



HAL
open science

Caractérisation de la relation entre organisation spatiale d'un territoire et risque d'incendie : Le cas des interfaces habitat-forêt du sud de la France

C. Lampin-Maillet

► **To cite this version:**

C. Lampin-Maillet. Caractérisation de la relation entre organisation spatiale d'un territoire et risque d'incendie : Le cas des interfaces habitat-forêt du sud de la France. Sciences de l'environnement. Docteur en géographie - Analyse spatiale, Université de Provence, Aix-Marseille I, 2009. Français. NNT: . tel-02592367

HAL Id: tel-02592367

<https://hal.inrae.fr/tel-02592367>

Submitted on 15 May 2020

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

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

UNIVERSITE DE PROVENCE – AIX-MARSEILLE I
U.F.R. DES SCIENCES GEOGRAPHIQUES ET DE L'AMENAGEMENT
ECOLE DOCTORALE « Espace, Culture, Société »

THESE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE PROVENCE

en GEOGRAPHIE

Soutenue publiquement le 09 octobre 2009
par

Corinne LAMPIN-MAILLET

**Caractérisation de la relation entre organisation spatiale
d'un territoire et risque d'incendie :
Le cas des interfaces habitat-forêt du sud de la France**

Directeurs de thèse :

Jean-Paul FERRIER, Professeur émérite, Directeur

Marielle JAPPIOT, Ingénieure de recherche au Cemagref Aix, Co-Directrice

JURY :

Paul ARNOULD, Professeur, Ecole Normale Supérieure Lettres et Sciences Humaines, Lyon
Raphaele BLANCHI, Ingénieure de recherche, CSIRO, Manufacturing and Infrastructure
Technology Fire Science and Technology Laboratory, Bushfire Research Graham Rd,
Highett, Melbourne, Australia

Jean-Paul FERRIER, Professeur émérite, Université Aix-Marseille I

Luis GALIANA, Professeur, Universidad Complutense de Madrid, Departamento de Análisis
Geográfico Regional y Geografía Física, Facultad de Geografía e Historia, Ciudad
Universitaria, s/n, Madrid

Marielle JAPPIOT, Ingénieure de recherche, Cemagref, Aix-en-Provence

Eric RIGOLOT, Ingénieur de recherche, INRA Avignon

Christine VOIRON-CANICIO, Professeure, Université de Nice-Sophia Antipolis, Nice.

Thèse préparée au sein des laboratoires :

Cemagref, Unité de Recherches Ecosystèmes méditerranéens et Risque, Aix-en-Provence
UMR CNRS-Université 6012 Espace, site d'Aix-en-Provence



Remerciements

Je remercie la direction scientifique du Cemagref, qui m'a fait confiance en me permettant de mener à bien ce projet, ainsi que le chef du Département Gestion des Territoires et le chef de l'Unité de recherche EMAX qui m'ont donné les moyens de réaliser mes recherches.

Je remercie les partenaires financiers qui, dans un cadre conventionnel, ont contribué au développement de ces travaux de recherche, témoignant ainsi de leur intérêt : Europe, Ministères, Région, Département, Collectivités...

Merci à Jean-Paul Ferrier, mon directeur de thèse pour le temps consacré au suivi de mon travail, pour ses conseils en termes de statistiques, et pour m'avoir invité à participer et à devenir membre des groupes de travail Interface et Géogouvernance de l'UMR Espace. Je remercie aussi Marielle Jappiot, ma co-directrice, pour ses conseils et nos échanges toujours constructifs et riches.

Je remercie vivement Jean-Paul Arnould, Raphaelae Bianchi, Jean-Paul Ferrier, Luis Galiana, Marielle Jappiot, Eric Rigolot et Christine Voiron-Canicio, les membres du jury et rapporteurs pour le temps consacré à la lecture de ma thèse, pour leurs avis et jugements.

Merci à Jean-Luc Bonnefoy, Jean-Pierre Chéry, Dennis Fox, Jean-Paul Ferrier, Marielle Jappiot, Christine Voiron-Canicio, membres du comité de suivi de ma thèse pour leurs remarques avisées durant tout ce parcours.

Je ne manquerai pas de remercier mes collègues, qui m'ont transmis leur savoir-faire, ou, pour leur disponibilité : Marlène, Christophe, Denis, Marielle, Eric pour le SIG et autres outils d'analyse spatiale ... Anne, Michel, Philip pour les statistiques...

Roland, Marlène, Denis, Christophe, Willy pour le recueil de données sur les « WUI-WUI »... Merci à tous ceux qui n'ont pas manqué de petits mots de soutien et d'encouragement ...Françoise, Monique...

C'est avec beaucoup d'enthousiasme que j'ai toujours participé aux réunions fructueuses du groupe de travail Interface de l'UMR Espace. Conduites dans la bonne humeur, ces séances de travail ont abouti à la publication d'un article scientifique et la concrétisation d'un projet d'édition d'un ouvrage sur les Interfaces en Géographie. J'en remercie les membres pour leur accueil et de même je remercie ceux du groupe Géogouvernance.

Merci à mon mari, Albert, pour son soutien, pour son écoute lors de mes moments de doute, pour sa patience... Merci à mes filles, Marie et Sarah, qui ne m'ont apporté que satisfactions et bonheur durant ces presque cinq années de thèse : gentillesse au quotidien, réussite scolaire m'aidant ainsi à conduire à terme cette aventure. A tous les trois, pardon pour ces soirées trop studieuses !

Promis après la thèse...

Résumé

Les incendies de forêt affectent de grandes surfaces et causent d'importants dommages qui peuvent avoir de lourdes conséquences écologiques, sociales et économiques. Plus de 50 000 feux brûlent environ 500 000 hectares de végétation chaque année dans les pays du bassin méditerranéen européen (JRC, 2006; Lampin-Maillet, 2008). Les interfaces habitat-forêt sont directement concernées par ces incendies : 90% des départs de feux sont liés à l'activité humaine en Europe Méditerranéenne (Eufirelab, 2004), et chaque année de nombreux morts sont à déplorer à cause de ces incendies de forêt, notamment parmi les habitants des interfaces habitat-forêt. Dans le contexte d'une forte pression d'urbanisation et d'une accumulation de biomasse combustible, les interfaces habitat-forêt représentent une véritable préoccupation pour la gestion du risque d'incendie (Davis, 1990; Velez, 1997; Cohen, 2000), particulièrement au regard des deux composantes du risque : l'aléa en terme de départs de feu causés par les activités humaines, et la vulnérabilité, en termes de surfaces brûlées menaçant les zones habitées et aussi de dégâts sur les habitations (Hardy, 2005; Jappiot et al, 2009).

La thèse, qui relève des sciences de la géographie et de la cyndinique, montre toute la pertinence de l'utilisation de l'objet géographique « interface » dans le contexte de l'évaluation du risque d'incendie. Cet objet « interface » a été appliqué dans la thèse au cas particulier de l'interface habitat-forêt. Après avoir défini, caractérisé et cartographié l'interface habitat-forêt, la thèse a alors examiné la valorisation possible de cette entrée par l'interface habitat-forêt dans le cadre d'une démarche d'analyse spatiale et de cartographie du risque d'incendie sur le territoire.

Ainsi l'interface habitat-forêt a été définie de façon précise dans le contexte du risque d'incendie. Une typologie d'interfaces a été créée, fondée sur la combinaison de deux critères jugés pertinents pour le risque d'incendie, traduisant des caractères prégnants des milieux humain, avec la structure de l'habitat résidentiel, et naturel, avec la structure de la végétation. Les types d'habitat résidentiel : habitat isolé, diffus, groupé dense et groupé très dense ont été définis en posant des principes de distances entre bâtis et de dénombrement des bâtis. Ils ont également été caractérisés en termes de densité de bâtis, de surfaces à débroussailler et de périmètre à défendre. La structure de la végétation a été traduite en termes de continuité horizontale avec un indice d'agrégation emprunté à l'écologie du paysage. L'indice est fondé sur des cartes de végétation, au format raster, d'une résolution maximale de 10 m avec un rayon de 20 m pour la fenêtre de calcul. Un seuil à 95 % discrimine une agrégation faible (végétation éparse) d'une agrégation forte (végétation continue). La méthode de caractérisation et de cartographie des interfaces habitat-forêt, développée dans la thèse, est applicable sur de grandes surfaces et à une grande échelle dans les départements du sud de la France. Elle a permis pour la première fois en France de quantifier l'importance des interfaces habitat-forêt sur un territoire.

Puis la carte des interfaces a contribué à produire une nouvelle carte du territoire, alors compartimenté en espaces dits « interfacés » (types d'interfaces habitat-forêt), et en espaces dits « non interfacés » (espaces bâtis hors interfaces et le reste du territoire). Une première relation, forte, entre les types d'interface habitat-forêt et l'importance des départs de feu et des taux de surfaces brûlées a été mise en évidence. Une méthode d'évaluation du risque d'incendie, innovante, a alors été développée dans la thèse. Elle s'appuie sur une analyse spatiale et statistique du territoire, fondée sur une nouvelle cartographie de types de territoire déduite de la cartographie des interfaces habitat-forêt. L'analyse a consisté à croiser les types de territoire et les caractéristiques environnementales, topographiques et socio-économiques avec l'historique des feux à travers la distribution spatiale des départs de feu, celle des surfaces brûlées et la fréquence de passage des incendies. Elle a permis de mettre en évidence l'importance de certaines variables pour leur contribution positive (interfaces habitat-forêt en habitat isolé, espaces naturels autres que forestiers, garrigue, exposition très chaudes, zones de végétation éparse, densité de chemins) ou négative (interfaces habitat groupé dense et très dense, densité de bâtis et de routes, espaces urbains et agricoles, végétation résineuse) à l'explication de trois indicateurs de risque définis comme densité d'éclosion, densité d'incendie et taux de surfaces brûlées. La modélisation de ces indicateurs a contribué à la construction d'un indice global de risque et à sa cartographie qui permet de déduire facilement, et de manière assez directe, l'information synthétique sur les niveaux de risque à l'échelle du territoire.

L'approche par les « interfaces habitat-forêt », intrinsèquement porteuses de l'information synthétique aléa/enjeux/vulnérabilité, a servi de clé d'entrée pour une évaluation directe et globale du risque, fondée sur l'observation et la description des territoires d'une part, et en particulier des interfaces habitat-forêt, et sur une analyse spatiale et statistique de ces territoires. Elle permet également de tirer des enseignements d'une meilleure connaissance du territoire et du risque d'incendie associé en termes de prévention. Elle est particulièrement bien adaptée à la mise en évidence, quantifiée, d'une dynamique de territoire lu à travers les interfaces habitat-forêt. Cette dynamique de territoire peut alors être facilement associée à une dynamique du risque dont l'étude est particulièrement intéressante dans le contexte du changement global : dynamique de végétation, dynamique d'urbanisation. Elle offre des perspectives encourageantes en matière de géogouvernance et développement durable dans le cadre d'une prévention contre le risque d'incendie toujours plus efficace et adaptée.

Mots clé : interface habitat-forêt, risque d'incendie, habitat, indice d'agrégation, densité d'éclosion, densité d'incendie, taux de surfaces brûlées, indice global de risque

Sommaire

Liste des Sigles	3
Introduction générale.....	5
Première partie Contexte de l'étude, Problématique de recherche, Données et Méthodes9	
Chapitre 1. Contexte de l'étude.....	11
Chapitre 2. Problématique de recherche	27
Chapitre 3. Données et méthodes.....	43
Deuxième partie Caractérisation puis Cartographie des Interfaces habitat-forêt	71
Chapitre 4. L'interface habitat-forêt, un objet géographique nouveau	75
Chapitre 5. La caractérisation des interfaces habitat-forêt.....	83
Chapitre 6. Les types d'interfaces habitat-forêt et leur représentation cartographique	139
Troisième partie Les relations entre territoire et risque d'incendie	161
Chapitre 7. Relation entre types de territoire dont les interfaces habitat-forêt et distribution spatiale des départs de feu et des incendies	165
Chapitre 8. Introduction de nouvelles variables d'occupation du sol dans l'étude des relations types de territoire et risque d'incendie	175
Chapitre 9. Démarche de modélisation d'indicateurs de risque.....	217
Quatrième partie Vers un modèle d'évaluation globale du risque d'incendie avec une clé d'analyse fondée sur les types d'interfaces habitat-forêt	249
Chapitre 10. Indice global de risque d'incendie de forêt dans les interfaces habitat-forêt.	253
Chapitre 11. Simulation dynamique du risque d'incendie en fonction de la dynamique de territoire et géogouvernance	275
Conclusion-Perspectives	283
Références bibliographiques	293
Liste des Tables.....	311
Annexes	325

LISTE DES SIGLES

ARPE PACA	Agence Régionale Pour l'Environnement Provence-Alpes-Côte d'Azur
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales
CRIGE-PACA	Centre Régional de l'Information Géographique de Provence-Alpes-Côte d'Azur
DDAE	Direction Départementale de l'Agriculture et de l'Equipeement
DDAF	Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt
DFCI	Défense des Forêts Contre l'Incendie
DREAL	Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
GIFF	Groupement d'Intervention Feux de Forêt
IFN	Inventaire Forestier National
IGN	Institut Géographique National
INSEE	Institut national de la statistique et des études économiques
MEEDDAT- DPPR	Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire - Direction de la prévention des pollutions et des risques
MNT	Modèle Numérique de Terrain
OFME	Observatoire de la forêt méditerranéenne
OLD	Obligation légale de débroussaillage
ONF	Office National des Forêts
PACA	Provence Alpes-Côtes d'Azur
PCRD	Programme-cadre de recherche et de développement
PIDAF	Plan Intercommunal D'Aménagement Forestier
PPFCI	Plans de Protection des Forêts Contre les Incendies
PPRiF	Plan de Prévention des Risques Naturels Prévisibles d'Incendie de Forêt
SDISS	Service Départemental d'Incendie et de Secours
SIG	Système d'Information Géographique
UMR	Unité Mixte de Recherche

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'incendie de forêt est considéré traditionnellement comme un risque et une catastrophe naturelle. Son impact sur le territoire est majeur : la FAO indique en effet que 350 millions d'hectares ont été parcourus par le feu en 2000 (FAO, 2003).

Cette réalité correspond toutefois à des situations très diverses :

- Des conditions climatiques qui peuvent être conjoncturelles ou régionales et récurrentes : le phénomène El Nino de 1997-1998 propice à de graves sécheresses accompagnées d'incendies majeurs sur tous les continents illustre le premier cas ;
- Un contexte socio-économique à dominante rurale, où le feu, voulu, plus ou moins contrôlé et maîtrisé, est un outil intégré aux itinéraires de production agricoles et pastorales. De nombreux pays en voie de développement relèvent de ce schéma. Ou à l'inverse, un environnement socio-économique marqué par la déprise rurale et la métropolisation des territoires où l'incendie survient comme un fléau subi et très mal toléré, compte tenu des dégâts causés au milieu naturel et du risque encouru par les populations. Les pays développés répondent à cette dernière définition.

L'incendie de forêt constitue toutefois un risque naturel aux caractéristiques tout-à-fait particulières : en effet, la majorité des aléas naturels ont des causes d'apparition et de développement principalement, voire exclusivement déterminées par des facteurs eux-mêmes strictement naturels (caractéristiques du milieu physique, de la végétation, du climat notamment).

Le feu de forêt, bien que considéré habituellement comme risque naturel, est au contraire largement conditionné par des facteurs anthropiques.

- Les statistiques montrent ainsi que 95 % des incendies de forêt sont liés à des activités humaines (mises à feu par accident, imprudence voire malveillance).
- L'étude de Spyrtos et *al.* (2007) met par ailleurs en évidence le rôle de la structuration des territoires et plus particulièrement de l'articulation zones urbaines-zones naturelles, dans la propagation et le développement des sinistres. Cette étude démontre et confirme une règle empirique bien connue des services de lutte contre les incendies : l'importance en taille d'un feu dépend autant de la manière dont sont conçues et aménagées les zones habitées en forêt ou à proximité, que de la nature de la végétation combustible.

C'est précisément ce dernier constat qui amène à penser qu'une approche du risque d'incendie, par la géographie, est particulièrement indiquée. En effet la géographie a pour objet l'étude de l'espace terrestre utilisé et aménagé par les sociétés, de son organisation dans ses composantes culturelles et naturelles, de ses caractéristiques structurantes en prenant en compte un ensemble de lieux et leurs relations.

Dans le cas de l'incendie de forêt, les outils et méthodes de la géographie seront appliqués, en premier lieu aux espaces que les services opérationnels tiennent pour déterminants, tant en matière d'évaluation des risques que d'organisation des secours : les zones de contact entre milieu naturel et secteurs occupés par les installations humaines, notamment l'habitat. Cette approche ciblée sera par la suite complétée par une analyse plus globale au niveau de l'ensemble du territoire.

En tant que méthode il sera fait appel à l'analyse spatiale. En effet la « position théorique générale de l'analyse spatiale consiste à proposer une explication partielle, et des possibilités de prévision, quant à l'état et à l'évolution probable des objets ou unités géographiques, à partir de la connaissance de leur situation par rapport à des objets géographiques » (Pumain, 2004).

Cette analyse spatiale abordera la question centrale des zones de contact habitat-forêt au travers de l'objet géographique « interface », tel qu'il ressort des travaux récents du Groupe de Recherches « Interfaces » (2008), à savoir un concept permettant à la fois une meilleure lecture et une nouvelle compréhension de l'espace.

En matière d'outils, on fera appel à la géomatique c'est-à-dire aux processus de traitements des données géographiques.

L'ambition de cette recherche géographique n'est toutefois pas uniquement théorique. Elle vise également à fournir des outils et méthodes de diagnostics et d'aide à la décision en matière d'évaluation du risque d'incendie. On se positionne donc clairement dans le champ de la cyndinique, ce qui explique l'importance accordée également à la cartographie, cette représentation d'un espace géographique comme « combinaison structurale de lieux (Gusdorf cité dans Zanin, 2004). La carte, « outil » et « langage » du géographe est le moyen d'expression privilégié, nécessaire quoique non suffisant, pour dégager puis communiquer de manière synthétique les informations stratégiques utiles aux décideurs.

La présente thèse, conduite en géographie relève donc d'un objet de recherche théorique mais dont on espère toutefois également des retombées opérationnelles rapides : il s'agit de mettre en évidence les apports de certaines méthodes et outils de la géographie, dans le processus d'évaluation du risque d'incendie et de suivi de sa dynamique d'évolution temporelle, pour un territoire donné.

Dans ce contexte les objectifs de la thèse sont au nombre de deux :

- Démontrer la pertinence de l'utilisation de l'objet géographique « interface » pour une bonne compréhension de la contribution décisive des zones de contact habitat-forêt, dans la démarche d'analyse spatiale et de cartographie du risque d'incendie sur l'ensemble du territoire ;
- Démontrer que cette approche du risque par l'entrée « interface habitat-forêt » ouvre des perspectives en matière de conception innovante de modèles d'évaluation du risque d'incendie. Contrairement aux méthodes traditionnelles qui travaillent d'abord de manière analytique selon les axes aléa/enjeux ou aléa/vulnérabilité avant d'opérer une synthèse pour aboutir à la notion de risque, l'objet géographique « interface habitat-forêt » est intrinsèquement porteur de l'information synthétique aléa/enjeux/vulnérabilité. Il peut donc servir de clé d'entrée pour une évaluation directe du risque, si on parvient à établir en amont une relation entre niveaux de risque et types d'interface.

La démarche poursuivie pour atteindre les deux objectifs de la thèse sera la suivante :

- Vérifier l'hypothèse selon laquelle il est possible de définir, grâce à l'analyse spatiale, des critères pertinents pour la caractérisation des interfaces habitat-forêt puis pour leur cartographie. L'objectif est d'aboutir, à l'issue de cette analyse, à une typologie des interfaces habitat-forêt ;
- Vérifier l'hypothèse selon laquelle le risque d'incendie est lié à la structure spatiale du territoire, selon des relations stables et reproductibles, avec une contribution déterminante des types d'interfaces habitat-forêt.

- En déduire qu'il est alors possible de mettre au point, une méthode d'évaluation du risque innovante, fondée sur une simple lecture directe de la structure du territoire, intégrant en priorité la caractérisation des interfaces habitat-forêt selon la typologie préalablement établie.

La thèse s'organise donc en quatre parties.

La **première partie** rappelle dans le *chapitre 1* la nature du phénomène incendie avant de préciser le contexte de l'étude. Le *chapitre 2* présente le contexte scientifique ainsi que la problématique de recherche. Le *chapitre 3* détaille quant à lui les données, méthodes et outils qui ont été utilisés.

Les trois autres parties reprennent les trois étapes de la démarche de recherche présentée au paragraphe précédent.

La **deuxième partie** construit la méthode de caractérisation et de cartographie des interfaces habitat-forêt. Le *chapitre 4* aborde la définition de l'objet géographique « interface » et précise l'utilisation qui peut en être faite dans le contexte particulier de l'interface habitat-forêt et du risque d'incendie. Le *chapitre 5* identifie les critères pertinents de caractérisation des interfaces habitat-forêt. Il développe, d'une part, une méthode pour caractériser et cartographier la structure de l'habitat résidentiel, et d'autre part, une méthode pour caractériser la structure de la végétation. Cela conduit au *chapitre 6* qui présente une typologie d'interfaces habitat-forêt et une méthode de cartographie associée.

La **troisième partie** vise à établir des relations stables et reproductibles entre territoire et risque. Elle s'intéresse particulièrement aux interfaces habitat-forêt mais aussi aux espaces autres que ces interfaces, développant ainsi la notion de type de territoire. Le *chapitre 7* met en évidence les premières relations entre les types de territoire et la distribution spatiale des départs de feu et incendies. Le *chapitre 8* développe des analyses statistiques et spatiales approfondies afin de mieux comprendre ces premières relations. Il prend alors en compte des variables d'occupation du sol, complémentaires de celles relatives aux types de territoire étudiés dans le chapitre 7. Il introduit trois indicateurs élémentaires de risque (densité de départ de feu, densité d'incendie, taux de surfaces brûlées). Enfin le *chapitre 9* identifie les variables significatives qui expliquent le mieux les trois indicateurs élémentaires de risque définis précédemment. Il conduit à leurs modélisations déduites de formules de calcul pondérées selon les variables d'occupation du sol et les types de territoire retenus.

La **quatrième partie** vise à élaborer et à valoriser un nouveau modèle d'évaluation du risque d'incendie dans les interfaces habitat-forêt, à partir des résultats obtenus précédemment. Ainsi le *chapitre 10* élabore la formule de combinaison des trois indicateurs élémentaires de risque identifiés en partie III, en un indice unique, global et synthétique qui servira de base aux processus d'évaluation et de cartographie du risque d'incendie. Il n'est donc nul besoin de maîtriser les techniques spécialisées de connaissance des aléas, ou de diagnostic des vulnérabilités exigés dans la plupart des méthodes traditionnelles d'évaluation du risque, qui sont réservés, quant à eux, aux seuls experts. Le *chapitre 11* démontre que, par sa simplicité d'utilisation, le modèle proposé est particulièrement apte au suivi dynamique du risque d'incendie, et apte au débat et à la discussion citoyenne autour du risque d'incendie de forêt. Il esquisse alors les apports potentiels d'un tel modèle dans une démarche de géogouvernance du risque d'incendie, tant au niveau du territoire, qu'à l'échelle d'enjeux particuliers de proximité.

PREMIÈRE PARTIE

CONTEXTE DE L'ÉTUDE, PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE, DONNÉES ET MÉTHODES

Chapitre 1. Contexte de l'étude

1.1 L'incendie de forêt

1.1.1. Définition

On parle d'incendie de forêt lorsque le feu parcourt la forêt (mais aussi maquis, garrigue et landes) sur une surface minimale d'un hectare d'un seul tenant et qu'il détruit une partie au moins des étages arbustif et/ou arboré (parties hautes). Un incendie est un phénomène naturel complexe qui peut échapper au contrôle de l'homme, tant en durée qu'en étendue. Pour qu'il naisse, il faut qu'il y ait inflammation et combustion. Pour cela, trois facteurs doivent être réunis : un combustible, qui peut être n'importe quel matériau susceptible de brûler, une source externe de chaleur (flamme ou étincelle) et de l'oxygène nécessaire pour alimenter le feu. Cette combinaison est plus connue sous le nom de « triangle du feu » illustré par la Figure 1-1 (Colin et al., 2002). La forêt dans son intégralité, est un combustible potentiel. Les flammes peuvent en effet parcourir indifféremment la végétation vivante ou morte (aiguilles, arbres morts sur pied, branches, feuilles). Les infrastructures humaines implantées en zone forestière ou ses abords constituent également un combustible potentiel important.



Figure 1-1 Le triangle du feu.

La chaleur générée par un incendie va être transportée vers l'avant des flammes selon trois processus :

- ☞ la conduction, qui permet la transmission de proche en proche de l'énergie cinétique (produite par le mouvement);
- ☞ le rayonnement thermique, qui propage l'énergie sous forme d'ondes infrarouges. C'est le principal mode de propagation des incendies;
- ☞ la convection, qui liée aux mouvements d'air chaud augmente avec le vent et la pente. Ce processus peut contribuer au transport de particules incandescentes en avant du front de flammes et au déclenchement de foyers secondaires (sautes de feu).

1.1.2. Facteurs de développement de l'incendie

Le développement d'un incendie de forêt est influencé à la fois par des facteurs naturels liés aux conditions du milieu, et par des facteurs anthropiques, liés aux activités humaines.

a. L'influence des facteurs naturels

Les conditions météorologiques et les caractéristiques de la végétation conditionnent le développement des incendies, les premières pouvant avoir une influence non négligeable sur les secondes. Dans certaines situations (forts vents par exemple), la topographie du site peut également favoriser le développement des incendies.

☞ Les conditions météorologiques

Les périodes de sécheresse et les épisodes de vents forts, sont favorables à l'éclosion des incendies. Ainsi le vent accélère le dessèchement des sols et des végétaux et augmente les probabilités de mises à feu, par la dispersion d'éléments incandescents. La chaleur dessèche les végétaux par évaporation et provoque, lors des périodes les plus chaudes, la libération d'essences volatiles, à l'origine de la propagation des flammes. De même, la foudre est à l'origine d'environ 5 % des départs de feux, notamment en plein cœur des massifs et lors des mois les plus chauds de l'année en région méditerranéenne.

☞ Les caractéristiques de la végétation

La prédisposition de la végétation aux incendies est souvent liée à sa teneur en eau, elle-même déterminée par les conditions météorologiques. Elle se mesure par son niveau d'inflammabilité, propriété des végétaux à s'enflammer sous l'effet d'une exposition à une source de chaleur, et de combustibilité, aptitude à propager le feu en se consumant et en libérant des quantités de chaleur plus ou moins importantes. L'état général des peuplements forestiers, maquis, garrigues (disposition des strates, état d'entretien, densité, essences présentes, passage récent d'un incendie, bois mort) et la composition chimique de la végétation (teneur en essences volatiles ou en résines) jouent également un rôle déterminant dans l'éclosion mais aussi la propagation des incendies.

☞ Les conditions orographiques

Dans une zone sans relief, un départ de feu est facilement soumis à l'accélération du vent. En zone de relief irrégulier, la progression du feu est accélérée dans les montées et ralentie dans les descentes. La pente conditionne l'inclinaison des flammes par rapport au sol et influe sur leur vitesse de propagation (Dupuy, 1997). L'exposition prédétermine des conditions plus ou moins favorables à la progression d'un feu. Généralement, les versants sud et sud-ouest présentent les conditions les plus favorables pour une inflammation rapide et pour la propagation des flammes (types de végétation, influence des vents et ensoleillement). L'effet combiné d'une pente et d'une exposition, favorables à la progression d'un feu, accélérera la propagation d'un feu, et ce d'autant plus qu'un vent important sera présent.

b. L'influence des facteurs anthropiques

Les facteurs anthropiques ont un rôle prépondérant dans le déclenchement des incendies de forêt mais aussi dans leur extension. En forêt méditerranéenne les départs de feu sont dans leur grande majorité d'origine humaine (Clément, 2005). Aux causes d'origine humaine (imprudence, travaux agricoles et forestiers, malveillance, loisirs) viennent s'ajouter des phénomènes aggravants :

☞ la déprise agricole : le déclin des activités agricoles et pastorales et l'abandon des espaces ruraux favorisent l'extension des friches, zones potentielles de départs d'incendie. Par ailleurs la diminution des prélèvements en forêt et un mauvais entretien ont conjointement conduit à la présence de bois morts dans les forêts et au développement des sous-bois. Ainsi, le risque de voir se propager des incendies de grande ampleur et de forte intensité a été considérablement accru du fait de l'augmentation de la biomasse combustible ;

☞ l'urbanisation : le mitage, par l'expansion des habitations aux abords des zones boisées, voire au sein même de la forêt, multiplie les points potentiels de départs d'incendies accidentels. De plus avec l'extension urbaine, l'espace entre les zones d'habitat et les zones sensibles de forêts se réduit progressivement. Ceci a pour conséquence de limiter les zones tampon à de faibles périmètres, insuffisants pour stopper la propagation d'un feu.

1.1.3. *Les différents types de feux*

Une fois éclo, un feu peut prendre différentes formes, chacune étant conditionnée par les conditions climatiques (conditions de sécheresse, force et direction du vent) et les caractéristiques de la végétation. Ainsi la litière, très inflammable est à l'origine d'un grand nombre de départs de feux difficiles à détecter, car se consumant lentement. La strate herbacée est d'une grande inflammabilité, le vent peut y propager le feu sur de grandes superficies. La strate des ligneux bas (maquis, garrigue) d'une inflammabilité moyenne, transmet rapidement le feu aux strates supérieures. La strate des ligneux hauts, rarement à l'origine d'un feu, permet cependant la propagation des flammes lorsqu'elle est atteinte.

On distingue donc :

☞ les feux de sol, qui brûlent la matière organique contenue dans la litière, l'humus ou les tourbières. Alimentés par incandescence avec combustion, leur vitesse de propagation est faible ;

☞ les feux de surface, qui brûlent les strates basses de la végétation, c'est-à-dire la partie supérieure de la litière, la strate herbacée et les ligneux bas. Ils se propagent en général par rayonnement et affectent la garrigue ou les landes ;

☞ les feux de cimes, qui brûlent la partie supérieure des arbres (ligneux hauts) et forment une couronne de feu. Ils libèrent en général de grandes quantités d'énergie et leur vitesse de propagation est très élevée. Ils sont d'autant plus intenses et difficiles à contrôler que le vent est fort et le combustible sec.

Ces trois types de feu peuvent se produire simultanément sur une même zone.

1.1.4. *Impacts de l'incendie sur l'homme et son environnement*

L'incendie de forêt est un phénomène complexe qui varie dans l'espace, en intensité et en fréquence. Par ses effets, le feu peut être un agent de destruction. Son impact va dépendre de son intensité et de son extension. Il crée des dommages pour les hommes (mort ou blessures), pour les biens matériels mais aussi pour les activités socio-économiques et plus largement pour les écosystèmes eux-mêmes.

Les atteintes aux hommes, aux biens et aux activités

En France, on déplore peu de victimes des feux de forêt dans la population. Ce sont les sapeurs-pompiers, qui payent davantage un lourd tribut en protégeant les forêts et ses populations exposées aux incendies. Les habitations, et plus particulièrement celles implantées dans les zones forestières, présentent une forte sensibilité au feu. Elles peuvent faire l'objet de destruction partielle (environnement extérieur, annexes au bâtiment principal) ou totale. Ces dommages occasionnés par le feu représentent un coût d'autant plus élevé que des zones d'activités économiques et industrielles, ainsi que des réseaux de communication sont touchés, entraînant par ailleurs des pertes d'exploitation (MEDD, 2002).

Les atteintes à l'environnement

Un incendie a des conséquences immédiates (modification du paysage, disparition d'animaux ou de végétaux, parfois appartenant à des espèces rares) mais également à plus long terme, si

l'on considère les temps nécessaires à la reconstitution des biotopes. Les paysages subissent d'importantes modifications, soit par l'absence de végétation, soit par la présence de nombreux arbres calcinés. L'impact sur la faune et la flore est lié quant à lui à l'intensité de l'incendie et à l'intérêt biologique que présentent les espèces concernées. Parmi la faune, les reptiles, tortues et animaux rampants sont les plus touchés, car ils ne peuvent fuir les flammes comme les oiseaux et le gibier. Les conséquences sur les sols sont sources de problèmes liés à la dégradation de la couverture végétale qui peut être à l'origine d'un accroissement du ruissellement et à termes d'un risque d'érosion important (MEDD, 2002).

1.1.5. Bilan mondial des incendies de forêt

Chaque année, 350 millions d'hectares de terres boisées, de friches et de cultures brûlent chaque année provoquant non seulement des dégâts considérables à la nature mais aussi aux habitations et aux propriétés (FAO, 2009). Depuis une décennie, d'immenses régions forestières de la planète s'embrasent tour à tour. Ainsi les graves sécheresses liées au phénomène El Niño de 1997-1998 ont été propices au développement d'immenses incendies en Asie du Sud-Est, en Amérique centrale, en Amérique du Sud mais aussi en Russie orientale, dans le sud-est des Etats-Unis et les régions situées autour du bassin méditerranéen. De façon récurrente, le sud de la Californie et l'Australie connaissent des incendies destructeurs, comptabilisant des centaines de milliers d'hectares brûlés, des milliers de maisons détruites, des morts, des blessés. Ainsi en ce début d'année 2009, le sud-est de l'Australie a connu les incendies les plus meurtriers de son histoire, des feux de brousse qui se sont développés dans des conditions de chaleur et sécheresse extrêmes.

Dans les pays du pourtour de la Méditerranée, les feux de forêts représentent une part importante des incendies. Souvent plus de 100 000 incendies éclatent chaque année dans les pays à risque d'incendie de la zone méditerranéenne durant la saison sèche et chaude, détruisant jusqu'à 700 000 ha de forêts et de maquis méditerranéens selon la FAO (FAO, 2005). Un peu plus de la moitié d'entre eux affectent près de 493 000 hectares de végétation (moyenne 1980-2006) dans les cinq pays de l'Europe du sud les plus affectés par les incendies - Portugal, Espagne, Italie, Grèce et France - (JRC, 2006). Mais de 2003 à 2005, ce sont des centaines de milliers d'hectares de forêts des pays méditerranéens, dont le Maroc, l'Algérie, le Portugal, l'Espagne, l'Italie, la Grèce et la France, qui ont brûlé durant l'été occasionnant la mort de près de 60 personnes et de lourdes pertes matérielles. En 2007, près de 500 000 hectares (21 000 feux) ont été parcourus par le feu en Grèce, en Italie et en Espagne. De nombreuses personnes sont mortes (64 morts en Grèce) ou ont été évacuées durant ces terribles événements et des milliers de bâtiments ont été détruits ou endommagés (Lampin-Maillet, 2008).

Ces incendies ont eu pour conséquences non seulement la destruction de ressources écologiques en particulier forestières mais aussi des problèmes de santé publique liés, par exemple, à la formation de fumées denses, des déplacements de population sans compter des pertes en vies humaines. Leur point commun est un contexte climatique extrême conjuguant un état de sécheresse, des vents violents et une forte canicule, voire exceptionnelle, qui conduit au déploiement de gigantesques incendies, difficiles à contrôler.

La principale cause des incendies de forêts dans le monde et dans le bassin méditerranéen en particulier (FAO, communication 2003) est l'activité humaine dans 95 % des cas. Si les feux de forêt sont un outil largement utilisé pour gérer les sols, entretenir les processus écologiques, et ouvrir les milieux pour le pâturage, il n'en reste pas moins que les incendies

accidentels ou criminels détruisent des millions d'hectares de couvert forestier et de végétation, tout en causant des pertes en vies humaines et animales ainsi que des dégâts considérables à l'environnement et à l'économie. La situation s'est aggravée du fait du développement socio-économique, en particulier de l'exode rural notamment dans les pays développés. Ainsi on n'y débroussaillait plus par nécessité liée au mode de vie : le bois mort n'est plus ramassé pour le feu, ni les hautes herbes pour nourrir le bétail. Les forêts deviennent particulièrement vulnérables aux incendies car de plus en plus combustibles et inflammables, les feux sont par conséquent de plus en plus difficiles à maîtriser. Parallèlement les constructions se développent, toujours plus nombreuses, et conduisent à un étalement urbain qui s'insère dans les espaces plus naturels. De nouvelles populations qui n'ont pas la culture du feu, se retrouvent au cœur de zones à risque facilitant l'augmentation de l'éclosion de feux par leurs activités au contact de la forêt elle-même. Que ce soit dans les pays méditerranéens Européens, dans les banlieues Californiennes ou en Australie, ces incendies qui affectent les zones résidentielles en bordure de forêt sont les plus dangereux et les plus difficiles à contrôler.

Si les feux font partie des processus naturels d'autorégulation des écosystèmes comme en Sibérie ou en Alaska, ils sont généralement peu intenses et concourent à améliorer la gestion forestière créant même de la biodiversité. En revanche, s'ils se développent, comme en Australie, dans des conditions climatiques combinant une longue période de sécheresse et de températures extrêmes, et dans des formations végétales très inflammables comme les eucalyptus ou les pins d'Alep en Provence, dont la canopée diffuse en période de canicule des gaz inflammables qui s'enflamment à distance, leurs conséquences du fait de leur ampleur et intensité dévastatrices vont à l'encontre de tout système autorégulé. Or, le risque au XXI^{ème} siècle est de voir les sécheresses se confirmer, comme en Australie et en Californie, et dans le sud de l'Europe. Comme il fera plus sec, les incendies seront plus fréquents et ne permettront pas à la végétation de se reconstituer comme dans un système autorégulé (Marlon et al., 2009).

Enfin selon la structure des paysages et la composition des types d'occupation du sol, le feu peut s'étendre sur de grandes surfaces comme au Canada, aux USA et Australie sans générer de risque pour les populations et peut admettre ainsi une politique de « *Let it burn* ». En revanche, dans la plupart des pays européens méditerranéens, la composition du paysage est rarement uniforme sur de grandes surfaces. Les zones de végétation sont proches des zones bâties ce qui conduit à un risque accru pour les populations en cas de non maîtrise d'un feu.

1.2 Le cas de la zone méditerranéenne française

En France, le territoire méditerranéen s'étend de la Corse à Nice, de Nice au sud de Perpignan en remontant la vallée du Rhône jusqu'au niveau de Montélimar et comprend la Corse. Il couvre environ 67 520 km², soient les régions Provence-Alpes-Côte d'Azur, Languedoc-Roussillon et Corse.

1.2.1. La région méditerranéenne française

a. Le climat

Le territoire méditerranéen français se situe dans une zone climatique qui est sous l'influence de la mer Méditerranée, des reliefs et de l'anticyclone des Açores. La mer Méditerranée stocke les rayonnements solaires durant l'été et restitue cette énergie pendant l'hiver. Le relief

des Alpes bloque les masses d'air en provenance du Nord, tandis que l'anticyclone des Açores bloque les flux d'ouest, notamment en été.

Le climat méditerranéen se caractérise alors par des hivers doux (7°C en moyenne, gelées rares) et des étés chauds (23°C en moyenne, saison sèche de 3 à 4 mois), un régime pluviométrique faible et irrégulier, un ensoleillement important et des vents violents assez fréquents. La température moyenne annuelle oscille autour de 15 à 20°C avec une amplitude thermique de 12 à 15°C. Des pics de température peuvent aussi être observés comme -20°C en 1963 ou 44,1°C à l'ombre dans le Gard en Août 2003 (Source MétéoSudEst). Le niveau de précipitations (600 mm/an) connaît de forts contrastes selon les mois de l'année : des précipitations en moyenne 6 fois plus importantes en octobre qu'en juillet, souvent concentrées dans le temps (quelques jours à quelques semaines) avec des conséquences parfois catastrophiques ("épisodes cévenols" souvent générateurs de crues dévastatrices). La coïncidence entre le maximum thermique et le minimum pluviométrique annuels donne un caractère singulier à ce climat.

Au delà de ces paramètres pluvio-thermiques, le climat méditerranéen se distingue par la qualité de sa lumière et son nombre important d'heures d'ensoleillement (2 800 heures en moyenne annuelle en Provence), expliquant largement l'attractivité de la région.

Enfin l'orientation des vents joue un rôle important sur le climat. Ainsi le vent de nord-ouest à nord amène un froid sec en hiver, et un temps chaud et sec en été. Le vent du sud amène des entrées maritimes, notamment sur le Languedoc-Roussillon.

On observe ainsi une très forte variabilité interannuelle du climat qui n'est pas sans conséquences pour la gestion des ressources en eau et des risques, du risque d'incendie en particulier (Carnat et al., 2005). La période estivale rassemble les facteurs privilégiant les incendies de forêt, soit une forte sécheresse associée à de fortes chaleurs auxquels s'ajoute le vent. Sécheresse et chaleur conduisent à diminuer la teneur en eau de la végétation qui devient alors très inflammable. Le vent qui peut survenir sous la forme de rafales violentes et atteindre de très grandes vitesses, accélère aussi le dessèchement des végétaux et favorise alors l'éclosion de l'incendie et sa propagation.

b. La végétation

La végétation méditerranéenne présente des formes d'adaptation à la sécheresse estivale, elle se caractérise par sa xérophilie et sa thermophilie. Elle est de nature xérophile supportant un fort ensoleillement et de longues périodes de sécheresse. Souvent sempervirente, elle est caractérisée par l'abondance de ligneux et par des feuilles petites et vernissées pour résister aux dures conditions de l'été. Ainsi les arbres ou les arbustes ont des feuilles coriaces, en général persistantes, présentant des dispositifs de lutte contre la transpiration excessive de l'été (membranes épaisses, stomates protégés du soleil, concentration particulière des sucres cellulaires) : le pin parasol, le chêne vert, le chêne-liège, en sont des exemples. Cette végétation méditerranéenne est par ailleurs marquée de façon prépondérante par le passage du feu avec le pin d'Alep (*Pinus halepensis*) aux stratégies de régénération adaptée, le ciste conquérant après le passage d'un feu, et le maquis et la garrigue, formes dégradées de la forêt après incendie. Le maquis, sur substrat siliceux, contient des arbousiers, la bruyère arborescente, des calycotomes, des lentisques, parfois du buis, des daphnés (le garou), des ajoncs, le tout enchevêtré de salsepareille (*Smilax*) le rendant impénétrable. La garrigue, généralement sur substrat calcaire, est formée de buis, de chêne kermès (*Quercus coccifera*), de genévrier oxycèdre et de romarin, thym, lavande. La dégradation maximale donne une apparence de steppe, qu'on appelle "erme" en Provence.

Ces formations végétales répondent particulièrement bien à la sécheresse estivale prononcée, couplée à des températures élevées ainsi qu'aux perturbations telles que les incendies, mais le maintien de conditions extrêmes comme une canicule prolongée peut entraîner une surmortalité des individus (Lloret et al., 2004).

La végétation méditerranéenne joue un rôle important dans l'éclosion des incendies, du fait de son inflammabilité (taux d'humidité, essences volatiles...), mais elle conditionne aussi la propagation de l'incendie, du fait de sa combustibilité (quantité de biomasse, structure de la végétation...). Au niveau du paysage méditerranéen, une augmentation des surfaces forestières a induit une forte augmentation de la biomasse et de la continuité spatiale des formations boisées, avec, comme conséquence, une augmentation des risques d'incendie de forêt de grande intensité et de grande dimension. De plus dans le contexte de changement global, où les modèles météorologiques prévoient une augmentation des sécheresses estivales et une augmentation des températures dans le bassin méditerranéen (Gibelin et Deque, 2003 ; Jacq, 2008), ces risques d'incendie pourraient être amplifiés en termes de fréquence et d'intensité (Rigolot, 2008a).

1.2.2. Dynamique du territoire méditerranéen

L'évolution du territoire méditerranéen constatée depuis plus d'un siècle se poursuit encore. Elle a été étudiée hors Corse. Ainsi la déprise agricole en est le principal moteur même si les surfaces agricoles n'y sont pas majoritaires. Entre 1980 et 2005, alors que les sols agricoles (cultivés ou non) ont perdu 420 000 hectares (soit - 0,4 % par an) (Source Agreste Statistique, 2007), les forêts qui prédominent ont gagné 331 000 hectares (soit + 0,6 % par an). A titre de comparaison sur la même période, l'évolution moyenne en France métropolitaine s'est traduite par une diminution annuelle des surfaces agricoles cultivées de seulement 0,27 % et par une augmentation annuelle de la surface forestière de 0,25 % (Source Agreste Statistique, 2007).

