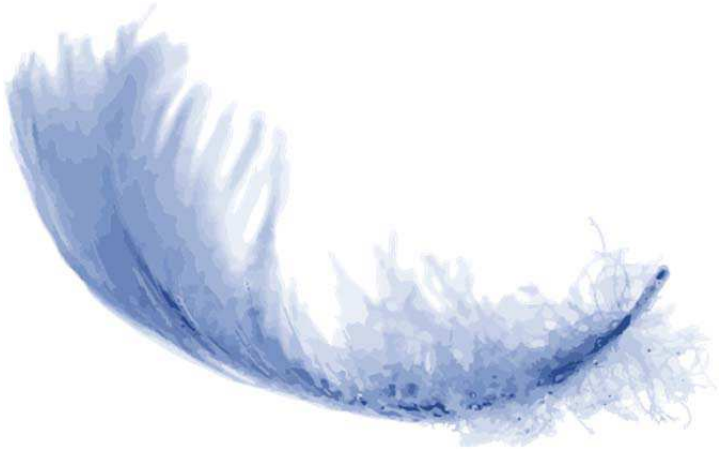
OBSERVATOIRE « HOMMES-MILIEUX »

Littoral méditerranéen

PLUMES

Pression Littorale Urbaine : Modélisation, Environnement, Simulation



Rapport final

15 mars 2014

Responsable scientifique

Christine VOIRON

UMR 7300 ESPACE voiron@unice.fr

Sommaire

Sommaire 2

Résumé succinct du projet 3

1. Informations générales concernant le projet 4

2. Contexte problématique 5

3. Méthodologie 10

4. Résultats 27

5. Discussion et conclusion 57

Bibliographie succincte 59

Résumé succinct du projet

Ce projet porte sur la pression urbaine qui s'exerce sur le littoral méditerranéen, et tout particulièrement sur celui de la région PACA. Or, si le terme « pression », est systématiquement invoqué dans les diagnostics territoriaux et les analyses prospectives, sa définition précise est rarement donnée. D'une part, ses manifestations et ses impacts sont davantage étudiés que le processus en lui-même, d'autre part, le phénomène est généralement abordé à une seule échelle. L'optique est ici différente. L'attention est focalisée sur les mécanismes spatiaux qui induisent la pression, qui jouent à différentes échelles et se combinent en chaque lieu. La démarche est multi-scalaire, spatiale et prospective. L'objectif final est double, produire un indicateur composite de la pression littorale urbaine, et estimer au moyen de modèles et de simulations spatiales, la pression urbaine future.

Le champ d'étude est une zone de forme rectangulaire, s'étendant de Fos à Toulon, et vers l'intérieur, du trait de côte à la région aixoise. Les analyses sont menées à l'échelle communale et infra-communale, sur un maillage de 200m x 200m.

La recherche s'organise en trois grands volets :

- Détermination d'un indice de pression urbaine potentielle, calculé pour chaque commune, puis attribué à chaque maille.
- Quantification des changements d'occupation du sol et de leurs déterminants spatiaux, sur le maillage retenu. Puis modélisation par automate cellulaire, de la dynamique d'occupation du sol, dont la diffusion de l'habitat.
- Mesure de l'incidence des attributs paysagers sur l'artificialisation, à l'échelle infra-communale, dans deux sous-ensembles littoraux. Élaboration d'un protocole de détection des zones de pression potentielle.

Mots clés : Pression urbaine, occupation du sol, organisation spatiale, analyse spatiale, modèle, simulation

1. Informations générales concernant le projet

Responsable(s) scientifique(s)

Christine Voiron

98 Boulevard Edouard Herriot – BP 3209 06204 Nice cedex

Téléphone : 04 93 37 54 64

Email : voiron@unice.fr

Ce projet a été réalisé au sein de l'UMR CNRS 7300 ESPACE – Equipe de l'Université de Nice Sophia Antipolis (UNS). Il a réuni deux enseignants-chercheurs, une doctorante en géographie, devenue docteure, durant la période, et trois étudiants de géographie du Master *Géoprospective Aménagement et Durabilité des Territoires* (GEOPRAD) qui ont participé activement à la réalisation de ce projet dans le cadre de stages au laboratoire. Ont également contribué à sa réalisation un ingénieur d'étude de l'équipe niçoise et un étudiant de Licence 3 de Géographie

Nom-Prénom	Fonctions et laboratoire	Spécialité
Voiron Christine	PR - UNS/ ESPACE	Géographie, littoralisation, analyse spatiale
Decoupigny Fabrice	MCF - UNS/ ESPACE	Dynamique urbaine, modèle gravitaire
Liziard Sophie	Docteure en géographie, chercheure associée, ESPACE	Géographie, littoralisation, modélisation automate cellulaire
Ornon Alexandre	Etudiant en Master 1 GEOPRAD de l'UNS stagiaire 2014	Géographie, analyse statistique des données, traitements sous SIG
Roussel Delphine	Etudiante en Master 1 GEOPRAD de l'UNS stagiaire 2013	Géographie, analyse spatiale sous SIG
Séry Romain	Etudiant en Master 1 GEOPRAD de l'UNS stagiaire 2014	Géographie, automate cellulaire
Contributeurs associés - Mannoni Pierre-Alain - Fernandez Anthony	 Ingénieur d'études, UNS/ ESPACE Etudiant en L3 Géographie de l'UNS	 Bases de données spatiales Photo-interprétation spatiotemporelle

Temporalité

Date de début des travaux : mars 2013

Date de fin des travaux pour la rédaction du rapport : mars 2014

Poursuite de l'étude en cours : Oui

Demande de soutien financier à l'OHM pour l'année 2014 : Non

2. Contexte problématique

2.1 Etat de l'art

La pression urbaine, analysée à une échelle méso ou micro, est généralement appréhendée au regard de l'évolution de trois critères majeurs, la densité de population, les valeurs foncières et la consommation d'espaces naturels et agricoles. Si ces deux types d'espace jouent un rôle fondamental dans le maintien des équilibres des territoires, l'attention se porte aujourd'hui davantage vers les surfaces agricoles, mal protégées, et qui de ce fait, diminuent fortement sur la frange littorale, au profit de l'urbanisation. Quatre études récentes en fournissent l'illustration.

Une étude de l'IFEN, intitulée « Le littoral, entre nature et artificialisation croissante » (2007), dresse un tableau de l'évolution de l'artificialisation entre 1990 et 2000, sur l'ensemble du littoral français, d'où ressortent deux tendances marquantes. L'artificialisation est élevée quelle que soit la distance à la mer, cependant elle a progressé de manière plus marquée dans la zone rétro-littorale, du fait de l'instauration de la Loi Littoral, des protections environnementales et de la raréfaction des terrains constructibles au bord de mer. En 2000, 27% des espaces situés à moins de 500 m de la mer sont occupés par des zones urbaines, industrielles, et des réseaux de communications, et cohabitent avec des espaces naturels ouverts, des zones humides et des zones agricoles, qui se maintiennent difficilement, du fait de ce voisinage. En effet, une très forte pression foncière s'exerce sur les terres agricoles avec, comme conséquence, une diminution de 20% de leurs surfaces, entre 1970 et 2000, dans les communes littorales, contre 7% en métropole.

Cette pression qui se porte sur le marché foncier agricole, et plus précisément sur le marché en vue d'un usage résidentiel ou de loisir[1], a fait l'objet d'une étude à l'échelle des cantons littoraux français (Observatoire du littoral, 2005). Deux indicateurs, calculés pour chaque canton, mesurent la pression foncière urbaine sur les espaces ruraux, hors zones à urbaniser.

- L'indicateur de pression en valeur correspond à la surface du marché résidentiel ou de loisirs, multipliée par le prix moyen par hectare des surfaces non bâties de ce marché. Ce produit est ensuite rapporté à la surface cantonale, puis le ratio cantonal est divisé par le ratio national (valeur moyenne pour l'ensemble des cantons métropolitains).
- L'indicateur de pression en surface est obtenu en divisant la surface du marché résidentiel ou de loisirs par la surface du canton. Ce ratio cantonal est ensuite divisé par le ratio national (valeur moyenne pour l'ensemble des cantons métropolitains).

Pour ces deux indicateurs, la pression foncière locale est indicée. Elle est donc appréciée au regard de la moyenne nationale valant 100. Les plus fortes pressions foncières à usage résidentiel et de loisir s'exercent sur le littoral méditerranéen. Le détail par région, figurant sur le tableau 1, indique que près de 85% des cantons de PACA sont soumis à une pression en valeur extrêmement forte.

[1] Il s'agit des terrains non constructibles acquis en vue de l'installation ou de l'agrandissement de pelouses, de jardins, de vergers, de petits élevages ou d'habitats temporaires (mobil home, tentes) ou achetés dans la perspective d'un changement d'usage du sol.

	Nombre de cantons littoraux	% de cantons ayant un indice de pression foncière > 170	
		Pression en surface	Pression en valeur
Languedoc-Roussillon	19	42,1%	52,6%
Corse	30	3,3%	43,3%
PACA	33	24,7%	84,8%
Cantons littoraux de France	271	67%	39,5%

Tab. 1 - La pression foncière à usage résidentiel et de loisir sur les cantons du littoral méditerranéen

En 2010, l'Observatoire National de la Mer et du Littoral a produit une typologie socio-économique des exploitations agricoles des communes littorales et de leur arrière-pays, reposant sur des paramètres fournis par le Recensement Général de l'Agriculture de 2010 (parts des grandes exploitations, des exploitants et co-exploitants ayant une formation agricole secondaire ou supérieure, des exploitants et co-exploitants agricoles âgés de plus de 55 ans, des exploitations ayant un chef né avant 1960, sans repreneur…). Cette typologie socio-économique en quatre grandes classes est destinée à apprécier le niveau de fragilité de l'agriculture littorale à partir d'une échelle de viabilité des exploitations (Fig. 1).

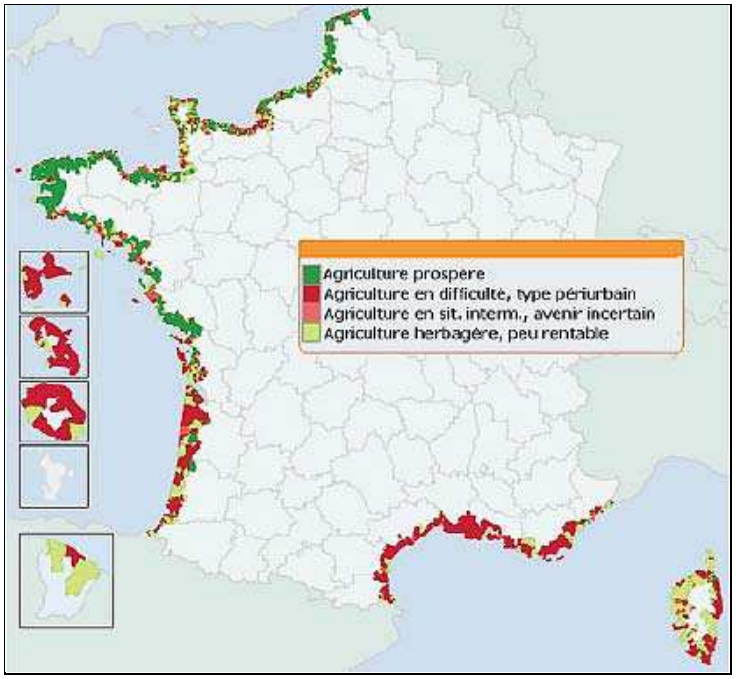


Fig. 1 - Répartition des 4 classes sur le littoral (Source : Observatoire National de la Mer et du Littoral, 2010)

Les cantons littoraux dont des terres agricoles sont susceptibles d'être libérées au profit d'autres utilisations, peuvent être repérés en rapprochant ce type d'information des divers indicateurs de pressions sur le littoral (densité de population, tourisme, …), calculés par ailleurs (Fig.2).

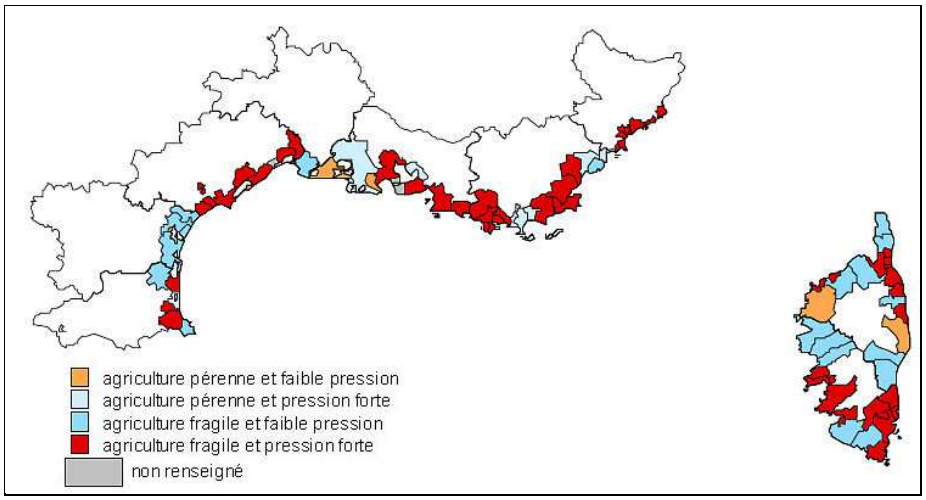


Fig. 2 - Pression foncière urbaine (en valeur) et fragilité de l'agriculture des cantons littoraux (Source : Observatoire du littoral, 2005)

L'INSEE-PACA a réalisé, en 2011, une étude sur les espaces encore peu denses aujourd'hui, mais qui enregistrent les plus fortes dynamiques de population - espaces ruraux, périurbains et urbains à faible densité de population. À partir de 7 variables[2], les communes concernées ont été classées en 5 groupes plus ou moins exposés aux conflits d'usage du sol. La cartographie qui en résulte (Fig. 3) met en évidence deux faits majeurs relatifs à la zone littorale, l'étendue des communes urbanisées, et de ce fait hors champ dans l'étude, qui représentent les 4/5 des communes littorales, et la forte pression de l'urbanisation qui caractérise les communes littorales restantes, situées aux abords des agglomérations de Marseille, Toulon et Nice ainsi que sur la côte varoise.

Dans les 3 groupes à forte pression, les nouveaux arrivants proviennent pour moitié des pôles urbains de la région et pour un tiers des autres régions françaises. L'espace à très forte pression enregistre une croissance de la population très rapide (+ 1,6 % par an en moyenne entre 1999 et 2007) avec, comme corollaire, le développement des résidences principales dont la part est passée en 25 ans de deux tiers à trois quarts du parc de logements. L'agriculture résiste difficilement à l'artificialisation ; 40% des biens agricoles vendus s'orientent vers un usage résidentiel contre 44% qui conservent une vocation agricole.

[2] la population et le parc logement de 1999 à 2006, les constructions de locaux entre 1999 et 2006, la distance à la ville-centre et aux équipements de la gamme intermédiaire, la part des chefs d'exploitation agricole dans la population active et la part de la surface agricole utilisée dans la superficie communale, la répartition des surfaces communales entre surfaces agricoles, naturelles et artificialisées (au canton).

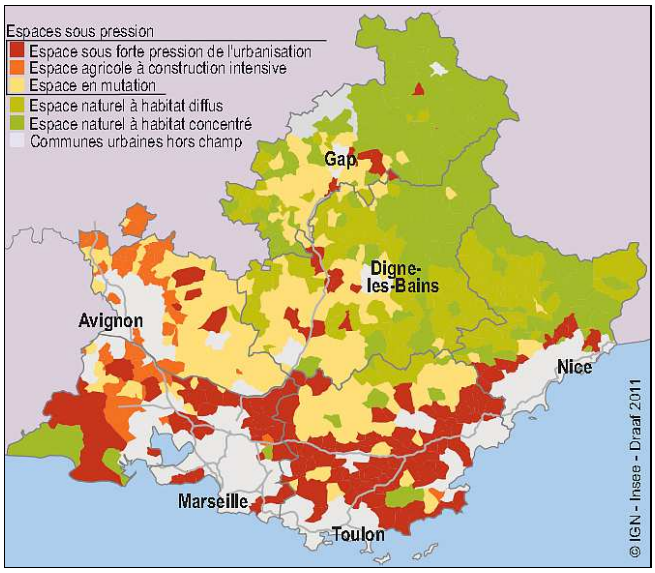


Fig. 3 - Les communes rurales, périurbaines et urbaines à faible densité de population exposées aux conflits d'usages du sol (Source : Insee Etudes PACA, 2011)

Par ailleurs, la région PACA possède une organisation de l'espace qui se distingue par trois particularités. Elle figure parmi les trois régions de France les plus boisées, avec 1 505 000 ha, selon les dernières campagnes 2007 et 2011 de l'Inventaire forestier. Les espaces naturels, agricoles et urbains sont fortement imbriqués, notamment dans les zones côtières (Fig. 4). Cette structure spatiale explique en partie l'extension des surfaces boisées qui progressent au rythme de 2% par an, du fait de la déprise agricole.

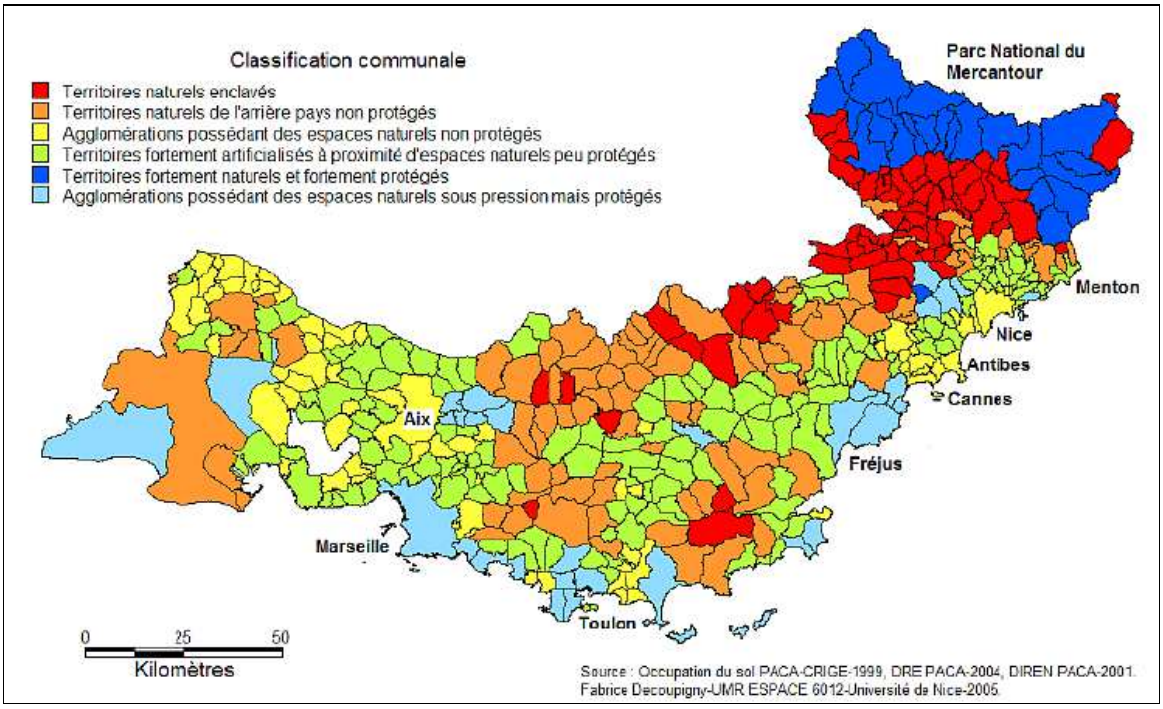


Fig. 4 - Typologie communale de la proximité des espaces naturels et urbains (Source : Decoupigny et al. 2007)

En résumé, la pression urbaine exercée sur les littoraux est toujours analysée de manière rétrospective, à l'échelle des cantons ou des communes, en focalisant l'attention sur les facteurs majeurs qui déterminent les mutations d'occupation du sol, et sur l'agriculture, en particulier, beaucoup moins protégée que les espaces naturels, qui de ce fait, cède plus facilement face à la périurbanisation. L'optique des études porte davantage sur les manifestations et les conséquences de la pression urbaine que sur le processus en lui-même.

A la vue des résultats des nombreuses analyses menées à l'échelle des communes de la région PACA, par divers organismes, le littoral apparaît exposé à une pression très intense mais relativement uniforme à travers l'espace côtier, alors que l'OHM Littoral méditerranéen décrit cette pression urbaine côtière comme étant d'intensité variable selon les espaces considérés, et différenciée spatialement.

La pression anthropique étant connue dans ses grandes lignes, il semble désormais indispensable de détecter les différenciations spatiales existant à une échelle fine, de définir plus précisément les processus spatiaux en jeu, et de déceler les combinaisons de facteurs qui interviennent à différentes échelles et déterminent les évolutions différenciées.

2.2 Parti de recherche et hypothèses

Le plus souvent, la pression urbaine est déterminée par l'analyse de la différence entre deux états à deux dates données de l'évolution de l'occupation du sol. On dit qu'il y a pression urbaine quand la part des surfaces artificialisées gagne sur celle des surfaces agricoles et/ou naturelles. Mais force est de constater qu'elle n'est pas définie en analyse spatiale. En effet, il n'existe pas d'indicateur générique de pression urbaine, c'est-à-dire un indicateur défini *a priori* et non *a posteriori*, qui puisse être utilisé dans des modèles de simulations prospectifs.

Nous faisons l'hypothèse que la pression urbaine est un processus qui combine des facteurs jouant à différentes échelles, ce qui implique d'adopter une démarche multi-scalaire. La pression urbaine sur l'environnement, en général, et l'environnement côtier, en particulier, est définie comme la sensibilité des espaces naturels et agricoles à subir la croissance urbaine. Cette pression est non seulement dépendante de l'état de l'occupation du sol (artificialisation et densité du bâti) et des réserves foncières d'une commune mais aussi de l'urbanisation dans les unités spatiales voisines. Ainsi la pression urbaine d'une commune sur l'environnement est non seulement déterminée par son urbanisation mais aussi par la pression induite par l'urbanisation exercée sur une plus grande portée et l'accessibilité des unités spatiales voisines.

En outre, même si le contexte régional est celui d'une forte pression, cette dernière se manifeste localement de manière différenciée, certes, en fonction des réglementations, mais surtout, en fonction des caractéristiques spatiales : du relief, de l'occupation du sol, des aménités, des distances aux lieux attractifs. Le point de vue spatial sera donc privilégié à tous les stades de l'analyse des processus.

L'objectif est d'analyser la pression anthropique en emboîtant deux mesures de la pression urbaine, l'une au niveau communal, l'autre au niveau infra-communal. Cet objectif se décline en deux volets.

- Déterminer le potentiel de pression démographique qu'exerce tout le système métropolitain (réseau des centres urbains régionaux) en chaque commune de la zone d'étude littorale et produire un indice de pression métropolitaine. Il sera intéressant d'observer si la pression métropolitaine s'exerce de manière uniforme sur l'ensemble littoral étudié ou si elle affecte préférentiellement des lieux - points ou axes – particuliers de l'ensemble littoral. Par ailleurs, la pression sera mise en relation avec les surfaces protégées (acquisition du Conservatoire du Littoral, sites classés…) afin d'examiner l'incidence de ces protections sur les espaces non protégés situés dans le voisinage intérieur. Observe-t-on une tendance à un report de la pression, voire même une intensification de la pression, dans le proche voisinage ?

- Déterminer comment, au niveau infra communal, cette pression métropolitaine potentielle s'inscrit dans l'espace et s'exprime en termes de diffusion de l'habitat. Nous faisons l'hypothèse que le type d'occupation du sol ainsi que la structure spatiale, le degré d'imbrication des différents types d'occupation du sol, ainsi que la configuration induite par le relief et les attributs paysagers qui en découlent, ont une incidence sur la diffusion infra-communale de l'habitat, et plus globalement sur l'artificialisation du sol.

3. Méthodologie

3.1 Terrains étudiés et données mobilisées

Le champ d'étude varie selon l'échelle à laquelle se situe l'analyse (Fig. 5).

La pression urbaine exercée par le réseau des villes régionales a été calculée sur l'ensemble des communes de la région PACA, auquel ont été ajoutées les communes voisines appartenant au Gard et à la Drome.

L'analyse infra communale a été menée sur deux ensembles. Le premier est composé de 95 communes situées pour l'essentiel dans les Bouches du Rhône, ainsi que dans la partie occidentale du Var, il englobe les communes du littoral et de la zone rétro-littorale, sur une quarantaine de kilomètres à l'intérieur des terres. Le second correspond à deux secteurs littoraux dont les composantes paysagères sont analysées plus finement, l'un est situé sur la Côte Bleue, l'autre s'étend de la Ciotat au 9ème arrondissement de Marseille.

