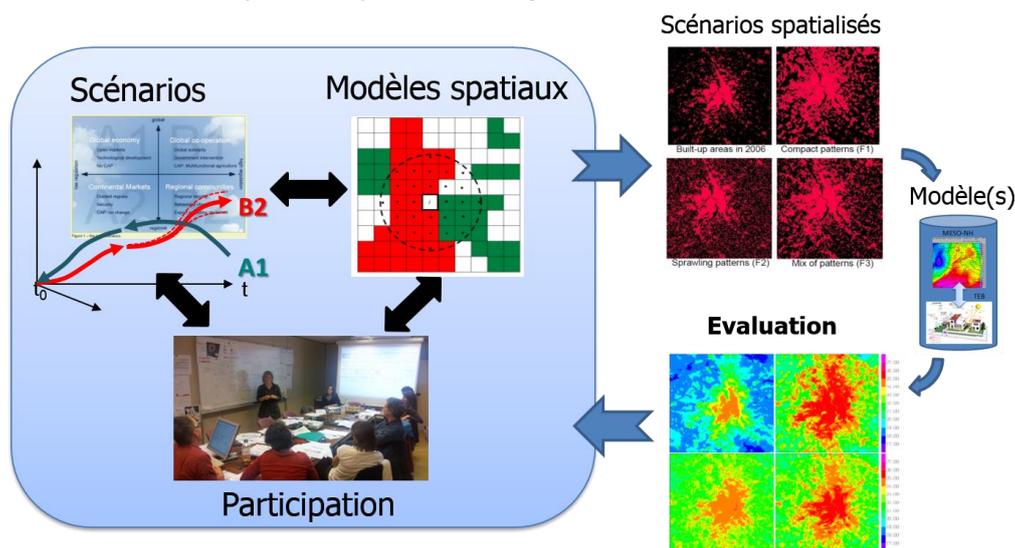


Figure 3.2.b. Illustration de l'intérêt de la modélisation prospective pour l'évaluation environnementale et la définition de stratégie de gestion de l'espace à moyen/long terme (proactivité)

3.2.2 Couplage scénarios / modèles

Diverses approches et modèles/méthodes peuvent être mobilisées pour construire des scénarios (Houet et Gourmelon, 2014 – Fig. 3.2.c). Premièrement, on peut distinguer les approches relevant de la prospective (Godet, 1986 ; Mermet 1992 ; Piveteau, 1995 ; Mermet et al 2003) qui font appel à des méthodes qualitatives et/ou participatives pour la plupart, de celles relevant de la communauté travaillant sur les changements d'occupation et d'usages du sol (Lambin and Geist, 2006 ; Veldkamp and Verburg 2001 ; Verburg et al, 2004) qui mobilisent majoritairement des modèles dynamiques et spatialement explicites (automates cellulaires, système multi-agent, etc.). La communauté travaillant dans le domaine de la modélisation d'accompagnement fournit également un cadre théorique et des méthodes particulièrement intéressantes, parfois communes aux deux autres communautés, pouvant aider à la construction de scénarios prospectifs spatialisés (Etienne, 2012), représentés sous le terme « Géoprospective ». Elles contribuent toutes les trois aux concepts du *Land Systems* (Kok et al, 2004 ; Dearing et al. 2010 ; van der Leeuw 2011) et du *Land change Science* (Turner et al 2007).

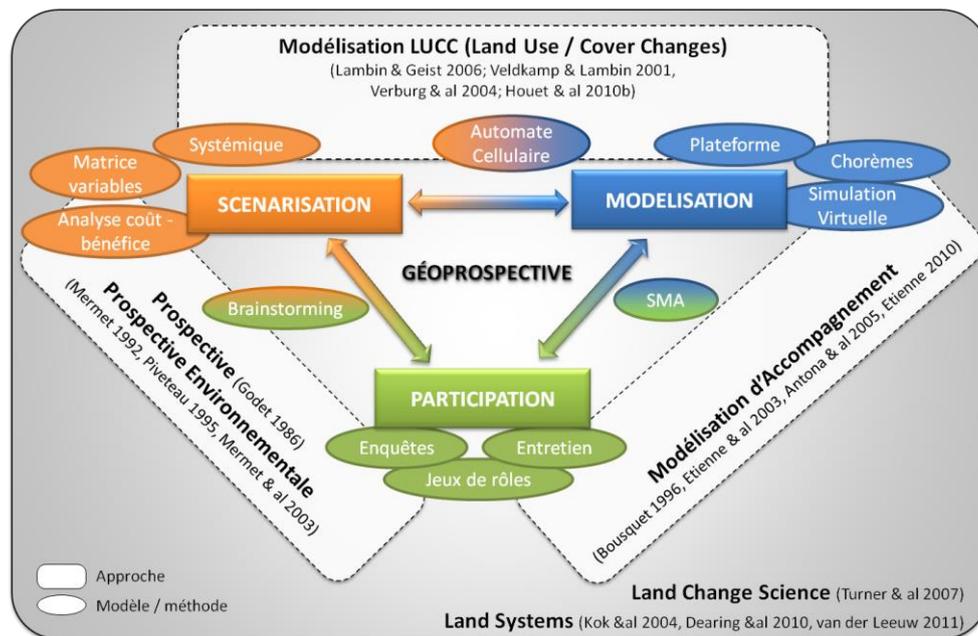


Figure 3.2.c. La géoprospective, une démarche à l'interface de plusieurs approches de modélisation (source : Houet, 2010)

Le couplage entre prospective et modèle renvoie toujours à la question de l'usage du modèle, et de la dépendance de l'un vis-à-vis de l'autre. En d'autres termes, le scénario prospectif alimente-t-il le modèle ou bien est-il le résultat de la simulation ? (La participation est considérée ici comme mobilisée soit en amont, lors de la définition des scénarios (récits), soit en aval, lors de la restitution des scénarios et de leur évaluation). Le couplage entre scénarios et modèles constitue à la fois un réel challenge, dans la mesure où les philosophies et hypothèses sous-jacentes diffèrent (van Vliet et al, 2010). Dans le cas où les scénarios alimentent les modèles, la démarche relève de l'approche SAS (*Storyline and Simulation*) définie par Alcamo et al (2008). Les scénarios sont construits préalablement, conformément aux attentes des acteurs (stratégies à tester, désirables ou non), sous forme de récits narratifs, et doivent être traduits de façon à alimenter des modèles spatiaux. Dans le cas où on utilise un modèle dont le paramétrage conduit à une simulation, assimilable à un scénario prospectif s'il répond aux principes de la prospective (cf. partie 3.2.3.), on se situe dans une approche « classique » de modélisation des changements d'occupation et d'usages du sol (Mas et al 2011, 2014). Cette approche sous-tend l'hypothèse d'une forte dépendance aux trajectoires passées (*Path dependency* – Brown et al 2005) qui peut être contraignante pour l'exploration de futurs très contrastés, supposant une rupture dans la trajectoire du socio-écosystème, c'est-à-dire avec une modification des facteurs explicatifs des changements et de leur poids respectif (Fig. 3.2.d). Kolb et al. (2013) ont par exemple démontré que, dans le cas d'un territoire n'ayant pas connu de ruptures au cours d'une certaine période, les données d'entrée (carte d'occupation des sols) et les modèles markoviens utilisés ne permettaient pas toujours de retrouver les mêmes *drivers*, présentant des poids respectifs similaires, au sein de deux sous-périodes. Cette distinction est relativement schématique dans la mesure où, au sein d'une même étude prospective, ces deux types de couplages « scénarios / modèles » peuvent être réalisés successivement, voire couplés (Houet et al, submitted-a).

Storyline and Simulation (SAS approach – Alcamo, 2008)

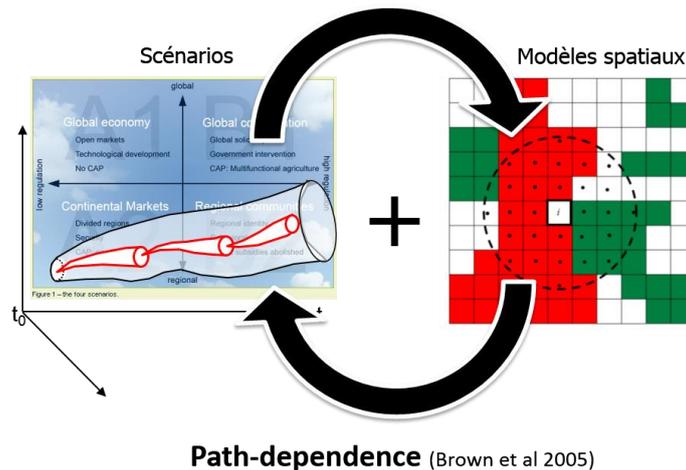


Figure 3.2.d. Distinction des approches couplant scénarios et modèles spatiaux.

Le choix du modèle dans une démarche prospective est fondamental car il dépend de plusieurs critères :

- Du type de scénarios (Mas et al 2011, 2014 ; Houet et al submitted-a, submitted-b) : des modèles estimant les quantités de changements futurs sur la base de données existantes sont pertinents pour simuler des scénarios tendanciels. Sur cette base, ceux-ci peuvent permettre également de tester des stratégies d'usages du sol contrastées (Houet et al, In press). Inversement, des modèles dont les quantités de changements futurs, voire les processus d'usage du sol, sont définis empiriquement ou proviennent du couplage avec d'autres modèles, selon l'approche SAS, vont être plus adaptés à simuler des scénarios contrastés et/ou normatifs.
- De l'échelle d'approche, c'est-à-dire de la résolution et de l'extension spatiale considérées. Si l'objectif consiste à reproduire des processus d'usage du sol, tels que des rotations culturales par exemple, alors des modèles de type *process-based* vont être plus adaptés (Houet et al 2014). A l'inverse, si l'objectif est de reproduire des *patterns* paysagers, des modèles de type *pattern-based* seront appropriés (voir par exemple Caillault et al 2013; Houet et al submitted-b).
- De façon plus ou moins corrélée au point précédent, du type de paysage considéré. En effet, selon les milieux considérés (urbain, agricoles, montagnards...) les changements d'occupation et d'usage du sol vont être représentés différemment, en mode raster ou vecteur, pouvant orienter le choix vers des modèles de type *process-based* ou *pattern-based*.
- De la représentation des acteurs, de leur choix et de leurs interactions dans la modélisation. Ainsi, si l'on ne considère que les dynamiques paysagères, des modèles de type automates cellulaires peuvent convenir (voir par exemple Houet et al In press ; Vacqué et al, In press ; Houet et al submitted-a). A l'inverse, si l'on veut tenir compte des interactions entre acteurs (décideurs, gestionnaires ou utilisateurs, couvrant les réseaux, les agriculteurs ou encore leur cheptel) qui influent directement ou indirectement les changements d'occupation du sol, alors un modèle de type système multi-agent (SMA) sera plus adapté (voir par exemple Caillault et al, 2013 ; Vacqué et al, Submitted).

Au-delà de ces critères, le couplage « scénarios / modèles », suivant l'approche adoptée, soulève la question de la validation du modèle en prospective.

3.2.3 La validation des modèles

En modélisation, la validation du modèle est une phase essentielle permettant d'évaluer l'aptitude d'un modèle à prédire un processus, une dynamique, une observation. Par essence, cette phase va à l'encontre de la philosophie de la prospective. En effet, la prospective sous-tend que l'objectif n'est pas la prédiction mais plutôt d'envisager une pluralité de futurs possibles. De plus, le futur étant par définition incertain, comment valider la simulation d'un scénario dans le futur ? Ainsi, dans une démarche prospective où des scénarios contrastés, prévoyant des ruptures avec les tendances passées, la calibration d'un modèle peut compromettre sa capacité à les simuler (Houet 2015). Néanmoins, la calibration reste indispensable à toute démarche modélisatrice. Ceci illustre les enjeux de la validation des modèles, qui diffèrent selon les disciplines, et qui sont sources de vastes débats et critiques dans le domaine.

La phase de validation d'un modèle utilisé en prospective a pour objectif d'accroître la confiance que les utilisateurs (c'est-à-dire les modélisateurs et les acteurs) peuvent avoir dans le modèle utilisé pour représenter spatialement les scénarios envisagés. En d'autres termes, la validation du modèle a pour objectif de renforcer la plausibilité des scénarios. C'est-à-dire démontrer que les dynamiques spatiales simulées sont crédibles et vraisemblables. Cela consiste à s'assurer que la représentation spatiale et temporelle des processus simulés respecte les tendances, les processus de changements voire les patrons paysagers tels qu'ils sont préalablement définis dans les scénarios prospectifs. En effet, si cette phase ne permet pas de démontrer cette aptitude, alors l'usage du modèle pourra avoir un effet contre-productif pouvant amener au rejet des résultats de la prospective.

En prospective, l'évaluation des scénarios porte plus sur la validation de la démarche de construction que sur les résultats des scénarios. La validation d'un modèle s'insère dans cette perspective. Selon Godet (1992), l'évaluation des scénarios prospectifs s'effectue en vérifiant le respect des quatre fondamentaux de la construction des scénarios : la pertinence, la cohérence, la vraisemblance et la transparence. L'évaluation de la pertinence des scénarios ne concerne pas directement la modélisation. Par contre, l'évaluation de la pertinence d'un modèle pour simuler des scénarios est implicite et consiste en une étude comparative pour choisir le modèle le plus adapté aux besoins (types de changements d'occupation du sol, dynamiques...). La validation d'un modèle peut contribuer directement aux principes de transparence, cohérence et vraisemblance en démontrant l'aptitude du modèle à simuler des changements, en termes de dynamiques et de processus, définis par des scénarios. L'approche proposée (Houet 2015) repose sur la combinaison de plusieurs démarches de validation (voir par exemple Houet et al., 2014, Submitted-b) (Fig. 3.2.e):

- La réalisation de tests de sensibilité et d'intégration. Les premiers permettent de s'assurer que l'ensemble des processus sont convenablement simulés par le modèle. Les seconds s'assurent que l'interaction de ces processus n'entrave pas leur fonctionnement respectif (Houet et Gaucherel, 2007). Ceci renforce le principe de cohérence.
- La simulation sur une période passée. Si la calibration sur une période passée peut avoir des conséquences selon les scénarios considérés, la démarche de simuler des changements observés durant une période passée (t_1 et t) à partir d'une calibration sur une période antérieure (entre t_2 et t_1), et de comparer le(s) résultat(s) de la simulation avec une situation observée (à t), reste particulièrement intéressante (Houet et Gaucherel, 2007). Dans le cas où le modèle est en mesure de reproduire, sur le plan de la composition et de la configuration du paysage, une évolution semblable à celle qui s'est réellement produite, alors la confiance que l'on peut avoir dans le modèle à produire des paysages vraisemblables est renforcée.
- La simulation de dynamiques contrastées (en termes de localisation, de quantité et de processus). Si cette démarche est assimilable à des tests d'intégration, elle s'en différencie quelque peu à travers la simulation de scénarios fictifs. L'objectif consiste donc à simuler des ruptures dans les dynamiques de changements (augmentation puis baisse d'une occupation

du sol ; modes d'allocation spatiale différents au cours du temps pour des modèles de type *pattern-based* ; introduction de nouveaux processus ou arrêt de processus existants pour des modèles de type *process-based*...). Si le modèle est en mesure de gérer des dynamiques contrastées, avec un séquençage contrôlé, tout en s'assurant que leurs interactions n'altèrent pas la production de paysages fidèles aux patrons paysagers et/ou aux processus d'usages des sols tels que définis par les scénarios, alors cela renforce la confiance que l'on peut avoir dans le modèle à simuler de façon vraisemblable des scénarios prospectifs.

Type de changement \ Tests	(1) Tests de sensibilité	(2) Tests d'intégration	
		(a) Simulation sur une période passée	(b) Simulation de tendances contrastées
Quantité de changement	- % d'occupation des sols (OS)	- Etat final des % d'occupation des sols	- Evolution des % d'occupation des sols
Processus de changement	- Cartes d'occurrences d'une OS - Carte de localisation	- Evolution des % d'occupation des sols - Cartes d'occurrences d'une OS - Indice Kappa - Comparison Map and Profile (CMP).	- Evolution des % d'occupation des sols - Cartes d'occurrences d'une OS - Kappa, CMP, etc.
Localisation des changements	- Métrique paysagère - Distribution par rapport à des éléments pérennes du paysage	- Cartes d'occurrences d'une OS - Kappa, CMP, etc. - Métrique paysagère - Distribution par rapport à des éléments pérennes du paysage	- Cartes d'occurrences d'une OS - Kappa, CMP, etc. - Métrique paysagère - Distribution par rapport à des éléments pérennes du paysage

Figure 3.2.e. Exemples d'indicateurs utilisables pour valider l'aptitude d'un modèle à simuler de façon vraisemblable des changements d'occupation des sols sur le plan des quantités, des processus ou de la localisation. Les indicateurs utilisés pour les démarches (1) et (2a) sont comparés soit aux paramètres d'entrée du modèle (valeurs attendues après simulation), soit à une situation observée (à la date t). Ceux utilisés pour la démarche (2b) doivent témoigner de valeurs évoluant de façon contrastée (valeurs témoignant de ruptures au cours de l'évolution).

Il n'existe pas d'indicateur synthétique sous forme statistique ou cartographique qui permette d'évaluer la vraisemblance d'une simulation. De plus, les simulations produites reposent parfois sur des règles aléatoires (choix aléatoire de localisation par exemple), engendrant potentiellement diverses simulations possibles pour un même scénario. Les indicateurs reposant sur la comparaison d'une simulation avec une situation observée tels que le Kappa (Pontius, 2002), la courbe ROC (Pontius and Schneider, 2001) ou encore les indicateurs dérivés des LUC budgets (Pontius et al., 2004a ; 2004b ; 2008) apparaissent inadaptés dès lors qu'ils sont utilisés individuellement. En effet, ils évaluent le pouvoir prédictif d'un modèle et non son aptitude à correctement simuler les processus d'usages des sols ou les patrons paysagers désirés (Brown et al., 2005). Par contre, dans la mesure où chacun de ces indicateurs peut contribuer à évaluer l'aptitude du modèle à simuler soit le motif paysager désiré, soit des dynamiques spatiales ou temporelles spécifiques, leur usage combiné permet alors d'accroître la confiance que l'on peut avoir dans le modèle à simuler des scénarios prospectifs. Le cas échéant, c'est-à-dire si ces tests ne sont pas réalisés, il est possible que le résultat de la simulation présente des dynamiques spatiales cohérentes (à travers un motif paysager vraisemblable) et des dynamiques temporelles peu vraisemblables (par exemple, transitions

d'occupation des sols incohérentes). Dans ce cas de figure, l'acceptation des sorties des modèles de simulation spatiale peuvent être remis en cause, et par corolaire, les scénarios produits.

Par exemple, ces techniques, prises individuellement, ne permettent pas de démontrer que les processus ou encore les dynamiques sont bien respectés. Autre exemple, l'indice d'erreur due à la quantité (Pontius, 2002) peut ne pas être pertinent pour des scénarios prospectifs normatifs, car le modèle est censé simuler une quantité de changement définie. Si une erreur due à la quantité subsiste, cela signifie que le modèle n'est pas apte à correctement simuler ce type de scénario. Pour chacune des démarches mentionnées, un ou plusieurs indicateurs peuvent être utilisés : indicateur statistique simple (proportions d'occupations du sol), ROC, Kappa et autre méthodes de validation par comparaison (Pontius, 2002 ; Pontius et al., 2008) ainsi que les métriques paysagères, telles que des indices d'hétérogénéité ou de connectivité du paysage (Haines-Young et Chopping, 1996 ; Uuermaa et al., 2009), etc. Par exemple, les indices issus du CMP (Comparison Map and Profile – Gaucherel et al., 2008) peuvent permettre de mettre en évidence la similitude d'un motif paysager simulé avec un paysage de référence (Houet et al., 2014). C'est la combinaison de ces indicateurs, à travers ces trois démarches de validation, qui est importante et qui permet de valider l'aptitude du modèle à simuler des dynamiques spatio-temporelles vraisemblables, définies par un ou plusieurs scénarios (Fig. 3.2.e). Néanmoins, rappelons que la plausibilité des simulations dépend de la plausibilité des scénarios qui doit être vérifiée préalablement. Un modèle, une fois validé, peut en tout état de cause simuler de façon vraisemblable un scénario totalement incohérent.

3.2.4 Incertitude spatiale liée au futur

La prospective vise à réduire les incertitudes liées à l'avenir en donnant « un regard sur l'avenir, destiné à éclairer l'action présente » (Hatem 1993). Différents types et sources d'incertitudes peuvent intervenir dans le processus de modélisation (Messina et al. 2008; Batisani and Yarnal 2008). La première concerne l'incertitude inhérente à la qualité des données d'entrée. Dans la majeure partie des cas, les classifications d'occupations des sols restent imparfaites, incomplètes pouvant engendrant certaines sur/sous-estimations (Fig. 3.2.f (1)). La seconde est celle inhérente au modèle (*model inherent uncertainty* – Fig. 3.2.f (2)) pour un même scénario. Assimilable à la variance, elle concerne l'enveloppe des écarts à une simulation moyenne et intègre l'incertitude liée aux données et celle inhérente au paramétrage et au fonctionnement du modèle (algorithmes aléatoires, etc.). Le troisième type d'incertitude, souvent utilisée en climatologie, consiste à élargir la variance de l'incertitude au modèle, en utilisant plusieurs modèles. En effet, tout modèle étant par définition une simplification de la réalité, le fait de recouper les simulations issues de plusieurs modèles permet d'établir un faisceau convergent d'informations permettant de renforcer la plausibilité quant à l'intervalle de valeurs concernées par ce scénario (Fig. 3.2.f (3)). Cette incertitude liée à la modélisation est appelée *multi-models ensemble uncertainty* (Peng et al. 2002). Enfin, un dernier type d'incertitude se distingue, intégrant les précédents types d'incertitude. Elle concerne la délimitation de l'intervalle / l'enveloppe maximale des futurs possibles (Fig. 3.2.f (4)). Cette incertitude liée au futur, et répondant aux principes mêmes de la prospective considérant la pluralité des futurs comme un ensemble, est appelée *multi-scenarios ensemble uncertainty* ou *future ensemble uncertainty*.

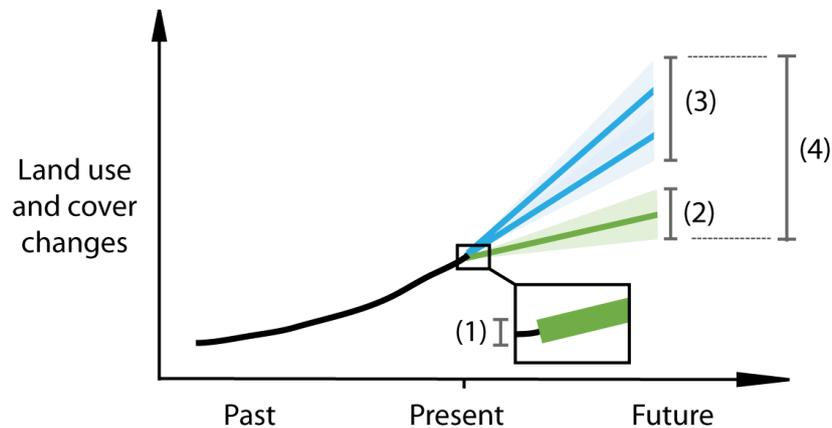


Figure 3.2.f. Sources et type d'incertitudes liées au futur : (1) l'incertitude liée à la qualité des données d'entrée, (2) celle inhérente au modèle pour un scénario (*inherent uncertainty*), (3) celle délimitée par l'utilisation croisée de plusieurs modèles pour un même scénario (*multi-model ensemble uncertainty*) et (4) l'incertitude d'ensemble lié au futur qui englobe la pluralité des futurs possibles (*multi-scenarios ensemble uncertainty*) (Adapté de Houet et al, In press).

La géographie peut apporter les outils pour caractériser et synthétiser cette incertitude liée au futur de façon spatialement explicite. L'objectif est alors de fournir, sous forme d'indicateurs synthétiques, une représentation spatialisée de cette incertitude liée au futur et des impacts des stratégies différenciées d'usages des sols. Une méthodologie simple, adaptée de Tenerelli and Carver (2012) et Ligman-Zielinska and Jankowski (2014) pour la prospective, a été définie pour répondre à cet objectif à partir du croisement des simulations produites (Houet et al, In press) (Fig. 3.2.g). Par simplification, en utilisant un seul modèle, seules les *model inherent* et *future ensemble uncertainties* ont été caractérisées ici.

Cette méthodologie consiste à réaliser différentes simulations sur la base de paramétrages différents, pour chaque scénario (ici MBAU et PHVU¹). Ces simulations sont croisées de façon à comptabiliser le nombre d'occurrences des changements d'intérêt d'un type d'occupation du sol vers un autre, toutes simulations confondues. Les cartes constituent des cartes de probabilités relatives représentant l'incertitude inhérente au modèle. Ensuite, suivant le même principe, ces cartes sont croisées pour produire deux autres cartes : (a) une carte de probabilités moyennées (ici sur le thème de la fermeture des paysages par reforestation) et (b) une carte des différences. La première permet de considérer le degré de probabilité de changements pour le futur, tous scénarios confondus. La seconde permet d'identifier les zones où les probabilités de changements sont identiques ou proches, témoignant d'une relative indépendance aux stratégies d'usages des sols, et inversement. L'intérêt réside dans l'utilisation combinée de ces deux cartes car il est ainsi possible de caractériser dans quelle mesure certains espaces, présentant de faibles ou de fortes probabilités, dépendent ou non d'une stratégie d'usage des sols.

¹ Ces scénarios font référence à l'utilisation de toutes ou d'une partie des estives de la vallée étudiée. MBAU (*model-based business as usual*) prévoit une utilisation de toutes les estives, en reproduisant les dynamiques passées (sous pression pastorale généralisée). PHVU (Priorization of High Values Uplands) prévoit un abandon des estives les moins appétantes et les plus difficiles d'accès, au profit des autres, de façon à maximiser la pression pastorale pour lutter, sur ces estives, contre l'enrichissement.

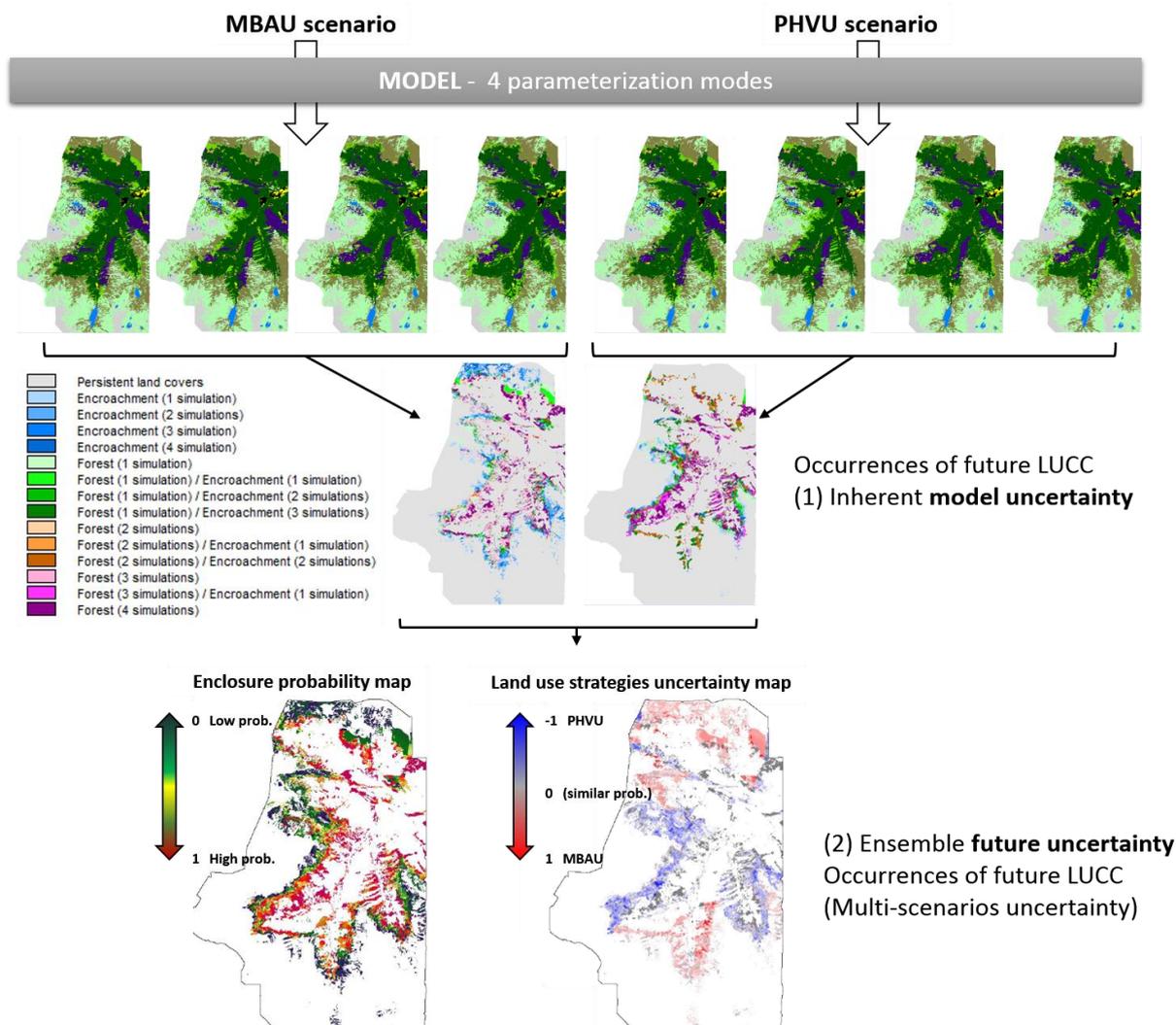


Figure 3.2.g. Approche méthodologique pour définir l'incertitude spatiale liée au futur.

3.2.5 Conclusion partielle

La modélisation prospective bénéficie de réelles avancées méthodologiques grâce à une étude approfondie du fonctionnement des modèles, des méthodes d'évaluation et à une analyse critique de leur usage en prospective. Ces recherches y contribuent en partie. Si elles bénéficient des projets de recherches et des thématiques abordées (études de cas, développements spécifiques), le cadre interdisciplinaire des équipes impliquées et des réseaux de recherches (GdR MAGIS, réseau PAYOTE INRA, Axe 3 laboratoire GEODE) au sein desquelles elles sont menées permettent de mettre ces analyses à l'épreuve et de débattre des résultats. La question de la généricité reste posée mais les synthèses proposées découlent d'études diversifiées, comparatives, sur des paysages divers qui tendent à y répondre par l'affirmative.

Si les modèles constituent des outils puissants pour l'évaluation quantitative des scénarios, ils requièrent d'être utilisés avec prudence et rigueur. S'ils permettent de localiser et de réduire l'incertitude liée au futur, ils n'en restent pas moins que des vecteurs de facilitation du porter à connaissance, voire de l'aide à la décision. La prospective modifie légèrement les paradigmes de la modélisation, en conférant à l'étape de validation un objectif de contribuer aux principes de transparence et de vraisemblance des scénarios. La figure suivante (Fig. 3.2.h) tente de synthétiser le passage de la démarche prospective où la dimension spatiale est intégrée au processus, tant lors de

la phase préalable à la construction des scénarios qu'au cours de la phase de production des connaissances par l'usage de modèles spatiaux. La participation peut intervenir à n'importe quelle étape (rectangle) de cette démarche itérative. Souvent, les travaux de recherches s'arrêtent à la fin de la première boucle, dès que les développements méthodologiques ont apportés leurs fondamentaux. Dès que l'analyse comparative des résultats des scénarios est restituée aux acteurs, on passe dans le domaine de la recherche appliquée.

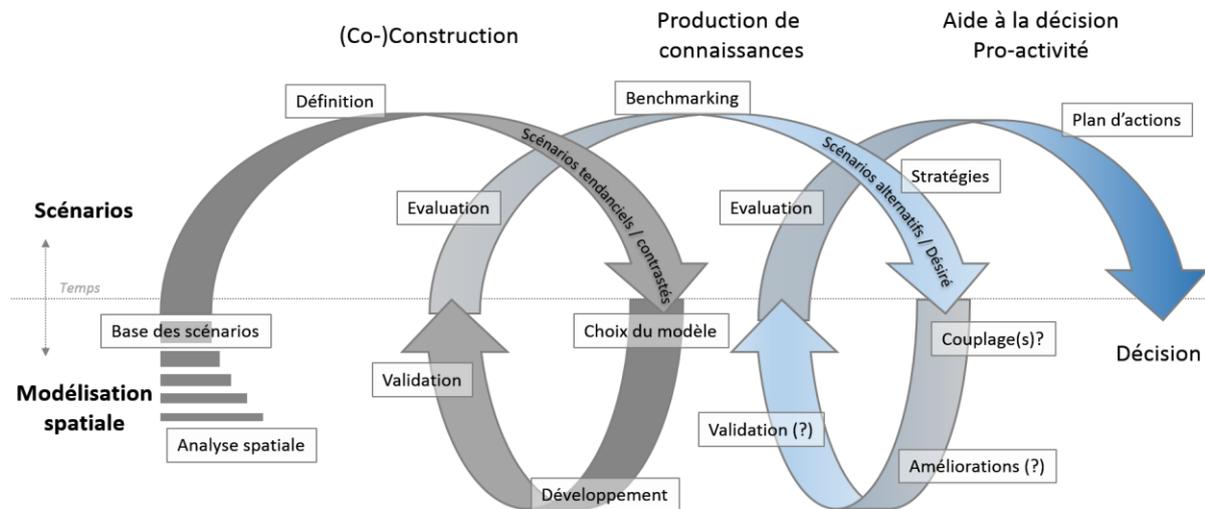


Figure 3.2.h. Apports de la dimension spatiale à la prospective : essai de synthèse

Liste des publications concernées (par ordre chronologique)

- Houet T.** et Gaucherel C., 2007, Simulation dynamique et spatialement explicite d'un paysage agricole bocager : Validation sur un petit bassin versant breton sur la période 1981-1998, *Revue Internationale de Géomatique*, vol. 17/3-4, pp. 491-516
- Houet T.**, Hubert-Moy L. et Tyssot C., 2008, Modélisation prospective spatialisée à l'échelle locale : approche méthodologique, *Revue Internationale de Géomatique*, Vol. 18/3, pp. 345-373
- Houet T.**, Hubert-Moy L., Corgne et Marchand J.-P., 2008, Approche systémique du fonctionnement d'un territoire agricole bocager, *L'espace géographique*, Vol. 2008-3, pp. 270-286
- Gaucherel C and **Houet T** (2009) Preface to the selected papers on spatially explicit landscape modelling: current practices and challenges. *Ecological Modelling*, 220(24), 3477-3480
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.06.025>
- Houet T.**, Loveland T. R., Hubert-Moy L., Napton D., Gaucherel C. and Barnes C. (2010) Exploring subtle land use and land cover changes: a framework based on future landscape studies, *Landscape Ecology*, 25(2), 249-266,
<http://dx.doi.org/10.1007/s10980-009-9362-8>
- Houet T.**, Verburg P. and Loveland T. (2010), Monitoring and modelling landscape dynamics, *Landscape Ecology*, 25(2), 163-167 <http://dx.doi.org/10.1007/s10980-009-9417-x>
- Mas JF, Kolb M, **Houet T**, Paegelow M, Camacho Olmedo MT (2011) Eclairer le choix des outils de simulation des changements des modes d'occupation et d'usages des sols. Une approche comparative. *Revue Internationale de Géomatique*, n°3, 405-430.
- Houet T.**, Hubert-Moy L. and Tyssot C., (2011) Fine scale spatialised prospective modelling - a methodological approach. Application to water management in Brittany, *Revue Internationale de Géomatique*, vol. 21, pp. 67-93
- Gourmelon F., **Houet T.**, Voiron C. et Joliveau T. (2012) La géoprospective. Points de vue conceptuels et applicatifs de l'apport du spatial à la prospective. *L'Espace Géographique*, n°2-2012
- Gaucherel C., Boudon F., **Houet T.**, Castets M. and Godin C. (2012) Understanding patchy landscape dynamics: Towards a landscape language, *PLoS ONE*, 7(9): e46064. doi:10.1371/journal.pone.0046064
- Paegelow M., Camacho Olmedo M.T., Mas J.M., **Houet T.** and Pontius R.G. (2013). Land change modeling: moving beyond projections. *International journal of Geographical Information Science*, Vol. 27, No. 9, 1691–1695, <http://dx.doi.org/10.1080/13658816.2013.819104>

- Caillault S., Delmotte S., Kédowidé C., Mialhe F., Vannier C., Amblard F., Bécu N., Gautreau P., Etienne M. and **Houet T.** (2013) Assessing the influence of social and economical networks on land use and land cover changes: a neutral model based approach, *Environmental Modelling and Software*, vol.45, pp.64-73
<http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.11.003>
- Houet T.**, Schaller N., Castets M., Gaucherel C., (2014) Improving the simulation of fine scale landscape changes coupling top-down and bottom-up land use and cover changes rules. *International Journal of Geographical Science*. 28(9), 1848-1876, <http://dx.doi.org/10.1080/13658816.2014.900775>
- Gaucherel C., Houllier F., Auclair D., **Houet T.** (2014) Dynamic landscape modelling: towards a unifying theory? *Living Reviews in Landscape Research*. 8, <http://www.livingreviews.org/lrlr-2014-2>
- Houet T.** et F. Gourmelon (2014) La géoprospective – Apport de la dimension spatiale aux approches prospectives, *Cybergeo*, 8 p., <http://cybergeo.revues.org/26194>
- Mas J.F., Kolb M., Paegelow M., Camacho Olmedo MT, **Houet T.** (2014) Modelling Land use / cover changes: a comparison of conceptual approaches and softwares. *Environmental Modelling and Software*, Vol. 51, pp. 94-111, <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.09.010>
- Paegelow M., Camacho Olmedo M.T., Mas J.F., **Houet T.**, (2014) Benchmarking of LUCC modelling tools by various validation techniques and error analysis, *Cybergeo*, n°701, <http://cybergeo.revues.org/26610>
- Houet T., Vacquié L., Sheeren D., (In press) Evaluating the spatial uncertainty of future land abandonment in a mountainous valley (Vicdessos, Pyrenees - France): insights from model parameterization and experiments. *The Journal of Mountain Science*
- Houet T.** (2015), Usages de modèles spatiaux pour la prospective, *Revue Internationale de Géomatique*, Vol. 25/1, pp. 123-143.
- Doukari O., Aguejdad R., **Houet T.** (Sous presse) SLEUTH* : un modèle d'expansion urbaine pour une approche scénario-dépendante. *Revue Internationale de Géomatique*.
- Houet T.**, Marchadier C., Bretagne G., Moine M.P., Aguejdad R., Viguié V., Bonhomme M., Lemonsu A., Avner P., Hidalgo J., Masson V. (Submitted-a). Linking modeling and narrative approaches to simulate long-term urban evolution: an integrated method to build urban scenarios for climate adaptation. *Environmental Modelling and Software*
- Houet T.**, Doukari O, Aguejdad R., Clarke K. (Submitted-b), A non path-dependent model for projecting contrasting urban growth futures, *Cybergeo*
- Vacquié L., **Houet T.**, Sheeren D., de Munnik N., Roussel V., Waddle J., (Submitted) Adapting grazing practices to limit the reforestation of mountainous summer pastures: an agent-based model (SHIELD), *Environmental Modelling and Software*

3.3 Etalement urbain et climat : caractérisation du climat urbain et scénarios prospectifs



Force est de constater l'émergence des problématiques scientifiques, en France, liées aux milieux urbains au cours de cette dernière décennie. Les canicules de 2003 et 2006 ont mis en avant les problématiques de santé publique, liées notamment au confort thermique des populations âgées et infantiles, qui résultent des interactions entre ville et climat. L'îlot de chaleur urbain en est une des expressions les plus connues.