Non seulement la déprise agricole conduit à la fermeture du paysage avec la progression de la forêt, notamment en Provence, mais elle s'effectue aussi au profit de zones urbanisées (bâti, jardins, espaces verts...), tout particulièrement sur la bande littorale (Lee et Slak, 2007).

Cette dynamique de colonisation des anciennes terres agricoles par la forêt complétée par l'insuffisance d'exploitation de la forêt conduit à développer sur le territoire des espaces forestiers de plus en plus vastes et continus augmentant ainsi le volume de biomasse combustible.

Parallèlement la pression anthropique exercée sur ce territoire méditerranéen est telle qu'entre 1990 et 2005, on enregistre une progression démographique de +13,7 % (soit + 0,9 % par an) pour une évolution moyenne en France métropolitaine de 7,4 % (soit de + 0,5 % par an) (Sources INSEE : valeurs des recensements 1990 et estimations au 1/1/2005). Pendant certaines périodes, estivales notamment, l'augmentation de la population peut atteindre jusqu'à 32 % en PACA et 58 % en Languedoc-Roussillon (sources des données : direction du tourisme pour la population présente en 2003, INSEE-RP pour la population résidente).

Cette dynamique anthropique a conduit à une urbanisation parfois anarchique sur la côte, autour des villes en lieu et place des anciennes surfaces agricoles mais aussi en limite, voire à l'intérieur, des espaces forestiers.

Sur les 15 dernières années, une croissance soutenue de la population permanente sur le territoire méditerranéen conjuguée à une conquête des surfaces forestières ont engendré une dynamique du territoire et notamment l'expansion de zones urbanisées au contact de la forêt. Cette expansion est loin de prendre fin si l'on se réfère aux projections régionales de

population élaborées à l'horizon de 2030 par l'INSEE (Léon, 2008; Léon et Godefroy, 2006) qui annoncent que les régions Languedoc-Roussillon et PACA continueront à être les régions à plus forte croissance démographique bénéficiant des excédents naturel (naissance-décès) et migratoire. Selon leur scénario central (taux de fécondité au niveau de 2005, baisse de la mortalité et quotients migratoires calés sur ceux de la période 1999-2005), des croissances démographiques de 23 % (soit 0,9 % par an) pour ces régions sont attendues pour la période 2005-2030 (elle n'est que de 10,7 % pour l'ensemble de la France métropolitaine, soit 0,4 % par an).

La progression de l'embroussaillage et des formations végétales dans les espaces agricoles abandonnés, couplée à la recrudescence des activités humaines au contact de ces espaces naturels dans les 20 prochaines années (Léon, 2008), pourrait augmenter les risques d'éclosion et d'extension des incendies, qui ne sont certes pas un phénomène nouveau sur le territoire méditerranéen.

1.2.3. *Un territoire coutumier de l'incendie de forêt*

L'incendie de forêt existe depuis longtemps. Pausas et Keeley (2009) démontrent même que le feu est apparu en même temps que l'origine des plantes terrestres, avant l'arrivée de l'Homme sur terre, et qu'il a joué un rôle important à travers l'histoire de la vie (distribution des écosystèmes, adaptation des plantes aux changements). Déjà Bouisset (1998) précisait que toutes les études scientifiques menées sur le milieu méditerranéen confirmaient la présence du feu depuis des époques reculées. Elle souligne que les recherches sur les écosystèmes méditerranéens et les changements bioclimatiques, notamment la palynologie, ont permis d'affirmer que la végétation du pourtour méditerranéen, indépendamment des actions humaines, était depuis des millions d'années façonnée par le passage répété d'incendies d'origine naturelle. Elle soutient enfin que « l'image d'une forêt méditerranéenne bien entretenue et donc invulnérable aux incendies relève d'un mythe de l'âge d'or, qui n'a jamais existé »

Mais l'incendie de forêt a pris de l'ampleur ces dernières années en même temps que changeait le statut de la forêt. Rinaudo (1994) montre comment l'incendie, phénomène ancien, est venu au cœur des préoccupations depuis quelques décennies seulement, au point d'être à présent « vu comme la caractéristique essentielle, pour ne pas dire unique, de la forêt méditerranéenne ». En quelques années les « urbains », à travers la périurbanisation mais aussi le tourisme, se sont appropriés la forêt en lui attribuant un rôle écologique, une fonction de loisirs, et la forêt est ainsi passée du statut d'objet économique à celui de patrimoine inestimable, l'incendie de forêt causant alors le plus vif émoi de la population. Bouisset (1998) déclare même que « l'incendie n'est pas seulement le mécanisme physique de combustion d'une végétation, mais qu'il est l'expression de rapports sociaux, de modes d'utilisation de l'espace ». Hetier (1993) démontre que l'influence de l'homme sur les milieux méditerranéens est également très ancienne, déclarant que « Les perturbations de la forêt méditerranéenne par l'homme ne sont pas un phénomène nouveau. Depuis 10 000 ans au moins, elle est soumise à l'action conjuguée des coupes, du pâturage, des incendies et du défrichement auquel elle s'est progressivement adaptée... ». Les feux sont un phénomène récurrent du territoire méditerranéen, ils ne sont pas le résultat des caractéristiques du milieu mais sont, avant tout, un fait culturel (Clément, 2005).

Jusqu'au XXème siècle, le feu était perçu comme un facteur important gouvernant la distribution et l'extension de la forêt selon Pinchot (1899) cité par Hardy (2005). Les

sylviculteurs américains comptaient sur l'aide du feu pour leur pratique sylvicole tel que l'exprime l'article d'Hoxie (1910) cité par Hardy (2005) et soulignaient même l'impact négatif de l'exclusion du feu dans la gestion de certaines espèces comme le *Pinus Ponderosa* (Weaver 1943 cité par Hardy 2005). Aujourd'hui, les incendies de forêt ont pris une dimension nouvelle depuis la seconde moitié du XXème siècle avec la déprise rurale conduisant à l'expansion d'espaces agricoles abandonnés et reconquis par des formations végétales très sensibles au feu, entraînant peu à peu la jonction entre des unités boisées autrefois discontinues et le développement d'une urbanisation anarchique qui a conduit souvent à un mitage de la forêt. Au niveau des pays du bassin méditerranéen européen, l'usage du feu au service du feu est donc remis au goût du jour notamment dans le cadre du programme intégré européen Fire Paradox qui inscrit son action dans le cadre du proverbe finlandais « Le feu est un mauvais maître mais un bon serviteur. ». L'usage du feu, en particulier le brûlage dirigé, est revaloriser pour réguler le problème des incendies (Rigolot, 2008b ; Rego et al., 2007). Il faut donc apprendre à vivre avec le feu.

1.2.4. Importance des incendies de forêt en région méditerranéenne

Le territoire méditerranéen est prédisposé au phénomène d'incendie de forêt par un climat chaud et sec avec des périodes de canicule et de vent, une végétation inflammable et combustible au contact d'une forte activité humaine. Des indicateurs annuels comme les surfaces brûlées et le nombre de feux de forêt sont révélateurs de l'importance de ce phénomène.

a. Surfaces brûlées et nombre de feux de forêt

La base de données Prométhée fournit des données sur le nombre de feux de forêt et la surface brûlée correspondante depuis 1973 dans les 15 départements du sud de la France. Les feux de l'espace rural et périurbain qui comprennent quant à eux les incendies de végétaux n'appartiennent pas à la catégorie feux de forêt : ce sont des feux de massifs de moins de 1 ha, de boisements linéaires, des feux d'herbes, des feux agricoles, des dépôts d'ordures et autres.

L'évolution annuelle des surfaces brûlées (Figure 1-2) est irrégulière. Les feux de forêts ont brûlé en moyenne 23 565 hectares de forêt chaque année sur la période 1973-2008. Si dans la première partie de la période (1973 à 1990), la surface brûlée annuellement représente 33 200 ha, elle est 2,3 fois moins importante dans la seconde partie de la période (1991 à 2008) avec environ 14 000 ha. L'année 2008 présente un des meilleurs bilans depuis 1973 en matière de surface brûlée (à l'exception de l'année 1996 particulièrement pluvieuse) : 3 603 ha brûlés (10 fois moins que la moyenne des 16 meilleures années de la période 1991-2007).

L'amélioration sensible des résultats liée notamment à une efficacité accrue des dispositifs de prévention (déploiement précoce sur le terrain des dispositifs départementaux de surveillance et de dissuasion) et à une diminution du nombre d'incendies de grande ampleur ne doit cependant pas faire oublier que le risque d'incendie reste très présent. Ainsi malgré la tendance à la baisse des surfaces incendiées observée depuis plusieurs années, des bilans très lourds peuvent encore être d'actualité comme en 2003 avec plus de 60 000 ha brûlés.

Le nombre moyen annuel d'incendies est de 2 650 sur la période 1973-2008 (Figure 1-3). Comparé à l'évolution des surfaces brûlées qui affiche une baisse de presque 60 % entre les deux périodes (1973-1990 et 1991-2008), le nombre annuel d'incendies évolue également à la baisse, mais cette diminution n'est que de 20 % à peine passant de 2 925, à environ 2 380. L'année 2008 présente un des meilleurs bilans depuis 1973 en matière de nombre

d'incendies : 1 130 incendies (2 fois moins que la moyenne des 16 meilleures années de la période 1991-2007). Ces bilans ne concernent que les feux de forêt qui sont décrits avec précision dans la base de données Prométhée. Ainsi le nombre d'incendies de forêt est trois fois moins important que celui des feux de l'espace rural et périurbain (8 420 incendies de l'espace rural et périurbain recensés en moyenne chaque année sur la période 1973-2008 comparés aux 2 650 feux de forêt sur la même période).

Mis à part le chiffre exceptionnel de 2008, les chiffres confirment l'importance de maintenir toute la vigilance nécessaire en matière de prévention contre les incendies de forêt. En effet malgré la nette diminution des surfaces incendiées, le nombre d'incendies reste quant à lui élevé, exerçant le maintien d'une pression importante en termes de risque d'incendie.

Même si l'efficacité des dispositifs d'alerte, de surveillance et de lutte contre l'incendie permet aujourd'hui de contenir rapidement les feux et de limiter ainsi leur étendue, une alerte trop tardive, un problème d'accessibilité ou des conditions météorologiques avec des épisodes venteux ou de forte sécheresse peuvent conduire à de nombreux départs de feux simultanés, très difficiles à contenir et générer de grands incendies.

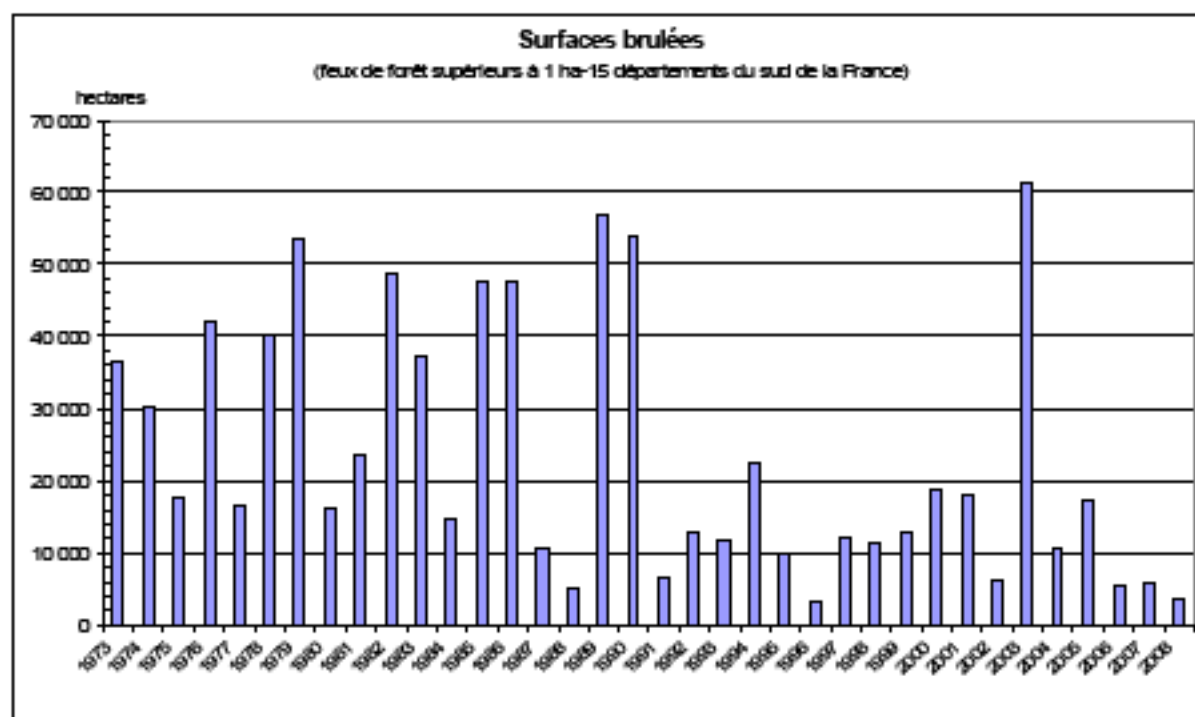


Figure 1-2 Evolution des surfaces brûlées en hectare de 1973 à 2008 (Source Prométhée)

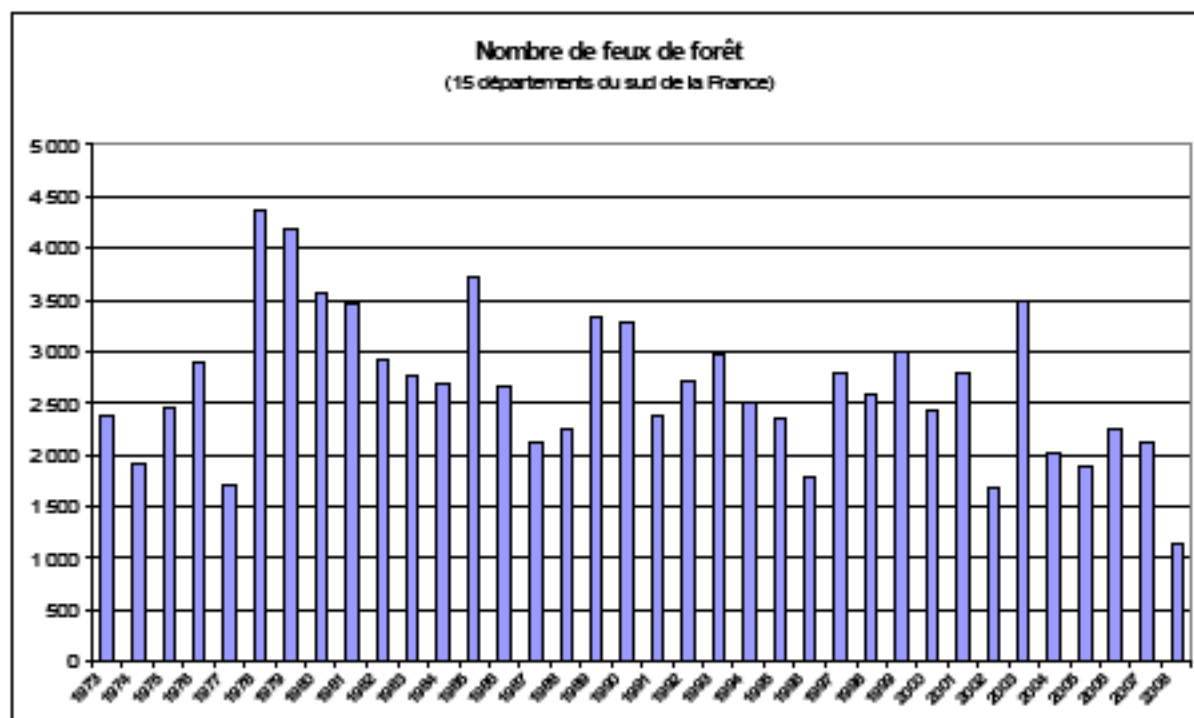


Figure 1-3 Evolution du nombre de feux de forêt de 1973 à 2008 (Source Prométhée)

b. Les causes de départs de feux

Elles sont variées et s'organisent en cinq familles :

- ☛ causes d'origine naturelle : elle concerne les départs dus à la foudre essentiellement ;
- ☛ causes d'origine accidentelle, liées aux installations (lignes électriques, dépôts d'ordures, véhicule, voies ferrées) ;
- ☛ causes d'origine humaine intentionnelle : la malveillance (conflit, intérêt, pyromanie) ;
- ☛ causes d'origine involontaire, liées aux travaux professionnels (agricoles, forestiers) au cours desquels des feux mal maîtrisés peuvent se propager ;
- ☛ causes d'origine involontaire, liées aux particuliers et leurs imprudences (travaux, loisirs).

Ces causes restent toujours très difficiles à déterminer. Ainsi la part de cause indéterminée se chiffre à 44 % sur la période 1998-2006 (source des données : Prométhée - 15 départements du sud-est de la France). Ce taux s'est amélioré passant de 51 % en 1998 à 29 % en 2006 et devrait encore diminuer si les efforts engagés se poursuivent avec notamment la mise en œuvre d'équipes pluridisciplinaires spécifiques (pompier, forestier, gendarme) chargées de déterminer les causes de départ de feu à l'appui de preuves physiques recueillies sur le terrain et l'élaboration de nouveaux guides techniques pour améliorer cette connaissance des causes (Long et al., 2008).

La Figure 1-4 illustre la répartition moyenne des causes sur la période 1998-2006. Ainsi 95 % des départs de feu sont d'origine anthropique, seuls 5 % des départs ont une origine naturelle (foudre). Parmi ces causes anthropiques, la malveillance représente 23 % - il s'agit souvent de pyromanie ou de manifestations liées à des conflits ou des intérêts -, les imprudences dues aux activités de travaux et de loisirs représentent une part tout aussi importante soit 23 %. Enfin s'ajoutent les causes accidentelles pour 5 % des cas.

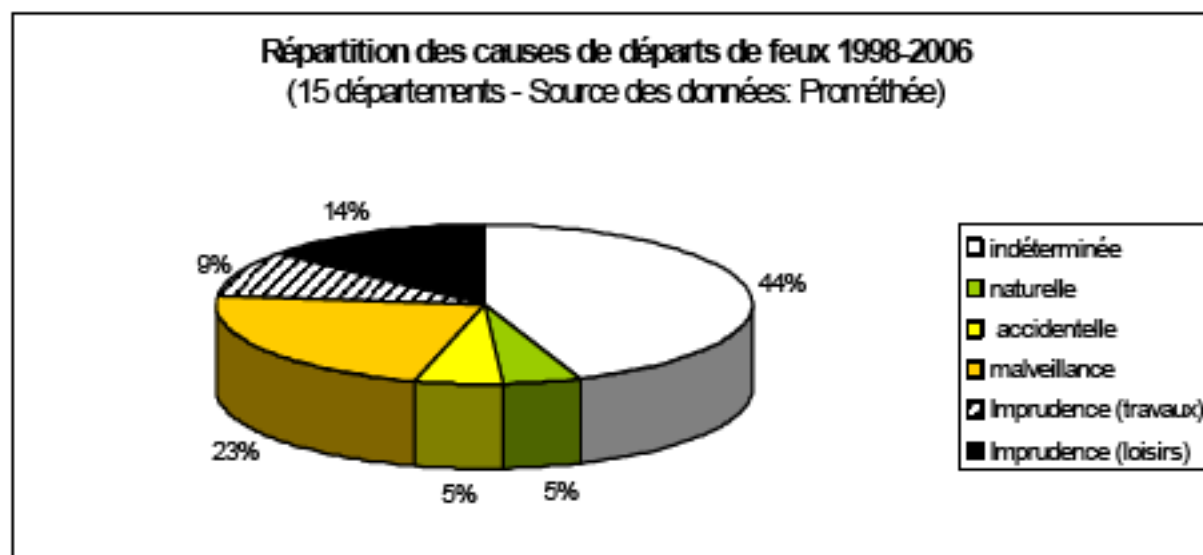


Figure 1-4 Répartition des causes de départ de feu sur la période 1998-2006 (Source Prométhée)

1.3 Le risque d'incendie

1.3.1. Définition du risque

C'est la superposition spatiale de l'extension d'un phénomène naturel et d'un territoire anthropisé qui crée le risque naturel. De nombreuses définitions du risque d'incendie existent (FAO, 1986 ; Vasconcelos, 1995 ; Velez, 1998b ; Bachmann et Allgower, 2001, Bianchi et al., 2002, Carrega, 2003, 2007, tous cités dans Camia et al., 2004). Dans la pratique, risque et aléa sont fréquemment confondus. Backmann et Allgöwer (2001), dans une synthèse bibliographique sur les termes employés en matière de feux de forêt, indiquent que l'emploi inapproprié des termes aléa, danger, risque... peut occasionner des incompréhensions pouvant avoir des conséquences fatales, particulièrement dans le cas d'une application à une prise de décision. Malgré un effort de clarification de la définition du risque d'incendie (Marzano et al., 2006), il existe toujours de nombreuses définitions à la fois pour l'aléa (*hazard*) et le risque (*risk*) (Hardy, 2005 ; Camia et al., 2004).

La définition qui prévaut cependant est celle qui définit le risque comme le résultat de l'interaction entre un aléa et une communauté vulnérable. Il se traduit par l'équation : $\text{risque} = \text{aléa} * \text{vulnérabilité}$, mettant ainsi en relation ces trois concepts (Chen et al., 2003). Cette équation établit une relation fondamentale importante entre l'environnement humain et naturel. Elle offre une perspective holistique pour l'évaluation du risque qui peut être définie différemment selon des contextes variés (Chen et al., 2003). Le risque d'incendie recouvre ainsi : d'une part la probabilité qu'un événement se produise, l'aléa et d'autre part les conséquences particulières découlant de cet événement, la vulnérabilité (Blanchi et al., 2002 ; Jappiot et al., 2000). Blanchi et al. (2002) proposent même de définir chacune de ces deux composantes en éléments imbriqués du risque appliqué à l'incendie de forêt qui apparaissent ainsi dans la Figure 1-5. Comme l'aléa et la vulnérabilité sont distribués spatialement, le risque est de fait, de nature spatiale et son évaluation doit prendre en compte à la fois le degré de risque et ses variations spatiales (d'après Emmi et Horton 1995 cités par Chen et al. 2003).

RISQUE					
Aléa				Vulnérabilité	
Occurrence		Intensité		Enjeu	Parade
Probabilité d'éclosion	Probabilité d'incendie	Surface menacée	Intensité de l'incendie		

Figure 1-5 Définition du risque d'incendie

a. *Aléa*

En référence à Blanchi et *al.* (2002) et Bachmann et Allgower (2001), l'aléa se définit comme « la probabilité qu'un phénomène naturel d'intensité donnée se produise en un lieu donné » comme le présente la Figure 1-5 (Jappiot et *al.*, 2000). Il est donc lui-même fonction de deux éléments : l'occurrence qui se caractérise par une probabilité d'éclosion et une probabilité d'incendie (probabilité qu'un incendie se propage en un lieu donné) et l'intensité. Ces deux éléments dépendent des facteurs naturels et anthropiques qui conditionnent le développement du phénomène, qui pour l'incendie sont définis au paragraphe 1.1.2.

Enfin en matière d'incendie de forêts, il est devenu d'usage de considérer deux aspects de l'aléa : le premier se réfère au « risque naturel », où l'aléa est, comme pour les autres phénomènes naturels, la combinaison entre probabilité d'incendie et intensité de l'incendie (on parle alors d'aléa subi) et le second se réfère au « risque technologique », où l'aléa est, comme pour les accidents industriels, la combinaison entre probabilité d'éclosion et surface menacée (on parle alors d'aléa induit) (Blanchi et *al.*, 2002).

b. *Vulnérabilité*

La vulnérabilité se définit le plus communément comme le degré de perte d'un élément donné, ou d'un ensemble d'éléments, engendré par un phénomène donné d'un niveau d'intensité donné (Coburn et *al.*, 1994 ; Cutter et *al.*, 1996 ; Dilley et Boudreau, 2001 cités dans Wilson et *al.*, 2005). Elle correspond ainsi aux « conséquences prévisibles d'un phénomène naturel d'intensité donnée sur les enjeux présents » (Jappiot et *al.*, 2000). Dans le cas de l'incendie, comme l'illustre la Figure 1-5, la vulnérabilité est fonction de deux éléments : les enjeux et les parades (Blanchi et *al.*, 2002). Les enjeux sont les personnes, les biens, les activités qui peuvent être affectés par l'incendie, les parades sont les moyens mis en œuvre pour diminuer les dommages comme les actions de prévention (débroussaillage, coupure de combustible) ou les plans de lutte. Coburn et *al.* (1994) insistent sur le fait que la distinction entre cette définition de la vulnérabilité et celle du risque est importante parce que le risque combine les pertes attendues pour tous les niveaux d'intensité du phénomène tout en prenant en compte la probabilité d'occurrence du phénomène. Mais Wilson et *al.* (2005) proposent une définition plus large de la vulnérabilité qui intègre d'autres éléments que les seuls, enjeu et parade de la Figure 1-5. Elle intègre les trois dimensions : exposition, intensité et impact. L'exposition est mesurée comme la probabilité qu'un phénomène menaçant affecte un espace à un moment donné. L'intensité se réfère à la magnitude, la fréquence et la durée du phénomène (Hardwood 2000 cité dans Wilson et *al.* 2005). Enfin l'impact fait référence aux effets du phénomène sur les enjeux. Cette notion d'intensité est également perceptible dans Jappiot et *al.* (2009).

La vulnérabilité peut aussi être appréhendée en termes de capacité qu'a un objet ou un ensemble d'objets (naturels ou anthropiques) à supporter les dommages, les conséquences négatives résultant de l'exposition à un phénomène (D'Ercole, 1998) ou qu'a une personne ou un groupe de personnes à les anticiper et les supporter (Blaikie et al., 1994).

Enfin la vulnérabilité peut être définie comme « un système qui considère un grand nombre de variables (naturelles et humaines) dont la dynamique spatiale et temporelle peut générer des situations qui peuvent s'avérer plus ou moins dangereuses pour une société exposée à un phénomène » (D'Ercole, 1996). Dans ce cas il s'agit de s'intéresser aux facteurs de vulnérabilité.

A travers ces différentes approches, il est évident que la définition de la vulnérabilité fait principalement référence aux impacts d'un phénomène sur les enjeux et que la vulnérabilité exprime le niveau d'effet prévisible d'un phénomène sur les enjeux.

1.3.2. *Risque d'incendie et aménagement du territoire*

Le risque d'incendie de forêt est une réalité en région méditerranéenne française, son intégration dans la gestion et l'aménagement du territoire est devenue incontournable. Cette intégration du risque doit s'appuyer sur des actions conjointes : (1) de gestion et de protection des massifs forestiers à travers leur aménagement (par exemple, Plan Intercommunal de Débroussaillage et d'Aménagement Forestier (PIDAF) prévoyant voies d'accès adaptées à l'intervention, signalétique en conséquence, réserves d'eau, débroussaillage), (2) de planification et de réglementation pour maîtriser l'urbanisation avec la prise en compte du risque d'incendie dans l'aménagement des zones urbaines (par exemple, Plan de Prévention du Risque Incendie de Forêt (PPRIF)) et, (3) de maîtrise de l'utilisation du foncier localement pour la protection ou la mise en valeur d'espaces menacés par un risque d'incendie de forêt. Différents outils existent pour intégrer le risque feux de forêt dans la gestion et l'aménagement du territoire. Ils sont nombreux, issus du Code forestier, du Code de l'environnement et du Code de l'urbanisme, et ont des objectifs différents. Mais pour une intégration réussie, l'évaluation spatiale du risque d'incendie et sa cartographie sont une des composantes nécessaires. Et cette évaluation du risque doit s'orienter vers une approche plus globale.

Cette recherche d'une approche intégrée d'évaluation du risque est développée par Chen et al. (2003) qui insistent sur la nécessité d'intégrer des données de trois natures : des données physiques environnementales, des données socio-économiques mais aussi de prendre en compte des données de type gestion issues de la législation ou autre ... Ils en proposent un schéma conceptuel qui adapté aux feux de forêt se traduit par la Figure 1-6, le SIG étant l'outil dédié à ce genre d'intégration.

La voie de l'approche multicritère d'aide à la décision est également intéressante car elle peut être considérée comme un moyen de combiner et transformer des données géographiques en une décision notamment à travers l'étude de scénarios (Malczewski, 1999). Lapucci et al. (2005) ont mis en œuvre cette méthode pour l'évaluation du risque incendie de forêt et ont développé un instrument permettant de définir des scénarios d'incendie utiles en termes de lutte contre l'incendie mais aussi d'interventions préventives pour protéger les populations et biens collectifs en cas d'incendie.

Malgré un effort vers une approche globale de l'évaluation du risque nécessaire pour une meilleure intégration de ce risque dans la gestion et l'aménagement du territoire, ces développements ne s'affranchissent pas d'une prise en compte de l'aléa d'une part, et de la vulnérabilité d'autre part, et surtout de leur combinaison difficile.

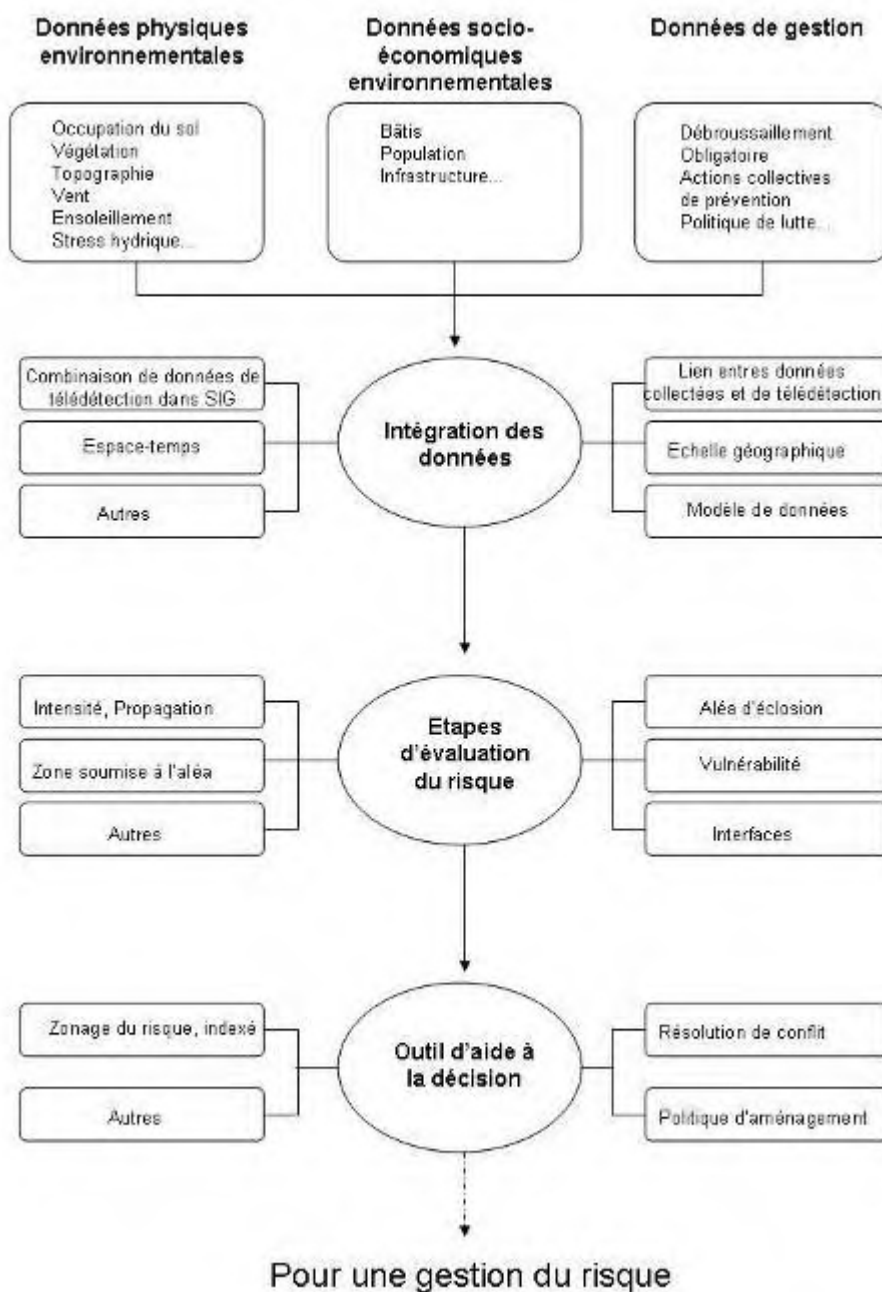


Figure 1-6 Schéma conceptuel d'une approche intégrée pour l'évaluation du risque d'incendie de forêt adapté de Chen et al. (2003)

Chapitre 2. Problématique de recherche

Le contexte méditerranéen présenté dans le chapitre précédent souligne l'importance du phénomène incendie de forêt et du risque qu'il génère sur l'ensemble du territoire, pour ses hommes et leur environnement. L'évolution prévisible de ce risque à moyen terme n'est guère favorable du fait des dynamiques actuelles d'occupation du sol dans les territoires concernés, et des conditions de sécheresse attendues, plus sévères qu'aujourd'hui, liées au changement climatique. Face à ces constats, la seule approche efficace consiste en une meilleure intégration du risque dans l'aménagement du territoire : il faut apprendre ou ré-apprendre à vivre avec le feu. C'est dans ce contexte général que se situe le travail de thèse.

2.1 Contexte scientifique

Sur le plan du contexte scientifique, la thèse a été réalisée au sein de l'école doctorale Espaces, Cultures, Sociétés dans la mention doctorale Géographie, avec la spécialité « Structures et dynamiques spatiales ». Elle a été encadrée par Jean-Paul Ferrier, professeur émérite de l'université de Provence d'Aix-Marseille I. Dans le cadre de cet encadrement, j'ai été invitée à participer et à contribuer à la réflexion du groupe de recherche intitulé « Discontinuités, interfaces et dynamiques spatiales urbaines » fondé en 2002 par l'UMR Espace dont l'Université de Provence fait partie. L'objectif assigné à ce **groupe Interface** animé par Laurent Chapelon était de conduire une réflexion sur le positionnement conceptuel des interfaces, discontinuités et frontières en géographie. Une approche épistémologique issue de la réflexion de ce groupe a été développée sur l'objet géographique « interface » et a abouti à la publication d'un article intitulé « L'interface : contribution à l'analyse de l'espace géographique » dans la revue *L'Espace géographique* en 2008 (Groupe de recherches « interfaces », 2008). Par ailleurs j'ai été invitée à participer à la réflexion du **groupe Géogouvernance** piloté par Michelle Masson-Vincent, un groupe de recherche intersites co-animé par Dominique Bley et Nathalie Dubus, intitulé : « Géo-gouvernance : l'utilité sociale de l'analyse spatiale » (Gouvernance et citoyenneté dans une gestion durable des territoires). L'objectif de ce groupe est de développer une approche théorique conceptuelle portant sur la gouvernance, d'afficher la perception des géographes sur les termes gouvernance et géogouvernance. Ma participation est intervenue au stade de la définition de la géogouvernance et de la mise en application du concept de géogouvernance à des cas concrets.

Le laboratoire d'accueil qui m'a permis de développer les travaux de thèse est l'Unité de recherche "Ecosystèmes méditerranéens et Risques" du Cemagref d'Aix-en-Provence dont un des axes stratégiques scientifiques est l'évaluation et la cartographie du risque d'incendie de forêt. Au sein de l'unité, le travail a été suivi par Marielle Jappiot, ingénieure de recherche de l'unité de recherche. Dans cette unité, une recherche menée au sein du Groupement d'Intérêt Scientifique Incendie a permis de clarifier le vocabulaire et le concept de risque (Jappiot et al., 2000). Les travaux des chercheurs se sont articulés essentiellement autour de l'évaluation de l'aléa : approche analytique développée sur la description et le rôle des différents facteurs participant à la probabilité d'éclosion et à la probabilité d'incendie (Mariel et Jappiot, 1997), poursuivie par une description fine des facteurs vent (Colin, 2006) et végétation (Lampin et al., 2003). Parallèlement une étude portant sur la caractérisation de types d'interfaces espaces forestiers/espaces anthropiques en milieu méditerranéen a été initiée en 2000 (Follin, 2000). Elle a conduit à traiter des données de télédétection : classification d'images de résolution moyenne (30m) telle que Landsat TM puis d'images de très haute résolution comme les

orthophotos de la BD Ortho® de l'IGN (0,5 m de résolution). Mais le manque de précision des premières liée à leur moyenne résolution ne permettait pas de traduire la complexité du territoire au niveau des interfaces et l'hétérogénéité radiométrique des secondes présentait un obstacle dans la reproductibilité des traitements d'images et de classification sur de grandes surfaces (Jappiot et al., 2002; Borgniet et al., 2004). L'arrivée d'images de très haute résolution spatiale et de grande étendue (0,6 m à 2,5 m pour les images satellites Quickbird ou Spot 5) a ouvert de nouvelles perspectives et permis des classifications plus précises d'image. Des indices empruntés à l'écologie du paysage ont pu être calculés pour qualifier l'organisation spatiale du territoire présentant alors un grand intérêt (Jappiot et al., 2002). Mais beaucoup d'entre eux sont apparus trop complexes pour être interprétés, d'autres n'avaient pas de représentation spatiale et les critères retenus en trop grand nombre produisaient des typologies d'interface difficiles à exploiter. L'effort s'est concentré sur la sélection de quelques critères (diversité, agrégation, densité), les plus pertinents possibles et à représentation spatiale (Lampin, 2004a ; Long, 2004).

Le développement des travaux de la thèse s'est appuyé sur plusieurs conventions de recherche : européenne (6^{ème} PCRD : Programme Fire Paradox FP6-018505), nationale (Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durables, Ministère de l'Agriculture et de la Pêche), régionale (Conseil Régional PACA) et départementale (Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt du Var). Les collectivités locales sont parties prenantes pour l'application opérationnelle des méthodes envisagées. Elles sont également conscientes de l'intérêt des représentations spatiales dans l'aide à la décision : la carte permet de simplifier les données et de mieux les interpréter. De plus, elle favorise une appropriation collective d'un enjeu. L'Etat est également intéressé par la proposition de méthodes de cartographie de niveaux de risque dans le cadre d'une généralisation de politiques d'affichage du risque.

Ces programmes ont contribué au financement des travaux prévus et à fédérer d'autres laboratoires et équipes de recherche sur le thème abordé.

2.2 Objet de la recherche

L'objet de la recherche est de **caractériser la relation entre l'organisation spatiale d'un territoire et le risque d'incendie**. Il s'inscrit dans le contexte d'une meilleure prise en compte de la prévention du risque d'incendie dans l'aménagement du territoire en région méditerranéenne française.

2.2.1. L'évaluation du risque d'incendie

Le risque d'incendie de forêt peut être évalué selon deux échelles de temps : à court terme sous l'angle du risque temporel et/ou à long terme sous l'angle du risque spatial.

- Dans le premier cas, l'occurrence et la propagation d'un incendie sont influencées par une évolution très rapide dans le temps, de facteurs liés aux conditions climatiques et aux caractéristiques de teneur en eau des végétaux (stress hydrique des végétaux, forte sécheresse, vents violents...) (Jappiot et al., 2009 ; Camia et al., 2004). L'estimation du risque requiert alors une information mise à jour quotidiennement telle que la température, le vent, l'humidité relative et les précipitations. Son intérêt est de permettre de fixer un niveau d'alerte et de positionner des moyens de lutte sur le terrain pour combattre au mieux et au plus vite le départ d'un feu ou le front de flammes d'un incendie. De nombreux travaux contribuent à améliorer l'évaluation temporelle des facteurs de risque : par exemple des travaux relatifs à l'estimation de la teneur en eau de la végétation combustible directement liée à son inflammabilité

(Valette et Moro, 1990), par traitements de télédétection, couplés ou non à l'emploi du SIG, et calculs d'indices variés sur la végétation (Mantzavelas et al., 2008 ; Chuvieco et al., 2003 ; Camia et al., 2004 ; Deshayes et al., 1998 ; Prosper-Laget et al., 1998), mais aussi des travaux relatifs à la prise en compte de variables climatiques et météorologiques (auteurs cités dans Camia et al., 1999 ; Carrega, P., 2003).

- Dans le second cas, l'occurrence et la propagation d'un incendie sont influencées par des facteurs structuraux (Chuvieco, 1999) qui n'évoluent pas, sinon très lentement (pente, exposition, structure de végétation combustible, urbanisation...) (Jappiot et al., 2009 ; Camia et al., 2004). Autrement dit, les facteurs de risque pris en compte, peuvent être considérés comme statiques tout au long d'une saison de feu. L'estimation du risque requiert des informations relevant de la structure de la végétation, de la topographie et du contexte climatique. L'échelle d'évaluation peut être globale et concerner des territoires très vastes. Dans ce cas, la cartographie du risque, à l'échelle internationale par exemple, est un support pour l'établissement de directives générales et le fondement de stratégies visant à renforcer la coopération internationale (Chuvieco, 2003). L'échelle d'évaluation peut être locale à des niveaux régionaux ou des niveaux moindres. Dans ce cas, la cartographie du risque a pour objectif une gestion du risque plus opérationnelle. De nombreux travaux contribuent à améliorer l'évaluation spatiale des facteurs de risque : par exemple des travaux relatifs à la détermination des modèles de combustible et leur cartographie (Marell et al., 2008 ; Long et al., 2007a,b ; Ganteaume et al., 2008 ; Lampin et al., 2004b), des travaux sur les effets du vent (Colin, 2006) et sur les facteurs socio-économiques (Camia et al., 2004).

Les travaux de thèse s'inscrivent dans le contexte d'une meilleure prise en compte de la prévention du risque d'incendie dans l'aménagement du territoire en région méditerranéenne française. C'est la composante spatiale du risque d'incendie à l'échelle locale qui est donc développée dans la thèse.

L'évaluation spatiale du risque d'incendie est importante pour décider, mettre en œuvre et localiser efficacement les actions de prévention prioritaires permettant de réduire ce risque, pour concentrer les efforts de lutte et allouer les moyens correspondants de façon optimale (Brosofske et al., 2007). Il est donc nécessaire de prendre en compte les éléments de risque qui ont une influence sur les niveaux du risque d'incendie (Martinez et al., 2009) en s'appuyant sur une analyse spatiale du territoire. L'occupation de ce territoire et son organisation sont en effet des éléments majeurs de détermination des niveaux de risque d'incendie. L'agencement spatial entre terrains naturels, terres agricoles et zones urbanisées définit le degré de « compartimentage » d'un territoire combustible mais aussi l'importance des zones d'interfaces habitat-forêt qui sont à la fois source d'éclosion et lieux de vulnérabilité maximum. La nature et l'organisation des équipements de prévention et de lutte modifient la vulnérabilité en constituant les premières parades.

Certes les méthodes d'évaluation spatiale et de cartographie du risque d'incendie en vigueur actuellement intègrent déjà une dimension spatiale. Elles reposent sur le principe de la combinaison de l'aléa avec la vulnérabilité en s'appliquant d'abord à évaluer l'aléa, comme dans la plupart des phénomènes naturels.

L'aléa incendie de forêt étant défini par son occurrence et son intensité est fonction à la fois de facteurs écologiques, physiques et de facteurs socio-économiques (Agee, 1998 ; Turner et Romme, 1994 ; Veblen et al., 2000 ; Brown et al., 2001 ; Blanchi et al., 2002 ; Sturtevant et Cleland, 2007). Son évaluation consiste à recenser les occurrences passées des phénomènes inscrits dans un bassin de risque étudié, à les représenter dans l'espace, à évaluer leur fréquence à un niveau d'intensité donné. Elle exige une forte connaissance du phénomène et

s'appuie traditionnellement sur une approche analytique des facteurs de risque. Elle conduit à développer des approches déterministes ou tantôt empiriques, voire combinées.