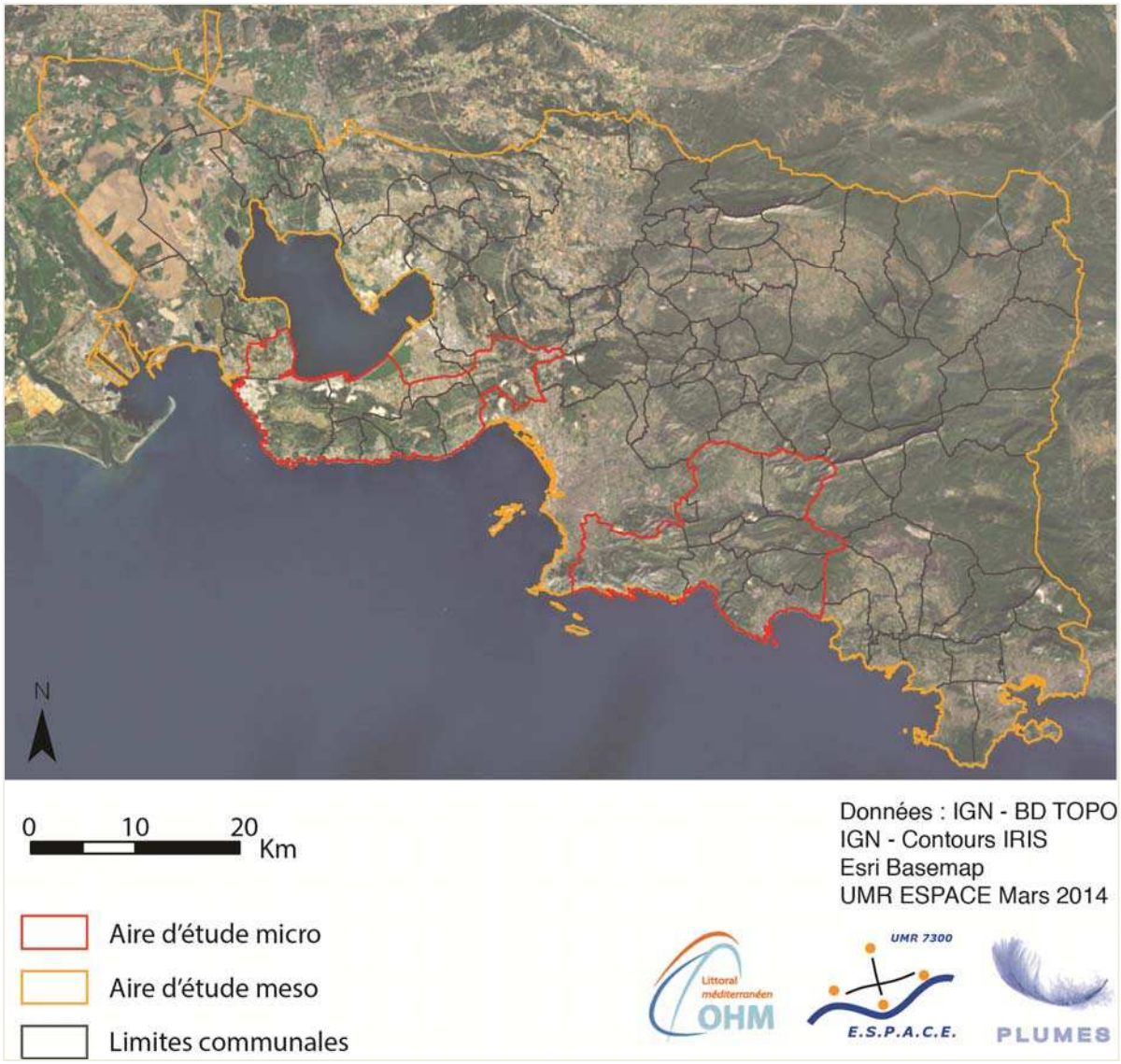


Fig. 5 - Zones d'étude

Les données mobilisées sont de différentes natures :

- Chiffres de population, migrations, logements construits et ventilation du parc logement provenant des bases de données communales de l'INSEE de 1999 à 2010
- Nombre de permis de construire par communes de 2002 à 2011 de la base Sit@del2
- Occupation du sol : base Corine Land Cover de 2006 (CLC-2006) et OCSOL 1999 et 2006
- Photographies aériennes des communes littorales disponibles sur le Géoportail de l'IGN (1950 et années 2000).

3.2 Démarche de traitement et d'analyse

3.2.1 Modélisation de la pression urbaine

Calcul de l'Indice de Pression IP

À la base de la formalisation, il y a l'hypothèse que la pression urbaine d'une commune est induite par deux forces d'urbanisation : la première est fonction de l'état d'urbanisation dépendante de sa taille, la seconde est induite par l'intensité des interactions des villes, dépendante de l'accessibilité. Autrement dit, la pression urbaine sur l'environnement est soumise à deux forces distinctes : la première est son poids, donné par une population qui occupe une surface bâtie, la seconde est la force du réseau qui se répercute sur la commune. Le concept de pression tient alors compte des processus multi-échelles de croissance urbaine sur un réseau.

En physique, le calcul de la pression s'apparente au rapport d'une force exercée sur une surface (P = F/S). Nous postulons que plus la concentration de la population sur un espace est forte et le territoire accessible, plus celui-ci sera soumis à une force importante : en conséquence, les espaces disponibles et constructibles d'une ville (les zones agricoles par exemple) seront d'autant plus fragiles aux forces en présence.

Nous avons donc élaboré un indice de pression (IP), qui synthétise l'état de contrainte d'un territoire, en quelque sorte la charge d'efforts qu'il doit supporter. Son objectif est d'évaluer les territoires les plus exposés à une pression urbaine afin de localiser sur le réseau de villes les communes qui possèdent un fort risque d'urbanisation. L'indice s'obtient par le rapport entre une fonction gravitaire qui calcule les interactions entre les unités urbaines et la quantité de réserves foncières que celles-ci possèdent.

Il se présente sous sa forme générique suivante :

$$IP\ commune_i = \frac{(Ai \times Pi)}{Sri} \qquad \text{relation (1)}$$

Sri est la surface des sols disponibles des communes, c'est-à-dire les superficies non urbanisées pouvant potentiellement servir de réserves foncières ; elles sont données par la somme des surfaces naturelles et agricoles.

Sri = Sti –Sui où Sti est la surface totale de la commune i ; Sui, la surface urbaine de i, on considère que toutes les surfaces non urbanisées sont potentiellement constructibles.

Ai est la somme des interactions qu'exercent les communes voisines de i, c'est-à-dire l'intensité qui lie les communes entre elles dans le réseau. Il s'agit ici de postuler que le voisinage composé des communes limitrophes de i exercent des interactions d'autant plus fortes que la commune i se localise dans un réseau de villes plus ou moins dense et connecté.

$A_i = \Sigma\ (Pi\ Pj\ /\ d(i,j)^{\alpha})$ *pour tout* $d(i,j) < dmax$ relation (2)

Avec d(i,j) la distance temps de déplacement voiture (chemin minimal calculé sur le graphe routier par l'algorithme de Floyd) séparant i et j, dmax la distance maximale de déplacement , α la rugosité de l'espace, Pi et Pj la population respectivement de i et j.

En d'autres termes, on va considérer que la force qui s'exerce sur chaque commune est donnée par une localisation dans le réseau de villes et sa masse. Par conséquent, chaque commune possède un poids dépendant de sa position relative dans le réseau qui s'exerce sur les réserves foncières.

On suppose ainsi, qu'en prenant en compte les différents paramètres (temps de déplacement, taille de la ville, réseaux routiers), il est possible d'appréhender les sensibilités communales à l'urbanisation en mesurant les pressions urbaines engendrées par la croissance métropolitaine.

La relation (1) peut aussi s'écrire de la manière suivante :

$$IP\,commune_i = \frac{\left(AAi \times Pi^2\right)}{Sri} \qquad \text{relation (3)}$$

avec $AA_i = \sum (Pj / d(i,j)^{\alpha})$ *et* $Sri \neq 0$

Par conséquent, la pression urbaine qui s'exerce sur une commune i est le produit de la masse de la ville i (population) par le potentiel qu'exercent les communes voisines sur la commune i.

On considère que l'indice de pression est dépendant de la densité relative des réserves foncières (Pi/Sri) de la relation (2). Plus ce rapport est grand, plus la pression est grande.

Si Sri est nulle, c'est-à-dire qu'il n'existe plus de réserve foncière, alors IP=0. La pression urbaine sur l'environnement est considérée nulle. La commune n'est plus vulnérable à l'étalement urbain, puisque toutes ses réserves naturelles ont été consommées. Mais la commune continue à peser puisqu'elle rentre dans les calculs des AAi des communes voisines.

L'indice de pression IP calcule la vulnérabilité des espaces non construits à la pression urbaine. Cet indice peut varier de différentes manières. Si une commune i, entre deux périodes, ne connaît aucun changement (population et surfaces constantes), son IP variera si les communes dans le voisinage ont connu une extension urbaine. La commune i verra alors son AAi, son IP et sa vulnérabilité augmenter. La fonction AAi peut alors être appréhendée comme étant les forces d'urbanisation existant dans son voisinage. En définitive, le numérateur ($AAi \times Pi^2$) calcule le poids de l'urbanisation qui va s'exercer sur la commune i.

Il importe de bien différencier la pression urbaine de la force attractive d'urbanisation. La pression ne détermine pas l'état d'urbanisation d'une commune mais uniquement une dynamique qui s'exerce sur des espaces restés non construits.

Une réglementation d'occupation des sols contraignante sur une commune aura pour effet de limiter la constructibilité mais aussi d'augmenter la pression sur le tissu urbain et les terrains restés ouverts à l'urbanisation. Deux cas peuvent alors se présenter entre deux périodes : le premier est une densification du tissu urbain, le second un report de la population sur les communes voisines.

Paramétrage du modèle sur la région PACA

Le modèle de pression urbaine possède deux paramètres à calibrer : la distance maximale (dmax) d'interactions potentielles et la rugosité α des distances d(i,j).

La distance d(i,j) (exprimée en minutes) est donnée par la matrice Origine / Destination des temps minimaux des déplacements en voiture sur un graphe routier et sont calculés par la plate-forme de modélisation FRED (algorithme Floyd)[3]. Le calibrage est réalisé avec le nombre de logements construits par commune (R^2 égal à 0.7 pour un α=0.01).

Les résultats du paramétrage (Tab.2) mettent en exergue une croissance de la pression sur les franges des réseaux de villes. On peut ainsi constater que la distance maximale des mobilités passe de 52 minutes à 71 minutes, cela veut dire que l'influence urbaine s'étend plus loin sur le territoire, et que la pression va atteindre des territoires en 2006 qui étaient épargnés en 1999.

R^2 (Δ IP $_{06\text{-}99}$ // Logements construits entre 1999 et 2006) = 0.7		
Paramètres	2006	1999
Distance max en minutes	71	52
Alpha	0,325	0,325

Tab.2 - Résultats du paramétrage du modèle de pression sur l'ensemble de la région PACA

3.2.2 Modélisation des dynamiques d'occupation du sol basée sur les automates cellulaires et choix de la plateforme de modélisation SpaCelle

À l'échelle de l'ensemble des 95 communes composant le périmètre méso de notre analyse, une modélisation spatiale de l'évolution de l'occupation du sol est développée. Le processus de modélisation consiste en une démarche d'identification et de compréhension des dynamiques en cours dont le résultat - le modèle - fournit un outil permettant l'implémentation de scénarios par la simulation. L'intérêt de cette modélisation est donc à la fois explicatif et prospectif vis-à-vis de la problématique de la pression urbaine. Le modèle est créé à partir des évolutions observées entre 1999 et 2006. Il est basé sur les automates cellulaires dont le principe d'évolution repose sur les interactions spatiales (Von Neumann 1966). Les automates cellulaires ont été utilisés pour la première fois en géographie par W. Tobler (1979) pour simuler les changements d'utilisation du sol. Les automates cellulaires sont en effet particulièrement adaptés à la modélisation des dynamiques d'occupation des sols puisque les automates cellulaires à deux dimensions permettent de formaliser l'espace sous la forme d'une grille régulière de cellules. Chaque cellule est caractérisée par un état, qui évolue en fonction des caractéristiques des cellules voisines selon des règles de transition. Ainsi, l'état d'une cellule à t+1 dépend de son état et de celui des cellules voisines au temps t. À partir de règles simples, les automates cellulaires peuvent produire des comportements complexes (Wolfram 1984). Spatialement explicites, les modèles basés sur les automates cellulaires sont particulièrement répandus pour la simulation rétrospective et prospective du développement urbain (White et Engelen 1993, Batty et Xie 1994, Langlois et Phipps 1997, Papini et al. 1998,

[3] Logiciel de modélisation qui permet des calculs de fonctions gravitaires sur un graphe – conception Fabrice Decoupigny

Barredo et al. 2003, Dubos-Paillard et al. 2003, Engelen et al. 2007). Ils permettent d'étudier les effets de la proximité dans les processus d'urbanisation (Moreno et al. 2012) et par exemple de comparer l'influence des différents facteurs spatiaux pour divers modèles de ville (Clarke 2003, Caglioni et al. 2006). Les automates cellulaires donnent ainsi la possibilité d'intégrer les relations spatiales dans la modélisation.

Pour le modèle développé dans PLUMES, nous avons choisi d'utiliser la plateforme de modélisation SpaCelle, réalisée par Patrice Langlois (UMR IDEES – Rouen/MTG). Le logiciel SpaCelle ne contient pas de modèle programmé mais fournit une interface permettant de décrire le comportement de l'automate cellulaire par une série de règles, exprimées dans un langage de représentation des connaissances spatiales (Langlois 2005). L'utilisateur définit une configuration initiale (sur une ou plusieurs couches représentant l'espace analysé), des règles des transitions possibles entre les différents états qualitatifs que peuvent prendre les cellules, et les règles de vie des cellules. Le principe de concurrence est bien adapté à notre thématique : à travers la question de la pression urbaine s'exerçant sur les espaces agricoles et naturels, c'est la concurrence pour l'espace que nous cherchons à modéliser de manière spatiale et dynamique. Nous reproduisons ici les explications donnés par P. Langlois concernant ce principe de concurrence, la formalisation des règles et le mode de fonctionnement de SpaCelle (Langlois 2005, p.342) :

« [Le principe de concurrence] se manifeste entre la « force de vie » d'une cellule et les « forces environnementales » émanant des autres cellules. Lorsqu'une cellule est affectée d'un nouvel état, c'est la naissance d'un individu (cellulaire). Il est alors affecté d'une durée maximale de vie (dans cet état) qui dépend de sa classe (DI : durée infinie, DF : durée fixée, DA : durée aléatoire selon une espérance de vie et un écart-type). À sa mort naturelle, un individu change d'état et prend l'état de mort défini dans la règle de vie de sa classe. Un individu possède ainsi une force de vie qui vaut 1 à sa naissance, et décroît linéairement jusqu'à 0 à sa mort naturelle. Mais un individu peut mourir prématurément si une des forces environnementales qui agissent sur lui, dépasse sa propre force de vie.

Par exemple, la règle de vie « Pav > Fri = DA(100 ;25) » signifie que la classe « Pav » (type pavillonnaire), devient « Fri » (une friche) après sa mort et possède une durée de vie aléatoire (DA) selon une espérance de vie de 100 ans et un écart-type de 25 ans.

Les forces environnementales sont définies par les règles de transition qui sont construites sur le modèle syntaxique suivant : « État1 > État2 = Expression ». Le terme « Expression » représente une fonction d'interaction spatiale ou une combinaison de telles fonctions. Une fonction d'interaction spatiale s'écrit le plus souvent sous la forme F(X;R) et permet d'évaluer, pour chaque cellule, la « force environnementale » due aux individus de type X dans un rayon R autour de la cellule. Par exemple, si X est « Ind+Com » cela représente la sous-population des cellules de type « industrie » ou de type « commerce ». R est le rayon du disque définissant le voisinage d'action de X sur la cellule. La fonction F représente le type d'interaction qui est calculé. Il existe une vingtaine de fonctions prédéfinies. »

La pertinence géographique de cette approche a été testée à travers une expérimentation concernant l'évolution de l'espace urbain de Rouen pendant les cinquante dernières années, qui a permis de valider d'une part le modèle général et d'autre part la base de règles pour l'agglomération rouennaise (Dubos-Paillard et al. 2003).

Choix de la taille des cellules

Conséquemment au choix d'une modélisation basée sur les automates cellulaires, les données géographiques sont analysées et implémentées sous format raster. Il en résulte également que les méthodes d'analyse employées reposent sur de l'analyse d'image et de l'analyse spatiale à base de maillage. L'analyse spatiale basée sur des données de type raster présente une multitude d'avantages comparativement au traitement des données vectorielles. Tout d'abord, l'utilisation d'un maillage permet d'adapter la résolution par rapport à l'échelle d'analyse, le détail vectoriel pour une étude à échelle méso correspondant à de l'information superflue. Ce surplus d'information aurait pour conséquence de rallonger considérablement les temps de traitements, alors que l'approche raster offre des possibilités d'analyse qui seront présentées dans la section suivante (analyse à partir de l'occupation du sol dominante au sein de chaque cellule et analyse des occupations du sol en présence à l'intérieur de chaque cellule).

Le choix d'une grille adaptée à l'échelle d'analyse est déterminant pour la suite des traitements et des informations obtenues. La variabilité de la taille de la maille conditionne les résultats, puisqu'à chaque taille de cellule correspond une certaine perte d'information (Openshaw 1984). Afin d'intégrer la dimension multi-scalaire de la pression urbaine au sein de l'étude, il était initialement prévu, lors de la conception du projet PLUMES, de travailler sur deux maillages emboîtés, aux résolutions de 1km et de 200m de côté, appliquées respectivement au périmètre méso et au périmètre micro. Il a d'abord été considéré d'utiliser les deux maillages produits par l'INSEE à ces mêmes résolutions afin de se conformer à une grille communément utilisée et permettre l'analyse des données de population carroyées fournies à cette résolution. Comme le montre la représentation cartographique de la figure 6-A, les grilles de l'INSEE alors disponibles comportaient cependant un inconvénient majeur, correspondant à des défauts de formes à l'échelle des objets géographiques. Il faut entendre par défauts de forme, des mailles qui ne sont pas closes, comportant chacune trois côtés et dont les vertices (nœuds entre chaque segment) sont plus nombreux que ce qu'ils devraient être. Pour pallier cet inconvénient, il a été réalisé, dans un premier temps, un maillage de 1km de côté sur l'ensemble de la zone méso, et à partir de ce dernier, deux grilles de 200m pour les deux zones micro (figure 6-B).

Néanmoins, les premières phases d'exploration des données nous ont amené à remettre en cause l'emploi de la maille à 1 km, la perte d'information précédemment citée, liée au maillage, étant trop importante à cette résolution. Comme on peut l'observer sur la figure 6-C, le résultat de l'occupation par cellule pour une maille de 1 km ne traduit pas de façon satisfaisante les réalités spatiales : par exemple, le poste de la nomenclature « urbain non résidentiel » est surreprésenté sur l'île du Frioul. Face à ce problème majeur qui aurait pu constituer un biais analytique, le choix a été d'étendre à l'ensemble de l'espace d'étude méso, la grille de 200m dont le respect des formes spatiales est accru, et qui minimise la perte d'information au sol (figure 6-D).

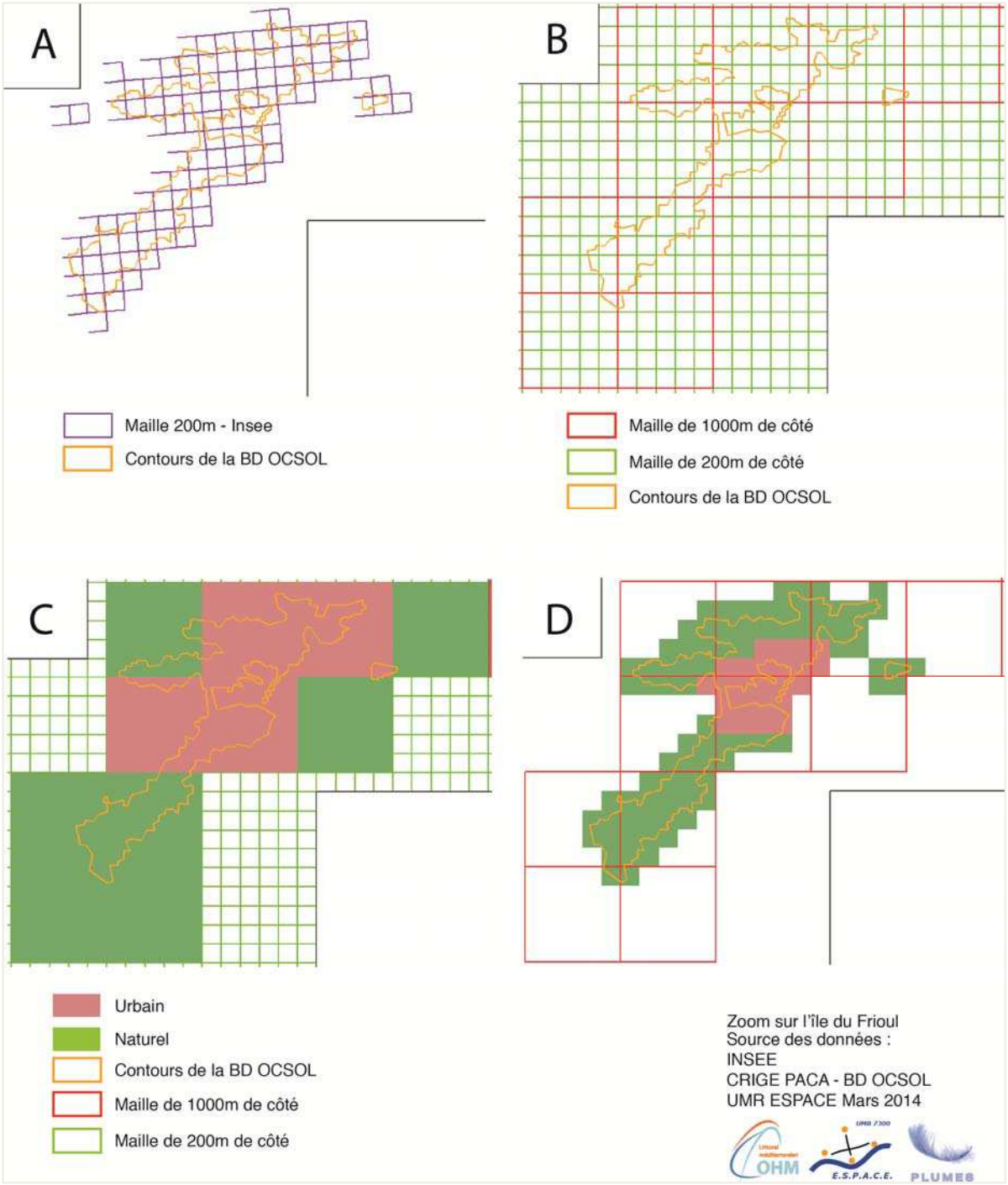


Fig. 6 - Illustration des problèmes relatifs aux différents maillages envisagés et choix d'un nouveau maillage de 200m de côté

Préparation et analyse des données géographiques

Une succession de traitements et d'analyses a été nécessaire pour la création du modèle. La démarche, de la création des données à la formalisation du modèle, est présentée par la figure 7.

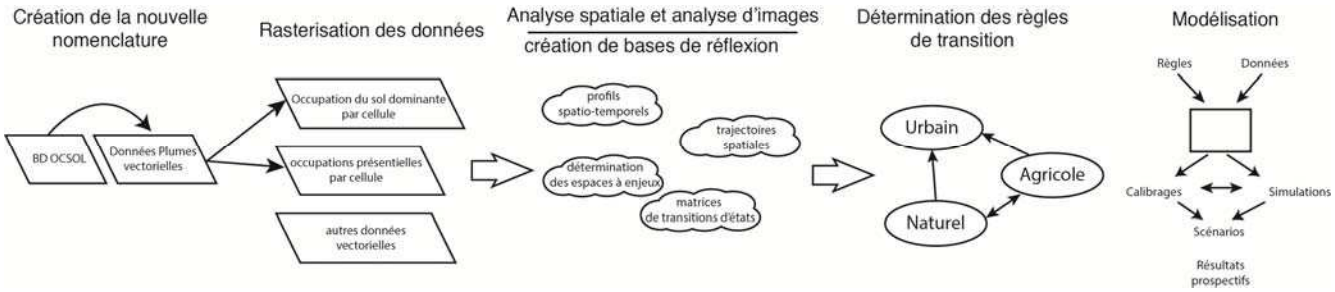


Fig. 7 -Démarche pour la création du modèle

Dans un premier temps, il a fallu réorganiser la nomenclature de la base de données OCSOL de manière à la simplifier, tout en instaurant une logique cohérente vis-à-vis de notre problématique d'origine. La nouvelle nomenclature est basée sur 4 occupations du sol principales (bâti, milieux agricoles, milieux naturels, milieux aquatiques), divisées en sous-catégories afin de faire ressortir les occupations du sol de fort intérêt pour notre analyse (nomenclature plus détaillée pour l'urbain). La reclassification aboutit à 9 classes d'occupation du sol (Tab. 3).