Aujourd'hui, l'atténuation et l'adaptation aux changements climatiques constituent, depuis les lois Grenelle 1 et 2, de nouvelles prérogatives à prendre en compte dans l'aménagement urbain. L'exploration du futur apparaît dès lors comme une étape quasi-indispensable pour aider ou orienter les décideurs dans la définition des stratégies d'aménagement du territoire qui soient efficaces à moyen / long terme tels que les SCoT (Schéma de Cohérence Territoriaux), les SRCAE (Schéma Régional Air, Climat, Energie), etc.

Toutefois, afin de pouvoir mieux appréhender les impacts des changements urbains futurs (étalement, morphologie, matériaux...) il est nécessaire de bien appréhender et caractériser les interactions entre les milieux urbains et le climat.

Cette thématique a été abordée dans le cadre des projets PIRVE Hétérogénéité climatique, paysagère, sociale (Resp. S. Haouès-Jouve) et RTRA ACCLIMAT (Adaptation au changement climatique de l'agglomération Toulousaine – Resp. V. Masson). De ces projets sont nées des collaborations fructueuses avec Météo-France et le laboratoire LISST. C'est également dans ce contexte que des recherches post-doctorales ont été lancées (R. Aguejdad, O. Doukari), et plus récemment une thèse de doctorat (D. Takou, Université de Lomé, Togo) dont le but est d'explorer l'évolution future d'une ville africaine, où l'évolution démographique diffère grandement de celle des villes du vieux continent.

3.3.1 Caractérisation des interactions milieux / climat à différentes échelles

L'augmentation des températures nocturnes liée aux îlots de chaleur urbain (ICU) pourrait faire doubler en moins de 20 ans la mortalité attribuable à la chaleur dans les grandes agglomérations (Kalstein and Green, 1997 ; Besancenot, 2002 ; Tan et al., 2010). En France, la surmortalité lors de la canicule de 2003 fut d'environ 40% dans les petites villes ou les villes moyennes, de 80% à Lyon, et de 141% à Paris (Laadi et al. 2012). Il est donc essentiel d'anticiper les conséquences sanitaires de l'effet couplé des ICU et des vagues de chaleurs dans les grandes villes (Dousset et al, 2011). En effet, aux Etats-Unis, les vagues de chaleur ont engendré des fortes tensions sur les énergies allant jusqu'à des coupures généralisées d'électricité, augmentant d'autant la vulnérabilité des populations dont le confort thermique dépend essentiellement de la climatisation. Face à cette situation, de profonds changements du cadre législatif, notamment avec les lois Grenelle, ont amené à une meilleure prise en compte du climat urbain dans l'aménagement de la ville. Ainsi, les collectivités font désormais face à la problématique d'aménager les villes de façon à limiter voire réduire les effets de l'urbanisation sur l'inconfort thermique, alors que toute extension ou densification de la ville (suivant les normes actuelles) a des effets négatifs sur l'ICU (Aguejdad et al. 2012).

La caractérisation des interactions milieux urbain / climat est indispensable si l'on souhaite appréhender les conséquences futures possibles de l'étalement urbain sur le confort thermique. Une des hypothèses retenues suppose l'influence prépondérante de la composition paysagère sur le confort thermique. Cette hypothèse a été testée à deux échelles : celles de l'agglomération et celles d'un quartier.

A l'échelle de l'agglomération, l'objectif a consisté à mettre en relation les paysages urbains et la variabilité climatique urbaine. En 2004, le projet de recherche CAPITOU (Masson et al. 2008) a permis d'acquérir des données climatologiques précises pour une année complète sur 26 stations réparties sur toute l'agglomération. A l'aide de données de télédétection et altimétriques, il a été possible de classer chacune d'elle selon la nomenclature des *Urban Climate Zones* (UCZ) proposée

par Oke (2004). Il a ainsi été possible de calculer le taux de surfaces imperméables à partir de la classification des types d'occupation du sol (Fig. 3.3.a.) et le rapport d'aspect (Fig. 3.3.b.) qui constituent deux des trois indices utilisés pour cette classification, pour des rayons de 100, 250 et 500m autour des stations.

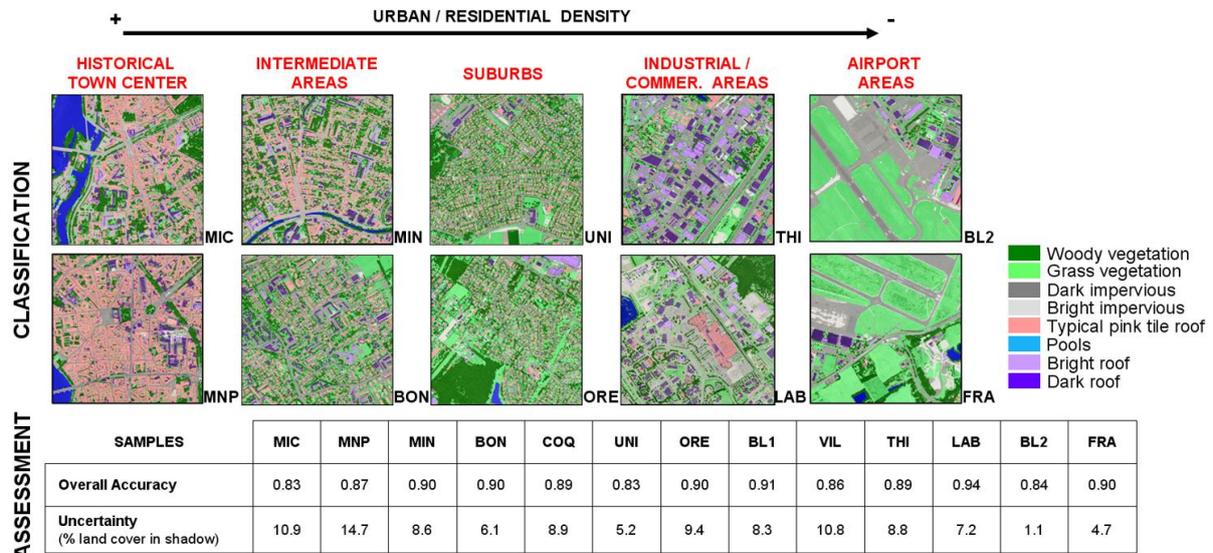


Figure 3.3.a. Classifications des types d'occupation des sols pour les stations : MIC (Saint-Michel), MNP (Monoprix), MIN (Minimes), BON (Bonnetoy), UNI (Union), ORE (Saint-Orens), THI (zone Thibault), LAB (Labège), BL2 (Blagnac 2) et FRA (Francazal) et leur évaluation. (Source : Houet and Pigeon, 2011)

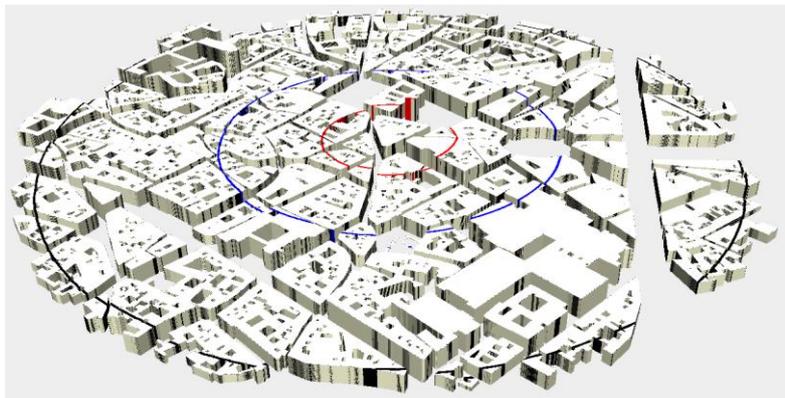


Figure 3.3.b. Exemple visuel du calcul du rapport d'aspect dans des rayons de 100, 250 et 500m autour des stations et qui représente l'effet « canyon » de la morphologie urbaine. Il est égal à la surface des façades des bâtiments divisée par 2 fois la surface des rues.

Une fois ces indicateurs calculés, chaque station s'est vue affectée une classe d'UCZ qui était cohérente avec le type de quartier concerné malgré le fait que l'indice de rugosité n'ait pas été pris en compte. L'étape suivante a consisté à caractériser le « comportement thermique » des UCZ les unes par rapport aux autres à l'aide de mesures réalisées. En hiver, pour les températures les plus froides (la nuit), l'effet de l'ICU est clairement visible avec des températures moyennes en centre-ville (UCZ2) toujours plus fortes que dans les périphéries (autres UCZs). Ces différences de températures sont plus ténues entre les zones industrielles et artisanales (UCZ4), les zones périurbaines pavillonnaires denses (UCZ5) et peu denses / aéroportuaires (UCZ6) et la campagne (UCZ7) (Fig. 3.3.c haut). En été, pour les températures les plus chaudes (de jour), on observe le même phénomène à la différence que les faubourgs (UCZ3) sont légèrement plus chauds que le centre-ville (Fig 3.3.c bas, Fig. 3.3.d). Ceci s'explique a priori par l'effet canyon plus prononcé dans le

centre historique qui limite l'influence du rayonnement solaire incident sur l'ensemble des façades (ombrages).

Tmin Winter	UCZ3	UCZ4	UCZ5	UCZ6	UCZ7
UCZ2	+0.41° ±0.04	+0.95° ±0.09	+1.1° ±0.04	+1.15° ±0.07	+1.12° ±0.07
UCZ3		+0.47° ±0.05	+0.7° ±0.04	+0.7° ±0.04	+0.66° ±0.05
UCZ4			+0.17° ±0.05	+0.23° ±0.06	+0.19° ±0.06
UCZ5				+0.03° ±0.04	+0.01° ±0.04
UCZ6					-0.03° ±0.06
Tmax Summer	UCZ3	UCZ4	UCZ5	UCZ6	UCZ7
UCZ2	-0.16° ±0.05	+0.41° ±0.06	+0.35° ±0.04	+0.58° ±0.05	+0.75° ±0.05
UCZ3		+0.55° ±0.04	+0.52° ±0.03	+0.76° ±0.04	+0.9° ±0.04
UCZ4			-0.03° ±0.03	+0.20° ±0.04	+0.34° ±0.05
UCZ5				+0.23° ±0.02	+0.39° ±0.02
UCZ6					+0.15° ±0.04

Colder
 Equal
 Hotter ($\leq +0.25^\circ$)
 Hotter ($\leq +0.5^\circ$)
 Hotter ($\leq +0.75^\circ$)
 Hotter ($\geq +0.75^\circ$)

Figure 3.3.c. Différences moyennes de températures entre les UCZ en hiver pour les températures nocturnes (haut) et en été pour les températures de jour (bas)

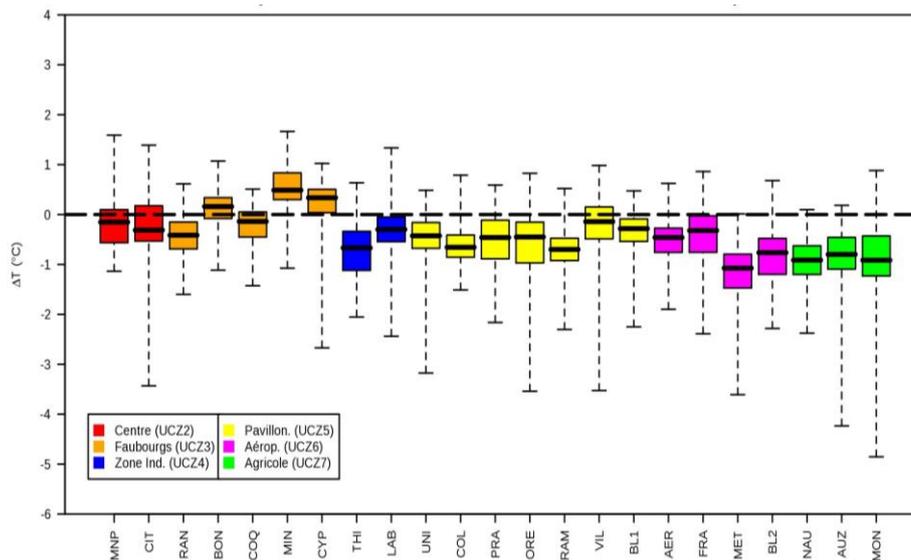


Figure 3.3.d. Boîtes à moustaches montrant les différences de températures des stations CAPITOUL par rapport à la station de référence (MIC) située en centre-ville en situation estivale et de jour. (Source : Houet and Pigeon, 2011)

A une échelle plus fine, celle d'un quartier péri-urbain (appartenant à la classe UCZ5 d'après la classification de Oke), l'objectif a consisté à rechercher des corrélations entre des mesures fines de température de l'air acquises le long d'un parcours réalisé en vélo (le matin, le midi et le soir) (Fig. 3.3.e) et les types de paysages périurbains. Une approche experte a permis ainsi de délimiter différents types d'unités paysagères dont la composition a été déterminée à l'aide d'une classification des types d'occupation du sol (Fig. 3.3.f).

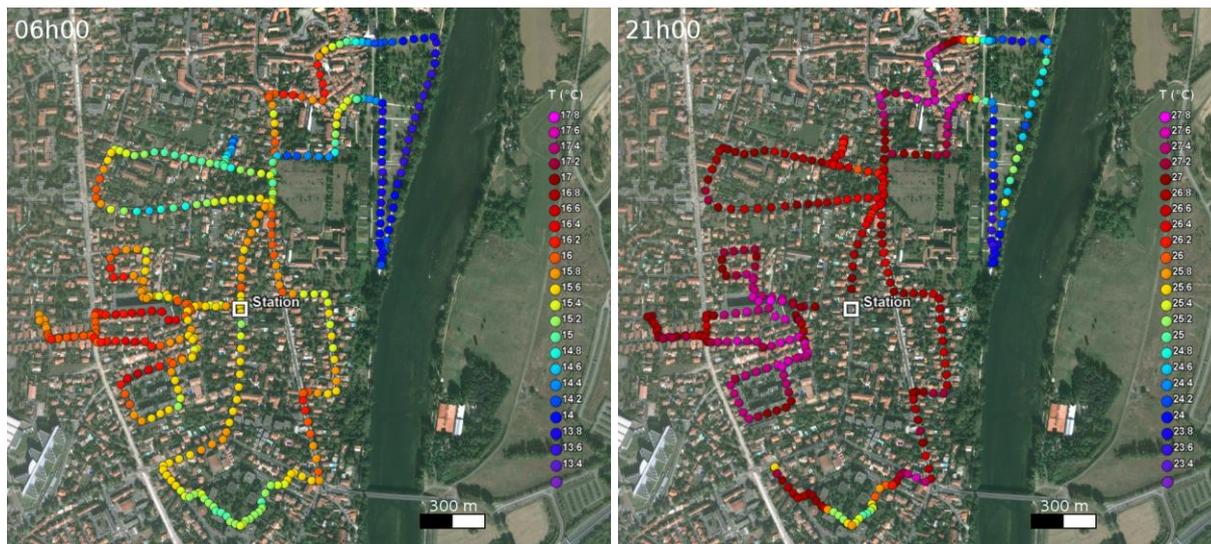


Figure 3.3.e. Mesures de températures de l'air acquises en vélo, le long d'un parcours dans la commune de Blagnac, le 3 juin 2009 entre 6h00 et 7h00 du matin (à gauche) et entre 21h00 et 21h30 le même jour. Trois instruments de mesures différents ont permis d'acquérir des données précises, en quasi temps réel (temps de réponse inférieur à la seconde) avec une précision comprise entre 0.2 et 0.5°C. (Source : Lemonsu et al. Submitted)

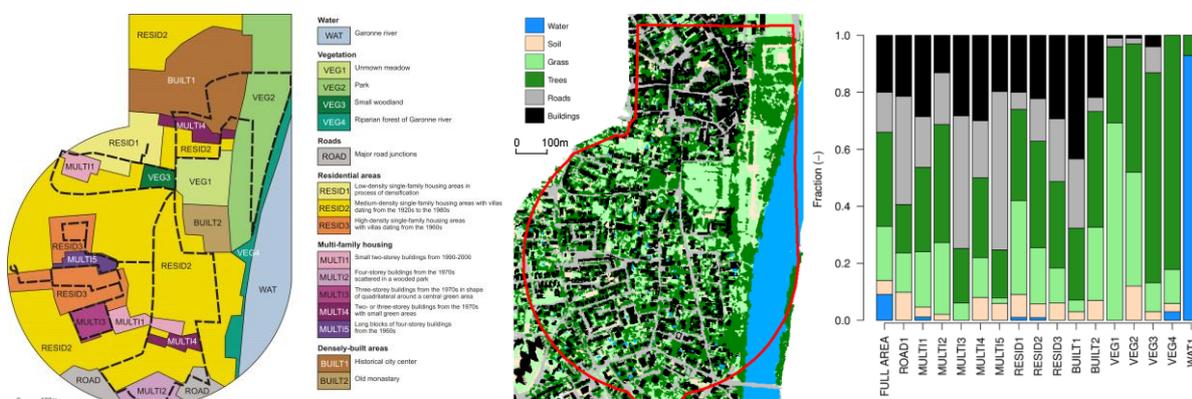


Figure 3.3.f. A gauche : Unités paysagères urbaines identifiées par une approche experte au sein du l'UCZ5 BLA (projet CAPITOU). A droite : classification des types d'occupation des sols et composition des unités paysagères. (Source : Lemonsu et al. Submitted)

L'analyse a consisté dans un premier temps à évaluer, pour chaque unité paysagère, la corrélation entre chaque type d'occupation du sol présent dans un rayon de 25 m autour du point de mesure et les températures acquises le matin et le soir. En effet, la variance des données de température acquises le midi, pour chaque unité paysagère, était trop importante pour pouvoir réaliser cette analyse. Les points de mesure pour lesquels l'aire comprise dans un rayon de 25 m est à cheval sur plusieurs unités paysagères, ont été retirés de l'analyse. Seules les unités pour lesquelles un nombre de points de mesure suffisant, permettant d'assurer la significativité des analyses statistiques, ont été considérées.

Les résultats ont mis en évidence que le matin, la température diminue avec la fraction de couvert naturel (ou augmente avec la fraction surfaces imperméables). Néanmoins, le noyau historique de la ville de Blagnac est caractérisé par des températures plus basses que dans certaines zones résidentielles, alors qu'il présente moins de verdure. Cette différence pourrait être expliquée par les effets d'ombre qui limitent la pénétration du soleil dans les rues étroites du centre-ville, et par conséquent le réchauffement de l'air. En soirée, les coefficients de corrélation linéaire sont

élevés, en particulier pour les fractions de bâtiments ($R^2 = 0,79$) et de couvertures naturelles ($R^2 = 0,77$) (Fig. 3.3.g). Plus l'unité de paysagère est densément construite, plus la température est élevée. Au coucher du soleil, le dégagement de chaleur par les infrastructures urbaines empêche le refroidissement nocturne.

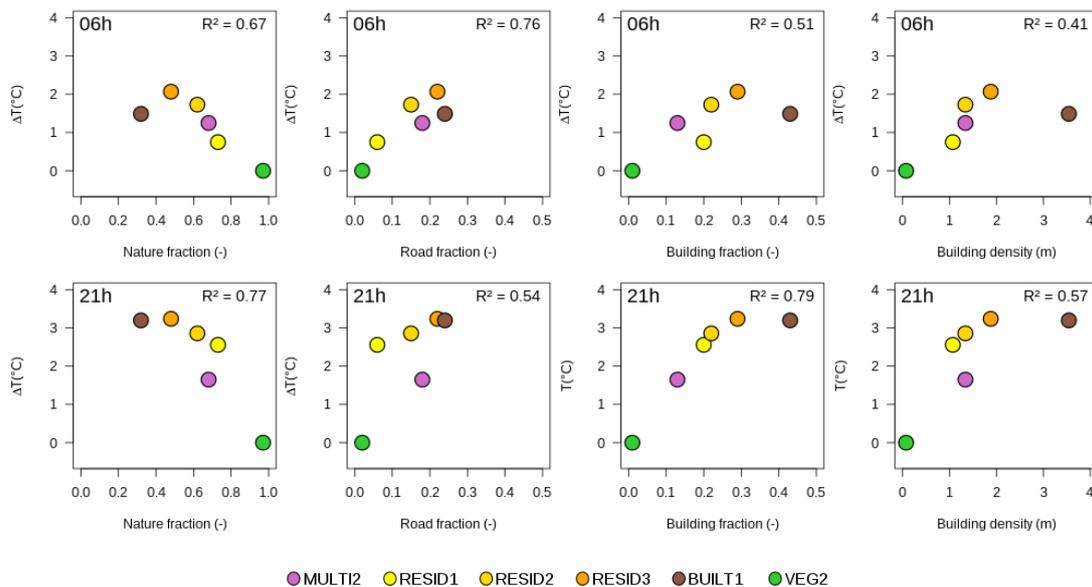


Figure 3.3.g. Corrélation entre les types d'occupation du sol et les températures mesurées pour chaque unité paysagère traversée. (Source : Lemonsu et al. Submitted)

Dans un second temps, l'analyse a eu pour objectif de déterminer la contribution respective des facteurs influençant les températures de l'air (fraction de chaque type d'occupation du sol dans un voisinage variant de 5m, 25m et 50m de rayon ; distance à la Garonne ; altitude ; fraction des différentes unités paysagères dans le voisinage) à l'échelle du site d'étude dans son ensemble et pour chaque unité paysagère, à l'aide de méthodes de régression multiples, en s'assurant de retirer les variables auto-corrélées.

A l'échelle du site d'étude, trois variables (distance à la Garonne, fraction de végétation dans un rayon de 25m, fraction d'herbe dans un rayon de 50m) suffisent pour obtenir une corrélation significative (0.74) et expliquer la variabilité de températures du matin et du soir. De plus, les variables les plus corrélées sont toujours liées à la géographie du site (altitude, distance à la Garonne) et à la distribution de la végétation. On peut donc légitimement se demander si les températures sur ce secteur périurbain ne dépendent pas essentiellement de facteurs "globaux" plutôt que de facteurs internes relevant de l'hétérogénéité paysagère ?

A l'échelle des unités paysagères, l'analyse est beaucoup plus complexe. La figure 3.3.h montre bien que ce ne sont pas les mêmes facteurs qui expliquent les différences de température entre les unités paysagères d'une part, et entre le matin et le soir d'autre part, à quelques exceptions près. Par exemple pour BUILT1, les facteurs fortement corrélés sont ceux qui contribuent aux variations de températures au sein de cette unité le matin. Les facteurs relatifs à l'influence de la végétation sont tous corrélés aux variations mesurées le matin. Le soir, aucun de ces facteurs n'est corrélé, ce qui laisse supposé que le réchauffement au cours de la journée s'est homogénéisé à l'échelle de l'unité paysagère. C'est l'inverse pour MULTI2. On peut alors se demander si la hauteur des bâtiments (formes urbaines) n'influe pas sur les températures: des maisons individuelles (basses) ne limitent pas l'influence d'une turbulence atmosphérique prédominante, tandis que des immeubles les limitent et seuls les processus radiatifs contribuent à expliquer la variabilité des températures au sein de cette unité paysagère ?

La comparaison des résultats pour les unités paysagères RESID1, RESID2 et RESID3 laisse supposer que, le matin comme le soir, l'influence de la végétation n'est significative qu'à partir d'une

certain proportion de végétation, ou inversement, qu'elle est significative dès lors que la fraction de surfaces imperméables est faible (inférieure à 25% pour RESID1, supérieure à 35% pour RESID2 et environ 50% pour RESID3). La fraction d'herbe est ce qui les différencie. Au final, déterminer la part contributive des facteurs influant sur le confort thermique reste un exercice délicat car les méthodes statistiques classiques présentent peut-être certaines limites pour différencier les facteurs ayant une influence « globale », c'est-à-dire à méso-échelle, de ceux ayant une influence locale, impactant le micro et/ou le topo-climat.

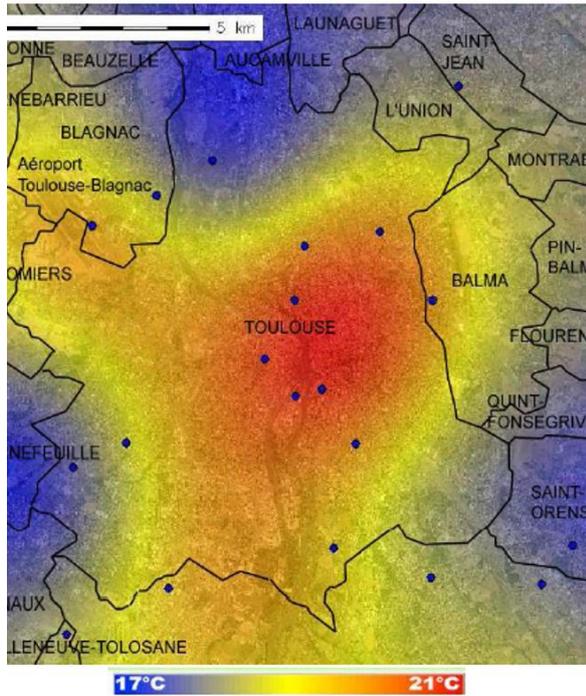
	MATIN						SOIR						
	MULTI2	RESID1	RESID2	RESID3	BUILT1	VEG2	MULTI2	RESID1	RESID2	RESID3	BUILT1	VEG2	
Alti	0.02	0.62	0.00	0.44	0.69	0.39	0.37	0.60	0.02	0.18	0.01	0.11	
Dgar	0.00	0.64	0.07	0.20	0.55	0.26	0.36	0.66	0.03	0.40	0.03	0.19	
B05m	Soil	NA	NA	1.00	NA	NA	NA	NA	0.19	NA	NA	NA	
	Grass	0.13	0.31	0.03	0.02	NA	0.05	0.65	0.01	0.03	NA	0.30	
	Tree	0.26	0.28	0.00	0.01	0.63	0.26	0.16	0.29	0.24	0.01	0.19	0.02
	Natu	0.00	0.06	0.00	0.00	0.63	0.40	0.42	0.26	0.24	0.08	0.19	0.15
	Road	0.01	0.46	0.08	0.00	0.55	NA	0.48	0.04	0.00	0.02	0.23	NA
	Build	0.12	0.05	0.04	0.08	0.00	NA	NA	0.21	0.00	0.04	0.00	NA
B25m	Soil	NA	NA	0.16	NA	NA	NA	NA	0.19	NA	NA	NA	
	Grass	0.10	0.63	0.01	0.00	0.64	0.07	0.56	0.78	0.01	0.03	0.34	
	Tree	0.18	0.45	0.10	0.31	0.28	0.30	0.00	0.56	0.26	0.02	0.13	0.01
	Natu	0.03	0.44	0.11	0.22	0.08	0.38	0.68	0.47	0.39	0.11	0.15	0.05
	Road	0.03	0.59	0.08	0.02	0.14	NA	0.50	0.62	0.09	0.02	0.06	NA
	Build	0.11	0.12	0.00	0.02	0.02	NA	0.57	0.09	0.22	0.00	0.02	NA
B50m	Soil	NA	NA	0.13	NA	NA	NA	NA	0.11	NA	NA	NA	
	Grass	0.10	0.41	0.07	0.02	0.38	0.57	0.56	0.33	0.00	0.04	0.00	0.06
	Tree	0.03	0.04	0.05	0.13	0.08	0.40	0.40	0.00	0.10	0.02	0.00	0.03
	Natu	0.05	0.59	0.18	0.16	0.02	0.13	0.69	0.36	0.15	0.00	0.06	0.01
	Road	0.00	0.39	0.14	0.01	0.54	0.73	0.66	0.26	0.00	0.00	0.13	0.97
	Build	0.18	0.18	0.01	0.03	0.01	0.29	0.46	0.10	0.12	0.00	0.05	0.67
B50m	MULTI2	0.01	NA	NA	NA	NA	NA	0.15	NA	NA	NA	NA	
	RESID1	NA	0.06	NA	NA	NA	NA	0.00	0.88	NA	NA	NA	
	RESID2	0.69	0.05	0.09	0.05	NA	NA	0.13	0.00	0.01	0.00	NA	NA
	RESID3	NA	NA	0.88	0.20	NA	NA	NA	NA	0.80	0.09	NA	NA
	BUILT1	NA	NA	NA	NA	0.36	0.50	NA	NA	NA	NA	0.01	0.79
	VEG2	NA	NA	NA	NA	0.32	0.07	NA	NA	NA	NA	0.01	0.00

Figure 3.3.h. Analyse des corrélations, pour les données du matin et du soir, entre les variables explicatives et les unités paysagères. Les variables explicatives sont : l'altitude (Alti), la distance à la Garonne (Dgar), la fraction de sol nu (Soil), de végétation herbeuse (Grass) et arborée (Tree), de nature (Natu), de routes (Road) et de bâtiments (Build), dans des zones de rayon 5m (B05), 25m (B25) et 50m (B50), la fraction des unités paysagères voisines (Multi2, Resid1, Resid2, Resid3, Built1 et Veg2) dans un rayon de 50m (B50). Les valeurs surlignées présentent les corrélations significatives (>0.3), positives (en rouge) et négative (bleu). (Source : Lemonsu et al. Submitted)

La comparaison des différences de températures, acquises lors des projets CAPITOU et PIRVE, montrent que la caractérisation de ces interactions reste complexe car elles sont non-linéaires et multi-scalaires.

La figure 3.3.i. présente l'ICU tel qu'il a été observé durant l'été 2004 sur l'ensemble la zone cœur de l'agglomération toulousaine et les températures absolues mesurées à l'échelle d'un quartier périurbain (centre historique de Blagnac) en 2009. Ainsi, si la température de l'air présente une variabilité spatiale à une échelle très fine, pouvant atteindre une amplitude de 4°C, elle est similaire à l'échelle de l'ICU moyen. Elle est causée par l'influence de l'environnement urbain : la forme urbaine des quartiers et leur agencement spatial, les taux de surfaces imperméables et végétalisées, le type de végétation, les types de matériaux utilisés en lien avec la période de construction, la proximité à des surfaces en eau, sont autant de facteurs qui influent sur la température de l'air (Haouès-Jouve et al, Sous presse).

Différence = 4°C



Différence = 4°C

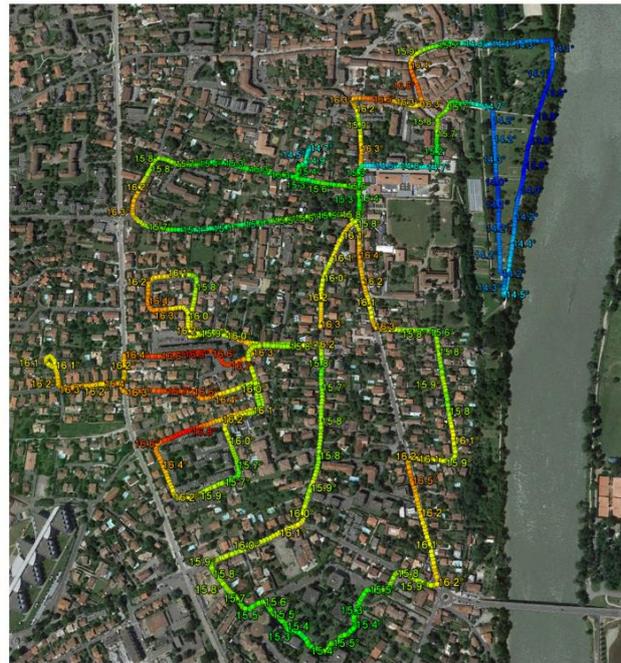


Figure 3.3.i. Variabilité du climat urbain : caractérisation de l'ICU moyen (4°C) à Toulouse grâce aux données de la campagne de mesures scientifiques CAPITOUL (à gauche) ; variations de la température de l'air (4°C) dans un quartier périurbain (Blagnac) caractérisées dans le cadre du PIRVE « Hétérogénéités climatiques, paysagères et sociales ». (sources : Pigeon et al. 2007 ; Haouès-Jouve et al., sous presse)

3.3.2 Scénarios prospectifs et impact sur l'îlot de chaleur urbain

L'étude est réalisée à l'échelle du siècle, pour tenir compte d'une part de l'inertie des modifications structurelles de la ville, et d'autre part des scénarios climatiques issus du 4^{ème} rapport du GIEC (IPCC 2007). Pour adapter les villes au climat de la fin du XXI^{ème} siècle, il est indispensable de commencer dès maintenant à modifier la conception des bâtiments et les stratégies de planification urbaine. Pour répondre à la complexité du système ville, ce travail, réalisé dans le projet ACCLIMAT, s'appuie essentiellement sur la modélisation numérique des processus et leurs interactions (développement urbain et micro-climat urbain, expansion et spatialisation, morphologie urbaine et consommation énergétique), ainsi que sur l'exploration du futur. Sept scénarios contrastés ont été construits de façon experte et participative, puis simulés à l'aide de modèles couplés. Afin d'identifier et d'évaluer des leviers d'action pour l'adaptation et l'atténuation des changements climatiques, l'objectif consistait à embrasser un large panel de futurs possibles, contrastés, représentatifs de la diversité des stratégies possibles (adaptation technologique, aménagement urbain, etc.). L'approche adoptée était basée sur une approche *storyline and simulation* de façon à outrepasser les limites inhérentes aux projections faites à partir de modèles, c'est-à-dire de construire des visions plus imaginatives et contrastées.