Dans le premier cas, des modèles physiques sont développés pour comprendre et reproduire le fonctionnement du phénomène lui-même. Cette modélisation qui cherche à reproduire le comportement du feu, tient compte essentiellement de facteurs physiques du territoire (végétation, topographie, vent, etc). L'organisation du territoire à travers la distribution spatiale des bâtis, des infrastructures, etc, n'est pas prise en compte bien que sans être liée directement au phénomène physique du feu, elle agisse fortement sur le comportement du feu, sa propagation et son intensité.

Dans le deuxième cas, des modèles probabilistes sont appréhendés, non pas pour comprendre en détail le fonctionnement du phénomène, mais pour déceler des paramètres explicatifs grâce à l'exploitation de données décrivant des événements passés. Le modèle explicatif obtenu à partir d'un échantillon représentatif de phénomènes décrits précisément peut être appliqué sur d'autres zones d'étude. Des méthodes peuvent aussi être construites sur une modélisation statistique faisant ressortir certaines fonctions du risque mais très peu intègrent des données humaines qui sont pourtant fondamentales dans le comportement du feu. En effet alors que des variables physiques sont habituellement utilisées et associées au risque d'incendie, des données spatiales liées aux facteurs humains n'existent pas ou sont rarement disponibles (Martell et *al.*, 1987 cités dans Martinez et *al.*, 2009). Relativement peu d'études quantifient directement les influences humaines sur l'occurrence des feux et le régime des incendies actuels et encore moins étudient les aspects spatiaux de la relation (Duncan et Schmalzer, 2004 ; Martinez et *al.*, 2009).

Enfin des modèles peuvent combiner les deux approches, déterministe et empirique. Ainsi l'évaluation de l'aléa s'appuie sur la modélisation physique du feu qui produit des résultats en termes de vitesses de propagation du feu et d'intensité, ou sur la modélisation statistique avec le développement de modèles probabilistes (Jappiot et *al.*, 2000).

Si ces méthodes d'évaluation de l'aléa sont particulièrement maîtrisées et relativement objectives, les méthodes d'**évaluation de la vulnérabilité** relèvent davantage de l'expression de points de vue. Wilson et *al.* (2005) ont dressé l'inventaire des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité développées dans la littérature. Ils les ont classées en quatre groupes principalement selon le type de données utilisées. Toutes ces méthodes estiment l'exposition au phénomène et quelques unes mettent aussi en avant l'intensité et l'impact. Mais leur limite est qu'elles ne sont pas capables de rendre compte des facteurs qui atténuent ou réduisent les menaces. Ces facteurs sont à la fois difficiles à interpréter spatialement et très dynamiques.

L'approche la plus avancée est la mesure de l'endommagement correspondant à la mesure des conséquences de la survenance d'un aléa donné sur un élément vulnérable (D'Ercole, 1998). Elle conduit à exprimer la vulnérabilité d'un enjeu par un pourcentage de perte pour un niveau d'intensité donné, d'évaluer des niveaux d'endommagement possible puis de traduire la vulnérabilité en niveaux d'objectif de protection (Manche, 2000).

Pour le risque d'incendie, l'évaluation de la vulnérabilité se traduit en général par deux approches : l'une mesure les effets du feu sur les écosystèmes et leur résilience par analyse du comportement du feu et l'autre estime la valeur des enjeux naturels et humains, endommagés par le passage du feu. La première se traduit par une mesure de l'intensité d'un feu sur des enjeux (végétation, infrastructures...) qui peut alors être complétée par une estimation du dommage potentiel que le feu peut causer selon le niveau d'intensité. L'impact est en effet conditionné par le niveau de l'intensité (Hardwood 2000 cité dans Wilson et *al.*, 2005) ce que traduit l'échelle d'intensité établie pour les incendies de forêt (Lampin et *al.*, 2002a, 2002b)

dont l'objet est d'assigner un état de dommage, une mesure de l'impact d'un incendie sur un ensemble d'enjeux comme la végétation, les infrastructures bâties... en lien avec différents niveaux d'intensité. La seconde approche s'applique à élaborer un indice de vulnérabilité d'une surface menacée par un incendie prenant en compte la vulnérabilité des populations, la vulnérabilité des structures bâties et la vulnérabilité de l'environnement écologique, paysager et des sols (Bovio et al., 2006). Une mesure du degré de vulnérabilité a été définie comme une « mesure agrégée du bien-être humain intégrant des données environnementales, sociales et économiques exposées à une série de perturbations » (San-Miguell-Ayanz et al., 2003). Elle considère plusieurs facteurs comme l'érosion potentielle des sols, le niveau de protection associé à la fragilité, rareté et intérêt de l'environnement et la distance au bâti dans lesquels des vies humaines et des biens sont endommageables. Comme pour les autres risques naturels, la vulnérabilité reste difficile à évaluer spatialement.

La plupart des méthodes d'évaluation du risque naturel qui s'appuient sur le modèle théorique « risque = aléa * vulnérabilité » pèchent dans leur mise en œuvre du fait de la difficulté d'évaluer la composante vulnérabilité. Elles conduisent en général à une synthèse aléa-enjeux, caractéristique du niveau de risque, souvent délicate et difficile. Si l'on s'intéresse aux éléments du risque qui composent chacune des deux composantes, aléa et vulnérabilité, on constate qu'ils sont plus ou moins imbriqués : la notion d'intensité qui est fonction de l'aléa (Blanchi et al., 2002), peut aussi être élément de la vulnérabilité (Wilson et al., 2005 ; Jappiot et al., 2009). La surface « de végétation » menacée qui intervient dans l'estimation de l'aléa est aussi un enjeu à défendre en cas d'incendie et à ce titre est un élément de la vulnérabilité. Il apparaît difficile de raisonner en dissociant l'aléa de la vulnérabilité. Par ailleurs les méthodes en vigueur concernent davantage l'évaluation de l'aléa que la vulnérabilité (Chen et al., 2003). Ces méthodes sont en général lourdes et longues notamment du fait de la difficulté à cartographier le combustible (Keane et al., 2001) pour en déduire une intensité possible du feu. La carte du risque d'incendie peut avoir une durée de validité courte du fait de l'évolution rapide de l'occupation du sol.

Sans remettre en cause les définitions (cf.1.3.1), il semble opportun de s'affranchir de ces deux notions (aléa et vulnérabilité) par une approche globale du risque s'intéressant directement à l'interaction et la combinaison des éléments du risque.

Comment s'affranchir de la double entrée aléa-vulnérabilité pour évaluer le risque d'incendie ? Comment développer une approche globale du risque ? Comment proposer une cartographie du risque d'incendie qui soit simple et performante, susceptible par ailleurs d'évoluer conjointement à la dynamique du territoire ?

2.2.2. L'interface

a. L'interface en géographie

Parallèlement la géographie s'intéresse à un objet particulier qui est l'« Interface » cherchant à en définir le concept. Dans leur article écrit en commun et publié dans l'*Espace Géographique* en 2008 (Groupe de recherches « interfaces », 2008), les chercheurs du Groupe de recherches « interfaces » rappelle la place de l'interface en géographie.

« Par essence, l'espace géographique est une étendue différenciée. La différenciation spatiale (Ferrier, 1984) constitue le fondement de la géographie... [...]. Longtemps, la notion de contact a été l'un des éléments de réflexion principal de la démarche « classique » de géographie régionale qui définissait des régions homogènes par continuité spatiale ou par ressemblance fonctionnelle. Aujourd'hui, le terme de contact est repris dans les définitions de

l'interface en mettant l'accent sur les interactions spatiales. Ainsi, Brunet (1993) définit l'interface comme un « plan ou une ligne de contact entre deux systèmes ou deux ensembles distincts » et Lévy et Lussault (2003) comme « l'une des interspatialités caractérisée par la mise en contact de deux espaces ». Parfois aussi, l'interface a permis d'explicitier des interrelations localisées à l'œuvre dans les territoires entre le monde physique et vivant – la nature – et la réalisation des activités humaines – la culture (Ferrier, 1984) » (Groupe de recherches « interfaces », 2008).

L'ambition du groupe de recherches « interfaces » est, tout en réaffirmant la place des interfaces au cœur des systèmes spatiaux (Brunet, 1967; *l'Espace géographique*, 1997, 1998), de démontrer que, par ce concept d'interface, une nouvelle lecture de l'espace et des processus qui s'y déroulent est possible et que de nouvelles compréhensions des organisations spatiales, des disparités et complémentarités qu'elles engendrent devraient émerger. « Dans un monde où [...] la notion d'unité spatiale tient encore une grande place, une entrée par les interfaces, et les interrelations qu'elles facilitent, pourrait être de nature à mieux éclairer la compréhension de l'organisation de l'espace et de ses dynamiques actuelles » (Groupe de recherches « interfaces », 2008). C'est là tout l'intérêt d'une approche par les interfaces pour l'analyse des structures et des dynamiques spatiales en géographie. Le concept « interface » a alors été appliqué à l'interface habitat-forêt avec l'objectif de démontrer tout l'intérêt d'une telle approche par les interfaces habitat-forêt pour l'analyse du risque d'incendie.

b. *Le cas des interfaces habitat-forêt*

Les interfaces habitat-forêt causent de sérieux problèmes en termes de gestion du territoire et surtout en termes de gestion du risque d'incendie (Davis, 1990 ; Avalapati et al., 2005). Aux USA, Canada et Australie, l'intérêt pour les interfaces habitat-forêt est apparu après les feux de forêt de 1985, et a augmenté avec le développement de ces interfaces (Davis, 1990). Cette attention particulière aux interfaces habitat-forêt est liée au fait que les maisons et les vies humaines y sont très vulnérables au feu et que les causes humaines de départ de feu y sont très fréquentes (Rundel et King, 2001; USDA et USDI, 2001 cités dans Syphard et al., 2007a ; Cardille et al., 2001). Dans les pays européens, plus spécifiquement dans le bassin méditerranéen, les interfaces constituent un contexte spatial très complexe qui soulève également de nombreuses questions interdépendantes relatives au social, à la gestion de l'espace naturel et aux feux de forêt. Les études sur le sujet ont commencé, il y a 10 à 15 ans, du fait des dommages sérieux que causaient les incendies, à l'environnement, aux biens et aux populations (Velez, 1992, 1997).

En Europe comme aux USA, Canada ou Australie, les activités humaines ont contribué peu à peu à fragmenter le paysage rural et forestier qui s'est ainsi retrouvé cerné, voire mélangé aux zones de développement urbain et économique. De façon générale, ce développement urbain, situé au cœur, ou à proximité, d'une végétation « naturelle », pose une menace majeure sur l'environnement (Johnson, 2001; Radeloff et al., 2005a). En effet il génère des aires où des conflits homme-environnement apparaissent, tels que la destruction de maisons par le feu de forêt, la fragmentation des habitats naturels, l'introduction d'espèces exotiques et le déclin de la biodiversité (Radeloff et al., 2005a). Il crée des zones de contact qui marquent des ruptures plus ou moins brusques dans l'espace entre des parties où dominent les processus anthropiques et d'autres toujours dominées par des processus naturels (forêts, garrigues...). L'importance des interfaces habitat-forêt s'est accrue ces dernières années du fait de leur développement en tant qu'unités de paysage à travers le monde (Stewart et al., 2003), ce développement étant principalement due à la croissance des zones bâties considérablement

forte durant ces dernières décennies (Stewart et *al.*, 2003, Radeloff et *al.*, 2005b). Les paysages méditerranéens d'aujourd'hui résultent d'une utilisation passée des terres déterminée non seulement par des facteurs socio-économiques et culturels mais aussi par les caractéristiques naturelles du paysage (Gonzalez-Abraham et *al.*, 2007), les interfaces habitat-forêt en sont le résultant prégnant.

Aux USA, le terme interface "wildland-urban interface" est presque exclusivement utilisé dans le contexte des feux de forêt (Stewart et *al.*, 2007). Ces interfaces sont devenues des secteurs prioritaires pour la maîtrise des incendies (Stephens, 2005 cité dans Zhang et Winberly, 2007) car à haut risque (Collins, 2005). Au fil des années, la végétation herbacée et les sols, autrefois en culture, ont été remplacés par d'importantes accumulations de végétations combustibles par recolonisation, les zones forestières sous-exploitées ou non parcourues par le feu depuis des années ont entraîné une accumulation de combustibles forestiers morts ou vivants. Cette végétation de type « accrus de bois » a typiquement établi une couche verticale de combustibles mais aussi une couche horizontale continue au sein même d'une couche de combustible déjà prédominant (Iversen et VanDemark, 2006). Cette accumulation de biomasse combustible s'est trouvée conjointement au contact d'activités humaines du fait de la dynamique urbaine. Les interfaces sont alors de plus en plus menacées par les feux créant ainsi un phénomène inquiétant : le feu d'interface (Pyne et *al.*, 1996). Ces feux d'interface sont fréquemment associés aux grands feux et dans la plupart des cas au développement de feux de cimes (Alexander et *al.*, 1998) qui peuvent être meurtriers (Davis, 1990). Par ailleurs, les interfaces habitat-forêt constituent un milieu artificiel dans lequel les structures bâties et la végétation naturelle ou introduite (comme des genévriers d'ornement, des cyprès, des acacias) sont encore placées dans un contexte naturel : ni les forestiers ni les pompiers ne sont formés ou entraînés à lutter contre un feu de forêt dans cet environnement. Elles sont le lieu où l'incendie détruit le plus les structures bâties (Covington, 2000 cité dans Radeloff et *al.*, 2005b), où les valeurs humaines sont le plus concentrées et soumises au risque par les hommes qui mettent le feu intentionnellement ou non (Syphard et *al.*, 2008).

Evidemment il y a de nombreuses manières de définir les interfaces habitat-forêt mais l'interface habitat-forêt est le plus communément définie comme une aire où les zones urbaines sont en contact et interagissent avec les zones rurales incluant les bordures des grandes villes et petites agglomérations (Vince et *al.*, 2005), comme une zone où des dispositifs de développement humain se mélangent avec la végétation naturelle (Collins, 2005), comme une aire où les habitations ou autres activités humaines sont situées dans, ou au contact d'une végétation combustible (Summerfelt, 2001; Sanchez-Guisandez et *al.*, 2003). Certains auteurs font une distinction entre d'une part « l'interface » qui constitue une aire où les maisons et la végétation combustible sont en contact selon une limite bien définie et d'autre part « l'intermix », qui constitue une aire où les maisons et la végétation combustible sont en contact selon une limite mal définie (Davis, 1990; USDA-USDI, 1991 cité dans Nowicki, 2002; Radeloff et *al.*, 2005a). Le terme de communauté d'interface apparaît également avec la définition suivante « la communauté d'interface habitat-forêt » existe là où les hommes et le développement de ses activités sont au contact ou s'interpénètrent avec la végétation combustible (USDA-USDI du registre fédéral, 2001). En France, dans le cadre de la gestion de coupures de combustible dans les interfaces, on emploie le terme interface habitation-forêt (ou urbanisation-forêt) qui se définit comme une bande 50 à 100 m séparant l'espace naturel combustible de l'espace urbain (SUAMME, 2007) - cet espace urbain comprenant la ceinture de 50 à 100 m soumise à obligation légale de débroussaillage. L'interface forêt-habitat reste de façon très générale définie comme un espace dans lequel le système urbain et le système naturel sont en interaction (OCR-INCENDI, 2008).

Conceptuellement, l'interface habitat-forêt est la conjonction de caractéristiques d'habitations et de végétation (Stewart et al., 2007). La présence humaine est alors mesurée par la densité des bâtis et autres infrastructures (SilvisLab, 2006; Lampin et al., 2006a, 2006b; Caballero, 2004; Camia et al., 2003) ou par la densité de la population (Kamp et Sampson, 2002). La végétation naturelle est évaluée dans la plupart des cas en utilisant le Système d'Information Géographique (SIG) et la télédétection traitant des images à très haute résolution comme les images aériennes au niveau régional ou local (Camia et al., 2003; Pascual et al., 2003; Jappiot et al., 2002). L'approche peut être davantage paysagère comme dans Galiana et al. (2007) qui au niveau régional, ont développé une approche de caractérisation des interfaces en lien avec les processus d'urbanisation et leurs contextes paysagers. Les méthodes développées, au niveau national ou régional, permettent la localisation et la cartographie des interfaces mais généralement leur objectif est de fournir une aide à l'élaboration de plans de secours d'urgence et d'autoprotection ou encore d'obtenir des informations en termes de dynamique paysagère. En Europe, des zones tampons de 500 m ou 250 m autour des bâtis ont été considérées pour délimiter les interfaces au niveau régional (Caballero et Beltran, 2003; Camia et al., 2003). Aux USA, Radeloff et al. (2005a) et SilvisLab (2006) ont considéré une zone tampon de 2,4 kilomètres autour des bâtis pour délimiter leurs interfaces, distance qui correspond à la distance que les brandons peuvent parcourir en moyenne du front de flamme jusqu'à la toiture d'une maison. Ainsi l'aire délimitée par l'interface inclut la zone exposée au contact des flammes, la zone susceptible d'être affectée par le phénomène de convection et de radiation des flammes (Cohen, 2002, 2003; Nowicki, 2002; Caballero et Beltran, 2003; Southern Forest Alliance, 2003) mais également la zone qui peut être atteinte par les sautes de feu. Récemment Theobald et Romme (2007), Dumas et al. (2008) ont produit une méthode pour cartographier les interfaces au niveau national en utilisant la densité des bâtis.

Malgré les fortes préoccupations que causent les interfaces habitat-forêt, notamment en matière de gestion du territoire et de gestion de l'incendie, les données sur leur localisation sont imprécises et celles sur leur extension sont rares. Comme le soulignent Theobald et Romme (2007) ainsi que Dumas et al. (2008) des cartographies plus détaillées d'interfaces habitat-forêt permettraient d'utiliser les cartes produites à des fins d'activité de gestion et de prévention mais aussi de prospective en matière de développement futur. Le développement d'une méthode efficace pour cartographier précisément les interfaces habitat-forêt serait nécessaire pour la gestion du risque d'incendie.

Comment développer une méthode de caractérisation des interfaces habitat-forêt pour cartographier sur de grandes surfaces et à grande échelle, compatible avec la mise en œuvre au niveau local d'actions de prévention ? La délimitation sur une carte nécessite des choix méthodologiques : quelle définition des interfaces habitat-forêt ? Quels critères pertinents, quantifiables pour délimiter les interfaces habitat-forêt ?

2.2.3. *Caractériser la relation entre l'organisation spatiale d'un territoire et le risque d'incendie*

a. *Analyse du risque vue sous l'angle des départs de feu*

L'importance de la distribution non aléatoire des départs de feu a été reconnue après des études cherchant à prédire ces distributions à grande échelle spatiale (Cardille et al., 2001; Vasconcelos et al., 2001; Diaz-Avalos et al., 2001; Preisler et al., 2004). Brososke et al., (2007) rappellent que les facteurs majeurs influençant l'occurrence des feux sont le climat et

le temps (Cardille et al., 2001; Prestemon et al., 2002), le combustible et les caractéristiques des écosystèmes associés (Van Wilgen et al., 1990; Miller et Urban, 2000 cités dans Brososke et al., 2007; Dimitrakopoulos et Papaioannou, 2001) et la topographie (Romme et Knight, 1981; Engelmark, 1987 cité dans Brososke et al., 2007). Mais Sturtevant et Cleland (2007) démontrent que les départs de feux sont essentiellement liés à l'activité humaine.

L'analyse des données historiques sur les feux a permis généralement d'étudier les tendances en matière de départs de feux mais elle a toujours souffert du manque de données spatiales précises sur les activités humaines, notamment celles au contact des zones forestières (Vega-Garcia et al., 1995 cités in Martinez et al., 2009). Même si certaines de ces activités comme les activités récréatives ou agricoles sont assez faciles à spatialiser du fait de leur relation directe avec des variables biophysiques environnementales, la plupart d'entre elles sont au contraire difficiles à représenter comme celles liées à la pyromanie.

Dans une synthèse bibliographique, Martinez et al. (2009) font état des variables relatives aux facteurs humains fréquemment utilisées pour l'analyse du risque d'incendie. Ainsi les premières études étaient fondées sur l'utilisation de variables le plus fréquemment non spatiales et issues d'enquêtes ou de sondages (Cunningham et Martell, 1976; Altobellis, 1983; Donoghue et Main, 1985 cités dans Martinez et al., 2009). Puis des analyses spatiales ont permis d'établir des relations entre départs de feux et distances aux routes, aux zones habitées, aux voies ferrées, densité des routes, analyses spécifiques bien documentées (Chuvienco et Congalton, 1989; Vega-Garcia et al., 1995 cité dans Martinez et al., 2009; Vasconcelos et al., 2001; Dickson et al., 2006; Genton et al., 2006; Mollicone et al., 2006 cités dans Martinez et al. 2009; Lampin et al., 2006c; Maingi et Henry, 2007; Vasilakos et al., 2007; Yang et al., 2007). Ces études sont fondées sur des analyses statistiques et géographiques utilisant le système d'information géographique qui permet l'intégration de ces facteurs humains dans des indices synthétiques du risque (Yool et al., 1985; Sebastián-López et al., 2002; Chuvienco et al., 2003; San Miguel-Ayanz et al., 2003; Prestemon et Butry, 2005; Morehouse et al., 2006, Sturtevant et Cleland, 2007).

L'hétérogénéité des variables utilisées conduit également au développement de nombreux modèles dont les plus fréquents sont des modèles de régression simple, régression multiple, régression logistique et réseau de neurones. Les modèles logistiques estiment la probabilité d'un événement et permet de décrire la relation de plusieurs variables à une variable

b. *Analyse du risque vue sous l'angle du régime de feu*

La propagation du feu, son intensité, sa taille, son évolution dans un paysage sont influencées par une combinaison de facteurs qui varient dans l'espace et le temps et qui présentent des caractéristiques physiques et biologiques spécifiques (Syphard et al., 2007b). Ce comportement du feu a longtemps été perçu comme un phénomène physique illustré par le classique triangle du feu qui situe le feu comme une fonction du temps, du combustible et de la topographie (Countryman, 1972 cité dans Syphard et al., 2008). De fait ce sont des variables biophysiques qui sont préférentiellement étudiées (Morgan et al., 2001). Mais l'influence humaine sur le régime de feu, défini par le type de feu, l'intensité du feu, la taille du feu, la récurrence du feu... (Christensen, 1985; Agee, 1998) doit aussi être comprise, et encore plus de nos jours, pour répondre aux besoins de gestion du feu (DellaSalla et al., 2004 cité dans Syphard et al., 2007b). Les surfaces brûlées sont surtout fonction du type de végétation (Syphard et al., 2007b), et les conditions biophysiques déterminent principalement le fait que le feu devienne, ou non, un grand feu (Sturtevant et Cleland, 2007). Mais des relations ont aussi été établies par analyse spatiale entre l'extension des espaces brûlés et les distances aux zones de développement, distances aux infrastructures (Syphard et al., 2008), entre taille des feux et densité de population (Sturtevant et Cleland, 2007), densité de bâtis

(Spyratos et al., 2007) ou type d'occupation du sol (Cardille et Ventura, 2001). Syphard et al. (2007b) expliquent par ailleurs une part importante de la variabilité du nombre d'incendies de forêt en termes de récurrence du fait de la distribution spatiale des hommes. Mais les hommes ont aussi une forte influence sur la taille des feux *via* les politiques de lutte (Brosofske et al., 2007 ; Sturtevant et Cleland, 2007). La lutte peut en effet interférer dans les régimes de feu avec des feux de petite taille mais fréquents (Baker 1999 dans Brosofske et al. 2007), les actions de lutte efficaces peuvent aussi augmenter les charges en combustible et leur connectivité (Miller et Urban, 2000 dans Brosofske et al. 2007) augmentant ainsi potentiellement l'étendue et l'intensité des feux (Schoennagel et al., 2004 dans Brosofske et al. 2007).

c. Interfaces habitat-forêt et risque d'incendie

La majorité des études concernant les interfaces habitat-forêt ont été focalisées sur les stratégies de protection des vies humaines et des structures (Cohen, 2000; Winter et Fried, 2000) ou sur l'évaluation du risque en utilisant uniquement des variables biophysiques ou climatiques qui influencent le comportement du feu (Bradstock et Gill, 1998; Fried et al., 1999; Haight et al., 2004). Pourtant Cardille et al. (2001) et Pew et Larsen (2001) ont montré une relation très significative entre l'organisation spatiale des bâtis et la fréquence de départs de feu. Butry et al. (2002) ont souligné que les incendies de forêt apparaissaient le plus souvent dans des zones où les surfaces forestières étaient fragmentées. Mercer et Prestemon (2005) trouvent que les variables socio-économiques jouent un rôle significatif en particulier dans l'éclosion d'un feu et sa propagation, dans une zone fortement marquée par la présence d'interfaces habitat-forêt (Floride). Ils suggèrent que décideurs et gestionnaires devraient tenir compte de telles variables dans leurs prises de décisions en matière de gestion des incendies, en particulier dans les interfaces habitat-forêt. Récemment Syphard et al. (2007a, 2007b) comme d'autres (Martinez et al., 2009; Sturtevant et Cleland, 2007; Badia-Perpinya et Montserrat-Pallares, 2006; Mercer et Prestemon, 2005) ont montré que le risque d'incendie et notamment la fréquence des incendies et les surfaces brûlées, étaient plus élevées à des niveaux intermédiaires d'urbanisation tels que les interfaces habitat-forêt. Ils suggèrent que le risque d'incendie est une fonction de l'organisation spatiale de l'habitat humain et du combustible.

Malgré l'importance de l'influence des facteurs humains sur la distribution spatiale et temporelle des points d'éclosion de feux, déjà soulignée par Chuvieco et al. (1997) et plus récemment par Martinez et al. (2009), celle-ci n'est pas bien connue (Sturtevant et Cleland, 2007). Les variables physiques et humaines ne sont pas suffisamment associées notamment pour l'analyse de l'influence des facteurs sur le régime des feux (Amatulli et al., 2006). Très peu d'études considèrent les variables humaines. Certes l'évolution rapide des activités humaines dans l'espace et dans le temps et la complexité de l'évaluation du comportement humain expliquent aussi souvent pourquoi ces facteurs humains sont rarement pris en compte dans les modèles de risque (Martinez et al., 2009). Tous soulignent alors l'importance d'inclure de telles variables dans les modèles de risque d'incendie. Il est important de comprendre comment les interfaces habitat-forêt elles-mêmes affectent le niveau de risque d'incendie et de quantifier les relations spatiales entre ces interfaces, leur composition, les activités humaines ... et incendie (Duncan et Schmalzer, 2004; Syphard et al., 2007b).

Il apparaît nécessaire de connaître plus précisément les relations entre l'organisation spatiale du territoire, plus particulièrement les interfaces habitat-forêt et le risque d'incendie. Existe-t-il de telles relations ? Si oui, quel type d'interface est le plus sujet aux départs de feu ? Quel type d'interface est le plus vulnérable à l'incendie ?

2.3 Objectifs de la thèse et démarche de recherche

2.3.1. Un objectif double

Pour répondre à cette ambition de recherche qui est de caractériser la relation entre l'organisation spatiale d'un territoire et le risque d'incendie, l'objectif de la thèse est double :

Pour la géographie, il est de contribuer à la construction du concept interface en géographie dans le cadre du Groupe de recherches « Interface », et de démontrer que ce concept, appliqué à l'interface l'habitat-forêt soumise au risque d'incendie de forêt, présente un intérêt pour l'analyse des structures et des dynamiques spatiales.

Pour le risque d'incendie, dont la cyndinique est la science, il est en considérant l'interface habitat-forêt comme un objet géographique nouveau et structurant de l'espace, de démontrer que l'approche par les interfaces habitat-forêt constitue une nouvelle clé d'entrée pour l'évaluation du risque d'incendie. Cet objectif est fondé sur les hypothèses suivantes : que des critères pertinents peuvent être définis pour la caractérisation spatiale des interfaces habitat-forêt et leur cartographie, que le risque d'incendie est lié à la structure spatiale du territoire selon des relations stables et reproductibles, et qu'une simple lecture de la structure du territoire, comprenant notamment la caractérisation des interfaces habitat-forêt, permettra alors une évaluation rapide et fiable des niveaux de risque d'incendie.

2.3.2. La démarche de recherche

Pour répondre à cet objectif de la thèse, la démarche de recherche se décline en trois grandes étapes assignées d'objectifs secondaires.

- 1- Caractériser et cartographier l'interface habitat-forêt reconnu comme un objet géographique (Figure 2-1)

Le premier objectif est de définir précisément l'interface habitat-forêt, objet géographique nouveau dans le contexte du risque d'incendie. Il est de développer une méthode de caractérisation de ces interfaces par une approche d'analyse spatiale, fondamentale en géographie. « La position théorique générale de l'analyse spatiale consiste à proposer une explication partielle, et des possibilités de prévision, quant à l'état et à l'évolution probable des objets ou unités géographiques, à partir de la connaissance de leur situation par rapport à d'autres objets géographiques » (Pumain, 2004). Cette analyse doit définir des caractéristiques homogènes et des valeurs seuils pour délimiter l'objet géographique, le système spatial interface habitat-forêt. Elle doit permettre d'identifier des types d'interface habitat-forêt sur le territoire.

Le second objectif est de cartographier les interfaces habitat-forêt. Souvent considérée comme fondamentale à la recherche géographique, la cartographie permet la représentation d'un espace géographique comme une « combinaison structurale de lieux » (Gusdorf cité dans Zanin, 2004). Elle doit permettre la représentation des types d'interfaces sur le territoire, d'en tracer les contours. Pour le géographe « La carte est le moyen spécifique de la géographie », un « outil » et un « langage », un moyen privilégié d'expression pour communiquer synthétiquement et pour dégager des informations stratégiques utiles aux décideurs. Pour ce décideur ou pour le gestionnaire chargé de l'aménagement du territoire, les limites explicites

de ces interfaces doivent être fixées pour déterminer des politiques de prévention, d'habitat, etc... dans le cadre du risque d'incendie.

Les résultats de cette première étape : L'interface habitat-forêt a été définie de façon précise dans le contexte du risque d'incendie. Une typologie d'interfaces habitat-forêt a été créée. Cette typologie est fondée sur la combinaison de deux critères jugés pertinents pour le risque d'incendie, traduisant des caractères prégnants des milieux naturel et humain. Elle reste délibérément simple pour être interprétable.

Une méthode de cartographie des interfaces habitat-forêt a été développée sous SIG. Cette cartographie est réalisée à une grande échelle et sur de grandes surfaces. Elle peut être interprétée au niveau du bâti, d'un ensemble de bâtis, d'un bassin de risque, d'une commune, d'une communauté de communes, d'un département. Une modélisation informatique de la procédure de cartographie est en cours de développement pour permettre une production de cartes d'interface habitat-forêt qui soit la plus automatique possible.

La cartographie des interfaces habitat-forêt a contribué à produire une nouvelle carte du territoire. En effet le territoire s'est trouvé compartimenté selon une nouvelle clé de lecture : les espaces dits « interfacés » (Interfaces habitat-forêt avec une différenciation selon la typologie d'interfaces élaborée), et les espaces dits « non interfacés » (Espaces bâtis hors interfaces et le reste du territoire).

- 2- Mettre en relation l'organisation spatiale du territoire lue à travers la cartographie des interfaces habitat-forêt et le risque d'incendie (Figure 2-2)

Fondé sur l'hypothèse que le risque d'incendie est lié à la structure spatiale du territoire selon des relations stables et reproductibles, l'objectif est d'établir des relations entre les éléments du risque et les différents compartiments du territoire (espaces dits « interfacés » et espaces dits « non interfacés »). La cartographie des interfaces habitat-forêt est la clé d'entrée pour cette mise en relation. Elle a fait surgir la notion de types de territoire relatifs aux espaces « interfacés » et aux espaces dits « non interfacés » couvrant l'ensemble du territoire. Le risque d'incendie est appréhendé en termes de distribution spatiale de points de départs de feu et de distribution spatiale des incendies et des surfaces brûlées correspondantes. La mise en relation est alors recherchée entre types de territoire et répartitions spatiales des départs de feu et des surfaces brûlées.

Les résultats de cette deuxième étape : Le rapprochement de la distribution spatiale des départs de feu d'une part, et de la distribution spatiale des incendies d'autre part, avec les types de territoire, a mis en évidence une relation forte entre les types de territoire de nature interface habitat-forêt et l'importance des départs de feu et des taux de surfaces brûlées. Mais cette relation n'expliquant pas toutes les distributions spatiales observées des départs de feu et des incendies, la prise en compte de nouveaux éléments d'occupation du territoire a été jugée nécessaire. Des approches spatiales et statistiques ont été développées pour expliquer au mieux le risque d'incendie à partir de trois indicateurs élémentaires de risque considérés comme pertinents. Elles ont mis en œuvre des variables relatives aux types de territoire mais aussi de nature environnementale et socio-économique. Elles ont ainsi permis une meilleure connaissance des types de territoire et de leur environnement face au risque, connaissance développée grâce à des analyses statistiques, univariée, bivariée et multivariée.

- 3- Evaluer les niveaux de risque en fonction d'une part des types d'interface habitat-forêt, d'autre part des principales caractéristiques géographiques (Figure 2-3)

L'objectif est d'appréhender globalement et de façon synthétique les niveaux de risque. Il est de modéliser le risque d'incendie dans les interfaces habitat-forêt en région méditerranéenne française. Il est de définir un indice global de risque qui puisse être cartographié sur le territoire, en se fondant sur la cartographie des interfaces habitat-forêt développée dans la première étape. Cette recherche doit conduire à développer une nouvelle méthode d'évaluation du risque par une simple lecture de la structure du territoire, comprenant notamment les interfaces habitat-forêt.

Les résultats de cette troisième étape : Un processus d'évaluation du risque d'incendie a été développé évitant un diagnostic selon la démarche analytique traditionnelle (aléa+vulnérabilité). Il a été construit à partir des trois indicateurs élémentaires de risque établis dans l'étape précédente, chacun d'entre eux étant une combinaison linéaire de quelques variables reconnues statistiquement comme les plus significatives. Ces variables relèvent de facteurs tant physiques qu'humains, et sont porteuses également de l'information sur l'aléa et sur la vulnérabilité. La combinaison linéaire de ces trois indicateurs élémentaires, qui ont été considérés d'un poids égal, a été corrigée de la part de contribution explicative de chaque indicateur. Elle a ainsi produit un indice global de risque. Cet indice, calculé sous SIG, a été traduit par une carte de risque dans les interfaces. Le prototype d'un modèle original d'évaluation du risque d'incendie a ainsi été développé à partir d'une lecture du territoire, simple dans sa mise en œuvre et fiable.

La démarche de recherche ainsi développée s'est traduite dans le plan de la thèse par 3 parties (parties II à IV) correspondant à chacune des trois grandes étapes, la partie I étant dédiée à la définition du contexte de l'étude et à l'exposé de la problématique de recherche.

Etape I : Caractériser et cartographier les Interfaces Habitat-Forêt IHF

L'Interface Habitat-Forêt IHF :

un objet géographique nouveau – une zone soumise à fort risque d'incendie de forêt

1

☞ Définir l'objet géographique, interface

☞ Définir l'interface habitat-forêt dans le contexte du risque d'incendie de forêt

☞ Choisir des critères pertinents pour caractériser les deux composantes de l'interface habitat-forêt : structure de l'habitat résidentiel et structure de la végétation

Constat :

Structure de l'habitat

Beaucoup de définitions mais rien de précis, quantifiable, cartographiable

Structure de la végétation

Végétation combustible complexe à déterminer et cartographier

Résultats :

Choix de critères définissant 4 types de structure d'habitat humain : habitats isolé, diffus, groupé dense et très dense

calée sur des valeurs choisies de distance entre bâtis et de regroupement de bâtis

Choix d'un critère spatial simple, l'indice d'agrégation calculé sur la végétation, définissant 3 types de structure de végétation : végétation continue, éparse, absente

traduisant la perméabilité au feu,

☞ Elaboration d'une typologie d'interfaces habitat-forêt en combinant les types de structure, habitat et végétation, fondés sur des critères quantifiables, simples et reproductibles

2

☞ Développer une méthode de cartographie des interfaces habitat-forêt

Constat : la méthode n'existe pas pour des cartographies à grande échelle et sur de grandes surfaces

Résultats :

Méthode développée sur deux zones test AIX (64 700 ha) et VAR (74 550 ha), représentatives des départements du sud de la France

Méthode appliquée et validée par une confrontation terrain et par sa mise en œuvre par des services gestionnaires dans les départements de l'Hérault et de la Gironde

Application de la méthode sur une zone d'étude plus étendue pour la suite de la démarche

Cartographie des interfaces habitat-forêt sur la zone d'étude MAM située entre les métropoles d'Aix et de Marseille (167 736 ha) conduisant à une carte de types de territoire : les interfaces habitat-forêt et en dehors des interfaces habitat-forêt

Figure 2-1 Etape I de la démarche de recherche

Etape II : Mettre en relation Types de territoire, dont IHF, et risque d'incendie

Risque d'incendie analysé à partir de l'historique des feux

(points d'éclosion et contours de feux disponibles sur la zone d'étude MAM située entre les métropoles d'Aix et de Marseille (167 736 ha))

①

☞ Une première mise en relation entre les types de territoire et la distribution spatiale des points de départ de feu d'une part et celle des contours des surfaces brûlées d'autre part

Constat : une carte des interface des habitat-forêt conduit à lire le territoire en : territoires IHF et territoires en dehors des territoires IHF

Résultats :

☞ Relation forte entre types d'interface habitat-forêt IHF et densité d'éclosion des feux et taux de surfaces brûlées (ratio surfaces brûlées sur surface totale d'une zone donnée) mais relation moindre entre types d'IHF et surfaces brûlées

②

☞ Une analyse univariée développée sur un échantillon de la zone d'étude MAM

Prise en compte de nouvelles variables écologiques, topographiques et anthropiques

Définition de trois indicateurs de risque: densité d'éclosion de feu, densité d'incendie et taux de surfaces brûlées

Constat : la mise en œuvre de l'analyse oblige à simplifier au préalable la lecture des types de territoire : ainsi les interfaces habitat-forêt ont été étudiées à travers des grands types d'IHF calés sur la structure de l'habitat (IHF isolé, diffus, groupé dense et groupé très dense) et les zones en dehors des IHF ont été étudiées à travers des zones bâties hors IHF et des zones non bâties hors IHF

Résultats :

Caractérisation des environnements propices à de forte densité d'éclosion de feu, à de forte densité d'incendie et à de forts taux de surfaces brûlées : importance des IHF et d'autres conditions de contexte comme les parts relatives d'espaces naturels et d'espaces urbains, les expositions chaudes...

③

☞ Des analyses, bivariée et multivariée, développées sur le même échantillon de la zone d'étude MAM

Connaissance des Interrelations entre les variables sélectionnées pour permettre une meilleure connaissance des composantes structurant le territoire

Une démarche de modélisation des indicateurs de risque

Résultats :

Trois modèles ont été élaborés pour expliquer les indicateurs, densité d'éclosion de feu, densité d'incendie et taux de surfaces brûlées à partir de quelques variables révélées significatives relatives à des types de territoire et d'autres thématiques sur la zone MAM

Les trois modèles relatifs à la densité d'éclosion de feu, la densité d'incendie et au taux de surfaces brûlées, sont les supports de la construction de l'indice global de risque, développé dans la suite de la démarche, dans les interfaces habitat-forêt de la zone d'étude MAM

Figure 2-2 Etape II de la démarche de recherche

Etape III : Elaborer un indice global de risque d'incendie dans les IHF

- ① **Mettre en évidence l'importance des facteurs anthropiques sur le risque d'incendie**
Vu sous l'angle de l'occurrence des feux, de la récurrence des incendies et des surfaces brûlées
Importance de l'entrée interface habitat-forêt IHF pour l'évaluation du risque d'incendie au travers des indicateurs définis dans l'étape II, densité d'éclosion de feu, densité d'incendie et taux de surfaces brûlées
- ② **Construire un indice global de risque d'incendie dans les interfaces habitat-forêt**
Rappel de la définition du Risque d'incendie
Les interfaces sont portées de l'info aléa et vulnérabilité

Préalable :

- ☞ Considérer la définition du Risque d'incendie en s'affranchissant de ses deux éléments (aléa et vulnérabilité)
- ☞ Faire l'hypothèse que la vulnérabilité des enjeux humains est neutralisée à l'échelle du territoire par les parades mises en œuvre

Résultats :

- Développement d'une méthode reproductible d'élaboration d'un indice global du risque d'incendie dans les interfaces habitat-forêt s'appuyant sur une analyse spatiale et statistique préalable du territoire étudié
- Elaboration d'un modèle original d'évaluation du risque d'incendie dans les interfaces de la zone d'étude MAM
- Développement d'une méthode de cartographie de cet indice global en cinq niveaux

Le caractère innovant du modèle proposé est de permettre une évaluation du risque par une approche purement descriptive : une lecture simple et directe du territoire, à partir de la typologie d'IHF proposée, complétée par quelques descripteurs d'occupation du sol permet d'obtenir, grâce au modèle, le niveau de risque d'incendie associé.

Figure 2-3 Etape III de la démarche de recherche

Chapitre 3. Données et méthodes

3.1 Sites d'étude et données

Plusieurs sites d'étude situés dans le sud de la France ont été choisis pour la mise en œuvre de la démarche de recherche.

Dans la partie II de la thèse dont l'objet est de développer une méthode de caractérisation et de cartographie des interfaces habitat-forêt, deux sites d'étude, représentatives du sud de la France, d'une superficie équivalente ont été retenus présentant un territoire d'analyse intéressant dans le cadre du risque d'incendie de forêt : l'un situé dans les Bouches-du-Rhône appelée AIX et l'autre dans le Var appelé VAR. Ces deux sites intègrent en effet une diversité de types d'interfaces habitat-forêt avec des habitats groupés, dispersés, des mitages en forêt... dans deux contextes cependant différents : l'un très péri-urbanisé (Bouches-du-Rhône) et l'autre plus rural et forestier (Var).

Dans la partie III de la thèse dont l'objet est de mettre en relation l'organisation du territoire à travers la cartographie des interfaces habitat-forêt avec le risque d'incendie, la disponibilité de certaines bases de données de qualité a conduit à sélectionner un site d'étude dans les Bouches-du-Rhône comprenant d'ailleurs l'emprise du site d'étude précédent appelé AIX. Ce site qui s'étend entre les deux Métropoles Aix-en-Provence et Marseille est appelé MAM. Deux fois et demi plus étendu que le site appelé AIX et riche en interfaces habitat-forêt, il bénéficie de l'existence de bases de données spatiales précises d'occupation du sol, de départs de feu et de surfaces incendiées.