Nomenclature OCSOL	Intitulé	Nomenclature PLUMES	Intitulé
121 à 142	Zones industrielles, décharges, espaces verts artificialisés non agricoles	100	Urbain non résidentiel (ACT)
111	Tissu urbain continu	111	Urbain continu, dense (DEN)
112	Tissu urbain discontinu	112	Urbain discontinu (DIS)
113	Bâti diffus	113	Urbain diffus (DIF)
212 à 214 et 231 à 244	Terres arables, prairies, zones agricoles hétérogènes, friches	200	Agriculture à moindre valeur ajoutée (AGM)
221 à 224	Vignobles, vergers, oliveraies et lavandins	220	Agriculture à forte valeur ajoutée (AGF)
311 à 324	Forêts, milieux à végétation arbustive et/ou herbacée	300	Espaces forestiers, arbustifs, herbacés (FOR)
331 à 335	Espaces ouverts avec peu de végétation	330	Espaces ouverts (OUV)
400 à 523	Zones humides, eaux continentales, eaux maritimes	400	Milieux aquatiques (MER)

Tab. 3 - Reclassification de la nomenclature OCSOL vers PLUMES

La première étape de la création du jeu de données consiste donc en la recodification de la base de données OCSOL (Fig. 8a). Pour réaliser le codage PLUMES, nous avons désagrégé la base OCSOL grâce au logiciel ArcGIS, afin que la typologie numérique d'OCSOL puisse être recodée par la nouvelle nomenclature PLUMES, pour ensuite être ré-agrégée et vectorisée (Fig. 8b).

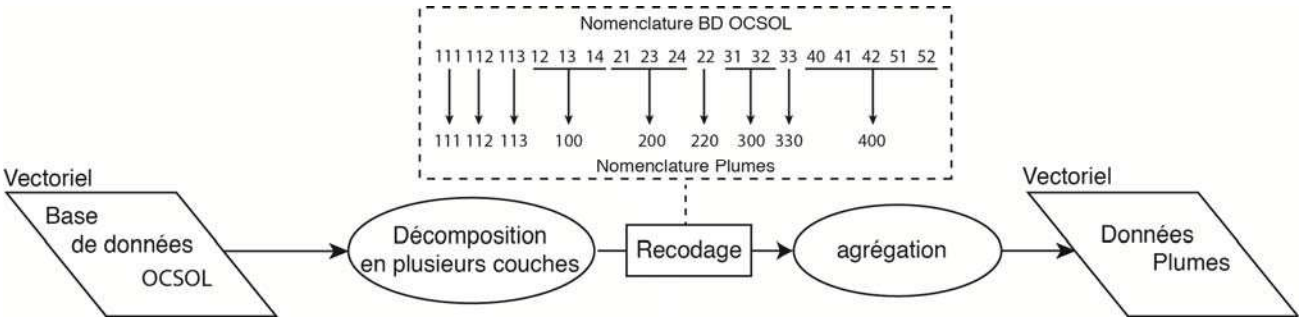


Fig. 8a - Mise en place de la nouvelle nomenclature PLUMES

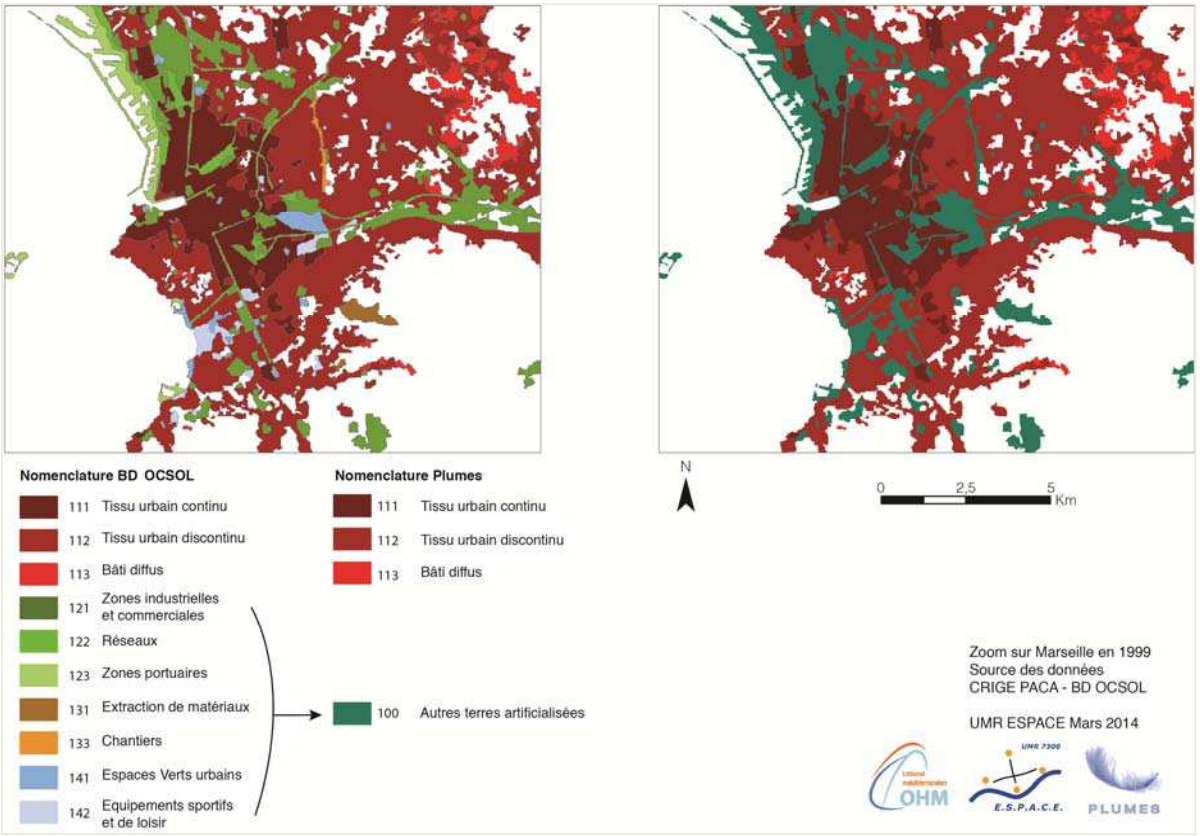


Fig. 8b - Exemple de reclassification de la nomenclature BD OCSOL pour le programme PLUMES

En vue de la modélisation cellulaire, nous avons rastérisé les données correspondant à la nomenclature PLUMES en fonction de la grille d'étude de 200 mètres de côté (figure 9). Deux types de rastérisation ont été effectués pour les années 1999 et 2006 : une première rastérisation met en évidence l'occupation du sol dominante de chaque cellule ; une seconde rastérisation est réalisée pour chaque type d'occupation du sol et met en lumière de façon binaire sa présence ou son absence au sein des cellules. Alors que l'automate cellulaire développé modélise l'évolution de l'occupation dominante de chaque cellule, nous souhaitions en effet mener une analyse complémentaire sur les occupations du sol présentes en chaque cellule.

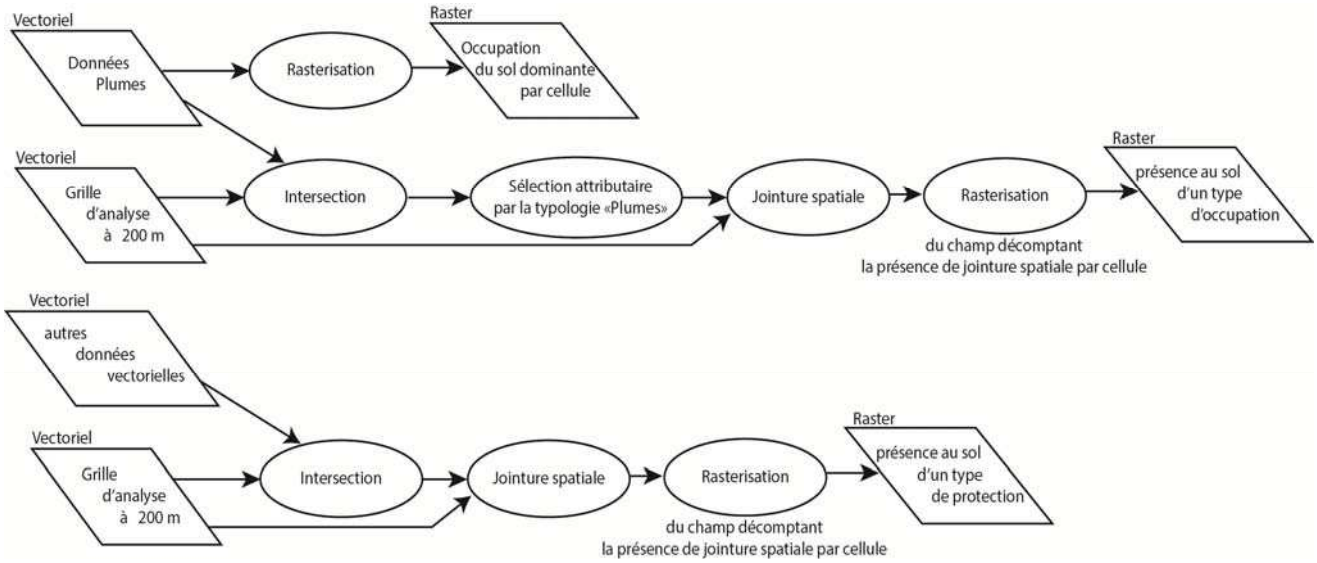


Fig. 9 - Rastérisation des couches d'information géographique

Pour créer les couches des occupations dominantes par cellule (figures 10 et 11), la couche vectorielle PLUMES précédemment créée a simplement été rastérisée pour 1999 et 2006.

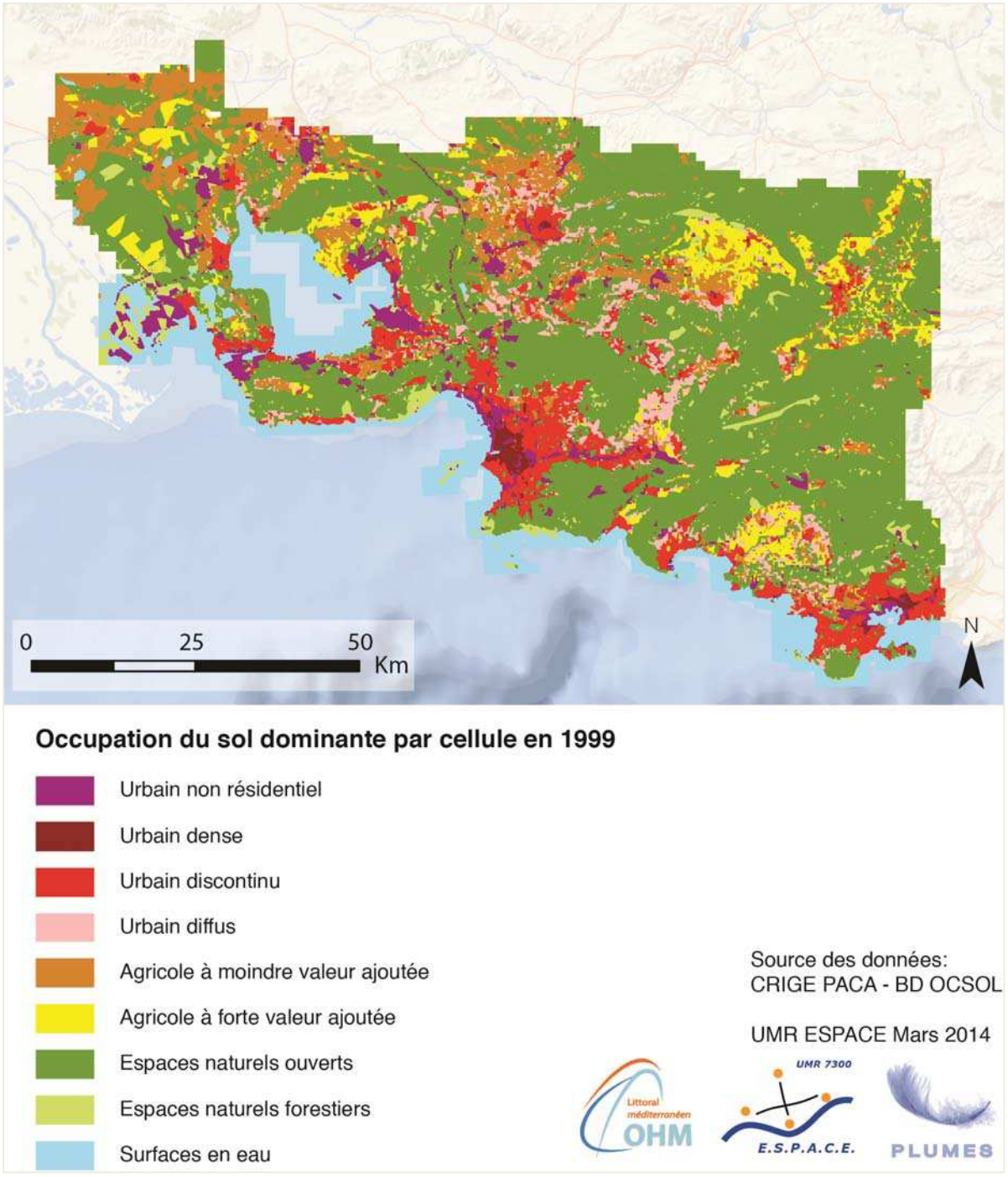


Fig. 10 - Carte de l'occupation du sol dominante en 1999

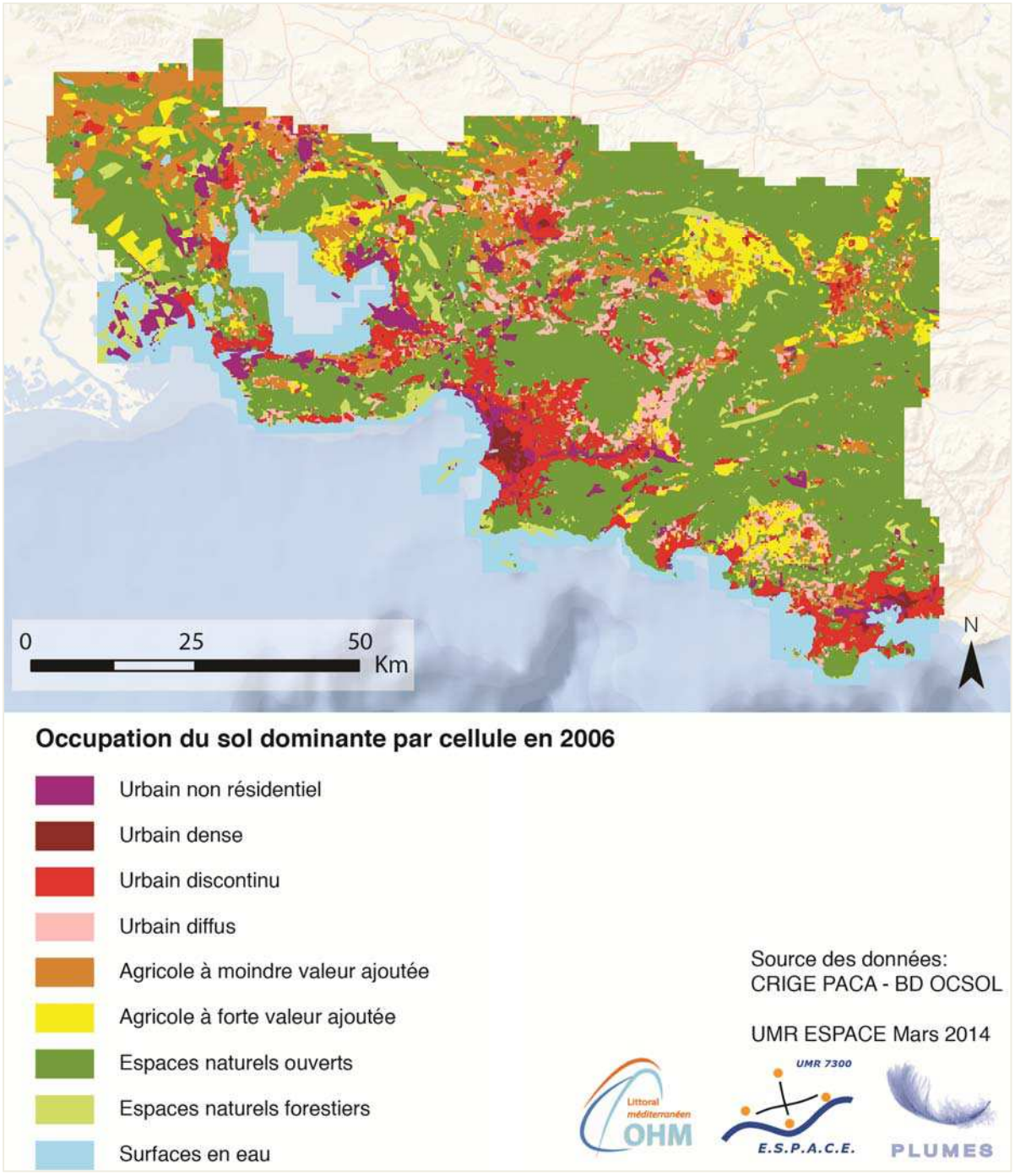


Fig. 11 - Carte de l'occupation du sol dominante en 2006

En ce qui concerne la création des couches raster de présence/absence des différents types d'occupation du sol, il a fallu effectuer une intersection entre les données PLUMES et la grille à 200m, puis sélectionner les attributs en fonction de la nomenclature PLUMES (figure 9). Ensuite, une jointure spatiale a été réalisée entre les données intersectées et à nouveau la grille afin qu'à

chaque cellule soit attribuée les codes d'occupation du sol de la nomenclature PLUMES présents. Enfin, la rastérisation permet d'obtenir un raster de présence au sol pour chaque type d'occupation (figure 12), soit un total de deux fois 9 couches.

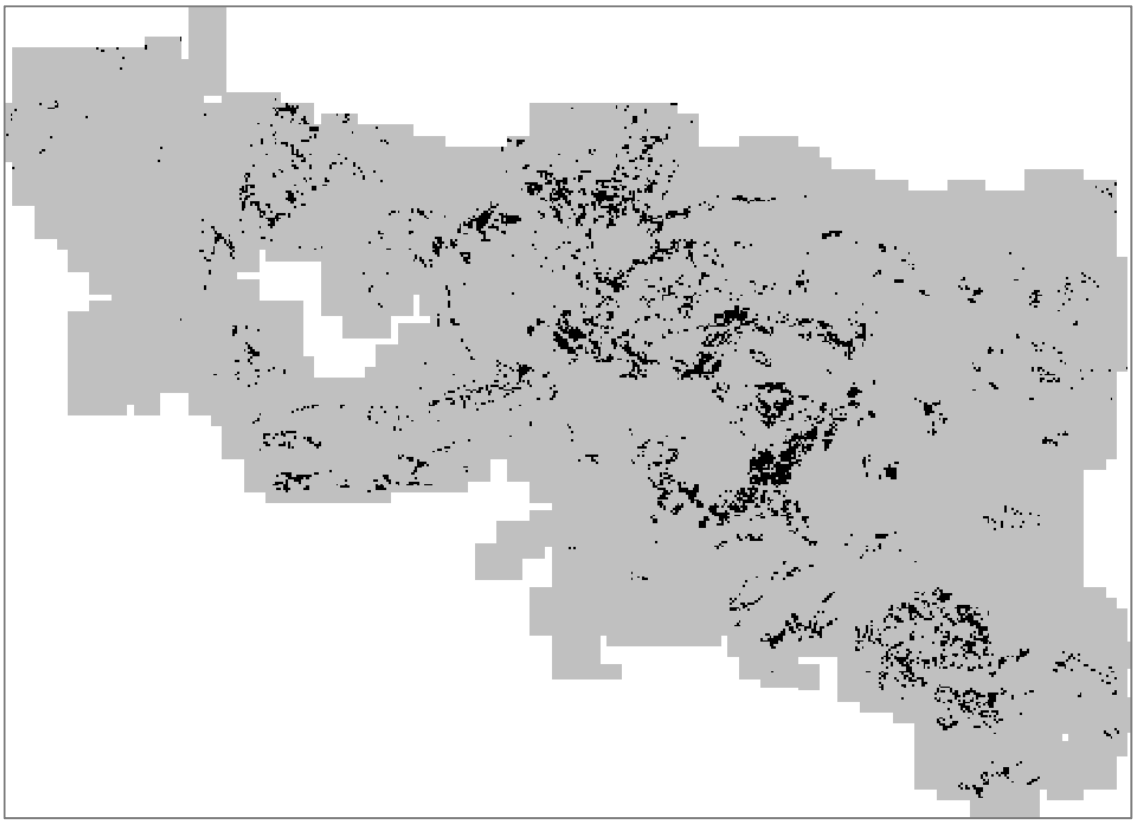


Fig. 12 - Exemple d'occupation présentielle : le bâti diffus en 1999 (capture d'écran)

L'automate cellulaire intègre non seulement l'occupation du sol, mais aussi l'influence d'autres facteurs sur l'évolution de celle-ci. Nos hypothèses quant à ces facteurs se basent sur le couple attractivité/contrainte, qui est le moteur des dynamiques de ce territoire. Nous avons ainsi choisi d'introduire les protections environnementales règlementaires les plus contraignantes en termes d'urbanisation, le réseau des routes nationales et départementales, qui oriente le développement urbain, et l'indice de pression urbaine potentielle, singularisant l'évolution des communes selon l'importance de la pression urbaine métropolitaine qui s'y exerce.

Une démarche identique de traitement de l'information géographique est donc effectuée afin de rastériser les espaces de protections environnementales règlementaires (figure 9), en se basant sur les couches vectorielles des protections en place (figure 13). Les protections règlementaires prises en compte sont au nombre de cinq : les Arrêtés de Protection de Biotopes (APB), les réserves nationales naturelles, les terrains du Conservatoire du Littoral, les terrains du Conservatoire d'Espaces Naturels PACA, et les sites classés.

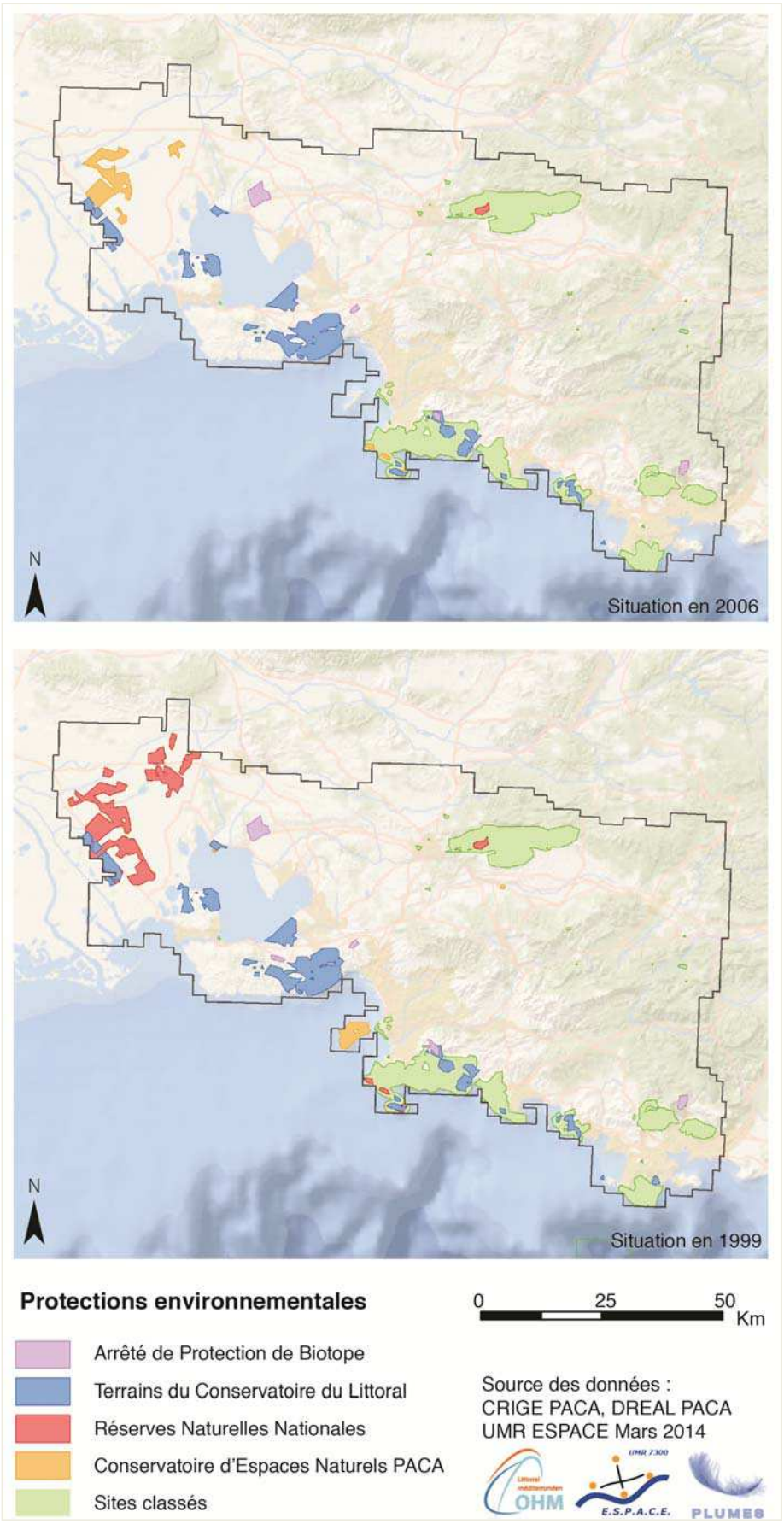


Fig. 13 - Carte des protections règlementaires

Nous avons simplement rastérisé le réseau des routes nationales et départementales (figure 14). L'indice de pression urbaine potentielle a été également rastérisé, selon une classification des valeurs qui sera exposée en section 4.1.3.