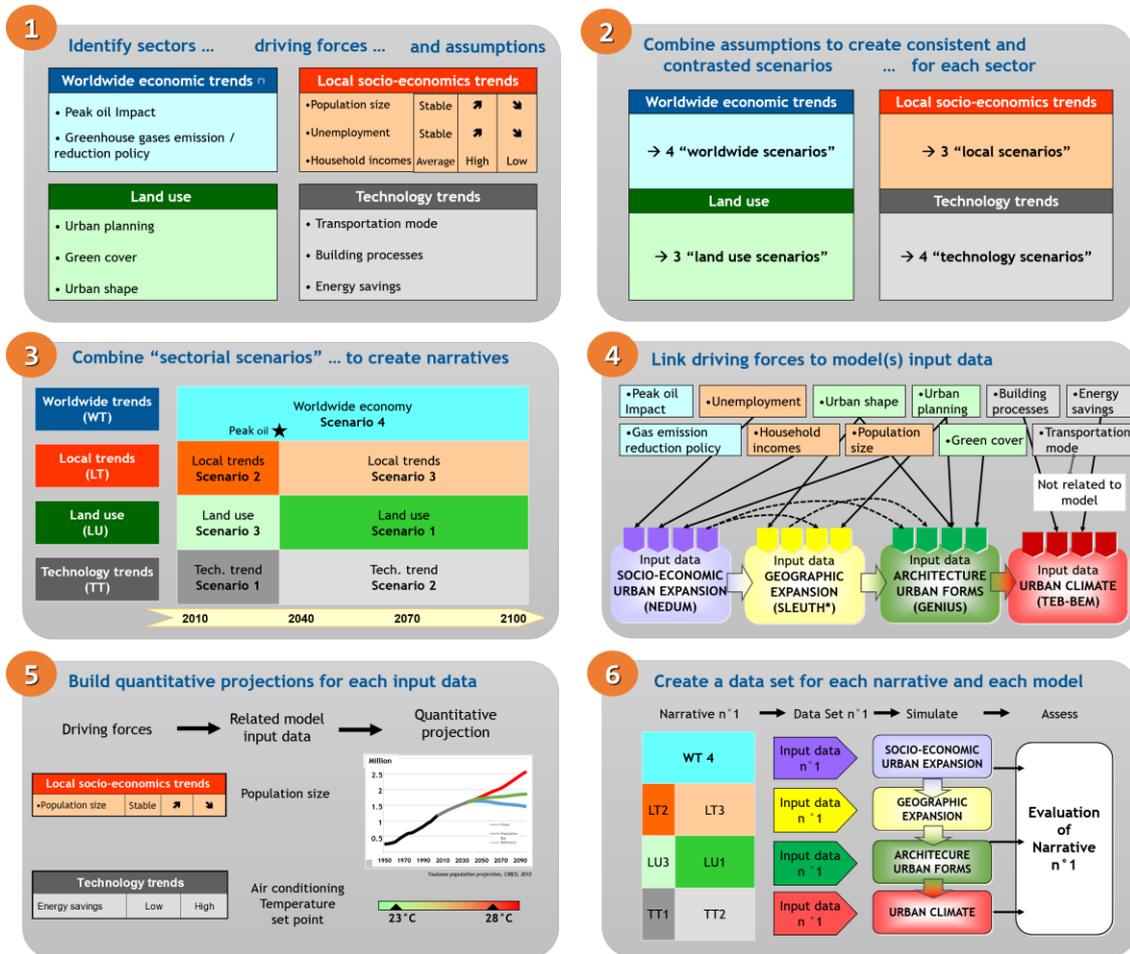


Figure 3.3.j. Méthodologie générale de construction des scénarios prospectifs et de leur traduction en variable d'entrée de modèles. (Source : Houet et al, Submitted)

Un des premiers défis a consisté à définir ces scénarios de façon à ce qu'ils puissent être traduits en variables d'entrée de modèles. La méthodologie générale, structurée en six étapes, est décrite par la figure 3.3.j : (1) Identifier les « secteurs » structurant pour le système étudié, ayant une influence sur celui-ci dans le temps et dans l'espace. Pour chacun de ces secteurs, les variables clés ont été définies et pour chacune d'elles, des hypothèses contrastées ; (2) Construire des scénarios contrastés pour chacun des secteurs, respectant la cohérence des hypothèses entre elles ; (3) Combiner les scénarios sectoriels en respectant leur cohérence, de façon à créer des scénarios systémiques, sous la forme de récits ; (4) Identifier les variables qui sont en mesure d'alimenter les modèles économiques, géographiques, architecturaux et climatiques qui auront été préalablement choisis et couplés au sein d'une plateforme ; (5) Construire et/ou estimer pour chacune des variables / hypothèses des valeurs quantitatives (par exemple, les valeurs seuils définissant la taille moyenne des ménages, la cartographie des trames verte et bleue, les projections démographiques, les températures de confort, etc.) ; (6) Créer un jeu de données propre à chacun des scénarios systémiques qui alimentera la plateforme de modélisation. Le second défi consistait à définir l'architecture du couplage des modèles, sachant que certains, du fait de leur nature (équation différentielle, *process-based*...), pouvaient perturber, une fois couplés, le bon fonctionnement d'autres modèles (Masson et al. 2014).

Au final, sept scénarios ont été construits : Ville Réactive, Ville Réfléchie, Ville Dynamique, Ville Verte, Ville Néfaste, Ville Passive, Business as usual. Les récits sont présentés en annexe 1. Les cartes simulées sont présentées par la figure 3.3.k.

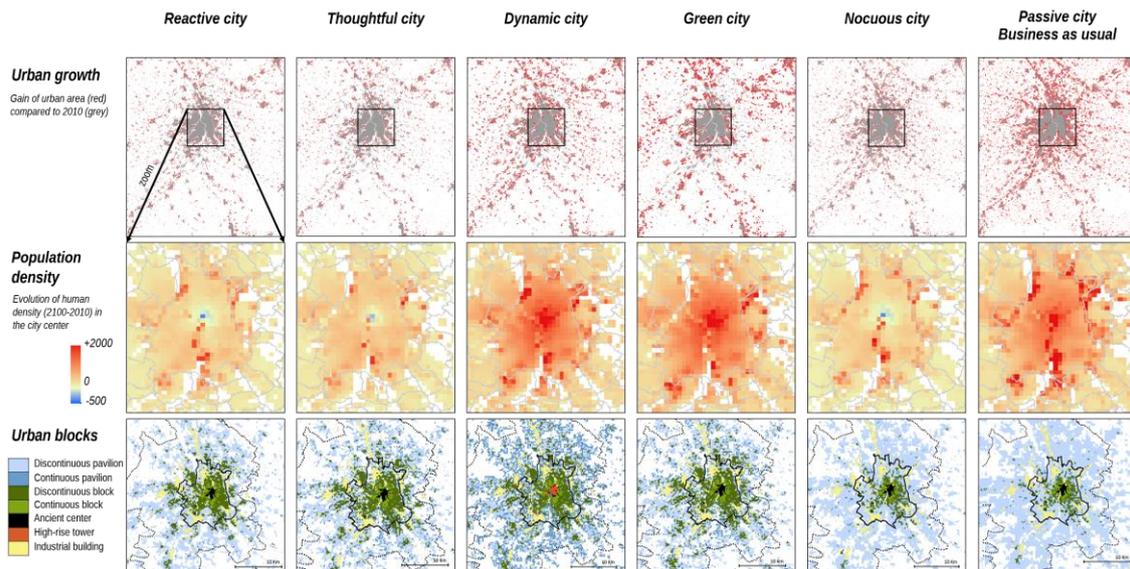
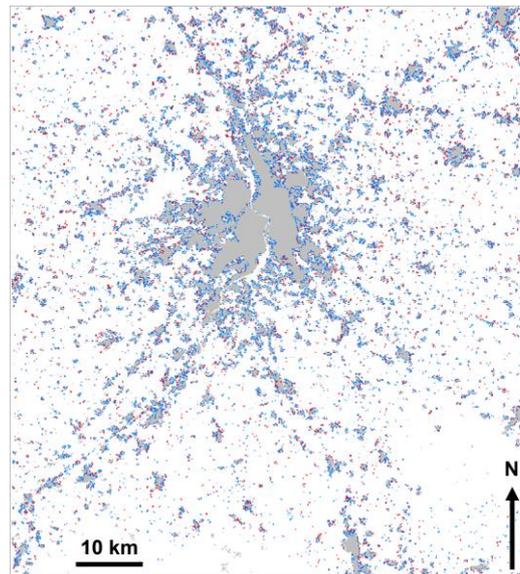


Figure 3.3.k. Etalement urbain, densité de population et morphologie urbaine simulées pour les sept scénarios ACCLIMAT.

Le premier enseignement à retenir de la comparaison des scénarios est que, pour être efficace à coup sûr, une politique ambitieuse d'urbanisation à l'échelle de l'aire urbaine (par exemple pour mener à une ville compacte ou archipel) nécessite d'être mise en œuvre rapidement : en cas de crise économique majeure qui ferait perdre son attractivité à Toulouse d'ici 30 à 40 ans, il serait trop tard pour modifier la forme de l'agglomération ensuite, puisque celle-ci ne serait plus en expansion (les marges de manœuvre seraient donc bien plus limitées) (Fig. 3.3.l). En cas de développement économique, il convient tout autant d'agir vite : en effet, les bâtiments et maisons nouvellement construits dans les prochaines décennies impacteront fortement la forme de la ville jusqu'à la fin du siècle.

En ce qui concerne le climat en ville, le phénomène d'ICU pourra varier, en moyenne, de +1 à 3°C selon les scénarios d'étalement urbain (à climat actuel constant) (Fig. 3.3.m). Couplés aux scénarios de réchauffement climatique, ils peuvent donc varier de +3° à +9° C. Le verdissement de la ville et la rénovation des bâtiments (isolation par l'extérieur et peintures réfléchissantes) auront aussi tendance à limiter l'îlot de chaleur urbain.



■ Artificialized area 2040 – all scenarios
■ Artificialized area 2100 – 3 scenarios with crisis
 (Reactive city, Thoughtful city and Nocuous city scenarios)

Figure 3.3.l. Comparaison de l'extension urbaine en 2040 pour tous les scénarios (rouge) et de l'extension urbaine en 2100 pour les 3 scénarios en situation de crise économique après 2040. Dans le cas de ces scénarios, prévoyant l'extension minimale, il n'y a qu'une très faible différence par rapport à la situation commune en 2040 (Source : Houet et al, Submitted).

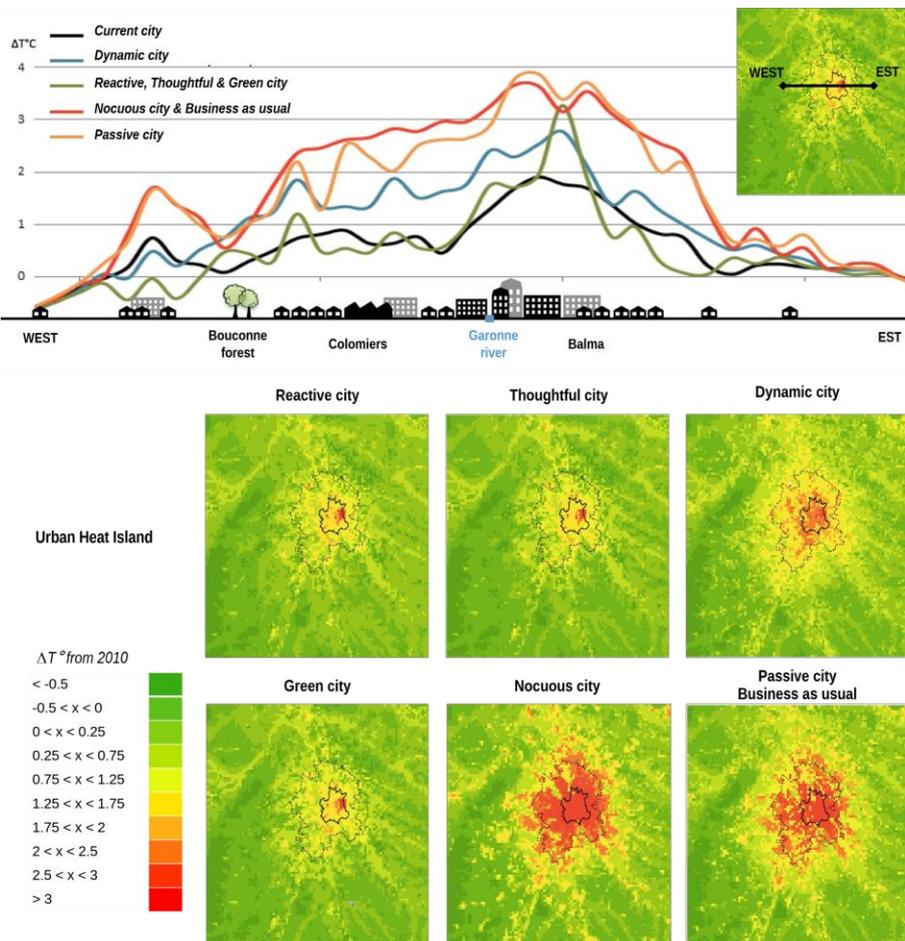


Figure 3.3.m. Gain en îlots de chaleur urbains par rapport à 2010, simulés pour les sept scénarios ACCLIMAT : en haut, les profils ; en bas, les extensions spatiales. (Source : Houet et al, Submitted).

Les consommations énergétiques (normalisées par m²) sont principalement pilotées par les scénarios technologiques du bâti et les scénarios d'usages. Premier constat, le réchauffement climatique a des effets globalement positifs sur la consommation énergétique. Dans la plupart des scénarios, la somme des consommations estivales et hivernales est inférieure à la consommation hivernale actuelle. Néanmoins, en hiver les sources de chauffage sont diverses (bois, pétrole, électricité) alors qu'en été, seul l'électricité est utilisée. Cela pourra conduire à un pic de consommation d'électricité en été. Sachant que l'électricité dépend principalement des ressources en eau (hydro-électricité dans les Pyrénées, nucléaire sur la Garonne), dans un contexte de changements climatiques, cela engendrera vraisemblablement des tensions sur les usages de cette ressource (irrigation, gestion des débits...).

Un levier potentiellement efficace consiste donc à agir pour améliorer les comportements énergétiques des habitants et usagers : un comportement vertueux peut permettre à lui seul de diminuer d'un tiers la consommation de chauffage et par trois celle de climatisation. Rénover les bâtiments permet de faire baisser encore plus le besoin en chauffage. Toutefois, si l'on veut atteindre une diminution de consommation énergétique significative par ce biais avant la fin du siècle (pour atteindre le facteur 4 en 2050 en particulier), il faudra trouver des mécanismes d'incitation pour accélérer la rénovation des bâtiments existants.

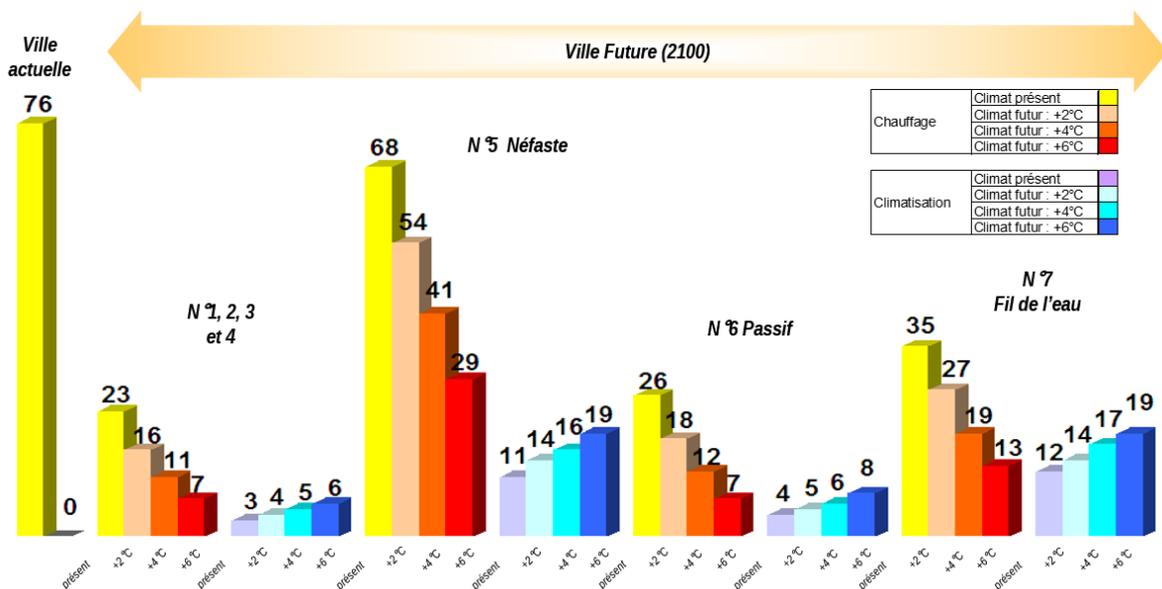


Figure 3.3.n. Consommations énergétiques liées au chauffage et à la climatisation actuelles (à gauche) et pour les sept scénarios prospectifs. (Source : Masson et al. 2014)

3.3.3 Conclusion partielle

La caractérisation des relations et des interactions entre le milieu urbain (forme, composition, agencement spatial) et le climat urbain est fondamentale pour mieux évaluer l'influence des facteurs de changements (planification et aménagement urbain, types de matériaux, influence de la végétation, etc.) sur le confort thermique extérieur des sociétés.

Les recherches en climatologie urbaine ont permis, à l'aide d'approches fondées sur l'observation ou la modélisation, d'identifier les leviers d'actions permettant de limiter l'ICU. A l'échelle de l'agglomération, le contrôle de l'étalement urbain est indispensable. A l'échelle des opérations d'aménagement (parcelle, quartier), un travail sur les formes urbaines et les bâtiments (architecture, matériaux, etc.) est nécessaire. La grille synthétique, proposée ci-après, peut ainsi constituer un tableau de bord dans la définition d'actions de lutte contre l'ICU.

Objectifs	Moyens
Accroître le ratio "Surfaces naturelles / Surfaces artificialisées"	Surfaces en eau et végétation Gérer l'extension urbaine
Réduire l'impact de l'ensoleillement	Ombrages Matériaux de construction et d'isolation
Optimiser la ventilation par le vent	Orientation des rues / bâtiments Ventilation des bâtiments
Réduire le flux de chaleur anthropique	Industrie Trafic routier Bâtiments
Réduire la vulnérabilité des populations	Plans d'alerte Comportements individuels

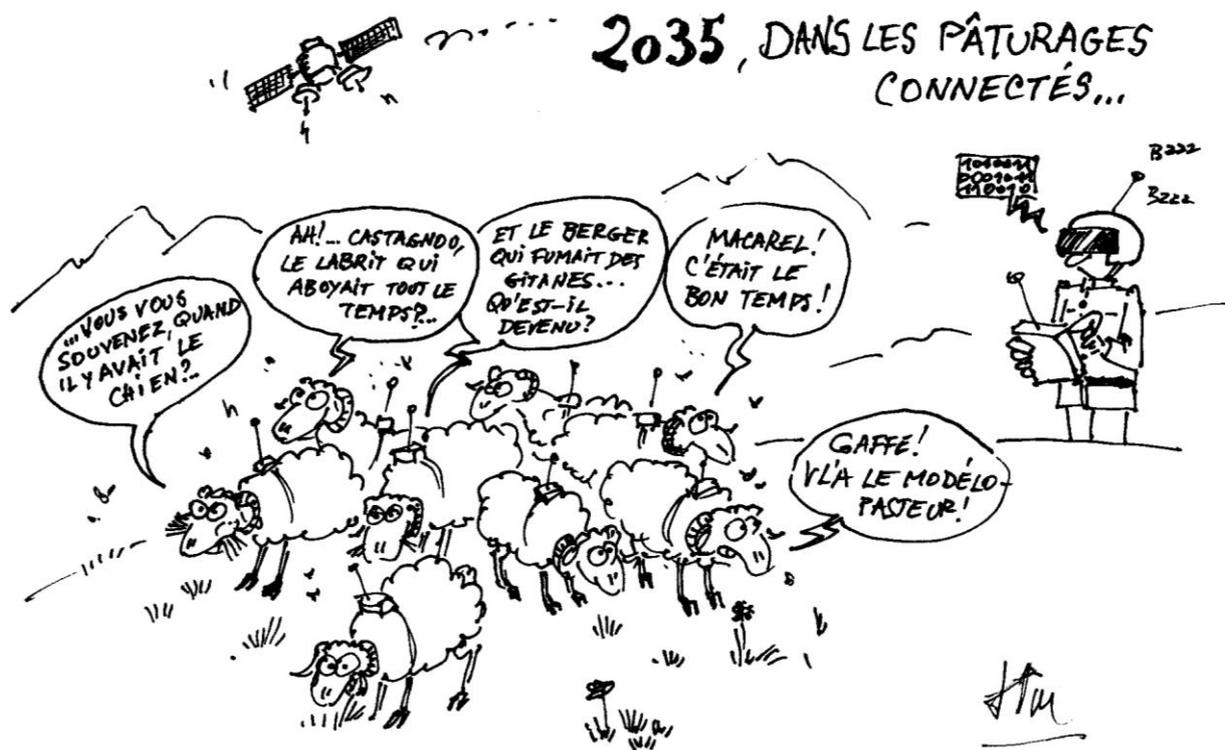
(d'après Hidalgo et Houet, Sous presse)

La prospective a été utilisée ici dans le but d'identifier l'influence respective et/ou combinée de facteurs explicatifs concourant à l'inconfort thermique, au même titre qu'une analyse des résidus réalisée sur des données réelles en statistique, mais suivant une approche exploratoire dans le futur. Elle offre la possibilité d'identifier des leviers d'actions pour lutter contre l'ICU afin d'atténuer et de s'adapter aux changements climatiques, sous un jeu d'hypothèses données. Au regard de la complexité (relations non-linéaires, multi-scalaires...) des interactions entre milieux et climat urbains que les statistiques n'arrivent pas à expliciter totalement, cette approche, même si elle reste approximée, offre de la matière à penser aux décideurs. Plus que des conseils à prendre au pied de la lettre, qu'il conviendrait de ré-analyser selon l'évolution du contexte technologique, politique, ou encore socio-économique, la sensibilisation des acteurs aux répercussions de leurs actions à moyen et long terme (qu'il convient d'envisager de façon systémique) grâce à l'approche quantitative constitue probablement le véritable résultat d'un travail de modélisation prospective. Au final, cela permet de corroborer les résultats quant à l'identification d'un des principaux jalons pour lutter contre les effets des changements climatiques : mettre en adéquation le temps du politique (par exemple, un mandat unique et plus long) avec le temps de l'aménagement.

Liste des publications concernées (par ordre chronologique)

- Houet T.** and Pigeon G. (2011), Mapping Urban Climate Zones And Quantifying Climate Behaviors - An Application On Toulouse Urban Area (France), *Environmental Pollution*, Vol 159, Iss 8-9, 2180-2192, <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2010.12.027>
- Masson V., Marchadier C., Adolphe L., Aguejdad R., Avner P., Bonhomme M., Bretagne G., Briotter X., Bueno B., de Munck C., Doukari O., Hallegate S., Hidalgo J., **Houet T.**, Lemonsu A., Long N., Moine M.P., Morel T., Nolorgues L., Pigeon G., Salagnac J.L., Zibouche K., (2014). Adapting Cities to Climate change: a systemic modelling approach, *Urban Climate*. 10(2), 407-429 <http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2014.03.004>
- Hidalgo J., **Houet T.** (2015) Îlots de chaleur urbains et stratégies d'adaptation des villes face aux changements climatiques: le cas de Toulouse Métropole. Chapitre d'ouvrage POPSU. Sous presse
- Haouès-Jouve S., Beringuier P., Desailly B., **Houet T.**, Lemonsu A., Masson V., Pigeon G., Rouyer A., (à paraître). Climats et modes d'habiter périurbains. Réflexions interdisciplinaires et multiscalaires à partir de l'exemple toulousain. Ouvrage collectif. Programme PIRVE
- Houet T.**, Marchadier C., Bretagne G., Moine M.P., Aguejdad R., Viguié V., Bonhomme M., Lemonsu A., Avner P., Hidalgo J., Masson V. (Submitted). Linking modeling and narrative approaches to simulate long-term urban evolution: an integrated method to build urban scenarios for climate adaptation. *Environmental Modelling and Software*
- Lemonsu A., **Houet T.**, Pigeon G., Dessailly B., Beringuier P., Legain D., Hidalgo J., Gaudio N. (Submitted). Multiscale analysis of variability in temperature and landscaping for a residential area study case, *Landscape and Urban Planning*

3.4 Espaces montagnards pyrénéens et prospective : apports de la dimension spatiale



Les espaces montagnards sont considérés à la fois comme des sentinelles ou des révélateurs des changements d'origine anthropiques et climatiques (Galop, 2014). D'un point de vue méthodologique, ils rassemblent toutes les difficultés dont un chercheur en modélisation prospective puisse « rêver » : le relief contraint fortement la télédétection (nuages, ombres portées, éclairage des pentes, géo-positionnement et ortho-rectification...) nécessaire pour la reconstitution des trajectoires d'évolutions des paysages ; les usages sont multiples (pastoralisme, sylviculture, tourisme, résidentialisation...) et les enjeux associés (risques gravitaires, biodiversité, ressources en eau et autres services écosystémiques) particulièrement prégnants. De plus, leur accessibilité (pour les travaux de terrain) reste parfois difficile et limitée au cours l'année (4 à 5 mois seulement).

L'application de la modélisation prospective à ces milieux a consisté (et consiste encore) à identifier les espaces porteurs d'enjeux, actuels et futurs. L'hypothèse initiale repose sur les dynamiques de végétation, considérées à la fois comme le révélateur des enjeux liés aux usages du sol et le vecteur indispensable pour évaluer les conséquences socio-environnementales de leurs changements. Aujourd'hui, la tendance à l'abandon des espaces montagnards est avérée et les gestionnaires actuels se posent des questions quant aux espaces concernés et aux conséquences possibles, et ce à différentes échelles (vallée, Région, Europe), en témoignent les aides spécifiques apportées aux territoires de montagne pour les activités agricoles, pastorales et sylvicoles (ICHN – Indemnités Compensatoires de Handicap Naturels et sa revalorisation avec la réforme de la PAC DE 2014 par exemple). C'est dans ce contexte que cette thématique a été abordée et explorée dans le cadre des projets de recherches centrés sur l'OHM du Haut-Videssos et le projet ANR MODE RESPYR que j'ai dirigés, et le projet ANR SAMCO auquel je participe. Ainsi, une thèse de doctorat a été réalisée et soutenue en juin 2015 sur le thème de « La modélisation prospective et échelles spatiales : application aux Pyrénées française » (Vacquié, 2015).

En parallèle, des collaborations ponctuelles avec le CESBIO et l'association Moraine m'ont permis de me familiariser un peu plus avec les espaces de plus haute altitude, enneigés toute ou partie de l'année, et de travailler, d'une part, sur les méthodes de reconstitution de dynamiques de la cryosphère (neige, glace) dont les échelles spatiales et temporelles soulèvent de véritables défis (Thèse R. Marti), et d'autre part, sur l'impact des futurs changements d'occupation et d'usage du sol sur les ressources en eau (neige).

3.4.1 La caractérisation des milieux, des trajectoires d'évolution et des facteurs de changement : les enjeux de la quantification

Le suivi des changements d'occupation et d'usage du sol sur un territoire de montagne est un exercice particulièrement délicat. D'une part parce que la montagne concentre toutes les difficultés imaginables pour leur cartographie et d'autre part car les dynamiques d'occupation et d'usage du sol sont encore plus subtiles qu'ailleurs. Les travaux réalisés sur le Haut-Videssos ont permis de rendre compte d'enjeux, tant scientifiques que sociaux, représentatifs des milieux de montagne en général. Néanmoins, précisons que si certains des résultats présentés ci-après avaient déjà été pressentis ou observés, telle que la reforestation des Pyrénées, ils n'avaient pas fait l'objet d'une évaluation quantifiée. Ainsi, si la télédétection a bénéficié d'avancées considérables, la contrainte liée au relief reste une constante, tant pour la caractérisation de milieux d'intérêt écologique (Vacquié et Houet 2012) ou encore des trajectoires d'évolution des paysages (Houet et al, 2012). Néanmoins, pour y parvenir, des méthodes ont été développées et testées, notamment sur d'autres sites, avec succès (Sheeren et al, 2012). Un des jalons méthodologiques consistait à produire des cartes qui gomment les inévitables décalages résiduels de l'ortho-rectification des photographies aériennes aux différentes dates (Fig. 3.4.a.) d'une part, et la validation des classifications réalisées sans l'existence de données de terrain d'autre part. Pour ce faire, une évaluation visuelle a été réalisée en comparant des photographies paysagères et les résultats issus des photographies aériennes acquises aux mêmes périodes (Fig. 3.4.b).

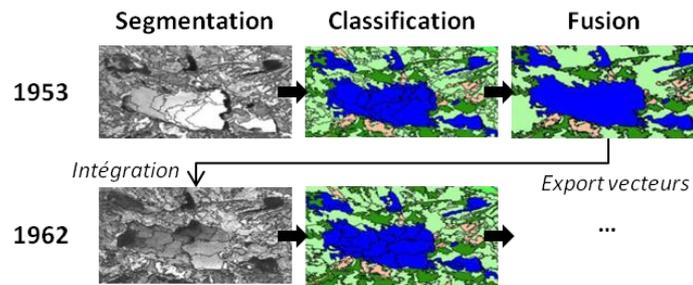


Figure 3.4.a. Intégration de la segmentation de l'année n-1 lors de la classification pour l'année n

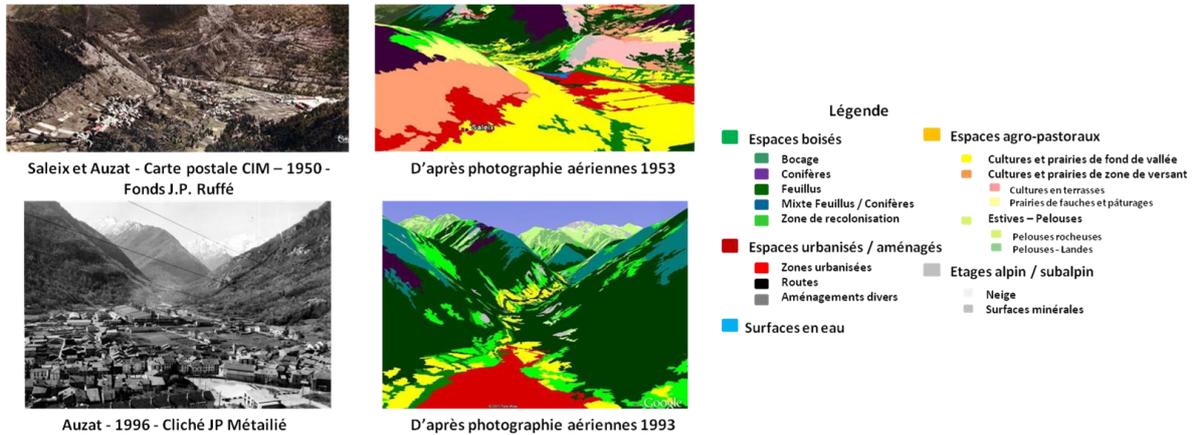


Figure 3.4.b. Méthode de validation des classifications anciennes : comparaison visuelle avec des photographies paysagères prises à des périodes identiques aux prises de vues aériennes utilisées.

Sur le Vicdessos, ces méthodes ont permis de mettre à jour que, dans le domaine des changements d'occupation du sol, les estives constituent les espaces à enjeu aujourd'hui. En effet, la reforestation de ces espaces, notamment les bas d'estives, atteint des vitesses largement sous-estimées (entre 30 et 50 ha/an), similaires à celles observées sur les zones de versants dans les années 1950-70s (Fig. 3.4.c. et 3.4.d. - Houet et al. 2012), période correspondant au paroxysme de la fermeture des zones intermédiaires dans les Pyrénées liée à l'évolution du pastoralisme.

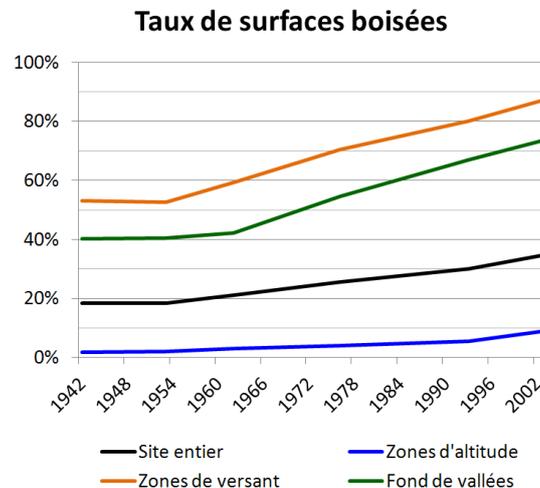


Figure 3.4.c. Evolution des taux de surfaces boisées par zones d'usage sur le Haut-Vicdessos entre 1942 et 2008.

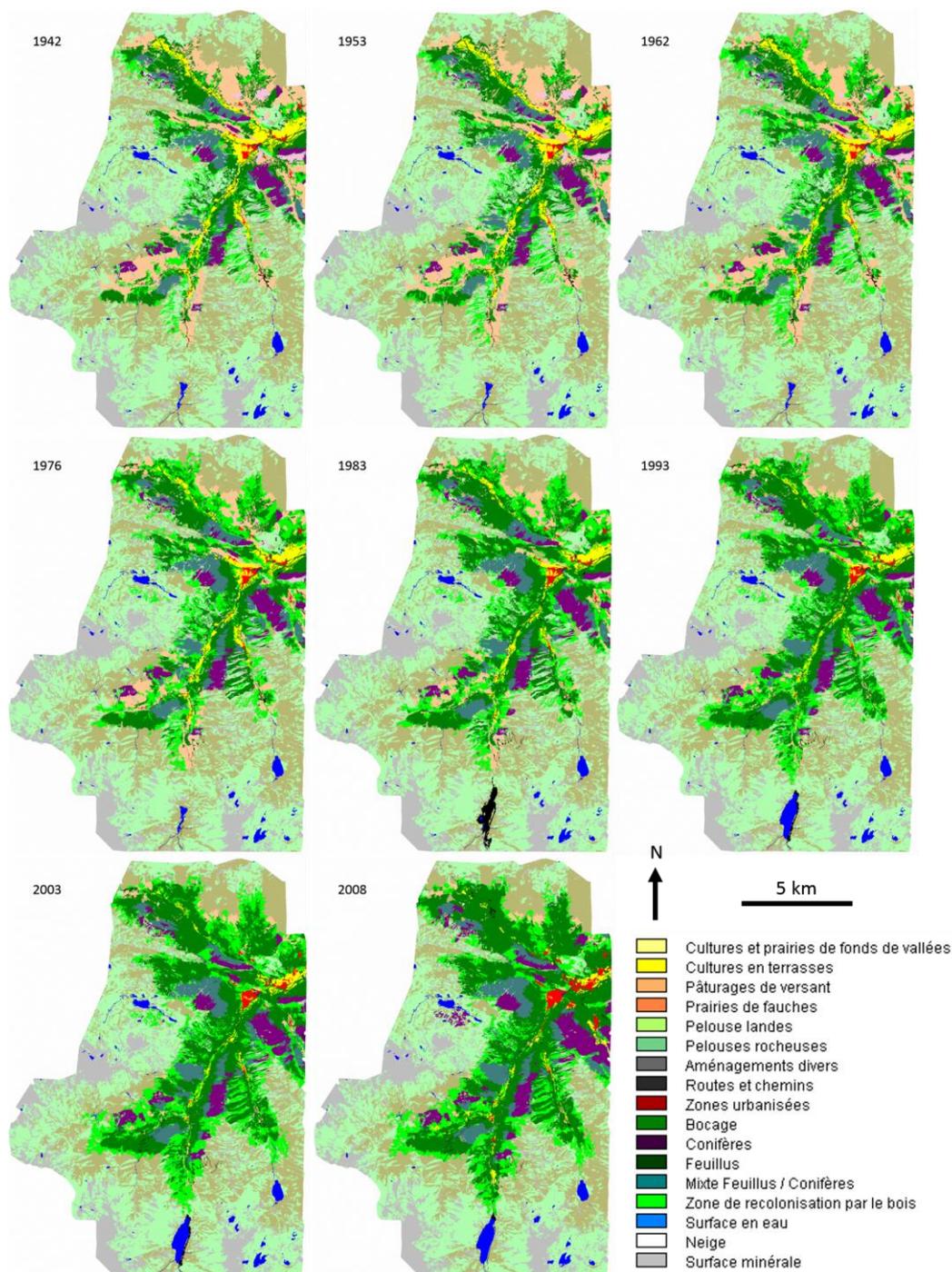


Figure 3.4.d. Evolution des types d'occupation et d'usage des sols sur le Haut-Videssos entre 1942 et 2008.

Deux processus ont été mesurés par cartographie, corroborant les résultats issus des données paléo-environnementales et archivistiques (Galop et al. 2011) : la remontée en altitude des feuillus et la recolonisation par le pin à crochets (notamment sur le secteur de Bassiès). Ces dynamiques sont finalement relativement récentes (depuis les années 1980-90s), mais commencent à être détectables et mesurables par télédétection que depuis la fin des années 2000s (Fig. 3.4.e.). Par exemple, sur le secteur de Bassiès, l'altitude moyenne des feuillus est passée de 1483m à 1528m entre 1983 et 2008 et le nombre de pins détectables (circonférence au sol sup. à 1m) a été multiplié par 5,3 (4275 individus recensés).

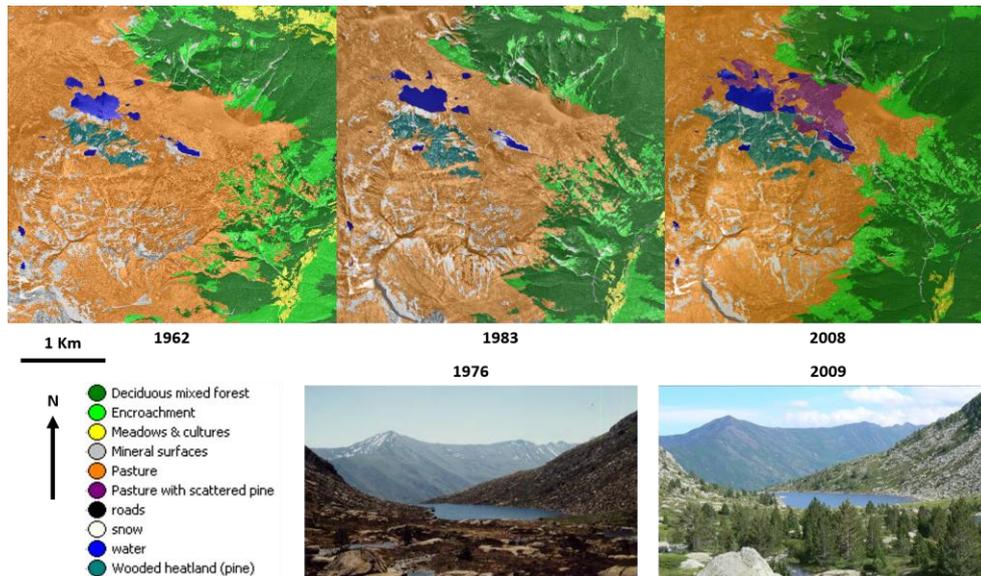


Figure 3.4.e. Evolution de la reforestation sur l'estive de Bassiès.