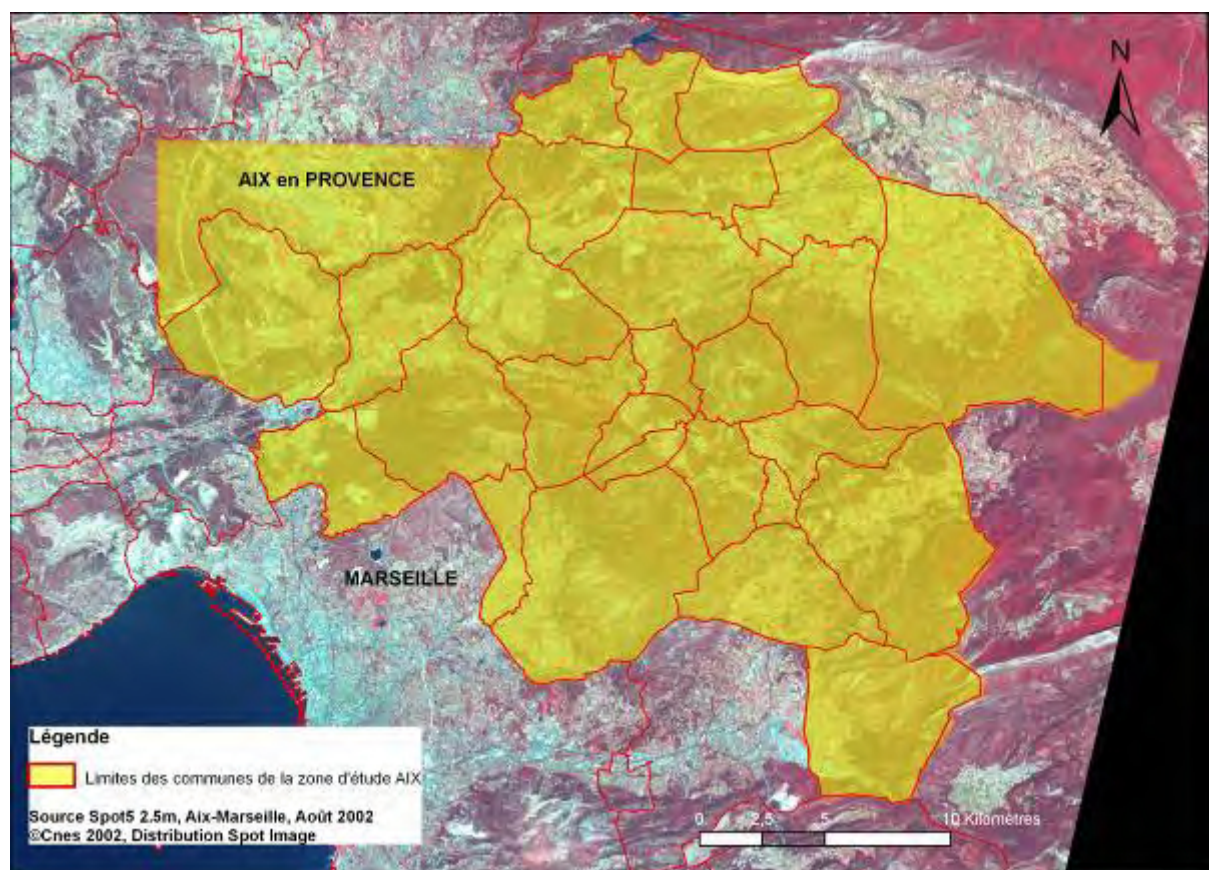
Enfin dans le cadre de l'analyse de certains points de la partie II, mais surtout de la partie IV, certaines emprises de surface plus restreinte ont été retenues sur la zone des Métropoles Aix-Marseille MAM. C'est le cas du site d'étude réduit à la commune de Meyreuil, appelé MEYR, situé près d'Aix-en-Provence. Il a été sélectionné notamment pour présenter la dynamique de développement des interfaces habitat-forêt (du fait de la disponibilité des données et de la connaissance du terrain).

3.1.1. Sites d'étude

- a. *Deux sites d'étude de taille moyenne situées : dans les Bouches-du-Rhône (AIX) et dans le Var (VAR)*

Site d'étude AIX situé dans les Bouches-du-Rhône

L'aire d'étude AIX située dans les Bouches-du-Rhône couvre environ 64 700 ha et 28 communes (Carte 3-1). Elle est assise à l'ouest sur le plateau de l'Arbois, importante dalle de calcaire massif (calcaire du Réaltor) qui marque la limite occidentale du bassin aixois. Bordée au sud-ouest par le synclinal des Pennes Mirabeau, au sud-est par le versant nord du massif de l'Etoile et à l'est par la montagne Sainte-Victoire, elle s'étend au nord-ouest jusqu'au massif du Montauguet. Le territoire étudié se répartit entre les espaces forestiers (65 %), les espaces urbains (16 %) et les espaces agricoles (19 %) (OccsolSPOT 5, 2003). On y dénombre environ 50 200 bâtis d'habitation extraits de la base de données BD TOPO® de l'IGN (bâtiments quelconques). La pression urbaine est de 326 hab/km². La végétation présente, caractéristique de la petite région IFN (Inventaire Forestier National) du Plateau Lambesc-Arbois, est essentiellement composée de futaies pures de pin d'Alep et de garrigues, une végétation très inflammable et combustible d'autant qu'elle est soumise aux conditions sévères du climat méditerranéen (températures élevées, sécheresse). Cette zone qui constitue une zone d'activités importante, est ainsi une aire riche en interfaces habitat-forêt.



Site d'étude VAR situé dans le Var

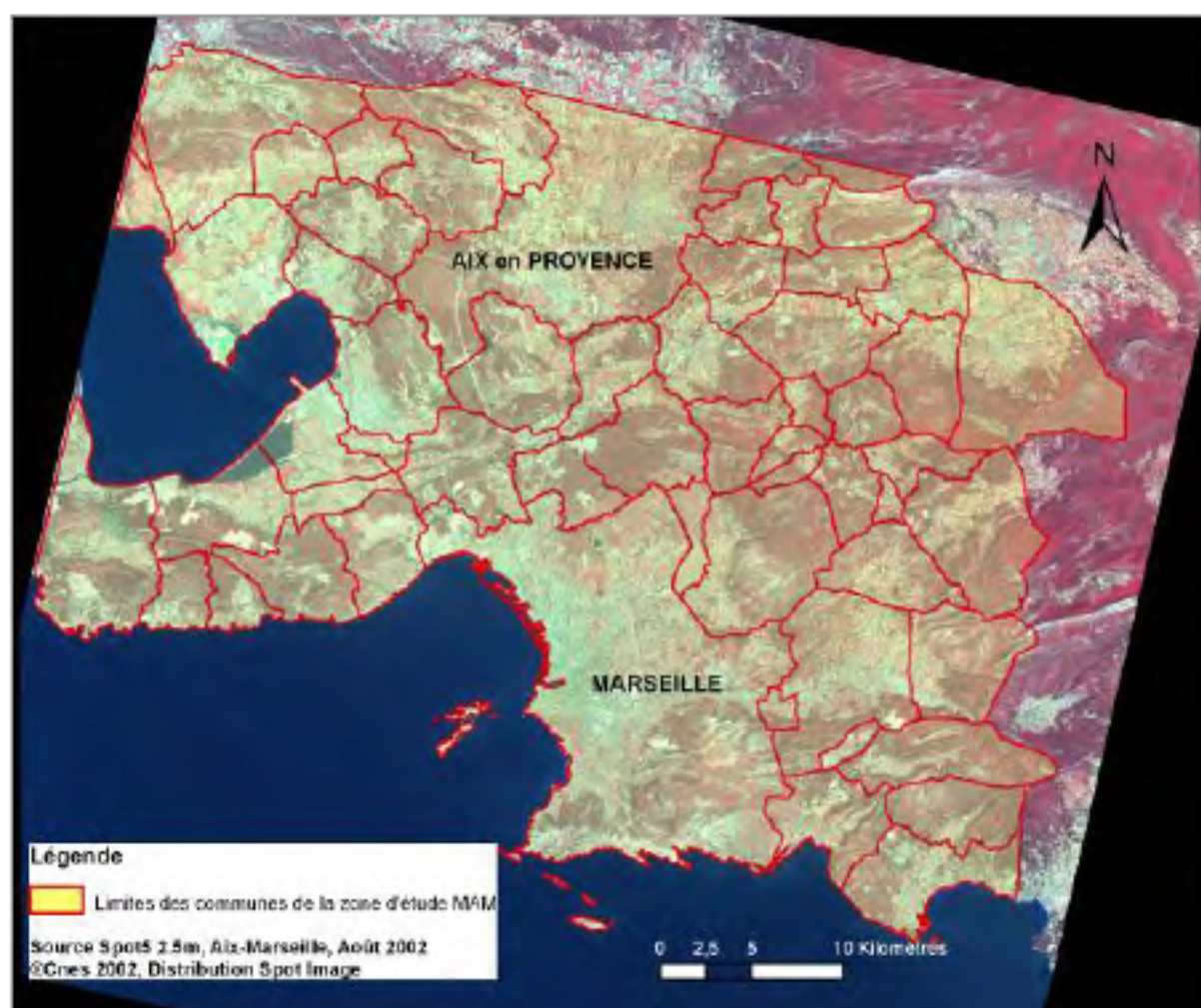
L'aire d'étude VAR est située dans le Var dans le massif des Maures et couvre une surface d'environ 74 550 ha étendus sur dix communes (Carte 3-2). Elle s'étend selon une direction dominante O/S.O.- N/N.E. (direction des principales lignes de crête), entre les villes d'Hyères et de Fréjus, sur une distance d'environ soixante kilomètres. Sa plus grande largeur dépasse légèrement trente kilomètres. A son extrémité sud-ouest, elle est bordée par la plaine alluviale du Gapeau. A son extrémité nord-est, la plaine de l'Argens la sépare du massif de l'Esterel. Du côté nord, de Toulon à Fréjus, elle est ceinturée par la longue et étroite dépression permienne qu'empruntent les routes départementales RDn 96 et RDn 7 et l'autoroute ainsi que la voie ferrée. Au sud, le massif plonge dans la Méditerranée, formant une côte découpée et souvent abrupte. Le territoire étudié se compose d'espaces forestiers (80 %), d'espaces agricoles (15 %) et d'espaces urbains (5 %) (OCCsol 1999). On dénombre 31 225 bâtis d'habitation extraits de la base de données BD TOPO® IGN (bâtiments quelconques). Comparée à la zone d'étude AIX située dans les Bouches-du-Rhône, cette zone d'étude est beaucoup plus rurale, le bâti est davantage situé au cœur de massif. L'urbanisation est moindre globalement avec un nombre de bâtis plus faible (31 % de bâtis en moins et 86 hab/km²) pour une surface d'étude plus grande. La végétation de type maquis et garrigues à chêne prédomine ainsi que des subéraies.



Carte 3-2 Zone d'étude VAR située dans le Var

b. Une zone de grande taille située entre les métropoles Aix-en-Provence et Marseille MAM

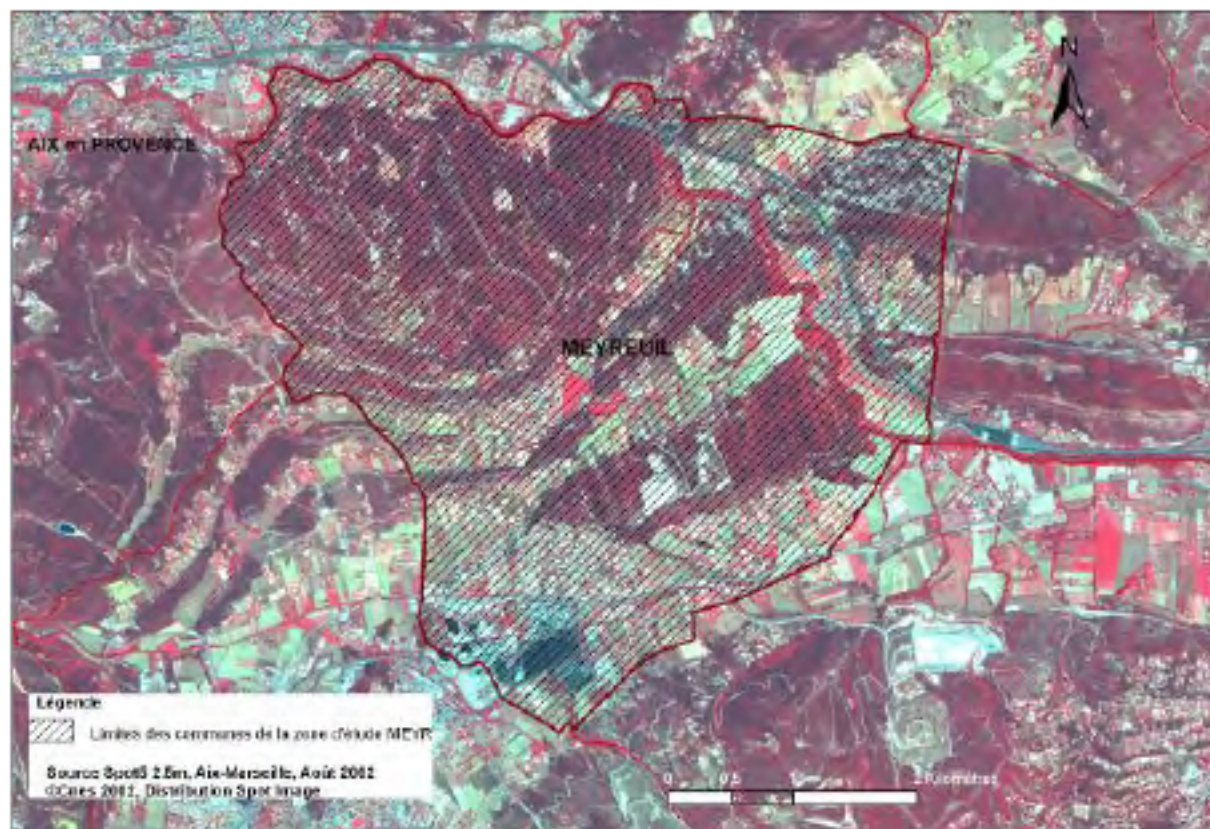
La zone d'étude MAM est située dans le sud est de la France entre les Métropoles Aix-Marseille dans le département des Bouches-du-Rhône (Carte 3-3 ; 43°23'57" N, 5°22'00" E). Elle s'étend sur 167 736 ha couvrant 59 communes : 60 % de la zone est occupée par des espaces forestiers, 20 % par des espaces urbains et 20 % par des espaces agricoles (OccsolSPOT 5, 2003). Cette zone connaît un haut niveau d'urbanisation et de pression urbaine (420 hab/km²), plus élevé que celui de la zone d'étude AIX, de +22 %. Les interfaces habitat-forêt y sont très communes. L'extension urbaine occupe peu à peu les anciennes terres agricoles désormais en jachère mais elle est également marquée aux limites, voire au cœur, des massifs forestiers.



Carte 3-3 Zone d'étude MAM entre les métropoles Aix-en-Provence et Marseille

c. Zone d'étude de petite taille située sur la commune de Meyreuil (MEYR), zoom des zones AIX et MAM

La zone restreinte MEYR se situe sur la commune de Meyreuil (Carte 3-4) au sud d'Aix-en-Provence, en limite et au cœur du Massif du Montaignet. Elle s'étend sur 2 021 ha. Située à proximité de l'agglomération d'Aix-en-Provence, la commune de Meyreuil connaît une pression urbaine importante. Le développement résidentiel périurbain est présent aux limites des zones boisées et au sein des massifs forestiers. La commune de Meyreuil peut se définir comme un territoire rural, forestier et périurbain. Les espaces boisés et les espaces naturels ou semi naturels sont très présents. Ils occupent environ 56 % du territoire de la commune. Les espaces agricoles occupent également une grande surface, soit 25 % (données OccsolSPOT 5). L'habitat y est de type résidentiel (avec des lotissements), isolé (comme les propriétés de vignobles, ou de grandes propriétés privées, ancien cabanon devenu résidence principale habitée), ou relativement dense (au niveau du village de Meyreuil). Enfin, les zones d'activités sont présentes en périphérie de la commune, le long des grands axes routiers. Cette commune a été partiellement parcourue par un incendie le 5 Août 2005 qui a brûlé 500 ha sur les 3 communes d'Aix-en-Provence, Gardanne et Meyreuil, dont 22 ha sur Meyreuil. Une quarantaine de maisons ont été frôlées par le feu n'entraînant que des dégâts sur la végétation.



Carte 3-4 Zone d'étude MEYR de Meyreuil

Enfin un zoom a été également fait sur 4 communes contiguës situées dans la zone d'étude Métropoles Aix-Marseille MAM dont Meyreuil MEYR.

3.1.2. Données de base

L'ensemble des données exploitées dans le cadre sont énumérées dans le Tableau 3-1 puis décrite dans le paragraphe suivant.

a. Bases de données non spatiales

La base de données Prométhée

Prométhée est une base de données sur les incendies de forêts de la région méditerranéenne française. Conçue et lancée en 1973, cette opération couvre 15 départements du sud de la France (Figure 3-1). Prométhée a pour objectif de fédérer et d'harmoniser les données en provenance de sources diverses (pompiers, forestiers, gendarmes...) et de redistribuer les résultats à tous ceux qui sont concernés par le problème des incendies de forêts. Ces résultats sont présentés sous forme de bilans annuels (évolution de surfaces brûlées, comparaison entre entités administratives, analyse des causes d'incendie...) et d'une série d'indicateurs (surfaces brûlées, nombre de feux...) pouvant être déclinés pour une entité administrative donnée (région, département voire commune) et pour une période de temps définie. Le site Prométhée est accessible par www.promethee.com depuis novembre 1997.

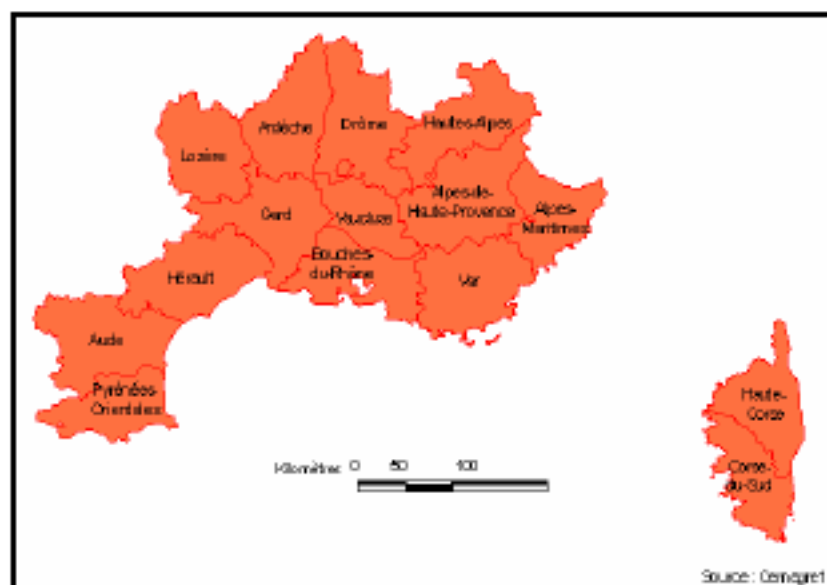


Figure 3-1 Quinze départements du sud de la France suivis dans Prométhée

La base de données a ainsi été exploitée dans la thèse pour obtenir des données sur le nombre d'éclosion, les surfaces brûlées dans les communes de la zone d'étude et dans les départements pour y apprécier la pression des feux de forêt.

Autres données statistiques

Agreste-Statistique agricole annuelle

- ☞ Evolution des surfaces occupées par les différentes natures de l'utilisation du sol (1980-2005)

Données de l'INSEE

- ☞ Evolution des effectifs. Données des effectifs de la population issus des recensements de 1990 et 1999. Données estimées des effectifs de la population en 2006 par département.

Nature des données	Zone concernée	Source	Paragraphe	Exploitation dans la thèse
Données générales relatives au territoire méditerranéen étudié				
Agreste-Statistique agricole annuelle	Régions PACA, Languedoc-Roussillon	Site Agreste	Partiel Chap.1 §1.2.2	Dynamique du territoire métropolitain méditerranéen
Données de l'INSEE		Site INSEE		
Base de données Prométhée	15 départements du sud de la France	Site Prométhée	Partiel Chap.1 §1.2.4 PartieII Chap.6 §6.4.3	Evolution des surfaces brûlées Evolution du nombre d'incendies Représentativité des zones d'étude AIX et VAR
Données principalement dédiées à l'analyse de la structure de l'habitat				
Données de bâti- 1992 à 1999	MAM, AIX VAR	BD TOPO®IGN	PartieII Chap.5 §5.1	Définition des types d'habitat par calcul sur les données de bâtis
			PartieIII Chap.8	Calcul des densités de routes, densité de chemins Croisement de la carte des types de territoire avec les différentes données pour la création de la matrice d'analyse destinée à l'analyse statistique et spatiale
	MEYR		PartieIV Chap.11 §11.1	Dynamique des interfaces (1992)
Image satellite Très Haute Résolution SPOT5-2002	MAM, AIX,	Acquisition Cemagref Programme ISIS	Partiel Chap.3 §3.1.2	Mise à jour de la couche des bâtis sur MAM -2002 Fond cartographique
	MEYR		PartieIV Chap.11 §11.1	Dynamique des interfaces
Image satellite Très Haute Résolution SPOT5 -2003	VAR	Acquisition Cemagref Programme ISIS	Partiel Chap.3 §3.1.2	Mise à jour de la couche des bâtis sur VAR 2003 Fond cartographique
Image satellite Très Haute Résolution Quickbird	MEYR	Acquisition Cemagref	Partiel Chap.3 §3.1.2 PartieIV Chap.11 §11.1	Mise à jour de la couche des bâtis sur MEYR 2006 Dynamique des interfaces
Orthophotos – 1998 et 2003	MAM, AIX, MEYR VAR	BD ORTHO®IGN	Partiel Chap.3 §3.1.2	Mise à jour de la couche des bâtis sur MEYR 1998, 2003 Fond cartographique
	MEYR		PartieIV Chap.11 §11.1	Dynamique des interfaces
Données d'occupation du sol dédiées à l'analyse de la structure de la végétation				
Classification supervisée d'image satellite SPOT5 - 2002	MAM, AIX, MEYR	Production Cemagref (Morin. N)	PartieII Chap.5 §5.2.1	Production de carte de végétation de résolution 2,5 m Comparaison de cartes de végétation Calcul de l'indice d'agrégation

Tableau 3-1 Tableau récapitulatif des données exploitées dans la thèse

Nature des données	Zone concernée	Source	Paragraphe	Exploitation dans la thèse
Classification supervisée d'image satellite SPOTS - 2003	VAR	Production MIDA	PartieII Chap.5 §5.2.1	Production de carte de végétation de résolution 5 m Comparaison de cartes de végétation Calcul de l'indice d'agrégation
Classifications supervisées d'image satellite Quickbird	MEYR	Production Cemagref (Journet.S)		Production de carte de végétation de résolution 0,6 m Comparaison de cartes de végétation
Classifications par segmentation objet d'image satellite Quickbird	MEYR	Production Cemagref (Long.M)		Production de carte de végétation de résolution 0,6 m Comparaison de cartes de végétation Identification qualitative de la structure horizontale de la végétation
Carte d'occupation du sol par photointerprétation et terrain	MEYR	Production Cemagref (Morge.D, Bouillon.C)		Production de carte de végétation – Verité terrain Comparaison de cartes de végétation
Autre données d'occupation du sol dédiées à la caractérisation et la cartographie des interfaces habitat-forêt				
Zone soumise à obligation légale du débroussaillage (OLD)	MAM VAR	MIDA	PartieII Chap.6 §6.2	Selection des batis situés en zone soumise à OLD
Occupation du sol : 2000	15 départements du sud de la France	Corine landcover		Représentativité des zones d'étude AIX et VAR
<u>Occsol SPOTS</u>	MAM, AIX, MEYR	ARPE PACA	PartieII Chap.6 §6.2 PartieIII Chap.8 PartieIII Chap.9 PartieIII Chap.10	Caractérisation des types d'occupation du sol des interfaces habitat-forêt Croisement de la carte des types de territoire avec les différentes données pour la création de la base de données destinée à l'analyse statistique et spatiale
Données relatives à la mise en relation risque d'incendie et territoire				
Base de données géoreférencées des départs de feu	MAM	Source ONF13	PartieIII Chap.7 PartieIII Chap.8	Croisement de la carte de la distribution spatiale des points d'éclosion avec la carte des types de territoire
Base de données géo référencées des surfaces brûlées	MAM	Source ONF13-DDAF13	PartieIII Chap.9 PartieIII Chap.10	Croisement de la carte de la distribution spatiale des surfaces brûlées avec la carte des types de territoire
Modèle numérique de terrain (MNT) • altitude	MAM	BDALTI® MNT -IGN	PartieIII Chap.8 PartieIII Chap.9 PartieIII Chap.10	Production de la carte des pentes et expositions (* Croisement de la carte des types de territoire avec les différentes données pour la création de la matrice d'analyse destinée à l'analyse statistique et spatiale
Données d'infrastructure routière • Routes et chemins	MAM	BD TOPO®IGN		Calcul des densités de routes, densité de chemins Idem (*) ci-dessus
Indice KR	MAM	Production Cemagref (Ganteaume. A)		Idem (*) ci-dessus
Autres données				
Données de limites de communes	MAM VAR	BD CARTO® IGN	Toutes parties de la thèse	Localisation des représentations cartographiques

Tableau 3-1 Tableau récapitulatif des données exploitées dans la thèse Suite

L'ensemble des données spatiales décrites sont utilisées dans le système de coordonnées NTF_Lambert_II_étendu.

b. *Données géo-référencées dédiées principalement à l'analyse de l'habitat*

Données de bâti

Les données de bâti ont été extraites de la base de données BD TOPO® Gestion B V2.4 de l'IGN (Carte 3-14 et zoom Carte 3-15). Elles sont issues du thème Arcview Bâtiment_PCT (Bati_P) et sont au format vecteur. Il s'agit de polygones à la précision métrique (IGN, 1999). Ces données, datant de 1992 à 1999, ont été actualisées manuellement à partir des images SPOT5 puis elles ont été contrôlées à partir des orthophotos de la BD ORTHO® 2003. Ce contrôle est nécessaire car il permet de corriger des erreurs du type omission (un bâti n'a pas été saisi), de type commission (un bâti a été saisi sur une parcelle mais, en réalité, il ne correspondait pas à un bâti) mais également de lever des incertitudes sur la précision de la saisie qu'il s'agisse de la localisation (un bâti a été digitalisé à l'emplacement d'une piscine, d'un garage ou d'un cabanon) ou de précision géométrique (le bâti n'a pas la forme ou la superficie réelle). La Figure 3-2 illustre quelques exemples de mise à jour et contrôles.











BD Ortho 2003 (résolution 50 cm)	Image Spot 5 (résolution 2,5 m)	Observations
		Erreur de commission : le bâti a été saisi à l'emplacement d'un chemin
		Erreur d'omission : la zone ne ressemble pas à priori à du bâti Précision géométrique du bâti : il est impossible de prévoir la forme du bâti sur l'image Spot 5
		Actualisation de bâti : une tâche blanchâtre apparaît sur l'image Spot 5 alors qu'elle n'existe pas sur l'image Ortho
		Incertitude vérifiée sur le terrain : sur ces 2 images on ne distingue pas le bâti qui a pourtant l'air présent
		Précision de la localisation : sur l'image Spot, on ne distingue pas la maison de la piscine, on aurait tendance à digitaliser 3 batis alors qu'il n'y en a que 2.

Figure 3-2 Illustration de contrôles de mise à jour des données du bâti

Images satellites, orthophotos

- Images satellites

Des images satellites à très haute résolution ont été utilisées et ont les caractéristiques suivantes :

- Une image satellite Très Haute Résolution SPOT5 (acquise dans le cadre d'un programme ISIS - Incitation à l'utilisation Scientifique des Images Spot lancé par le Centre National d'Etudes Spatiales), datée du 14/08/2002, ayant une résolution de 2,5 m, provenant de la fusion de l'image multispectrale à 10 m de résolution (3 canaux

V, B et PI) et de l'image panchromatique à 2,5 m de résolution. Son étendue couvre une surface d'environ 360 000 ha (60 km sur 60 km) et comprend la zone d'étude située entre les Métropoles Aix-Marseille MAM et celle plus restreinte d'AIX ;

- ☞ Une image satellite Très Haute Résolution SPOT5 (acquise également dans le cadre d'un programme ISIS), datée du 03 août 2003, ayant une résolution spatiale de 5 m sur le massif des Maures. Elle comprend la zone VAR située dans le Var ;
- ☞ Une image satellite Très Haute Résolution Quickbird, datée du 23/06/2006, ayant une résolution de 0,6 m (bandes multispectrales et panchromatiques). Elle couvre la zone d'étude située sur la commune de Meyreuil MEYR.

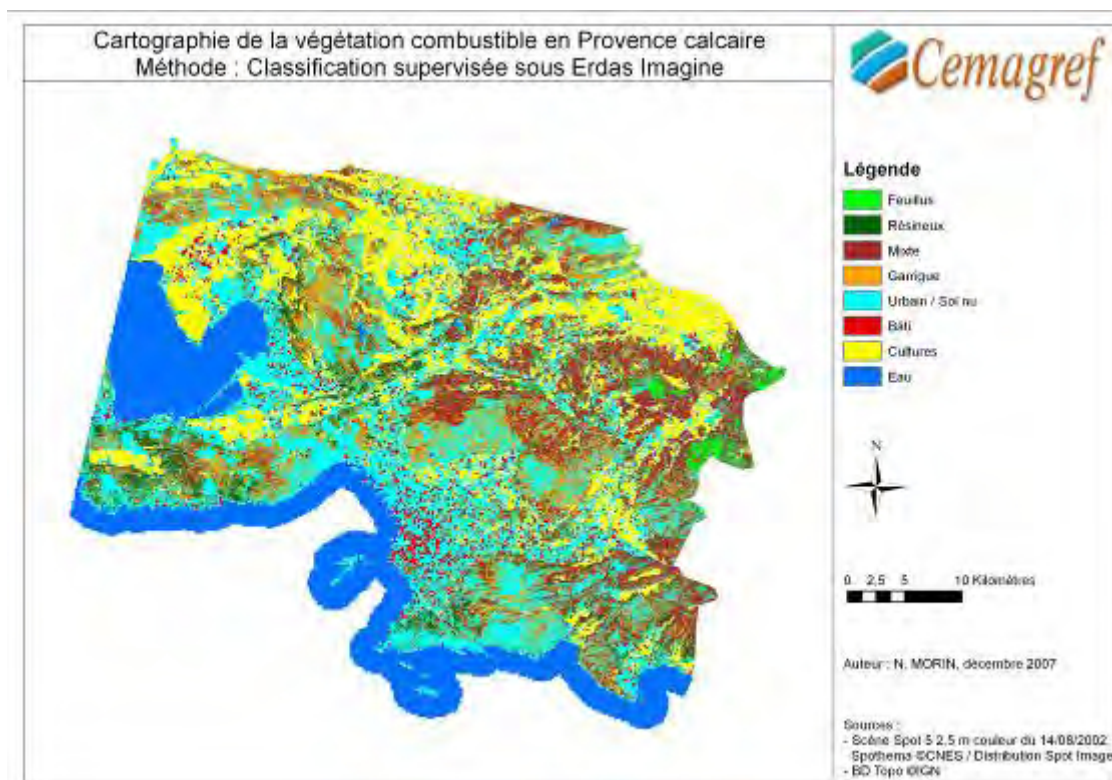
- Orthophotos

Les orthophotos datant de 1998 proviennent de la BD ORTHO® V1 de l'IGN et celles datant de 2003 proviennent de la BD ORTHO® V2 de l'IGN. Ces images au format raster ont une résolution de 0,5 m. Elles sont disponibles sur les départements des Bouches-du-Rhône et du Var par le biais du CRIGE PACA (<http://www.crige-paca.org/>).

c. Données d'occupation du sol dédiées à l'analyse de la structure de la végétation

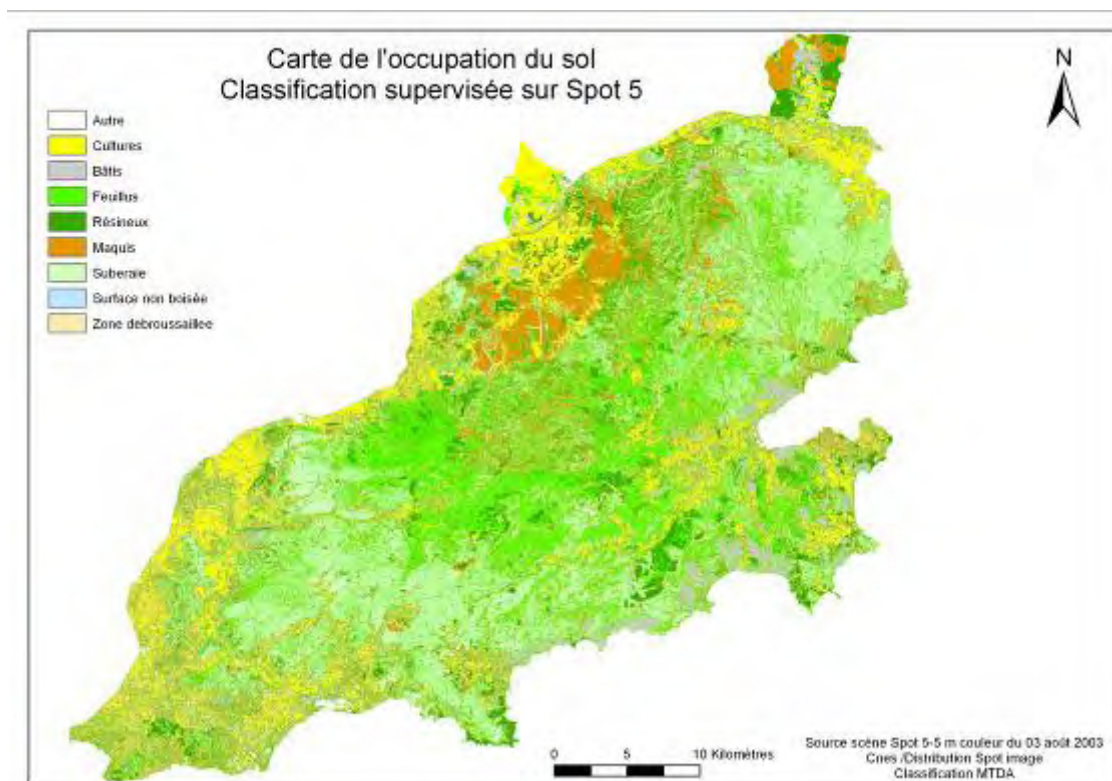
- Classifications supervisées d'images satellites à Très Haute Résolution

Une carte d'occupation du sol a été réalisée sur la zone d'étude MAM située entre les Métropoles Aix-Marseille à partir de l'image SPOT5 (Carte 3-3) avec une technique de classification d'image. Elle est au format raster avec une résolution de 2,5 m. Elle met en évidence 4 classes de végétation (feuillus, résineux, mixtes et garrigues), les zones de culture, les zones urbaines, le bâti et l'eau. Le résultat obtenu par classification supervisée de l'image SPOT5 a été validé statistiquement. Le coefficient de Kappa, indicateur courant de la qualité d'une classification, est compris entre 0 et 1. Le résultat obtenu avec la méthode de classification supervisée (Carte 3-5) est plutôt satisfaisant avec un coefficient de Kappa égal à environ 85 %, soit une marge d'erreur de près de 15 %.



Carte 3-5 Carte d'occupation du sol issue d'une classification supervisée de l'image satellite SPOT5 sur MAM (Source, Morin 2007)

Une carte d'occupation du sol a été réalisée sur la zone d'étude VAR (Carte 3-6) à partir de l'image SPOT5 (2003) avec une technique de classification d'image ayant une résolution de 5 m (Alexandrian et *al.*, 2005).

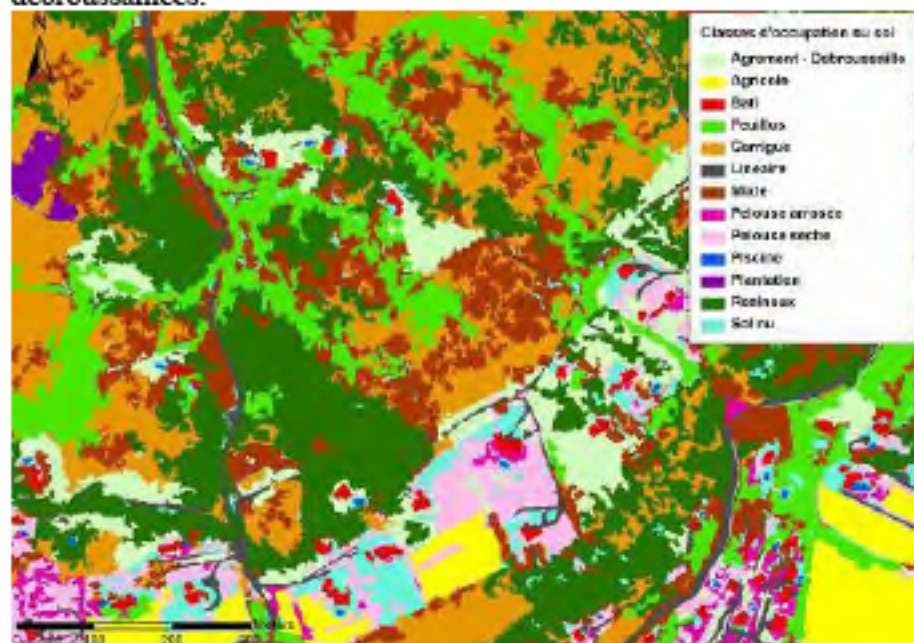


Carte 3-6 Carte d'occupation du sol issue d'une classification supervisée de l'image satellite SPOT5 sur VAR

Une carte d'occupation du sol a été réalisée sur la zone d'étude MEYR à partir de l'image Quickbird (2006) avec une technique de classification d'image ayant une résolution de 0,6 m (Journet, 2008).

- **Classifications par segmentation objet d'images satellites à Très Haute Résolution**

Une classification basée sur la méthode de segmentation a été réalisée à partir de l'image satellite Quickbird sur la zone de Meyreuil (Long *et al.*, 2007a, 2007b), produisant ainsi une carte d'occupation du sol (Carte 3-7). Une trentaine de classes ont été identifiées : le sol nu correspondant à la roche et aux surfaces artificialisées ; les résineux, les feuillus et peuplements mixtes correspondant à de la végétation dense ; la garrigue ; les jardins et les zones débroussaillées.



Carte 3-7 Carte d'occupation du sol par une classification orientée objet sur image Quickbird (Long *et al.*, 2007)

- Une carte d'occupation du sol issue de description de terrain et de photointerprétation décrivant des interfaces habitat-forêt sur la commune de Meyreuil, Le Montaignet (Carte 1 de l'Annexe C)

d. *Autres données d'occupation du sol dédiées à la caractérisation et la cartographie des interfaces habitat-forêt*

- **Délimitation des contours de la zone soumise à obligation légale de débroussaillage (OLD)** fournie pour les départements des Bouches-du-Rhône et du Var (MTDA).

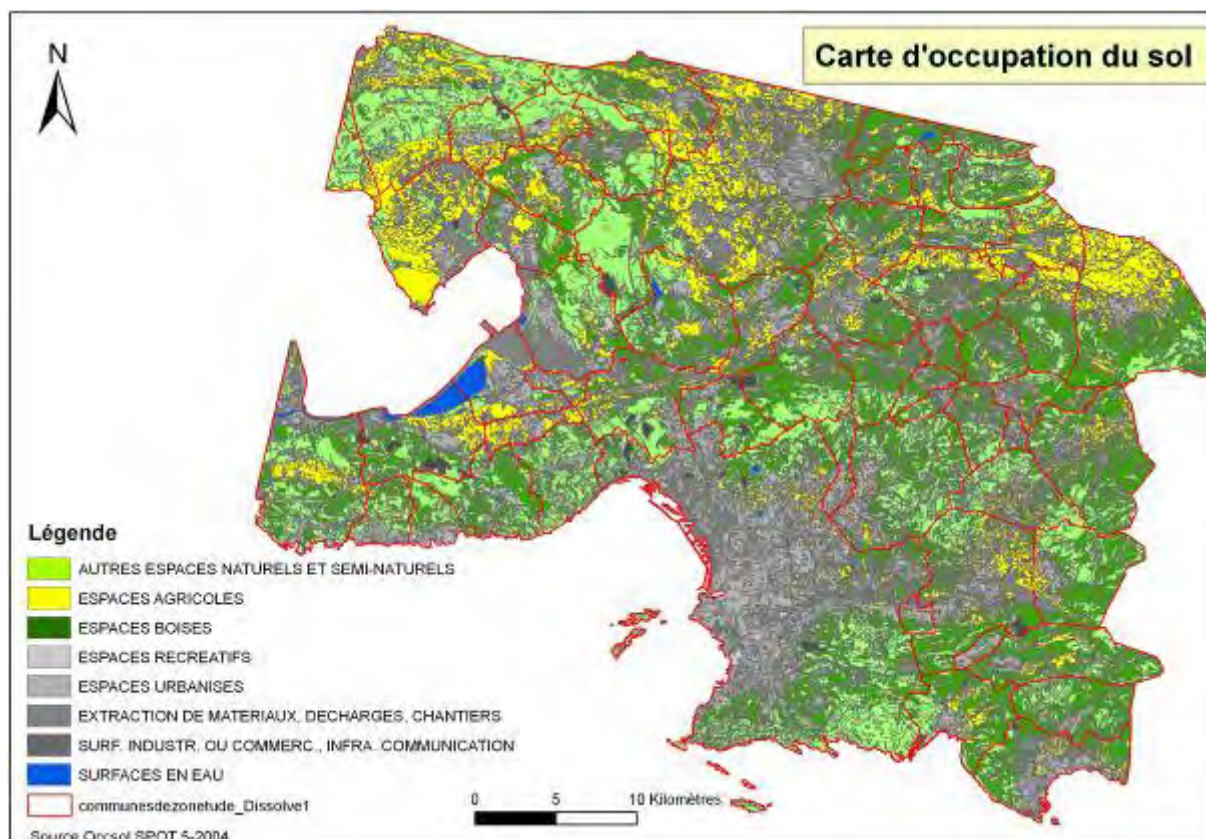
- **Carte d'occupation du sol issues de Corine land cover 2000** (IFEN, 2005 ; Corine Land Cover 2000) disponible sur les départements du sud de la France

- **Occsol SPOT5**

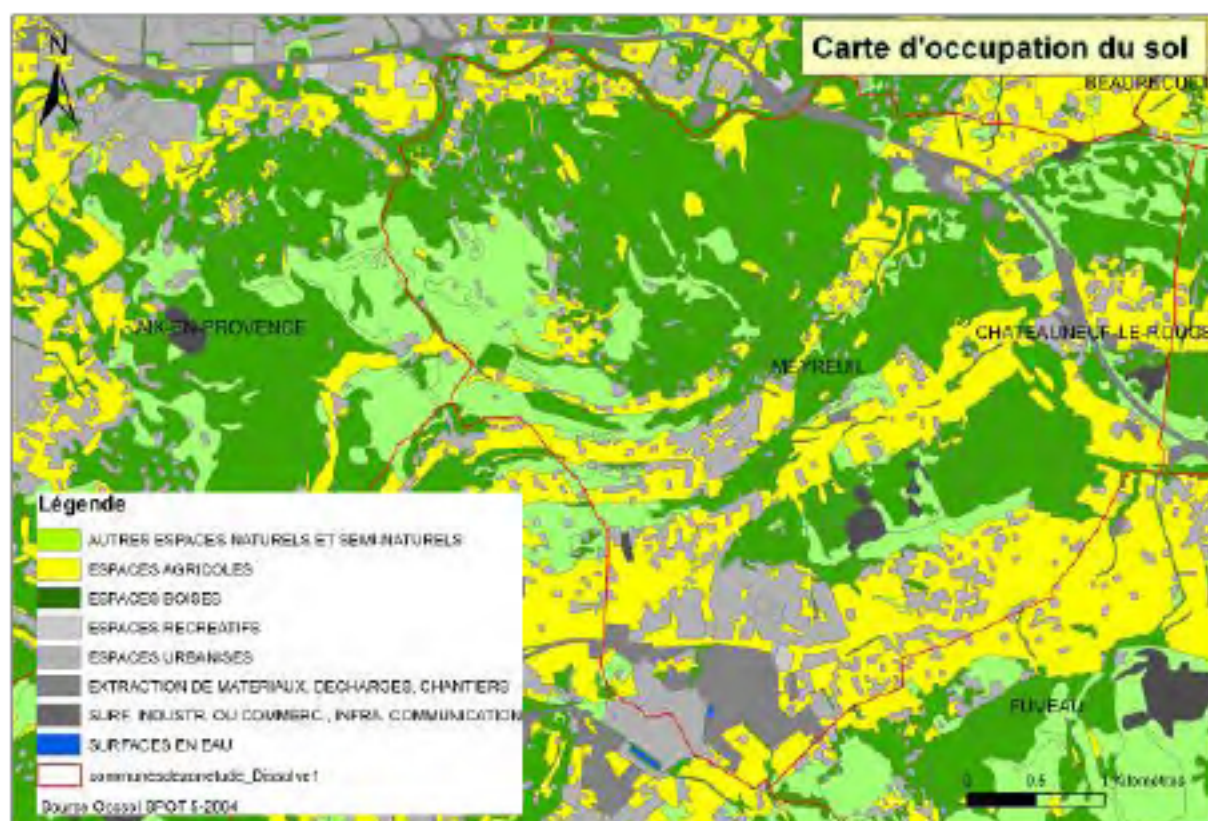
La carte d'occupation du sol Occsol SPOT5 a été conçue pour décrire les paysages urbains et périurbains tout en intégrant les principales composantes naturelles extra-urbaines. La hiérarchisation des classes et le contenu thématique reprennent les principales nomenclatures Corine Land Cover. Elle est un dérivé du traitement et de la photo-interprétation des images

SPOT5, 2.5 m couleur, (2002), assistée de l'utilisation de données exogènes nécessaires. Elle est constituée d'une couche, au format vecteur, de polygones présentant une nomenclature en 57 classes pouvant être regroupées en 29 classes SPOT Thema standard ou en 8 classes généralistes. Elle a été produite en 2004 à l'initiative du CNES, de l'ARPE PACA et de Spot Image. Elle s'étend sur un territoire compris entre le nord d'Aix-en-Provence, Marseille, l'étang de Berre et le massif de l'Etoile (Carte 3-8 et Carte 3-9). Elle est disponible sur le site internet du CRIGE PACA.