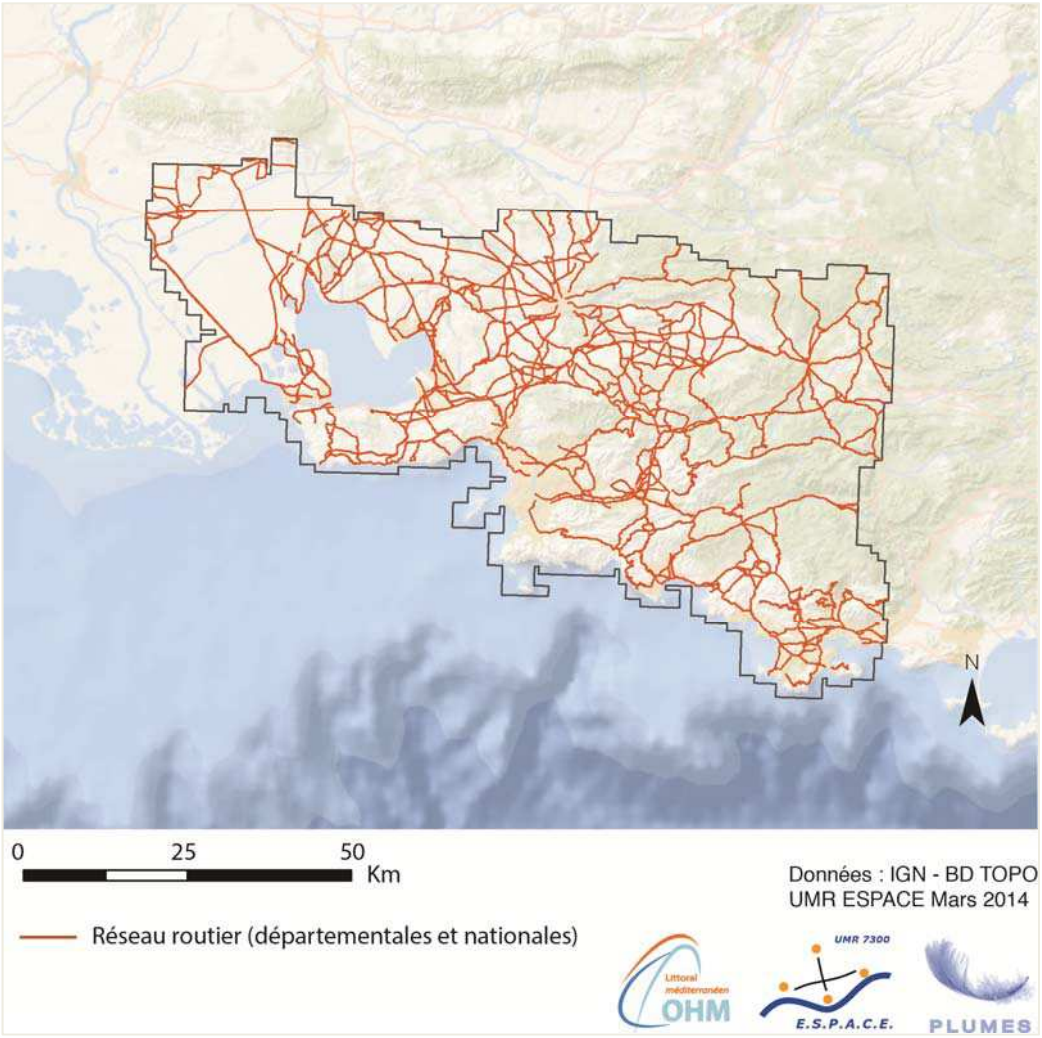


Fig. 14 - Carte du réseau routier (routes nationales et départementales)

A partir des images rasters, l'évolution de l'occupation du sol est analysée entre 1999 et 2006, à la fois par cartographie des changements et par création d'une matrice des transitions. Des analyses d'images permettent de déterminer les différents profils de changements à partir des couches de présence des occupations du sol. Des analyses SIG sont menées à partir des différentes couches rasters afin de tester les relations spatiales susceptibles d'expliquer l'évolution de l'occupation des sols. L'objectif est de déterminer les règles de transitions entre espaces urbains, agricoles et naturels (figure 6). La modélisation, basée sur ces données et ces règles, a pour finalité la simulation de différents scénarios prospectifs.

3.2.3 Protocole d'appréhension de la pression urbaine liée aux influences paysagères

Nous postulons que le paysage littoral possède des attributs qui influencent de manière significative le choix de localisation résidentielle. L'objectif est de considérer de manière

quantitative ces attributs paysagers, empreints de charge perceptive, afin de les introduire dans une démarche modélisatrice.

L'élaboration du protocole prend en compte six attributs paysagers retenus pour leur influence majeure dans l'expression de la pression urbaine à l'échelle d'une parcelle de terrain, qui font l'objet d'une quantification sur chaque parcelle ayant été artificialisée entre 1999 et 2006.

- La position de la parcelle dans son environnement, qui fait référence à l'encaissement ou à la position dominante d'une parcelle.
- L'exposition de la parcelle.
- Le type d'occupation du sol en 1999.
- L'ouverture de l'espace en 1999.
- Le contexte environnemental dans lequel la zone de changement d'occupation du sol s'inscrit. Cette variable apporte des informations sur les zones préférentielles d'implantation du bâti nouveau, en complément de l'occupation du sol.
- La pente de la zone bâtie.
- La composition du champ de vision en 1999.

La mise en évidence des caractéristiques paysagères des parcelles ayant été artificialisées nécessite le passage par des traitements géomatiques, qui ont été réalisés sous ArcGis - excepté pour l'attribut « position » dont les traitements ont été effectués par analyse d'image et outils de morphologie mathématique - offrant un large éventail de procédures d'analyse spatiale.
Le tableau 4 présente l'ensemble des variables du paysage retenues et leurs modalités respectives, à partir desquelles l'analyse des parcelles urbanisées a été menée ainsi que la détection des zones de pression à venir.

Variables	Modalités
Orientation de la parcelle	Sud
	Est
	Nord
	Ouest
Position de la parcelle	Position sommitale
	Position en haut versant
	Position en versant intermédiaire
	Position en bas versant
	Position en cuvette
Type de formation végétale ou de culture de la zone en 1999	Maquis, garrigues
	Zone agricole
	Forêt
Ouverture et fermeture du paysage	Espace ouvert
	Espace fermé
Contexte environnemental dans lequel la zone de changement d'occupation s'inscrit	Tissu urbain discontinu dense
	Tissu urbain discontinu lâche
	Tissu urbain discontinu dans un contexte agricole
	Bâti diffus dans un contexte de bâti diffus
	Bâti diffus dans un contexte naturel
	Bâti diffus dans un contexte agricole
Pente de la zone bâtie	Nulle
	Faible
	Forte
Composition du champ de vision en fonction de cinq plans de visibilité	Part de la vue sur des espaces naturels
	Part de la vue sur des espaces agricoles
	Part de la vue sur mer
	Part de la vue sur des zones artificialisées indifférenciées

Tab. 4 – Les variables paysagères retenues et leurs modalités

4. Résultats

4.1 Application du modèle de pression urbaine à la zone d'étude

Les indices de pression urbaine calculés sur les données de 1999 et de 2006 ont été reportés sur la figure 15. Les plus forts indices de pression urbaine s'observent, comme attendu, dans et autour des principales communes urbaines : Marseille, Toulon, Aix-en-Provence, ainsi qu'autour de l'Etang de Berre et le long du littoral. Les indices de 2006 traduisent une intensification de la pression urbaine dans quatre contextes spatiaux :

- au voisinage immédiat des trois grands pôles urbains,
- vers l'est, dans un triangle compris entre Marseille, Aix-en-Provence, et Saint-Maximin,
- le long d'un axe sud-nord, reliant Marseille à Aix-en-Provence et longeant les rives de l'Etang de Berre,
- le long du littoral, entre Marseille et Toulon.

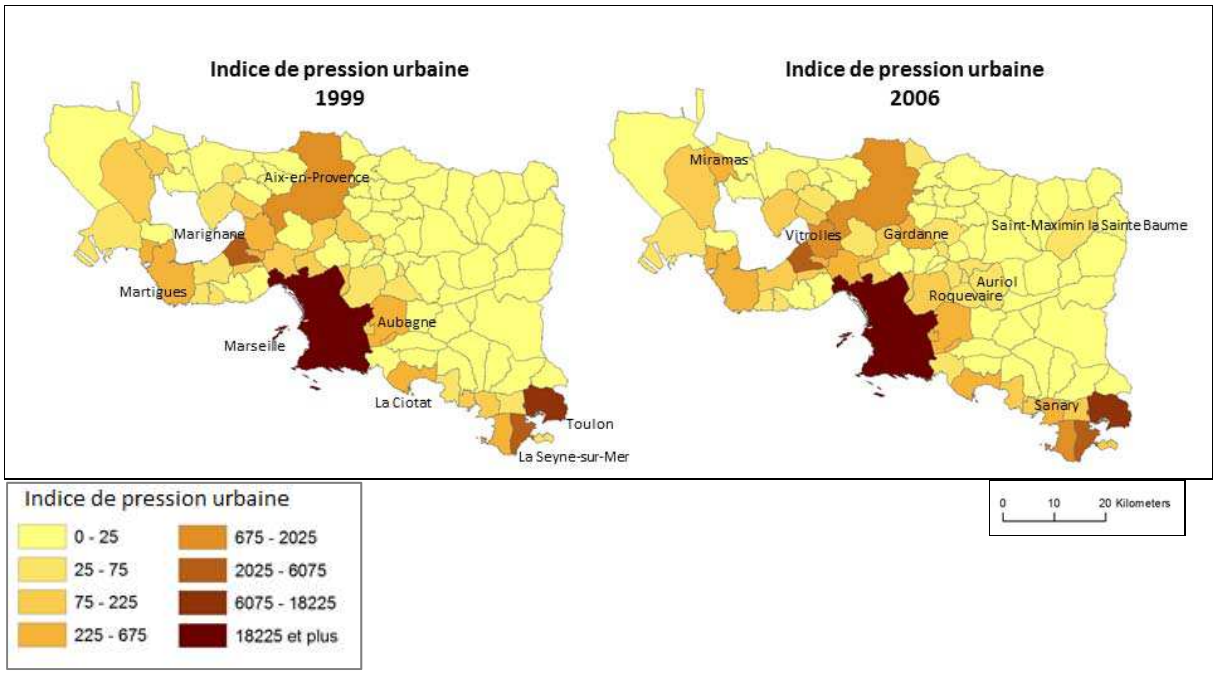


Fig. 15 - Cartographie des indices de pression en 1999 et 2006

4.1.1 Relation entre l'indice de pression urbaine et les constructions nouvelles (nombre de permis de construire autorisés).

Les données communales annuelles de la base Sit@del sont disponibles de 2002 à 2012. Nous avons regroupé les permis délivrés entre 2002 et 2006, d'une part, et entre 2007 et 2011, d'autre part. Sur l'ensemble des 95 communes du champ d'étude, le nombre de permis de construire a baissé de 15% alors qu'il a légèrement augmenté dans les deux sous-ensembles littoraux : + 2% mais avec des évolutions très différentes selon les communes, qui se traduisent par de forts coefficients de variation, surtout dans le sous-ensemble est.

Une régression simple des permis de construire autorisés sur les indices de pression a été réalisée sur les 95 communes du champ d'étude. Comme pressenti, les coefficients de détermination ajustés sont élevés :

- R^2 entre les permis autorisés (2002-2006) et l'indice de pression 1999 : 0,91
- R^2 entre les permis autorisés (2007-2011) et l'indice de pression 1999 : 0,86

L'observation des plus forts résidus nous a conduits à opérer une nouvelle régression, spécifique aux deux sous-ensembles du littoral. Les coefficients de détermination sont plus différenciés dans le temps et dans l'espace.

Sous-ensemble littoral ouest :

- R^2 entre les permis autorisés (2002-2006) et l'indice de pression 1999 : 0,55
- R^2 entre les permis autorisés (2007-2011) et l'indice de pression 2006 : 0,85

Les plus forts résidus positifs (constructions observées supérieures aux constructions estimées) se situent à Châteauneuf-les-Martigues (1ère période) et Le Rove (2ème période). Inversement, c'est la

commune de Sausset qui se distingue, aux deux périodes, par le plus fort résidu négatif (constructions observées inférieures aux constructions estimées).

Sous-ensemble littoral est :

- R^2 entre les permis autorisés (2002-2006) et l'indice de pression 1999 : 0,1
- R^2 entre les permis autorisés (2007-2011) et l'indice de pression 2006 : 0,05

Aubagne, se caractérise par les plus forts résidus positifs aux deux périodes, alors que sur le littoral, l'évolution est très contrastée. La Ciotat se démarque par le plus fort résidu négatif à la 1ère période et, *a contrario*, détient l'un des plus forts résidus positifs à la 2ème période, alors que pour cette même période, la commune voisine de Cassis est celle dont les constructions observées sont très inférieures aux constructions estimées par le modèle.

4.1.2 Une pression littorale urbaine spatialement différenciée et multiforme

Comment expliquer cette relation plus faible, voire nulle et ces divergences d'évolution, sur un espace littoral dont on connaît par ailleurs la forte attractivité ? Plusieurs facteurs interviennent.

Le modèle de pression considère toutes les surfaces naturelles, sans soustraire les protections naturelles, or celles-ci sont largement représentées sur la bordure littorale (Figure 16). Par ailleurs, les réglementations – loi littoral, politique d'urbanisme propre à chaque commune et zonage agricole – sont appliquées de manière plus ou moins drastique selon les communes.

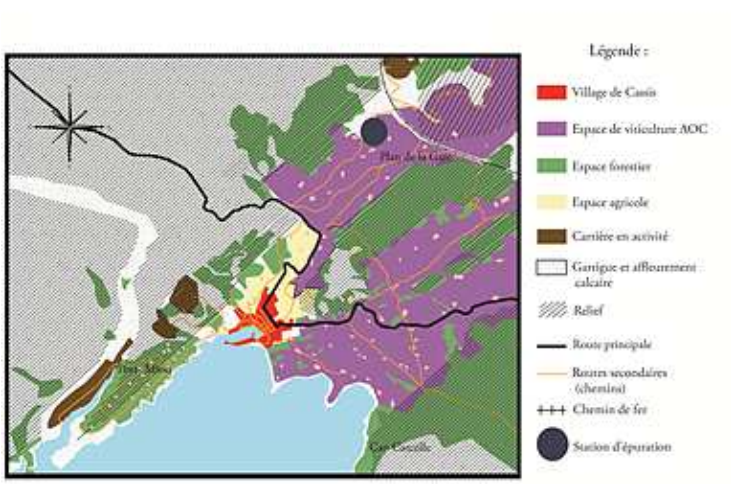


Fig. 16 – Zoom sur les protections de la zone de Cassis et La Ciotat

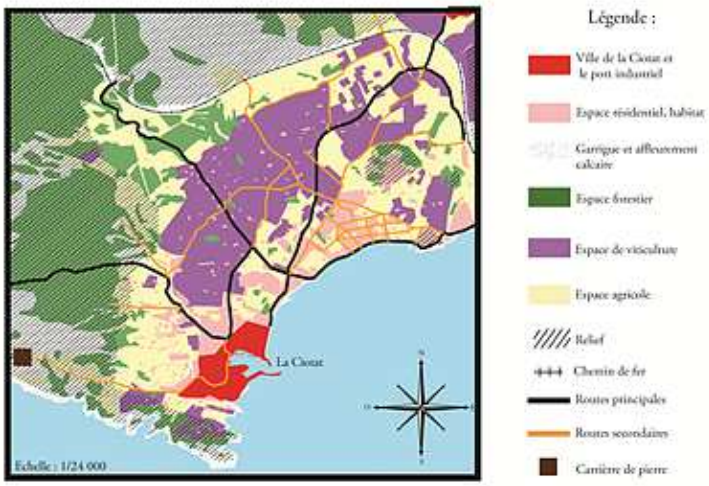
On constate que, même dans un secteur très protégé, comme la zone de Cassis – La Ciotat, les protections ne recouvrent qu'une partie de la superficie communale, laissant le champ libre à l'artificialisation, ailleurs. En outre, la place très variable accordée à l'agriculture et à la viticulture, dans les activités de la commune, est un facteur important de différenciation. La comparaison de Cassis et de La Ciotat est révélatrice de l'action conjointe de ces facteurs.

La Ciotat a 25% d'hectares de plus que Cassis, mais une proportion de surfaces protégées bien moindre, 29%, contre 46% à Cassis (en 1999). Ces surfaces protégées sont toutes localisées à l'Est, sur le relief du Cap Canaille, la majeure partie de la commune est donc sans protection particulière.

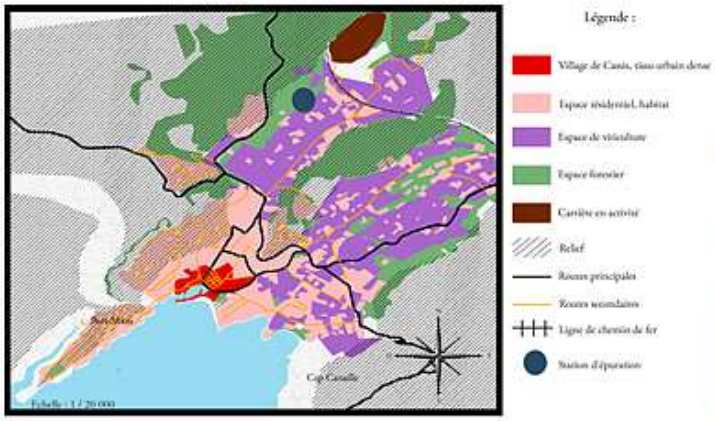
Par ailleurs, le paysage des deux communes, tel qu'il ressort de l'interprétation des photographies aériennes de 1950, est très agricole (Fig. 17). La forêt s'étend sur de vastes surfaces, notamment sur le Cap Canaille. À La Ciotat, les cultures maraîchères et les plantations d'oliviers couvrent une grande superficie et enserrent d'importantes surfaces en vigne, formant un ensemble compact à l'ouest, plus fragmenté à l'est. À Cassis, les espaces agricoles subsistent à l'état relictuel, en revanche, le vignoble couvre l'essentiel de la commune et descend jusqu'à la mer. Cinquante ans plus tard, le paysage a radicalement changé. La forêt a disparu du Cap Canaille en raison des incendies. Il ne reste pratiquement plus de vignes ni d'agriculture à La Ciotat ; le bâti résidentiel s'est étendu à leur place. À Cassis, si l'agriculture a totalement disparu, le vignoble, bien qu'en recul sur le littoral et mité par le bâti vers l'intérieur, résiste à l'artificialisation. Les raisons tiennent à l'attention continuelle portée par la municipalité de Cassis au vignoble, déclaré AOC vin de Cassis, et valorisé pour sa qualité paysagère et son rôle de protection face aux incendies.



Le paysage de Cassis en 1950



Le paysage de La Ciotat en 1950



Le paysage de Cassis en 2003



Le paysage de La Ciotat en 1999

Fig.17 - Evolution paysagère de Cassis et de La Ciotat

Enfin, les formes d'expression indirecte de la pression sont nombreuses. Dans les espaces littoraux à forte attractivité, lorsque la pression est bridée par les protections littorales, elle exploite toutes les opportunités existantes. Ainsi, quand la demande de nouvelles constructions est contenue par l'application des règlements d'urbanisme, elle tend à se reporter sur le bâti existant qui est soit rénové, soit détruit pour être reconstruit. Le marqueur traditionnel de cette pression urbaine et touristique est le prix du foncier et de l'immobilier. La structure du parc logement en est un autre. Comme mentionné dans l'état de l'art, la tendance dominante observée dans le sous-ensemble littoral est à la diminution de la part des résidences secondaires au profit des résidences principales. Sur les communes du front de mer, la part des résidences secondaires fluctue aujourd'hui entre 29 % et 39 % des logements, alors que cette fourchette se situait 10 points au-dessus en 1990. De plus, les différences d'évolution sont très sensibles d'une commune à l'autre et des conflits d'usage entre résidentialité secondaire et résidentialité principale sont plus ou moins exacerbés. Par exemple, la part des résidences principales est à Cassis de 64% en 2010 (68% en 1999) alors qu'elle est à La Ciotat de 76% (74% en 1999) ; sur la Côte Bleue, pour les mêmes dates, les résidences principales sont passées de 66% à 75% à Sausset, et de 84 % à 87 % pour Le Rove.

4.1.3 Normalisation de l'indice de pression potentielle urbaine par le voisinage

Afin d'être introduit dans la modélisation par automate cellulaire, qui suit, l'indice de pression urbaine potentielle a été rasterisé, ce qui a nécessité un travail préalable de reclassification des valeurs. En effet, les valeurs de l'indice de pression, ont été reclassées en 5 classes, allant de très faible (1) à très fort (3) (tableau 5).

Indice de pression urbaine potentielle	
Valeurs brutes	Valeurs reclassées
0 – 25	1 – Très faible
25 – 75	1,25 – Faible
75 – 225	1,25 – Faible
225 – 675	1,5 – Moyen
675 – 2025	2 – Fort
2025 – 6075	3 – Très Fort
6075 – 18225	3 – Très Fort
18225 et plus	3 – Très Fort

Tab. 5 - Reclassification des valeurs de l'indice de pression urbaine potentielle

Ensuite, et afin de prendre en compte d'éventuels phénomènes de report de pression entre communes mitoyennes, a été calculée pour chaque commune, la moyenne des indices de pression de ses communes voisines. Les valeurs de pression des communes dont le voisinage est caractérisé par une pression forte ou très forte ont été respectivement augmentées de 1 et 1,5. Au final, les valeurs de l'indice s'échelonnent entre 0 et 4,5 (figures 18 et 19).