Les principaux facteurs explicatifs de ces changements sont *a priori* principalement d'origine anthropique. Le rôle des pratiques pastorales sur l'évolution passée et récente des paysages pyrénéen a largement été démontré (Galop et al. 2011, Galop 2014). L'agropastoralisme, par les pratiques (types et conduite des troupeaux) et les usages (feu) que cela sous-tend, constitue le facteur prépondérant des évolutions observées, notamment sur le site de Bassiès. Ainsi, la corrélation entre les productions polliniques des espèces ligneuses (*Juniperus*, *Calluna*, *Pinus*, *Betula*) est forte et inverse avec l'évolution des charges pastorales (Fig. 3.4.f.), concomitantes avec l'évolution des surfaces recolonisées par le pin à crochets observées à Bassiès (Fig. 3.4.e.).

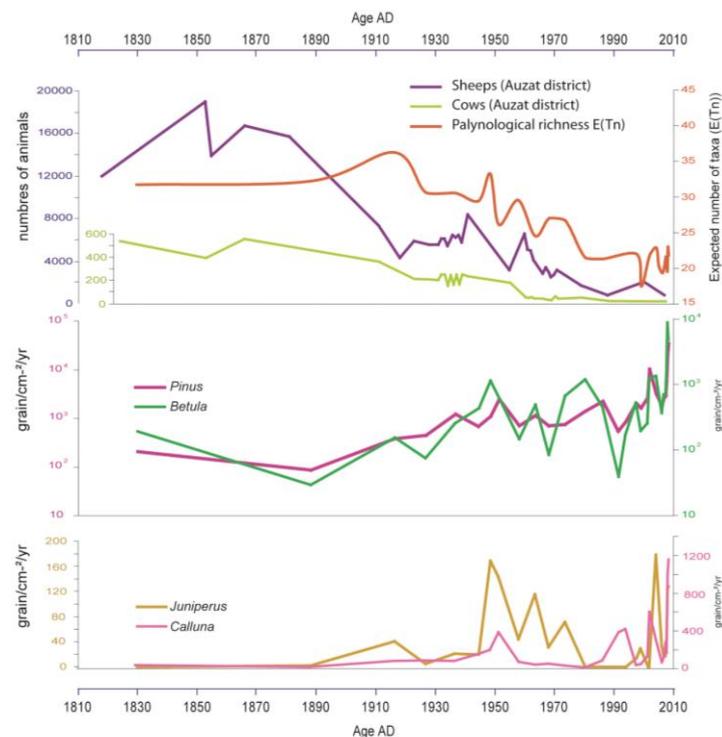


Figure 3.4.f. Co-évolution de la charge pastorale sur la vallée du Vicdessos (en haut) et les relevés polliniques du pin à crochets et du bouleau (milieu), et des genévriers et callunes (en bas) relevés sur l'estive de Bassiès. Les fluctuations des courbes polliniques sont à mettre en relation avec l'histoire des feux, dont la fréquence augmente après les années 1950 (source : Galop et al, 2011)

Une approche originale, utilisant un modèle individu centré et simulant les interactions entre les pratiques pastorales et les dynamiques de végétation, calibré sur une période passée (1993-2008), a permis d'évaluer quantitativement l'impact de ces pratiques sur la limitation de la recolonisation par le pin sur la vallée de Bassiès (Vacquié et al, submitted). Au regard des tendances actuelles, il est illusoire de vouloir la stopper. Néanmoins, l'intérêt de cette approche réside dans sa capacité à estimer : (1) qu'en cas d'abandon total de cette estive, le gain en forêt devrait être de l'ordre de 230 ha entre 2008 et 2050 (Scénario A – Fig.3.4.g.) ; (2) qu'en cas du maintien, voire de la restauration, de la charge pastorale déclarée en 2008, les surfaces en forêt augmenterait d'environ 140 ha, soit 40% de moins que dans le cas précédent (Scénario B – Fig. 3.4.g.) ; (3) que dans le cas d'actions spécifiques de limitation de la reforestation, se traduisant par une augmentation de 10% de la charge pastorale déclarée en 2008, le gain en forêt ne serait plus que de 110 ha (Scénario C – Fig. 3.4.g.). Dans les scénarios B et C, les animaux sont divagants. Les équins et bovins se limitent à la partie peu accidentée de l'estive (quartier 1 – Fig. 3.4.g.) alors que les ovins se distribuent sur l'ensemble des quartiers. Un dernier scénario, prévoyant une modification du mode de conduite des troupeaux, destinée à augmenter localement la pression pastorale une fois tous les 5 ans grâce à la supervision d'un berger tout en conservant une charge pastorale identique à celle déclarée en 2008 (scénario B), engendrerait un gain en forêt similaire au scénario C, soit une limitation de plus de 50% de la reforestation par rapport à l'abandon agropastoral. En résumé, ce type d'approche permet d'approximer quantitativement l'efficacité de certains leviers d'actions et de certaines stratégies de gestion à moyen ou long terme.

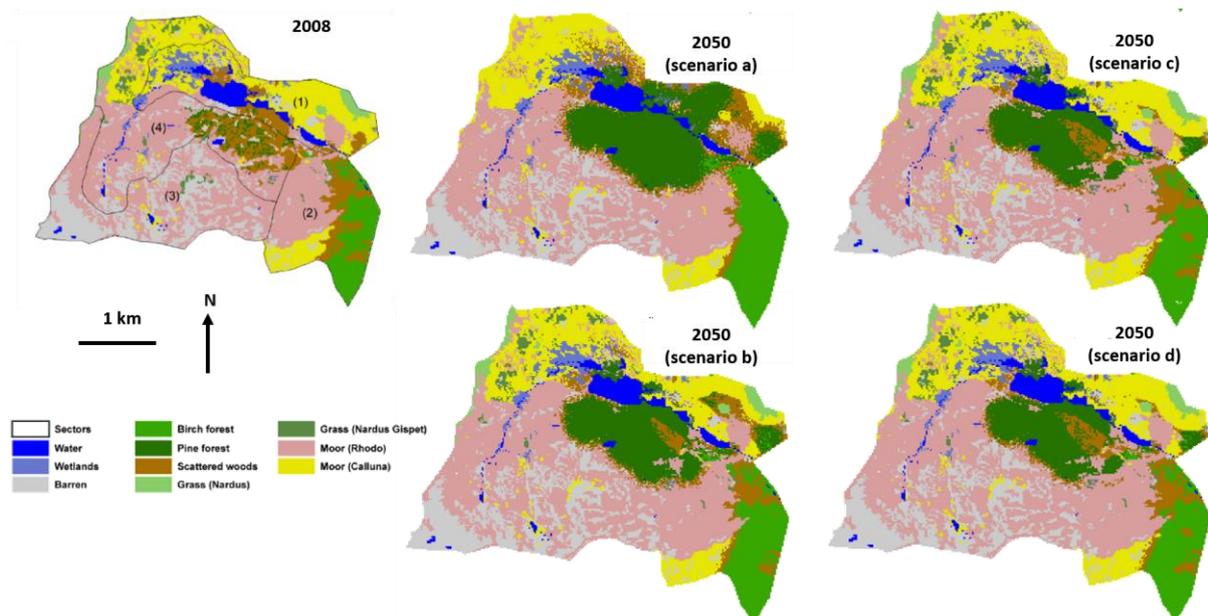
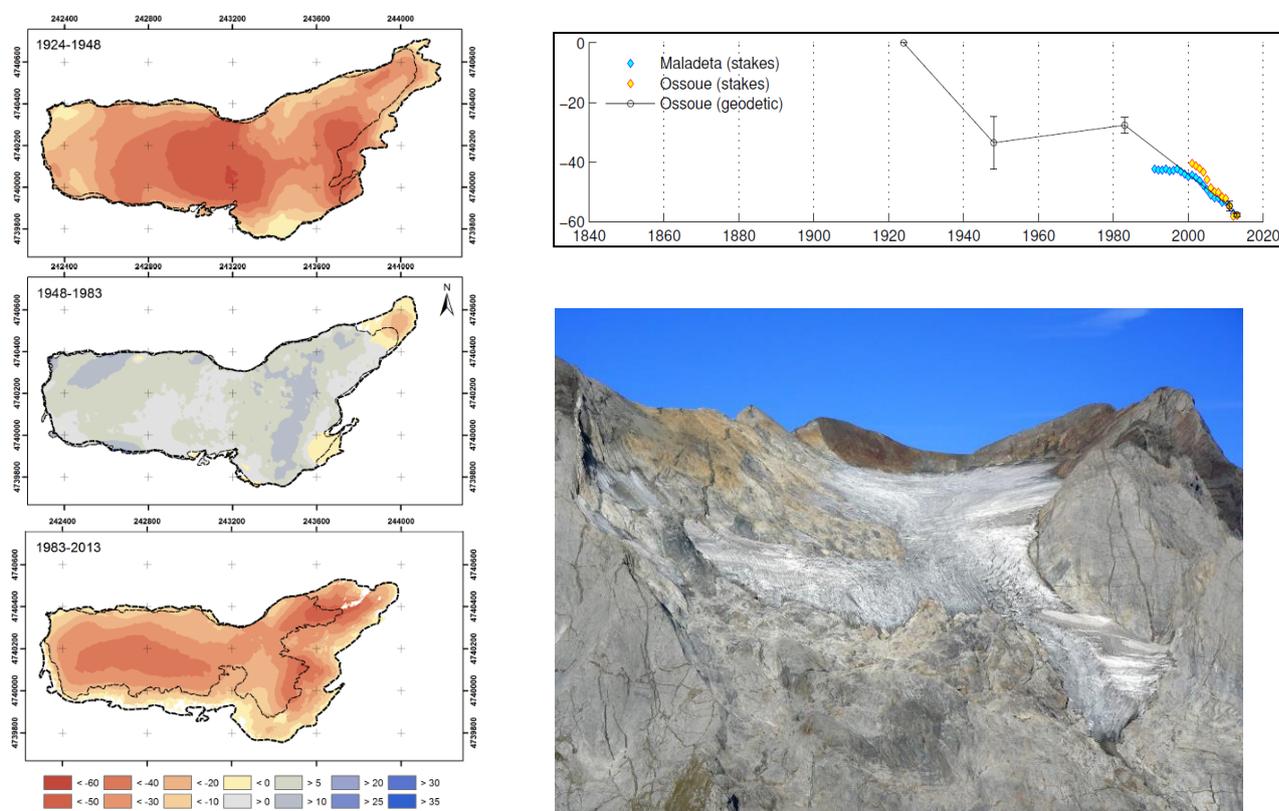


Figure 3.4.g. Evolution des surfaces boisées entre la situation de référence (2008) et la situation en 2050, sur la base de quatre scénarios différents. Le scénario A est un scénario tendanciel où le pastoralisme a disparu. Le scénario B prévoit le maintien du cheptel déclaré en 2008. Dans une perspective de limiter la reforestation par le pin à crochets sur l'estive, le scénario C prévoit une hausse de 10% du cheptel déclaré en 2008 et le scénario D prévoit une charge pastorale identique à celle de 2008 mais la supervision du troupeau par un berger une fois tous les 5 ans pour optimiser la pression pastorale dans certains quartiers (source : Vacquié et al, submitted)

Malheureusement, dans ce type de milieux d'altitude, il est délicat de mettre en évidence le rôle exclusif des changements climatiques sur les dynamiques observées. C'est pourquoi, des recherches ont été initiées, de façon opportune, sur le glacier d'Ossoue, localisé dans les Hautes-Pyrénées. A partir de cartes anciennes fournies par l'Association Moraine, il a été possible d'estimer l'évolution de son volume depuis les années 1920 (Fig. 3.4.h.). La fonte du glacier, à l'échelle du

dernier siècle, est flagrante, entrecoupée d'une période de regain entre la fin des années 1940 et le début des années 1980. De même, dans le cadre de la thèse de Renaud Marti, une accélération du processus de fonte au cours des 10 dernières années a pu être constatée, avec notamment une fréquence non négligeable d'évènements extrêmes (fonte, accumulations neigeuse) – non montrée ici. Ainsi, en termes statistiques, il est possible de constater que la courbe qui témoigne de l'impact des changements climatiques dans les Pyrénées est inversement corrélée avec la courbe des relevés polliniques de la figure 3.4.f., au même titre que celle de l'évolution de la démographie et de la charge pastorale dans la vallée du Vicdessos.



3.4.2 De l'identification des espaces constitutifs d'enjeux actuels et à venir

Les estives

Sur la base des dynamiques observées à l'échelle de quelques vallées pyrénéennes (Houet et al. 2012 ; Vacquié et Houet 2013), les estives constituent des espaces subissant actuellement des changements sensibles, sous-estimés, notamment dans les Pyrénées centrales. Toutefois, ces observations peuvent dépendre des contextes locaux. Aussi, l'évaluation des changements futurs requiert de prendre en compte les interactions hommes / milieux à différentes échelles. L'idée consiste à évaluer si, à partir de différents modèles et scénarios prospectifs réalisés à différentes échelles spatiales, les mêmes espaces ressortent.

Les outils de modélisation des changements d'occupation du sol, selon l'échelle appréhendée, permettent soit de simuler les processus en jeu, soit les *patterns* paysagers. A l'échelle locale, il s'agit de prendre en compte les interactions entre les usages pastoraux et les processus de recolonisation (Vacquié et al, Submitted). A l'échelle du site du Vicdessos ou encore des Pyrénées, ces interactions sont supposées être prises en compte lors de la phase de calibration à l'aide des dynamiques observées. Alors, le modèle prolonge dans le futur les *patterns* paysagers observés (Houet et al, In press ; Vacquié et al, 2015).

Si l'on reprend la distinction des approches *storyline and simulation* et *path-dependent*, on peut distinguer les scénarios prospectifs réalisés sur Cauterets (annexe 2) et les Pyrénées françaises (Fig. 3.4.j. - Vacquié et al, 2015), et ceux réalisés sur l'estives de Bassiès (cf. partie 3.4.1. et Fig. 3.4.g - Vacquié et al, Submitted) et du Haut-Vicdessos (Fig. 3.4.k. - Houet et al., In press). Dans le premier cas de figure, l'objectif consiste principalement à fournir des images du futur des territoires concernés les plus contrastées possibles, d'abord sous la forme de récits et qui vont être illustrés à l'aide de simulations spatiales. Cela permet de couvrir la gamme la plus vaste des possibles, de délimiter l'incertitude liée à l'avenir, mais également de faire réagir. Notons que dans le cas des scénarios de la commune de Cauterets, seuls les récits ont pour l'instant été produits. Les simulations seront réalisées à l'automne 2015. Ces récits sont présentés en annexe 2. Dans le second cas, on se situe plus dans une approche « path-dependent », c'est-à-dire dépendantes des trajectoires passées mais également du jeu de paramètres utilisés qui, dans le cas de l'estive de Bassiès, relate des stratégies d'usages pastoraux. Un seul exemple couplant différents scénarios et simulations est donné ci-après : il croise les résultats issus du modèle FORE-SCE utilisé à l'échelle des Pyrénées françaises, présentés dans un premier temps, et ceux issus du modèle Land Change Modeler (LCM) à l'échelle du Haut-Vicdessos présentés dans un second temps.

Dans le cadre du travail réalisé à l'échelle régionale (thèse de doctorat de Laure Vacquié), le modèle FORE-SCE a été utilisé. Il s'agit d'un modèle de type *pattern-based* qui permet de prendre en compte des dynamiques de changements d'occupation et d'usage du sol régionales et infra-régionales influencées par des facteurs socio-économiques et environnementaux mais également de reproduire des schémas d'organisation spatiale grâce à l'utilisation de métriques paysagères. Le modèle est appliqué au massif Pyrénéen français de 2006 à 2100 afin d'analyser les dynamiques d'enfrichement et de reforestation pour quatre scénarios exploratoires contrastés : *Regional Markets*, *Global economy*, *Regional Co-operation*, *Business as usual*. Les scénarios prennent en compte à la fois les tendances d'évolution passées, observées à partir d'analyses rétrospectives, et les spécificités socio-économiques régionales à travers l'intégration de rapport de conjonctures et de prospective sectoriels existants. Ils se différencient par leur degré d'adaptation (comme par exemple le degré de soutien des politiques nationales aux activités de production agro-sylvo-pastorales) à des contextes socio-économiques et environnementaux contrastés. Les résultats montrent que les dynamiques d'enfrichement et de reforestation varient de +3% à +20% selon les scénarios (Fig 3.4.j). D'une manière générale, certaines régions sont irrémédiablement vouées à subir les effets des processus de fermeture et présentent de fortes probabilités d'enfrichement et de reforestation. Les taux de changements les plus importants sont associés à des régions où la productivité des espaces est très fortement dépendante du contexte socio-économique et des conditions environnementales et climatiques. L'analyse combinée des résultats issus des quatre scénarios a permis de procéder à une évaluation de l'incertitude spatiale des changements et de localiser les espaces les plus propices aux changements pour chacune des régions administratives. Les espaces présentant les plus fortes probabilités de reforestation (quartile supérieur) diffèrent selon les régions (Fig. 3.4.j). Ainsi, les estives d'altitude (entre 1000 et 1600 m) et peu pentues semblent être les plus sensibles à ces dynamiques dans les Pyrénées orientales du fait des conditions climatiques plus défavorables au pastoralisme mais également de l'histoire (exode rural plus précoce, reforestation des versants plus précoce...). Les zones concernées dans les Pyrénées centrales, comprises entre 700 et 1200m, concernent tant les zones basses d'estives que des zones intermédiaires qui finissent de se fermer car les pentes sont plus prononcées (entre 15 et 25%). Enfin, dans les Pyrénées atlantiques, si le

phénomène est moins prononcé, il s’amorce malgré tout sur les zones de versant (inf. à 700m d’altitude) les moins accessibles (30-35%).

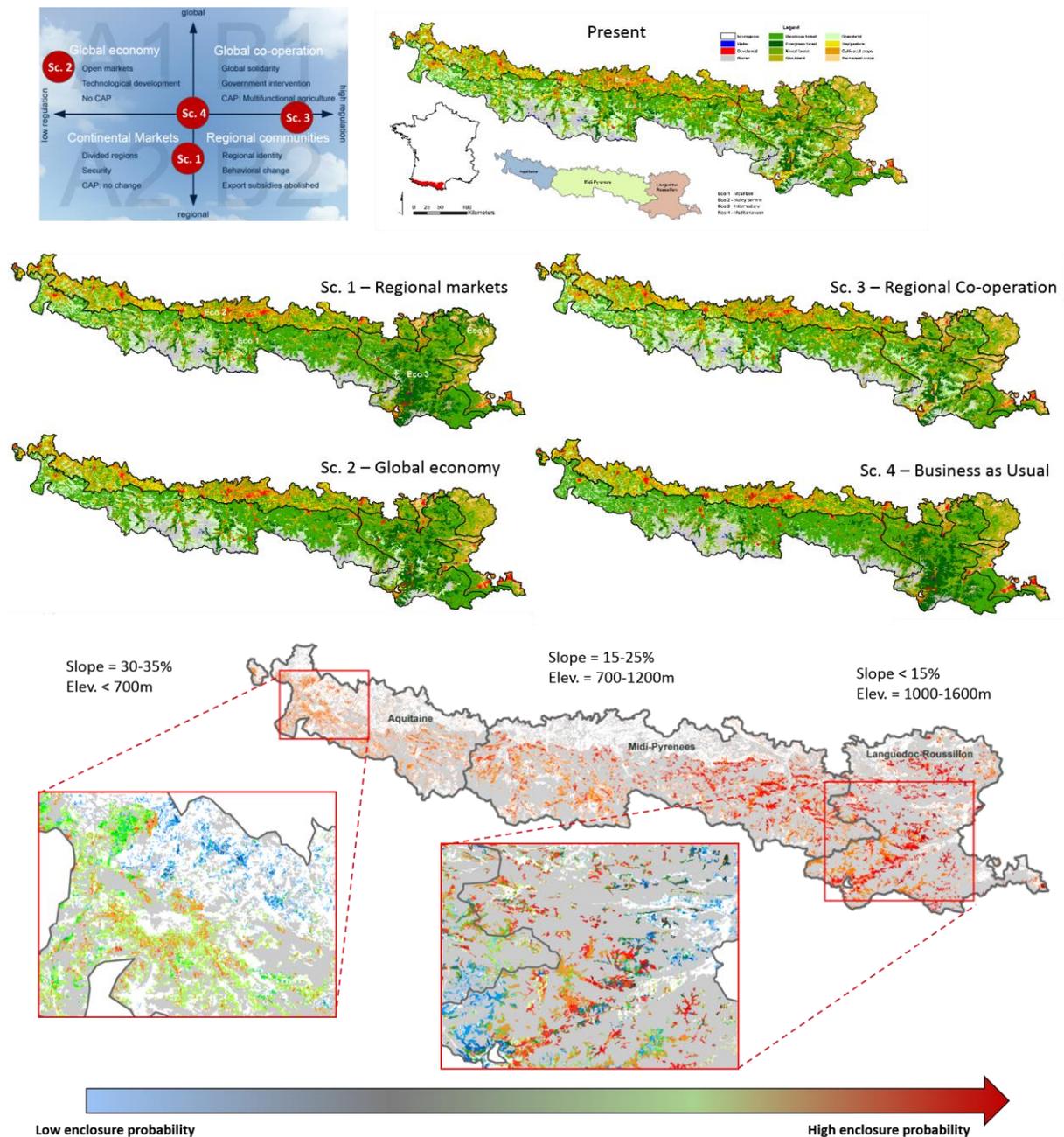


Figure 3.4.i. Simulation prospective des changements d’occupation des sols sur les Pyrénées françaises selon quatre scénarios contrastés comparativement à la situation de 2006 (en haut). Les simulations sont ensuite croisées pour calculer la carte d’incertitude spatiale lié au futur pour caractériser les zones susceptibles de se reforester à l’horizon 2100 (en bas) (Source : Vacquie et al, 2015)

Les scénarios réalisés à l’échelle du Haut-Vicdessos à l’aide du modèle LCM sont des scénarios tendanciels, où deux stratégies de gestion des estives de la vallée sont testées : la première consiste à maintenir la pression pastorale telle qu’elle est déclarée en 2008 (MBAU – *model-based business as usual*) ; la seconde consiste à prioriser certaines estives, réputées plus appétantes, par rapport à d’autres (PHVU – *Prioritizing High Value Uplands*). De façon simplifiée, les quantités de changements d’occupation des sols estimées à partir des trajectoires passées sont les mêmes pour les deux scénarios mais la réaffectation des cheptels sur les estives les plus intéressantes, de façon à

délibérément stopper l'enfrichement et la reforestation, engendrera une reforestation plus rapide sur celles abandonnées. La localisation des changements futurs étant régit par le calcul d'une probabilité, à partir de cartes représentatives des facteurs les influençant (par exemple : la distance aux forêts, l'altitude, l'orientation, la distance aux voies de circulation, etc.), différents paramétrages possibles ont été appliqués croisant : (1) la représentation de ces facteurs de façon quantitative (valeur d'altitude) ou catégorielle (classe d'altitude) et (2) la prise en compte (ou pas) de l'évolution dynamique des facteurs fondés sur la distance à une occupation du sol. Chaque scénario a donc été simulé avec quatre paramétrages différents. Un exemple est donné en figure 3.4.k, correspondant au scénario MBAU utilisant des facteurs dynamiques, représentés de façon catégorielle.

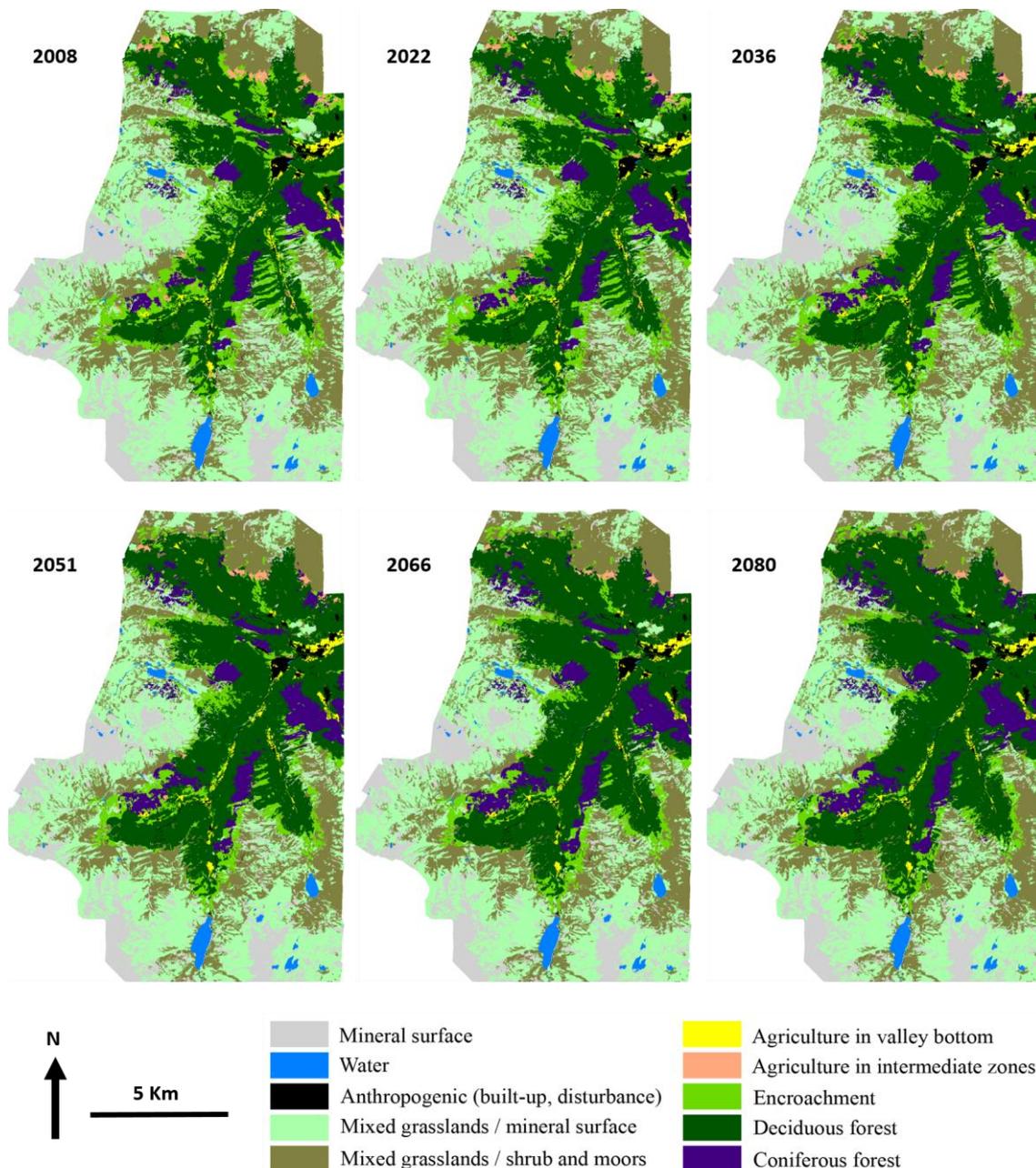


Figure 3.4.j. Simulation prospective des changements d'occupation des sols sur le Videssos sur la base du scénario MBAU utilisant des facteurs dynamiques, représentés de façon catégorielle. (Source : Houet et al, In press)

A partir des différents scénarios simulés à l'aide de FORE-SCE et LCM, les cartes de probabilités d'incertitude spatiale des changements futurs ont été générées selon la méthode présentée dans la partie 3.2.3. Ces cartes ont ensuite été comparées afin d'estimer les superficies présentant des probabilités similaires à l'échelle de la zone du Haut-Videssos (Fig. 3.4.k (a)) et leur congruence spatiale (Fig. 3.4.k (c)) par rapport à la situation de 2008 (Fig. 3.4.k (b)).

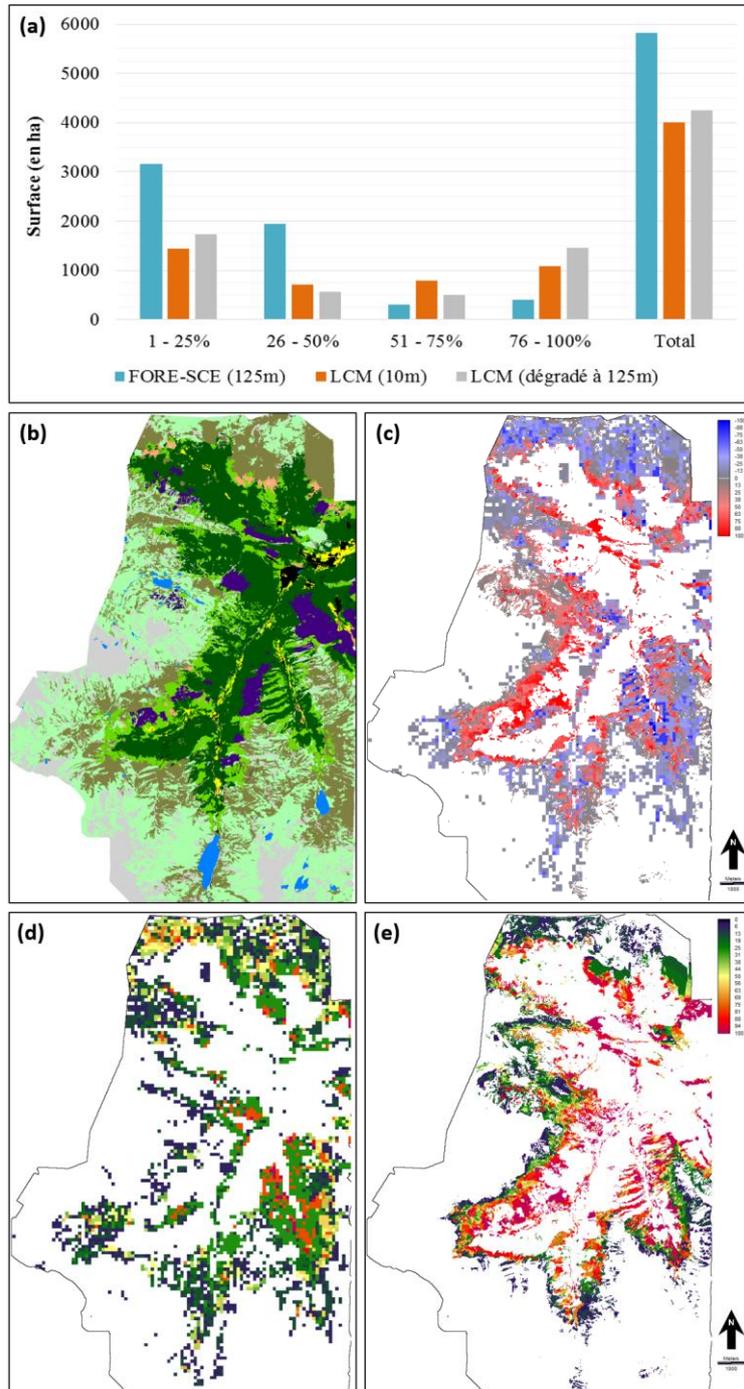


Figure 3.4.k. Analyse comparative des résultats issus de FORE-SCE et de LCM à l'échelle du Haut-Videssos. (a) Répartition par tranches altitudinales des probabilités de fermeture issues de la carte d'incertitude spatiale liée au futur ; (b) Carte d'occupation des sols en 2008 ; (c) Différence entre les cartes (d) et (e) avec en bleu foncé les zones à très forte probabilité de reforestation par FORE-SCE, en rouge celles simulées par LCM et en gris, les zones présentant des probabilités similaires par les deux modèles; (d) Carte d'incertitude spatiale liée au futur pour les scénarios régionaux simulés avec FORE-SCE ; (e) Carte d'incertitude spatiale liée au futur pour les scénarios réalisés avec LCM. (source : Vacqué 2015)

Fort logiquement, les quantités de changements diffèrent puisqu'elles proviennent de scénarios différents. Les simulations issues de FORE-SCE identifient 31% de surfaces susceptibles de se reboiser de plus que le modèle LCM. Le fort degré de contraste entre les scénarios induit une sous-estimation des surfaces où une reforestation est observée dans les quatre scénarios (probabilité de fermeture supérieure à 75%). Le constat est le même pour les espaces présentant entre 51% et 75% de probabilité de se fermer. Inversement, les zones où les probabilités de fermeture sont plus faibles (inférieures à 50%) sont surestimées. A l'inverse, une analyse de la figure 3.4.l. (c) met en évidence que, quel que soit les modèles / scénarios considérés, ce sont globalement les mêmes zones qui se distinguent. La superficie des espaces présentant des probabilités de fermeture communes (en gris – Fig. 3.4.l. (c)), qu'elles soient faibles ou fortes (Fig. 3.4.l. (d) et 3.4.l. (e)), représentent au total 2473 ha. Cela signifie que 43% des espaces prévoyant une fermeture par LCM ont été identifiés par FORE-SCE, et inversement, 62% des espaces prévoyant des dynamiques d'enfrichement ou de reforestation par FORE-SCE ont été identifiés par LCM. Dès lors que l'on compare visuellement ces zones grisées avec la situation de 2008 (Fig. 3.4.l. (b)), se sont majoritairement les zones d'estives, facilement reconnaissables car situées au-dessus de la limite supra-forestière, qui apparaissent comme les plus vulnérables. Les caractéristiques altitudinales et de pente sont similaires à celles identifiées par LCM pour la Région Midi-Pyrénées et Languedoc-Roussillon, couvrant près de 75% du massif français. Au final, il a non seulement été possible de localiser, caractériser les secteurs les plus susceptibles à la reforestation mais également de corroborer ces résultats à l'aide d'une approche comparative multi-modèles / multi-scénarios, nous permettant d'affirmer de façon quantitative que les estives constituent les espaces porteurs d'enjeux actuels et futurs. Ces enjeux (pastoralisme, risque gravitaire, ressources en eau, etc.) diffèrent d'une vallée à l'autre selon ces spécificités géographiques et socio-économiques. C'est pourquoi l'évaluation des conséquences possibles des futurs changements d'occupation et d'usage du sol reste fondamentale pour éclairer l'action présente.

L'évaluation des impacts possibles

Il est largement reconnu que les changements d'occupation et d'usage du sol ont des conséquences sur les milieux (Vitousek et al. 1997 ; Sala et al. 2000; Matson et al. 1997), les ressources (Houghton et al. 1999; Maron and Fitzsimons 2007; Butler et al. 2007; Gordon et al. 2008), les risques (IPCC, 2007), etc. Ainsi, les services écosystémiques fournis aux sociétés s'en trouvent modifiés, potentiellement de façon négative ou positive. Différents travaux ont été menés sur l'évaluation de l'impact des dynamiques futures présentées ci-avant. Dans le cadre de l'ANR SAMCO, cette évaluation (en cours) porte sur les risques gravitaires (crues et laves torrentielles, chutes de bloc, glissement de terrain, avalanche...). Dans le cadre de l'OHM du Haut-Videssos, elle porte sur l'évaluation de l'impact respectif et combiné des changements climatiques et d'usages des sols sur les ressources en eau, c'est-à-dire sur l'épaisseur du manteau neigeux (Sczcypta et al. 2015). Les Pyrénées constituent naturellement une réserve hydrique importante, massivement exploitée et utilisée par les activités anthropiques situées à l'aval (production électrique, irrigation, etc.). Seul cet exemple est abordé ici car ceux sur les risques sont encore préliminaires.

Les rétroactions entre les changements climatiques et les changements de végétation sont nombreuses et complexes à appréhender. Par exemple, si le réchauffement aura certainement une influence sur les dynamiques de végétation (augmentation de la limite supérieure de la forêt, compétition inter-espèces, rythmes phénologiques, etc.), la végétation peut également modifier le climat à micro et méso-échelle (Pielke, 2002). Sans aller jusqu'à ce niveau de complexité, elle aura aussi une influence sur les ressources en neige car elle intercepte une partie de la neige tombant au sol, modifiant ainsi l'éclairement solaire incident (ombrages) et l'albédo de la neige par les résidus de végétation tombant au sol. Snowmodel (Liston and Elder 2006a; Liston et al, 2007) simule ces interactions permettant ainsi de combiner les effets respectifs et combinés de scénarios de changements climatiques et d'usages des sols.

Cette étude, décrite en détail par Sczcypta et al. (2015), se base sur des données de température et de précipitation issues de modèles régionaux de simulation de changements climatiques d'une part, et des cartographies simulées des changements d'occupation et d'usage des sols en lien avec des stratégies de gestion pastorale d'autre part. Ces données alimentent Snowmodel qui est ainsi capable de simuler l'évolution spatiale et temporelle du manteau neigeux. Il est appliqué au bassin versant de Bassiès sur lequel une validation sur l'année 2011-12 a été faite. Les résultats démontrent que l'augmentation moyenne des températures est le principal facteur explicatif de la diminution de l'épaisseur moyenne du manteau neigeux sur une année hydrologique. Les précipitations, plus variables à l'avenir, n'engendrent qu'une augmentation de la variance de l'épaisseur de neige par rapport à l'épaisseur moyenne observée en 2011-12. Les changements de végétation, qui traduisent le passage vers une strate de hauteur supérieure (par exemple pelouse vers landes, ou landes vers forêt), impactent très légèrement le manteau neigeux (de l'ordre de -0.1m environ). Par contre, l'influence sur la dynamique de fonte est réelle, allongeant légèrement la durée de la fonte durant le printemps. Les effets combinés affectent d'autant plus le volume de neige disponible à l'horizon 2080 (Fig. 3.4.l). Sur le plan de la distribution spatiale, ce volume n'est pas uniformément impacté. En effet, les effets cumulés se localisent dans la tranche altitudinale la plus sensible (1500-1800m) vis-à-vis des températures (Fig. 3.4.m). En d'autres termes, la fermeture du bas des estives aura tendance à accentuer les effets du réchauffement global sur la neige.