La zone d'étude située entre les Métropoles Aix-Marseille MAM correspond à la partie nord de la carte d'occupation du sol Occsol SPOT5 (Spot image, 2004).



Carte 3-8 Carte d'occupation du sol Occsol SPOT5 sur la zone d'étude MAM



Carte 3-9 Carte d'occupation du sol Occsol SPOT5 sur la zone d'étude MEYR (zoom)

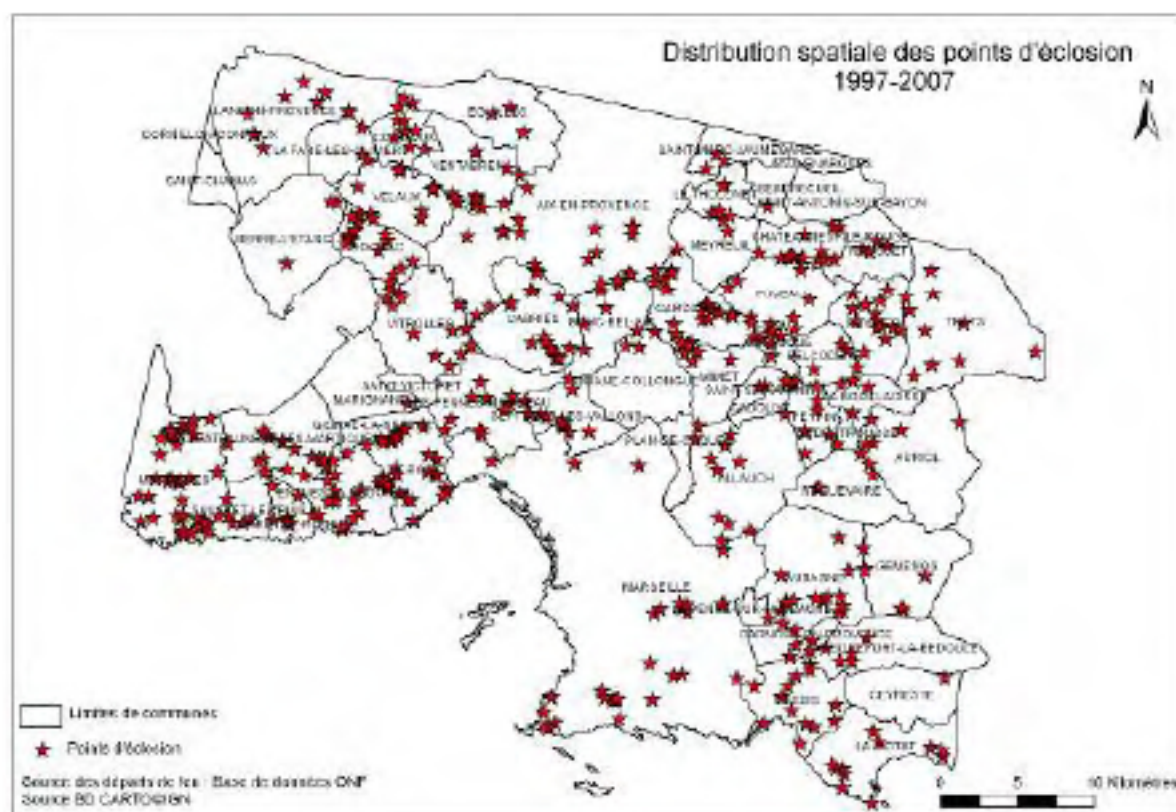
e. *Données relatives à la mise en relation du risque d'incendie et du territoire*

Données relatives aux incendies de forêt

• **Base de données géoréférencées des départs de feu**

La base de données géoréférencées de départs de feu, fournie par l'agence départementale de l'Office National des Forêts des Bouches-du-Rhône (ONF13), comptabilise 565 points d'éclosion sur la zone d'étude située entre les Métropoles Aix-Marseille MAM sur la période 1997 à 2007. Ces points d'éclosion ne sont pas exhaustifs, seuls les points d'éclosion dont la localisation avec une précision de 10 m a été considérée comme fiable par l'ONF13, le Service Départemental d'Incendies et de Secours des Bouches-du-Rhône (SDIS13) et la Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt des Bouches-du-Rhône (DDAF13), ont été numérisés et localisés au 1/10 000 par l'ONF13. Ils ne concernent par ailleurs que les départs de feu ayant généré des feux de forêt de plus de 1 ha, uniquement en saison estivale.

Comparés aux enregistrements de la base de données Prométhée, ils ne représentent que 31,4 % des 1 801 feux de forêt éclo (et 7,8 % de la totalité des départs de feux si l'on considère les feux périurbains qui sont, en nombre et en moyenne, trois fois plus importants que les feux de forêt). Selon les données Prométhée la pression annuelle de feux de forêt peut être évaluée sur la zone d'étude située entre les Métropoles Aix-Marseille MAM à 163 éclosions de feux de forêt par an, soit une densité annuelle d'éclosion de 0,97 éclosions de feux de forêt au 1 000 ha (ou 9,7 départs de feux au 100 km²). Leur représentation spatiale figure sur la Carte 3-10.



Carte 3-10 Carte de la répartition des points d'éclosion sur la zone d'étude MAM

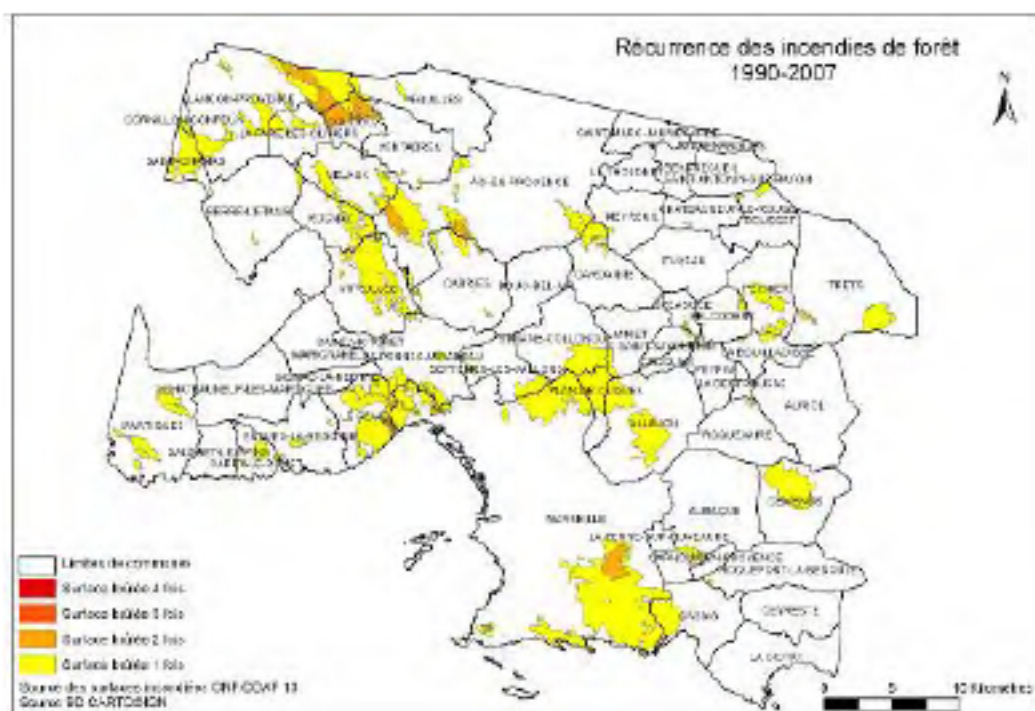
- **Base de données géo référencées des surfaces brûlées**

Les surfaces incendiées dont les contours digitalisés sont issus d'une base de données géo référencées DDAF13/ONF13 concernent les feux de plus de 10 ha recensés de 1960 à 2007 et les sautes associées d'une surface généralement inférieure à 1 ha. Dans l'étude, seuls les feux de 1990 à 2007 ont été pris en compte de façon à rendre acceptable l'hypothèse d'une évolution modérée de l'occupation du sol et de mettre en relation la surface brûlée avec le territoire existant.

Ainsi 162 incendies ont parcouru la zone d'étude située entre les Métropoles Aix-Marseille MAM sur la période 1990-2007, totalisant une surface brûlée de 22 071 ha. Parmi ceux-ci, 53 % ont une surface inférieure à 50 ha et représentent 7 % de la surface incendiée, 20 % ont une surface comprise entre 50 ha et 500 ha représentant 27 % de la surface incendiée et 6 % ont une surface supérieure à 500 ha représentant 65 % de la surface incendiée. Ces seuils de surface font référence aux seuils retenus dans la base de données Prométhée. Par ailleurs, 34 zones incendiées d'une surface inférieure à 1 ha ont été recensées correspondant aux sautes de feux représentant 1 % de la surface incendiée.

Une carte de récurrence des feux a été élaborée permettant de mettre en évidence les zones ayant brûlé 1 à plusieurs fois, l'empreinte des surfaces incendiées couvrant 20 341 ha sur la zone d'étude. On observe des surfaces qui ont brûlé 1 à 4 fois : 18 655 ha ont brûlé 1 fois (92 %), 1 642 ha ont brûlé 2 fois, 43 ha ont brûlé 3 fois et 1 ha a brûlé 4 fois. Leur représentation spatiale figure sur la Carte 3-11.

NB : Sur les 565 points de dépôts de feu présentés dans le paragraphe précédent, seuls 231 points se situent dans les surfaces incendiées cartographiées.



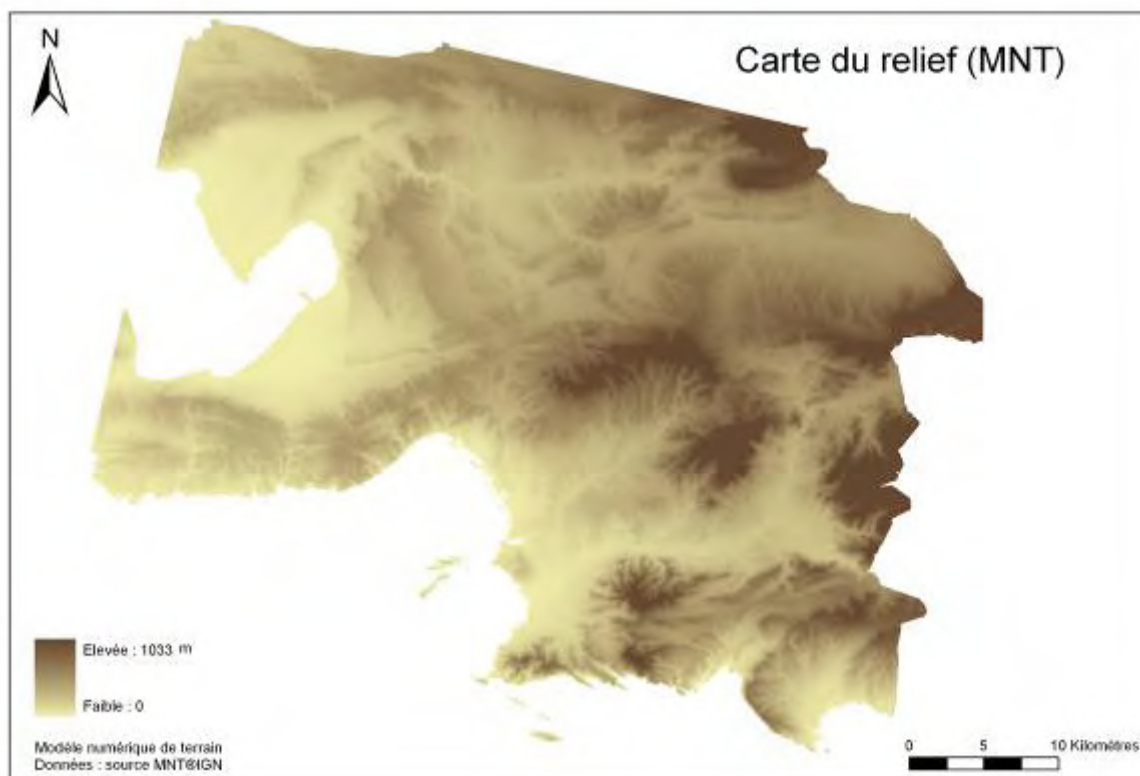
Carte 3-11 Carte de la récurrence des incendies sur la zone d'étude MAM

Ils sont légèrement supérieurs aux enregistrements de la base de données Prométhée, qui totalise 20 859 ha brûlés sur la période 1990-2007 sur l'aire d'étude MAM située entre les Métropoles Aix-Marseille. La pression annuelle de feux de forêt peut y être évaluée à 1159 ha brûlés, soit une part annuelle de surface brûlée de 0,69 %.

Autres données spatiales

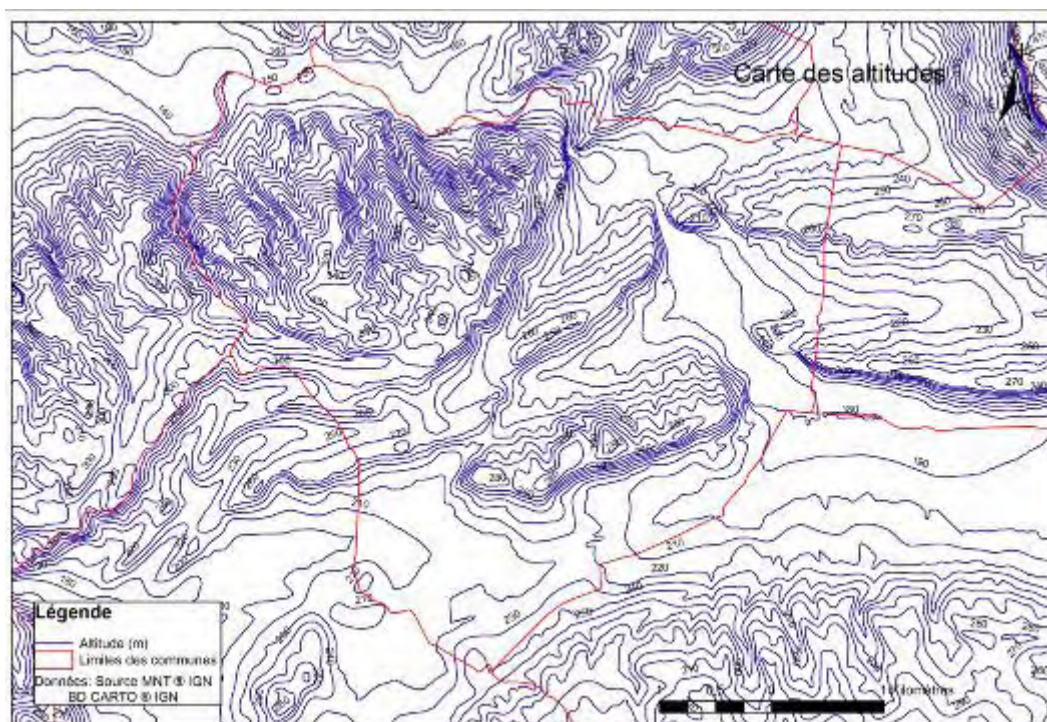
- **Modèle numérique de terrain (MNT)**

Les données relatives au relief sont issues de la base de données BDALTI® MNT - V2001 de l'IGN. Cette base conserve sous forme de données vectorielles les courbes de niveau et les points cotés de la totalité du territoire français. Ces données sont issues de la numérisation de la carte au 1/25 000 et de restitution photogrammétrique de photos aériennes (quart sud-est du territoire métropolitain). Sa précision est de 2,5 m à 10 m suivant les zones. Le modèle numérique de terrain régional est au pas de 50 mètres (Carte 3-12). Son échelle d'utilisation varie du 1/25 000 au 1/50 000. Le fichier se présente sous la forme d'une grille de pixels dont l'attribut est l'élévation (hauteur) exprimée en m (IGN, 1998). Le MNT est disponible sur le site internet du CRIGE PACA.



Carte 3-12 Carte du relief sur la zone d'étude MAM

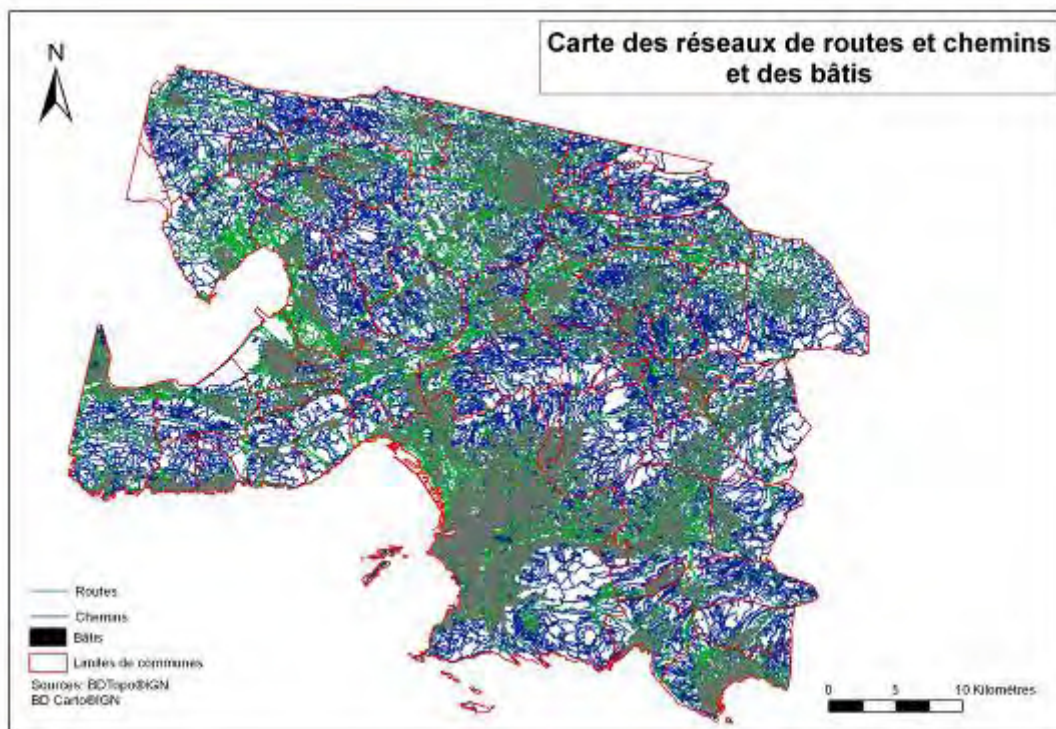
Observation : Les courbes de niveaux ont été recalculées à partir de MNT par l'IGN. A titre d'illustration, la Carte 3-13 présente les altitudes sur la zone d'étude située sur la commune de Meyreuil MEYR (au format vecteur).



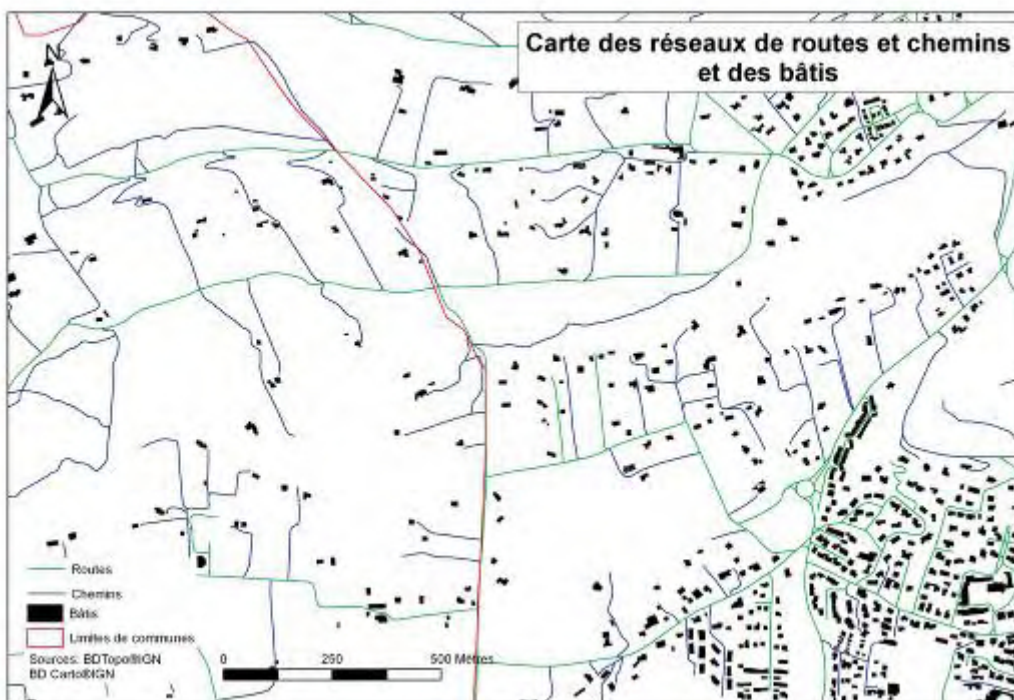
Carte 3-13 Carte des altitudes zoomée sur la zone d'étude MEYR avec courbes de niveaux et points hauts

Données d'infrastructure routière

Les données d'infrastructure routière à savoir routes et chemins ont été extraites de la base de données BD TOPO® Pays Version 1.2 de l'IGN (Carte 3-14 et zoom Carte 3-15). Elles sont issues du thème Réseaux de transport et sont au format vecteur. Il s'agit de polygones à la précision métrique. Ces données datent de 2003 et ont été considérées comme étant à jour dans le cadre des travaux de recherche.



Carte 3-14 Carte des réseaux de routes et de chemins, des bâtis et limites de communes



Carte 3-15 Carte des réseaux de routes et de chemins, des bâtis et limites de communes-zoom

L'indice KR

L'indice KR élaboré par Becker (Becker, 1982) est une variable synthétique combinant l'exposition et la pente d'un site pour définir l'énergie lumineuse reçue en un point donné. Il s'exprime comme le rapport entre l'énergie lumineuse reçue par unité de surface en un point donné et une référence, représentant l'énergie reçue, sur la même unité de surface par un site parfaitement horizontal et plan. La valeur est une valeur moyenne sur l'année et ne tient pas compte des reliefs avoisinants qui peuvent intercepter les rayons de soleil pendant certaines heures de la journée durant toute ou partie de l'année.

Sa formule est développée ci-après (Vennetier, 2007) :

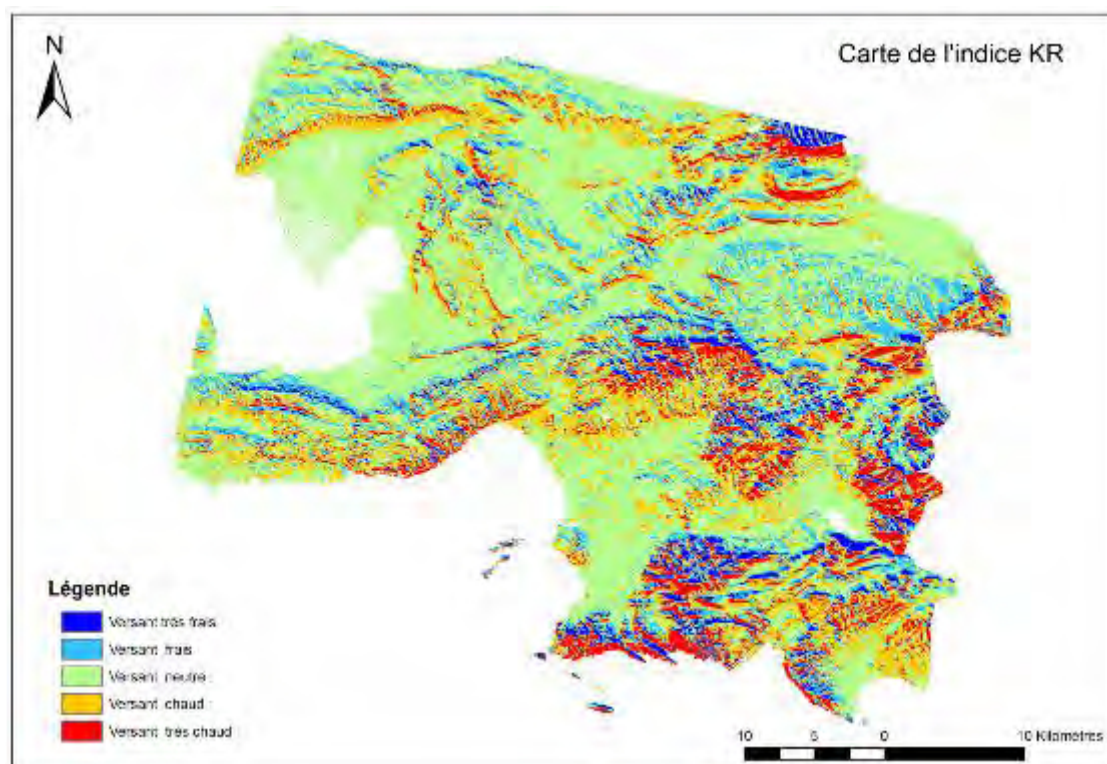
Indice KR = $(\sin(H - \text{ATAN}(P * \cos(E)))) / \sin(H)$ avec :

H = constante liée à la moyenne annuelle de l'angle par rapport à la verticale du soleil au zénith à la latitude du site étudié. Elle change avec la latitude (elle s'accroît du nord au sud, le soleil étant de plus en plus haut sur l'horizon). Cette valeur algébrique de la pente pour la zone d'étude est de 0,8203.

P = pente du site par rapport à l'horizontale, en radians.

E = exposition du site par rapport au nord, en radians.

La variable représentée par cet indice a été calculée sur l'ensemble de la zone d'étude MAM, les valeurs obtenues ont été classées selon les 5 niveaux.



Carte 3-16 Carte de l'indice KR de Becker

Données de limites de communes

Les données de limites de communes ont été extraites de la base de données BD CARTO® V2004 de l'IGN (Carte 3-14). La BD CARTO® est une base de données géographiques contenant des entités cartographiques issues de la vectorisation de la carte au 1/50 000 et d'images satellitaires SPOT5. Son échelle d'utilisation varie du 1/25 000 au 1/100 000. Sa

précision géométrique est entre 20 et 40 m. Cette précision géométrique varie selon les thèmes et selon le type de paysage (plus précis en milieu rural qu'en milieu urbain) (IGN, 2004).

3.2 Méthodes et outils

Ce paragraphe a pour objectif d'exposer les principales méthodes mises en œuvre dans la thèse avec leurs principes. Il présente également les méthodes de traitement d'images par télédétection, qui, même si elles n'ont pas été utilisées directement dans les travaux de thèse, peuvent aider à la compréhension de certaines données relatives à la végétation.

3.2.1. Méthodes d'analyse spatiale

Les méthodes d'analyse spatiale ont été particulièrement exploitées dans les travaux de recherche avec, en particulier le Système d'Information Géographique (SIG), l'analyse par le calcul d'indice de l'écologie du paysage et la morphologie mathématique.

a. SIG

Le Système d'Information Géographique (SIG) a permis de stocker, de gérer, de traiter et de représenter l'information géographique développée dans la thèse. Cette information a été stockée et gérée dans une base de données géographiques, qui combine des données géométriques (localisation et forme) et thématiques. Chaque thème d'information a été représenté par une couche, ensemble d'objets élémentaires de même nature, associant la représentation cartographique des objets spatiaux et la table d'information statistique associée. L'information y a été stockée et représentée au niveau du pixel (on est alors en mode raster) ou au niveau d'objets spatiaux élémentaires qui sont alors soit des points, des lignes ou des polygones (on est alors en mode vecteur). Le SIG utilisé a permis une combinaison de ces deux modes de gestion.

Le Système d'Information Géographique (SIG) a permis de croiser les informations contenues dans la base de données de différentes façons. D'une part les liens existant entre les caractéristiques géométriques et thématiques des objets ont permis des sélections de sous ensembles à partir, soit de requêtes portant sur les attributs statistiques, soit de requêtes dites spatiales à partir d'outils graphiques. D'autre part un certain nombre d'opérateurs géométriques ou topologiques ont permis de travailler sur les objets spatiaux eux-mêmes, appartenant ou non à une même couche.

Les principales fonctions d'analyse spatiale associées aux SIG qui ont été utilisées dans la thèse ont été :

- la superposition (*overlay*) de différentes couches d'information : elle permet de mettre en relation des informations issues de sources variées et *a priori* incompatibles (recensement, télédétection, relevés de terrain etc.) et de nature différente (réseau routier, parcellaire, bâti etc.) ;
- l'intersection, l'inclusion, l'union, qui permettent de délimiter des ensembles spatiaux correspondant à certains critères. Ces opérations donnent lieu à la création de nouvelles informations géométriques (création de nouveaux polygones par exemple dans le cas de l'intersection) et/ou d'une nouvelle information sémantique (données agrégées, dictionnaire d'inclusion...) ;
- des opérations booléennes sur les attributs des entités spatiales qui sont des points, des lignes ou des polygones ;
- la création de zones tampons (*buffer*) autour d'objets permettant d'évaluer les caractéristiques de différents environnements d'un objet spatial donné ;

- des statistiques sur les attributs des entités associées.

L'outil logiciel utilisé : Le logiciel ArcGIS© Version 9.2

Le logiciel ArcGIS© version 9.2, Extension Spatial Analyst, est un logiciel développé par ESRI (Environmental Systems Research Institute) qui permet de visualiser, d'explorer, d'interroger et d'analyser des données spatiales. Ce logiciel est particulièrement adapté pour manipuler des données vectorielles. Son extension Spatial Analyst est quant à elle, particulièrement adaptée pour manipuler des données raster, dotée de fonctions permettant la reclassification d'image, la transformation de couche raster en couche vecteur et réciproquement, de calculer des densités, de procéder à des calculs sur les couches...

C'est un outil très riche pour l'analyse spatiale, mais aussi pour la mise en page cartographique.

b. *Ecologie du paysage*

Pour traduire la structure de la végétation, les travaux de thèse se sont intéressés aux indices développés pour l'écologie du paysage dans le paragraphe 5.2.2. En effet, l'écologie du paysage, qui étudie les écosystèmes à travers l'étude des paysages, offre un grand nombre d'indices permettant de traduire la composition mais aussi la structure des paysages (McGarigal, 2002 ; Turner, 1990). Il est intéressant de rappeler que la notion de paysage se rapporte à « ce que l'on voit », elle est d'abord liée à l'aspect visuel. En cherchant à formaliser sous forme de cartes son regard sur les paysages, les régions, le géographe a fait évoluer cette notion. Il devait « transposer [sa] vision horizontale, et nécessairement fragmentaire, qu'il avait au sol (avec ses espaces masqués) en une vision verticale, extensive, cartographique et spatiale » (Bruneau et al., 1985). La véritable dimension spatiale est apparue avec les photographies aériennes et les images satellites, le paysage pouvait être perçu dans toute sa globalité et sa variété. Certains géographes considèrent le paysage suivant les deux dimensions, verticale et horizontale. La dimension verticale consiste à voir le paysage comme une superposition de couches, chacune étant la représentation cartographique d'une variable du paysage, toute la variété du paysage apparaissant aux intersections de ces couches. La dimension horizontale, en revanche, correspond alors à la notion de paysage introduite par Bruneau et al. (1985) à savoir l'agencement dans certaines proportions de plusieurs affectations de sol.

C'est tout particulièrement l'indice d'agrégation qui a été calculé et exploité.

L'outil logiciel utilisé : Le logiciel FRAGSTATS© Version 3.3

Pour l'élaboration des indices paysagers, le logiciel FRAGSTATS© Version 3.3 a été utilisé (McGarigal et Marks, 1994). Il permet de calculer un grand nombre d'indices à l'échelle du paysage (landscape), de la classe (class) ou de l'unité spatiale élémentaire (patch). C'est un logiciel qui peut être chargé sur :

<http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>.

Le logiciel offre deux possibilités de calcul des indices :

- *le calcul standard* : l'indice est calculé sur la totalité de l'image, le résultat obtenu est une valeur chiffrée caractéristique de l'image ;
- *le calcul par fenêtre glissante* : l'indice est calculé sur la totalité de l'image grâce à une fenêtre qui parcourt toute l'image en « glissant » de l'extrémité gauche de l'image vers l'extrémité droite et de haut en bas. La taille de la fenêtre est définie par l'utilisateur qui en fixe en mètres, le rayon encore appelé *radius*. Ainsi pour une image d'une résolution de

pixel de 2,5 mètres, un *radius* de 5 mètres délimitera une fenêtre glissante de 12,5 mètres soit 5 pixels sur 5 pixels (Figure 3-3)

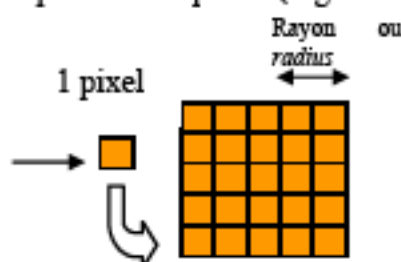


Figure 3-3 Définition d'une fenêtre glissante de 5 pixels sur 5 pixels

L'assiette de calcul de l'indice est celle de la fenêtre, la valeur obtenue est affectée au pixel central. La fenêtre se déplace alors d'un pixel et reproduit le même calcul, ainsi de suite jusqu'à ce que toute l'image ait été parcourue par la fenêtre glissante. Le résultat peut être représenté spatialement, il couvre la totalité de l'image initiale avec des valeurs pour chaque pixel correspondant aux valeurs de l'indice calculé. Les bords de l'image ainsi obtenue sont en général des valeurs no data, le calcul étant ramené au pixel central, les bords correspondant à la taille du rayon n'ont donc pas de valeurs.

c. Morphologie mathématique

La morphologie mathématique a été mise en oeuvre pour l'analyse de la structure des zones bâties dans la partie 5.1.1.c de la thèse. Dans son principe, elle traite les images binaires (codées en 0 ou en 1), s'intéressant aux objets d'intérêt codés à 1; elle utilise un élément structurant qui est déplacé de façon à ce que son centre *x* passe par toutes les positions dans l'image. L'image binaire exploitée dans la thèse correspondait à une image comportant les bâtis, représentant les objets d'intérêt codés 1, et le reste codé 0.

Pour chacune des positions de *x*, on se pose une question relative à l'union ou à l'intersection de l'élément structurant avec les objets de l'image. L'ensemble des points correspondant à une réponse positive permet de construire une nouvelle image qui constitue l'image résultat. Deux traitements élémentaires sont fréquemment mis en oeuvre : la dilatation et l'érosion. Le résultat de leur application sur les objets est le suivant :

Pour la dilatation :

- tous les objets vont "grossir" d'une partie correspondant à la taille de l'élément structurant ;
- s'il existe des trous dans les objets, c'est-à-dire des "morceaux" de fond à l'intérieur des objets, ils seront comblés ;
- si des objets sont situés à une distance moins grande que la taille de l'élément structurant, ils vont fusionner.

Pour l'érosion :

- les objets de taille inférieure à celle de l'élément structurant vont disparaître ;
- les autres seront "amputés" d'une partie correspondant à la taille de l'élément structurant ;
- s'il existe des trous dans les objets, c'est à dire des "morceaux" de fond à l'intérieur des objets, ils seront accentués ;
- les objets reliés entre eux vont être séparés.

NB : une érosion (ou dilatation) de taille n peut se réaliser en répétant une érosion (ou une dilatation) n fois avec un élément structurant de taille 1 ou en appliquant une seule érosion (ou une seule dilatation) avec un élément structurant de taille n.

Transformations de base de la morphologie mathématique appliquée à une image

La fermeture. Parmi les transformations de base de la morphologie mathématique, la fermeture, qui combine la dilatation suivie d'une érosion, bouche les trous et réunit les composantes proches. En répétant la séquence de transformation choisie avec un élément structurant de taille croissante, on obtient un tamisage des composantes. Des mesures sont effectuées après chaque transformation d'où le terme de granulométrie employé pour qualifier ce type de traitement. Dans le cas d'une granulométrie par fermeture, l'information structurale est relative à la distance car ce ne sont plus les composantes mais l'espace situé entre elles qui est tamisé; au fur et à mesure que le nombre de fermeture augmente, les composantes se rattachent les unes aux autres jusqu'à n'en former qu'une seule (Voiron-Canicio, 1995b). La granulométrie par fermeture apporte ainsi des informations sur l'espacement entre des points. C'est un traitement cartographique qui consiste donc à relier des points qui se situent à une certaine distance les uns des autres (Figure 3-4).

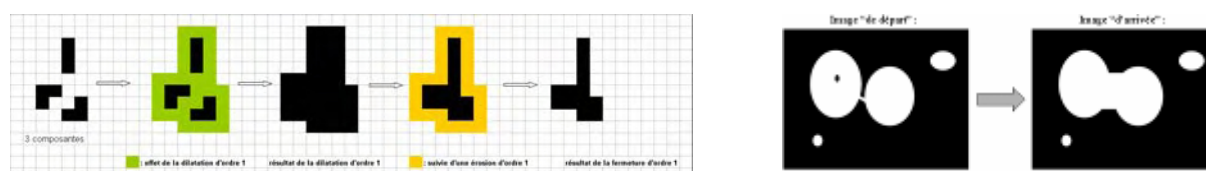


Figure 3-4 Effets d'une fermeture illustrés à partir de deux exemples

L'ouverture. En combinant l'érosion suivie d'une dilatation, l'ouverture a quant à elle pour effet de supprimer les petites composantes de l'image et de gommer les irrégularités des contours (Figure 3-5).

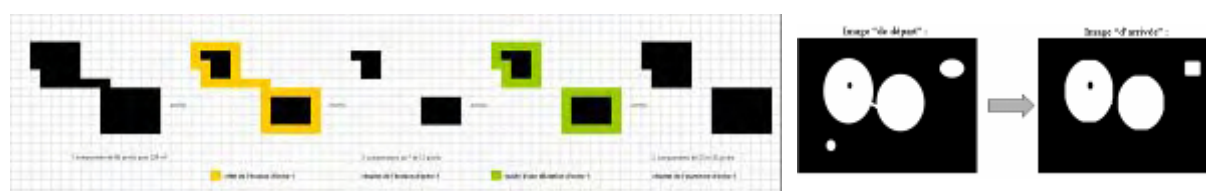


Figure 3-5 Effets d'une ouverture illustrés à partir de deux exemples

L'outil logiciel utilisé : Le logiciel Image J 1.2

Pour la morphologie mathématique le logiciel ImageJ a été utilisé. C'est un logiciel mis dans le domaine public qui peut être chargé à partir du site Internet : <http://rsb.info.nih.gov/ij>. Il est capable d'afficher, d'éditer, de traiter, de sauvegarder et d'imprimer des images 8, 16 et 32 bits ainsi que de lire de nombreux formats (TIFF, JPEG, GIF...). Il a permis de calculer des statistiques en valeur de pixel et de surface sur des zones définies, de mesurer des distances, de réaliser des traitements d'image tels que des contrastes, des filtres, des transformations géométriques, des lissages...

3.2.2. Méthodes statistiques

Des analyses statistiques de plusieurs natures ont été réalisées dans le cadre de la thèse.

a. Statistiques résumées de l'analyse univariée

La procédure Analyse à une variable est l'une des procédures de base pour l'analyse d'une unique colonne de données numériques. Elle calcule des statistiques résumées, effectue des tests d'hypothèse et crée une grande variété de graphiques. Parmi les graphiques, citons le nuage de points, l'histogramme, la boîte à moustaches, les graphiques des quantiles, de normalité, de densité et de symétrie, calculs de valeurs statistiques telles que moyenne, médiane, écart-type, coefficient de variation.

b. Calcul de coefficient de corrélation des analyses bivariées

La procédure de calcul des coefficients de corrélation des variables deux à deux a été développée dans le cadre du paragraphe 9.1.

c. Comparaison d'échantillons

La procédure Comparer plusieurs échantillons est conçue pour comparer deux échantillons indépendants, ou plus, de données numériques. Des tests ont été effectués pour déterminer s'il y avait des différences significatives entre les moyennes, variances et/ou médianes de différentes populations dont les échantillons étaient issus pour plusieurs analyses développées dans la thèse. De plus, les données ont été visualisées graphiquement avec des boîtes à moustache.

Comme les valeurs analysées de chaque variable ne suivaient pas une distribution normale, un test non-paramétrique a été utilisé pour comparer les médianes des échantillons, et non les moyennes. Ainsi le test de Kruskal-Wallis a testé l'hypothèse nulle que les médianes pour les différents échantillons étaient les mêmes. Quand la valeur de la probabilité était inférieure à 0.05, il y avait une différence statistiquement significative entre les médianes au niveau de confiance de 95 %. Puis la représentation de la boîte à moustaches avec les encoches apparentes sur la médiane a permis de déterminer quelles médianes étaient statistiquement différentes.

d. Analyse multivariée

Plusieurs méthodes ont été développées dans la thèse :

- ☞ L'analyse en composantes principales (ACP), analyse factorielle classique qui s'applique principalement aux tableaux de mesure, c'est-à-dire à un ensemble de variables quantitatives, hétérogènes ou non (principalement développée dans le paragraphe 9.2) ;
- ☞ L'analyse factorielle des correspondances (AFC) qui s'applique principalement aux tableaux de contingence, mais permet d'analyser des données qualitatives (principalement développée dans le paragraphe 5.2.3) ;
- ☞ La classification ascendante hiérarchique (CAH) qui est une des méthodes de classification automatique les plus utilisées en géographie. Elle permet d'effectuer des typologies emboîtées et est très utile pour cartographier de manière synthétique une

information complexe et multidimensionnelle (principalement développée dans le paragraphe 5.2.3).

Les analyses de données en statistique ont servi à affiner la description, à éliminer des « bruits », à révéler des associations et des interactions. Elles ont permis de regrouper les unités élémentaires. Il a été possible de procéder ainsi à une classification, qui tient compte de toutes les variables simultanément, et telle que les unités géographiques qui constituent une classe se ressemblent plus entre elles qu'elles ne ressemblent aux autres unités de l'espace étudié.

☛ Une dernière méthode a été utilisée, soit la régression PLS (Partial Least Squares regression), conçue pour construire un modèle statistique reliant un ensemble de variables explicatives X à des variables à expliquer Y (principalement développée dans le paragraphe 9.3). Elle a permis la prise en compte de variables effectivement ou potentiellement corrélées (Tenenhaus, 1998). Cette méthode de régression linéaire peut demander d'éventuelles transformations des variables explicatives continues ou discrètes. Ceci a été testé dans le cadre des travaux de la thèse mais n'a finalement pas été retenu, car les résultats ne s'en trouvaient pas améliorés. Elle a fourni une variable estimée continue, dans laquelle on a pu choisir de faire des classes. Elle s'est prêtée à des tests de robustesse très fiables à différentes étapes de son utilisation par des méthodes de ré-échantillonnage (Wold, 1995 cité dans Vennetier, 2007).

e. Logiciels utilisés

Plusieurs logiciels statistiques ont été utilisés : le logiciel STATGRAPHICS®Centurion et les logiciels ADE4 et R de façon secondaire.

Le logiciel STATGRAPHICS®Centurion

C'est un logiciel d'analyse statistique et graphique largement utilisé pour les statistiques descriptives et exploratoires, les modélisations, l'amélioration de la qualité. Il contient plus de 150 procédures (Statgraphics®CenturionXV, 2006). On peut citer celles utilisées principalement dans la thèse :

- Analyses exploratoires des données ;
- Analyses de la variance et régressions ;
- Méthodes non paramétriques ;
- Méthodes multivariées.

Le logiciel ADE4

ADE4 est un logiciel développé au laboratoire de Biométrie et Biologie Évolutive (UMR 5558) de l'Université Lyon 1. Il contient des fonctions d'Analyse de Données destinée en premier lieu à la manipulation des données Écologiques et Environnementales avec des procédures Exploratoires d'essence Euclidienne, d'où la dénomination ADE4. Il a été utilisé pour tester la significativité des composantes de la PLS développée sous Statgraphics®Centurion (principalement développée dans le paragraphe 9.3).