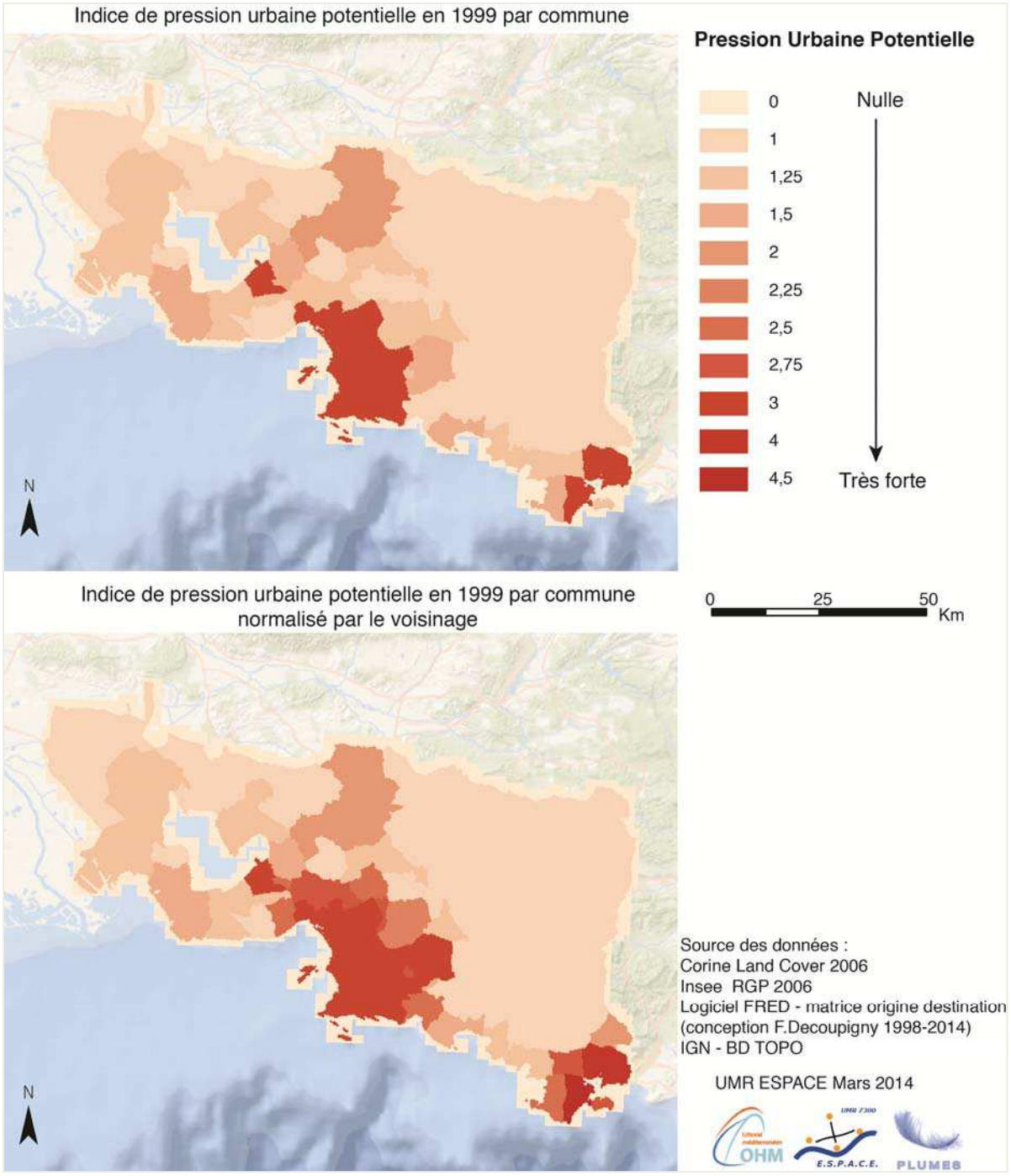


Fig. 18 - Carte de l'indice de pression urbaine potentielle en 1999

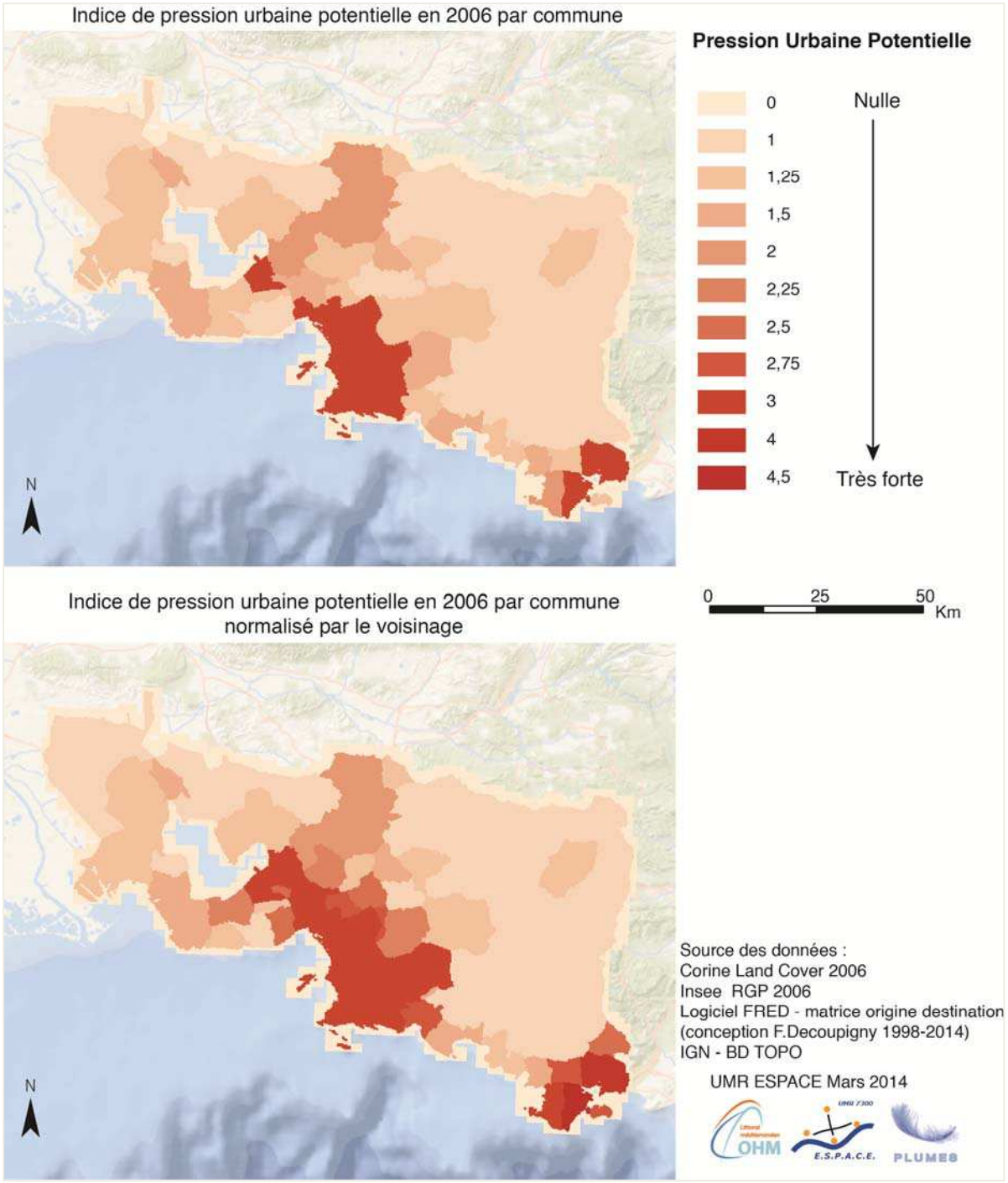


Fig. 19 -Carte de l'indice de pression urbaine potentielle en 2006

4.2 Structures et dynamiques de l'occupation du sol à l'échelle des mailles de 200m x 200m

4.2.1 Analyse des occupations du sol dominantes

La faible durée de la période d'analyse rend les changements d'occupation du sol dominante difficilement perceptibles par comparaison des cartes 1999 et 2006 (figures 10 et 11). La carte des dynamiques spatiales globales entre 1999 et 2006 montre la fragmentation et l'éparpillement des zones ayant connu un changement d'occupation dominante (figure 20).

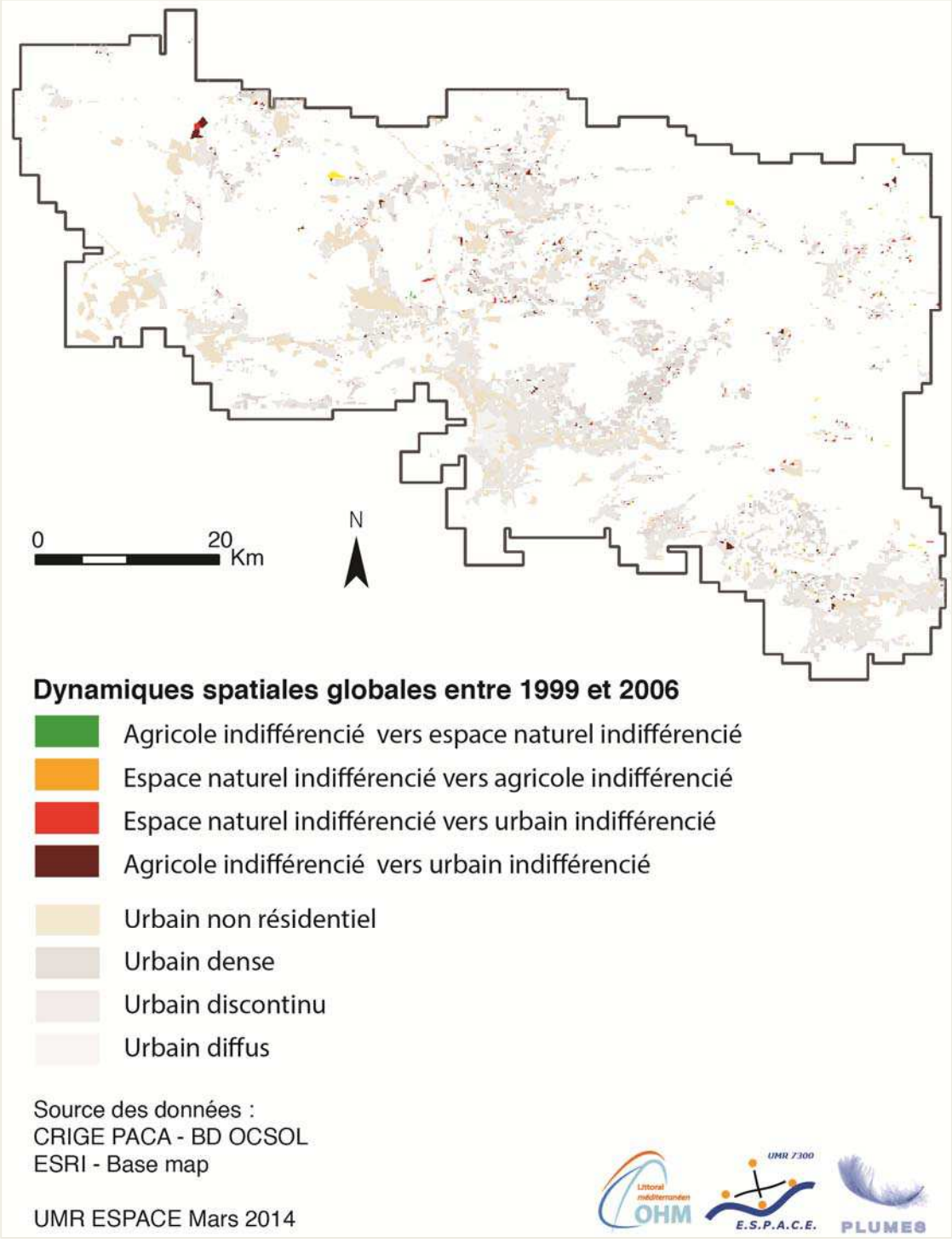


Fig. 20 - Carte des dynamiques spatiales globales entre 1999 et 2006

Les lieux ayant connu un changement dans leur occupation du sol dominante sont généralement situés en périphérie des zones urbaines. La proximité, voire même la contiguïté des espaces urbains, apparaît être un facteur majeur de la localisation des changements d'occupation du sol dominante. La matrice des changements entre 1999 et 2006 (tableau 6) présente la ventilation des cellules pour les différentes occupations du sol dominantes et leur évolution.

		2006											
		Hors champ	Urbain non résidentiel	Urbain continu	Urbain discontinu	Bâti diffus	Agr. moindre valeur	Agr. forte valeur	Forêt	Milieux ouverts	Mer	Total 1999	1999 (%)
1999	Hors champ	84988	0	0	0	0	0	0	0	0	0	84988	44,69
	Urbain non résidentiel	0	4711	0	0	1	2	2	13	61	0	4790	2,52
	Urbain continu	0	0	667	1	0	0	0	0	0	0	668	0,35
	Urbain discontinu	0	1	0	8250	9	5	1	2	1	1	8270	4,35
	Bâti diffus	0	0	0	5	5225	7	4	0	2	0	5243	2,76
	Agr. moindre valeur	0	58	1	59	159	10774	254	23	10	0	11338	5,96
	Agr. forte valeur	0	25	0	14	34	719	5264	20	4	0	6080	3,20
	Forêt	0	37	0	28	165	62	23	52973	691	1	53980	28,38
	Milieux ouverts	0	18	0	8	8	21	15	114	3662	0	3846	2,02
	Mer	0	0	0	0	0	0	1	0	0	10976	10977	5,77
	Total 2006	84988	4850	668	8365	5601	11590	5564	53145	4431	10978	190180	
	2006 (%)	44,69	2,55	0,35	4,40	2,95	6,09	2,93	27,94	2,33	5,77		

Tab. 6 - Matrice des changements d'occupation du sol dominante entre 1999 et 2006 (nombre de cellules de 200m x 200m)

Les pourcentages d'occupation du sol sont basés sur une aire rectangulaire couvrant l'ensemble du périmètre d'étude, composé de 514 cellules en largeur et 370 cellules en hauteur, afin d'assurer la comparabilité directe avec les sorties du modèle basé sur les automates cellulaires. Une grande partie de l'emprise concerne ainsi une zone située « hors champ » vis-à-vis du périmètre d'étude (44.69%), à laquelle on peut ajouter la mer (5.77%).

En 1999, les espaces naturels, qui représentent la majeure partie de l'occupation des terres, rassemblent un peu plus de 30.41% de l'emprise totale, avec une large prédominance des espaces forestiers (28.38%). Les espaces urbains concernent 9.98% de l'emprise totale, dont 2.52% d'urbain non résidentiel, 0.35% d'urbain continu, 4.35% d'urbain discontinu et 2.76% de bâti diffus. Les zones agricoles représentent 9.16% de l'emprise totale, avec 3.20% d'agriculture à forte valeur ajoutée et 5.96% d'agriculture à moindre valeur ajoutée.

La ventilation reste semblable en 2006 puisque les évolutions concernent de très faibles proportions. L'extension de l'urbain se fait à la faveur de l'urbain non résidentiel (+0.03 point), de l'urbain discontinu (+0.05 point) et du bâti diffus (+0.19 point), et ne concerne donc pas l'urbain continu. L'agriculture à forte valeur ajoutée présente une baisse de -0.27 point, alors que la superficie de l'agriculture à moindre valeur ajoutée augmente de +0.13 point. Concernant les espaces naturels, les espaces forestiers perdent -0.44 point, tandis que les milieux ouverts gagnent +0.31 point.

La matrice permet en outre d'identifier les transitions existantes entre les différentes classes d'occupation du sol et l'importance des surfaces relatives à ces différentes évolutions. Ainsi, en termes de transition d'une classe d'occupation du sol dominante à une autre, la matrice montre l'absence de phénomène de densification d'une classe d'occupation urbaine vers une autre. L'urbanisation évolue ainsi par étalement.

Trois grands types de transition s'observent :

- les transitions à partir des espaces agricoles (266 cellules) et naturels (209 cellules) vers l'urbain discontinu et l'urbain diffus ;
- les transitions entre l'agriculture à forte et moindre valeur ajoutée (973 cellules au total) ;
- les transitions des espaces forestiers et milieux ouverts vers l'agriculture à forte ou moindre valeur ajoutée (121 cellules).

A cela s'ajoutent trois types de transition qui ne seront pas pris en compte dans la modélisation basée sur les automates cellulaires :

- les transitions entre forêts et milieux ouverts (805 cellules au total), qui correspondent en grande partie à des feux de forêts ;
- les transitions des espaces agricoles vers les espaces naturels, qui sont peu importantes en nombre (57 cellules) ;
- les transitions à partir des espaces agricoles et naturels vers l'urbain non résidentiel, qui correspondent à des opérations ponctuelles d'aménagement de zones d'activités (83 cellules).

Enfin, il faut noter que les cellules d'urbain non résidentiel ayant connu une transition vers les espaces forestiers (13 cellules) et les milieux ouverts (61 cellules) correspondent à un artefact lié à la présence de la voie TGV qui n'a pas fait l'objet de la même assignation aux deux dates d'analyse.

4.2.2 Validation des dynamiques observées en occupation dominante par analyse des occupations du sol présentielles

Afin de profiter au maximum du maillage dans le cadre analytique, une seconde étape d'analyse est réalisée, non plus sur l'occupation du sol dominante de chaque cellule, mais focalisée sur la présence (positive ou négative) des différentes occupations du sol au sein du quadrillage.

Cette analyse consiste, dans le cadre de notre démarche exploratoire, à considérer la présence de chaque objet géographique inscrit dans une maille. Il est ainsi possible d'observer les apparitions et disparitions de chaque type d'occupation du sol entre les deux dates. Cette analyse

complémentaire vient étayer l'analyse de l'occupation du sol dominante par la prise en compte de la présence de chaque objet géographique au sein d'une maille.

Afin de déceler des tendances quant à la présence de tel ou tel type d'occupation du sol aux deux dates, il est réalisé dans un premier temps une différence d'une même occupation entre les deux dates pour obtenir un fichier raster dont les valeurs de chaque pixel sont situées dans l'intervalle [-1 ; 1], soit une perte et un gain (et 0 pour l'absence de changement). Une fois les différences obtenues pour chaque poste de la nomenclature, une classification basée sur la méthode des nuées dynamiques avec une base de 9 classes est réalisée (des reclassifications peuvent être réalisées en cas de classes similaires). À la manière de la création de courbes radiométriques pour la télédétection, les statistiques de chaque classe sont produites et reportées sur le tableur Excel (figure 21). Cette analyse permet ainsi de rassembler dans des classes les cellules présentant les mêmes types d'évolution, en prenant en compte les différentes occupations du sol présentes en leur sein en 1999 et 2006.

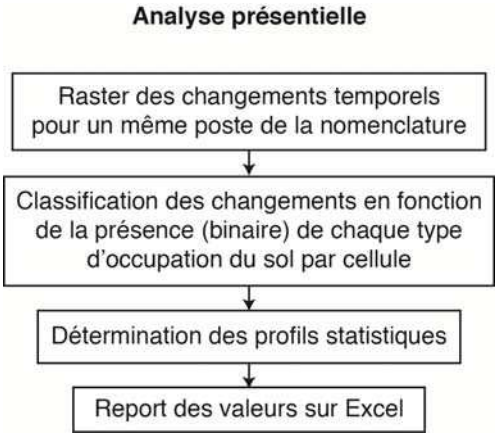
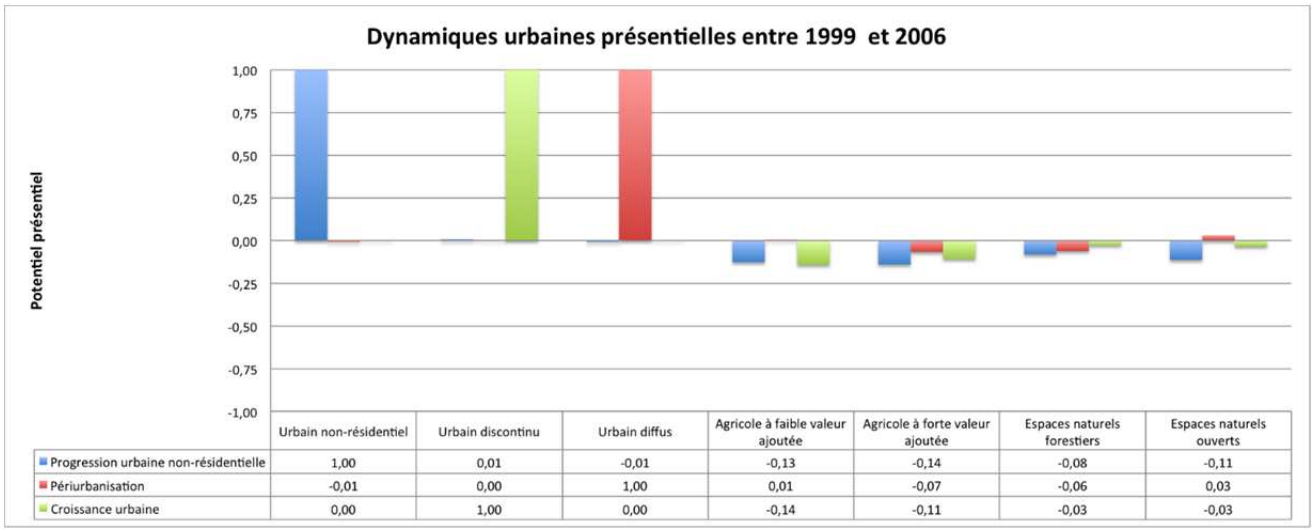


Fig. 21 - Démarche d'analyse présentielle de l'occupation du sol

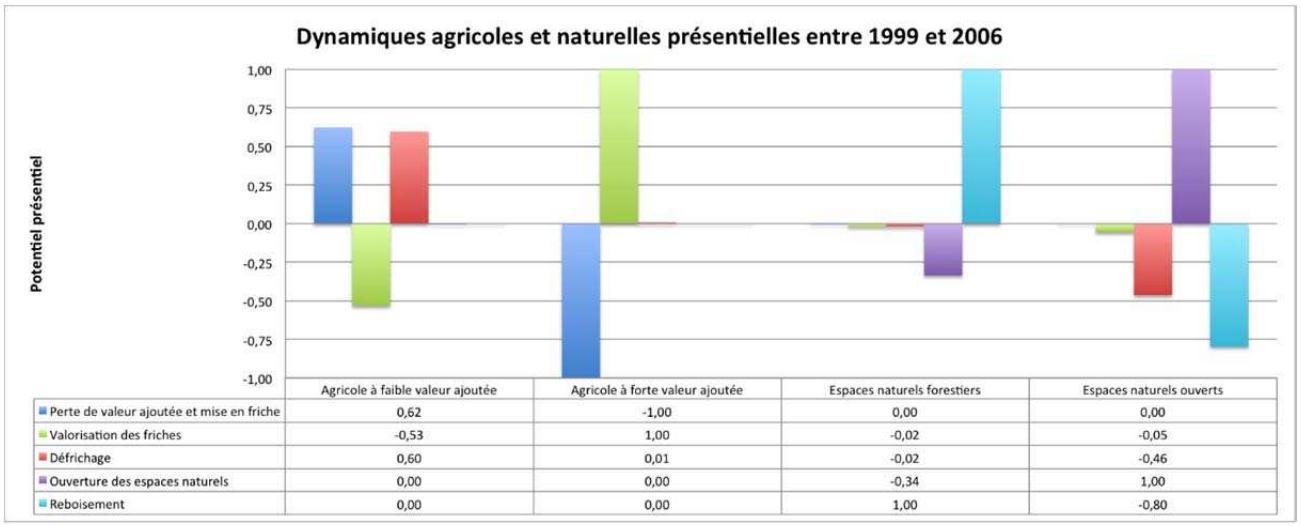
Les résultats obtenus par cette suite de traitements confirment les tendances identifiées au niveau de l'occupation du sol dominante. On observe en effet au travers du graphique suivant (figure 22) des profils liés à des dynamiques de croissance urbaine. La classe bleue expose un gain général de l'urbain non résidentiel sur des espaces agricoles et des milieux naturels. Le même profil se retrouve pour l'urbain discontinu et pour l'urbain diffus (avec néanmoins une infime augmentation de la présence d'espaces naturels ouverts). Il apparaît important de noter qu'il ne s'agit que de valeurs moyennes au sein de chaque classe créée expliquant qu'un cumul des valeurs pour chaque classe n'est pas forcément égal à 0.



	Urbain non-résidentiel	Urbain discontinu	Urbain diffus	Agricole à faible valeur ajoutée	Agricole à forte valeur ajoutée	Espaces naturels forestiers	Espaces naturels ouverts
Progression urbaine non-résidentielle	1,00	0,01	-0,01	-0,13	-0,14	-0,08	-0,11
Périurbanisation	-0,01	0,00	1,00	0,01	-0,07	-0,06	0,03
Croissance urbaine	0,00	1,00	0,00	-0,14	-0,11	-0,03	-0,03

Fig. 21 - Classification des dynamiques urbaines présentielles entre 1999 et 2006

Les profils urbains présentés ici confortent les évolutions mises en évidence à travers l'analyse des occupations du sol dominantes. Les dynamiques liées aux espaces agricoles et naturels sont elles aussi semblables à celles mises en évidence par l'analyse en occupation du sol dominante (figure 22).



	Agricole à faible valeur ajoutée	Agricole à forte valeur ajoutée	Espaces naturels forestiers	Espaces naturels ouverts
Perte de valeur ajoutée et mise en friche	0,62	-1,00	0,00	0,00
Valorisation des friches	-0,53	1,00	-0,02	-0,05
Défrichage	0,60	0,01	-0,02	-0,46
Ouverture des espaces naturels	0,00	0,00	-0,34	1,00
Reboisement	0,00	0,00	1,00	-0,80

Fig. 22 - Classification des dynamiques agricoles et naturelles présentielles entre 1999 et 2006

On observe dans la classe bleue de ce second graphique une progression des espaces agricoles à faible valeur ajoutée sur les terres agricoles à forte valeur ajoutée : on peut d'ailleurs en déduire qu'il existe un phénomène de mise en friche (on retrouve les friches agricoles dans la typologie agriculture à faible valeur ajoutée) et de perte de valeur ajoutée au sein de l'espace d'étude. Il existe *a contrario* le phénomène inverse (classe verte) où l'agriculture à forte valeur ajoutée prend le pas sur des espaces à faible valeur ajoutée et dans de moindres mesures sur des espaces naturels ouverts. La classe rouge met en avant une mise en culture d'espaces naturels ouverts.

Le graphique montre, en outre, que l'agriculture à faible valeur ajoutée a une progression présentielle supérieure à celle de l'agriculture à forte valeur ajoutée. Cette tendance se traduit par une importante progression de l'agriculture à faible valeur ajoutée sur les espaces naturels ouverts

et l'agriculture à forte valeur ajoutée (classes bleue et rouge), alors qu'à l'inverse l'agriculture à forte valeur ajoutée progresse moins intensément sur l'agriculture à moindre valeur ajoutée (classe verte).

Au niveau des dynamiques internes aux milieux naturels, on observe un regain des milieux forestiers sur les espaces ouverts (classe cyan) mais aussi l'inverse (classe violette). Les espaces naturels ouverts gagnent en présence sur les espaces forestiers, mais peuvent à l'inverse faire l'objet d'un reboisement et/ou d'une valorisation agricole.

Les profils observés à partir de l'analyse des occupations du sol en présentiel montrent que l'analyse par les occupations dominantes traduit de manière pertinente les évolutions de l'occupation du sol, puisque l'on y retrouve les mêmes dynamiques.

4.3 Modélisation de l'évolution des occupations du sol dominantes entre 1999 et 2006

Comme annoncé dans la partie méthodologique, quatre couches d'information géographiques sont introduites dans SpaCelle : l'occupation du sol, les périmètres de protection des espaces naturels, le réseau des routes nationales et départementales et l'indice de pression urbaine potentielle normalisé par le voisinage. Ces quatre couches correspondent à treize états, dont les labels sont présentés dans le tableau 7.

AGF	Agriculture à forte valeur ajoutée
AGM	Agriculture à moindre valeur ajoutée
FOR	Espaces naturels forestiers
OUV	Espaces naturels ouverts
ACT	Zones d'activités urbaines non résidentielles
DEN	Urbain dense et continu
DIS	Urbain discontinu
DIF	Urbain diffus
MER	Mer
P	Périmètre de protection
R	Routes départementales
PF	Pression urbaine potentielle forte
PM	Pression urbaine potentielle moindre

Tab. 7 - Labellisation des différents états introduits dans Spacelle

Avant de procéder à des simulations prospectives, la construction et le calibrage du modèle s'effectuent par reconstruction de l'évolution observée entre 1999 et 2006. La modélisation de l'évolution 1999-2006 correspond au paramétrage de base permettant ensuite de tester l'effet de différents scénarios d'évolution future. Les couches d'information géographiques introduites dans SpaCelle sont donc relatives à 1999.