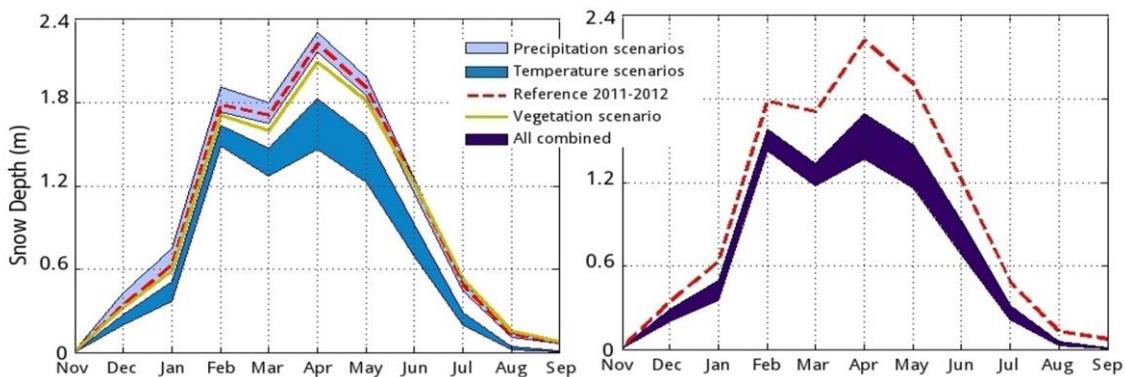


Figure 3.4.l. Impact respectif (gauche) et combiné (droite) des variables d'entrée de Snowmodel (T° , Pmm, Changements de végétation) par rapport à la situation de référence de 2011-12. (Source : Sczcypta et al. 2015)

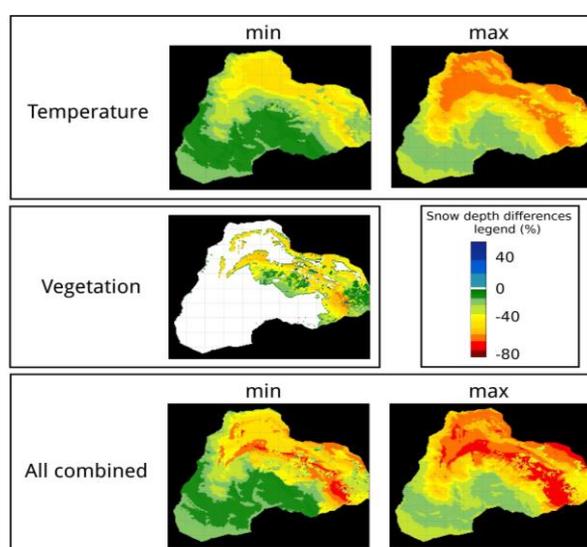


Figure 3.4.m. Impact respectif et combiné des variables d'entrée de Snowmodel (T° , Pmm, Changements de végétation) de façon spatialisée par rapport à la situation de référence de 2011-12. (Source : Sczcypta et al. 2015)

3.4.3 Conclusion partielle

La discrimination de l'influence respective des facteurs anthropiques vis-à-vis des changements climatiques reste encore délicate. En milieu montagnard, l'influence anthropique est peut-être largement sous-estimée, au même titre que les dynamiques de changements en cours (reforestation, fonte des glaces par exemple). Néanmoins, force est de constater que les effets de ces deux sources de changements sont particulièrement prégnants de nos jours. Les espaces montagnards offrent ainsi l'avantage d'être le siège de changements visibles, mesurables et quantifiables. Si les estives subissent des dynamiques de reforestation relativement récentes, l'analyse comparative avec celle des glaciers, où l'influence des usages anthropiques peut être considérée comme négligeable sur le cycle hydrologique annuel, peut constituer un dispositif intéressant pour parvenir à réaliser cette discrimination. Ainsi, les Pyrénées constituent un terrain d'étude particulièrement intéressant pour apporter des connaissances quant aux interactions entre végétation / climat, dans le but de bien appréhender le futur.

L'identification des espaces à enjeux, tant pour les dynamiques qui les concernent ou vont les concerner que pour leur influence sur les ressources, les risques ou encore les services écosystémiques, constitue une information importante pour les gestionnaires. En effet, la priorisation des actions à mener devient possible suivant les enjeux d'usages sous-jacents (préservation des espaces pastoraux par exemple) ou les stratégies de gestion de l'espace à mettre en œuvre. L'intérêt de la prospective repose fondamentalement sur la pluralité des futurs construits. La dimension spatiale contribue à la prospective *via* l'illustration cartographique des scénarios (récits), la caractérisation des espaces sensibles pouvant varier selon les échelles (versant, vallée, régions administratives...) et la production de données d'entrée à des modèles d'évaluation des impacts des futurs changements d'occupation et d'usage des sols.

La quantification et la localisation sont deux éléments fondamentaux visant à éclairer l'action présente. S'il subsiste des imprécisions dans l'estimation, issues des imperfections inhérentes aux modèles, la quantification permet d'apporter des ordres de grandeurs et d'identifier espaces à enjeux utiles aux gestionnaires et aux décideurs. De plus, l'usage combiné de modèles et/ou de scénarios, permet de réduire les incertitudes liées à la localisation des changements futurs.

Liste des publications concernées (par ordre chronologique)

- Galop D., **Houet T.**, Mazier F., Leroux G. & Rius D., (2011) Grazing activities and biodiversity history in the Pyrénées – the use of paleoecology and historical ecology to provide new insights on high-altitude ecosystems in the framework of a Human-Environment Observatory, *PAGES news*, vol 19, n°2, pp. 53-56
- Houet T.**, Ribière O., Vacquié L., Vidal F. et Galop D. (2012) Analyse spatiale de l'évolution des modes d'occupation et d'usages des sols sur le Vicdessos de 1942 à nos jours, *Sud-Ouest Européen*. N°33, pp. 41-56.
- Vacquié L. et **Houet T.** (2012) Détection et caractérisation des zones humides de montagnes par télédétection : évaluation de l'apport de la Très Haute Résolution Spatiale. *Revue Internationale de Géomatique*, Vol. 22, 2012/4, 497-518
- Houet T.** et René P. (2014) Evolution récente du glacier d'Ossoue (Hautes-Pyrénées), *La météorologie*, n° 84, p. 4-5
- Szczypta C., Gascoin S., **Houet T.**, Vigneau C., Fanise P. (2015), Impact of climate and land-use changes on snow cover in a small headwater catchment in the Pyrenees, France, *Journal of Hydrology*, 521, 84-99, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.060>
- Vacquié L., **Houet T.**, Sohl T., Reeker R., Sayler K., (2015) Developing scenarios to project LULC changes in the Pyrenees (France): a model-based approach to assess land abandonment and reforestation dynamics. *The Journal of Mountain Science*, 12(4), 905-920. <http://dx.doi.org/10.1007/s11629-014-3405-6>
- Houet T.**, Vacquié L., Sheeren D., (In press) Evaluating the spatial uncertainty of future land abandonment in a mountainous valley (Vicdessos, Pyrenees - France): insights from model parameterization and experiments. *The Journal of Mountain Science*
- Marti R., Gascoin S., **Houet T.**, Ribière O., Laffly D., Condom T., Monnier S., Schmutz M., Camerlynck C., Tihay J.P., Soubeyrou J.M., René P. (In press) Evolution of Ossoue glacier since the end of the Little Ice Age, French Central Pyrenees, *The Cryosphere*, <http://www.the-cryosphere-discuss.net/9/2431/2015/tcd-9-2431-2015.html>

LA MODÉLISATION PASSERA-T-ELLE PAR LES ESTIVES ?..



4 Perspectives de recherche

A travers la présentation de mes travaux de recherche, je me suis attaché à montrer que la prise en compte de la dimension spatiale dans une démarche de prospective permettait d'identifier les espaces à enjeux et ce, pour diverses stratégies d'usages des sols. La localisation des espaces « sensibles » est essentielle pour évaluer si les changements d'occupation du sol auront une réelle incidence sociale ou environnementale en termes de risques, d'impact sur les ressources ou de services écosystémiques. Ainsi, une prospective spatialisée, grâce à la localisation précise et la prise en compte de interactions spatio-temporelles, va bien au-delà de ce que propose la prospective territoriale qui considère la dimension spatiale comme un simple support illustratif de scénarios prospectifs produisant des images du futur qualitatives et imprécises. La dimension spatiale est le vecteur de l'évaluation quantitative des conséquences possibles des futures actions anthropiques sur l'environnement.

Les modèles ont bien évidemment une place centrale dans la démarche prospective, et doivent notamment être utilisés avec de la méthode et de la rigueur. S'ils peuvent révéler des trajectoires d'évolution dans un futur incertain et d'apporter des informations quantifiées, contribuant à un meilleur éclairage prospectif voire à l'aide à la décision, ils restent cependant imparfaits. Ainsi, l'usage de modèles spatiaux, définis ici comme dynamiques et spatialement explicites, pour explorer le futur suppose de se positionner dans un paradigme commun à la modélisation et à la prospective. Ils doivent donc être utilisés avec prudence et surtout ne pas être considérés comme prédictifs. Leur validation suppose ainsi d'aller au-delà de la démonstration de leur aptitude à reproduire des observations passées à l'aide de simulations et autres tests de sensibilité. En effet, pour répondre aux principes de transparence et de plausibilité permettant de valider une démarche prospective, ils doivent ne pas apparaître comme une « boîte noire » et il convient de bien identifier et expliciter leurs apports, limites et fonctionnement aux acteurs.

Au-delà de ces aspects d'usages et techniques, la dimension spatiale ancre des récits dans un contexte territorial connu des acteurs. Lors de la restitution des travaux de recherches ou des réunions participatives, les cartes utilisées (issues de l'analyse des trajectoires d'évolution ou des simulations) ont constitué le support du dialogue, d'échanges entre chercheurs et acteurs et entre acteurs. Outil de médiation, la dimension spatiale facilite l'implication et donc la participation. Toutefois, au même titre que la modélisation d'accompagnement (Etienne 2010, 2012) et que la prospective (Mermet, 2003), cela suppose une certaine éthique de la part du chercheur (neutralité, indépendance, etc.). En effet, la façon de restituer les conséquences possibles des futurs changements d'occupation des sols (sémiologie graphique, discours, etc.) peut influencer les acteurs quant aux décisions et actions qu'ils souhaitent mettre en œuvre et qui peuvent différer des préférences personnelles des chercheurs. Inversement, si les acteurs peuvent vouloir volontairement limiter la gamme des futurs à explorer à des fins politiques et que le chercheur, en tant qu'animateur, doit être vigilant sur ce point, il ne faut pas également que cette limitation provienne de la méthode mise en œuvre (méthode de construction des scénarios inadaptée, choix inapproprié d'un modèle, etc.).

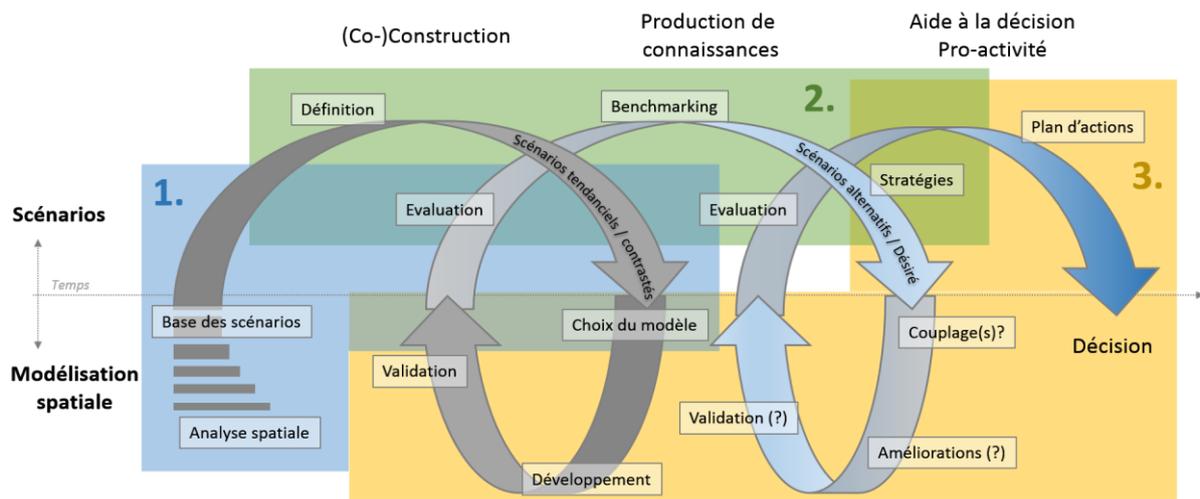
La généralité de la démarche méthodologique, visant à intégrer la dimension spatiale tout au long du processus prospectif, constituait notre hypothèse de recherche. Les résultats obtenus sur deux nouveaux types de paysages (la ville et la montagne) ne l'ont pas contredite. Elle reste cependant à être évaluée sur d'autres types de milieux (littoraux, marins). Néanmoins, les recherches dans ce domaine, fondamentalement inter et pluridisciplinaires, sont exigeantes en données et en connaissances et donc chronophages. Les différents travaux de recherche présentés

ici, ou dans les articles adossés à ce mémoire, ont été réalisés sur des sites scientifiques de suivi à long terme des interactions hommes – milieux (OHM Haut-Videssos, OHM Pyrénées centrales, Zone Atelier Chizé -Plaine Niortaise) ou sur des sites ayant bénéficié de recherches préalables (Toulouse). Ces dispositifs scientifiques favorisent les recherches dans ce domaine car ils capitalisent des données diverses potentiellement utiles et regroupent des ressources humaines indispensables à cette approche systémique / holistique. Mon implication dans le comité de direction du projet de Zone Atelier PYGAR (Pyrénées – Garonne) va dans ce sens et vise à promouvoir la mise à disposition des données et des ressources ainsi que l'interdisciplinarité. Toutefois, si ces dispositifs constituent un terreau scientifique particulièrement fertile, ce type de terrain d'étude ne constitue pas un préalable indispensable pour mener ce type de recherche sur de nouveaux sites. Une approche par télédétection, suivie d'un travail de terrain avec les acteurs, est alors fondamentale.

De nombreux fronts de recherches restent à explorer pour améliorer la modélisation prospective, faciliter l'évaluation ou la participation, ou encore l'aide à la décision. Telles des briques, ces fronts visent à consolider la robustesse de la démarche méthodologique. Trois pistes de développements scientifiques ont d'ores et déjà été identifiées, initiées voire légèrement explorées, et pouvant contribuer aux différentes étapes de la démarche :

1. Améliorer la caractérisation des milieux et des usages du sol à l'aide des technologies émergentes en télédétection ;
2. Fournir une évaluation multi-proxy des conséquences liées à des scénarios prospectifs de façon à apporter un meilleur éclairage aux acteurs et décideurs ;
3. Explorer plus en détails les liens entre modélisation prospective et modélisation d'accompagnement pour une meilleure prise en compte du fait anthropique en prospective environnementale.

La télédétection (1) ambitionne ainsi de contribuer à déterminer les trajectoires d'évolution des changements d'occupation et d'usage du sol, pouvant influencer sur le choix et le développement des modèles spatiaux, mais également à relier des types d'occupation du sol à des fonctionnalités écologiques (biodiversité) dans le but de pouvoir affiner l'évaluation des impacts des changements futurs. L'approche multi-proxy (2) vise à contribuer à l'évaluation et à l'analyse comparative des scénarios dans le but d'aider à la définition de stratégies de gestion de l'espace, voire à la décision. Enfin, la modélisation d'accompagnement (3) peut intervenir tant dans l'amélioration de la modélisation spatiale, de la plausibilité des simulations à travers la présentation de la validation du modèle ou encore la définition de scénarios (sur la base de stratégies d'acteurs) ou de stratégies de gestion (Fig. 4.a).



Positionnement des perspectives de recherches au sein de la démarche

1. Apport de la télédétection pour mieux caractériser les milieux, les usages et évaluer les impacts futurs
2. Apport d'une évaluation « multi-proxy » pour améliorer l'éclairage prospectif
3. Développements futurs: modélisation (rétro-)prospective et acteurs

Figure 4.a. Positionnement des perspectives de recherche dans la démarche de modélisation prospective

4.1 La caractérisation actuelle des milieux pour mieux évaluer les impacts futurs : rôle de la télédétection

Contexte

L'évolution technologique dans le domaine de la télédétection offre de nouvelles perspectives de recherches en modélisation prospective. La télédétection a démontré son intérêt pour caractériser les milieux, voire les trajectoires d'évolution des paysages. Néanmoins, trois constats peuvent être faits. Les produits satellitaires disponibles offrent (1) une très haute résolution spatiale (THRS) permettant la caractérisation finement les types d'occupation des sols, voire des usages simples, mais dont la résolution temporelle présente des limites ne permettant pas de réaliser des suivis intra-annuels pour des milieux connaissant de rapides changements tels que les milieux agricoles ou montagnards ; (2) une haute répétitivité temporelle (quotidienne ou décadaire) mais dont la résolution spatiale est limitée pour réaliser des études à des échelles fines. Enfin, (3) hormis de rares études (Hubert-Moy et al. 2003 ; Rapinel et al. 2011), il reste difficile de relier l'observation spatiale (pixels) à des fonctionnalités écologiques du territoire car la résolution spectrale de la plupart des produits de télédétection reste insuffisante ou imprécise, et requiert d'être couplée à d'autres sources d'informations.

Les données hyperspectrales à très haute résolution spatiale permettent de discriminer finement les types de végétation et certains paramètres biophysiques, différents types de matériaux, de sols et leurs propriétés, comparativement à des données multispectrales. Elles offrent ainsi la possibilité de caractériser des paramètres indispensables à la détermination de certaines fonctionnalités écologiques ou pouvant alimenter des modèles physico-chimiques. D'autre part, la télédétection multispectrale à très haute résolution spatiale offre désormais, avec les constellations Pléiades ou Sentinel-2 par exemple, une très haute résolution temporelle. Les applications peuvent donc être multiples (suivi de la cryosphère, détermination des rotations culturales et des usages associées, etc.) et soulèvent de nouveaux enjeux méthodologiques. Dans le même temps, des recherches sont actuellement menées pour évaluer l'intérêt de la mise en orbite d'un capteur hyperspectral à haute résolution spatiale (5 à 8m) dans les années 2020. En effet, le TOSCA (groupement de scientifiques et d'experts en télédétection sur « Terre, Océan, Surfaces continentales, Atmosphère ») a demandé en 2004 au CNES d'étudier l'intérêt d'un spectro-imageur hyperspectral à haute résolution spatiale et temporelle pour le suivi des surfaces continentales. La phase A du projet a été décidée en 2012 et a pour but de consolider les spécifications techniques du capteur. En collaboration avec l'ONERA, des vols spécifiquement dédiés à l'acquisition de données hyperspectrales sont réalisés en 2012 et 2013 à des fins d'évaluation. Dans ce contexte, deux nouvelles perspectives de recherches émergent logiquement.

Méthodologie

La première piste, d'ores et déjà engagée, concerne l'évaluation de l'apport de la télédétection hyperspectrale à la caractérisation actuelle des milieux. D'une part, ce type de données peut permettre d'affiner les informations requises lors de la construction de la base des scénarios. D'autre part, sur la base de ce diagnostic amélioré permettant de faire le lien entre une occupation du sol et une fonctionnalité écologique (biodiversité, épuration, séquestration en carbone, etc.), on peut imaginer développer des modèles simples permettant d'évaluer les conséquences possibles des changements futurs d'occupation et d'usages du sol. Deux exemples de travaux illustrent ces objectifs.

Le premier concerne la caractérisation de la biodiversité végétale, associée à certaines compositions de végétation, d'une tourbière remarquable située en Ariège (tourbière de Bernadouze). Ce travail est réalisé en partenariat avec l'ONERA (X. Briottet) dans le cadre de la thèse de doctorat de Thierry Erudel, financée par le LABEX DRIIHM. La production de ce type de cartes peut être extrêmement intéressante pour les gestionnaires : l'application de la directive « Habitats » visant la mise en place d'une cartographie spatialement exhaustive de la biodiversité (habitats, fonctionnalités écologiques, espèces remarquables...) fait face à de forts verrous méthodologiques et humains (coûts des relevés de terrain). De plus, cette tourbière est entourée par une forêt qui va être exploitée par l'ONF à l'automne 2015 / printemps 2016. Il sera ainsi possible de réaliser un diagnostic *ex-post* avant la mise en exploitation, et d'évaluer les impacts possibles des activités anthropiques sur ces milieux. De plus, en raison de la complexité du milieu, ce projet possède un fort potentiel de démonstration, notamment pour d'autres sites « Observatoires Hommes-Milieux » dont ce site fait partie. L'objectif consiste donc à développer une approche méthodologique destinée à caractériser les milieux dans lesquels on retrouve des espèces emblématiques à l'aide de signatures spectrales de référence, acquises sur le terrain. Un second objectif vise à évaluer l'apport de l'imagerie hyperspectrale pour estimer les surfaces boisées (biomasse) couplées ou non à des données lidar. Trois vols ont d'ores et déjà été effectués (Octobre 2012, Juillet et septembre 2014) et un dernier est envisagé en septembre 2015 (à confirmer), offrant la possibilité de tester des approches multi-dates.

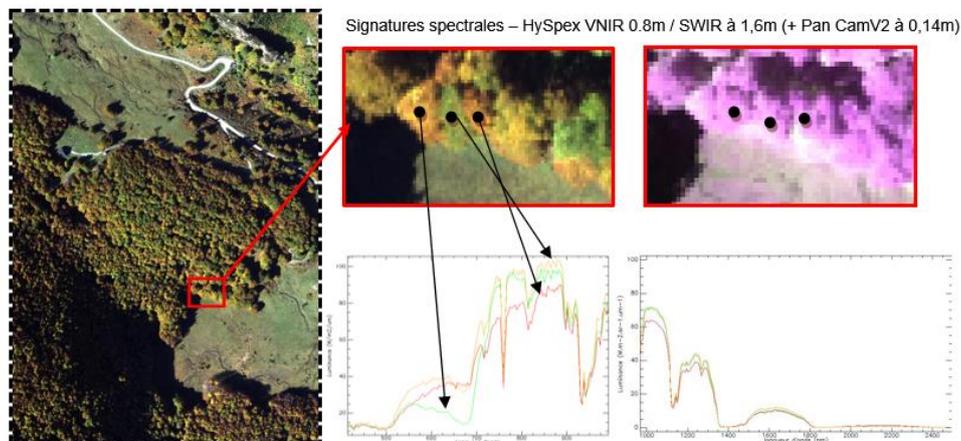


Figure 4.b. Exemple de l'image acquise le 24 Octobre 2012 : signatures spectrales d'hêtres extraites de l'image.

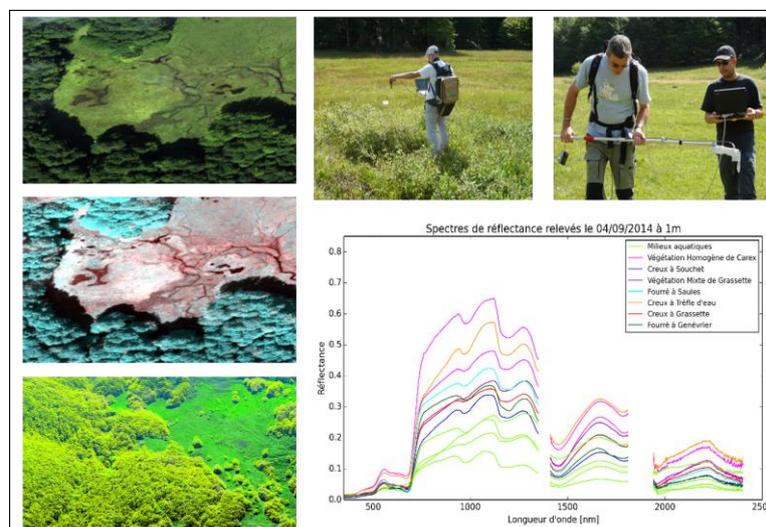


Figure 4.c. Exemple signatures spectrales acquises sur le terrain en septembre 2014, lors de l'acquisition des données hyperspectrales et lidar.

Le second exemple porte sur les milieux urbains et ses recherches s'inscrivent dans le projet ANR HYPEP 2014-2018 (Hyperspectral imagerY for Environmental urban Planning). Ce projet a pour objectif de disposer d'outils permettant de caractériser le milieu urbain afin d'en étudier l'évolution et l'impact induit sur son environnement. D'un point de vue personnel, si la caractérisation fine des surfaces (matériaux, taux et types de végétation, etc.) peut aider à expliquer la variabilité de la climatologie urbaine, elle permet également d'envisager l'évaluation de l'état et des potentialités futures pour le développement d'énergies renouvelables (potentiel photovoltaïque) ou encore d'améliorer la gestion d'enjeux sanitaires au travers la détection des surfaces humides favorables à la prolifération du moustique tigre (phase d'alerte à Toulouse durant l'été 2015).

La seconde piste de recherche concerne l'utilisation de données THRS à très haute répétitivité temporelle (Sentinel 2). Ce type d'images, au-delà des nouvelles méthodes de traitement à considérer (Cloud computing) en raison du passage au paradigme des *Big Data*, les applications thématiques pour la caractérisation des types d'occupation et d'usages des sols, ou encore de leurs trajectoires d'évolution, sont prometteuses. En effet, à titre d'exemples, il devient possible de :

- Déterminer plus facilement les types de cultures par une approche multi-dates au sein d'une même saison / année culturale ;
- Caractériser les pratiques culturales (rotations, couverture des sols, utilisation d'engrais ou de produits phytosanitaires, etc.) ;
- D'évaluer des changements, en termes de direction, d'ampleur et de vitesse, qui peuvent être diversifiés, tels que des changements progressifs (fonte de la neige/glace) ou brutaux (crise érosive ou feux pastoraux en montagne, ...) ;
- De mettre plus facilement en relation ces changements avec les facteurs de changements (forçages climatiques, mise en application d'une nouvelle réglementation, décision individuelle...).

A ces deux pistes de recherches liées à la télédétection spatiale ou aéroportée, une troisième piste est également envisagée en lien avec l'explosion actuelle et future de l'utilisation des drones. Dans le cadre du CPER 2015-2016, l'acquisition de deux drones (aile rigide, capteurs multi-spectraux et visibles) va consolider la plateforme AMOS (Analyse et MOdélisation Spatiale) qui vient en appui de l'axe 3 du laboratoire GEODE. Ayant obtenu le brevet théorique de pilote d'ULM en juin 2015, je vais dès l'automne pouvoir utiliser ce type d'équipement (équipé de caméras visible et multispectrale) pour générer des données de télédétection particulièrement intéressantes. La résolution temporelle, dépendant désormais de l'opérateur, il devient possible de générer des cartographies fréquentes permettant d'étudier la phénologie de la végétation par exemple mais également des données altimétriques, fondées sur la photogrammétrie, présentant une très haute résolution spatiale. Ces données seront particulièrement utiles par exemple dans le cadre de la thèse de Juliette Grimaldi, où l'objectif consistera à évaluer l'effet de la trame arborée liée à l'agroforesterie, de l'échelle micro-locale (arbre / haie) à l'échelle de la parcelle et du bassin versant, sur le climat (température et humidité de l'air). *In fine*, cela permettra d'évaluer l'apport de ce type de pratiques sur différents systèmes de production (élevage, grande cultures, etc.).

D'autres applications sont d'ores et déjà prévues et/ou engagées. Cela permettra également de raffiner les données d'entrée utilisées dans le modèle SHIELD (Vacquié et al, Submitted) par exemple en cherchant à extraire automatiquement les pins à crochets. Dans ce but, deux vols ont déjà été réalisés en collaboration avec la société GEOFALCO en Février et Juillet 2015 sur l'estive de Bassiès (Fig. 4.d). Cela permettra d'avoir des éléments de comparaison, voire de validation des données lidar qui seront acquises en septembre 2015 sur la tourbière de Bernadouze (Thèse T. Erudel).



Figure 4.d. Exemple d'une orthophotographie générée par drone en février 2015 (source : société GEOFALCO).

4.2 Evaluation spatialisée « multi-proxy » : pour un meilleur éclairage prospectif

Contexte

D'une façon générale, les études et recherches prospectives environnementales tendent à se concentrer sur un seul enjeu : gestion de l'eau, érosion des sols, biodiversité, climat urbain, etc. Les travaux de recherches auxquels j'ai pu participer en sont l'expression (Narcy et al, 2006 ; Houet et al. 2010 ; Houet et al. Submitted). Si les éclairages prospectifs ont pu apporter des connaissances aux acteurs pour les aider à faire des choix quant à la problématique concernée, cela ne signifie pas pour autant que leurs décisions seront bénéfiques pour d'autres enjeux environnementaux. Par exemple, si le contrôle de l'étalement urbain (concentration, remplissage des « dents creuse », etc.) a des effets bénéfiques pour limiter l'extension spatiale de l'îlot de chaleur urbain, cela peut réduire la connectivité des espaces favorables à la biodiversité faunistique, impactant ainsi l'efficacité des corridors écologiques (trames verte et bleue).

Pour fournir aux acteurs un meilleur éclairage prospectif, il convient de leur fournir une image la plus complète possible quant aux conséquences possibles des usages et changements d'usages des sols. Dénommée ici « approche multi-proxy », elle s'apparente à l'approche *Integrated Assessment Modelling* (Parker et al. 2002 ; Jakeman and Letcher 2003) ou celle visant à plus intégrer les acteurs dans l'approche précédente (Pahl-Wost and Schlumpf, 2000 ; Pahl-Wost 2002).

Méthodologie

L'objectif consiste donc à pouvoir évaluer, sur la base des cartes d'occupation et d'usages des sols, passées, actuelles et prospectives, les conséquences des changements observés et/ou simulés sur l'ensemble des services écosystémiques (Fig. 4.e) :

- Impacts sur la biodiversité et les ressources (pollinisation, séquestration du carbone, qualité des sols, qualité / quantité de l'eau...) ;
- Les risques gravitaires (crues et inondations, glissements, avalanches, chute de blocs...)
- Les sociétés (perception paysagère, économie locale...).

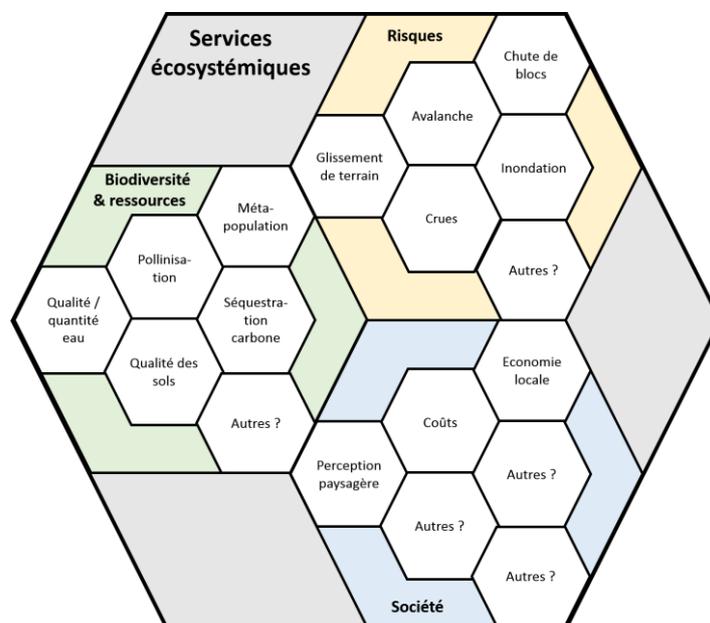


Figure 4.e. Prisme d'évaluation multi-proxy pour améliorer l'éclairage prospectif (Auteur : T. Houet).

Chaque brique consiste à évaluer l'impact des changements d'occupation et d'usages du sol à l'aide d'un modèle dédié, dont le choix dépendra de l'échelle d'approche et du type de territoire étudié. Il sera ainsi possible de fournir une analyse comparative des pertes et gains liées aux stratégies d'usages des sols.

Suivant cette approche, trois perspectives de recherches peuvent être mentionnées. La première, à court terme, s'inscrit dans le cadre du projet ANR SAMCO. Cette approche multi-proxy est déclinée en une approche multi risques (prisme jaune uniquement). Les modèles d'évaluation utilisés seront : Rockyfor3D (Bourrier et al, 2009 ; Dorren 2015) ainsi qu'un modèle régional d'estimation de la stabilité des versants (Rockforline, *unpublished*) pour les chutes de blocs, Alice pour les glissements de terrain (Grandjean et al. 2013), le modèle *Avalforline* (*unpublished*) pour les avalanches, etc. Le couplage avec des scénarios prospectifs spatialisés devrait permettre d'évaluer les capacités d'adaptation des sociétés à moyen et long terme.

La deuxième, s'inscrit dans une perspective à moyen terme, dans le cadre d'une éventuelle collaboration internationale avec des laboratoires espagnols. Le projet iPast, soumis au POCTEFA en septembre 2015, s'inscrit dans cette logique. L'objectif consiste à évaluer, à l'aide de la télédétection et de la modélisation prospective, l'impact à moyen et long terme des évolutions des estives pyrénéennes dans un contexte de changement climatique et institutionnel sur les services écosystémiques, durabilité des systèmes d'élevages (bovins et ovins) inclus, et les continuités écologiques.

La troisième s'inscrit dans une dynamique à plus long terme. Fondée sur les scénarios issus des projets ANR MODE RESPYR et SAMCO réalisés à l'échelle des Pyrénées ou de vallées (Vicdessos, Cauterets), l'objectif consiste à établir des collaborations avec des spécialistes du domaine, dans le but d'évaluer les multiples impacts possibles à l'avenir. Cela pourrait notamment se faire sous la forme d'un futur projet ANR interdisciplinaire. Riches des collaborations existantes avec le CESBIO (Ressources en neige / eau) et les partenaires du projet SAMCO, des collaborations complémentaires sur les aspects biodiversité et ressources sont en cours avec P. Verburg (Univ. Amsterdam / Post-Doc L. Vacquière) et en cours de définition avec S. Lavorel (UMR LECA – Grenoble).



4.3 Développements futurs : Modélisation (rétro-)prospective et acteurs

Contexte

Le projet ANR MODE RESPYR avait l'objectif d'explorer la reconstitution spatialement explicite des paysages passés à partir de données paléo-environnementales. Cette piste de recherche est particulièrement intéressante pour les paléo-environmentalistes car ainsi, ils peuvent par exemple alimenter en données anciennes les modèles de climat pour une meilleure prise en compte des interactions biosphère-atmosphère à l'échelle régionale / continentale (Stranberg et al. 2013). A une échelle plus fine, cela peut permettre de reconstituer des milieux suivant des horizons temporels plus éloignés que ceux qui peuvent être extraits de cartes anciennes (Hérault 2015). Toutefois, les jalons méthodologiques sont particulièrement forts (Bunting et al 2013 ; Mazier et al. 2012) en raison, (1) de la disponibilité et de la précision (densité, résolution...) des données paléo-environnementales, (2) des incertitudes quant à la provenance des pollens dans les archives sédimentaires et (3) des relations « surfaces de végétation / enregistrement pollinique » qui dépend également du (2). L'usage de modèles dynamiques et spatialement explicites pour simuler, à des échelles fines, les changements passés de façon rétrospective cette fois, et non prospective, constitue une piste intéressante à explorer.

Par ailleurs, de façon totalement décorrélée au point précédent, le projet ANR MODE RESPYR a également soulevé des enjeux quant à la place des acteurs dans la démarche de prospective spatialisée. Cela concerne, d'une part, l'usage des scénarios prospectifs par et pour les acteurs et d'autre part, le rôle et l'influence des acteurs dans le processus prospectif. En effet, se posent les questions de (1) la bonne compréhension, appropriation et utilisation des scénarios et des connaissances qu'ils produisent dans une perspective de proactivité et (2) d'une meilleure prise en compte des stratégies d'adaptation des différents types d'usagers sous certaines conditions, définies dans les scénarios.

Méthodologie

Les travaux exploratoires en modélisation rétro-prospective ont donc été prolongés, sous la direction de F. Mazier (Projet PaleoPays). Ma contribution vise à utiliser des modèles adaptés pour spatialiser les proportions d'occupation du sol qui seront estimés par des modèles polliniques, sur la base des enregistrements polliniques, en fonction de leur localisation et des conditions abiotiques qui leurs sont favorables actuellement. Diverses méthodes sont envisagées : l'utilisation de fonctions de probabilité de densité autour des points de mesures (carrotages) (Hély et al. 2014), l'utilisation, couplée ou non de modèles prospectifs de type exploratoire (Houet et al. 2006, In press) ou *backcasting* (Haslauer, 2015 ; Haslauer et al. 2012, In press). Si les aspects méthodologiques restent à approfondir, la thématique est particulièrement intéressante et sera explorée de façon collaborative à moyen terme.