Le logiciel R

R est un langage de programmation interactif interprété et orienté objet contenant une très large collection de méthodes statistiques et des facilités graphiques importantes. C'est un logiciel gratuit. Initié dans les années 90 par Robert Gentleman et Ross Ihaka (Département de Statistique, Université d'Auckland, Nouvelle-Zélande), auxquels sont venus depuis

s'ajouter de nombreux chercheurs, le logiciel R constitue aujourd'hui un langage de programmation intégré d'analyse statistique. Le site Internet de la "R core-développement Team", <http://www.r-project.org>, est la meilleure source d'informations sur le logiciel R. De nombreuses bibliothèques de fonctions et des documents d'aide sont disponibles également sur le "Comprehensive R Archive Network (CRAN)", <http://lib.stat.cmu.edu/R/CRAN/> (Marin, 2006).

Il a été utilisé pour tester la significativité des coefficients des modèles issus de la PLS développée sous Statgraphics®Centurion (principalement développée dans le paragraphe 9.3).

3.2.3. Méthodes de traitement d'images par télédétection

Les données relatives à l'occupation du sol, à partir desquelles ont été extraites les données de végétation (Carte 3-5 ; Carte 3-6 ; Carte 3-7), ont été obtenues par le traitement d'images satellites par télédétection. L'objet de ce paragraphe est de présenter succinctement les méthodes de classification d'images satellites qui ont permis de disposer de cartes de végétation ayant des caractéristiques variées.

a. La résolution des images satellites

Un satellite tel que SPOT, QUICKBIRD ou LANDSAT enregistre, pour une même emprise ou scène, des images constituées d'une mosaïque de pixels qui caractérisent autant de surfaces élémentaires au sol, individualisées par leurs propres valeurs radiométriques. La dimension du pixel, qui ne cesse de décroître avec l'évolution de la technologie des radiomètres, exprime la limite de résolution spatiale des capteurs. Exprimée en mètres au niveau du sol, celle-ci définit la plus petite surface pour laquelle les différentes réponses radiométriques des objets susceptibles de composer cette plage seront inévitablement confondues en une seule. Cette taille du pixel constitue donc une donnée très importante en télédétection satellitaire. Elle permet en effet d'apprécier la finesse de détail d'une image satellite et par conséquent, la capacité d'un satellite donné à aborder l'étude de domaines pour lesquels les faibles dimensions des objets à détecter constituent un facteur limitant (Robin, 2002).

Les deux grands types de traitement d'image satellite qui ont permis de réaliser les cartes de végétation exploitées dans la thèse, sont la classification par pixel et la classification par objet.

b. Classification par pixel

La classification par pixel traite chaque pixel indépendamment les uns des autres et considère que le pixel décrit correctement l'objet, c'est-à-dire que sa résolution spatiale est en accord avec la taille et l'organisation spatiale des objets présents ce qui n'est évidemment pas le cas pour des images de très haute résolution spatiale. Cette classification est nécessaire pour simplifier l'information contenue dans l'image et donc pour faciliter son interprétation. La classification est un outil classique qui a permis de distinguer correctement les différents types d'occupation du sol, notamment la végétation avec forêt, garrigues... On peut signaler qu'un problème de différenciation du bâti est apparu sur 20 % des données, ceci quelque soit le support image traité (orthophoto de l'IGN, image satellite à haute ou très haute résolution). Des confusions entre des toits de maisons de couleur orangée (fréquente dans le sud de la France) et la terre nue argileuse de même couleur ont été observées, ce qui a conduit à ne pas retenir cette méthode pour obtenir des données sur la localisation précise des bâtis.

L'outil logiciel utilisé : Le logiciel Erdas Imagine©8.7

L'outil de traitement de l'image utilisé pour l'étude qui a permis de réaliser les classifications par pixel est le logiciel Erdas Imagine©8.7 (ESRI : Environmental Systems Research Institute) qui propose une gamme complète de procédures simples et efficaces de traitement d'images. Le logiciel a été utilisé dans le cadre de la thèse dans le cadre des procédures de mosaïcage, changements de formats d'images...développés lors du calcul de l'indice d'agrégation de la végétation (développé dans l'annexe D).

c. Classification par analyse texturale

La classification orientée objet considère la forme, la taille, la couleur, la texture et l'association d'objets se trouvant sur une image. Elle permet ainsi d'identifier des classes constituées de plusieurs types d'occupation du sol comme un peuplement mixte combinant feuillus et résineux, une zone débroussaillée caractérisée par de la pelouse au sol et des arbres mis à distance, etc. L'image est segmentée en régions homogènes, de manière à faire ressortir les objets réels du terrain. Les objets sont créés par croissance de région, c'est-à-dire, par fusion de pixels adjacents. L'outil logiciel utilisé est un module additionnel Feature Analyst©4.1 du logiciel Erdas Imagine décrit ci-dessus.

DEUXIÈME PARTIE

CARACTÉRISATION PUIS CARTOGRAPHIE DES INTERFACES HABITAT-FORÊT

Le contexte de la thèse, tant général que scientifique, et la problématique de recherche ont été décrits dans la partie I.

L'objectif de cette partie II est de construire une méthode de caractérisation et de cartographie des interfaces habitat-forêt, pour les départements du sud de la France concernés par le risque d'incendie.

En rappel, la partie II s'organise autour des Chapitre 4 à Chapitre 6.

Le **chapitre 4** aborde la définition de l'objet géographique « interface » et précise l'utilisation qui peut en être faite dans le contexte particulier de l'interface habitat-forêt et du risque d'incendie. Le **chapitre 5** identifie les critères pertinents de caractérisation des interfaces habitat-forêt. Il développe, d'une part, une méthode pour caractériser et cartographier la structure de l'habitat résidentiel, et d'autre part, une méthode pour caractériser la structure de la végétation. Cela conduit au **chapitre 6** qui présente une typologie d'interfaces habitat-forêt et une méthode de cartographie associée.

Chapitre 4. L'interface habitat-forêt, un objet géographique nouveau

4.1 Un objet géographique nouveau

4.1.1. *Le concept d'interface en géographie*

Dans un espace géographique formé d'unités spatiales de taille et de nature différentes, les territoires sont constitués d'espaces différenciés. Deux espaces en contact, contigus, sont qualifiés de « discontinus », formant ainsi une discontinuité. Les discontinuités mises en évidence, de type surfacique, peuvent être par ailleurs des zones privilégiées d'échange, des zones d'interaction entre deux systèmes, système anthropique et système naturel, des zones « de transition, brutale ou progressive entre deux systèmes dissemblables » (Carroué et al., 2002). Elles peuvent alors être définies comme « interfaces », au sens de l'article du Groupe de recherches « interfaces » (2008).

Dans son article (Groupe de recherches « interfaces », 2008) publié dans l'*Espace géographique*, le groupe de chercheurs du Groupe de recherches « interfaces » dont j'ai fait partie, exprime son positionnement scientifique sur le concept d'interface en géographie, précise la définition et les contours de cette interface par rapport à des termes proches comme la discontinuité et la limite.

[L'interface] naît de la discontinuité et/ou est établie sur celle-ci. L'interface assure avant tout une fonction de mise en relation de différents systèmes territoriaux et joue un rôle privilégié de régulation. En effet, l'interface est soit un lieu doté de pouvoirs spécifiques de régulation, soit la conséquence de régulations exercées par les centres des systèmes territoriaux qu'elle relie. Dire interface, c'est d'abord construire un objet géographique nouveau possédant une puissance explicative forte, c'est ensuite disposer d'une clé d'entrée pour l'analyse spatiale, orientant le choix des lieux à étudier, c'est enfin postuler l'existence d'un système particulier. Longtemps, l'étude des interactions s'est principalement intéressée aux échanges entre les lieux et aux modifications territoriales générées : on se centrait donc sur les actions et les rétro-actions entre des lieux souvent distants et non sur la manière dont ces interactions pouvaient produire des lieux particuliers. Ici, l'analyse par les interfaces privilégie la régulation et la valorisation de flux en des lieux spécifiques par des acteurs socio-économiques et la compréhension des conséquences sur le fonctionnement de l'espace. L'interface est un système localisé, constitué d'interactions entre les espaces et les sociétés, avec une certaine stabilité. Les échanges entre les territoires constituent les entrées et les sorties de ce système. Son organisation interne permet la sélection et la valorisation des échanges. L'interface est alors un système ouvert, essentiellement caractérisé par ses relations avec son environnement. Et même si ses marges sont floues de par sa fonction même, l'interface est un système spécifique, parce qu'elle réalise des actions différentes de son environnement.

L'interface est un facteur de production de l'espace, bien au-delà de ses limites, à travers ses répercussions, positives ou négatives, sur l'organisation des systèmes spatiaux interfacés. C'est précisément ce qui en fait tout l'intérêt dans le cadre d'une approche géographique. L'interface met en relation des lieux, mais dans le même temps en exclut d'autres. Une nouvelle hiérarchisation de l'espace émerge alors, entre les lieux qui ont accès à l'interface ou

qui sont localisés dans sa dynamique forte (les lieux « in »), et les autres (les lieux « out »). Les systèmes interfacés vont ensuite être modifiés par l'existence même de l'interface, ce qui aura des conséquences sur le plan économique, social, culturel, etc.

L'approche par les interfaces est donc fondamentale pour l'analyse des systèmes spatiaux dans la mesure où elle offre un cadre spécifique permettant une meilleure appréhension des mécanismes relationnels et de leurs implications territoriales. L'importance croissante prise par les structures réticulaires et les dynamiques spatiales nouvelles associées vient conforter l'intérêt d'une telle approche. En outre, utiliser le concept d'interface, c'est avoir la possibilité de mettre l'accent sur des espaces souvent périphériques, considérés comme des marges, qui révèlent des structures spatiales au rôle stratégique pour le fonctionnement des systèmes interfacés.

Ce concept de l'interface en géographie peut s'appliquer au cas particulier de l'Interface Habitat-Forêt.

4.1.2. *Le concept géographique appliqué à l'interface habitat-forêt*

Les espaces urbains et forestiers s'interpénètrent créant ainsi des zones de contact entre espaces anthropiques (périurbains ou agricoles) et naturels (forestiers ou sub-forestiers), celles-ci se traduisent soit par des lisières (pour une ligne de contact), soit par des marges (pour un plan de contact) (Follin, 2000). Elles marquent des ruptures plus ou moins brusques dans l'espace entre des parties où dominent les processus anthropiques et d'autres parties qui restent dominées par des processus naturels (forêts, garrigues...). En intégrant plus ou moins des massifs de végétation forêt, garrigues ... avec des fonctionnalités liées aux systèmes urbains, elles constituent de nouvelles configurations spatiales qui forment des territoires plus ou moins complexes, l'interface habitat-forêt, et rendent totalement obsolètes « la durable distinction de l'urbain et du rural » (Ferrier, 1998). Cette interface habitat-forêt peut être observée sur le territoire, c'est un objet géographique qui naît de la discontinuité établie par le contact entre différentes natures d'occupation du sol contiguës caractérisées par des structures spatiales spécifiques (habitat et végétation). Cette discontinuité est non seulement caractérisée par un changement de nature qualitative. Elle s'inscrit en effet sur un contact entre différents types d'occupation du sol qui sont principalement l'espace forestier au sens large (forêts, maquis, garrigues...), l'espace urbanisé mais aussi l'espace agricole. Mais elle est également marquée par une variation de nature quantitative faisant apparaître des différences de structure (habitat isolé à groupé, discontinuité à continuité de la végétation). Ces variations sont plus ou moins fortes : interpénétration de la végétation dans les zones habitées (discontinuité en doigt de gant, sinueuse) ou front de végétation au contact des habitations (discontinuité linéaire droite séparant deux espaces bien différenciés).

a. *Le système interface, lieu d'échange et régulation.*

La présence de cette discontinuité justifie le développement de l'interface (Groupe de recherches « interfaces », 2008) qui forme un système localisé complexe, empreint d'une certaine stabilité. Siège d'interactions entre les espaces et la société, les échanges entre ces espaces constituent les entrées et sorties du système. Pour en comprendre le fonctionnement, il est pertinent de définir d'une part une structure interne de l'interface avec ses composantes intrinsèques, et d'autre part une structure externe de l'interface avec son environnement proche. L'interface peut alors être perçue de type horizontal du fait de ses échanges surfaciques au sein de la structure interne de l'interface au niveau de ses composantes

(végétation forestière, type d'habitat, pelouse...). La végétation est la caractéristique forte du système « naturel » soumis à des conditions locales de vent, pente, exposition... et les enjeux sont la caractéristique forte du système « anthropique » soumis à des conditions locales de présence d'équipements de protection, lutte... Cette structure interne lui permet alors de valoriser et de sélectionner ses échanges, qui dépendent de la combinaison de la nature de l'habitat avec la nature de la végétation. Dans sa globalité l'interface assure des échanges avec son environnement extérieur, toujours de type horizontal (autre interface, autre occupation du sol, champ, eau...) en mettant en relation des espaces appartenant à un même niveau d'organisation, mais aussi de type vertical (relation de gouvernance de la gestion des risques dans les interfaces...). La distinction entre le caractère horizontal et le caractère vertical permet de mieux saisir la portée des répercussions des interactions sur les espaces et de détecter les différents enjeux spatiaux des interfaces en matière d'aménagement notamment. L'interface habitat-forêt se présente donc comme un système ouvert, essentiellement caractérisé par ses relations avec son environnement, assurant un certain nombre de fonctions avec celui-ci.

Une fonction d'échange

Par essence, l'interface habitat-forêt assure une fonction d'échange et de régulation par la mise en relation de différents systèmes territoriaux attachés à la nature forestière, agricole ou urbaine qui la compose. Ce **rôle d'échange** peut être assuré de deux façons. En premier lieu, le vecteur de l'échange est le vecteur « aménités » - l'homme et son milieu de vie. L'interface habitat-forêt est un lieu où des habitants vivent au contact, voire au cœur, du milieu naturel (forêt, garrigues...). Elle offre un milieu de vie agréable, un certain bien-être pour ses habitants en quête d'une vie proche de la « nature » (positif). L'homme y trouve la tranquillité, l'ombre, l'espace, etc ; la nature, quant à elle, est entretenue par les mains de l'homme, lui assurant ainsi une certaine pérennité (renouvellement, débroussaillage, enlèvement des bois morts...). En second lieu, le vecteur de l'échange est le vecteur « feu » - l'homme met le feu à la végétation et la végétation, alors en flammes, menace l'homme et ses biens. L'interface crée un milieu propice au développement du feu dans le contexte méditerranéen (négatif). Elle est à la fois le siège de départs de feu générés par le fait d'imprudences liées aux travaux et aux loisirs conduits au sein d'une végétation combustible et inflammable et elle est très vulnérable à l'incendie (hommes et biens à protéger contre le feu). L'échange au sein de l'interface se traduit donc par la relation homme/arbres associée d'une part au confort de vie (ombre, calme, végétation nettoyée, etc) et d'autre part au phénomène incendie de forêt (départs de feu, surfaces ou lignes de front de flamme - propagation du feu- parcourues par l'incendie).

Une fonction de régulation

L'interface joue par ailleurs un **rôle de régulation**, essentiel et privilégié bien que non obligatoire. En effet l'interface habitat-forêt oriente les échanges relevant de réglementation, c'est-à-dire de l'établissement de lois et de contrats. Dans les régions françaises soumises à un risque d'incendie de forêt élevé, la loi d'orientation forestière du 11 juillet 2001 impose l'obligation de débroussailler dans un rayon de 50 m autour des bâtis situés à moins de 200 m de forêts, garrigues ou maquis (Art. L.322.3). Cette distance de débroussaillage peut être étendue à 100 m autour des maisons selon les règles locales. Les interfaces habitat-forêt sont particulièrement inscrites dans les zones soumises à obligation de débroussaillage. Ce sont des lieux où s'exercent des obligations qui leur confèrent *in fine* un rôle de régulation. De manière générale, l'interface régule les fonctionnements de l'espace et des sociétés, c'est un régulateur entre la cause (interaction socio-spatiale) et un effet (transformation spatiale) qui parvient à concilier des échanges et des fonctionnements apparemment contradictoires. Cette

caractéristique définit la pérennité de l'interface (Groupe de recherches « interfaces », 2008). L'interface habitat-forêt obéit à ce principe, elle assure un rôle d'équilibre entre le milieu naturel et l'homme avec une biomasse végétale maîtrisée et un comportement humain adapté face au risque d'incendie. L'interface habitat-forêt peut aussi assurer un rôle de rupture avec un changement d'état de l'interface dans le cas d'un feu parcourant l'interface habitat-forêt : changement d'état de l'interface qui, de l'état non brûlé passe à l'état brûlé. Mais aussi parce que la discontinuité végétation/urbain/agricole traduisant l'hétérogénéité de l'espace, autorise la mise en place de concurrence et de complémentarité qui créent l'interface (végétation détruite complètement pour permettre l'extension de l'urbain - urbanisation croissante – ou, végétation qui embroussaille le territoire urbain ou qui colonise d'anciennes terres agricoles - végétation envahissante).

b. Mise en œuvre de processeurs

Les différents rôles joués par l'interface habitat-forêt exposés ci-dessus supposent l'existence de processeurs. Ces *principaux processeurs* intervenant dans le fonctionnement de l'interface habitat-forêt sont de plusieurs ordres :

- ☞ **Attracteur** : l'homme est attiré et a envie de vivre dans les interfaces habitat-forêt qui correspondent pour lui à un lieu de bien-être proche de la nature (tranquillité, espace, nature tout en s'assurant le confort urbain). Le feu est aussi un élément qui peut être attiré dans les interfaces en s'y propageant facilement si le combustible est important (par manque de débroussaillage...), il peut y être également généré (imprudence humaine, source de départ de feu) ;
- ☞ **Régulateur** : l'entretien de la végétation et la maîtrise de la quantité de combustibles assurés par l'homme garantissent un équilibre de vie dans l'interface : bien-être, ombre, espace, tranquillité avec un risque d'incendie maîtrisé ;
- ☞ **Sélecteur** : quiconque ne peut vivre au sein d'une interface habitat-forêt. L'homme peut hériter d'un cabanon qui autrefois se trouvait au sein d'un espace géré du fait d'une agriculture locale ou du pastoralisme et qui aujourd'hui, faute d'exploitation de la forêt, se retrouve au sein d'une interface soumise au risque d'incendie. En général faute de moyens financiers, cette catégorie d'habitant ne peut ni entretenir ni quitter les lieux pour s'installer ailleurs. Au contraire l'homme doit avoir des moyens financiers importants pour envisager de s'installer dans une interface habitat forêt. Le processeur « sélecteur » joue également dans la gestion de la végétation : le débroussaillage imposé dans les interfaces habitat-forêt oblige à sélectionner les arbres en fonction de leur situation par rapport à la maison ...ceux qui devront être abattus, ou préservés, mais élagués...

Dans une moindre mesure on peut évoquer les processeurs :

- ☞ **Adaptateur** (par la régulation dans la cohabitation possible de l'homme au sein d'un espace naturel moyennant le respect du débroussaillage...);
- ☞ **Commutateur** (lien possible entre des systèmes différents, par le vecteur feu par exemple).

4.2 L'interface habitat-forêt

4.2.1. Définition des interfaces habitat-forêt dans le sud de la France

Dans les régions françaises soumises à un risque d'incendie de forêt élevé, la loi d'orientation forestière du 11 juillet 2001 (Art. L.322.3) impose l'obligation de débroussailler « dont l'objectif est de diminuer l'intensité et de limiter la propagation des incendies par la réduction des combustibles végétaux en garantissant une rupture de la continuité du couvert végétal, et en procédant à l'élagage des sujets maintenus et à l'élimination des rémanents de

coupes » (*). Le débroussaillage et son maintien en état doivent être exécutés par le propriétaire (ou son ayant-droit ou le locataire) dans un rayon de 50 m minimum autour des bâtis situés à moins de 200 m de forêts, garrigues ou maquis (illustration du débroussaillage en Figure 4-1). Cette distance de débroussaillage peut être portée à 100 m autour des constructions par décision motivée du maire ou prescription dans un Plan de Prévention au Risque Naturel incendies de forêt. L'obligation de débroussaillage s'applique également de part et d'autre des routes desservant ces bâtis sur une profondeur variable, dépendant de l'arrêté préfectoral. Chaque département a en effet ses règles, 10 m est en général la profondeur préconisée. Une carte délivrée par la préfecture du département concerné par le risque d'incendie de forêt dessine la limite des 200 m de tout massif forestier, garrigue ou maquis, identifiant ainsi les habitations soumises au débroussaillage obligatoire. Elle s'appuie sur un fond de carte de l'Inventaire Forestier National (IFN), validé par les services de l'Etat chargés de la bonne mise en œuvre des obligations de débroussaillage (Directions Départementales de l'Agriculture et de l'Équipement).

(*): Article L.321-5-3 du Code forestier, circulaire DGFAR/ SDFB/C2004-5007 du 26 mars 2004 relative aux Planx de Protection des Forêts Contre l'Incendie (PPFCI).



Figure 4-1 Illustration des effets du débroussaillage sur l'environnement en interface- Photo SDIS Gard dans Detry-Fouque 2007

La définition des Interfaces Habitat-Forêt s'appuie sur l'existence de la loi d'orientation forestière du 11 juillet 2001 (Art. L.322.3) qui impose l'obligation de débroussailler dans les conditions évoquées précédemment.

L'interface habitat-forêt est délimitée par la surface dessinée par un rayon de 100 m autour des bâtis situés à moins de 200 m de tout massif forestier ou garrigues, maquis (Figure 4-2). Seuls les bâtis de type résidentiel sont pris en compte, qu'ils soient occupés de façon permanente, temporaire ou saisonnière, au regard des actions de prévention à développer auprès de la population résidente (les constructions agricoles, industrielles, commerciales et édifices publics bien que soumises au débroussaillage ne sont donc pas pris en compte dans cette définition).

Cette distance de 100 m prend en compte la profondeur maximale à l'intérieur de laquelle les opérations de réduction du combustible s'imposent aux propriétaires de maisons par la loi forestière française (Art.321.5.3). Ainsi en règle générale, l'interface sera constituée d'une zone de 50 m autour de la maison en principe débroussaillée (Obligation Légale de Débroussaillage, OLD) et d'une couronne entre 50 m et 100 m, non débroussaillée dans le cas où le débroussaillage à 50 m est considéré comme suffisant ou débroussaillée si le Maire a porté ce débroussaillage à 100 m.

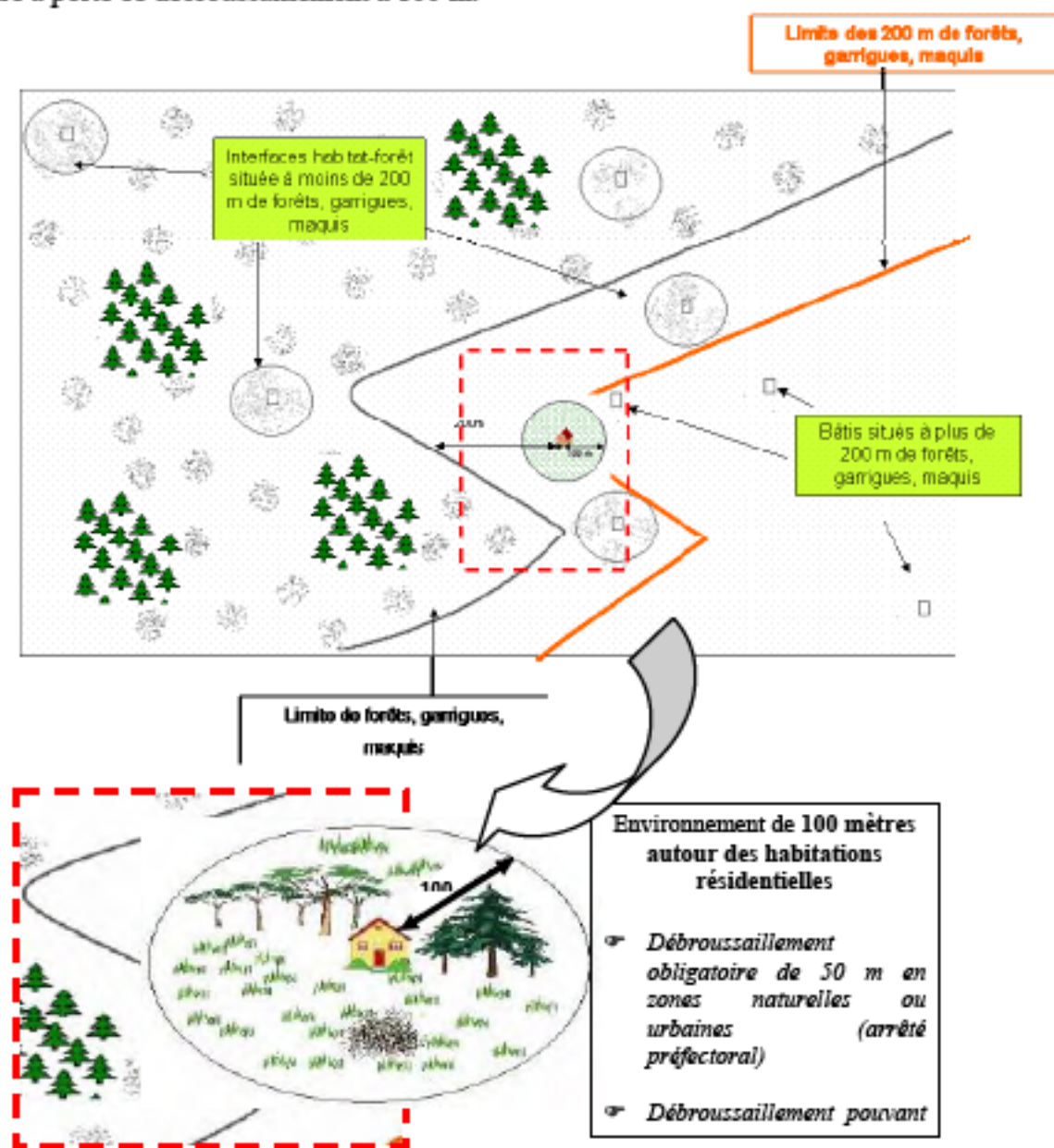


Figure 4-2 Définition de l'interface habitat-forêt

4.2.2. Des interfaces habitat-forêt vulnérables à l'incendie

Si comme aux USA on porte une attention particulière aux interfaces habitat-forêt, c'est parce que les maisons et les vies humaines y sont le plus vulnérables au feu (Caballero et al., 2004 ; USDA et USDI, 2001 ; Rundel et King, 2001 cités dans Syphard et al., 2007a). D'une part l'interface habitat-forêt intègre la zone exposée au contact des flammes ainsi que celle exposée aux phénomènes de radiation et de convection des flammes (Cohen, 2002, 2003; Nowicki, 2002; Randall, 2003; Southern Forest alliance, 2003; Caballero et al., 2004). En effet le rayon de 100 m autour du bâti inclut à la fois une zone dite d'inflammation potentielle ou zone d'ignition, dans laquelle une structure bâtie est vulnérable aux phénomènes de radiation et de convection des flammes, et une zone de protection possible : les résultats de recherches indiquent que la zone délimitée par une maison et son environnement situés dans les 30 à 60 m d'un front de flamme détermine cette zone d'inflammation potentielle lors d'un feu sévère et que cette zone peut être protégée (Cohen, 2002 ; Southern Forest alliance, 2003). Dans une publication récente, Kaval (2009) souligne l'importance de connaître l'état de la végétation dans un rayon de 100 m autour des bâtis rappelant que les 30 premiers mètres doivent être nettoyés de tout combustible. D'autre part l'interface habitat-forêt, par définition située non loin d'un massif forestier, est aussi vulnérable au phénomène d'inflammation par des brandons liés aux sautes de feux. En effet la limite extrême de l'interface peut se trouver située jusqu'à 300 m d'un massif (200 m + 100 m) (Figure 4-2). Les résultats de recherche indiquent que la probabilité pour qu'une maison soit enflammée par un brandon est non-négligeable jusqu'à une distance de 200 à 250 m d'un front de flamme, soit des limites d'un massif (Ahern et Chladil, 1999 ; Caballero et Beltran, 2003), et que la maison reste vulnérable aux sautes de feux jusqu'à une distance de 500 m, en particulier dans un environnement d'arbres hauts. Colin et al. (2002) ont montré qu'une distance de 228 mètres était la distance moyenne observée que les brandons pouvaient sauter depuis un front de flamme dans les pays méditerranéens européens. Les sautes de ces brandons enflammés peuvent même atteindre plus de 2 km dans le cas des pinèdes de Pin d'Alep, entraînant l'allumage de foyers secondaires dans au moins 40 % des cas (Alexandrian, 2002).

Chapitre 5. La caractérisation des interfaces habitat-forêt

La définition des interfaces habitat-forêt conduit à penser à élaborer une typologie d'interfaces habitat-forêt en fonction des parts relatives des systèmes « habitation » et systèmes « forêt ou autre espace naturel » et du niveau d'imbrication de leurs structures (Lampin et *al.*, 2005). Dans l'espace géographique, les interfaces habitat-forêt ne sont pas délimitées. Or pour mieux comprendre leur fonctionnement et leur intérêt, en particulier pour l'évaluation et la prévention du risque d'incendie de forêt, elles doivent pouvoir être délimitées puis mesurées. Inscrire leurs limites sur le territoire s'apparente à une démarche de géo-métrisation qui aura pour effet de renforcer la place de ces interfaces sur le territoire.

La **première hypothèse** est de considérer que **l'organisation de l'habitat**, sa structure spatiale a une influence sur le niveau de risque d'incendie. Selon la nature de l'habitat - isolé, diffus ou groupé- la pression anthropique sera différente sur l'environnement, les enjeux seront plus ou moins importants en cas d'incendie, etc. Il convient donc de différencier l'organisation de l'habitat selon des types tel qu'isolé, diffus ou groupé (Figure 5-1) et des critères associés comme la densité du bâti...

L'analyse des retours d'expériences souligne que la structure de la végétation prime sur sa nature (Jolielercq, 2003) dans la propagation d'un incendie de forêt. La **seconde hypothèse** est donc de prendre en compte la **structure horizontale de la végétation** localisée en zone d'interface : une végétation éparse aura pour effet d'atténuer l'intensité d'un feu, de freiner sa propagation du fait d'une rupture dans la continuité de la végétation ; au contraire, une végétation compacte et continue alimentera le feu et lui maintiendra un niveau d'intensité critique jusqu'aux abords d'un bâti. Même si la structure verticale de la végétation joue un rôle également dans la propagation d'un feu en permettant le transfert du feu d'une végétation enflammée au sol jusqu'à la cime des arbres en cas de continuité verticale de la végétation, elle ne sera prise en compte dans l'approche spatiale. Ainsi la végétation est appréhendée au niveau de sa continuité horizontale, de sa compacité.

La caractérisation des interfaces habitat-forêt se fonde alors sur la **combinaison de deux critères** qui sont la nature de l'habitat (habitat isolé, habitat diffus, habitat groupé) et la structure horizontale de la végétation (végétation éparse, végétation continue, végétation absente). Elle conduit à des typologies qui doivent rester simples pour être interprétables en termes de risque d'incendie.

5.1 La structure de l'habitat et sa représentation cartographique

Comment définir, identifier et cartographier différents types d'habitat, pertinents en termes de risque d'incendie de forêt pour une caractérisation des interfaces habitat-forêt ? Il apparaît intéressant de distinguer d'une part un habitat isolé qui constitue un espace habité peu dense, localisé en général au sein d'espaces naturels, d'autre part un habitat diffus pour lequel les zones habitées restent dispersées et relativement peu peuplées, et enfin un habitat groupé qui correspond à des zones bâties avec des densités de population fortes. Peut-on alors attribuer une densité, une forme, voire d'autres critères spatiaux spécifiques pour chacun des types d'habitat alors identifiés ? Selon quelle méthode, à partir de quelles informations géographiques, par quelle analyse spatiale du territoire ?

5.1.1. Approche exploratoire pour définir la structure des zones bâties

a. Définir la structure des zones bâties en habitat isolé, diffus ou groupé

Si les expressions « habitat isolé, diffus ou groupé » dont une illustration est donnée sur la Figure 5-1, sont très répandues chez les cartographes, urbanistes et autres aménageurs, il n'en existe pas vraiment de véritable définition. Ainsi l'INSEE (Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques) développe le concept d'unité urbaine. « L'unité urbaine est une commune ou un ensemble de communes qui comporte sur son territoire une zone bâtie d'au moins 2 000 habitants où aucune habitation n'est séparée de la plus proche de plus de 200 mètres. Ces seuils, 200 mètres pour la continuité de l'habitat et 2 000 habitants pour la population, résultent de recommandations adoptées au niveau international ». Fondée sur cette définition, la continuité de l'habitat serait préservée pour une distance entre bâtis de moins de 200 m, au-delà de cette distance tout bâti serait considéré comme isolé. L'IGN (Institut Géographique National) définit une distance de 100 m dans sa base de données BD CARTO® pour définir la tâche urbaine (CETE-CERTU, 2005). Dans cette tâche urbaine, aucun bâtiment n'est séparé d'un plus proche de plus de 100 m. Ainsi tout bâti séparé de son plus proche de moins de 100 m peut être identifié comme un bâti appartenant à un habitat groupé. Enfin, des travaux sur la généralisation des données de la base de données BD TOPO® de l'IGN (Boffer, 2001 ; Ruas, 1999) identifient le cœur d'une ville (cœur urbain, noyaux urbains) comme l'ensemble des bâtis distants de moins de 50 m.

Faute de règles précises pour définir les types d'habitat isolé, diffus et groupé, plusieurs approches ont été explorées.

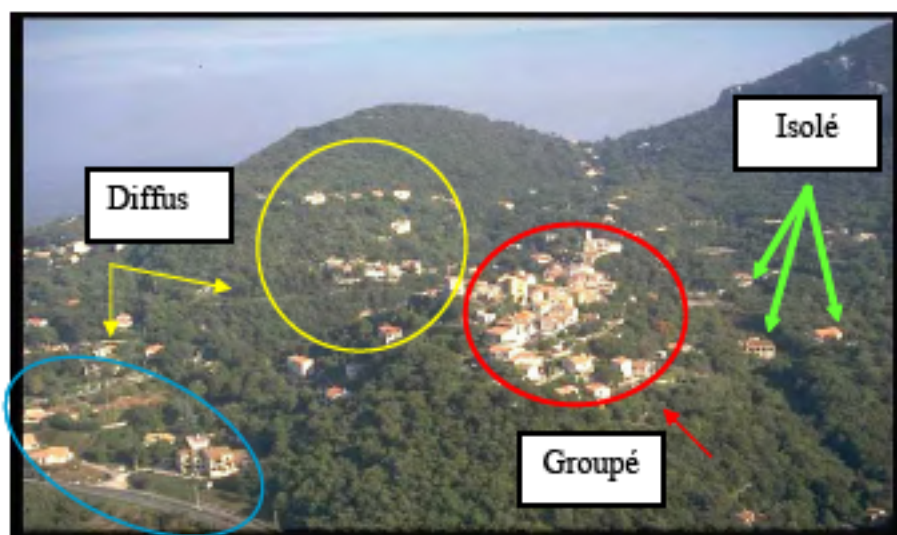


Photo C.Tailleux

Figure 5-1 Illustration de différents types de structure d'habitat

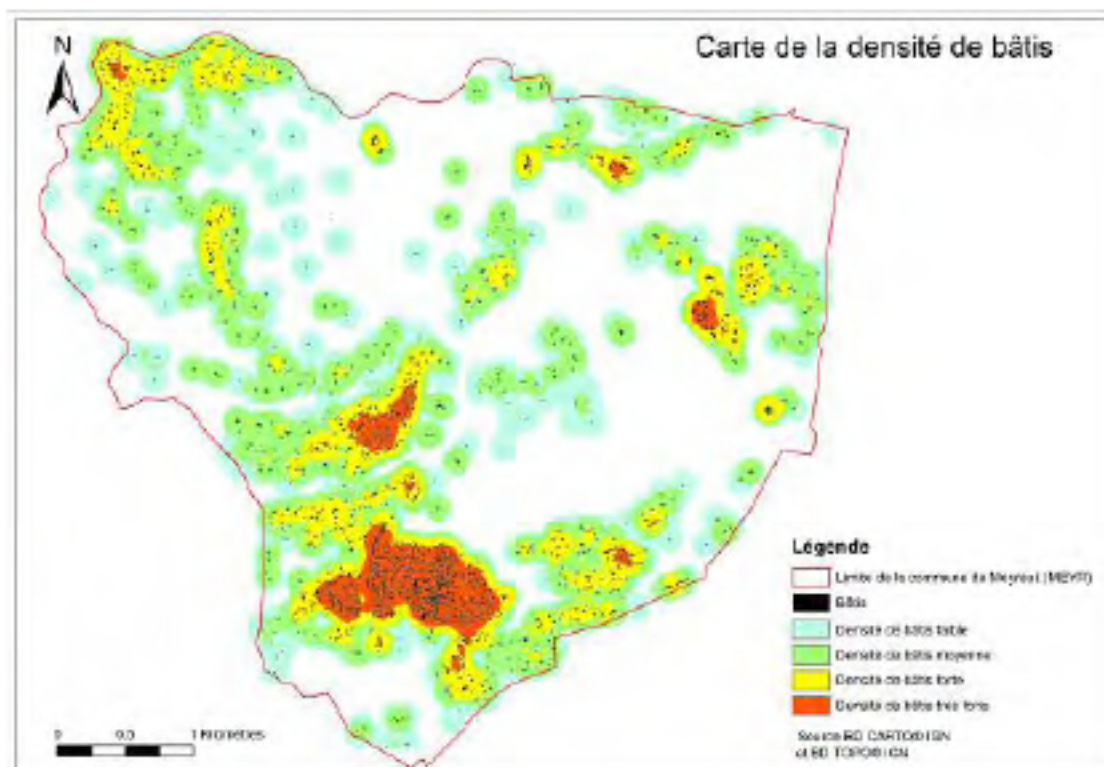
La première approche a consisté à caractériser les types d'habitat - isolé, diffus et groupé- à travers le seul critère de densité des zones bâties, un critère *a priori* discriminant. La méthode a alors exploité la fonction « densité » développée dans le logiciel ArcGIS®9.2. Mais le problème de la détermination de seuils appropriés des valeurs de densité s'est posé pour différencier chaque type d'habitat. Cette première approche a donc été complétée par une approche basée sur le regroupement de bâtis séparés d'une certaine distance afin d'en déduire des seuils de densité représentatifs d'une organisation spatiale du bâti. Des fourchettes de distance ont alors été définies en s'appuyant sur les distances, citées précédemment dans les

concepts d'unité urbaine de l'INSEE et de tâche urbaine de l'IGN. Puis en s'inspirant de travaux développés pour qualifier la ville (Boffer, 2001 ; Ruas, 1999), cette deuxième méthode s'est appuyée sur l'application de principes de la morphologie mathématique. Elle a ainsi permis d'évaluer des seuils de densité calés sur une organisation spatiale des bâtis. Mais la seule notion de distance pour discriminer les types d'habitat s'est avérée insuffisante et la notion du nombre de bâtis a dû également être prise en compte, notamment en s'inscrivant dans un contexte de prévention et de lutte contre l'incendie de forêt. Une approche calée sur des géo-traitements appliqués sur les bâtis a donc été développée prenant en compte à la fois la distance entre les bâtis et le nombre de bâtis regroupés.

b. Une approche par la densité

La densité du bâti peut être calculée sans investigation particulière en appliquant la fonction densité, développée dans l'extension Spatial Analyst du logiciel ArcGIS®9.2, sur la couche de « bâtis quelconques » issue de la base de données BD TOPO® de l'IGN, actualisée. Cette couche de données, qui est au format vecteur (polygones), a été transformée en couche vecteur point pour permettre le calcul de la densité à l'intérieur d'un rayon de recherche fixé à 100 m. La valeur du rayon ainsi choisi permet de circonscrire l'emprise de l'interface fixée à un même rayon de 100 m autour de chaque bâti. Les valeurs de densité ont été seuillées en se rapprochant de données relevées dans les plans d'occupation du sol des municipalités. Ainsi trois classes ont été créées selon les critères suivants conduisant à la Carte 5-1 :

- Faible densité : moins de 48 bâtis/km². Cette classe a été considérée comme habitat isolé ;
- Densité moyenne : de 48 à 160 bâtis/km². Cette classe a été considérée comme habitat diffus ;
- Forte densité : plus de 160 bâtis/km². Cette classe a été considérée comme habitat groupé.



Carte 5-1 Carte de la densité du bâti avec la fonction densité du logiciel ArcGIS®9.2

La cartographie de la densité ainsi réalisée est simple mais le choix des seuils de densité définissant les classes de densité reste intuitif. Comment fixer les meilleurs seuils pour distinguer les différents types d'habitat ? Par ailleurs, le résultat se présente sous forme d'auréoles concentriques avec des valeurs de densité décroissantes du centre vers l'extérieur, l'interface dans son ensemble ne peut pas toujours être affectée à un type d'habitat donné.

c. Une approche par la distance et la morphologie mathématique

Considérant que les types d'habitat sont définis comme des zones de plus ou moins forte densité de bâtis, de forme plus ou moins compacte et de taille variable, l'idée est de considérer qu'une densité peut être traduite par des distances caractéristiques entre bâtis, bâtis regroupés alors au sein d'une même enveloppe. La recherche d'une méthode d'identification des types d'habitat a été fondée sur la sélection des bâtiments répondant au même critère de distance entre bâtis et la définition d'enveloppes englobant ces mêmes bâtiments. Il s'agissait de regrouper les bâtiments distants entre eux d'une distance fixée.

Des méthodes de généralisation des données géographiques ont déjà été développées dans le souci de caractériser les villes : méthode de l'enveloppe convexe, de la Triangulation de Delaunay ou modèle de généralisation basé sur la BD TOPO® IGN (Boffer, 2001 ; Ruas, 1999). Cette dernière méthode développée pour la création et la qualification de villes est basée sur le regroupement de bâtiments proches en unités, puis le regroupement de ces unités, et enfin la simplification des formes obtenues. Elle utilise la morphologie mathématique développée par Matheron et Serra (1964) et s'inspire des travaux récents d'Edwards et Regnault (2000). D'autres travaux (Le Corre et al., 2000 ; Kalhori et Weber, 2005) font appel à la morphologie mathématique pour délimiter la ville et plus particulièrement à une méthode d'agrégation de données basée sur le critère des distances.

La granulométrie par fermeture dont les principes sont présentés dans le paragraphe 3.2.1.c apporte des informations sur l'espacement entre les bâtis. C'est un traitement cartographique qui consiste à relier des points, ici des bâtis, se situant à une certaine distance les uns des autres. Il peut être réalisé grâce à des logiciels spécifiques de morphologie mathématique (ex : IMAGE J) ou grâce à la notion SIG de zone tampon ou *buffer*, positif ou négatif (fonction SIG permettant de dilater ou d'éroder les éléments surfaciques). Si l'on veut réunir les éléments distants de moins de 200 m, il faut appliquer autour de ces entités surfaciques un *buffer* positif dans un rayon de 100 m, puis un *buffer* négatif de 100 m. Les entités distantes de moins de 200 m seront alors agrégées lors du phénomène de dilatation et resteront reliées entre elles lors du phénomène d'érosion permettant de revenir à la taille initiale des éléments. Les zones de moins de 200 m sur 200 m incluses au milieu des zones de la classe considérée disparaissent et le zonage final laisse apparaître une seule région de classe d'intérêt. Les éléments distants de plus de 200 m subissent le phénomène de dilatation puis d'érosion mais retrouvent leur forme initiale (Le Corre et al., 2000).

Des règles de distance entre bâtis.

Pour identifier des types d'organisation spatiale du bâti (habitat isolé, diffus et groupé), des règles s'appuyant sur des notions simples de distance entre les bâtis, de continuité du bâti existant dans la littérature ont été fixées.