Pour formaliser les règles de transition, nous avons utilisé de manière combinée quatre des multiples fonctions proposées par SpaCelle (tableau 8). Pour les combinaisons de fonctions, le signe de la multiplication « * » correspond à la conjonction « et », alors que la conjonction « ou » se traduirait par la signe de l'addition « + ». Ainsi, la règle de transition « Nat>Ind=PV(Ind+Mix;2)*AV(Nat;3) » correspond à la phrase « une zone naturelle peut devenir une zone d'habitat individuel lorsque la présence d'habitat individuel ou mixte est forte dans un voisinage de 2 et lorsque la non-présence d'espaces naturels est forte dans un voisinage de 3 ». Les proportions de présence et de non-présence sont comparées avec la durée de vie de la cellule.

Fonction de proximité	
PV(Y;R)	proportion de présence de la population Y dans le voisinage de rayon R
AV(Y;R)	proportion de non-présence de Y dans le voisinage de rayon R
ZV(Y; R)	1 s'il n'existe aucun individu de Y dans le voisinage de rayon R, sinon 0
Fonction d'accessibilité	
AC(Y;R)	accessibilité aux états de Y selon un demi-effet à distance R

Tab. 8 - Fonctions d'interaction de la plateforme SpaCelle employées pour le modèle PLUMES

Alors qu'une fonction de type AV(Y ;R) renvoie à la proportion de non-présence de Y dans le rayon R, la fonction AV(Y;R;Min;Max) est de forme binaire, renvoyant à la valeur 1 si la proportion de non-présence de Y est dans l'intervalle [Min;Max] (sinon 0).

Les durées de vie des occupations du sol qui sont l'objet d'une règle de transition ont été définies à partir de leur propension à se maintenir entre 1999 et 2006. Ainsi, sur l'ensemble des espaces forestiers présents en 2006, 99.7% étaient déjà présents en 1999, 94.6% pour l'agriculture à forte valeur ajoutée, 93% pour l'agriculture à faible valeur ajoutée et 82.6% pour les espaces ouverts. À partir de cet ordonnancement général, les valeurs ont été plus précisément définies après la définition et le paramétrage des règles de transition, lors du calage du modèle, pour rapprocher les parts d'occupation du sol observées en 2006 de celles simulées pour cette même année. Les règles sont présentées dans le tableau 9 selon la syntaxe de modélisation de SpaCelle et vont à présent être explicitées et justifiées.

Durées de vie	Règles de transition
P>P=DI	AGM>DIF=ZV(P;0)*AC(R;3)*PV(DIF;1)*AV(AGM;4;0.2;1)*AV(AGM;4)
R>R=DI	AGM>DIS=ZV(P;0)*AC(R;1)*PV(DIS;2)*AV(AGM;4;0.1;1)*AV(AGM;4)
MER>MER=DI	AGF>DIF=ZV(P;0)*AC(R;3)*PV(DIF;1)*AV(AGF;4;0.1;1)*AV(AGF;4)
DEN>DEN=DI	AGF>DIS=ZV(P;0)*AC(R;1)*PV(DIS;2)*AV(AGF;4;0.1;1)*AV(AGF;4)
DIF>DIF=DI	FOR>DIF=ZV(P;0)*AC(R;3)*PV(DIF;1)*AV(FOR+OUV;4;0.3;1)*AV(FOR+OUV;4)
DIS>DIS=DI	FOR>DIS=ZV(P;0)*AC(R;1)*PV(DIS;2)*AV(FOR+OUV;4;0.1;1)*AV(FOR+OUV;4)
ACT>ACT=DI	OUV>DIF=ZV(P;0)*AC(R;3)*PV(DIF;1)*AV(FOR+OUV;4;0.3;1)*AV(FOR+OUV;4)
FOR>FOR=DA(20000,200)	OUV>DIS=ZV(P;0)*AC(R;1)*PV(DIS;2)*AV(FOR+OUV;4;0.1;1)*AV(FOR+OUV;4)
OUV>OUV=DA(8000,80)	AGM>AGF=ZV(PF;0)*PV(AGF;3)*AV(DIS+DIF;5)*PV(AGF;1)
AGF>AGF=DA(10000,100)	AGF>AGM=ZV(PF;0)*PV(AGM;3)*AV(AGF;5)
AGM>AGM=DA(8000,80)	OUV>AGF=ZV(PF;0)*PV(AGF;1)*AV(FOR+OUV;4)*PV(AGF;6)
PM>PM=DI	OUV>AGM=ZV(PF;0)*PV(AGM;1)*AV(FOR+OUV;4)*PV(AGM;6)
PF>PF=DI	FOR>AGF=ZV(PF;0)*PV(AGF;1)*AV(FOR+OUV;4)*PV(AGF;6;0.65;1)
	FOR>AGM=ZV(PF;0)*PV(AGM;1)*AV(FOR+OUV;4)*PV(AGM;6;0.65;1)

Tab. 9 - Paramétrage des durées de vie et des règles de transition pour le scénario d'évolution entre 1999 et 2006 (DI= durée de vie infinie ; DA= durée de vie aléatoire selon une espérance de vie et un écart-type)

Comme précédemment annoncé, ont été introduites dans le modèle les transitions vers l'urbain discontinu et diffus qui se réalisent à partir d'espaces agricoles (AGM>DIF ; AGM>DIS ; AGF>DIF et AGF>DIS) et d'espaces naturels (FOR>DIF ; FOR>DIS ; OUV>DIF et OUV>DIS). Ces différentes transitions vers l'urbain sont conditionnées par :

- l'absence d'un périmètre de protection au niveau de la cellule (ZV(P;0)) ;
- une fonction d'accessibilité aux routes nationales et départementales (AC(R;1) ou AC(R;3)) ;
- la proportion de bâti (diffus ou discontinu) dans un voisinage contigu (PV(DIF;1) ou très proche (PV(DIS;2)) ;
- la proportion de non-présence d'espaces agricoles (à forte ou moindre valeur ajoutée) (AV(AGF/AGM;4)) lorsque celle-ci représente 10, 20 ou 30% (selon les types de transition) à 100% du voisinage à 4 cellules (800m) (AV(AGF/AGM;4;0.1;1)).

Le choix de ces déterminants et de leur paramétrage différencié selon les sous-catégories d'espaces agricoles, naturels et urbains, résulte d'analyses de proximité spécifiques à chaque déterminant. L'analyse des transitions vers l'urbain entre 1999 et 2006 montre que celles-ci sont presque nulles à l'intérieur des périmètres de protection des espaces naturels, témoignant d'une efficacité de ces périmètres à notre échelle d'analyse. Sur les 614 cellules devenant de l'urbain entre 1999 et 2006,

seules 10 cellules sont situées dans les périmètres de protection, alors que ces derniers couvrent près de 10% de l'espace d'étude.

L'analyse de la localisation des transitions vers l'urbain en fonction de la distance aux routes départementales montre que leur effectif se concentre aux abords des routes. La fonction d'accessibilité utilisée dans SpaCelle pour modéliser cette relation est une fonction décroissante prenant la valeur 0.5 pour la distance que l'on indique en argument. D'après le graphique présenté en figure 23, nous avons fixé ce seuil à 1 pour les transitions vers l'urbain discontinu et à 3 pour les transitions vers l'urbain diffus, qui présentent une pente plus douce.

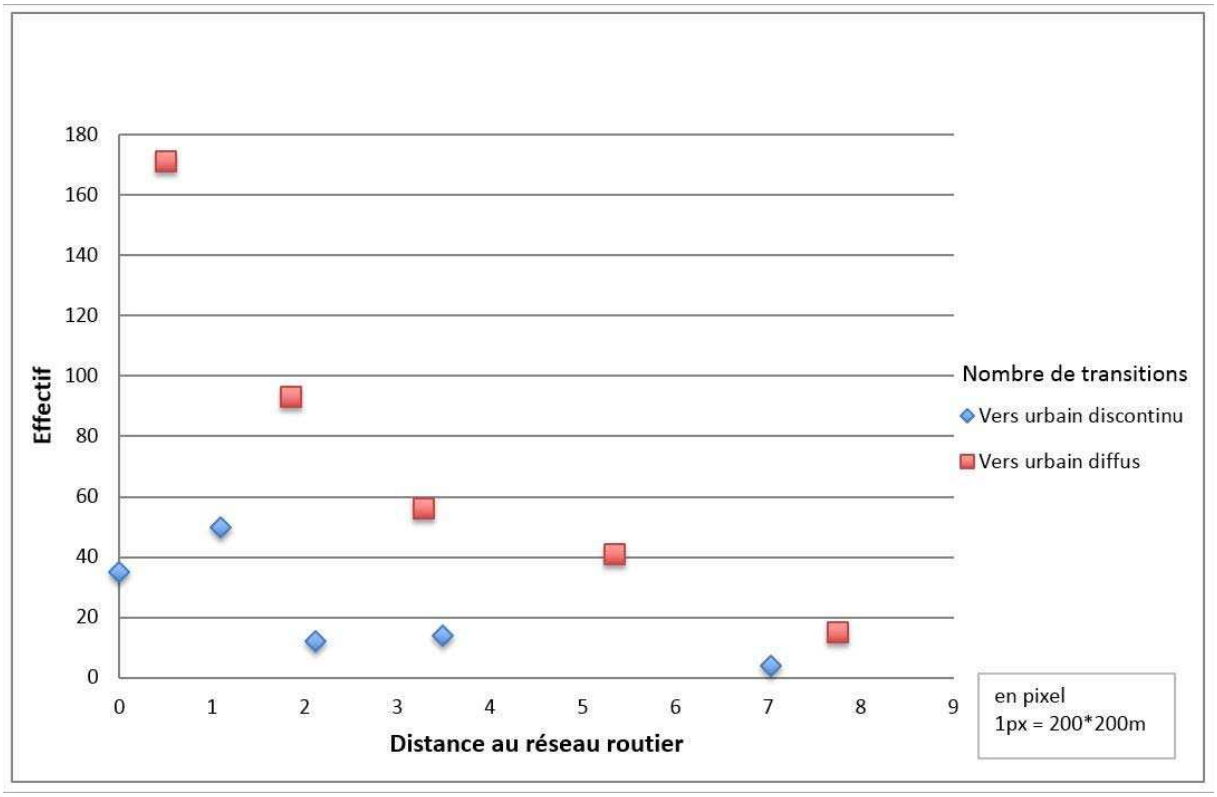


Fig. 23 - Distance au réseau routier des transitions vers l'urbain discontinu et vers l'urbain diffus

Cette démarche d'analyse des changements en fonction des distances (figure 24) est basée sur une classification du raster de la distance au réseau routier (pour les cellules ayant connu une transition), ce qui explique que toutes les valeurs de distance ne sont pas forcément renseignées dans le graphique précédent.

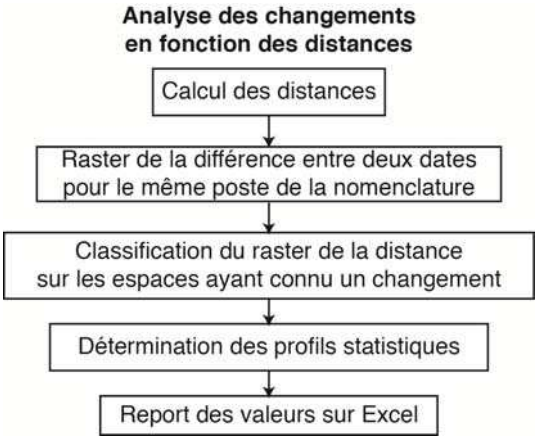


Fig. 24 - Démarche d'analyse des changements en fonction des distances

Le même type d'analyse a été mené afin de mettre en évidence la localisation des transitions vers l'urbain discontinu et diffus en fonction de la distance aux espaces urbains. Les résultats de cette analyse (figure 25) montrent l'importance de la contiguïté, puisque près de 89% des nouvelles zones d'urbain diffus sont à une distance de 200m d'une cellule urbain diffus, et 86% des nouvelles zones d'urbain discontinu sont à une distance de 400m d'un pixel urbain discontinu. Dans le critère de transition relatif à la distance aux espaces urbains, nous avons ainsi fixé un voisinage de 1 cellule pour le diffus et de 2 cellules pour le discontinu. Nous avons pris en compte de manière séparée les deux types d'urbain (localisation des transitions vers l'urbain diffus par rapport aux espaces urbains diffus de 1999, et localisation des transitions vers l'urbain discontinu par rapport aux espaces urbains de 1999), car des analyses préalables ont montré que les relations spatiales sont moins marquées lorsque l'on étudie les transitions vers l'urbain diffus par rapport à leur distance aux espaces urbains discontinus de 1999, et les transitions vers l'urbain discontinu par rapport à leur distance aux espaces urbains diffus de 1999.

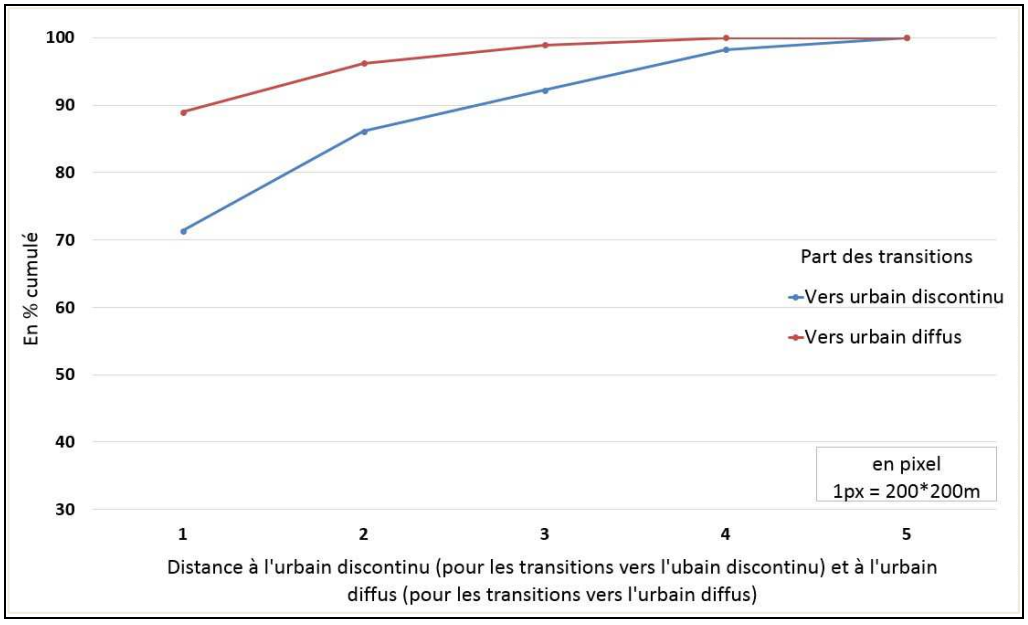


Fig. 25 - Distance à l'urbain diffus des transitions vers l'urbain diffus et distance à l'urbain discontinu des transitions vers l'urbain discontinu

Enfin, concernant la non-présence d'espaces agricoles (à forte ou moindre valeur ajoutée) pour les transitions des espaces agricoles vers l'urbain, et la non-présence d'espaces naturels (forestiers ou ouverts) pour les transitions des espaces naturels vers l'urbain, les analyses réalisées pour le paramétrage du modèle sont légèrement différentes (figure 26). Elles ont consisté à déterminer la proportion d'espaces agricoles ou naturels dans le voisinage des cellules ayant connu une transition vers l'urbain. Il s'agit en fait d'une analyse de densité à l'intérieur de plusieurs buffers dont les seuils de distance sont préalablement définis (de deux en deux jusqu'à une distance de 10 cellules puis de cinq en cinq).

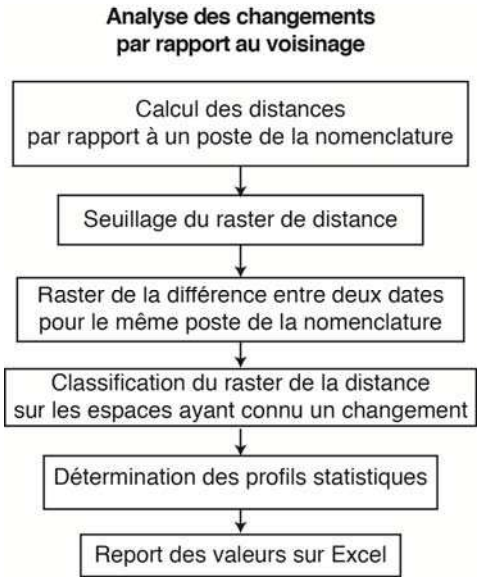


Fig. 26 - Démarche d'analyse des changements par rapport au voisinage

Les résultats (figure 27) montrent par exemple que le voisinage contigu (buffer de 0 à 2 cellules) aux cellules passant de l'agricole vers l'urbain entre 1999 et 2006, rassemble moins de 50 % de surfaces agricoles.

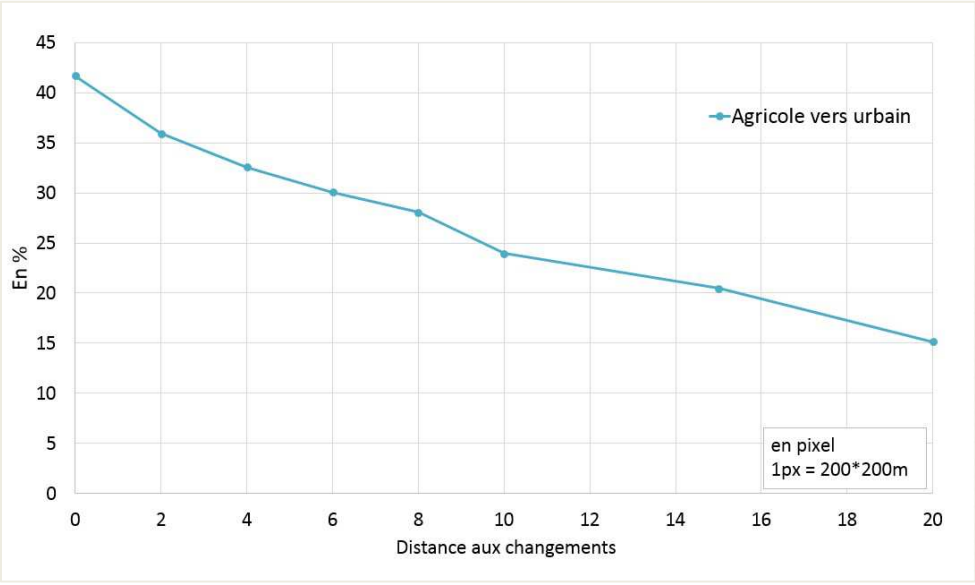


Fig. 27 - Proportion de voisinage agricole en fonction de la distance aux transitions de l'agriculture à l'urbain indifférencié

Etant donné qu'il s'agit d'une moyenne au sein de l'ensemble des surfaces des buffers 0 à 2 cellules, cette analyse peut cacher une certaine variabilité de l'environnement agricole des cellules étant passées de l'agricole à l'urbain. Néanmoins, la carte des transitions de l'agriculture vers l'urbain entre 1999 et 2006 (figure 28) confirme que cette tendance à la contiguïté avec les espaces urbains est généralisée.

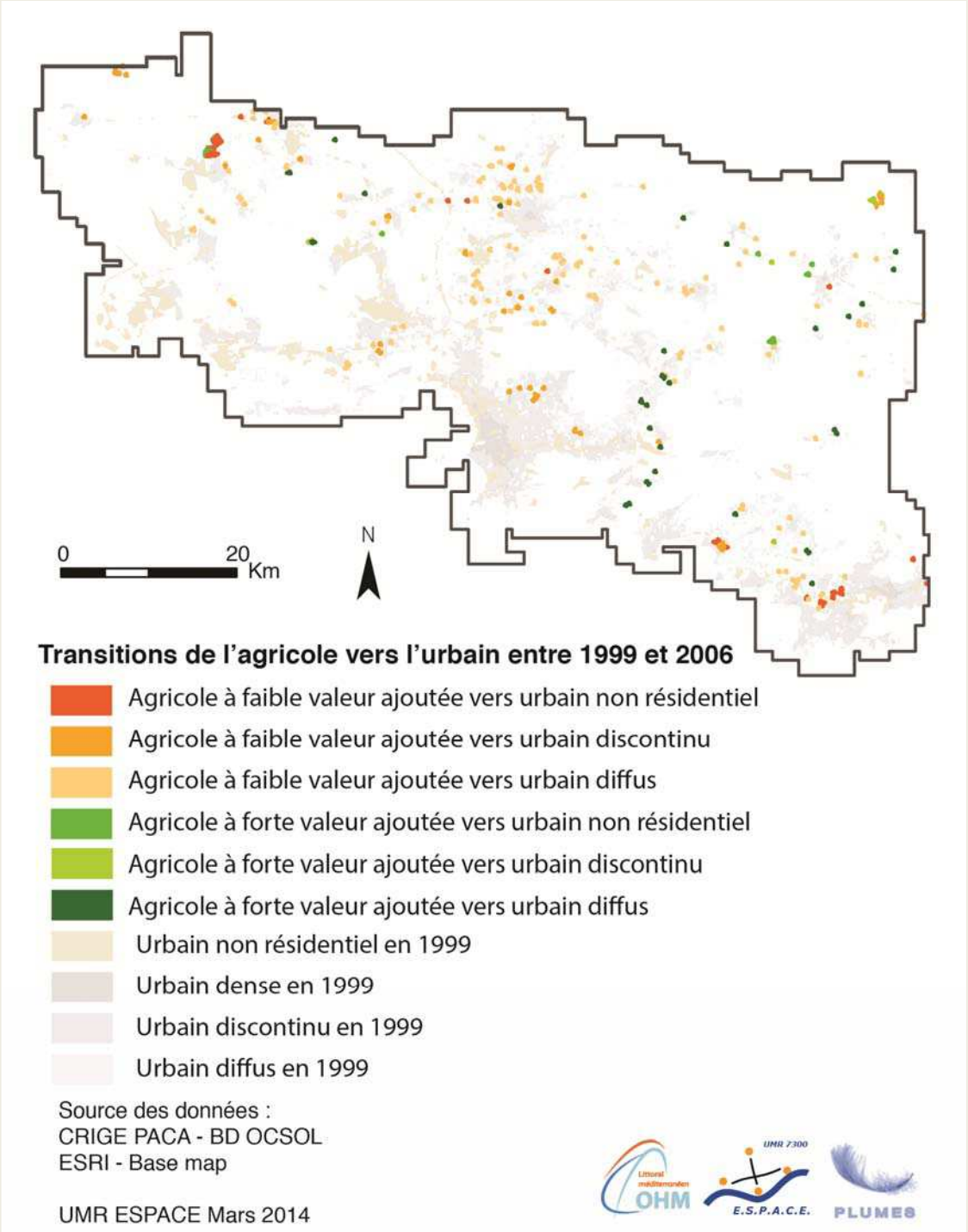


Fig. 28 - Carte des transitions de l'agriculture vers l'urbain entre 1999 et 2006

Nous utilisons de manière comparative les valeurs des différents sous-types de transition pour fixer les seuils minimaux de non-présence des espaces agricoles et des espaces naturels dans les règles

de l'automate cellulaire. Nous observons par exemple (figure 29) que les cellules passées d'espace naturel à espace urbain discontinu entre 1999 et 2006 ont une proportion de voisinage naturel plus faible que les cellules passées d'espace naturel à urbain diffus (42 contre 54% dans le buffer allant de 0 à 4 cellules). On en déduit que la présence d'espaces naturels dans le voisinage est plus contraignante pour les transitions vers l'urbain discontinu (d'où un seuil minimal de non-présence de 10% pour l'urbain discontinu et de 30% pour l'urbain diffus, pour que la transition puisse se réaliser). La définition des valeurs précises de ces seuils a également contribué au calage du modèle.

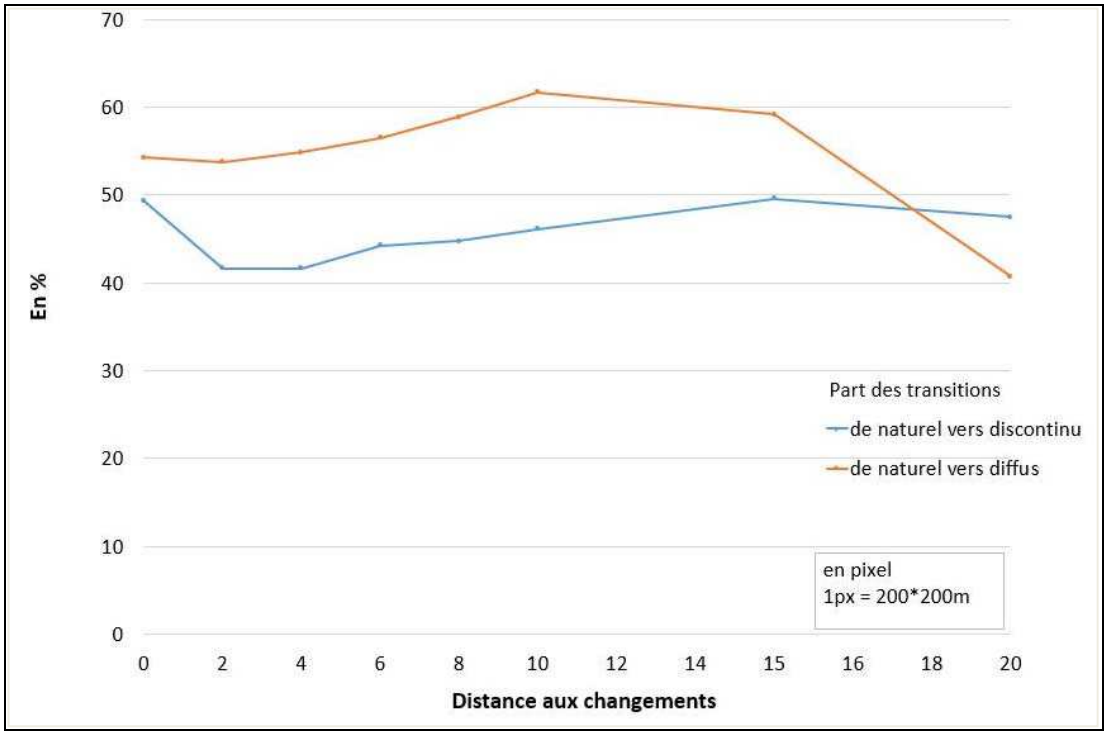


Fig. 29 - Proportion de voisinage naturel en fonction de la distance aux transitions du naturel à l'urbain discontinu et diffus

Les transitions des espaces agricoles à moindre valeur ajoutée vers les espaces agricoles à forte valeur ajoutée (AGM>AGF) sont déterminées en fonction de :

- l'absence de pression urbaine potentielle forte (indice normalisé par le voisinage) au niveau de la cellule (ZV(PF;0)) (la pression urbaine potentielle faible prise en compte est comprise entre 0 et 1,25) ;
- la proportion d'espaces agricoles à forte valeur ajoutée en contiguïté (PV(AGF;1)) et dans une voisinage de 3 cellules (600m) (PV(AGF;3)) ;
- la proportion de non-présence d'espaces urbains discontinus et diffus dans un voisinage de 5 cellules (1000m) (AV(DIS+DIF;5)).