Enfin, pour répondre à la seconde piste de recherche identifiée, relative à la place des acteurs dans la démarche de modélisation prospective, diverses approches seront explorées. La première consiste à travailler de façon interdisciplinaire avec des sociologues pour évaluer l'apport de la prospective spatialisée, comparativement à des diagnostics actuels et « statiques », dans l'aide à la gestion des territoires. C'est dans cet objectif que j'ai participé à l'appel à proposition du Belmont Forum dans le cadre du projet CapAdapt (*Building Local and Regional Institutional Capacity to Govern Complex Mountain Landscapes -- Improving Governance Theory and Adaptive Management Practice in Mountain Systems* – PI : Sandra Pinel and Derek Kauneckis). D'autre part, si les acteurs ne sont pas intégrés dans les exemples de modélisation prospective présentés dans ce mémoire, des

travaux existants laissent à penser que l'on peut intégrer l'influence des jeux d'acteurs dans ce domaine de façon à évaluer plus subtilement leur influence sur l'(in)efficacité de stratégies de gestion ou bien à faire ressortir des stratégies d'adaptation de certains usagers. Le couplage de la modélisation prospective avec la modélisation d'accompagnement offre ainsi des perspectives particulièrement intéressantes. Par exemple, une utilisation répétée d'un jeu de rôles pourrait permettre d'extraire une typologie de comportements face à des stratégies d'usages du sol d'autres acteurs, des événements naturels (incendie, inondation) ou des changements réglementaires. Ces comportements « types » pourraient ensuite être mobilisés dans le cadre de scénarios prospectifs afin de paramétrer les modèles de simulation.



5 Conclusion générale

Le couplage de la géographie et de la prospective environnementale a permis de développer et de revisiter des méthodes pour l'exploration du futur de façon quantitative, c'est-à-dire de façon spatialement explicite. L'apport de la dimension spatiale est significative pour la prospective : elle permet d'identifier les espaces à enjeux et ce, pour diverses stratégies d'usages des sols. La localisation des espaces « sensibles » est essentielle pour évaluer si les changements d'occupation du sol auront une réelle incidence sociale ou environnementale. Elle facilite également la participation et l'évaluation.

Ce mémoire synthétise ainsi les approches méthodologiques nécessaires à la modélisation prospective : il replace l'apport de la télédétection et de l'analyse des interactions entre les hommes et leurs milieux ; il met en perspective l'apport des modèles de simulation spatiale et émet des préconisations quant à leur bon usage ; il identifie les limites et les jalons à lever au sein de la démarche (participation, évaluation, etc.). Il présente également deux exemples d'application sur des milieux très différents, les milieux urbains et montagnards, qui tendent à démontrer la généralité de la démarche. En trame de fond, il plaide pour et justifie le caractère fondamentalement interdisciplinaire de ces recherches.

Si ces recherches ont constitué un terreau fertile à la production scientifique, elles ne peuvent être dissociées de la nécessité de les promouvoir et les diffuser dans le cadre de la formation et de l'animation de cette thématique de recherche. Mes implications au sein du laboratoire GEODE, du GDR MAGIS ou encore dans le paysage scientifique toulousain dans le cadre de l'OHM du Haut-Videssos et du projet de Zone Atelier vont dans ce sens. Il en va de même en ce qui concerne mes activités d'enseignements (Master 2) et de formations (CFE, Ecole thématique). L'encadrement et la réussite d'étudiants (master, thèse) ou de contractuels (post-doc) dans ce domaine traduisent d'ailleurs la dynamique de ce thème de recherche.

L'exercice de prospective de ce thème de recherche met en avant les perspectives qu'il me reste à creuser, seul ou de façon collaborative. Au cœur d'une multitude de développements possibles, il conviendra de s'insérer et/ou de s'entourer d'un réseau interdisciplinaire de chercheurs expérimentés et de jeunes chercheurs pour pouvoir les mener à bien. Ceci renforce d'autant la nécessité de mener de front formation, animation et administration de la recherche. Ainsi, il me semble désormais de plus en plus évident que ce mémoire constitue une étape importante de ma propre prospective, un germe de changements qui devrait inévitablement modifier ma trajectoire de chercheur.

6 Bibliographie

- Agejedad R., Hidalgo J., Doukari O., Masson V., Houet T., (2012). Assessing the influence of long term urban growth on urban climate. 6th International Congress on Environmental Modelling and Software, July 1–5, 2012, at the UFZ in Leipzig, Germany
- Alcamo J (2008) Environmental futures: the practice of environmental scenario analysis. Developments in Integrated Environmental Assessment—Volume 2. Elsevier, Amsterdam
- Amer M., Daim T.U., Jetter A., (2013). A review of scenario planning. *Futures*, vol. 46, p. 23-40.
- Barbault R., Chevassus-au-Louis B., Teyssèdre A., (2004), Biodiversité et changements globaux : enjeux de société et défis pour la recherche. Publication de l'Association pour la diffusion de la pensée française (adpf), Paris, 242 p.
- Batisani N.J. and Yarnal B. (2008). Uncertainty awareness in urban sprawl simulations: Lessons from a small US metropolitan region. *Land Use Policy*. 26, 178-185
- Besancenot JP. (2002). Vagues de chaleur et mortalité dans les grandes agglomérations urbaines. *Environnement, risques et santé*; 1(4):229-40
- Bourrier F, Dorren L, Nicot F, Berger F, Darve F (2009) Toward objective rockfall trajectory simulation using a stochastic impact model. *Geomorphology*, 110, 68-79.
- Bradfield R., Wright G., Burt G., Cairns G., Van Der Heijden K., (2005). The origins and evolution of scenario techniques in long range business planning, *Futures*, vol. 37, p. 795–812.
- Brown, D.G., Page, S., Riolo, R., Zellner, M., Rand, W., (2005). Path dependence and the validation of agent-based models of land use. *International Journal of Geographical Information Science*, 19(2), 153-174.
- Bunting M.J., Farrell M., Broström A., Hjelle K.L., Mazier F., Middleton R., Nielsen A.-B., Rushton E., Shaw H., Twiddle C.L., (2013). Palynological perspectives on vegetation survey: a critical step for model-based reconstruction of Quaternary land cover. *Quaternary Science Review*. 82, 41-55
- Butler SJ, Vickery JA and Norris K (2007) Farmland biodiversity and the footprint of agriculture. *Science* 315:381-384
- DATAR (Délégation à l'Aménagement du Territoire et à l'Action Régionale). (1971a). Scénarios d'aménagement du territoire. Essais méthodologiques. Paris : La documentation française, collection Travaux et Recherches de Prospective.
- DATAR (Délégation à l'Aménagement du Territoire et à l'Action Régionale). (1971b). Une image de la France en l'an 2000. Scénario de l'inacceptable. Paris : La documentation française, collection Travaux et Recherches de Prospective.
- Dearing J.A., Braimoh A.K., Reenberg A., Turner B.L., Van der Leeuw S., (2010). Complex land systems: the need for long time perspectives to assess their future. *Ecology and Society*, vol. 15, n°4, p. 21.
- Delamarre A. (2002). La prospective territoriale. Paris : La documentation française. Collection Territoire en mouvement.
- Dorren, L.K.A., (2015). Rockyfor3D (v5.2) revealed - Transparent description of the complete 3D rockfall model. *ecorisQ paper* (www.ecorisq.org), 32 p.
- Dousset B, Gourmelon F, Giraudet E, Laaidi K, Zeghnoun A, Bretin P, Vandentorren S, (2011) Evolution climatique et canicule en milieu urbain : apport de la télédétection à l'anticipation et à la gestion de l'impact sanitaire. Ed. Fondation MAIF (2008-2011), 82 p. http://opac.invs.sante.fr/doc_num.php?explnum_id=7240
- Durand J. (1972). A new method for constructing scenarios, *Futures*, vol. 4, p. 325–330.
- Emsellem K., Liziard S., Scarella F., (2012). La géoprospective: l'émergence d'un nouveau champ de recherche? *L'espace Géographique*, vol. 12, p. 154-168.
- Étienne M. (dir.), (2010) La modélisation d'accompagnement : une démarche en appui au développement durable, Paris, Quae éditions.

- Étienne M., (2012), La modélisation d'accompagnement : une forme particulière de géoprospective ?, *L'Espace Géographique*, vol. 41, n° 2, 128-137.
- Galop D., (2014) Interactions environnement-sociétés en milieu montagnard: la passé a de l'avenir. *Habilitation à diriger des recherches*, INP-Toulouse.
- Gauchere, C., Alleaume, S., Hély, C., (2008). The Comparison Map Profile method: a strategy for multiscale comparison of quantitative and qualitative images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46 (9), 2708-2719.
- Godet M., (1986), Introduction to la prospective: seven key ideas and one scenario method. *Futures*, vol. 18, p. 134-157
- Godet M., (1992), De l'anticipation à l'action, Dunod, 390 p.
- Gordon LJ, Peterson GD and Bennett EM (2008) Agricultural modifications of hydrological flows create ecological surprises. *Trends in Ecology and Evolution*, 23:211-219
- Gourmelon F., Etienne M., Rouan M., Kerbirou C., Charles M., Bioret F., Chlous-Ducharme F., Guermeur Y., Levrel H., (2008). Éléments de prospective environnementale dans une réserve de biosphère, *Cybergeo*, n° 429, <http://cybergeo.revues.org/20343>
- Grandjean, G, Bernardie, S., Malet, J.P., Puissant, A., Houet, T., Berger, F., Fort, M., Pierre, D. (2013). SAMCO: Society Adaptation for coping with Mountain risks in a global change COntext. EGU general Assembly 2013, Vienne : Autriche
- Harper, J. L. (1982). After description. *In* E. J. Newman. Oxford, Blackwell, The Plant Community as a working mechanism: 1-10.
- Haslauer E. (2015) Application of a spatially explicit backcasting model: A case study of sustainable development in Salzburg, Austria. *Applied Geography*, 58, 128-140.
- Haslauer E., Biberacher M., Blaschke T. (2012) GIS-based Backcasting: An innovative method for parameterisation of sustainable spatial planning and resource management, *Futures*, 44, 292-302.
- Haslauer E., Biberacher M., Blaschke T. (In press) A spatially explicit backcasting approach for sustainable land-use planning, *Journal of Environmental Planning and Management*, <http://doi.dx.org/10.1080/09640568.2015.1044652>
- Hatem F. (1993). La prospective : Pratiques et méthodes, Economica, série "Gestion", Paris.
- Haines-Young R., Chopping M., (1996). Quantifying landscape structure: a review of landscape indices and their application to forested landscapes, *Progress in Physical Geography*, vol. 20, iss. 4, p. 418-445.
- Hély C., Lézine A.M. and ADP contributors (2014) Holocene changes in African vegetation: tradeoff between climate and water availability. *Climate of the Past*, 10, 681-686.
- Herrault P.A. (2015) Extraction et gestion de données spatiales incertaines pour la cartographie des forêts anciennes, Thèse de doctorat Université Toulouse Jean-Jaurès.
- Houet T., (2006a), Occupation des sols et gestion de l'eau : modélisation prospective en paysage agricole fragmenté (Application au SAGE du Blavet), Thèse de Doctorat, Université Rennes 2, Rennes, 16 juin 2006, 368 p
- Houet T. (2006b). Modélisation prospective de l'occupation du sol en zone agricole intensive : Evaluation par simulations dynamiques de l'impact de l'évolution des exploitations agricoles dans la France de l'Ouest, *Norois*, n°198, 2006/1, p. 35-47
- Houet T., Hubert-Moy L., Tyssot C., (2008). Modélisation prospective spatialisée à l'échelle locale : approche méthodologique, *Revue Internationale de Géomatique*, vol. 18, n°3, p. 345-373.
- Houet T., Loveland T. R., Hubert-Moy L., Napton D., Gauchere C., Barnes C., (2010). Exploring subtle land use and land cover changes: a framework based on future landscape studies, *Landscape Ecology*, vol 25, iss. 2, p.249-266.
- Houet T., Gourmelon F., (2014) La géoprospective – Apport de la dimension spatiale aux approches prospectives, *Cybergéo*, n°667, <http://cybergeo.revues.org/26194>
- Houghton RA, Hackler JL and Lawrence KT (1999) The US carbon budget: Contributions from land-use change. *Science* 285:574-578

- Hubert-Moy L., Clément B., Lennon M., Houet T. et Lefeuvre E., (2003) « Etude de zones humides de fond de vallées à partir d'images hyperspectrales CASI : Application à un bassin versant de la région de Pleine-Fougères (Bretagne, France)», *Photo-Interprétation*, Ed. Hubert-Moy L., 2003/01, pp. 33-43
- Hubert-Moy L., Corgne S., Houet T. et Tissot C., (2006) Modélisation prédictive et prospective des changements d'occupation des sols. Actes du colloque Interactions Nature - Société, analyse et modèles. UMR6554 LETG, La Baule 2006. 7 p.
- Huss W.R., Honton E.J., (1983). Scenario planning—what style should you use? *Long Range Planning*, vol. 20, p. 21–29.
- Huss W.R., Honton E.J., (1987). Alternative methods for developing business scenarios, *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 31, 219–238.
- InEE – Institut Ecologie et Environnement. (2009). Prospective de l'Institut Ecologie et Environnement du CNRS, Compte rendu des 12 et 13 mai, Rennes, InEE – CNRS.
- InSHS - Institut Sciences Humaines et Sociales. (2009). Projet scientifique et organisationnel, Institut Sciences Humaines et Sociales, CNRS.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), (2007). Summary for Policymakers. In: Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J., Hanson, C.E. (Eds.), *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)*. Cambridge, UK. Cambridge University Press
- Jakeman, A.J., Letcher, R., (2003). Progress in integrated assessment and modelling. *Environmental Modelling and Software*, 18, 491-501.
- Kalkstein LS, Green JS. (1997). An evaluation of climate/mortality relationships in large U.S cities and the possible impacts of climate change. *Environmental Health Perspectives* 105: 84-93.
- Kolb, M., Mas, J.F., Galicia, L., (2013). Evaluating drivers and transition potential models in a complex landscape in southern Mexico. *International Journal of Geographical Information Science*, 27(9), 1804-1827.
- Kok K, Verburg P., Veldkamp T., (2004). Integrated Assessment of the land system: The future of land use, *Land Use Policy*, vol. 24, p. 517-520.
- Laaidi K., Zeghnoun A., Dousset B., Bretin P., Vandentorren S., Giraudet E., Beaudeau P., (2012) The Impact of Heat Islands on Mortality in Paris during the August 2003 Heat Wave, *Environmental Health Perspectives*, vol. 120, pp. 254-259
- Lambin E.-F., Geist H.-J., (2006). Land-Use and Land-Cover Change – Local processes and Global impacts, *Global Change – The IGBP Series*, Ed. Springer.
- Ligman-Zielinska A., Jankowski P., (2014). Spatially-explicit integrated uncertainty and sensitivity analysis of criteria weights in multicriteria land suitability evaluation. *Environmental Modelling and Software*, 57, 235-247.
- Liston, G. E., Elder, K., (2006a). A distributed snow-evolution modeling system (SnowModel). *Journal of Hydrometeorology*, 7(6), 1259-1276.
- Liston, G. E., Haehnel, R. B., Sturm, M., Hiemstra, C. A., Berezovskaya, S., Tabler, R. D., (2007). Instruments and methods simulating complex snow distributions in windy environments using SnowTran-3D. *Journal of Glaciology*, 53(181), 241-256.
- Maron M and Fitzsimons JA (2007) Agricultural intensification and loss of matrix habitat over 23 years in the West Wimmera, south-eastern Australia. *Biology and Conservation*, 135:587-593
- Masson V., L. Gomes, G. Pigeon, C. Liousse, V. Pont, J.-P. Lagouarde, J. Voogt, J. Salmond, T. R. Oke, J. Hidalgo, D. Legain, O. Garrouste, C. Lac, O. Connan, X. Briottet, S. Lachérade, P. Tulet, (2008) The canopy and aerosol particles interactions in toulouse urban layer (CAPITOU) experiment. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 102(3-4), 135-157.
- Matson PA, Parton WJ, Power AG and Swift MJ (1997) Agricultural intensification and ecosystem properties. *Science*, 277:504-509

- Mazier F., Gaillard, M.J., Kuneš, P., Sugita S., Trondman, A.K., Brostöm A. (2012). Effect of site selection and parameter setting on REVEALS model estimates of plant abundance using the Czech Quaternary Palynological Database: the LANDCLIM project I. *Review of paleobotany and palynology*, 187: 38-49.
- Millennium Ecosystem Assessment, (2005). Scenarios, Washington D.C., Island Press.
- Meadows D., Meadows D., Randers J. Behrens W., (1972) *The Limits to Growth*, Universe Books, New York, 205p.
- Mermet L., (1992) *Stratégies pour la gestion de l'environnement. La nature comme jeu de société ?* Editions l'Harmattan, Coll. Environnement, 205p.
- Mermet L. (2003). *Prospectives pour l'environnement. Quelles recherches? Quelles ressources? Quelles méthodes?* Collection Réponses environnement. La Documentation Française.
- Messina J.P., Evans T.P., Manson S.M., Shortridge A.M., Deadman P.J., Verburg P.H. (2008). Complex systems models and the management of error and uncertainty. *Journal of Land Use Science*. 3(1):11-25.
- Morin E., (1990) *Introduction à la pensée complexe*, E.S.F éditeur, 158 p.
- Narcy J.-B., Poux X. et Houet T., (2006) *Méthode et apports d'une intervention prospective dans une problématique de gestion des eaux: le cas du Blavet*, in *Qualité de l'eau en milieu rural : savoirs et pratiques dans les bassins versants*, Ed. P. Mérot, Editions Cemagref, Cirad, Ifremer, Inra, pp. 287-296
- Oke T.R., (2004). *Urban observations*, World Meteorological Organization, IOM Report n° 81, WMO/TD n° 1250
- Pahl-Wostl C., Schlumpf C., (2000). Models at the interface between science and society: impacts and options. *Integrated Assessment* 1, 267–280.
- Pahl-Wostl, C. (2002) Participative and Stakeholder-based policy design, evaluation and modeling processes. *Integrated Assessment*, 3, 3-14. 2002
- Parker P., Letcher R., Jakeman A.J., Beck M.B., Harris G., Argent R.M., Hare M., Pahl-Wostl C., Voinov A., Janssen M., Sullivan P., Scoccimarro M., Friend A., Sonnenshein M., Barker D., Matejcek L., Odulaja D., Deadman P., Lim K., Larocque G., Tarikhi P., Fletcher C., Put A., Maxwell T., Charles A., Breeze H., Nakatani N., Mudgal S., Naito W., Osidele O., Eriksson I., Kautsky U., Kautsky E., Naeslund B., Kumblad L., Park R., Maltagliati S., Girardin P., Rizzoli A., Mauriello D., Hoch R., Pelletier D., Reilly J., Olafsdottir R., Bin S. (2002). Progress in integrated assessment and modelling. *Environmental Modelling and Software* 17, 209-217
- Peng P., Kumar A., van den Dool H., Barnston A.G., (2002). An analysis of multimodel ensemble predictions for seasonal climate anomalies, *Journal of Geophysical Research*. 107(D23), 1-12, <http://dx.doi.org/10.1029/2002JD002712>
- Pielke, R.A., Sr., (2002): *Mesoscale meteorological modeling*. 2nd Edition, Academic Press, San Diego, CA, 676 pp.
- Piveteau V., (1995) *Prospective et territoires: apports d'une réflexion sur le jeu*, Collection Etudes, Série Gestion des territoires, Cemagref Editions, Antony, 298 p.
- Philipponneau M. (1971). *Géographie et perspectives à long terme*, Ouvrage de synthèse, IVth international Symposium of the International Geographical Union, Commission on Applied Geography, Editions Coconnier, Sablé, France.
- Pigeon G., Legain D., Durand P. and Masson V. (2007). Anthropogenic heat release in an old European agglomeration (Toulouse, France), *International journal of climatology*. 27: 1969–1981
- Pontius R.G., Schneider L.C., (2001). Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed (Massachusetts, USA), *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 85, p. 239–248.
- Pontius R.G. (2002). Statistical methods to partition effects of quantity and location during comparison of categorical maps at multiple resolutions. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 68, p. 1041–1049.

- Pontius R.G., Huffaker D., Denman K., (2004a). Useful techniques of validation for spatially explicit land-change models. *Ecological Modelling*, vol. 179, iss. 4, p. 445-461.
- Pontius R.G., Shusas E., McEachern M., (2004b). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 101, p. 251–268.
- Pontius R.G., Boersma W., Castella J.C., Clarke K., de Nijs T., Dietzel C., Duan Z., Fotsing E., Goldstein N., Kok K., Koomen E., Lippitt C.D., McConnell W., Sood A.M., Pijankowski B., Pidhadia S., Sweeney S., Trung T.N., Veldkamp A.T., Verburg P., (2008). Comparing the input, output, and validation maps for several models of land change. *Annals of Regional Science*, vol. 42, iss. 1, p. 11-27.
- Rapinel S., Thomas A., Hubert-Moy L., Clément B., Dufour S., Cudennec C., (2011). Automatic hydrogeomorphologic units (HGMU) mapping at watershed scale from LiDAR data: Toward a functional assessment of wetlands. XXV IUGG General Assembly, Melbourne, Australia, 28 June-7 July.
- Ramankutty N., Delire C., Snyder P., (2006) Feedbacks between agriculture and climate: an illustration of the potential unintended consequences of human land use activities, *Global and Planetary Change*, n° 54, p. 79-93
- Sala OE, Chapin FS, Armesto JJ, Berlow E, Bloomfield J, Dirzo R, Huber-Sanwald E, Huenneke LF, Jackson RB, Kinzig A, Leemans R, Lodge DM, Mooney HA, Oesterheld M, Poff NL, Sykes MT, Walker BH, Walker M and Wall DH (2000) Biodiversity - Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science* 287:1770-1774
- Schoemaker P.J.H. (1993). Multiple Scenario development: its conceptual and behavioral foundation, *Strategic Management Journal*, vol. 14, p. 193–213.
- Schoemaker P.J.H. (1995). Scenario planning: a tool for strategic thinking, *Sloan Management Review*, vol. 36, p. 25–40.
- Schwartz P. (1996). The art of the long view: planning for the future in an uncertain world, Currency Doubleday, New York.
- SheerenD., Ribiere O., Raynaud B., Ladet S., Paegelow M., Houet T. (2012) Assessing land cover changes in the French Pyrenees since the 1940s: a semi-automatic GEOBIA approach using aerial photographs, Proceedings of the AGILE'2012 conference, 23-27 April, Avignon, France, pp.318-320, ISBN: 978-90-816960-0-5.
- Strandberg G., Kjellström E., Poska A., Wagner S., Gaillard M.-J., Trondman A.-K., Mauri A., Birks H. J. B, Bjune A.E., Davis B. A. S., Fyfe R., Giesecke T., Kalnina L., Kangur M., Kaplan J. O., van der Knaap W. O., Kokfelt U., Kuneš P., Latałowa M., Marquer L., Mazier F., Nielsen A.B., Smith B., Seppä H., and Sugita S. (2013). Regional climate model simulations for Europe at 6 k and 0.2 k yr BP: sensitivity to changes in anthropogenic deforestation. *Climate of the Past Discussion*, 9, 5785–5836
- Tan J, Zheng Y, Tang X, Guo C, Li L, Song G, et al. (2010). The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai. *International Journal of Biometeorology*; 54 (1):75-84.
- Tenerelli P. and Carver S. (2012). Multi-criteria, multi-objective and uncertainty analysis for agro-energy spatial modelling, *Applied Geography*, 32(2):724-736
- Turner B., Lambin E., Reenberg A., (2007). The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Science of the USA*, vol. 104, n°52, p. 20666-20671.
- Uuemaa E., Antrop M., Roosaare J., Marja R., Mander Ü., (2009). Landscape metrics and indices: an overview of their use in landscape research, *Living Reviews in Landscape Research*, n°3, <http://www.livingreviews.org/lrlr-2009-1>
- Vacquié L. (2015) Modélisation prospective des changements des modes d'occupation et d'usages des sols. Approche multi-échelles appliquée sur les Pyrénées. Thèse de doctorat. Université Toulouse Jean Jaurès. 307 p.
- Van der Leeuw S., Costanza R., Aulenbach S., Brewer S., BurekM., Cornell S., Crumley C., Dearing J.A., Downy C., Graumlich L.J., Heckbert S., Hegmon M., Hibbard K., Jackson S.T., Kubiszewski I.,

- Sinclair P., Sörlin S., Steffen W., (2011) Toward an integrated history to guide the future. *Ecology and Society*, vol. 16, n°4, <http://eprints.soton.ac.uk/203317/>
- van Vliet M., Kok K., Veldkamp T. (2010) Linking stakeholders and modellers in scenario studies: The use of Fuzzy Cognitive Maps as a communication and learning tool, *Futures*, 42(1), 1-14
- Veldkamp A., Lambin E.-F., (2001) Predicting land-use change, *Agriculture Ecosystems Environment*, vol. 85, pp. 1-6
- Verburg P., Schot P., Djist M., Veldkamp T., (2004) Land use change modelling: current practices and research priorities, *GeoJournal*, vol. 61, n°4, 309–324
- Vitousek PM, Mooney HA, Lubchenco J and Melillo JM (1997) Human domination of Earth's ecosystems. *Science* 277:494-499
- Voiron C. (2006). L'espace dans la modélisation des interactions nature-société. Actes du colloque International Interactions Nature-Société. La Baule, 3-6 mai 2006.
- Voiron C. (2012). L'anticipation du changement en prospective et des changements spatiaux en géoprospective, *L'espace Géographique*, vol. 12, p. 99-110.

7 Annexes

Liste des annexes

ANNEXE 1 : RÉCITS DES SCÉNARIOS PROSPECTIFS À L'HORIZON 2100 POUR L'AGGLOMÉRATION TOULOUSAIN ET IMPACTS SUR LE CLIMAT URBAIN (PROJET ACCLIMAT)	100
ANNEXE 2 : RÉCITS DES SCÉNARIOS PROSPECTIFS À L'HORIZON 2040 ET 2100 POUR CAUTERETS (PROJET SAMCO)	104

Annexe 1: Récits des scénarios prospectifs à l'horizon 2100 pour l'agglomération toulousaine et impacts sur le climat urbain (Projet ACCLIMAT)

La figure suivante schématise les hypothèses retenues ayant conduits aux sept scénarios Ville Réactive, Ville Réfléchie, Ville Dynamique, Ville Verte, Ville Néfaste, Ville Passive, Business as usual.

Systemic scenario		Reactive city	Thoughtful city	Dynamic city	Green city	Nocuous city	Passive city	Business as usual
Worldwide trends scenario (2010-2100)								
2010 - 2040	Local trends scenario							
	Land use scenario							
	Technology trends scenario							
2040 - 2100	Local trends scenario							
	Land use scenario							
	Technology trends scenario							

The 'reactive city' scenario

The economy of Toulouse, which is primarily based on the aerospace sector, is performing very well between 2010 and 2040. Therefore, the agglomeration of Toulouse remains an attractive territory where the population is continuously increasing (+44% of new households). In terms of urban planning, despite the Coherent Territorial Scheme (SCoT), the development of Toulouse metropolitan area is not regulated. Indeed, the public policies struggle to converge. Consequently, the sprawl growth trend continues (91666 ha of artificialized areas in 2040) under the form of detached houses (83% of the total developed area) and is accompanied by new road arteries that are quickly clogged. This phenomenon jeopardizes all principle of density and structure around the public transport networks. The

preservation of agricultural and natural areas is secondary. In terms of energy, the local policy remains dependent on the national trends, which highly weakens the territory (+8% of heating needs). The energy and environmental concerns are barely present. Regulations and renovation rate progress slowly.

By 2040, the price of oil increases and the oil shock has strong consequences. A global economic crisis hits all countries that are dependent on the market economy. Conscious of its technological backwardness and its strong dependence on carbon energy, the state invests heavily. Indeed, the regulatory and technological developments are finally underway.

At the level of Toulouse, the aeronautic industry is very concerned, strongly weakened by the global crisis in the period between 2040 and 2100. Therefore, the territory loses its attractiveness. In parallel, the population falls (-9% since 2070) and becomes older and poorer. The local policies, nevertheless, maintain an economic system that is focused on the energetic innovation. Faced with scarcity, effective local governance is set up: unity is strength. The aeronautic industry is stopped, and the urban density is enhanced and controlled. Furthermore, Toulouse megalopolis is formed and maintains a hyperpolarization around Toulouse city. Small collective housing become the dominant urban form (detached houses represent 46% of the total developed area). Likewise, natural and agricultural areas are better protected or restored (only 1472 ha of new developed areas); they participate in refreshing the city. On the energy side, the economic difficulties push to innovate and review the insulation modes and the consumption.

The 'thoughtful city' scenario

The local trends in 2010-2040 are similar to the previous scenario. The urban sprawl is contained through an integrated territorial project. In parallel, green areas are preserved for their ecological functionality. New green spaces are even reintroduced for their climatic beneficial role. The urban density is enhanced and controlled (terraced houses are multiplied by 8). Consequently, small collective housing is privileged (multiplied by 2). On the energy level, local politics remain dependent on the national trends. This greatly weakens the territory. Regulations evolve slowly, while, citizens' environmental awareness and willingness to reduce energy consumption appear. In fact, the individual is the catalyst of a strong culture of innovation which promotes the development of new techniques in new or existing buildings and also allows to improve the comfort and the quality of life.

By 2040, the price of oil increases. Still, the oil shock is has strongly negative impacts. A global economic crisis is hits all countries that are dependent on the market economy. At the global level, climate policies that aim to reduce the emission of gases with greenhouse effect are efficient. The low-carbon technologies are available and mitigate the impact of the peak oil.

At Toulouse level, the aeronautic industry is fully concerned and especially weakened by the global crisis between 2040 and 2100. Therefore, the territory loses its attractiveness. In parallel, the population falls (-9% since 2070) and becomes older and poorer. The local policies, nevertheless, maintain an economic system that is focused on the energetic innovation. New urban policies promote the archipelago city. Only municipalities located about 15 minutes by public transport are allowed to develop. Also, strings of transport alternatives to road transport develop in parallel to inter-modality develop. Furthermore, they preserve non-urban areas (only 1675 ha of new developed areas). The high vegetation rate participates in refreshing the city and improving the living quality of the environment. The innovation and regulation develop rapidly. Indeed, the urban planning integrates the

use behavior and comfort concept. Small collective housing (42% of the total developed area), which are energetically efficient and energy saving attitude, lead to a real decrease in energy consumption (66% of gain in heating).

The 'dynamic city' scenario

Based on current trends, the sprawl development resembling an oil spot is stopped through the green and blue network defined in urban planning scheme. Besides, a territorial economic development project emerges based on an efficient transport policy and the promotion of a dense city with high buildings. Yet, managing and preserving non-developed areas located outside the green corridors are nevertheless not a priority. In terms of energy, strict energetic standards are defined and applied to all buildings; regulations and innovation are very dynamic and favor renovation. To reduce energy consumption, urban design fosters an extreme compact development accompanied by density control resulting in small and large collective housing (+56% of small collective housings and +450% of large collective housings during 2010-2040). Autonomous buildings bloom and behaviors become virtuous.

The price of oil increases. However, in 2040 the peak oil is limited by the technological effort and the anticipated economic diversification. Climatic and energetic awareness of policy makers lead to a more integrated, shared and controlled organization of regulatory technological efforts.

The economy is diversified in order to reduce its dependence on a single sector of industry. Since the territory is less sensitive to the global context, it retains a strong attractiveness. The local economy is basically focused on the exploitation of local resources and innovation on energy-efficient urban design. Moreover, the territorial development responds to a political will and a regional competence (regional SCoT). In addition to that, urban areas are dense. The majority of new developed areas (+37% compared to 2010) consists of collective housings (+91% of terraced houses and +40% of small collective housings during 2040-2100). Still, high buildings develop without increasing green spaces. The pooling and networking of the produced energy becomes systematic. Indeed, users have better control of their consumption and avoid mismanagement. Innovation and regulation develop rapidly which authorizes further improvement of the energy performance of buildings.

The 'green city' scenario

The local trend is similar to the reactivity city scenario. The urban sprawl resembling an oil spot is stopped through the implementation of an integrated territorial project. In parallel, green areas are preserved for their ecological functionality. New green spaces are even reintroduced for their climatic beneficial role preserving most of non-developed areas. The diversity function is privileged. Additionally, the urban density is enhanced and controlled; small collective housing is privileged; the organization of transport is optimized. Likewise, strict energetic standards are defined and applied to all buildings; the regulations and innovations are very dynamic and favor renovation. In order to reduce energy consumption (-50%), urban design projects and extreme compactness accompanied by a density control (+815% of terraced houses) resulting in small and large collective housing (+100%). Autonomous buildings bloom and behaviors become virtuous.

The impact of the peak oil and local trend is similar to the dynamic city scenario. The economy is diversified and the territory retains a strong attractiveness (+30000 ha of new developed areas representing). New urban policies foster the archipelago city. Only municipalities located about 15 minutes by public transport are allowed to develop. In

terms of patterns of urban growth, compact development is promoted. Indeed, non-urban areas are protected or renovated. Only few municipalities can develop. In parallel, the high vegetation participates in refreshing the city and improves the living quality of the environment. The pooling and networking of the produced energy becomes systematic allowing for a better control of energy consumption and the avoidance of mismanagement.

The 'nocuous city' scenario

The local trend starts (2010-2040) similarly to the reactive city scenario.

The decarbonation of economy, initiated since 2020, leads to a limited impact of the peak oil. Nevertheless, the price of oil continues to increase, at a very strong pace until 2060. By 2040, policy makers do not deem necessary to question the current economic system and do not adopt an environmentally virtuous path.

Toulouse agglomeration is severely hit by the global crisis. Consequently, the aeronautic industry is weakened, whereas the local authorities do not anticipate any energy policy. The territory is losing its attractiveness and the population drops and becomes older and poorer. Socioeconomic inequalities between municipalities and inter-municipalities raise tensions. The urban sprawl spreads following past trends (+9612 ha and +2218 ha during 2040-2070 and 2070-2100 periods, respectively) mainly under the form of detached houses. Yet, the SCoT fails and local communities compete for urban development. Single houses progressively broadcast at the expense of agricultural areas. In parallel, the economic difficulties affect the regulation, production and energy consumption modes. The regulation, hardly requiring in terms of performance, favors neither the emergence nor the appropriation of innovations. Moreover, renovations are stopped and behaviors become energy intensive (+6% of energy consumption).

The 'passive city' scenario

This scenario starts similarly to the reactive city scenario although the economy is based on diversification boosts in the bio-health and agri-food sectors thanks to local policies. The decarbonation of economy, initiated since 2020, leads to a limited impact of the peak oil. Nevertheless, the price of oil continues to increase, at a very strong pace until 2060. By 2040, policy makers do not deem necessary to question the current economic system and do not adopt any environmentally virtuous path.

Toulouse economic sectors are not strongly affected as the economy is relatively diversified. The territory remains attractive and the population continues to increase (+20% since 2040). The urban sprawl continues following past trends. Yet, the SCoT fails and local municipalities compete for urban development. Individual houses (81%) progressively broadcast at the expense of agricultural areas. In parallel, the density of developed areas decreases (-25%). The energy regulation, hardly demanding, evolves very slowly, leading to low levels of innovation and not triggering collective awareness towards energy saving and climate adaptation. Conversely, it contributes to the emergence of a bottom-up environmental awareness of citizens and willingness to save energy. The individual is the catalyst of a culture of innovation which promotes the development of new techniques in new or existing buildings but their penetration and influence on usages is longer than when imposed by regulations.

The 'business as usual' scenario

This scenario is similar to the Passive city scenario except that no bottom-up initiatives driven by citizens emerges and therefore behaviors do not evolve.

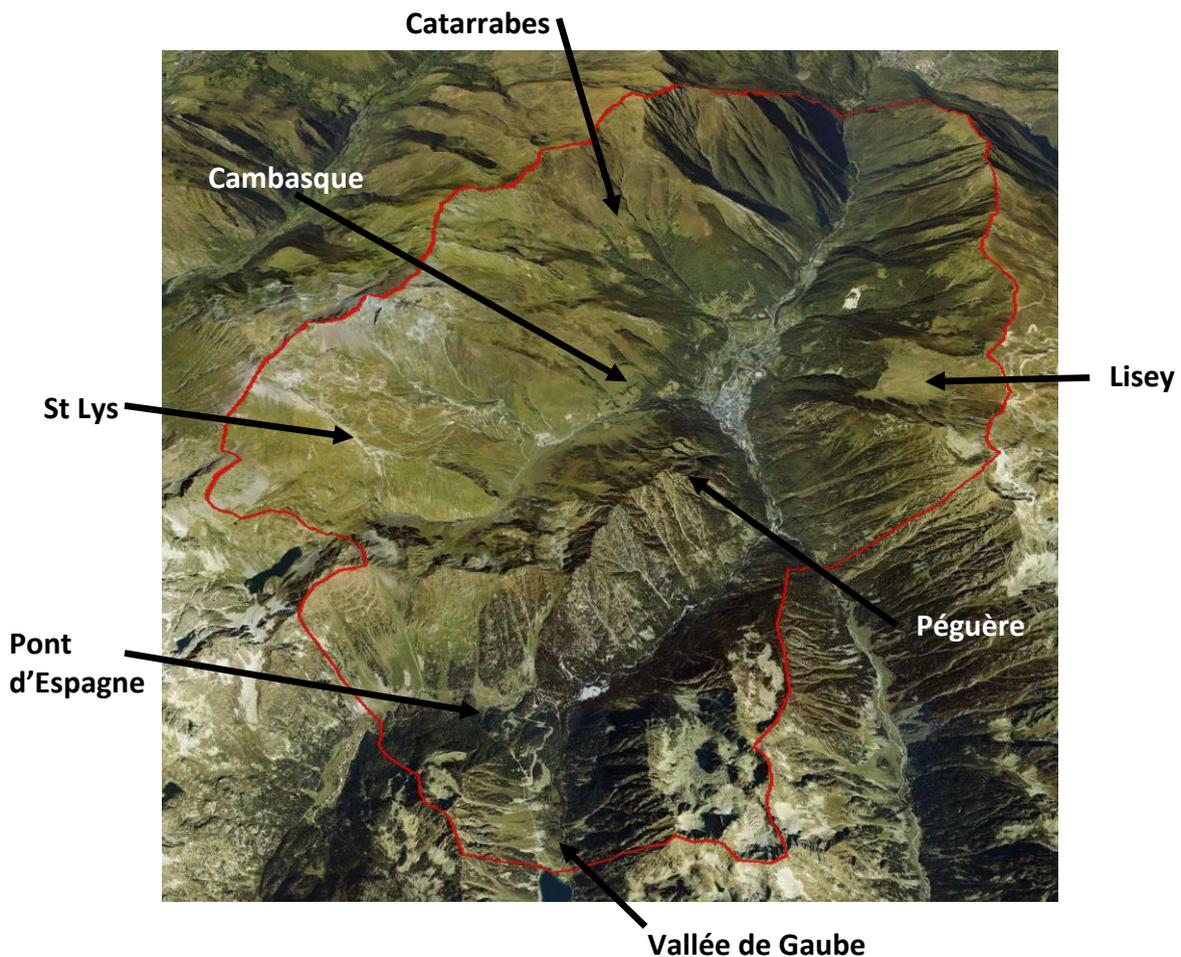
Annexe 2 : Récits des scénarios prospectifs à l'horizon 2040 et 2100 pour Cauterets (Projet SAMCO)

Résumé

Dans le cadre du projet de recherche SAMCO, financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR), un exercice de prospective a été réalisé sur la commune de Cauterets (Hautes-Pyrénées) afin d'évaluer l'influence combinée, à moyen et long termes, des changements d'occupation et d'usages des sols et du changement climatique sur les risques gravitaires (chutes de blocs, mouvements de terrains, etc.).