- ☞ L'INSEE évoque une distance de 200 m qui fait référence à la notion d'unité urbaine reposant sur la continuité du tissu urbain pour lequel il n'y a « pas de coupure de plus de

200 m entre deux constructions ». Ainsi tout bâti séparé de son plus proche de plus de 200 m pourrait être identifié comme un bâti appartenant à un habitat isolé (Figure 5-2).

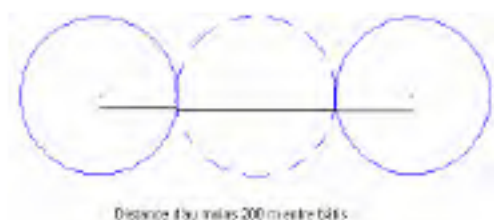


Figure 5-2 Distance entre deux bâtis d'un habitat isolé

☞ L'IGN dans sa base de données BD CARTO® IGN définit une distance de 100 m pour définir la tâche urbaine (CETE-CERTU, 2005). Ainsi les unités urbaines sont telles qu'aucun bâtiment n'est séparé d'un plus proche de plus de 100 m. Ainsi tout bâti séparé de son plus proche de moins de 100 m pourrait être identifié comme un bâti appartenant à un habitat groupé. Les schémas ci-dessous de la Figure 5-3 illustrent des configurations possibles.



Figure 5-3 Distance entre deux bâtis d'un habitat groupé

Des travaux (Boffet, 2001) visant à « créer » la ville mettent en évidence une distance intéressante pour identifier le cœur d'une ville, soit le cœur urbain. Ainsi les noyaux urbains sont constitués d'ensemble de bâtis distants de moins de 50 m.

☞ Enfin par complémentarité, un bâti n'appartenant ni à un habitat isolé ni à un habitat groupé serait considéré comme appartenant à un habitat diffus. Tout bâti séparé de son plus proche d'une distance comprise entre 100 et 200 m serait identifié comme un bâti appartenant à un habitat diffus (Figure 5-4).

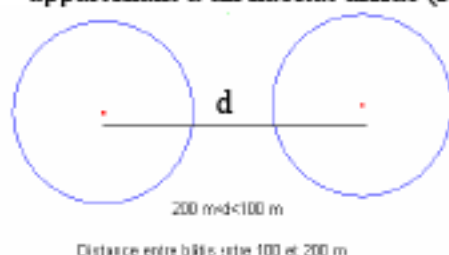


Figure 5-4 Distance entre deux bâtis d'un habitat diffus

Application de la méthode à l'échelle d'une commune de 2 021 ha, comptabilisant 1 652 bâtis
Avec le logiciel IMAGE J, considérant ces 3 classes de distances, les bâtis ont été identifiés comme appartenant à la classe habitat isolé, diffus ou groupé (Figure 5-5). La surface totale de chaque enveloppe a alors été calculée, en limitant l'enveloppe du bâti isolé aux limites de la commune (détail du calcul en Annexe A).

Des densités moyennes ont ainsi été calculées :

- pour le bâti isolé, on dénombre 150 bâtis sur une surface de 1 553 ha, soit une densité de 9,7 bâtis/km², de l'ordre de 1 bâti /10 ha, soit en surface 21 m²/ha (216 m² étant la surface moyenne d'un bâti) ;
- pour le bâti diffus, on dénombre 261 bâtis sur une surface de 278 ha, soit une densité de 93,6 bâtis/km², de l'ordre de 10 bâtis /10 ha, soit en surface 202 m²/ha ;
- pour le bâti groupé, on dénombre 1 104 bâtis sur une surface de 190 ha, soit une densité de 582,8 bâtis/km², de l'ordre de 58 bâtis /10 ha, soit en surface 1 259 m²/ha.

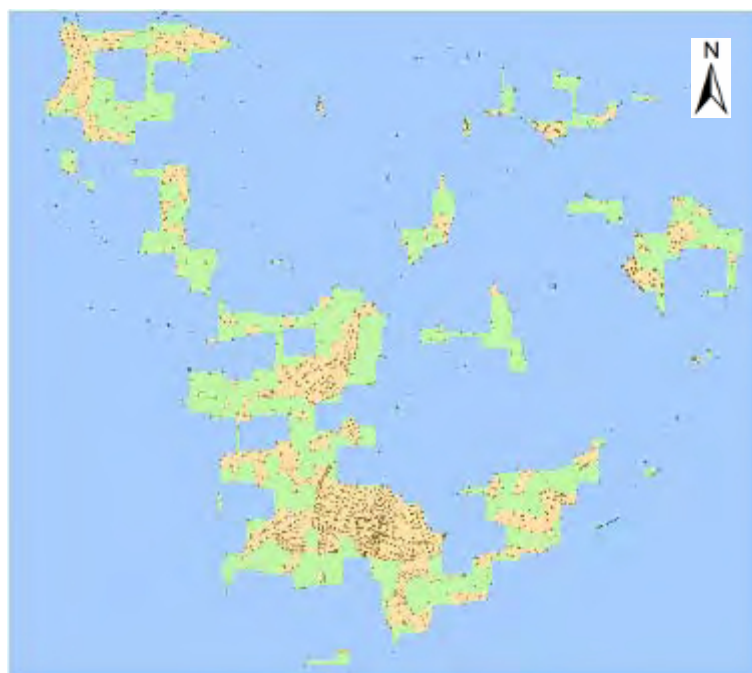
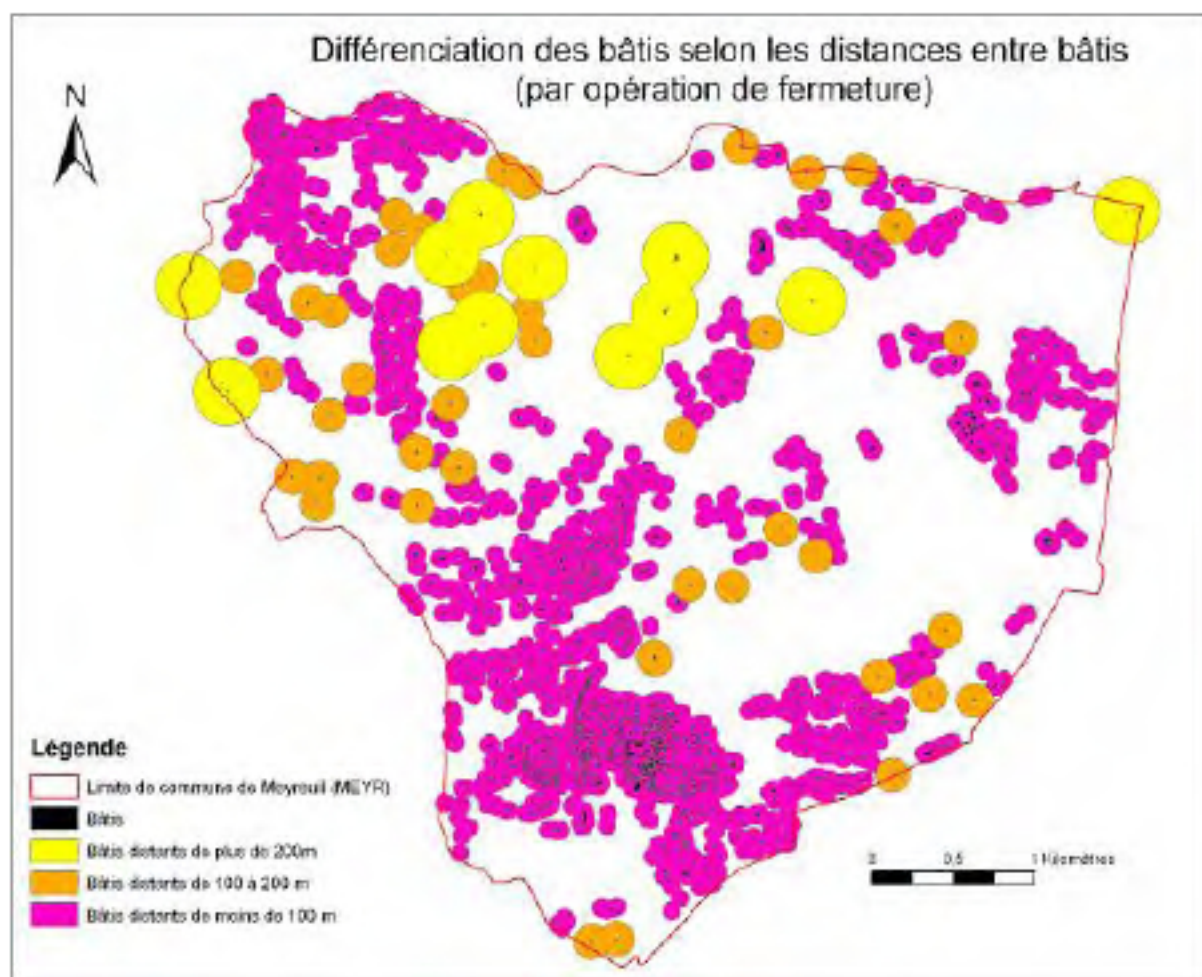


Figure 5-5 Représentation à l'aide d'ArcGIS©9.2 des enveloppes déterminées avec le logiciel Image J des bâtis isolés (en bleu), bâtis diffus (en vert) et bâtis groupés (en orange)

Avec le logiciel ArcGIS©9.2, les bâtis ont été identifiés selon 3 catégories en fonction de leur distance par des opérations successives de fermeture : bâtis distants de plus de 200 m, bâtis distants entre 100 et 200 m et bâtis distants de moins de 100 m. Une zone tampon a ensuite été réalisée autour de chaque type de bâti (200 m pour les bâtis isolés, 100 m pour les bâtis diffus et 50 m pour les bâtis groupés) puis les zones tampons se juxtaposant ou se superposant ont été agrégées (Carte 5-2).

Pour chaque enveloppe des zones tampons, des densités moyennes ont été calculées :

- pour le bâti isolé, une densité de 8 bâtis/km² ;
- pour le bâti diffus, une densité de 28 bâtis/km² ;
- pour le bâti groupé, une densité de plus de 150 bâtis/km².



Carte 5-2 Représentation des enveloppes de bâtis isolés, diffus et groupés déterminées sous ArcGIS@9.2

L'approche par les distances entre les bâtis permet de définir des valeurs de densité auxquelles doivent répondre les types de bâti mais elle n'est pas suffisante. La représentation cartographique obtenue, particulièrement facile à lire quand elle est issue du logiciel ArcGIS@9.2, fait apparaître que des bâtis identifiés comme appartenant à de l'habitat diffus voire à de l'habitat groupé apparaissent comme appartenant à un habitat isolé. En effet un groupe de 3 maisons distantes de moins de 50 m (bâtis groupés) qui se trouve éloigné de plus de 200 m d'un autre groupe de bâtis correspond davantage à un habitat isolé qu'à un habitat groupé à l'échelle du territoire. Ceci est d'autant plus vrai dans le contexte de prévention et de lutte contre les incendies.

d. Une approche par la distance et le regroupement de bâtis

Les deux approches précédentes n'étant pas suffisantes, la nouvelle approche a consisté à allier le critère « distance entre bâtis » et le critère « nombre de bâtis ». Sur la base des connaissances acquises par des experts, gestionnaires en matière de prévention et des acteurs de la lutte, des principes de définition des types d'habitat ont été posés en lien avec la problématique du risque d'incendie et plus particulièrement dans le contexte d'une caractérisation des interfaces habitat-forêt.

L'élément principal formulé a été de considérer la distance de 100 m entre les bâtis comme essentielle pour différencier un habitat isolé d'un habitat non isolé en termes de lutte contre l'incendie. Tout bâti distant de plus de 100 m d'un autre bâti est considéré comme un habitat

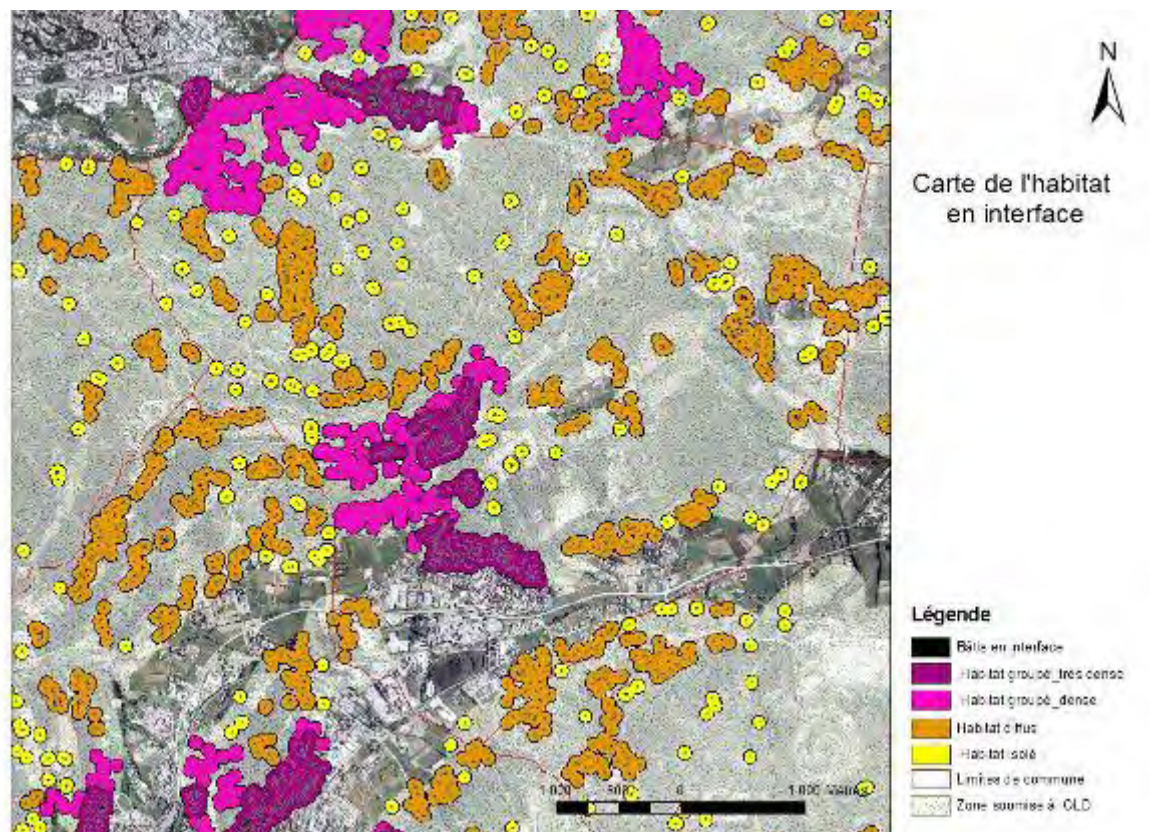
isolé. A cet élément principal, des compléments sont apportés. D'une part tout groupe de deux bâtis, éloigné de tout autre bâti de plus de 100 m, et d'autre part tout groupe de trois bâtis, éloigné de tout autre bâti de plus de 100 m, dans lequel la somme des distances séparant les bâtis, prises deux à deux, est supérieure à 100 m ont été également considérés comme un habitat isolé. En effet, en cas de lutte contre l'incendie, l'agencement spatial de ces deux ou trois bâtis est assimilable à celui d'un bâti seul. Par ailleurs en termes de prévention, ces configurations spatiales définissent des zones à débroussailler qui, ramenées au bâti, sont importantes.

Tout bâti distant de moins de 100 m d'un autre bâti est considéré comme un habitat non isolé. Cet habitat non isolé a été différencié en habitat diffus et en habitat groupé, selon la taille des groupes de bâtis. De cette taille dépend généralement l'organisation des moyens de lutte en cas d'incendie. Ainsi l'habitat diffus a été défini comme un ensemble de 3 à 50 bâtis distants de moins de 100 m, sachant que seuls les groupes de trois bâtis, dans lesquels la somme des distances séparant les bâtis, prises deux à deux, est inférieure à 100 m ont été pris en compte. Il correspond à un habitat constitué de petits groupes de bâtis qui restent dispersés et pour lequel les infrastructures routières sont dimensionnées et calibrées pour être sécurisées avec des seuils de 10 à 50 bâtis. La défense contre l'incendie d'un tel habitat diffus sollicitera l'intervention d'un à cinq groupements d'intervention feux de forêt (GIFF). Un GIFF correspond à 4 camions citerne feux de forêt et un véhicule d'officier, en cas de lutte contre l'incendie de forêt, il peut se déployer pour défendre efficacement jusqu'à 10 maisons séparées de moins de 100 m. Par ailleurs en termes de prévention, ces configurations spatiales définissent des zones à débroussailler qui, ramenées au bâti, certes restent encore importantes, mais assurent cependant une certaine autoprotection des bâtis, notamment ceux qui sont situés au centre des zones bâties.

Enfin l'habitat groupé a été défini comme un ensemble de plus de 50 bâtis. Il correspond en général à des zones habitées situées aux abords des centres urbains, ou il constitue même ce cœur urbain dans le cas de petites communes. Des règles spécifiques existent pour dimensionner et calibrer les infrastructures routières chargées de desservir plus de 50 bâtis de façon sécurisée en cas d'incendie. Par ailleurs, il est apparu opportun, en termes de prévention contre l'incendie, de différencier deux sous-ensembles au sein de ce type d'habitat : un habitat groupé dense d'un habitat groupé très dense, ceci de façon à mettre en évidence des zones qui seraient les plus fortement urbanisées de type lotissements très denses et cœurs urbains. Ces zones ont été identifiées comme des ensembles de plus de 10 bâtis situés à moins de 30 m les uns des autres définissant ainsi l'habitat très dense dont les configurations spatiales définissent des zones à débroussailler, ramenées au bâti, faibles.

5.1.2. Principes de définition des habitats isolé, diffus et groupé

Autour des bâtis situés en interface habitat-forêt, des zones tampon de 50 m sont délimitées, puis agrégées en cas de juxtaposition et superposition. Il est important de rappeler et souligner que dans le contexte de définition des interfaces, cette zone tampon de 50 m définit par ailleurs l'emprise minimale qui doit être débroussaillée. Les zones tampon forment des polygones de tailles et de formes différentes contenant un nombre variable de bâtis. Les bâtis situés au sein de chacune des zones tampon sont dénombrés. Les types d'habitat sont différenciés et cartographiés à partir de ces polygones auxquels est associé le nombre de bâtis (Carte 5-3).



Carte 5-3 Carte de l'habitat en interface

L'**Habitat isolé** (en jaune) est constitué des polygones contenant 1 à 2 bâtis (respectivement cas (1) et (2) sur la Figure 5-6) ainsi que des polygones contenant 3 bâtis pour lesquels la somme des distances entre bâtis, prises deux à deux, est supérieure à 100 m - $d1+d2 > 100$ m par exemple - (cas (3) sur la Figure 5-6).

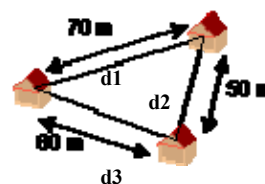
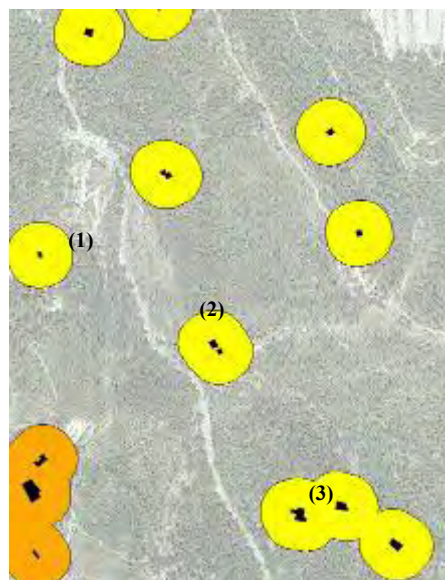


Figure 5-6 Définition de l'habitat isolé

L'**Habitat diffus** (en orange) est constitué des polygones contenant 3 bâtis (cas (1) sur la Figure 5-7) pour lesquels la somme des distances entre bâtis, prises deux à deux, est inférieure

à 100 m ($d1+d2 < 100$ m ou $d1+d3 < 100$ m ou $d2+d3 < 100$ m). Il est également constitué des polygones contenant de 4 à 50 bâtis (cas (2) sur Figure 5-7).

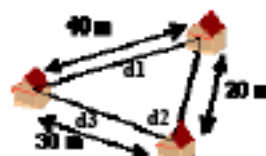
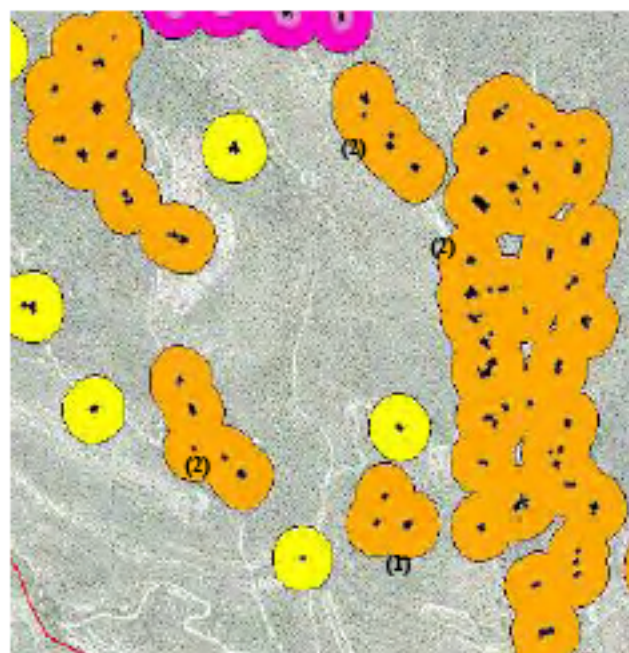


Figure 5-7 Définition de l'habitat diffus

L'*Habitat groupé* est constitué des polygones contenant plus de 50 bâtis. On différencie alors deux sous-ensembles de bâtis :

- un habitat groupé très dense (couleur à dominante violet) constitué de groupes de plus de 10 bâtis (cas (2) sur Figure 5-8) distants de moins de 30 m. Cette configuration correspond à celle des lotissements urbains compacts ou celle des cœurs urbains ;
- un habitat groupé dense (couleur à dominante rose) constitué de groupes de 1 à 10 bâtis (cas (1) sur Figure 5-8), la distance entre ces bâtis est de moins de 30 m pour les ensembles de 2 à 10 bâtis. Il correspond à un habitat groupé moins compact appartenant en général à un habitat groupé très dense.

La différenciation de ces deux sous-groupes se fait en créant des zones tampons de 15 m autour des bâtis en habitat groupé et en sélectionnant les polygones agrégés en fonction du nombre de bâtis présents dans ces polygones. Ces zones tampons sont représentées sur la Figure 5-8 d'une couleur rose clair dans les polygones à dominante rose et d'une couleur violet clair dans les polygones à dominante violet



Figure 5-8 Définition de l'habitat groupé

5.1.3. Caractéristiques spatiales des types d'habitat

Basée sur des principes de distance entre bâtis et de regroupement de bâtis, la définition des trois types d'habitat isolé, diffus et groupé conduit à caractériser ces types selon quatre critères traduisant l'organisation spatiale des bâtis dans un contexte incendie de forêt : la densité moyenne du bâti, le périmètre moyen par bâti qui doit être défendu et protégé en cas d'incendie, la surface moyenne qui doit être débroussaillée par bâti dans le cadre de la prévention contre l'incendie - la zone tampon correspondant à la zone soumise au débroussaillage obligatoire - et la forme générale de la zone bâtie de l'interface habitat-forêt pouvant avoir une incidence sur la mise en œuvre des moyens de lutte en cas d'incendie.

a. Définition des critères

La surface et le périmètre de chaque polygone, appartenant à chacun des types d'habitat isolé, diffus et groupé, sont calculés sous le logiciel ArcGIS©9.2. Par une jointure spatiale, le nombre de bâtis situés dans chaque polygone est affecté à chacun de ces polygones. A partir de ces données de bases, les critères suivants sont calculés :

La densité du bâti (Figure 5-9). Pour chaque polygone, la densité est calculée en rapportant le nombre de bâtis contenus dans le polygone sur la surface du polygone. Elle est exprimée en nombre de bâtis par km^2 .

La surface à débroussailler par bâti (Figure 5-9). Pour chaque polygone, la surface à débroussailler par bâti est calculée en divisant la surface du polygone par le nombre de bâtis contenus dans le polygone. Elle est exprimée en m^2 .

Le périmètre à défendre par bâti (Figure 5-9). Pour chaque polygone, le périmètre à défendre (ou à protéger) par bâti est calculé en divisant le périmètre du polygone par le nombre de bâtis contenus dans le polygone. Il est exprimé en m.

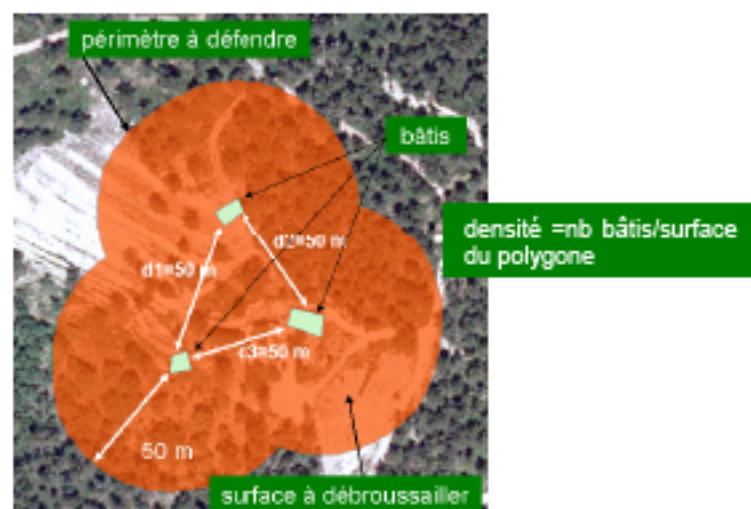


Figure 5-9 Densité, surface à débroussailler et périmètre à défendre

Nota : Pour discerner les polygones contenant 3 bâtis pour lesquels la somme des distances entre bâtis, prises deux à deux, est supérieure à 100 m de ceux pour lesquels la somme des distances entre bâtis, prises deux à deux, est inférieure à 100 m, le critère périmètre à défendre a été utilisé. Pour un scénario extrême où les distances entre bâtis sont égales à 50 m, cela signifie que la somme des distances entre bâtis, prises deux à deux, est égale à 100 m et le périmètre à défendre calculé, a une valeur de 200 m (Figure 5-10). Ainsi les polygones contenant 3 bâtis pour lesquels la valeur du périmètre à défendre est supérieure ou égale à 200 m sont considérés comme habitat isolé et ceux pour lesquels la valeur du périmètre à défendre est inférieure à 200 m sont considérés comme habitat diffus.

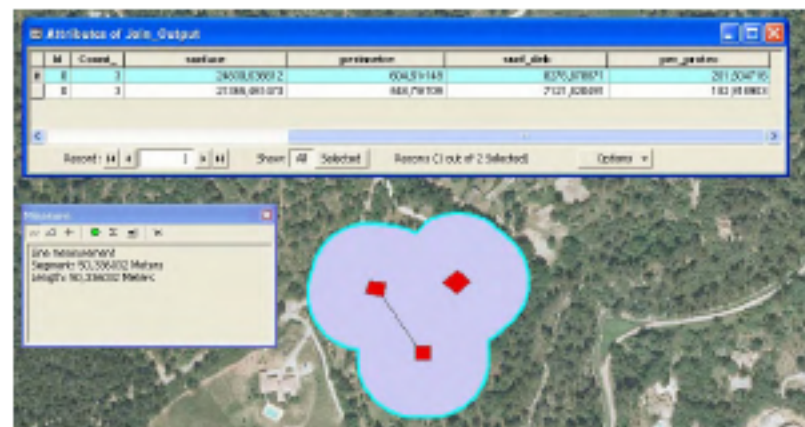


Figure 5-10 Illustration du scénario avec 3 bâtis distants de 50 m au sein d'un polygone et zoom sur la valeur de 201,50... pour le périmètre à défendre

L'indice de Patton (IP). Cet indice traduit la complexité d'une forme spatiale (Patton, 1975). Pour chaque polygone, l'indice de Patton est calculé en appliquant la formule suivante : $IP = (\text{Périmètre} \sqrt{\pi}) / (2\pi \sqrt{\text{Surface}})$ avec Périmètre = le périmètre du polygone, Surface = la surface du polygone et $\pi = 3,1416$. Le résultat est une valeur sans unité. Plus la valeur augmente, plus la taille de la forme augmente ou plus la forme est irrégulière. La valeur 1 représente une forme circulaire, la valeur 1,13 représente une forme carrée. Plus on s'éloigne de la forme ronde ou carrée, plus la valeur de l'indice augmente (Figure 5-11).

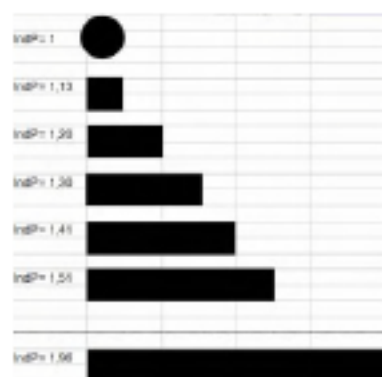


Figure 5-11 Evolution de l'indice de Patton IP en fonction de la forme

b. *Différences statistiques significatives entre les types d'habitat pour les 4 critères définis*

La carte de l'habitat a été réalisée sur chacune des deux zones d'étude AIX et VAR situées respectivement dans les Bouches-du-Rhône et dans le Var. Les 4 critères spatiaux ont été calculés pour chaque type d'habitat puis comparés par une analyse statistique de comparaison d'échantillons pour tester si les différences observées étaient significatives ou non. L'analyse statistique a été réalisée sur l'ensemble des polygones formés par les zones tampon de 50 m autour des bâtis situés en zone d'interface. Ces polygones ont été répartis selon les trois natures d'habitat constituant ainsi les trois populations d'habitat isolé, diffus et groupé à comparer sur chacun des 4 critères précédemment explicités. Puis des comparaisons ont été réalisées au sein de l'habitat groupé entre les deux populations, habitat groupé dense et habitat groupé très dense. L'analyse a été réalisée sur les données des deux zones AIX et VAR.

(i) Analyse sur les données de la zone d'étude AIX située dans les Bouches-du-Rhône

Statistiques résumées sur habitat isolé, diffus et groupé

Au sein des trois échantillons, les statistiques calculées pour chaque variable les caractérisant à savoir la densité du bâti, l'indice de Patton, la surface à débroussailler par bâti et le périmètre à protéger par bâti sont résumées dans les Tableau 5-1 à Tableau 5-4. On dénombre 979 observations (polygones) pour l'habitat isolé (I), 524 observations pour l'habitat diffus (D) et 72 observations pour l'habitat groupé (G). Les statistiques résumées permettent d'apprécier la distribution de chacun des trois échantillons pour les quatre variables étudiées. Pour chacune des variables étudiées, les échantillons ont, dans la majorité des cas, des asymétries standardisées et des aplatissements standardisés au-delà de la plage -2 et +2. Leurs données ne sont donc pas issues de lois normales. Le calcul du coefficient de variation (CV) sur la moyenne (ratio Ecart-type/Moyenne) est complété par celui (CVM) calculé sur la médiane (Q3-Q1/Médiane) quand moyenne et médiane diffèrent trop. Dans ce cas, la distribution des valeurs de l'échantillon étant trop asymétrique, l'information apportée par la médiane est meilleure.

	Effectif	Moyenne	Ecart-type	CV %	Médiane	Q1	Q3	CVM %	Min	Max	Asymétrie std	Aplatissement std.
Isolé	979	104	23	22	99	91	110	19	52	198	17,8	13,9
Diffus	524	163	35	21	159	137	186	31	81	255	3,8	-1,2
Groupé	72	346	144	42	313	226	463	76	140	699	1,7	-1,3

Tableau 5-1 Statistiques résumées – Densité (nb bâtis/km²) pour I, D, G sur AIX

	Effectif	Moyenne	Ecart-type	CV %	Médiane	Q1	Q3	CVM %	Min	Max	Asymétrie std	Aplatissement std.
Isolé	979	9974	1906	19	10079	9124	11031	19	5027	18885	2,23	10,27
Diffus	524	6428	1418	22	6281	5381	7298	30	3913	12341	6,72	3,62
Groupé	72	3456	1489	43	3186	2159	4427	71	1430	7108	2,33	-0,94

Tableau 5-2 Statistiques résumées Surface à débroussailler (m²) pour I, D, G sur AIX

	Effectif	Moyenne	Ecart-type	CV %	Médiane	Q1	Q3	CVM %	Min	Max	Asymétrie std	Aplatissement std.
Isolé	979	328	67	20	353	269	372	29	178	507	-9,46	-3,68
Diffus	524	149	39	26	149	121	177	37	62	260	1,68	-0,73
Groupé	72	46	27	60	38	24	65	108	14	119	3,16	0,09

Tableau 5-3 Statistiques résumées Périmètre à protéger (m) pour I, D, G sur AIX

	Effectif	Moyenne	Ecart-type	CV %	Médiane	Q1	Q3	CVM %	Min	Max	Asymétrie std	Aplatissement std.
Isolé	979	1,03	0,08	7	1,00	1,00	1,01	1	1	1,51	43,24	77,42
Diffus	524	1,36	0,34	25	1,27	1,10	1,50	31	1,01	2,67	13,63	0,21
Groupé	72	2,83	1,06	37	2,66	2,02	3,44	53	1,23	5,36	2,06	-0,77

Tableau 5-4 Statistiques résumées Indice de Patton pour I, D, G sur AIX

Les échantillons habitat isolé et habitat diffus sont relativement homogènes pour les variables Densité de bâtis et Surface à débroussailler (médiane proche de la moyenne : distribution symétrique par rapport à la moyenne, CV de l'ordre de 20%). L'échantillon habitat groupé est en revanche hétérogène pour ces variables (CV>30%). L'échantillon habitat isolé est relativement homogène pour les variables Périmètre à protéger et Indice de Patton (médiane proche de la moyenne : distribution symétrique par rapport à la moyenne, CV de l'ordre de 20%). Les échantillons habitat diffus et habitat groupé sont en revanche hétérogènes pour ces variables (CV>30%). La dispersion reste cependant mesurée pour les 4 variables étudiées au sein des échantillons (au plus CV=60% et CVM=107 % pour la variable Périmètre à protéger de l'habitat Groupé).

De façon attendue, les valeurs moyennes de densité de bâtis augmentent de l'habitat isolé à l'habitat groupé, alors que celles de surface à débroussailler et de Périmètre à protéger diminuent. Les valeurs de l'Indice de Patton augmentent, quant à elles, de l'habitat isolé à l'habitat groupé, avec la complexité de la forme.

Comparaisons des données des trois groupes : habitat isolé, habitat diffus et habitat groupé

Les distributions de données ne suivant pas une loi normale, le test non paramétrique de Kruskal-Wallis qui compare les médianes des échantillons plutôt que les moyennes est donc préférable. Il a été réalisé pour chacune des quatre variables.

Ce test de Kruskal-Wallis teste l'hypothèse nulle que les médianes pour les 3 colonnes sont les mêmes. Les données de toutes les colonnes sont combinées puis triées de la plus petite à la plus grande. Le rang moyen est alors calculé pour les données de chaque colonne. Une valeur de la probabilité inférieure à 0,05 indique qu'il y a une différence statistiquement significative entre les médianes au niveau de confiance de 95 %. Les résultats des tests produits figurent dans le Tableau 5-5.

	Taille échantillon	Rang moyen Densité du bâti	Rang moyen Indice de Patton	Rang moyen Périmètre à protéger	Rang moyen Surface à débroussailler
Isolé	979	529	523	1079	1047
Diffus	524	1175	1185	346	401
Groupé	72	1491	1504	45	85
Test statistique		867	960	1088	867
Proba.		0,0	0,0	0,0	0,0

Tableau 5-5 Test de Kruskal-Wallis pour I, D, G sur AIX

Comme la valeur de la probabilité pour chacune des variables est inférieure à 0,05, il y a une différence statistiquement significative entre les médianes au niveau de confiance de 95 %. Les paires de médianes sont comparées avec les boîtes à moustaches (Figure 5-12) de façon à déterminer les médianes qui sont significativement différentes les unes des autres. La plage couverte par chaque encoche montre l'incertitude associée à la médiane du groupe. Les encoches sont telles que si les encoches de deux échantillons ne se chevauchent pas, il est alors possible de déclarer que les médianes de ces deux échantillons sont significativement différentes au niveau de signification de 5 %. Les encoches ci-dessous ne se chevauchant pas, les médianes des trois groupes d'habitat sont significativement différentes pour chacune des quatre variables étudiées.

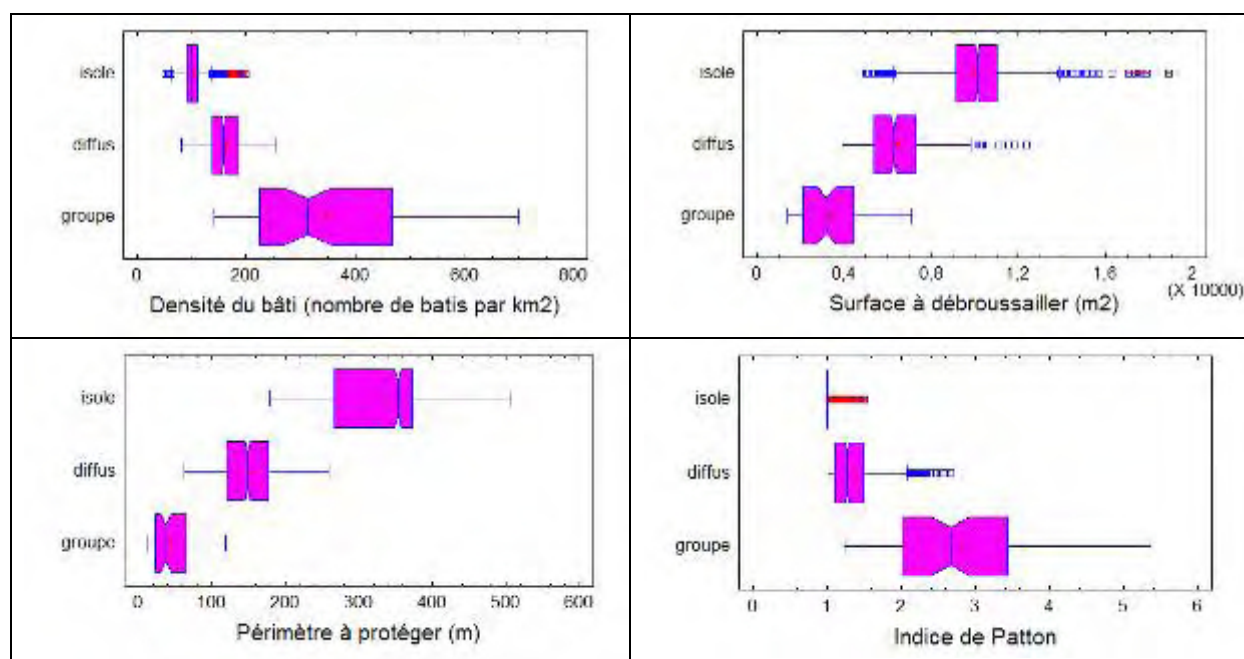


Figure 5-12 Boîtes à moustaches pour chacune des variables étudiées pour I, D, G sur AIX

Rappel : La boîte à moustaches montre que les moustaches s'étendent jusqu'aux plus grandes et plus petites valeurs des données, sauf si ces valeurs sont trop éloignées des boîtes. Une ligne verticale est tracée dans chaque boîte à la position de la médiane de l'échantillon et un signe + indique la position de la moyenne de l'échantillon. Les encoches figurent pour la médiane.

Les variables, densité du bâti, indice de Patton, surface à débroussailler par bâti et périmètre à protéger par bâti ont des **valeurs significativement différentes entre Habitat isolé, Diffus et Groupé dense**. Les trois populations Habitat isolé, Diffus et Groupé sont significativement différentes.

Statistiques résumées sur habitat groupé dense et très dense

Au sein des deux échantillons, les statistiques calculées pour chaque variable les caractérisant à savoir la densité du bâti, l'indice de Patton, la surface à débroussailler par bâti et le périmètre à protéger par bâti sont résumées dans les Tableau 5-6 à Tableau 5-9. On dénombre 411 observations pour l'habitat groupé dense (GD) et 142 observations pour l'habitat groupé très dense (GTD).

	Effectif	Moyenne	Ecart-type	CV %	Médiane	Q1	Q3	CVM %	Min	Max	Asymétrie std	Aplatissement std.
Groupé dense	411	233	92	39	212	167	280	53	212	561	8,4	2,99
Groupé très dense	142	507	150	30	479	408	584	37	267	995	5,1	2,6

Tableau 5-6 Statistiques résumées – Densité (nb bâtis/km²) pour GD, GTD sur AIX

	Effectif	Moyenne	Ecart-type	CV %	Médiane	Q1	Q3	CVM %	Min	Max	Asymétrie std	Aplatissement std.
Groupé dense	411	4947	1850	37	4714	3571	6004	52	1783	11566	6,3	2,2
Groupé très dense	142	2132	585	27	2087	1713	2449	35	1005	3739	2,3	0,29

Tableau 5-7 Statistiques résumées Surface à débroussailler (m²) pour GD, GTD sur AIX

	Effectif	Moyenne	Ecart-type	CV %	Médiane	Q1	Q3	CVM %	Min	Max	Asymétrie std	Aplatissement std.
Groupé dense	411	176	96	55	149	97	237	93	47	446	6,8	-1,7
Groupé très dense	142	32	15	48	29	20	41	72	9	74	3,6	-0,26

Tableau 5-8 Statistiques résumées Périmètre à protéger (m) pour GD, GTD sur AIX

	Effectif	Moyenne	Ecart-type	CV %	Médiane	Q1	Q3	CVM %	Min	Max	Asymétrie std	Aplatissement std.
Groupé dense	411	1,58	0,914	58	1,0	1,0	2	100	1,0	8,0	23,07	50,85
Groupé très dense	142	1,49	0,538	36	1,27	1,14	1,66	41	1,03	3,94	11,06	15,10

Tableau 5-9 Statistiques résumées Indice de Patton pour GD, GTD sur AIX

La distribution de chacun des deux échantillons pour les quatre variables étudiées ne suit pas une loi normale.

Les échantillons habitat groupé dense et habitat groupé très dense sont hétérogènes pour les 4 variables étudiées (médiane cependant proche de la moyenne -sauf pour l'indice de Patton- : distribution symétrique par rapport à la moyenne, CV > 30%). La dispersion reste cependant mesurée pour les variables Densité de bâtis et Surface à débroussailler. Elle est plus importante pour les variables Périmètre à protéger et Indice de Patton

De façon attendue, les valeurs moyennes de densité de bâtis augmentent de l'habitat groupé dense à l'habitat groupé très dense, alors que celles de Surface à débroussailler et de Périmètre à protéger diminuent. Les valeurs de l'Indice de Patton diminuent légèrement de l'habitat groupé dense à l'habitat groupé très dense.

Comparaisons des deux échantillons de l'habitat groupé : groupé dense et groupé très dense

Les deux échantillons ne suivant pas une loi normale, le test non paramétrique de Kruskal-Wallis a donc été réalisé pour chacune des quatre variables. Les résultats du test figurent dans le Tableau 5-10.

	Taille échantillon	Rang moyen Densité du bâti	Rang moyen Indice de Patton	Rang moyen Périmètre à protéger	Rang moyen Surface à débroussailler
Groupé dense	411	212	281	347	342
Groupé très dense	142	464	264	73	89
Test statistique		262,9	1,7	311,0	263,0
Proba.		0,0	0,00000108848	0,0	0,0

Tableau 5-10 Test de Kruskal-Wallis pour GD, GTD sur AIX

Comme la valeur de la probabilité pour chacune des variables est inférieure à 0,05, il y a une différence statistiquement significative entre les médianes au niveau de confiance de 95 %. Les boîtes à moustache associées montrent que les médianes sont significativement différentes pour chacune des quatre variables, les encoches des médianes ne se chevauchant pas (Figure 5-13).