Les transitions des espaces agricoles à forte valeur ajoutée vers les espaces agricoles à moindre valeur ajoutée (AGF>AGM) sont conditionnées par :

- l'absence de pression urbaine potentielle forte (indice normalisé par le voisinage) au niveau de la cellule (ZV(PF;0)) ;

- la proportion d'espaces agricoles à moindre valeur ajoutée dans un voisinage de 3 cellules (600m) (PV(AGM;3)) ;
- la proportion de non-présence d'espaces agricoles à forte valeur ajoutée dans un voisinage de 5 cellules (1000m) (AV(AGF;5)).

Sans rentrer dans le détail de la justification des différents paramètres de ces deux précédents types de transition, la figure 30 montre comment les cellules concernées par les transitions AGM>AGF et AGF>AGM se concentrent autour de Saint-Maximin et de Bandol. On observe notamment des transitions vers l'agriculture à moindre valeur ajoutée au niveau de Saint-Maximin et des transitions vers l'agriculture à plus forte valeur ajoutée au niveau du périmètre de l'AOC de Bandol.

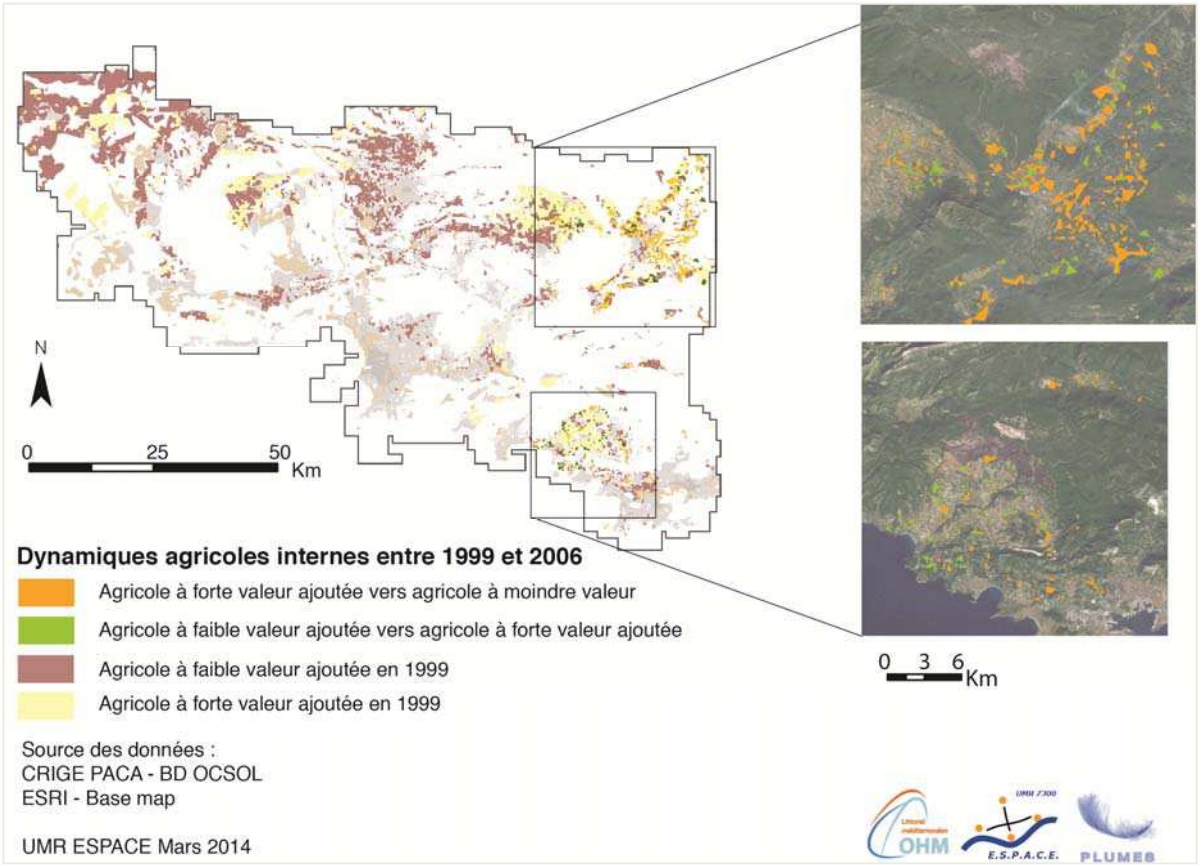


Fig. 30 - Carte des dynamiques internes à l'agriculture entre 1999 et 2006

Enfin, les transitions des espaces naturels (ouverts et forestiers) vers les espaces agricoles à forte et moindre valeur ajoutée (OUV>AGF ; OUV>AGM ; FOR>AGF ; FOR>AGM), sont conditionnées par :

- l'absence de pression urbaine potentielle forte (indice normalisé par le voisinage) au niveau de la cellule (ZV(PF;0)) ;
- la proportion d'espaces agricoles (à faible ou forte valeur ajoutée selon les cas) en contiguïté (PV(AGM/AGF;1) ;
- pour les espaces ouverts, la proportion d'espaces agricoles (à faible ou forte valeur ajoutée selon les cas) dans un voisinage de 6 cellules (1200m) (PV(AGF/AGM;6)), tandis que pour les espaces forestiers, bien plus nombreux, nous avons fixé que cette présence devait être comprise entre 65 et 100% du voisinage à 6 cellules de distance ;

- la proportion de non-présence d'espaces naturels dans un voisinage de 4 cellules (800m).

Résultats de la simulation 1999-2006

Afin de valider le modèle, nous étudions les effectifs des transitions et leur localisation en comparant les résultats d'une première simulation avec la situation observée en 2006. Les parts d'occupation du sol observées et simulées sont extrêmement proches (tableau 10) mais leurs faibles valeurs ne permettent pas d'évaluer précisément la validité du modèle.

	Urbain non résidentiel	Urbain continu	Urbain discontinu	Bâti diffus	Agr. moindre valeur	Agr. forte valeur	Forêt	Milieux ouverts
Part d'occupation du sol observée en 2006	2,550	0,351	4,398	2,945	6,094	2,926	27,945	2,330
Part d'occupation du sol simulée pour 2006	2,519	0,351	4,410	2,949	6,147	2,935	28,246	1,983

Tab. 10 - Comparaison des parts d'occupation du sol constatées en 2006 et simulées

Ainsi, afin de mieux percevoir les écarts entre le modèle et la réalité, nous avons décidé de nous référer directement au nombre de transition de chaque type. Les résultats (tableau 11) montrent que les effectifs des transitions de chaque type sont bien retranscrits par le modèle, et que les écarts sont faibles et généralement proportionnels à ces effectifs.

Transitions	Observées	Simulées	Ecarts
AGF>DIF	34	41	7
AGF>DIS	14	19	5
FOR>DIF	165	153	-12
FOR>DIS	28	41	13
OUV>DIF	8	11	3
OUV>DIS	8	4	-4
AGM>DIF	159	160	1
AGM>DIS	59	53	-6
AGF>AGM	719	715	-4
AGM>AGF	254	229	-25
OUV>AGM	21	20	-1
OUV>AGF	15	39	24
FOR>AGM	62	59	-3

Tab. 11 - Nombre de transitions observées et simulées entre 1999 et 2006

La comparaison de la figure 31 avec la carte des dynamiques spatiales globales entre 1999 et 2006 (figure 20) montre que la localisation des changements vers l'urbain est particulièrement bien retranscrite par le modèle. La localisation des transitions des espaces naturels vers les espaces agricoles diffère cependant légèrement par rapport à la réalité. Il faudrait en effet introduire deux règles d'implantation différentes pour traduire les deux logiques de mise en agriculture : ces changements apparaissent de façon morcelée à l'est de la zone d'étude, autour de Bandol et de

Saint-Maximin, et aussi de manière concentrée au niveau de la commune de Trets et de Pélissanne. La simulation fait apparaître ces transitions au niveau de la commune de Trets mais de manière morcelée, ainsi qu'à l'ouest (communes de Saint-Martin-de-Crau et d'Istres). Il semble ainsi qu'il aurait fallu prendre en compte l'hétérogénéité de l'espace dans les règles du modèle et éventuellement limiter l'apparition de ces transitions aux plus faibles valeurs de l'indice de pression potentielle normalisé (intervalle [0 ; 1] à la place de [0 ; 1.25]).

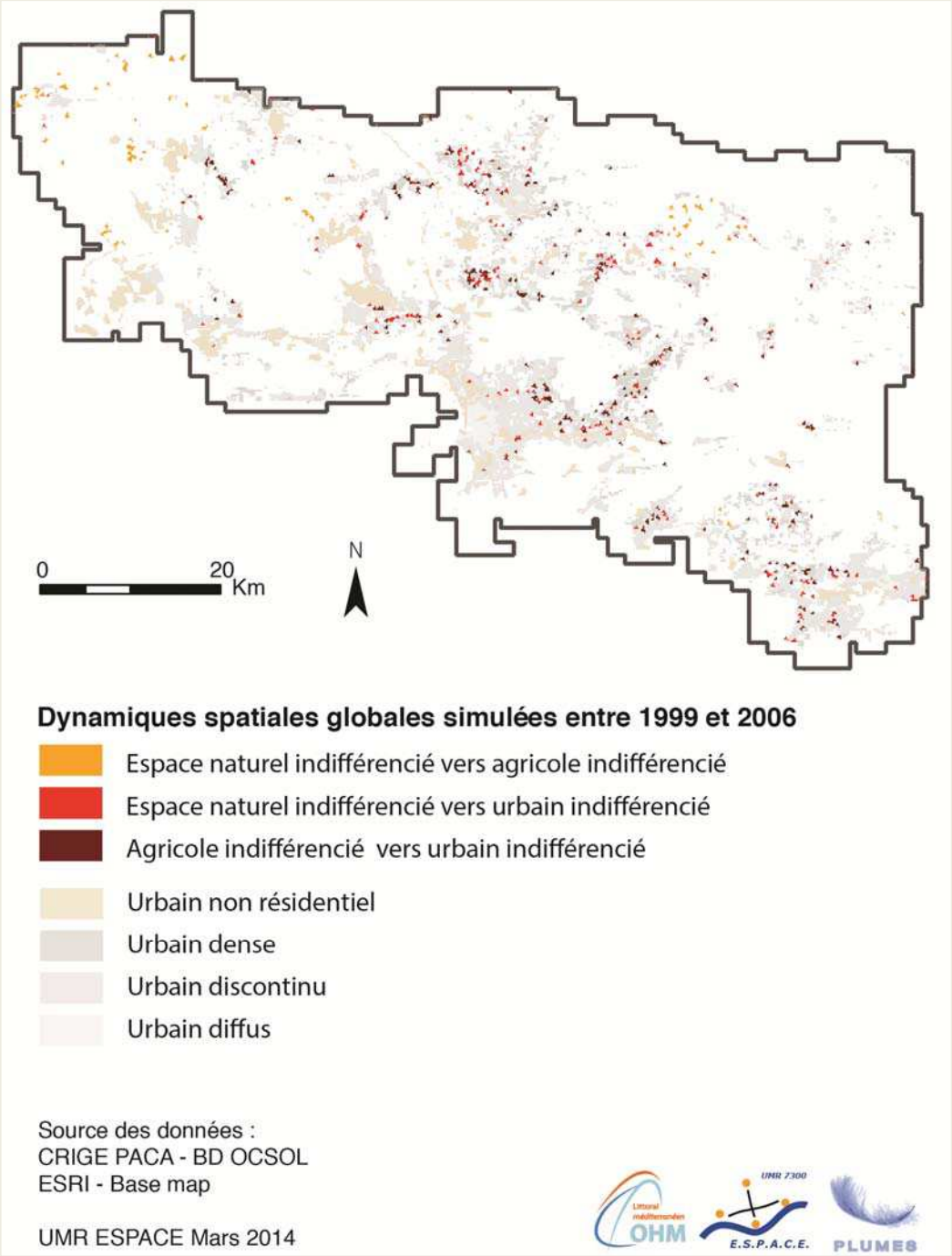


Fig. 31 - Carte des dynamiques spatiales globales simulées entre 1999 et 2006

La phase de validation du modèle se poursuit. Une fois le modèle entièrement validé, différents scénarios prospectifs pourront être testés et comparés. Ce travail est l'objet du mémoire

actuellement en cours de Romain Séry, étudiant de Master 1 en Géographie (Master GEOPRAD) à l'Université de Nice Sophia Antipolis et stagiaire pour le projet PLUMES. Les résultats des simulations et leurs enseignements seront présentés dans son mémoire.

4.4 Détection de la pression urbaine au regard des attributs paysagers dans les deux sous-ensembles littoraux et premières analyses prospectives

L'analyse des attributs paysagers a porté sur les 25 parcelles ayant été artificialisées entre 1999 et 2006. Cette analyse a permis de déterminer le poids respectif des différentes modalités paysagères pour chacune des 6 variables retenues et présentées dans le tableau 4. La figure 32 reproduit les résultats de cette analyse.

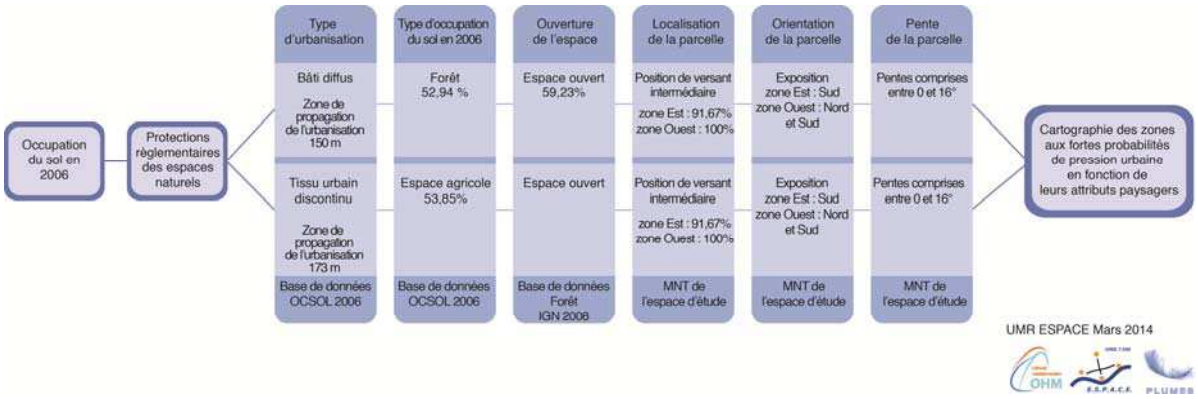


Fig. 32 – Schéma du protocole de détection des zones de pression urbaine et quantification des modalités paysagères.

Les zones à enjeu pour l'urbanisation future, période de référence 2006 – 2009, sont détectées en sélectionnant les zones de pression potentielle à partir de l'occupation du sol de 2006, qui feront ensuite l'objet d'un ciblage selon l'enchaînement prédéfini des variables paysagères influençant le choix de localisation résidentielle exposé sur la figure 32. Les espaces détectés seront comparés avec ceux ayant été réellement artificialisés entre 2006 et 2009, tels qu'ils ressortent de l'observation des photographies aériennes du département des Bouches-du-Rhône, en 2009.

La première étape consiste à déterminer les zones de propagation probable de l'urbanisation future, à l'aide de buffers de taille différente selon le type de bâti existant. Il ressort en effet des analyses de diffusion du bâti dans les deux zones d'étude, une légère différence entre la distance de propagation du tissu urbain discontinu, qui est en moyenne de 173 m, et celle du bâti diffus, qui est de 150 m. Cette différence s'explique par les plus grandes surfaces bâties dans le cas de l'urbanisation de type tissu urbain discontinu. Puis, dans ces auréoles autour du bâti, ne sont retenues que les surfaces hors protections naturelles.

La seconde étape consiste à appliquer, sur l'occupation du sol OCSOL 2006, le protocole de sélection « pas à pas » des zones dont l'urbanisation est la plus probable, en fonction de leurs attributs paysagers (Fig. 32). À chaque phase du protocole, les données issues de la phase précédente sont utilisées, induisant alors une réduction des zones possibles de pression urbaine future, à la manière d'un zoom avant.

- Type d'occupation du sol : les surfaces agricoles au sein des buffers de bâti discontinu (52,9% des zones urbanisées entre 1999 et 2006) et les surfaces naturelles autour du bâti diffus (53,8%), sont sélectionnées.
- L'ouverture de l'espace : les zones urbanisées concernent des espaces ouverts à 69,2%. Les espaces agricoles sont considérés comme ouverts ; s'y ajoutent, les espaces forestiers ouverts situés dans les surfaces naturelles autour du bâti, repérés à partir de la base de données Forêt de l'IGN.
- La position : sont extraites les zones en position de versant intermédiaire, qui ont représenté 96% des surfaces urbanisées entre 1999 et 2006.
- L'exposition : dans la zone littorale est, ne sont retenues que les parcelles exposées sud ; en revanche, dans la zone ouest, les parcelles d'exposition nord ayant vue sur l'étang de Berre sont retenues ainsi que celles exposées sud, toujours très prisées.
- La pente : les parcelles ayant une pente comprise entre 0 et 16 degrés sont retenues. De nombreux changements d'occupation du sol ont concerné des parcelles à forte pente, notamment quand le changement s'opérait vers du bâti diffus (58,3% des parcelles).

Détection des zones d'urbanisation potentielle de type habitat groupé

L'application du protocole de détermination des zones de pression de l'urbanisation sur les espaces agricoles a fait émerger un total de 656,51 ha d'espaces détenant des caractéristiques paysagères pouvant favoriser le processus d'urbanisation. Comme le révèlent les figures 33 et 34, elles sont plus nombreuses dans la zone ouest.

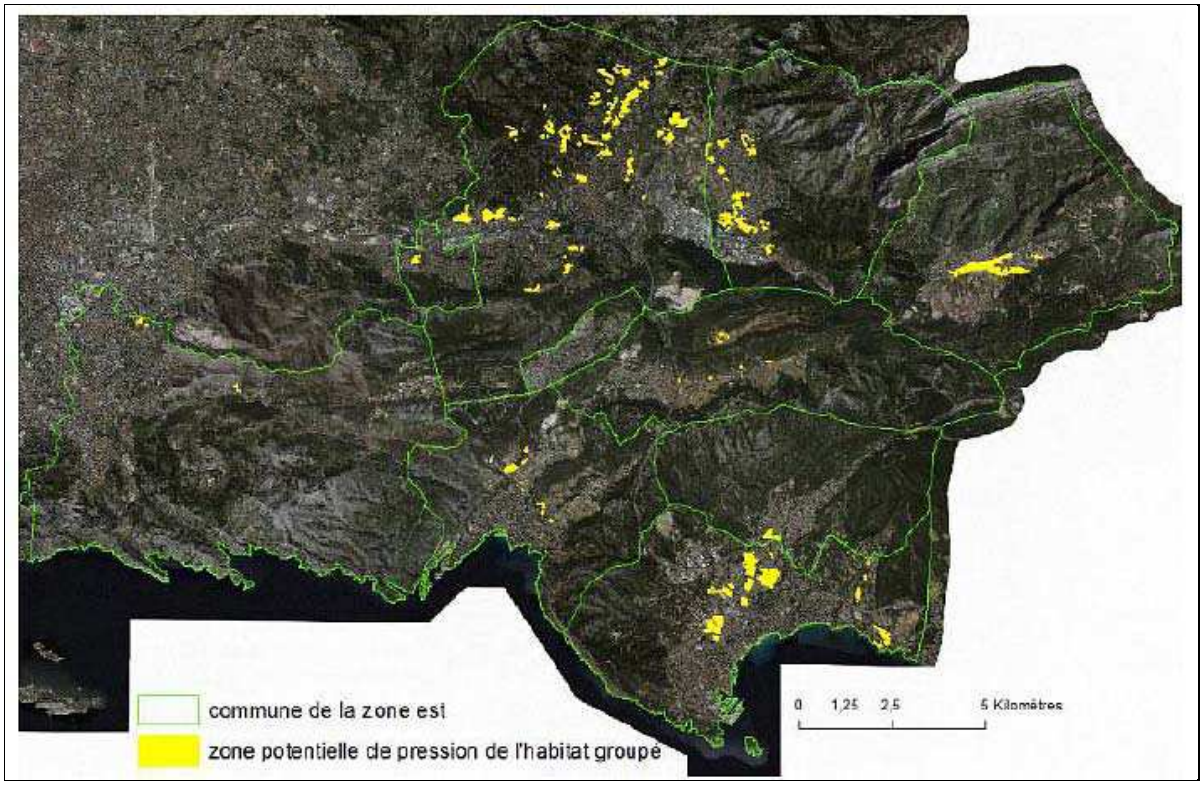


Fig. 33 – Zones à forte probabilité de pression d'urbanisation de type habitat groupé en zone est

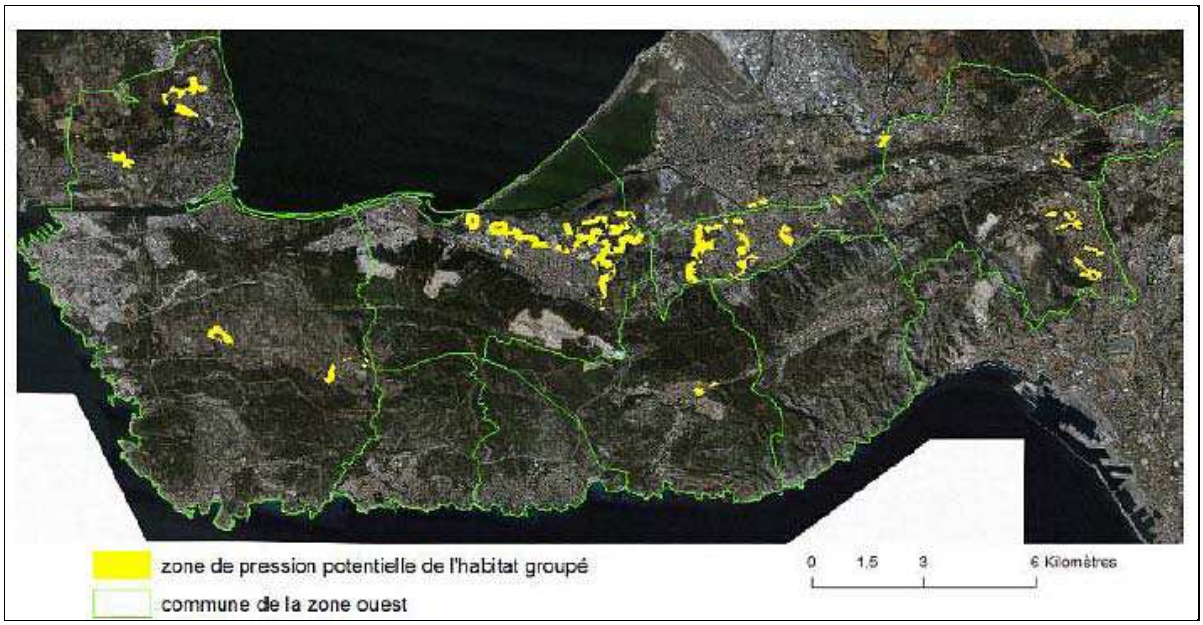


Fig. 34 – Zones à forte probabilité de pression d'urbanisation de type habitat groupé en zone ouest

La cartographie des zones de pression de l'habitat groupé n'est pas homogène dans l'espace. Les communes ayant les plus grandes surfaces à forte probabilité de pression de l'habitat groupé sont Aubagne, La Ciotat, Châteauneuf-les-Martigues et Gignac-la-Nerthe car leurs surfaces agricoles sont importantes, à la différence de Carnoux-en-Provence, Carry-le-Rouet, Sausset, Le Rove.
En effet, la majorité des zones à fort risque de pression de l'habitat groupé se localise sur les espaces agricoles à proximité des zones de bâti discontinu, et même au cœur des agglomérations urbaines, comme à la Ciotat (Fig. 35).