Deux ateliers participatifs ayant regroupé une dizaine d'acteurs locaux, représentants d'organismes participant directement ou indirectement à la gestion et à l'évolution du territoire, ont permis de co-construire des scénarios prospectifs présentant des visions contrastées de l'évolution possible du territoire aux horizons 2040 et 2100. Ces scénarios reposent sur un contexte national et international donné (issu de prospectives existantes), et visent à intégrer les spécificités du territoire étudié qui ne couvre pas la totalité de la commune de Cauterets (cf. figure ci-contre).

Au final, quatre scénarios ont été construits et sont présentés dans ce document.



Scénario « Libéralisation et abandon collectif du territoire »

Synthèse

CHEMINEMENT 2040

- Désengagement territorial de l'Etat et de l'Europe (finances, RH et techniques) et transfert insuffisant aux collectivités
- Disparition de la PAC, déprise agricole et absence d'entretien des estives
- Fermeture des espaces et diminution de l'attractivité touristique
- Absence de vision du territoire à long terme et gestion de l'urgence (vision à court-terme)
- Diminution des moyens et des compétences du PNP
- Chute du prix de l'immobilier et des recettes de la commune

IMAGE 2040: « Cauterets s'en sort mieux que les communes voisines »

- Moindre confort à vivre à Cauterets
- Quelques friches urbaines, bâtiments dégradés
- Village suranné
- Maintien de la zone cœur du PNP et des thermes –

CHEMINEMENT 2100

- Accélération du phénomène d'abandon du territoire
- Désengagement de la gestion collective dans les territoires périphériques

IMAGE 2100: « Cauterets, un hameau que l'on traverse »

- Déclin du « village » qui devient un hameau.
- (Le thermalisme) et le Pont d'Espagne attirent encore le peu de visiteurs qui se déplacent à Cauterets.

Récit à horizon 2040

Contexte national

La libéralisation des marchés en cours en Europe depuis la seconde moitié du XX^{ème} siècle se poursuit et les échanges internationaux de biens et de services s'intensifient. Avec une population mondiale atteignant 9 milliards d'habitants en 2040² (contre 7 milliards en 2012), les tensions s'accroissent sur la demande en produits agricoles pour l'alimentation humaine et animale. Le modèle dominant de l'individualisme économique réduit l'État à un rôle de garant des libertés individuelles dont les interventions dans la gestion des activités économiques sont fortement restreintes. En Europe, la Politique Agricole Commune décline à partir de 2020 puis disparaît progressivement. Les secteurs agricoles et sylvicoles deviennent dès lors des secteurs économiques à part entière ce qui tend à accentuer la volatilité des prix agricoles sur les marchés d'ores et déjà fortement sujets aux variations conjoncturelles induites par la concurrence internationale. En France, l'agriculture de montagne décline face à l'augmentation des prix des céréales et l'accroissement de la compétition dû aux importations massives de

produits agricoles à bas coûts. En 2040, l'élevage est considérablement réduit et se concentre dans quelques zones herbagères spécialisées et fortement productives.

Les individus se désengagent peu à peu de la gestion des affaires publiques. En l'absence d'accord international, les négociations sur le climat sont interrompues. Le marché européen d'échange de quotas de CO₂ disparaît en 2022, la transition énergétique n'a pas lieu et les politiques de préservation de l'environnement et de la biodiversité n'évoluent pas à l'échelle nationale. La gestion des milieux répond dorénavant aux préoccupations économiques du secteur privé, peu enclin à entretenir les espaces naturels en l'absence d'enjeux économiques forts. Seules les forêts productives ou ayant un potentiel touristique important font l'objet d'un entretien régulier. Dans les régions les moins compétitives, de vastes zones forestières sont en revanche laissées à l'abandon.

La société dépend quant à elle toujours fortement des énergies fossiles dont les prix fluctuent au gré de l'évolution du contexte géopolitique mondial. Face à l'augmentation du nombre de retraités en Europe, l'offre touristique se densifie pour répondre à un tourisme de masse, qui se

² Projection de l'ONU – Scénario « Fertilité Moyenne » - Datar (2012), Des images de la France en l'an 2040.

développe en hiver en particulier dans les grandes stations de montagne. En 2040 plus d'un quart de la population française est âgée de plus de 65 ans (contre 18% aujourd'hui). Ce vieillissement de la population remet en cause le système de retraites par répartition qui disparaît progressivement au profit d'un système par capitalisation³. Le pouvoir d'achat de nombreux retraités de la classe moyenne se réduit. Parallèlement, l'approvisionnement des ménages dans les grandes surfaces est en augmentation. La maîtrise des coûts est privilégiée, au détriment du commerce de détail et de la qualité des produits.

Description du scénario sur Cauterets

Agriculture

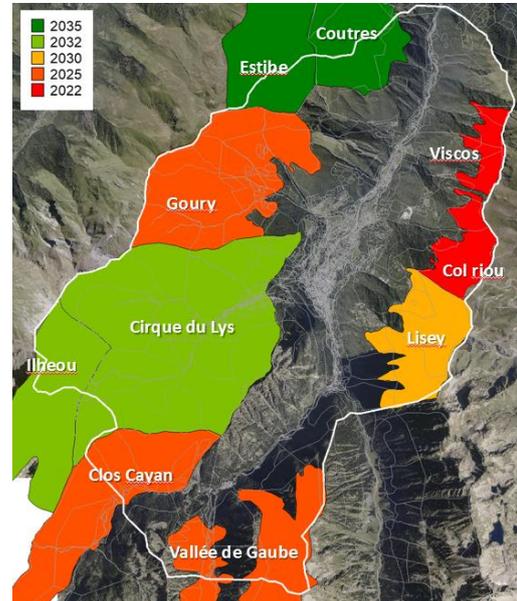
La disparition de la Politique Agricole Commune (PAC) favorise la poursuite de la déprise agricole dans le massif pyrénéen. Les deux exploitants agricoles exerçant à temps plein encore présents sur la commune en 2015 ne sont pas remplacés après leur départ à la retraite en 2025. En l'absence de soutien au pastoralisme, les unités pastorales gérées par la Commission Syndicale de la Vallée de Saint-Savin (CSVSS) se maintiennent dans un premier temps par l'accueil de transhumants extérieurs puis sont abandonnées progressivement selon leur accessibilité, leur potentiel fourrager et leur proximité à la vallée des Gaves (Argelès-Gazost), notamment du fait de l'arrivée du loup sur le secteur en 2022. Il n'y a plus d'estive ayant une fonction pastorale en 2035. Les forêts gagnent les lisères du village et s'étendent là où les sols et le climat leur sont favorables.

Forêts et espaces naturels

Du fait des difficultés d'accessibilité des forêts, du morcellement parcellaire lié aux héritages successifs sur les bas de versants et de la dépendance de l'économie aux énergies fossiles, la sylviculture ne se développe pas sur Cauterets. L'influence du Parc National des Pyrénées (PNP) diminue peu à peu. Si l'arrivée du loup, espèce à protéger, engendre des conflits avec les acteurs locaux, le PNP reste une vitrine favorable au tourisme. Malgré tout, le principe de zone d'adhésion disparaît en 2030 par arrêté réglementaire. Seule la zone cœur demeure mais

³ La retraite par capitalisation consiste pour chaque travailleur à accumuler individuellement un stock de capital durant ses années d'activité puis à l'utiliser pour financer sa retraite. Les pensions ne sont dès lors plus alimentées par les cotisations prélevées sur la population active simultanément aux versements, comme cela est le cas dans un système de retraites par répartition.

avec des moyens financiers affaiblis essentiellement basés sur le mécénat d'entreprises privées et ne lui permettant pas, à terme, de poursuivre sa vocation de préservation des milieux. Les paysages se banalisent et la biodiversité décline.



Abandon progressif des estives, avant 2040, selon leur accessibilité et leur potentiel fourrager

Tourisme

La fermeture des paysages, en phase avec la baisse de l'activité économique fortement impactée par une météo trop capricieuse durant les périodes de vacances scolaires (faibles enneigements successifs, forts orages estivaux), réduisent l'attractivité touristique de la station dont la capacité d'accueil stagne puis décline à partir de 2030. Les touristes se tournent désormais vers d'autres destinations (grandes stations alpines de haute montagne dont l'offre à bas coût a su répondre à la demande d'une population vieillissante, etc.) car le renchérissement du coût des déplacements (dépendance aux énergies fossiles) et la baisse du pouvoir d'achat des classes moyennes ne leur permet plus de financer leurs séjours à Cauterets. Seuls quelques curistes relativement aisés, dont les mutuelles privées acceptent de rembourser les soins, continuent à effectuer des cures thermales à Cauterets. La commune n'attire plus les citoyens. De nombreuses résidences secondaires sont mises en vente à partir de 2025 renforçant l'impression d'abandon (volets clos). Les prix de l'immobilier chutent et les recettes de la commune déclinent de façon continue jusqu'en 2040.



Récit à horizon 2100

En l'absence de prise de conscience environnementale et de soutien public aux énergies renouvelables, les prix des énergies fossiles demeurent très élevés. Le territoire de la commune est progressivement abandonné par l'Etat et les acteurs économiques. Les espaces ne sont pas entretenus. Les commerçants font faillites et ne sont pas remplacés. La population décline, les services publics ferment. La commune devient un hameau, fréquenté par quelques pyrénéistes avertis.

Scénario « Agro-bioénergies renforcées »

Synthèse

CHEMINEMENT 2040

- Désengagement de l'Etat au profit des régions
- La PAC permet un développement de l'agriculture de montagne et de la sylviculture
- Recherche de synergies entre les secteurs agricoles et sylvicoles
- Développement de l'hydrothermie et des centrales hydroélectriques
- Perte d'économie touristique

IMAGE 2040: « Un Finistère régional agro-sylvo-pastoral »

- Cauterets est source d'énergies alternatives.

CHEMINEMENT 2100

- Accélération du déclin du tourisme

IMAGE 2100: « Des brebis et du bois »

- Organisation des paysages
- Monoculture – énergie
- Espace fonctionnel
- Moins d'enjeux vulnérables aux risques naturels

Récit à horizon 2040

Contexte national

Face à la dégradation continue des finances publiques, l'Etat se désengage peu à peu de la sphère économique et transfère de nombreuses compétences aux régions dont l'autonomie s'accroît. Les politiques publiques sont désormais territorialisées et visent à assurer le développement économique des territoires. Face à l'augmentation de la demande d'énergie dans les pays émergents, les prix des énergies fossiles augmentent considérablement jusqu'en 2030. Soutenue par des politiques territoriales volontaristes, l'Europe investit dans le développement de sources d'énergies alternatives (bois, agro-carburants, etc.). La Politique Agricole Commune, qui relève dorénavant de la compétence des régions, est réorientée de façon à soutenir ces nouvelles productions d'énergies. La production agricole s'intensifie, l'offre d'énergies renouvelables se diversifie et la France aspire désormais à l'autonomie énergétique et alimentaire. Les échanges internationaux se stabilisent autour de 2030. Ce « repli régional » préserve la production française de la concurrence internationale. Des filières locales se structurent de façon à exploiter la complémentarité entre les

cultures, l'élevage et l'énergie à l'échelle des territoires.

Entre 2020 et 2030, une série de scandales sanitaires et environnementaux liés à l'agriculture éclatent (cancers dus aux pesticides chez les agriculteurs, algues vertes, pollution de l'eau potable). Fortement médiatisés, ces événements accroissent la méfiance des consommateurs vis-à-vis de l'agriculture. Les normes sanitaires se renforcent en conséquence. En 2030, une enquête du Ministère de la Production Alimentaire montre que l'économie et la santé alimentaire sont au cœur des préoccupations des citoyens français au détriment des problématiques environnementales et solidaires. Les entreprises investissent toutefois dans des démarches socialement responsables (labels et garanties sanitaires) en vue « d'assainir » leur image mais sans réelle volonté d'inscrire leur développement économique dans une dynamique durable.

Les espaces naturels sont peu à peu sanctuarisés, notamment en périphérie des villes, pour satisfaire les besoins de naturalité des citadins et des retraités. Les forêts domaniales sont progressivement transférées aux collectivités territoriales qui intensifient leur exploitation. L'Etat se désengage également de la gestion des milieux.

Description du scénario sur Cauterets

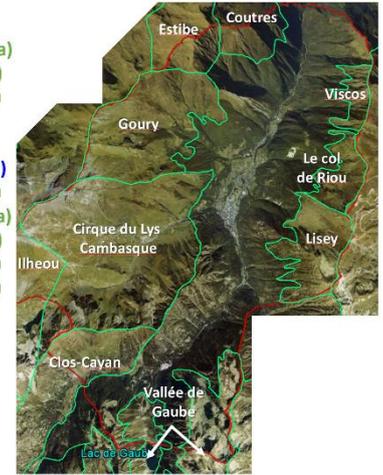
Agriculture

Dans les Pyrénées, l'agriculture de montagne connaît un regain dès 2025. Grâce à la Politique Agricole Commune, les revenus tirés de l'agriculture augmentent en montagne, comparativement à l'agriculture de plaine. Les formations proposées par les établissements d'enseignement agricoles attirent de plus en plus de jeunes. A leur départ à la retraite, les deux exploitants agricoles actifs sur la commune depuis 2015 trouvent aisément des repreneurs. Ce sont finalement huit nouveaux éleveurs qui s'installent sur la commune entre 2025 et 2040. Les estives, dont l'utilisation était en baisse jusqu'en 2020, sont de nouveau exploitées, d'abord par les éleveurs de la vallée des Gaves (Argelès-Gazost) puis également par les nouveaux arrivants. Les anciens chemins agro-pastoraux sont réaménagés et les zones intermédiaires des années 1950s sont ré-ouvertes grâce à de nouveaux équipements. L'effectif cheptel augmente ce qui permet de maintenir une pression de pâturage suffisante pour endiguer la propagation de l'embroussaillage. La surveillance des troupeaux est facilitée par de nombreuses avancées technologiques (colliers DGPS, clôtures électriques virtuelles, etc.) préservant l'activité de la prédation du loup. Les aides régionales de la Politique Agricole Commune permettent aux exploitants d'adapter leurs pratiques d'élevage aux nouvelles conditions climatiques (décalage des périodes de pâturage, modification de la gestion du stock fourrager, etc.). Ces derniers parviennent à partir de 2030 à acquérir leur autonomie fourragère.

Forêts et espaces naturels

L'intérêt grandissant pour le bois-énergie offre de nouvelles perspectives économiques à la sylviculture en zone de montagne. La production de bois est de nouveau rentable par rapport au prix du pétrole. Considéré politiquement comme un « finistère » dédié aux productions énergétiques, le territoire bénéficie d'aides financières et techniques de la région Midi-Méditerranée qui permettent de moderniser les outils d'exploitations (mécanisation, câbles) de telle sorte que les secteurs de versant sont rapidement remis en exploitation. Plusieurs entreprises s'implantent dans la région et exercent sur la commune dès 2020. Les hêtraies-sapinières de versant du Lisey et de Catarrabes sont ainsi exploitées de façon intensive (coupe rase par

Viscos	: -
Col Riou	: 2035 (-101 ha)
Lisey	: 2020 (-10 ha)
	: 2025 (-91 ha)
Coutres	: -
Estibes	: -
Goury	: 2020 (+35 ha)
	: 2025 (-30 ha)
	: 2035 (-122 ha)
Cirque du Lys	: 2025 (-45 ha)
	: 2035 (-30 ha)
	: 2045 (-55 ha)
Clos-Cayan	: -
Vallée Gaube	: -

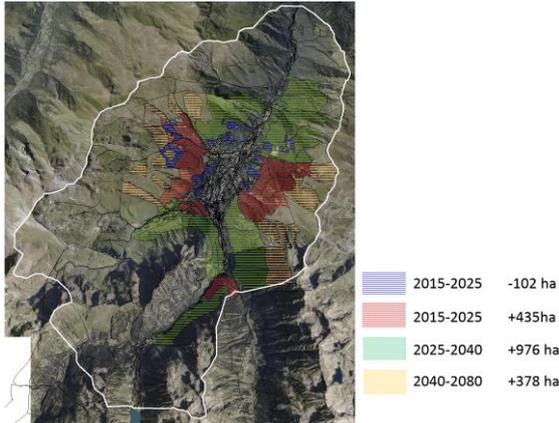


d'entre elles voient leur surface se réduire (aux dates indiquées) au profit de la sylviculture.

câble) dès 2020 et transformées en bois d'œuvre et en bois de chauffage.

Pour rationaliser ces nouvelles productions, les gestionnaires cherchent à exploiter au mieux les synergies entre les secteurs agricoles et sylvicoles. Ainsi, les sentiers sylvicoles sont réhabilités par le biais de dossiers de financement montés en collaboration avec le secteur agropastoral. L'exploitation des zones intermédiaires est destinée à faciliter la reconquête des prés de versant pour le pastoralisme. En échange, les zones d'estives en ombree deviennent sylvicoles. Ces versants se boisent par recolonisation spontanée, ou bien par plantation, notamment certaines placettes destinées à étudier l'influence du changement climatique sur l'évolution altitudinale des essences. Cette réallocation des usages pastoraux et sylvicoles entre les zones intermédiaires et les estives est rendue possible par la création d'une Association Foncière Pastorale sur les zones de versants.

Bien que la complémentarité entre l'agropastoralisme et la sylviculture soit vue par la majorité des acteurs comme une force, des conflits d'usage émergent localement lorsque des forêts sont plantées sur des secteurs d'estives encore sous-utilisés. Par ailleurs, du fait de l'augmentation de la précarité énergétique, le braconnage est en hausse si bien que le pouvoir de police de l'ONF se voit renforcé à partir de 2030.



Sylviculture : La sylviculture va, dans un premier temps, exploiter les versants les plus facilement accessibles (rouge) ainsi que rouvrir les zones intermédiaires qui vont être réaffectées au pastoralisme (bleu). Dans un second temps, les autres versants vont être exploités (vert). Dans les estives, les versants en ombree sont dédiés à la recolonisation spontanée en vue d'une exploitation plus tardive (orange) alors que les versants en soulane restent à vocation pastorale.

Récit à horizon 2100

La vallée de Cauterets tend à devenir un secteur essentiellement sylvo-pastoral. Après une longue phase de transition durant laquelle la vocation sylvicole d'anciens territoires agropastoraux a difficilement été acceptée par les acteurs locaux, les deux secteurs sont désormais gérés conjointement par une structure de gestion unique dont le siège se situe dans l'ancien casino, trop longtemps laissé à l'abandon.

Le changement climatique allonge la durée d'estivage. L'utilisation des zones intermédiaires n'est plus nécessaire au pastoralisme. Celles-ci peuvent ainsi être entièrement dédiées à la sylviculture dont le développement s'accélère dès 2050 du fait de la forte demande de bois en Europe. Les versants sont de nouveau ouverts

Energies

Grâce aux subventions de la région Midi-Méditerranée, la Commission Syndicale de la Vallée de Saint-Savin (CSVSS) investit dans des forages pour exploiter les sources d'eau par hydrothermie⁴. Des forages sont réalisés entre 200 et 300 mètres de profondeur afin de créer des circuits d'eau chaude à 70°C. En parallèle, de petites centrales hydro-électriques sont également installées sur le Gave de Cambasque et le Gave de Cauterets ce qui génère une nouvelle source de revenus pour l'intercommunalité.

Tourisme

En 2040, la vocation principale du territoire est avant tout agricole et sylvicole. Le tourisme hivernal demeure mais décline du fait du manque d'investissements dans la modernisation de la station. La baisse de la fréquentation est également liée aux contraintes énergétiques qui réduisent les possibilités de déplacements des ménages.

2050 du fait de la forte demande de bois en Europe. Les versants sont de nouveau ouverts (coupes rases) mais avec des rotations sylvicoles. Les prés de fonds de vallée sont plantés ainsi que les parcelles de zones intermédiaires (Ombrée : conifères ; Soulane : chênaie-hêtraie). La vallée connaît un fort recul démographique et touristique car les coûts liés aux déplacements restent élevés. Seuls demeurent les forestiers et les bergers. Le centre du village se resserre et l'habitat se verticalise. L'arrêt du tourisme hivernal permet la récupération des infrastructures (câbles télésièges / téléski) pour favoriser l'exploitation du bois sur une partie de l'ancien domaine skiable (câbles permanents).

⁴ Extraction de la chaleur contenue dans les eaux souterraines afin de l'utiliser avec une pompe à chaleur pour les besoins en chauffage.

Scénario « Vers une renommée touristique nationale »

Synthèse

CHEMINEMENT 2040

- Mise en avant des particularismes de Cauterets
- Valorisation artificielle des atouts touristiques de Cauterets
- Volonté de dynamiser l'image de la commune
- Perte d'identité (folklorisation / « Disneyisation ») de l'image de Cauterets)
- Aménagement de la montagne pour satisfaire les attentes des touristes
- Population croissante

IMAGE 2040: « Un tourisme fort dans une nature artificialisée »

- Carte postale

CHEMINEMENT 2100

- Renforcement de l'attractivité touristique
- Un écrin de fraîcheur dans un contexte de réchauffement climatique
- Un paysage et une nature aménagés pour les touristes
- Sur-fréquentation touristique aux premiers effets répulsifs

IMAGE 2100: « Avantages et inconvénients de la mono-industrie du tourisme »

- Une station balnéaire des Pyrénées reconnue nationalement
- Fragilisation du modèle économique de la vallée

Récit à horizon 2040

Contexte national

L'ouverture des marchés en cours en Europe depuis la seconde moitié du XX^{ème} siècle se poursuit et les échanges internationaux de biens et de services s'intensifient. Les tensions s'accroissent sur la demande en énergies et en produits agricoles pour l'alimentation humaine et animale. Les prix des énergies fossiles sont durablement élevés ce qui ouvre de nouvelles perspectives aux énergies renouvelables (bois, agro-carburants, etc.) dont le développement est encouragé par la Politique Agricole Commune. Parallèlement, les politiques économiques se renforcent autour du soutien aux atouts préexistants des territoires dont la société cherche à tirer un revenu maximal. En zone de montagne, certains territoires vulnérables sont abandonnés tandis que d'autres, à plus forts potentiels, sont préservés et valorisés dans un souci de valorisation économique.

Peu ambitieux et largement critiqué par les ONG environnementales, l'accord européen sur le climat conclu à Prague en 2019 incite peu les entreprises privées et les gouvernements à réduire leurs émissions de gaz à effet. L'essentiel des moyens qui lui sont consacrés visent à inciter progressivement

les ménages à modifier leurs comportements de consommation, et notamment à « consommer local ». Face à l'augmentation du prix des produits agricoles sur les marchés mondiaux, les circuits courts et la demande pour des produits de terroirs se développent rapidement en France. En 2040, plus de 50% des dépenses alimentaires des ménages s'effectuent dorénavant via des circuits de proximité.

Le pouvoir d'achat des classes-moyennes décline et le nombre de citadins augmente ce qui favorise le développement d'un tourisme de masse à l'échelle nationale. Une enquête Ipsos réalisée en 2020 dans les dix principales agglomérations de France montre que les attentes des citadins lors de leurs séjours de vacances portent sur la sécurité, la nature et le sport.

Description du scénario sur Cauterets

Tourisme

La volonté de l'Etat de stimuler un développement local basé sur les atouts préexistants des territoires incite la commune de Cauterets à poursuivre le développement de son secteur touristique qui concentre 90% de l'emploi de la commune. Attirés par le cadre de vie offert par la montagne, les touristes sont nombreux à venir se ressourcer à Cauterets. A l'inverse du tourisme de masse qui se

développe dans les grandes stations balnéaires du littoral, Cauterets favorise un tourisme de qualité, fidèle à ses traditions et cohérent avec la capacité d'accueil de ses infrastructures et la taille de son domaine skiable. Centrée sur les particularismes Cauterésiens (nature, authenticité, espaces), l'offre se diversifie. En été comme en hiver, les établissements de tourisme sont complets. La fréquentation hivernale reste stable. Les télécabines du Lisey étendent le domaine skiable. La baisse de l'enneigement est compensée par un recours accru aux canons à neige. La fréquentation estivale augmente quant à elle entre 2020 et 2030 pour se stabiliser à partir de 2030 à hauteur de l'offre de logements. L'organisation du travail renforce également la fréquentation « hors saison ». Cauterets est labellisée en 2025 « Village touristique régional » par la Région, corroborant le label « Grands Sites Midi-Pyrénées » obtenu en 2008. Le village vit désormais toute l'année.

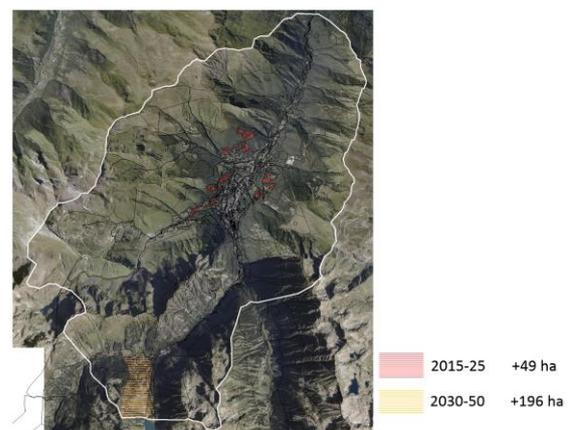
Avides de sécurité et de sérénité durant leurs vacances, les touristes manifestent leurs craintes face à l'intensification des événements naturels sur la commune (inondations, mouvements de terrain). Des actions ambitieuses de réduction des risques naturels sont donc entreprises dès 2020 en vue de rassurer la population et de pérenniser la vocation touristique du territoire. Soucieux de l'impact de la fermeture des paysages sur l'authenticité du village et l'attractivité touristique, un programme de reconquête des zones intermédiaires est mis en place conjointement par la commune, la CSVSS, la Région et l'ONF. L'intérêt patrimonial, économique et paysager de la reconquête des zones intermédiaires fait consensus auprès des élus qui réinvestissent chaque année une partie des revenus que la commune tire du tourisme en aides logistiques et/ou financières à l'entretien des milieux naturels pour les agriculteurs et propriétaires fonciers. En 2025, suite au départ à la retraite du dernier agriculteur de Cauterets, la commune décide de racheter l'exploitation dont la régie a pour objectif de valoriser l'image du pastoralisme pyrénéen, tout en entretenant le paysage des versants. C'est la première collectivité pyrénéenne à avoir trois agroforestiers communaux. Pour renforcer l'attrait touristique du territoire pour des visiteurs en quête

d'une nature ludique et sécurisée, un « zoo de la biodiversité » est créé à Pont d'Espagne.

L'attractivité du thermalisme s'accroît du fait de l'intérêt marqué des retraités pour ses bienfaits et du soutien des politiques de santé publique aux cures thermales. Une nouvelle image du thermalisme se construit, mêlant l'apport de bien-être en montagne, la recherche de naturalité et le thermoludisme. L'urbanisation reste quant à elle maîtrisée. Le parc immobilier actuel se modernise mais peu de nouveaux logements sont construits. Chaque demande est étudiée au cas par cas et les permis de construire ne sont délivrés qu'à des projets innovants, générateurs de valeur pour le territoire (cabanes et yourtes dans les sapins, chalets de qualité, etc.). Un secteur piéton voit le jour dans le centre du village. L'éco-mobilité est privilégiée avec un système de bus électriques qui amènent les skieurs des parkings-relais vers les remontées mécaniques.

Forêt et espaces naturels

Peu ambitieuse, la politique européenne sur le climat impacte de façon très marginale l'exploitation de la forêt dont la faible accessibilité rend l'exploitation trop coûteuse. Le Parc National des Pyrénées voit ses compétences et ses moyens d'action renforcés. Pour contrôler l'afflux de touristes, l'entrée du Parc National devient payante, à l'image des parcs nationaux aux Etats-Unis, permettant d'employer des saisonniers pour réaliser des visites encadrées. Il valorise les produits locaux via la création du label « Produits du Parc National des Pyrénées ».

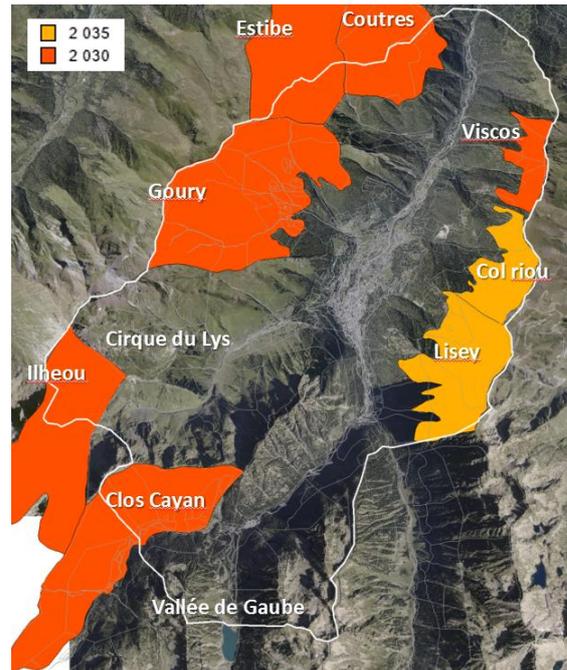


La forêt est exploitée pour maintenir les paysages ouverts (zones intermédiaires et vallée de Gaube)

Agriculture

L'agriculture évolue peu entre 2015 et 2040 et la tendance à la baisse de l'activité pastorale se poursuit. Cauterets étant déclarée « zone à forte valeur touristique », la commune bénéficie d'aides européennes en soutien au pastoralisme en vue de maintenir un cadre paysager bucolique et attractif pour les touristes (bergeries, prairies pâturées, etc.). Ainsi, seules les estives des sites touristiques (Vallée de Gaube, Cirque du Lys) concentrent l'activité pastorale. Ce maintien artificiel d'une activité pastorale bénéficie à quelques éleveurs de la vallée d'Argelès-Gazost.

La production agricole trouve aisément des débouchés locaux mais la concurrence internationale sur les produits agricoles est telle que l'agriculture génère peu de vocations parmi les jeunes. Si la vente à la ferme se développe peu à Cauterets du fait de l'orientation « viande » de ses exploitations, les commerces de la commune offrent néanmoins un débouché important aux produits de « terroirs » issus de l'ensemble de la vallée.



Les estives sont massivement abandonnées entre 2030 et 2035, à l'exception de celles ayant un intérêt touristique : le pastoralisme est dédié à l'entretien des paysages.

Récit à horizon 2100

Le prix des énergies se stabilise mais demeure élevé. Les logements rénovés répondent aux critères des Bâtiments à Basse Consommation. L'attractivité touristique de Cauterets se renforce avec le réchauffement climatique. Les citadins viennent y chercher la fraîcheur et aiment particulièrement les baignades dans les lacs dont les berges sont aménagées. L'étendue du domaine skiable se réduit et les pistes ferment définitivement en 2070, suite à plusieurs années successives sans chutes de neige. Les pratiques hors-ski y deviennent majoritaires (VTT, randonnées, promenades). La sur-fréquentation des lieux en haute-saison entraîne de nouvelles problématiques de préservation de l'environnement. Effet indirect de cette image de station balnéaire des Pyrénées reconnue nationalement, certains touristes fuient cette notoriété, fragilisant le modèle économique de la vallée.

Scénario « Développement durable »

Synthèse

CHEMINEMENT 2040

- Valorisation « authentique » de l'environnement
- Raisonement des aménagements touristiques, sans dénaturer l'environnement.
- Développement d'un tourisme ciblé, segmenté, éco-tourisme
- Prise de conscience collective et rémunération des services environnementaux
- Acceptation de la modernité et évolution des mentalités
- Conciliation sociale, économique et environnementale

IMAGE 2040: « **Un territoire multifonctionnel mais socialement sélectif** »

- Territoire qui s'adapte et s'équilibre, plus réactif, diversifié
- Un tourisme moindre, plus diffus dans le temps mais à forte valeur ajoutée
- Un territoire qui n'est pas à la portée de tout le monde

CHEMINEMENT 2100

- Promotion d'un tourisme quasi-exclusivement estival
- Valorisation sociale des activités

IMAGE 2100: « **Une transition énergétique modeste et contrôlée** »

- Un écrin de verdure et de fraîcheur
- Une autonomie énergétique communale

Récit à horizon 2040

Contexte national

La succession de catastrophes naturelles (inondations, canicules, etc.) et la forte médiatisation de la problématique climatique suite à l'accord planétaire sur le climat signé à Paris fin 2015, modifient profondément la vision consumériste de la société qui aspire à plus d'équité sociale et de bien-être. La montée des préoccupations environnementales impacte également les modes de production. Les marchés intègrent progressivement la composante carbone suite à la mise en œuvre d'une taxe carbone en 2018 dans tous les pays signataires du Protocole de Paris. Cette taxe a pour conséquence de renchérir les énergies fossiles et les produits importés. La coopération entre les Etats s'intensifie. D'importants investissements publics sont réalisés pour la recherche et le développement de technologies vertes et sobres en carbone. Les énergies renouvelables se développent en Europe, notamment grâce au verdissement de la Politique Agricole Commune qui favorise la mise en place et le maintien de systèmes de production compatibles avec la préservation de l'environnement.

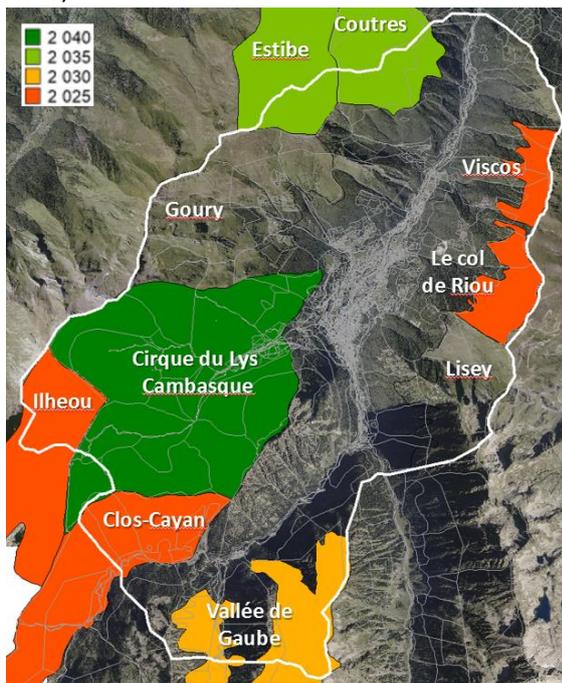
Les espaces montagnards sont moins impactés que les plaines par les sécheresses. Les milieux d'altitude dont la société a pris conscience de la valeur patrimoniale et environnementale (maintien de la biodiversité, entretien des paysages), sont soutenus pour l'élevage basé sur la ressource fourragère des estives. Les éleveurs adaptent la gestion de leurs troupeaux aux nouvelles contraintes climatiques. Les espaces naturels sont protégés grâce à des fonds débloqués par l'Organisation Mondiale de l'Environnement et du Climat (OMEC) tandis que dans les villes, la densification urbaine se généralise. Facilitée par le développement des nouvelles technologies de la communication (télétravail, etc.), la migration des urbains et des retraités vers les campagnes est encouragée par l'Etat. Globalement plus « éco-responsables », les consommateurs s'orientent vers des produits locaux et de saison, les labels de qualité et l'agriculture biologique.

Description du scénario sur Cauterets

Agriculture

Le verdissement de la Politique Agricole Commune permet le maintien du tissu agricole en place sur

Cauterets. La production agricole trouve aisément des débouchés locaux, via des circuits courts, fortement plébiscités par les néo-ruraux venus s'installer en nombre dans la vallée. A leur départ à la retraite, les deux exploitants agricoles actifs sur la commune trouvent des repreneurs qui convertissent rapidement les exploitations à l'agriculture biologique. L'utilisation des estives par les troupeaux d'Argelès-Gazost se poursuit. Les aides de la Politique Agricole Commune permettent la création d'une Association Foncière Pastorale à Catarrabes pour mobiliser du foncier sur les zones intermédiaires. Toutefois, à partir de 2025, la consommation de viande décline en France. Le cheptel diminue donc dans la vallée. L'exploitation des estives régresse en conséquence. En 2040, seules les estives historiques les plus facilement accessibles à partir de la vallée de la Cauterets et les plus productives en fourrages sont utilisées (Goury, Lisey, Cirque du Lys jusqu'en 2040).