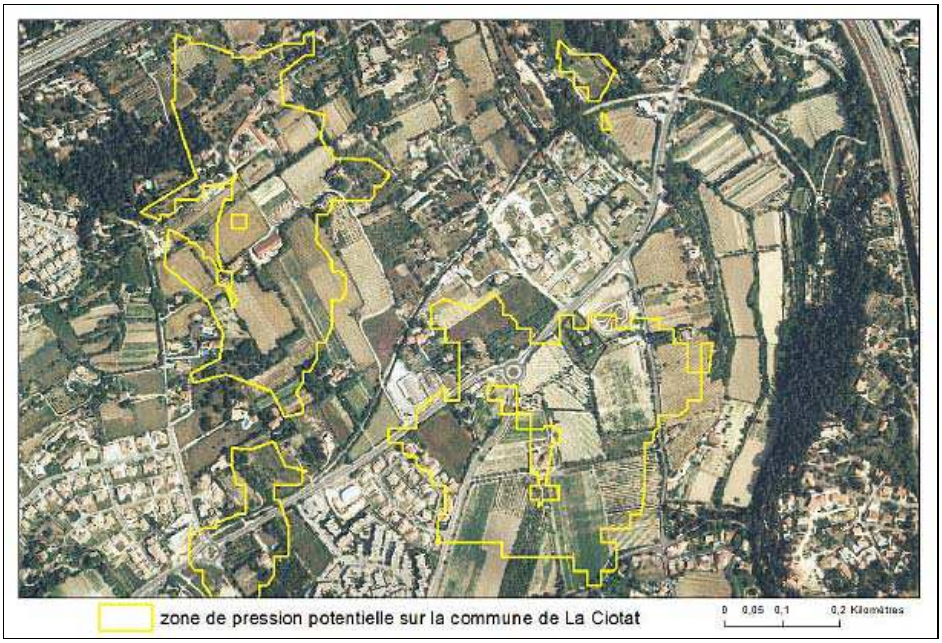


Fig. 35 – Forte pression de l'habitat groupé sur l'agriculture périurbaine : l'exemple de La Ciotat

La commune d'Aubagne présente un fort risque de diffusion de l'habitat groupé sur les collines surplombant le centre urbain, du fait du développement périurbain, de la position dominante et de l'exposition sud (Fig. 36).

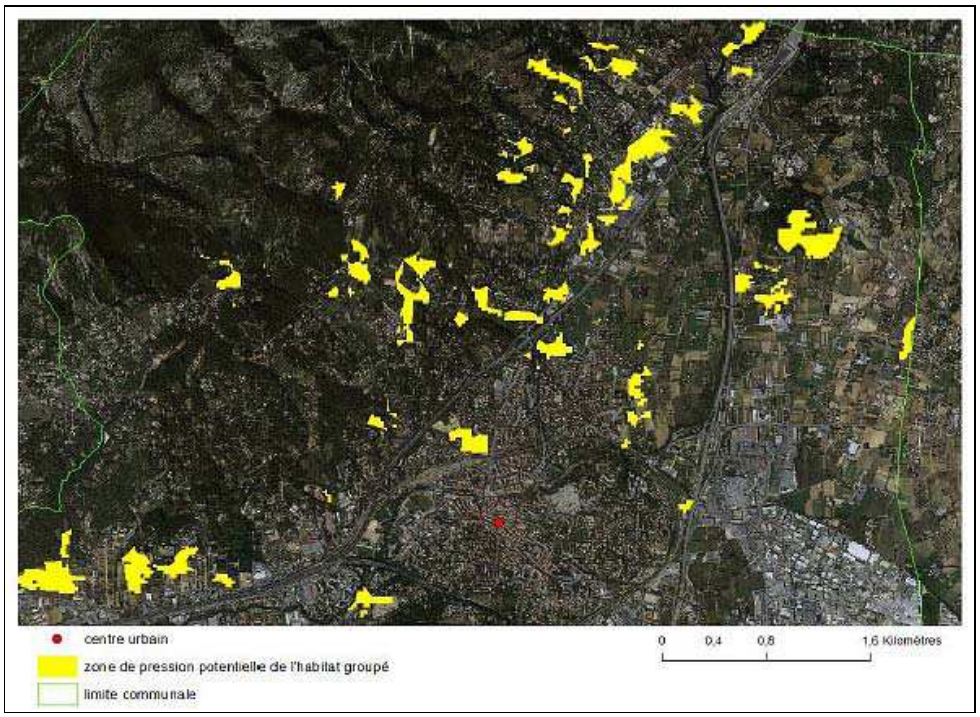


Fig. 36 – Fort risque de diffusion de l'habitat groupé sur la commune d'Aubagne

Détection des zones d'urbanisation potentielle de type habitat diffus

Ce type d'habitat génère une urbanisation potentielle de moins grande emprise spatiale que celle de l'habitat groupé. L'application du protocole a détecté 118,68 ha dont 75% se localisent dans la zone ouest (Fig. 37).

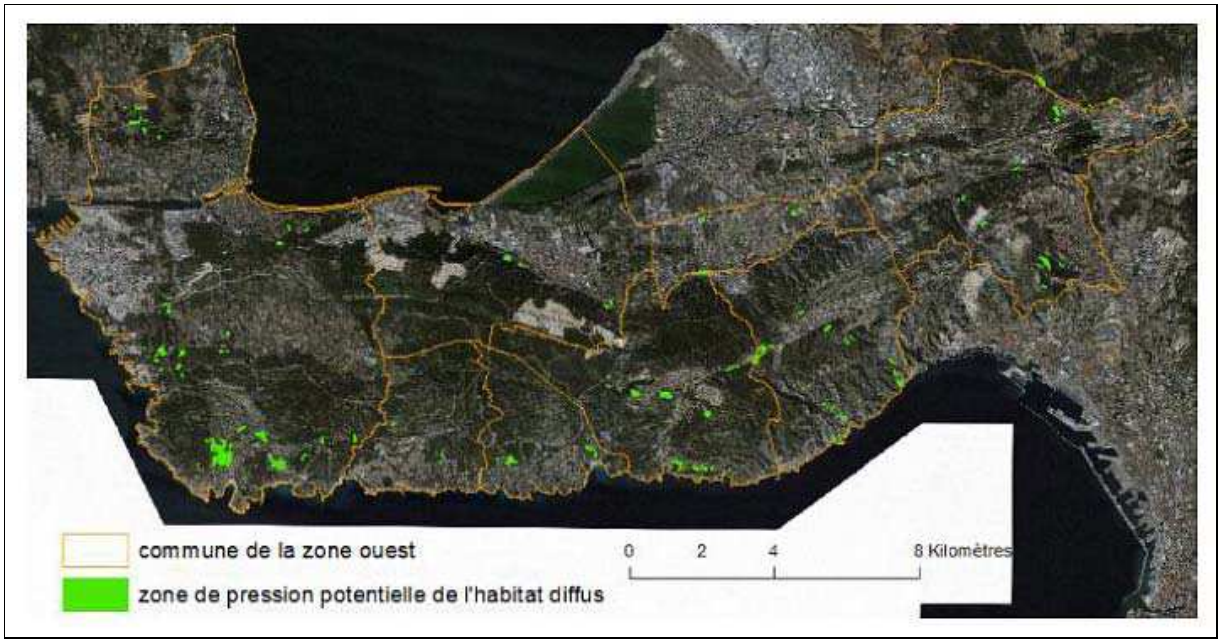


Fig. 37 – Zones à forte probabilité de pression d'urbanisation de type habitat diffus : zone ouest

La zone est ne présente que 5 communes sur 10 concernées par ce type de pression sur les espaces naturels : Aubagne, Cuges-les-Pins, Roquefort-la-Bedoule, Ceyreste et Cassis (Fig. 38). De plus, les plus fortes potentialités se concentrent dans la commune d'Aubagne, sur les collines qui présentent déjà un fort potentiel de pression urbaine de l'habitat groupé. Dans les autres communes, les zones de pression potentielle se localisent préférentiellement en périphérie des espaces d'extension urbaine, se développant dans les vallons où se mêlent les espaces agricoles et naturels, notamment dans la commune de Ceyreste (Fig. 39).

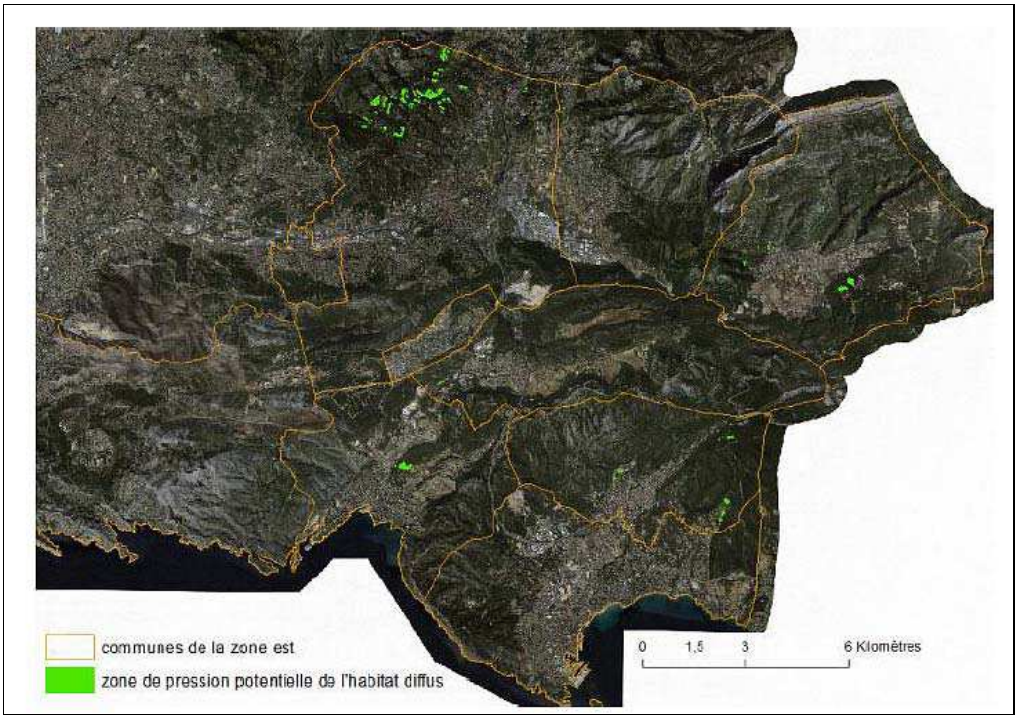


Fig. 38– Zones à forte probabilité de pression d'urbanisation de type habitat diffus : zone est

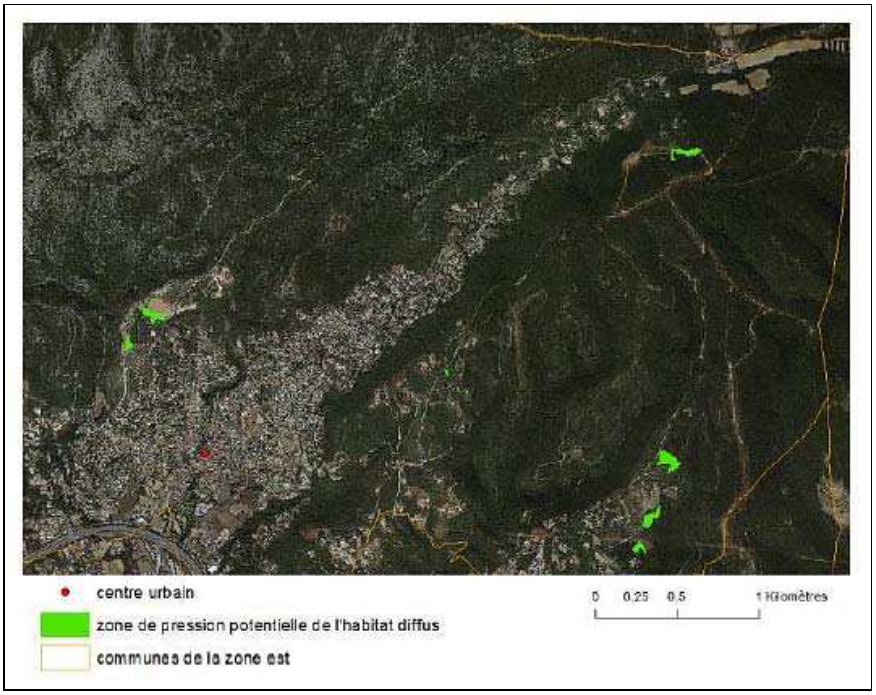


Fig. 39 – Mise sous pression des vallons naturels et agricoles de la commune de Ceyreste

La dynamique de pression urbaine potentielle est différente dans les deux zones. À l'ouest, toutes les communes font l'objet de pression potentielle en lien avec leurs attributs paysagers. La commune de Martigues détient les plus fortes probabilités de pression urbaine, notamment concentrées sur le littoral. Ce fait est à rapprocher des forts indices de pression urbaine calculés en 1999 et 2006 (section 4.1). Toutefois, il faut préciser que ces grandes surfaces de pression potentielle sont exposées au nord et n'ont pas toutes une vue sur mer. Les littoraux de cette zone ont assez peu de surfaces à risque de pression du bâti diffus, alors que l'on aurait pu penser que leurs caractéristiques paysagères, tout particulièrement les variables de position, d'occupation du sol et d'exposition, les valoriseraient. Toutefois, les communes d'Ensues-la-Redonne et du Rove (Fig. 40) détiennent des surfaces attractives du fait de leurs aménités paysagères.



Fig. 40 – Le Rove : Zones de pression potentielle

Premières validations des résultats

La photographie aérienne de l'occupation du sol en 2009 est utilisée pour vérifier la concordance entre les zones de diffusion de l'habitat observées et estimées par le protocole.

Premier constat, la base de données OCSOL 1999 comporte des erreurs. En effet, certaines zones ont été détectées comme étant des espaces de pression urbaine potentielle alors qu'elles détenaient déjà un habitat de type groupé ou diffus. Ce biais a été mis en évidence, notamment, dans les communes d'Aubagne et de Cuges-les-Pins, comme l'illustre la figure 41. Le périmètre en jaune délimite une zone de pression potentielle future issue du protocole alors même que ce secteur était déjà urbanisé sur la photographie aérienne de 1999.

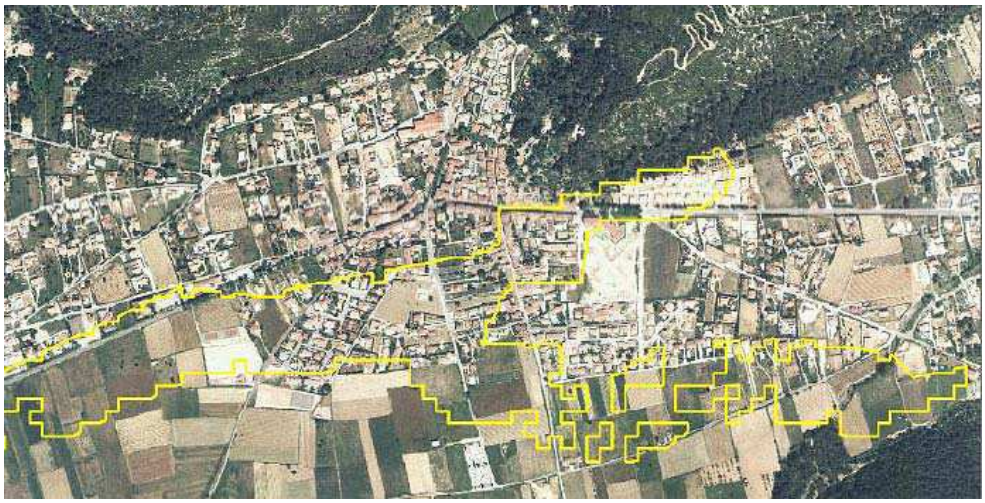


Fig. 41 – Détection erronée du fait des erreurs contenues dans la base OCSOL 1999 (Cuges-les-Pins)

Par ailleurs, le protocole a détecté certains espaces comme potentiellement urbanisables du fait de leurs attributs paysagers alors que les règlements d'urbanisme communaux interdisent leur constructibilité. Au stade actuel de l'étude, les zonages et règlements des PLU n'ont pas été pris en compte. L'obtention de ces documents, pour les communes de la communauté urbaine Marseille Provence Métropole, n'est possible que sur demande de zones spécifiques et non sur l'ensemble de la surface communale.

Cependant, ce protocole de détection, réalisé indépendamment des documents d'urbanisme, garde tout son intérêt, d'une part, en raison des possibilités toujours existantes de dérogations, et d'autre part, parce que la détection des espaces de pression potentielle met en évidence l'utilité des protections retenues dans les PLU. La commune d'Ensuès-la-Redonne en est un parfait exemple (Fig. 42).

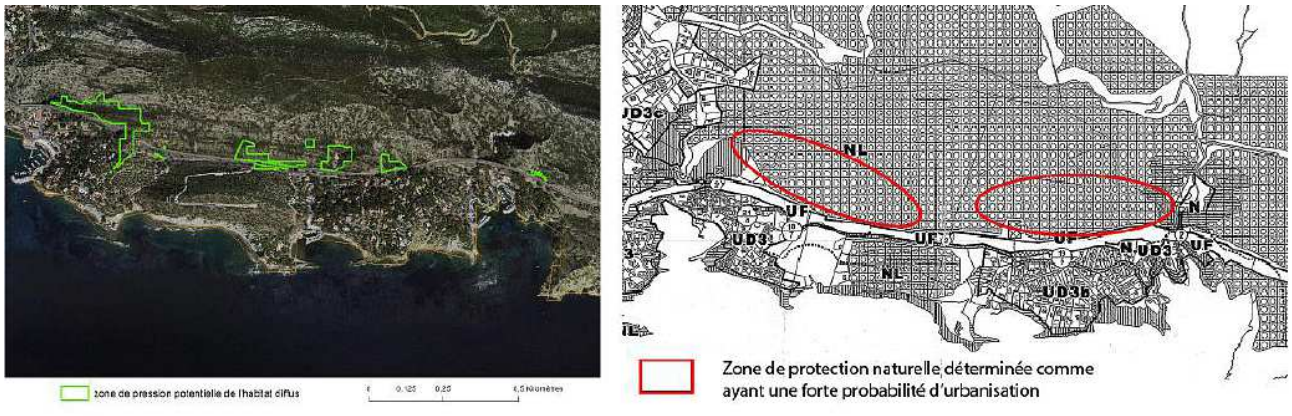


Fig. 42 – Détection de zones de pression potentielle qui font l'objet d'une protection à l'échelle communale : l'exemple d'Ensuès-la-Redonne.

5. Discussion et conclusion

Ce rapport présente l'état d'avancement d'une recherche conduite entre mars 2013 et mars 2014.

Le parti retenu a été de mener conjointement les trois grands volets de l'étude, afin que leurs résultats respectifs soient inter-reliés et suscitent de nouveaux développements.

Bien que non encore achevée, cette recherche innove à plus d'un titre :

- Par la visée prospective de la recherche axée sur la compréhension des processus de la pression urbaine littorale ;
- Par la démarche à la fois multiscalaire, intégrée et spatiale avec laquelle la pression urbaine littorale est traitée ;
- Par la reproductibilité des différents protocoles élaborés :
- Par la mise en place d'un maillage fin, 200 m x 200 m, qui permet de procéder à de l'analyse de données et des statistiques spatiales élaborées, ainsi que du traitement d'images, et qui autorise, par la robustesse de sa conception, des regroupements de mailles pour des analyses ultérieures ;
- Par la création d'un indice générique de pressions urbaines, défini *a priori* et non *a posteriori* qui peut être utilisé dans les modèles et les simulations à finalités prospectives.
- Par la conception d'un protocole de détection des zones de pression au regard de certains attributs paysagers, reflétant les aménités des lieux qui sont les plus prisés ;

Outre les avancées d'ordre méthodologique, les apports majeurs à la connaissance des structures et des dynamiques littorales se situent, à ce jour, principalement dans trois directions :

- La compréhension des processus de la pression urbaine qui jouent à différentes échelles, attestée par les premiers résultats probants du modèle gravitaire et de l'automate cellulaire, pour la dynamique de l'occupation du sol ;
- Les mécanismes de différenciations de la pression sur les littoraux. En travaillant à différentes échelles, il devient possible d'emboîter les résultats, d'observer la manière dont les différentes formes de pression se combinent en un même lieu. Émergent alors des espaces à enjeux, porteurs d'une charge composite de pression urbaine future. Ces lieux particuliers, qui ont été repérés sur les sous-ensembles littoraux ayant été analysés dans les trois volets, se situent notamment, dans les communes de Châteauneuf-les-Martigues, Martigues, Aubagne, La Ciotat. Les zones de pression future sur l'habitat groupé détectées dans le protocole basé sur les aménités paysagères corroborent les résultats de l'indice de pression urbaine exercée par le réseau des centres urbains de la région PACA ;
- La mesure de l'impact des protections environnementales sur la pression urbaine littorale. Les espaces littoraux à forte pression à venir ont à ce jour peu de protections environnementales.

Les travaux en cours visent à affiner le modèle. Il s'agit, notamment, de mieux prendre en compte les mutations internes à l'espace agricole, en mesurant l'impact des terroirs et des labels ; de

coupler le protocole d'analyse des attributs paysagers à l'automate cellulaire, ce qui nécessite d'intégrer le relief dans le modèle. Il semble également pertinent de mesurer l'incidence de l'arrangement spatial, de la configuration morphologique – imbrication et fragmentation – des différents types d'occupation du sol, dans la dynamique de l'occupation du sol et la propension à l'artificialisation.

Des analyses de sensibilité doivent être menées avant d'utiliser le modèle à des fins prospectives et d'effectuer des simulations à partir d'options d'aménagement et de politique littorale.

Bibliographie succincte

Barredo, J. I., Kasanko, M., McCormick, N. et Lavalle, C. (2003), « Modelling dynamic spatial processes: Simulation of urban future scenarios through cellular automata », *Landscape and Urban Planning*, n°64, vol.3, pp.145-160

Batty, M. et Xie, Y. (1994), « From cells to cities », *Environment Planning B*, vol. 21, pp. 31-48

Caglioni, M., Pelizzoni, M. et Rabino, G. A. (2006), « Urban Sprawl: A Case Study for Project Gigalopolis Using SLEUTH Model », *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 4173, pp. 436-445

Clarke, K. C. (2003), « Geocomputation's future at the extremes: high performances computers and nanoclients », *Parallel Computing*, n° 29, pp. 1281-1295

Decoupigny F., Réseaux de villes et détermination des pressions urbaines, *Cybergéo*, à paraître

Decoupigny F., Voiron-Canicio C., Fusco G., Sevenet M., (2007), *Analyse de la pression urbaine exercée sur les Alpes-Maritimes - Diagnostic territorial sur les implications spatiales de ses futurs possibles et association aux travaux d'une prospective territoriale*, Rapport PREDAT n°1.

Dubos-Paillard, E., Langlois, P. et Guermond, Y. (2003), « Analyse de l'évolution urbaine par automate cellulaire : le modèle SpaCelle », *L'Espace géographique*, vol. 32, n° 4, pp. 357-378

Engelen, G., Lavalle, C., Barredo, J. I., van der Meulen, M. et White, R. (2007), « The Moland Modelling Framework for Urban and Regional Land-use Dynamics » in E. Koomen, J. Stillwell, A. Bakema et H. J. Scholten (dir.), *Modelling Land-Use Change, Progress and Applications*, pp. 297-319

Langlois, A. et Phipps, M. (1997), *Automates cellulaires. Application à la simulation urbaine*, Hermès, coll. Systèmes complexes, Paris, 197 p.

Langlois, P. (2005a), « Les automates cellulaires pour la modélisation des systèmes spatiaux », in Y. Guermond (dir.), *Modélisations en géographie, Déterminismes et complexité*, Hermès, Lavoisier, 321-352

Moreno, D., Badariotti, D. et Banos, A. (2012), « Un automate cellulaire pour expérimenter les effets de la proximité dans le processus d'étalement urbain : le modèle Raumulus », *Cybergeo : European Journal of Geography*, Systems, Modelling, Geostatistics, document 606, url : http://cybergeo.revues.org/25353

Openshaw, S. (1984), *The modifiable areal unit problem*. Geo Books, CATMOG - Concepts and Techniques in Modern Geography, 41 p.

Papini, L., Rabino, G. A., Colonna, A., Di Stefano, V. et Lombardo, S. (1998). « Learning Cellular Automata in a Real World: The Case Study of the Rome Metropolitan Area », in S. Bandini, R. Serra et F. Suggi Liverani (dir.), *Cellular Automata: Research towards Industry, ACRI'96: Proceedings of the Third Conference on Cellular Automata for Research and Industry*, Springer-Verlag, Londres, pp.165-183

Tobler, W. (1979), « Cellular Geography », in S. Gale et G. Ollson, *Philosophy in Geography*, Kluwer, Dordrecht, pp. 379-386

Von Neumann, J. et Burks, A. (1966), *Theory of Self-Reproducing Automata*, University of Illinois Press, Chicago, 388 p.

White, R. et Engelen, G. (1993), « Cellular automata and fractal urban form: a cellular modelling approach to the evolution of urban land use patterns », *Environment Planning A*, vol. 25, pp. 1175-1199

Wolfram, S. (1984), « Cellular automata: A Model of Complexity », *Nature*, vol.31, pp. 419-424