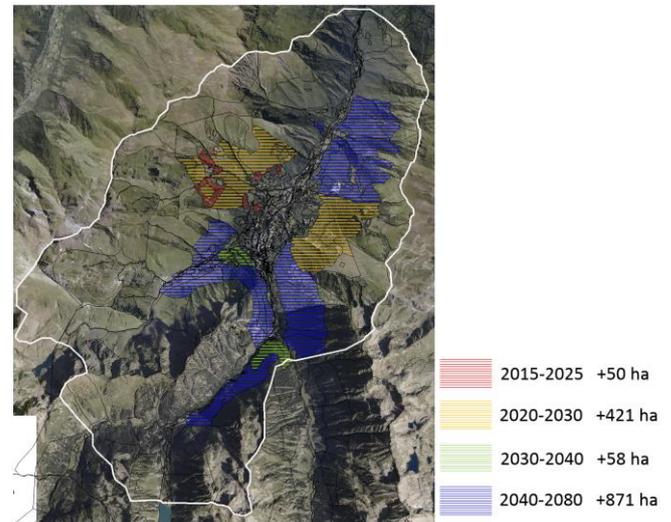


Les estives sont progressivement abandonnées entre 2025 et 2040 (dates en rouge), à l'exception de celles facilement accessibles et ayant un intérêt fourrager. Certaines d'entre elles ont pu connaître un changement d'usage partiel (dates et surfaces en vert) vers la sylviculture.

Forêts et espaces naturels

La production de bois augmente à Cauterets du fait de l'effet cumulé de l'augmentation du prix du pétrole (taxe carbone) qui améliore la rentabilité

économique du bois-énergie et du renforcement des aides publiques aux énergies renouvelables qui favorisent le développement d'un secteur sylvicole dans la région. Peu structurée, l'exploitation du bois s'effectue d'abord sur les versants les plus accessibles (Lisey, Catarrabes) par câble suivant un mode peu intensif (patches isolés, débardage à cheval si possible, etc.). Un partenariat avec le secteur pastoral permet la création d'un chemin d'exploitation en 2030, en échange de la réouverture des anciens prés de versant (AFP Catarrabes – 50 ha). Le Parc National des Pyrénées voit ses compétences et ses moyens d'action renforcés. Il utilise sa reconnaissance et son image pour mieux valoriser les produits locaux via la création du label « Produits du Parc National des Pyrénées ».



La réouverture des prés de versant à Catarrabes (en rouge) pour le pastoralisme (50 ha) est réalisée en même temps que l'exploitation de la forêt attenante et de celle du Lisey (Orange). Les autres versants sont exploités ultérieurement.

Tourisme

Cauterets attire progressivement un tourisme moins nombreux mais à haute valeur ajoutée. La hausse du prix des énergies réduit l'afflux de touristes. Dès 2025, le Parc National des Pyrénées voit ses moyens renforcés grâce aux dotations de l'état mais également en faisant payer l'entrée du Parc National, à l'image des parcs nationaux aux Etats-Unis. Il aide à la mise en place de la maison de la sylviculture qui sensibilise les visiteurs à l'adéquation entre l'entretien de la forêt et la biodiversité. Il propose également des visites dans des espaces de nature sanctuarisés et entretenus pour l'observation du Bouquetin et du Grand Tétrás. L'urbanisation reste quant à elle maîtrisée.

Le parc immobilier actuel dédié au tourisme se modernise et l'offre devient plus qualitative, alors que le nombre de lits se réduit légèrement. Aucun nouveau logement n'est construit, notamment du fait du durcissement induit par le nouveau PLUi approuvé en 2022. En 2018, le centre du village devient piéton. Un mode de transport collectif doux est mis en place vers Pont d'Espagne en 2022. L'électricité est produite par les centrales hydro-électriques créées sur les gaves de Cambasque et de Cauterets. Puis en 2030, l'accès en voiture devient interdit aux visiteurs depuis l'entrée de la

vallée. L'éco-mobilité est privilégiée avec un système de bus électriques qui amènent les skieurs des parkings-relais vers les remontées mécaniques. L'accès au village en voiture est dorénavant limité aux résidents permanents et aux professionnels. En 2040, Cauterets est un espace multifonctionnel ne reposant plus uniquement sur le tourisme, fournissant cadre de vie, produits et services de qualité aux populations. La transition énergétique, en augmentant le coût des déplacements, réduit l'accès des classes moyennes aux offres touristiques proposées.

Récit à horizon 2100

Les difficultés liées à l'enneigement incitent la collectivité à arrêter l'exploitation de la station de ski. Les infrastructures sont revendues et démontées, à l'exception des télécabines qui permettent un accès rapide aux randonneurs et VTTistes. Un centre thermo-ludique de haute qualité (avec thermes et sources chaudes) se développe. La transition touristique pousse Cauterets à se tourner principalement vers un tourisme estival et plus sélectif en hiver.

Dans un contexte marqué par une augmentation de la fréquence des phénomènes de sécheresses et de canicules estivales, son paysage largement forestier confère à la commune l'image d'un écrin de verdure et de fraîcheur. Les zones Natura 2000 s'étendent et renforcent l'image de naturalité du secteur. Une petite réserve naturelle est définie à proximité des circuits de randonnée (circuit bois, etc.) pour renforcer l'observation de la biodiversité. L'agriculture reste quant à elle socialement bien perçue car elle bénéficie à l'entretien de l'espace et des paysages dans le fonds de la vallée (Granges de Catarrabes) même si à l'échelle du site, la forêt progresse considérablement.

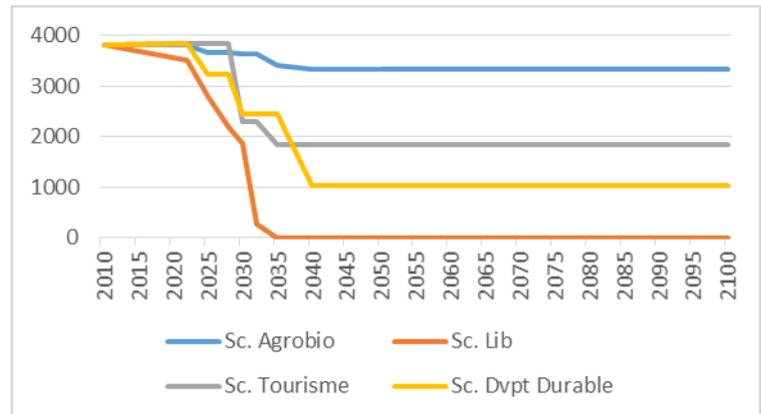
En résumé

Agro-pastoralisme

L'utilisation des estives évolue de façon très différenciée suivant les scénarios. D'un maintien quasi-total dans le scénario « Agro-bioénergies renforcées », dont la légère réduction des surfaces s'expliquent par l'exploitation sylvicole des versants d'ombrée, elles disparaissent complètement dans le scénario « Libéralisation et abandon collectif du territoire ».

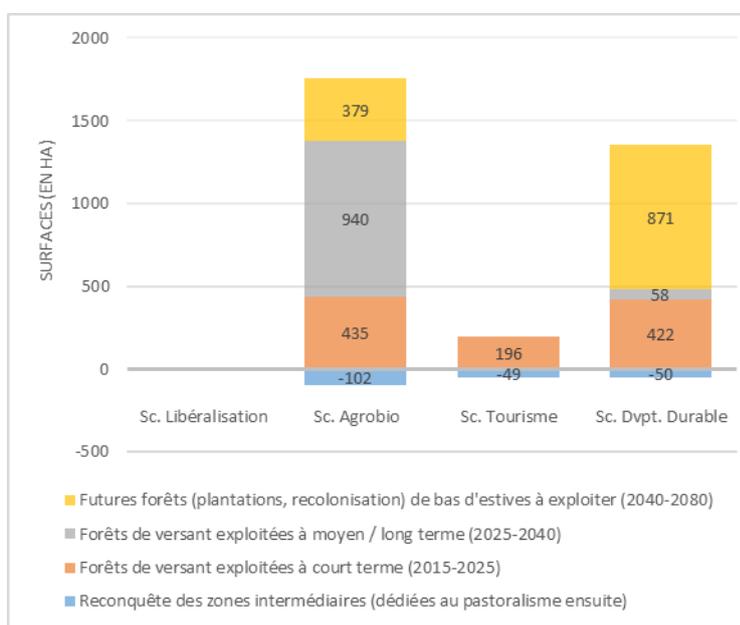
Les deux autres scénarios constituent des situations intermédiaires. S'ils prévoient le maintien de deux estives seulement dans chacun d'eux, elles correspondent à de grandes estives aux enjeux touristiques et paysagers dans le scénario « Vers une renommée touristique nationale ». A l'inverse, elles sont plus modestes dans le scénario « Développement durable », mais dimensionnées pour l'agriculture de la vallée.

Evolution des surfaces d'estives déclarées pour les quatre scénarios prospectifs sur le secteur d'étude (Cauterets).



Sylviculture

L'usage sylvicole varie grandement selon deux paires de scénarios. Inexistant ou très faible dans les scénarios « Libéralisation et abandon collectif du territoire » et « Vers une renommée touristique nationale », respectivement, elle est soutenue dans les deux autres scénarios, mais suivant des modes d'exploitations différenciés : intensif (coupes rases) dans le scénario « Agro-bioénergies renforcées », parcimonieux dans le scénario « Développement durable ».



8 Sélection d'articles

Par ordre chronologique

- Houet T.**, Loveland T. R., Hubert-Moy L., Napton D., Gaucherel C. and Barnes C. (2010) Exploring subtle land use and land cover changes: a framework based on future landscape studies, *Landscape Ecology*, 25(2), 249-266, <http://dx.doi.org/10.1007/s10980-009-9362-8>
- Houet T.** and Pigeon G. (2011), Mapping Urban Climate Zones And Quantifying Climate Behaviors - An Application On Toulouse Urban Area (France), *Environmental Pollution*, Vol 159, Iss 8-9, 2180-2192, <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2010.12.027>
- Houet T.**, Ribière O., Vacquié L., Vidal F. et Galop D. (2012) Analyse spatiale de l'évolution des modes d'occupation et d'usages des sols sur le Vicdessos de 1942 à nos jours, *Sud-Ouest Européen*. N°33, pp. 41-56.
- Mas J.F., Kolb M., Paegelow M., Camacho Olmedo MT, **Houet T.** (2014) Modelling Land use / cover changes: a comparison of conceptual approaches and softwares. *Environmental Modelling and Software*, Vol. 51, pp. 94-111, <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.09.010>
- Houet T.**, Schaller N., Castets M., Gaucherel C., (2014) Improving the simulation of fine scale landscape changes coupling top-down and bottom-up land use and cover changes rules. *International Journal of Geographical Science*. 28(9), 1848-1876, <http://dx.doi.org/10.1080/13658816.2014.900775>
- Masson V., Marchadier C., Adolphe L., Aguejdad R., Avner P., Bonhomme M., Bretagne G., Briotter X., Bueno B., de Munck C., Doukari O., Hallegate S., Hidalgo J., **Houet T.**, Lemonsu A., Long N., Moine M.P., Morel T., Nologues L., Pigeon G., Salagnac J.L., Zibouche K., (2014). Adapting Cities to Climate change: a systemic modelling approach, *Urban Climate*. 10(2), 407-429 <http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2014.03.004>
- Szczypta C., Gascoin S., **Houet T.**, Vigneau C., Fanise P. (2015), Impact of climate and land-use changes on snow cover in a small headwater catchment in the Pyrenees, France, *Journal of Hydrology*, 521, 84-99, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.060>
- Vacquié L., **Houet T.**, Sohl T., Reeker R., Sayler K., (2015) Developing scenarios to project LULC changes in the Pyrenees (France): a model-based approach to assess land abandonment and reforestation dynamics. *The Journal of Mountain Science*, 12(4), 905-920. <http://dx.doi.org/10.1007/s11629-014-3405-6>
- Houet T.**, Vacquié L., Sheeren D., (In press) Evaluating the spatial uncertainty of future land abandonment in a mountainous valley (Vicdessos, Pyrenees - France): insights from model parameterization and experiments. *The Journal of Mountain Science*, 12(5), <http://dx.doi.org/10.1007/s11629-014-3404-7>

9 Tables

Table des figures

Partie 3. Résultats scientifiques

Partie 3.2. Modélisation prospective des changements d'occupation et d'usages de sols : état de l'art et propositions

FIGURE 3.2.A. ADAPTATION DE LA MÉTHODE DES SCÉNARIOS DE GODET (1986) DE FAÇON À INTÉGRER LA DIMENSION SPATIALE TOUT AU LONG DU PROCESSUS (SOURCE : HOUET, 2010)	37
FIGURE 3.2.B. ILLUSTRATION DE L'INTÉRÊT DE LA MODÉLISATION PROSPECTIVE POUR L'ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE ET LA DÉFINITION DE STRATÉGIE DE GESTION DE L'ESPACE À MOYEN/LONG TERME (PROACTIVITÉ)	38
FIGURE 3.2.C. LA GÉOPROSPECTIVE, UNE DÉMARCHE À L'INTERFACE DE PLUSIEURS APPROCHES DE MODÉLISATION (SOURCE : HOUET, 2010)	39
FIGURE 3.2.D. DISTINCTION DES APPROCHES COUPLANT SCÉNARIOS ET MODÈLES SPATIAUX.	40
FIGURE 3.2.E. EXEMPLES D'INDICATEURS UTILISABLES POUR VALIDER L'APTITUDE D'UN MODÈLE À SIMULER DE FAÇON VRAISEMBLABLE DES CHANGEMENTS D'OCCUPATION DES SOLS SUR LE PLAN DES QUANTITÉS, DES PROCESSUS OU DE LA LOCALISATION. LES INDICATEURS UTILISÉS POUR LES DÉMARCHES (1) ET (2A) SONT COMPARÉS SOIT AUX PARAMÈTRES D'ENTRÉE DU MODÈLE (VALEURS ATTENDUES APRÈS SIMULATION), SOIT À UNE SITUATION OBSERVÉE (À LA DATE T). CEUX UTILISÉS POUR LA DÉMARCHE (2B) DOIVENT TÉMOIGNER DE VALEURS ÉVOLUANT DE FAÇON CONTRASTÉE (VALEURS TÉMOIGNANT DE RUPTURES AU COURS DE L'ÉVOLUTION).....	42
FIGURE 3.2.F. SOURCES ET TYPE D'INCERTITUDES LIÉES AU FUTUR : (1) L'INCERTITUDE LIÉE À LA QUALITÉ DES DONNÉES D'ENTRÉE, (2) CELLE INHÉRENTE AU MODÈLE POUR UN SCENARIO (<i>INHERENT UNCERTAINTY</i>), (3) CELLE DÉLIMITÉE PAR L'UTILISATION CROISÉE DE PLUSIEURS MODÈLES POUR UN MÊME SCÉNARIO (<i>MULTI-MODEL ENSEMBLE UNCERTAINTY</i>) ET (4) L'INCERTITUDE D'ENSEMBLE LIÉ AU FUTUR QUI ENGLOBE LA PLURALITÉ DES FUTURS POSSIBLES (<i>MULTI-SCENARIOS ENSEMBLE UNCERTAINTY</i>) (ADAPTÉ DE HOUET ET AL, IN PRESS).....	44
FIGURE 3.2.G. APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE POUR DÉFINIR L'INCERTITUDE SPATIALE LIÉE AU FUTUR.	45
FIGURE 3.2.H. APPORTS DE LA DIMENSION SPATIALE À LA PROSPECTIVE : ESSAI DE SYNTHÈSE.....	46

Partie 3.3. Etalement urbain et climat : caractérisation du climat urbain et prospective

FIGURE 3.3.A. CLASSIFICATIONS DES TYPES D'OCCUPATION DES SOLS POUR LES STATIONS : MIC (SAINT-MICHEL), MNP (MONOPRIX), MIN (MINIMES), BON (BONNEFOY), UNI (UNION), ORE (SAINT-ORENS), THI (ZONE THIBAUT), LAB (LABÈGE), BL2 (BLAGNAC 2) ET FRA (FRANCAZAL) ET LEUR ÉVALUATION. (SOURCE : HOUET AND PIGEON, 2011)	51
FIGURE 3.3.B. EXEMPLE VISUEL DU CALCUL DU RAPPORT D'ASPECT DANS DES RAYONS DE 100, 250 ET 500M AUTOUR DES STATIONS ET QUI REPRÉSENTE L'EFFET « CANYON » DE LA MORPHOLOGIE URBAINE. IL EST ÉGAL À LA SURFACE DES FAÇADES DES BÂTIMENTS DIVISÉE PAR 2 FOIS LA SURFACE DES RUES.	51
FIGURE 3.3.C. DIFFÉRENCES MOYENNES DE TEMPÉRATURES ENTRE LES UCZ EN HIVER POUR LES TEMPÉRATURES NOCTURNES (HAUT) ET EN ÉTÉ POUR LES TEMPÉRATURES DE JOUR (BAS)	52
FIGURE 3.3.D. BOÎTES À MOUSTACHES MONTRANT LES DIFFÉRENCES DE TEMPÉRATURES DES STATIONS CAPITOUL PAR RAPPORT À LA STATION DE RÉFÉRENCE (MIC) SITUÉE EN CENTRE-VILLE EN SITUATION ESTIVALE ET DE JOUR. (SOURCE : HOUET AND PIGEON, 2011)	52
FIGURE 3.3.E. MESURES DE TEMPÉRATURES DE L'AIR ACQUISES EN VÉLO, LE LONG D'UN PARCOURS DANS LA COMMUNE DE BLAGNAC, LE 3 JUIN 2009 ENTRE 6H00 ET 7H00 DU MATIN (À GAUCHE) ET ENTRE 21H00 ET 21H30 LE MÊME JOUR. TROIS INSTRUMENTS DE MESURES DIFFÉRENTS ONT PERMIS D'ACQUÉRIR DES DONNÉES PRÉCISES, EN QUASI TEMPS RÉEL (TEMPS DE RÉPONSE INFÉRIEUR À LA SECONDE) AVEC UNE PRÉCISION COMPRISE ENTRE 0.2 ET 0.5°C. (SOURCE : LEMONSU ET AL. SUBMITTED).....	53

FIGURE 3.3.F. A GAUCHE : UNITÉS PAYSAGÈRES URBAINES IDENTIFIÉES PAR UNE APPROCHE EXPERTE AU SEIN DU L'UCZ5 BLA (PROJET CAPITOU). A DROITE : CLASSIFICATION DES TYPES D'OCCUPATION DES SOLS ET COMPOSITION DES UNITÉS PAYSAGÈRES. (SOURCE : LEMONSU ET AL. SUBMITTED).....	53
FIGURE 3.3.G. CORRÉLATION ENTRE LES TYPES D'OCCUPATION DU SOL ET LES TEMPÉRATURES MESURÉES POUR CHAQUE UNITÉ PAYSAGÈRE TRAVERSÉE. (SOURCE : LEMONSU ET AL. SUBMITTED)	54
FIGURE 3.3.H. ANALYSE DES CORRÉLATIONS, POUR LES DONNÉES DU MATIN ET DU SOIR, ENTRE LES VARIABLES EXPLICATIVES ET LES UNITÉS PAYSAGÈRES. LES VARIABLES EXPLICATIVES SONT : L'ALTITUDE (ALTI), LA DISTANCE À LA GARONNE (DGAR), LA FRACTION DE SOL NU (SOIL), DE VÉGÉTATION HERBEUSE (GRASS) ET ARBORÉE (TREE), DE NATURE (NATU), DE ROUTES (ROAD) ET DE BÂTIMENTS (BUIL), DANS DES ZONE DE RAYON 5M (B05), 25M (B25) ET 50M (B50), LA FRACTION DES UNITÉS PAYSAGÈRES VOISINES (MULIT2, RESID1, RESID2, RESID3, BUILT1 ET VEG2) DANS UN RAYON DE 50M (B50). LES VALEURS SURLIGNÉES PRÉSENTENT LES CORRÉLATIONS SIGNIFICATIVES (>0.3), POSITIVES (EN ROUGE) ET NÉGATIVE (BLEU). (SOURCE : LEMONSU ET AL. SUBMITTED).....	55
FIGURE 3.3.I. VARIABILITÉ DU CLIMAT URBAIN : CARACTÉRISATION DE L'ICU MOYEN (4°C) À TOULOUSE GRÂCE AUX DONNÉES DE LA CAMPAGNE DE MESURES SCIENTIFIQUES CAPITOU (À GAUCHE) ; VARIATIONS DE LA TEMPÉRATURE DE L'AIR (4°C) DANS UN QUARTIER PÉRIURBAIN (BLAGNAC) CARACTÉRISÉES DANS LE CADRE DU PIRVE « HÉTÉROGÉNÉITÉS CLIMATIQUES, PAYSAGÈRES ET SOCIALES ». (SOURCES : PIGEON ET AL. 2007 ; HAOUÈS-JOUVE ET AL., SOUS PRESSE)	56
FIGURE 3.3.J. MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE DE CONSTRUCTION DES SCÉNARIOS PROSPECTIFS ET DE LEUR TRADUCTION EN VARIABLE D'ENTRÉE DE MODÈLES. (SOURCE : HOUET ET AL, SUBMITTED)	57
FIGURE 3.3.K. ÉTALEMENT URBAIN, DENSITÉ DE POPULATION ET MORPHOLOGIE URBAINE SIMULÉES POUR LES SEPT SCÉNARIOS ACCLIMAT.	58
FIGURE 3.3.L. COMPARAISON DE L'EXTENSION URBAINE EN 2040 POUR TOUS LES SCÉNARIOS (ROUGE) ET DE L'EXTENSION URBAINE EN 2100 POUR LES 3 SCÉNARIOS EN SITUATION DE CRISE ÉCONOMIQUE APRÈS 2040. DANS LE CAS DE CES SCÉNARIOS, PRÉVOYANT L'EXTENSION MINIMALE, IL N'Y A QU'UNE TRÈS FAIBLE DIFFÉRENCE PAR RAPPORT À LA SITUATION COMMUNE EN 2040 (SOURCE : HOUET ET AL, SUBMITTED).	59
FIGURE 3.3.M. GAIN EN ÎLOTS DE CHALEUR URBAINS PAR RAPPORT À 2010, SIMULÉS POUR LES SEPT SCÉNARIOS ACCLIMAT : EN HAUT, LES PROFILS ; EN BAS, LES EXTENSIONS SPATIALES. (SOURCE : HOUET ET AL, SUBMITTED).....	59
FIGURE 3.3.N. CONSOMMATIONS ÉNERGÉTIQUES LIÉES AU CHAUFFAGE ET À LA CLIMATISATION ACTUELLES (À GAUCHE) ET POUR LES SEPT SCÉNARIOS PROSPECTIFS. (SOURCE : MASSON ET AL. 2014).....	60

Partie 3.4. Espaces montagnards pyrénéens et prospective : apport de la dimension spatiale

FIGURE 3.4.A. INTÉGRATION DE LA SEGMENTATION DE L'ANNÉE N-1 LORS DE LA CLASSIFICATION POUR L'ANNÉE N	65
FIGURE 3.4.B. MÉTHODE DE VALIDATION DES CLASSIFICATIONS ANCIENNES : COMPARAISON VISUELLE AVEC DES PHOTOGRAPHIES PAYSAGÈRES PRISES À DES PÉRIODES IDENTIQUES AUX PRISES DE VUES AÉRIENNES UTILISÉES.....	65
FIGURE 3.4.C. ÉVOLUTION DES TAUX DE SURFACES BOISÉES PAR ZONES D'USAGE SUR LE HAUT-VICDESSOS ENTRE 1942 ET 2008...	65
FIGURE 3.4.D. ÉVOLUTION DES TYPES D'OCCUPATION ET D'USAGE DES SOLS SUR LE HAUT-VICDESSOS ENTRE 1942 ET 2008.	66
FIGURE 3.4.E. ÉVOLUTION DE LA REFORESTATION SUR L'ESTIVE DE BASSIÈS.	67
FIGURE 3.4.F. CO-ÉVOLUTION DE LA CHARGE PASTORALE SUR LA VALLÉE DU VICDESSOS (EN HAUT) ET LES RELEVÉS POLLINIQUES DU PIN À CROCHETS ET DU BOULEAU (MILIEU), ET DES GENÉVRIERS ET CALLUNES (EN BAS) RELEVÉS SUR L'ESTIVE DE BASSIÈS. LES FLUCTUATIONS DES COURBES POLLINIQUES SONT À METTRE EN RELATION AVEC L'HISTOIRE DES FEUX, DONT LA FRÉQUENCE AUGMENTE APRÈS LES ANNÉES 1950 (SOURCE : GALOP ET AL, 2011)	67
FIGURE 3.4.G. ÉVOLUTION DES SURFACES BOISÉES ENTRE LA SITUATION DE RÉFÉRENCE (2008) ET LA SITUATION EN 2050, SUR LA BASE DE QUATRE SCÉNARIOS DIFFÉRENTS. LE SCÉNARIO A EST UN SCÉNARIO TENDANCIEL OÙ LE PASTORALISME A DISPARU. LE SCÉNARIO B PRÉVOIT LE MAINTIEN DU CHEPTEL DÉCLARÉ EN 2008. DANS UNE PERSPECTIVE DE LIMITER LA REFORESTATION PAR LE PIN À CROCHETS SUR L'ESTIVE, LE SCÉNARIO C PRÉVOIT UNE HAUSSE DE 10% DU CHEPTEL DÉCLARÉ EN 2008 ET LE SCÉNARIO D PRÉVOIT UNE CHARGE PASTORALE IDENTIQUE À CELLE DE 2008 MAIS LA SUPERVISION DU TROUPEAU PAR UN BERGER UNE FOIS TOUTS LES 5 ANS POUR OPTIMISER LA PRESSION PASTORALE DANS CERTAINS QUARTIERS (SOURCE : VACQUIÉ ET AL, SUBMITTED)	68
FIGURE 3.4.H. ÉVOLUTION DE VOLUME DU GLACIER D'OSSOUE (VIGNEMALE, HAUTES-PYRÉNÉES) DEPUIS LES ANNÉES 1920. A GAUCHE, LES CARTES PRÉSENTENT LES PERTES ET GAINS TOPOGRAPHIQUES ISSUES DE LA COMPARAISON DES CARTES DE 1924, 1948, 1983 ET 2013. A HAUT À DROITE, LE GRAPHIQUE PRÉSENTE L'ÉVOLUTION DU BILAN DE MASSE (EN M ³ ÉQUIVALENT EN EAU) ISSU DES CARTES CITÉES, PROLONGEANT DANS LE TEMPS, LES DONNÉES ACQUISES DU BILAN DE MASSE POUR LE GLACIER	

	D'OSSOUE ET DE LA MALADETA PAR MESURES GLACIOLOGIQUES. EN BAS À DROITE, UNE VUE DE FACE DU GLACIER EN SEPT. 2012 (SOURCES : MARTI ET AL, IN PRESS ; HOUET ET RENÉ, 2014)	69
FIGURE 3.4.I.	SIMULATION PROSPECTIVE DES CHANGEMENTS D'OCCUPATION DES SOLS SUR LES PYRÉNÉES FRANÇAISES SELON QUATRE SCÉNARIOS CONTRASTÉS COMPARATIVEMENT À LA SITUATION DE 2006 (EN HAUT). LES SIMULATIONS SONT ENSUITE CROISÉES POUR CALCULER LA CARTE D'INCERTITUDE SPATIALE LIÉ AU FUTUR POUR CARACTÉRISER LES ZONES SUSCEPTIBLES DE SE REFORESTER À L'HORIZON 2100 (EN BAS) (SOURCE : VACQUIÉ ET AL, IN PRESS)	71
FIGURE 3.4.J.	SIMULATION PROSPECTIVE DES CHANGEMENTS D'OCCUPATION DES SOLS SUR LE VICDESSOS SUR LA BASE DU SCÉNARIO MBAU UTILISANT DES FACTEURS DYNAMIQUES, REPRÉSENTÉS DE FAÇON CATÉGORIELLE. (SOURCE : HOUET ET AL, IN PRESS)	72
FIGURE 4.A.	POSITIONNEMENT DES PERSPECTIVES DE RECHERCHE DANS LA DÉMARCHÉ DE MODÉLISATION PROSPECTIVE	81
FIGURE 4.B.	EXEMPLE DE L'IMAGE ACQUISE LE 24 OCTOBRE 2012 : SIGNATURES SPECTRALES D'HÊTRES EXTRAITES DE L'IMAGE...	84
FIGURE 4.C.	EXEMPLE SIGNATURES SPECTRALES ACQUISES SUR LE TERRAIN EN SEPTEMBRE 2014, LORS DE L'ACQUISITION DES DONNÉES HYPERSPECTRALES ET LIDAR.....	84
FIGURE 4.D.	EXEMPLE D'UNE ORTHOPHOTOGRAPHIE GÉNÉRÉE PAR DRONE EN FÉVRIER 2015 (SOURCE : SOCIÉTÉ GEOFALCO)...	86
FIGURE 4.E.	PRISME D'ÉVALUATION MULTI-PROXY POUR AMÉLIORER L'ÉCLAIRAGE PROSPECTIF.	87
FIGURE 3.4.L.	IMPACT RESPECTIF (GAUCHE) ET COMBINÉ (DROITE) DES VARIABLES D'ENTRÉE DE SNOWMODEL (T°, PMM, CHANGEMENTS DE VÉGÉTATION) PAR RAPPORT À LA SITUATION DE RÉFÉRENCE DE 2011-12. (SOURCE : SCZCYPTA ET AL. 2015)	75
FIGURE 3.4.M.	IMPACT RESPECTIF ET COMBINÉ DES VARIABLES D'ENTRÉE DE SNOWMODEL (T°, PMM, CHANGEMENTS DE VÉGÉTATION) DE FAÇON SPATIALISÉE PAR RAPPORT À LA SITUATION DE RÉFÉRENCE DE 2011-12. (SOURCE : SCZCYPTA ET AL. 2015)	75

Partie 4. Perspectives de recherche
--

FIGURE 4.A.	POSITIONNEMENT DES PERSPECTIVES DE RECHERCHE DANS LA DÉMARCHÉ DE MODÉLISATION PROSPECTIVE	81
FIGURE 4.B.	EXEMPLE DE L'IMAGE ACQUISE LE 24 OCTOBRE 2012 : SIGNATURES SPECTRALES D'HÊTRES EXTRAITES DE L'IMAGE...	84
FIGURE 4.C.	EXEMPLE SIGNATURES SPECTRALES ACQUISES SUR LE TERRAIN EN SEPTEMBRE 2014, LORS DE L'ACQUISITION DES DONNÉES HYPERSPECTRALES ET LIDAR.....	84
FIGURE 4.D.	EXEMPLE D'UNE ORTHOPHOTOGRAPHIE GÉNÉRÉE PAR DRONE EN FÉVRIER 2015 (SOURCE : SOCIÉTÉ GEOFALCO)...	86
FIGURE 4.E.	PRISME D'ÉVALUATION MULTI-PROXY POUR AMÉLIORER L'ÉCLAIRAGE PROSPECTIF.	87

Table des matières

SOMMAIRE	3
PRÉAMBULE	5
1 CURRICULUM VITAE	6
1.1 ETAT CIVIL / RENSEIGNEMENTS PERSONNELS	6
1.2 ACTIVITÉS D'ENCADREMENT DE LA RECHERCHE ET D'ENSEIGNEMENT	7
1.2.1 THÈSES ET POST-DOCTORATS	7
1.2.1.1 Post-doctorats	7
1.2.1.2 Thèse(s) soutenue(s)	8
1.2.1.3 Thèses en cours	8
1.2.2 MASTERS	8
1.2.2.1 Master 2	8
1.2.2.2 Master 1	9
1.2.3 ENSEIGNEMENTS	9
1.2.4 FORMATIONS	10
1.3 ADMINISTRATION ET ANIMATION DE LA RECHERCHE	10
1.3.1 DIRECTION DE PROGRAMMES DE RECHERCHE (2007-2015)	11
1.3.2 PARTICIPATION À DES PROJETS	11
1.3.3 RESPONSABILITÉS ADMINISTRATIVES ET COLLECTIVES	12
1.3.3.1 Direction d'axe de recherche	12
1.3.3.2 Animation de la recherche	13
1.4 EVALUATION DE LA RECHERCHE	15
1.4.1 PARTICIPATION AUX INSTANCES D'ÉVALUATION DE LA RECHERCHE	15
1.4.2 JURY DE THÈSES	15
1.4.3 COMITÉ DE THÈSES	15
1.4.4 CONSEILS SCIENTIFIQUES	15
1.4.5 EXPERTISES SCIENTIFIQUES	16
1.4.6 EVALUATION D'ARTICLES SCIENTIFIQUES	16
1.4.6.1 Membre de comité éditorial de revue	16
1.4.6.2 Revues à comité de lecture	16
1.4.6.3 Colloques à comité de lecture	16
2 PRODUCTION SCIENTIFIQUE	17
2.1 ARTICLES DANS DES REVUES SCIENTIFIQUES À COMITÉ DE LECTURE	18
SOU MIS EN COURS D'ÉVALUATION	18
2015 / SOUS PRESSE	18
2014	18
2013	19
2012	19
2011	19
2010	20

2009	20
2008	20
2007	20
2006	20
2005	20
2004	20
2.2 DIRECTION / CO-DIRECTION DE NUMÉROS SPÉCIAUX	21
2.3 OUVRAGES, CONTRIBUTIONS À OUVRAGES	21
2.4 ACTES DE COLLOQUES À COMITÉ DE LECTURE	21
2.5 COMMUNICATIONS ORALES	22
2.5.1 CONFÉRENCIER INVITÉ	22
2.5.2 COLLOQUES	23
2015 / Acceptée	23
2014	23
2013	24
2012	25
2011	25
2010	25
2008	26
2007	26
2006	26
2005	26
2004	26
2003	26
2.5.3 SÉMINAIRES	27
2.6 VULGARISATION	27
2.6.1 CONFÉRENCIER INVITÉ SÉMINAIRES	27
2.6.2 INTERVENTIONS PUBLIQUES	28
2.6.3 PUBLICATIONS	28
3 RÉSULTATS SCIENTIFIQUES	29
<hr/>	
3.1 CONTEXTE, THÉMATIQUES ET STRATÉGIES DE RECHERCHE	29
3.2 MODÉLISATION PROSPECTIVE DES CHANGEMENTS D'OCCUPATION ET D'USAGES DE SOLS : ÉTAT DE L'ART ET PROPOSITIONS	35
3.2.1 USAGES DES MODÈLES EN PROSPECTIVE	36
3.2.2 COUPLAGE SCÉNARIOS / MODÈLES	38
3.2.3 LA VALIDATION DES MODÈLES	41
3.2.4 INCERTITUDE SPATIALE LIÉE AU FUTUR	43
3.2.5 CONCLUSION PARTIELLE	45
3.3 ÉTALEMENT URBAIN ET CLIMAT : CARACTÉRISATION DU CLIMAT URBAIN ET SCÉNARIOS PROSPECTIFS	49
3.3.1 CARACTÉRISATION DES INTERACTIONS MILIEUX / CLIMAT À DIFFÉRENTES ÉCHELLES	50
3.3.2 SCÉNARIOS PROSPECTIFS ET IMPACT SUR L'ILOT DE CHALEUR URBAIN	56
3.3.3 CONCLUSION PARTIELLE	60
3.4 ESPACES MONTAGNARDS PYRÉNÉENS ET PROSPECTIVE : APPORTS DE LA DIMENSION SPATIALE	63
3.4.1 LA CARACTÉRISATION DES MILIEUX, DES TRAJECTOIRES D'ÉVOLUTION ET DES FACTEURS DE CHANGEMENT : LES ENJEUX DE LA QUANTIFICATION	64
3.4.2 DE L'IDENTIFICATION DES ESPACES CONSTITUTIFS D'ENJEUX ACTUELS ET À VENIR	69
3.4.3 CONCLUSION PARTIELLE	76

4	PERSPECTIVES DE RECHERCHE	79
4.1	LA CARACTÉRISATION ACTUELLE DES MILIEUX POUR MIEUX ÉVALUER LES IMPACTS FUTURS : RÔLE DE LA TÉLÉDÉTECTION	83
4.2	EVALUATION SPATIALISÉE « MULTI-PROXY » : POUR UN MEILLEUR ÉCLAIRAGE PROSPECTIF	87
4.3	DÉVELOPPEMENTS FUTURS : MODÉLISATION (RÉTRO-)PROSPECTIVE ET ACTEURS	89
5	CONCLUSION GÉNÉRALE	91
6	BIBLIOGRAPHIE	93
7	ANNEXES	99
	LISTE DES ANNEXES	99
	ANNEXE 1 : RÉCITS DES SCÉNARIOS PROSPECTIFS À L’HORIZON 2100 POUR L’AGGLOMÉRATION TOULOUSAINE ET IMPACTS SUR LE CLIMAT URBAIN (PROJET ACCLIMAT)	100
	ANNEXE 2 : RÉCITS DES SCÉNARIOS PROSPECTIFS À L’HORIZON 2040 ET 2100 POUR CAUTERETS (PROJET SAMCO)	104
8	SÉLECTION D’ARTICLES	119
9	TABLES	293
	TABLE DES FIGURES	293
	TABLE DES MATIÈRES	296