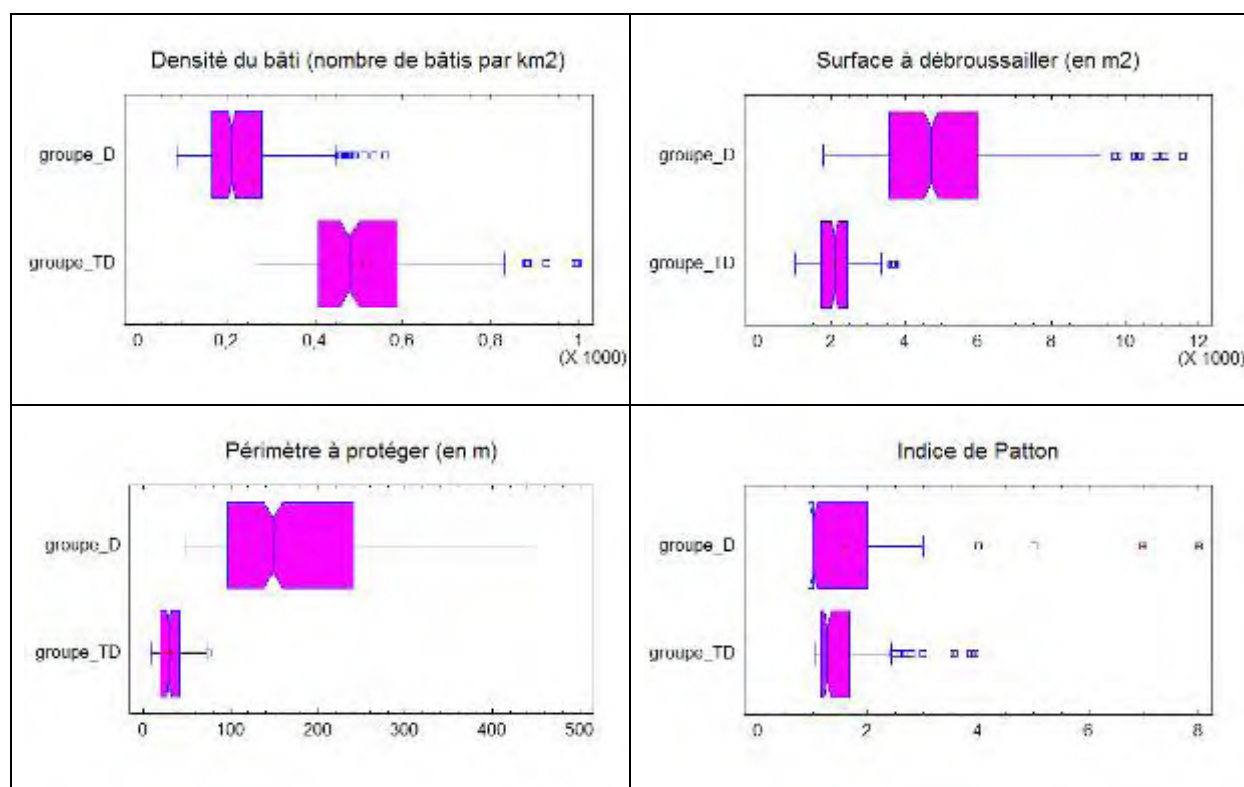


Figure 5-13 Boîtes à moustaches pour chacune des variables étudiées pour GD, GTD sur AIX

Les variables, densité du bâti, indice de Patton, surface à débroussailler par bâti et périmètre à protéger par bâti ont des **valeurs significativement différentes entre Habitat Groupé dense et Groupé très dense**. Les deux populations Habitat groupé dense et Habitat groupé très dense sont significativement différentes pour chacune des quatre variables étudiées.

(ii) Analyse sur les données de la zone d'étude VAR située dans le Var

Statistiques résumées sur habitat isolé, diffus et groupé

Au sein des trois échantillons, les statistiques calculées pour chaque variable les caractérisant à savoir la densité du bâti, l'indice de Patton, la surface à débroussailler par bâti et le périmètre à protéger par bâti sont résumées dans les Tableau 5-11 à Tableau 5-14. On dénombre 1 231 observations pour l'habitat isolé (I), 424 observations pour l'habitat diffus (D) et 45 observations pour l'habitat groupé (G).

Pour chacune des variables étudiées, les échantillons ont, dans la majorité des cas, des asymétries standardisées et des aplatissements standardisés au-delà de la plage -2 et +2. Leurs données ne sont donc pas issues de lois normales.

	Effectif	Moyenne	Ecart-type	CV %	Médiane	Q1	Q3	CVM %	Min	Max	Asymétrie std	Aplatissement std.
Isolé	1231	105	22	21	100	91	109	18	49	209	20,77	18,14
Diffus	424	175	62	35	163	138	193	34	76	642	23,47	57,28
Groupé	45	380	226	59	321	258	391	41	173	1321	7,62	11,40

Tableau 5-11 Statistiques résumées – Densité (nb bâtis/km²) pour I, D, G sur VAR

	Effectif	Moyenne	Ecart-type	CV %	Médiane	Q1	Q3	CVM %	Min	Max	Asymétrie Trie std	Aplatissement std.
Isolé	1231	9893	1770	18	9986	9136	10949	18	4793	20526	0,25	11,27
Diffus	424	6226	1663	27	6128	5179	7232	33	1557	13120	1,94	2,56
Groupé	45	3151	1084	34	3096	2560	3881	43	757	5772	-0,15	0,17

Tableau 5-12 Statistiques résumées - Surface à débroussailler (m²) pour I, D, G sur VAR

	Effectif	Moyenne	Ecart-type	CV %	Médiane	Q1	Q3	CVM %	Min	Max	Asymétrie std	Aplatissement std.
Isolé	1231	326	65	20	351	271	371	28	174	521	-10,92	-4,52
Diffus	424	150	46	31	152	122	181	39	31	307	-0,43	0,85
Groupé	45	39	19	49	37	24	51	73	7	87	0,83	-0,67

Tableau 5-13 Statistiques résumées - Périmètre à protéger (m) pour I, D, G sur VAR

	Effectif	Moyenne	Ecart-type	CV %	Médiane	Q1	Q3	CVM %	Min	Max	Asymétrie std	Aplatissement std.
Isolé	1231	1,03	0,08	8	1,00	1,00	1,02	2	1,0	1,56	43,41	66,97
Diffus	424	1,30	0,29	22	1,19	1,07	1,44	31	1,0	2,79	13,66	14,65
Groupé	45	2,47	1,15	46	2,14	1,76	2,68	43	1,13	7,19	5,81	8,24

Tableau 5-14 Statistiques résumées - Indice de Patton pour I, D, G sur VAR

L'échantillon habitat isolé est relativement homogène pour les 4 variables étudiées (médiane proche de la moyenne : distribution symétrique par rapport à la moyenne, CV de l'ordre de 20%). L'échantillon habitat habitat groupé est en revanche hétérogène pour ces variables (CV>30%), alors que l'échantillon habitat diffus est un peu plus nuancé : relativement hétérogène pour les variables Surface à débroussailler et Indice de Patton, et hétérogène pour les variables Densité de bâtis et Périmètre à protéger (CV>30%).

Comme sur la zone d'AIX et de façon attendue, les valeurs moyennes de densité de bâtis augmentent de l'habitat isolé à l'habitat groupé, alors que celles de surface à débroussailler et de Périmètre à protéger diminuent. Les valeurs de l'Indice de Patton augmentent de l'habitat isolé à l'habitat groupé.

Comparaisons des données des trois groupes : habitat isolé, habitat diffus et habitat groupé

Les distributions de données ne suivant pas une loi normale, le test non paramétrique de Kruskal-Wallis a été réalisé pour comparer les trois populations pour chacune des quatre variables. Les résultats des tests produits figurent dans le Tableau 5-15.

	Taille échantillon	Rang moyen Densité du bâti	Rang moyen Indice de Patton	Rang moyen Périmètre à protéger	Rang moyen Surface à débroussailler
Isolé	1231	645	652	1078	1056
Diffus	424	1361	1342	278	340
Groupé	45	1653	1644	30	48
Test statistique		794,6	803,1	966,5	794,0
Proba.		0,0	0,0	0,0	0,0

Tableau 5-15 Résultats de test de Kruskal-Wallis pour I, D, G sur VAR

Comme la valeur de la probabilité pour chacune des variables est inférieure à 0,05, il y a donc une différence statistiquement significative entre les médianes au niveau de confiance de 95 %. Les paires de médianes sont comparées avec les boîtes à moustaches de la Figure 5-14 de façon à déterminer les médianes qui sont significativement différentes les unes des autres. Les encoches ci-dessous ne se chevauchant pas, les médianes des trois groupes d'habitat sont significativement différentes pour chacune des quatre variables étudiées au niveau de signification de 5 %.

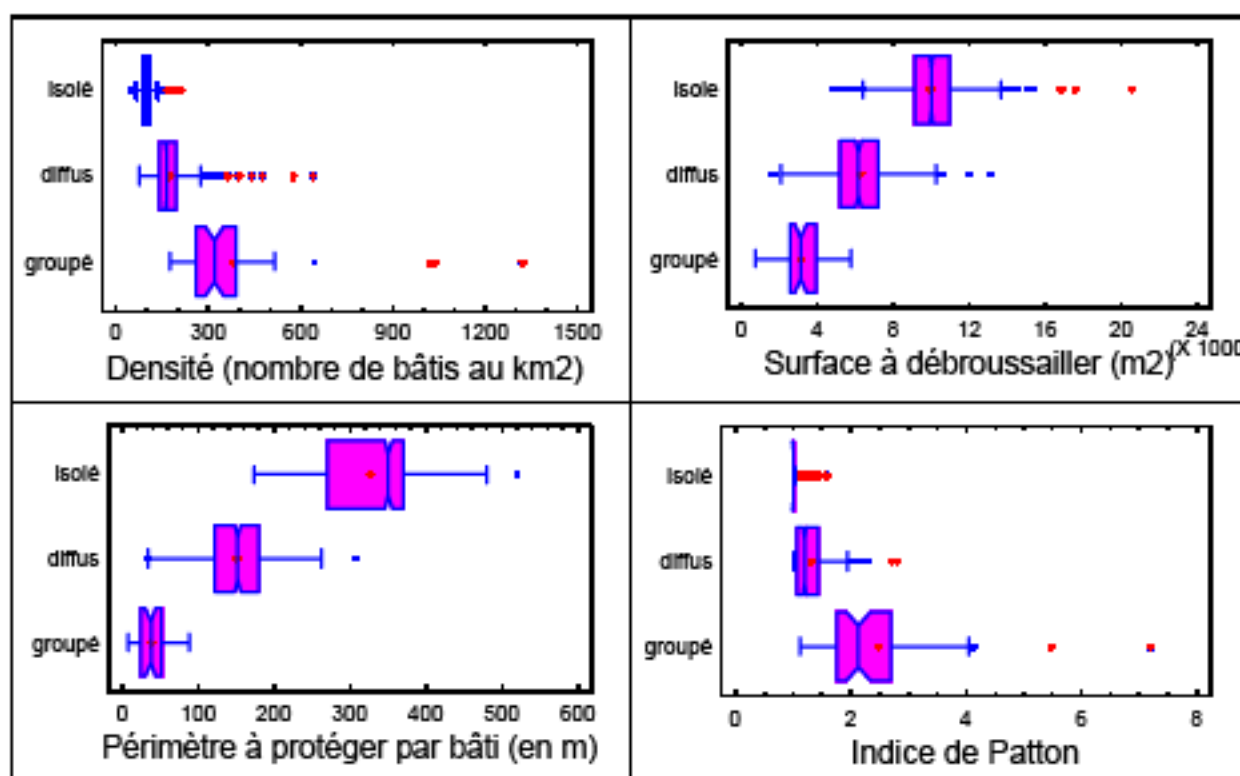


Figure 5-14 Boîtes à moustaches pour chacune des variables étudiées pour I, D, G sur VAR

Les variables, densité du bâti, indice de Patton, surface à débroussailler par bâti et périmètre à protéger par bâti ont des valeurs significativement différentes entre Habitat isolé, Diffus et Groupé dense. Les trois populations Habitat isolé, Diffus et Groupé sont significativement différentes.

Statistiques résumées sur habitat groupé dense et très dense

De la même façon, au sein des deux échantillons, les statistiques calculées pour chaque variable les caractérisant à savoir la densité du bâti, l'indice de Patton, la surface à débroussailler par bâti et le périmètre à protéger par bâti sont résumées dans les Tableau 5-16 à Tableau 5-19. On dénombre 310 observations pour l'habitat groupé dense (GD) et 79 observations pour l'habitat groupé très dense (GTD).

	Effectif	Moyenne	Ecart-type	CV %	Médiane	Q1	Q3	CVM %	Min	Max	Asymétrie std	Aplatissement std.
Groupé dense	310	152	52	34	152	102	190	58	59	307	2,76	-2,51
Groupé très dense	79	427	197	46	388	305	468	42	267	1455	10,38	20,19

Tableau 5-16 Statistiques résumées – Densité (nb bâtis/km²) pour GD, GTD sur VAR

	Effectif	Moyenne	Ecart-type	CV %	Médiane	Q1	Q3	CVM %	Min	Max	Asymétrie std	Aplatissement std.
Groupé dense	310	7410	2638	36	6584	5261	9849	70	3257	16914	4,72	-1,07
Groupé très dense	79	2671	865	32	2579	2139	3282	44	687	5006	1,24	0,53

Tableau 5-17 Statistiques résumées Surface à débroussailler (m²) pour GD, GTD sur VAR

	Effectif	Moyenne	Ecart-type	CV %	Médiane	Q1	Q3	CVM %	Min	Max	Asymétrie std	Aplatissement std.
Groupé dense	310	202	117	58	154	103	344	156	32	470	3,48	-4,49
Groupé très dense	79	38	20	52	35	24	52	80	6	98	2,48	0,23

Tableau 5-18 Statistiques résumées Périmètre à protéger (m) pour GD, GTD sur VAR

	Effectif	Moyenne	Ecart-type	CV %	Médiane	Q1	Q3	CVM %	Min	Max	Asymétrie std	Aplatissement std.
Groupé dense	310	1,34	0,54	40	1,15	1,01	1,44	37	1,0	4,94	23,50	50,16
Groupé très dense	79	1,56	0,62	40	1,38	1,21	1,67	33	1,06	5,27	12,93	30,88

Tableau 5-19 Statistiques résumées Indice de Patton pour GD, GTD sur VAR

La distribution de chacun des deux échantillons pour les quatre variables étudiées ne suit pas une loi normale.

Les échantillons habitat groupé dense et habitat groupé très dense sont hétérogènes pour les 4 variables étudiées (médiane cependant proche de la moyenne -sauf pour l'indice de Patton- : distribution symétrique par rapport à la moyenne, CV > 30%). La dispersion reste cependant mesurée pour les variables et du même ordre de grandeur entre les échantillons pour une même variable.

De façon attendue, les valeurs moyennes de densité de bâtis augmentent de l'habitat groupé dense à l'habitat groupé très dense, alors que celles de Surface à débroussailler et de Périmètre à protéger diminuent. Les valeurs de l'Indice de Patton diminuent légèrement de l'habitat groupé dense à l'habitat groupé très dense.

Comparaisons des deux échantillons de l'habitat groupé : groupé dense et groupé très dense

Les deux échantillons ne suivant pas une loi normale, le test non paramétrique de Kruskal-Wallis a donc été réalisé pour chacune des quatre variables. Les résultats du test figurent dans le Tableau 5-20.

	Taille échantillon	Rang moyen Densité du bâti	Rang moyen Indice de Patton	Rang moyen Périmètre à protéger	Rang moyen Surface à débroussailler
Groupé dense	310	156	178	233	234
Groupé très dense	79	347	261	46	43
Test statistique		181,5	34,5	174,5	182,4
Proba.		0,0	4,35E-9	0,0	0,0

Tableau 5-20 Test de Kruskal-Wallis pour GD, GTD sur VAR

Comme la valeur de la probabilité pour chacune des variables est inférieure à 0,05, il y a une différence statistiquement significative entre les médianes au niveau de confiance de 95 %. Les boîtes à moustache associées montrent que les médianes sont significativement différentes pour chacune des quatre variables, les encoches des médianes ne se chevauchant pas (Figure 5-15).

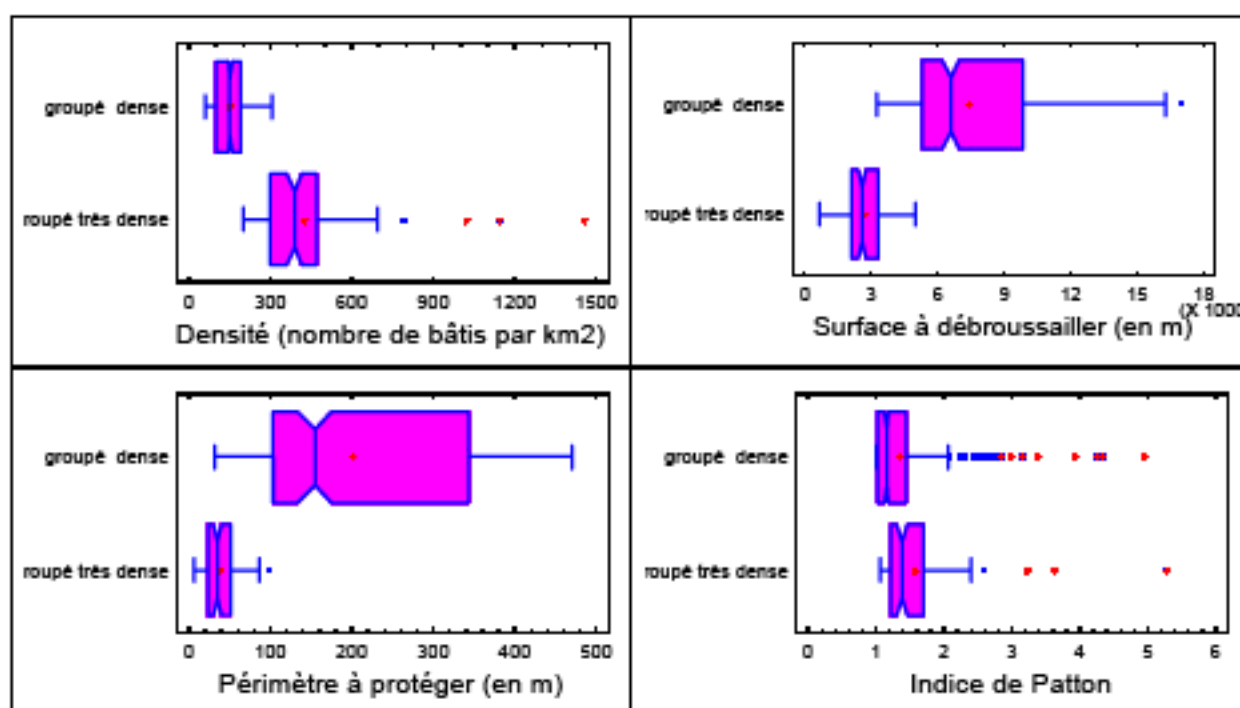


Figure 5-15 Boîtes à moustaches pour chacune des variables étudiées pour GD, GTD sur VAR

Les variables, densité du bâti, indice de Patton, surface à débroussailler par bâti et périmètre à protéger par bâti ont des valeurs significativement différentes entre Habitat Groupé dense et Groupé très dense. Les deux populations Habitat groupé dense et Habitat groupé très dense sont significativement différentes pour chacune des quatre variables étudiées.

Si l'on compare les résultats obtenus pour chaque zone d'étude AIX et VAR, on constate que les valeurs des 4 critères (densité de bâtis, surface à débroussailler par bâti, périmètre à protéger par bâti et indice de Patton) sont quasiment identiques dans la différenciation entre les trois grands natures d'habitat : isolé, diffus et groupé. Dans les deux zones, la distribution

de ces valeurs est peu hétérogène pour les habitats isolé et diffus ($CV < 30\%$), elle est un peu plus hétérogène pour l'habitat groupé (CV de l'ordre de 40% à 50%). On observe une légère différence au sein de l'habitat groupé entre l'habitat groupé dense et l'habitat groupé très dense pour chacun des 4 critères. Ainsi les valeurs de densité du bâti sont inférieures de 15% à 25% dans la zone d'étude VAR qui est moins urbanisée que la zone d'étude AIX. De façon cohérente, les valeurs de surface à débroussailler et de périmètre à protéger sont supérieures respectivement de 25% à 50% et de 15% à 20% dans la zone d'étude VAR. L'indice de Patton est moins élevé dans l'habitat groupé dense et plus élevé dans l'habitat groupé très dense de la zone VAR. Dans les deux zones, la distribution de ces valeurs est du même ordre, un peu hétérogène (CV de l'ordre de 30% à 50%).

c. Les types d'habitat et leurs caractéristiques

Dans chacune des deux zones d'étude AIX et VAR, quatre critères caractérisant les trois types d'habitat isolé, diffus et groupé ainsi que les types habitat groupé dense et très dense ont été définis et calculés. Ils ont été recalculés sur l'ensemble des polygones étudiés pour les deux zones d'étude, soit 2210 polygones en habitat isolé, 948 polygones en habitat diffus, 117 polygones en habitat groupé puis 721 polygones en habitat groupé dense et 721 polygones en habitat groupé très dense.

Le Tableau 5-21 présente de façon synthétique les caractéristiques des différents types d'habitat avec les valeurs suivantes : **moyenne** (écart-type, coefficient de variation sur la moyenne), **médiane** (1^{er} quartile Q1 - 3^{ème} quartile Q3, coefficient de variation sur la médiane).

Nature d'habitat	Densité du bâti (nombre de bâti/km ²)	Surface à débroussailler par bâti (m ²)	Périmètre à protéger par bâti (m)	Indice de Patton
Habitat isolé	105 (22 ; 21%)	9 929 (1 831 ; 18%)	327 (66 ; 20%)	1,03 (0,08 ; 7%)
	100 (91-110 ; 19%)	10 018 (9129-0 967 ; 18%)	352 (270-371 ; 29%)	1,00 (1,00-1,02 ; 2%)
Habitat diffus	168 (49 ; 29%)	6 337 (1 535 ; 24%)	150 (42 ; 28%)	1,33 (0,32 ; 24%)
	161 (137-189 ; 32%)	6 217 (5302-7 279 ; 32%)	150 (122-178 ; 37%)	1,25 (1,09-1,47 ; 30%)
Habitat groupé	359 (180 ; 50%)	3 338 (1 351 ; 40%)	43 (25 ; 57%)	2,69 (1,10 ; 41%)
	318 (243-424 ; 57%)	3 141 (2 359-4 117 ; 56%)	37 (24-60 ; 97%)	2,42 (1,97-3,27 ; 54%)

Au sein de l'habitat groupé, on différencie :

• Groupé dense	198 (87 ; 44%)	6 006 (2 534 ; 42%)	187 (106 ; 57%)	1,47 (0,78 ; 53%)
	184 (137-235 ; 53%)	5 426 (4 259-7 319 ; 56%)	152 (99-262 ; 107%)	1,06 (1,0-2,0 ; 94%)
• Groupé très dense	479 (173 ; 36%)	2 324 (743 ; 32%)	34 (17 ; 50%)	1,52 (0,57 ; 38%)
	451 (367-538 ; 38%)	2 216 (1 859-2 723 ; 39%)	31 (21-45 ; 77%)	1,33 (1,161,66 ; 38%)

Tableau 5-21 Caractéristiques des types d'habitat: moyenne (écart-type ; CV%), médiane (1^{er} quartile- 3^{ème} quartile ; CVM%) calculées dans un environnement de 50 m autour des bâtis.

Dans l'ensemble, les moyennes et médianes des variables pour chaque catégorie d'habitat sont peu différentes, la distribution des valeurs reste donc symétrique et proche de la moyenne, à l'exception des valeurs de l'indice de Patton au sein de l'habitat groupé dense et de l'habitat groupé très dense.

Pour chaque critère étudié, on peut retenir les évolutions citées ci-après.

Critère : densité du bâti

On mesure une augmentation de la densité du bâti de l'habitat isolé à l'habitat groupé avec un facteur de 3,5. Au sein de l'habitat groupé, la densité de l'habitat groupé très dense est 2,5 fois plus grande que celle de l'habitat groupé dense.

Critère : surface à débroussailler

On observe une diminution de la surface à débroussailler de l'habitat isolé à l'habitat groupé avec un facteur de 3. Si l'on considère l'habitat groupé très dense, la surface à débroussailler est 5 fois moins élevée que celle de l'habitat isolé. En termes de prévention contre le risque d'incendie, ces chiffres permettent d'apprécier l'effort qui doit être consenti par bâti pour maintenir un état débroussaillé selon que le bâti est en habitat isolé ou en habitat groupé très dense (temps, budget).

Critère : périmètre à protéger

On observe une diminution du périmètre à protéger de l'habitat isolé à l'habitat groupé avec un facteur de 7,6. Si l'on considère l'habitat groupé très dense, le périmètre à protéger est 10 fois moins élevé que celui de l'habitat isolé. De même en cas d'incendie, le périmètre à protéger par bâti permet de traduire l'effort attendu en termes de déploiement des moyens humains et matériels (pompiers, camions...) et d'imaginer la faisabilité en cas de dispersion des moyens lors de feux simultanés ou de grands feux.

Critère : indice de Patton

On observe une augmentation des valeurs de l'indice de l'habitat isolé à l'habitat groupé traduisant le fait que la zone bâtie passe d'une forme circulaire prédominante pour l'habitat isolé (valeur de Patton égale à 1) à une forme plus complexe pour l'habitat groupé (valeur de Patton supérieure à 2). Cette forme complexe peut être linéaire ou globulaire. La valeur augmente de l'habitat groupé dense à l'habitat groupé très dense. L'interprétation de l'Indice reste difficile, elle ne permet pas, notamment, de différencier les formes linéaires et longues des formes globulaires et compactes, ce qui au regard de la mise en œuvre des moyens de lutte en cas d'incendie pouvait être intéressant.

Pour chaque nature d'habitat, on peut retenir les spécificités énoncées ci-après.

L'**habitat isolé** est relativement homogène pour les 4 variables étudiées (médiane proche de la moyenne : distribution symétrique par rapport à la moyenne, CV de l'ordre de 20 %). L'habitat isolé se caractérise par une densité de l'ordre de 100 bâtis par km², soit 1 bâti à l'hectare. La surface moyenne à débroussailler par bâti est de l'ordre de 10 000 m² soit 1 hectare et le périmètre à protéger par bâti est de 330 m.

L'**habitat diffus** est relativement hétérogène pour les 4 variables (médiane proche de la moyenne : distribution symétrique par rapport à la moyenne, CV de l'ordre de 20% à 30 %). Il se caractérise par une densité de l'ordre de 168 bâtis par km² soit 1,6 à 1,7 bâtis à l'hectare. La

surface moyenne à débroussailler par bâti est de l'ordre de 6 300 m² soit 0,6 ha et le périmètre à protéger par bâti est de 150 m.

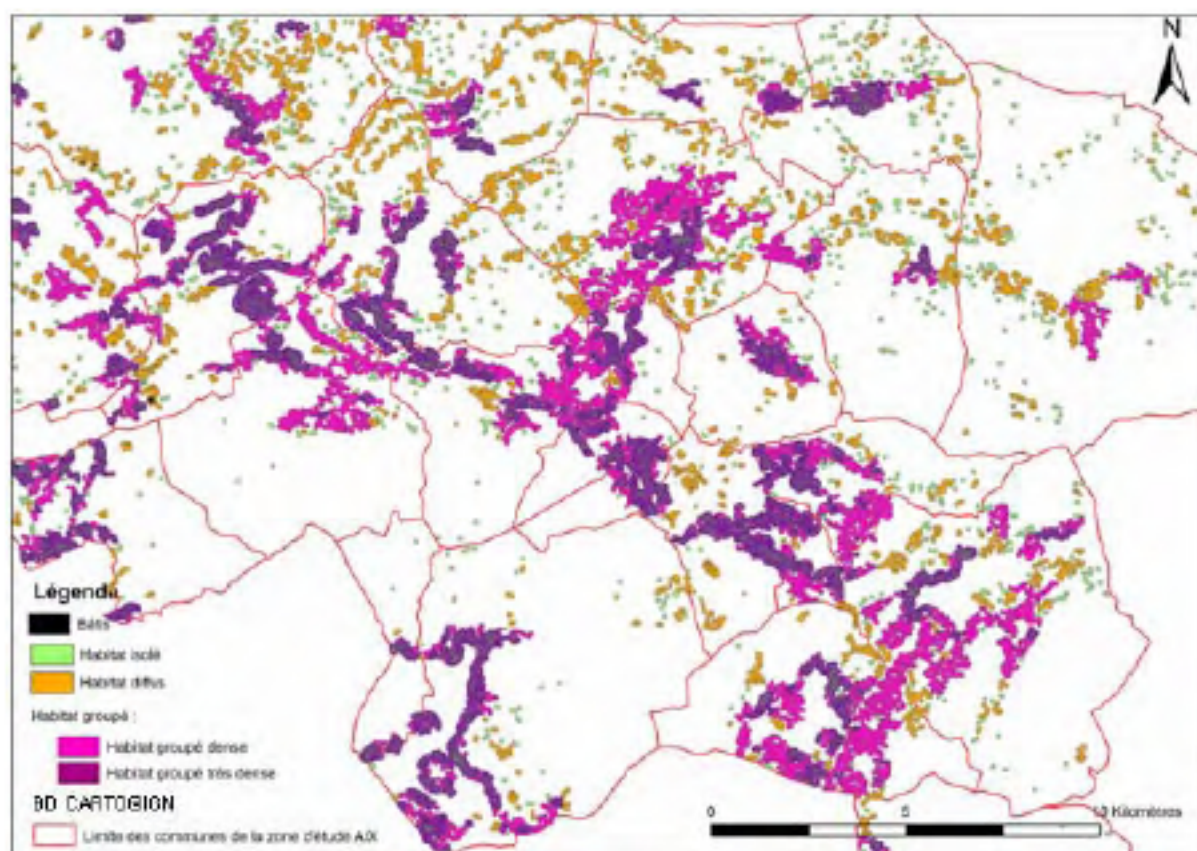
L'**habitat groupé** est en revanche hétérogène pour les 4 variables (CV>30%). Cette hétérogénéité se retrouve au sein de l'habitat groupé dense et dans une moindre mesure dans l'habitat groupé très dense. Globalement la dispersion reste cependant mesurée avec quelques valeurs de coefficient de variation sur la moyenne ou sur la médiane variant de 77 % à 107 % notamment pour la variable Périmètre à protéger au sein de l'habitat groupé. L'habitat groupé se caractérise par une densité de bâtis de l'ordre de 360 bâtis par km², soit 3,6 bâtis à l'hectare. La surface moyenne à débroussailler par bâti est de l'ordre de 3 300 m², soit 0,3 ha et le périmètre à protéger par bâti est de 45 m.

- Pour l'**habitat groupé dense**, correspondant aux zones en périphérie des zones les plus urbaines situées en interface, la surface moyenne à débroussailler par bâti, le périmètre moyen à protéger par bâti et la densité de bâti, sont respectivement de 6 000 m², 187 m et de 2 à 3 bâtis par ha.
- Pour l'**habitat groupé très dense**, correspondant aux zones les plus urbaines situées en interface, la surface moyenne à débroussailler par bâti, périmètre moyen à protéger par bâti et la densité de bâti, sont respectivement de 2 200 m², 35 m et plus de 3 bâtis par ha.

Les principaux critères définis pour chaque nature d'habitat sont la densité de bâti, la surface moyenne à débroussailler par bâti et le périmètre moyen à protéger par bâti. Ces critères devraient intéresser gestionnaires et pompiers et les aider à mesurer l'impact d'un type d'habitat sur le déploiement et l'efficacité de mesures de prévention et de lutte contre l'incendie. Il sera probablement plus difficile, en effet, de protéger un bâti en habitat isolé dont le périmètre à protéger est presque 10 fois plus grand que celui d'un bâti en habitat groupé. Il sera plus difficile à un habitant de maintenir une surface débroussaillée autour d'un bâti isolé qui est trois fois plus importante que celle autour d'un bâti groupé. Les valeurs moyennes de densité de bâti qui discriminent les trois types d'habitat sont de 105 bâtis/km² pour l'habitat isolé (CV = 21 %), 168 bâtis/km² pour l'habitat diffus (CV = 29 %) et de 359 bâtis/km² pour l'habitat groupé (CV = 50 %). Ces valeurs de densité peuvent être comparées aux valeurs que l'on trouve dans la littérature dans le contexte des interfaces habitat-forêt. Theobald (2001) et Stewart et al. (2003, 2007) ont fixé deux seuils pour différencier les interfaces habitat-forêt avec une densité minimum de 6 bâtis/km² des aires urbaines avec une densité de plus de 148 bâtis/km². D'autres seuils ont été utilisés par Hammer et al. (2004) considérant les zones de plus faible densité en dessous de 2 bâtis/km² et celles de plus forte densité à plus de 128 bâtis/km². Ces seuils peuvent être rapprochés de ceux obtenus avec la fonction densité du paragraphe 5.1.1.b (Lampin et al., 2007a) : moins de 48 bâtis/km² pour l'habitat isolé, entre 48 et 160 bâtis/km² pour l'habitat diffus et plus de 160 bâtis/km² pour l'habitat groupé, où les plus hautes valeurs sont relativement similaires, les plus faibles valeurs restent différentes. Ces seuils peuvent aussi être rapprochés des valeurs moyennes obtenues avec l'approche par la morphologie mathématique développée dans le paragraphe 5.1.1.c (Lampin et al., 2007a) : moins de 8 bâtis/km² pour l'habitat isolé, 28 bâtis/km² pour l'habitat diffus et 150 bâtis/km² pour l'habitat groupé, où les valeurs sont relativement proches. Les valeurs obtenues avec la méthode préconisée dans la thèse sont plus élevées que celles spécifiées dans les différentes méthodes. La délimitation de la surface qui sert de base au calcul de la densité joue probablement un rôle important dans l'explication de ces écarts, sans compter le contexte environnemental qui, dans les articles cités, doit être certainement différent de celui des zones AIX et VAR.

5.1.4. Analyse des résultats cartographiques sur les zones AIX et VAR

La Carte 5-4 des types habitat dans les interfaces habitat-forêt (en zoom : Carte 5-5) a été réalisée sous SIG conformément à la procédure développée en Annexe B.



Carte 5-4 Carte des types d'habitat en interface habitat-forêt

La méthode développée pour caractériser et cartographier la structure des zones bâties apparaît efficace. Elle met en oeuvre des traitements simples du SIG, permettant le calcul des distances entre bâtis et le regroupement de ces derniers après dénombrement, et peut être appliquée sur de grandes surfaces. Simple dans ses principes, la méthode peut être facilement transférée et utilisée par les gestionnaires et services chargés de l'aménagement du territoire.

La cartographie des zones bâties sur les deux zones tests AIX et VAR, selon les 4 types d'habitat définis, a permis de quantifier et de qualifier la structure de l'habitat en place. Ainsi sur la zone AIX, l'emprise des bâtis en interface habitat-forêt occupe 23 % de la zone soumise à obligation légale de débroussaillage (OLD) alors que, sur la zone VAR, ce pourcentage est presque deux fois moins important avec 12 %. La zone d'étude AIX, plus urbanisée que la zone VAR, fait ainsi apparaître une proportion plus importante de surfaces en interface habitat-forêt. En effet, l'habitat isolé est moins représenté sur la zone AIX que sur la zone VAR et, au contraire, l'habitat groupé est davantage représenté. Ainsi, l'habitat isolé représente 10 % des natures d'habitat représentées qui comprend 3,6 % des bâtis en interface habitat-forêt sur la zone d'étude AIX alors que ces proportions sont doubles sur la zone d'étude VAR avec 19 % pour les surfaces et 7 % pour les bâtis. L'habitat groupé constitue près des 2/3 des natures d'habitat représentées sur AIX (65 %) comprenant 82 % des bâtis alors qu'il représente 58 % des surfaces de natures d'habitat comprenant 79 % des bâtis sur la

zone VAR. Au sein de l'habitat groupé, l'habitat groupé très dense représente 46 % et comprend 69 % des bâtis sur la zone AIX alors qu'il est légèrement plus représenté sur la zone VAR avec 48 % comprenant 74 % des bâtis. L'habitat groupé de la zone VAR est ainsi un peu plus organisé en bourgs, centres urbains. L'habitat diffus est en revanche représenté de façon analogue sur les deux zones d'étude, avec sur AIX, 25 % pour les surfaces et 14,5 % pour les bâtis et, sur VAR, 23 % pour les surfaces et 14 % pour les bâtis.

En moyenne, l'emprise d'un bâti est de 0,96 ha en habitat isolé, de 0,57 ha en habitat diffus et de 0,27 ha en habitat groupé. Ces valeurs sont identiques à 0,01 ha près sur les deux zones, AIX et VAR. On observe une légère différence au sein de l'habitat groupé avec une valeur variant de 0,47 ha sur AIX à 0,52 ha sur VAR en habitat groupé dense et une valeur variant de 0,17 ha sur AIX à 0,21 ha sur VAR en habitat groupé très dense, signifiant une moindre densification de l'habitat groupé dans la zone VAR, avec des parcelles plus grandes de 10 % en habitat groupé dense à près d'un quart en habitat groupé très dense.



Carte 5-5 Carte des types d'habitat en interface habitat-forêt (zoom)

La carte de l'habitat a été élaborée sur l'ensemble de la zone d'étude MAM entre les métropoles Aix et Marseille pour la suite des travaux de thèse.

5.2 La structure de la végétation et sa représentation cartographique

Comment caractériser la structure horizontale de la végétation au contact des zones d'habitation dans les interfaces habitat-forêt ? Quels critères retenir ? Comment la cartographier à partir de différentes sources de données cartographiques de végétation, disponibles et suffisamment fiables.

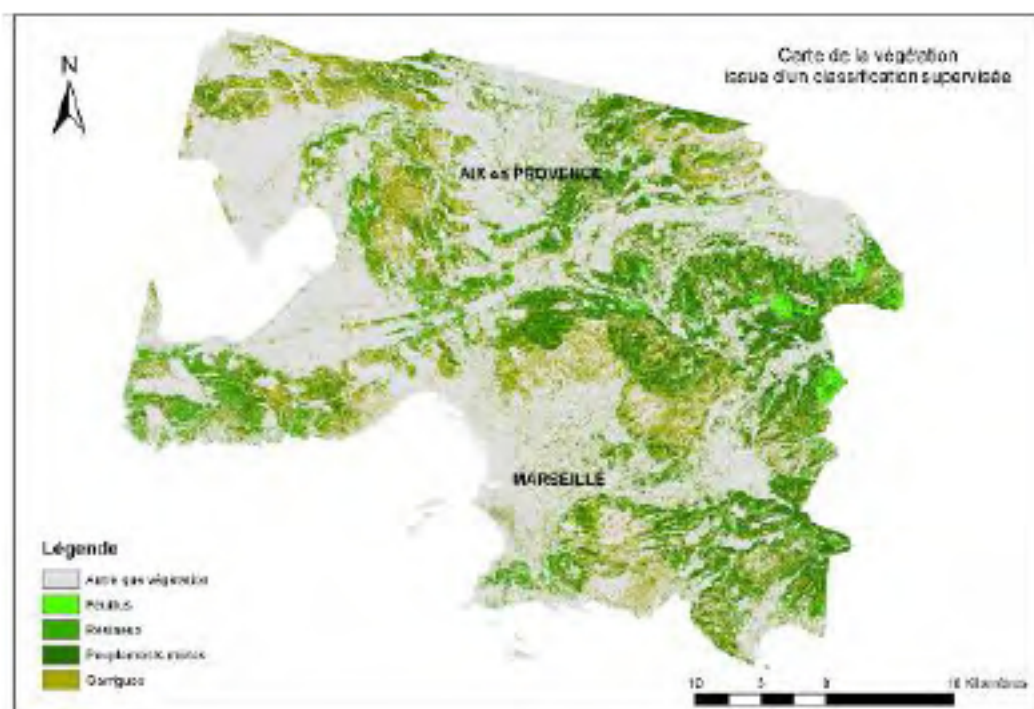
5.2.1. *Choix de la carte de végétation*

La carte de végétation doit représenter de façon précise et fiable les surfaces occupées par les forêts, garrigues ou maquis sur le territoire, en particulier au contact des zones bâties, si l'on veut en analyser l'organisation spatiale et en caractériser la structure. De ce fait, la carte des peuplements forestiers, produite par l'Inventaire Forestier National et exploitable à un niveau départemental, n'a pas pu être utilisée. Elle n'était pas assez précise et s'avérait même fautive au niveau de précision de l'interface habitat-forêt. La carte d'occupation du sol OccsolSPOT5, bien qu'elle ait été élaborée à partir d'une image satellite ayant 2,5 m de résolution, n'a pas pu être exploitée car elle résultait d'une photo interprétation de l'image qui dans son protocole regroupait généralement la végétation avec les zones habitées. Aussi des cartes de végétation ont dû être extraites de nouvelles cartes d'occupation du sol élaborées à partir des méthodes exposées ci-après.

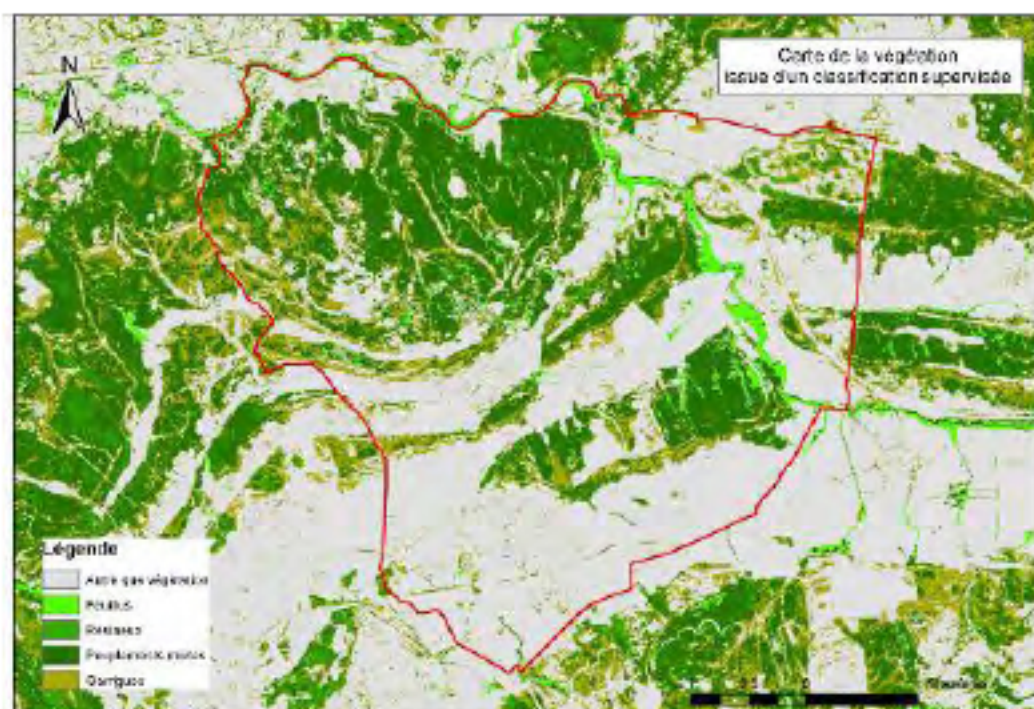
a. *Carte de végétation issue d'une classification supervisée*

A partir de la carte d'occupation du sol (Carte 3-5) réalisée sur la zone d'étude située entre les métropoles d'Aix et Marseille MAM, par classification supervisée de l'image satellite THR Spot 5 de résolution 2,5 m, une carte de la végétation (Carte 5-6) a été extraite. Elle fait apparaître les différentes classes de végétation identifiées lors de la classification et une classe « autre que végétation » pour ce qui n'est pas de la végétation. Ainsi une carte précise et fiable de la végétation a été élaborée en mode matriciel (raster) avec un pixel de 2,5 m.

La carte de végétation met ainsi en évidence 4 grandes classes de végétation, à savoir, les feuillus, les résineux, les peuplements mixtes et la garrigue. A chaque pixel correspond alors un attribut qui précise la nature de la végétation selon une de ces quatre classes identifiées, quand il y a de la végétation. Sinon l'attribut est défini comme autre. La Carte 5-7 a été zoomée sur la zone d'étude MEYR de Meyreuil.



Carte 5-6 Carte de la végétation sur MAM extraite d'une classification supervisée



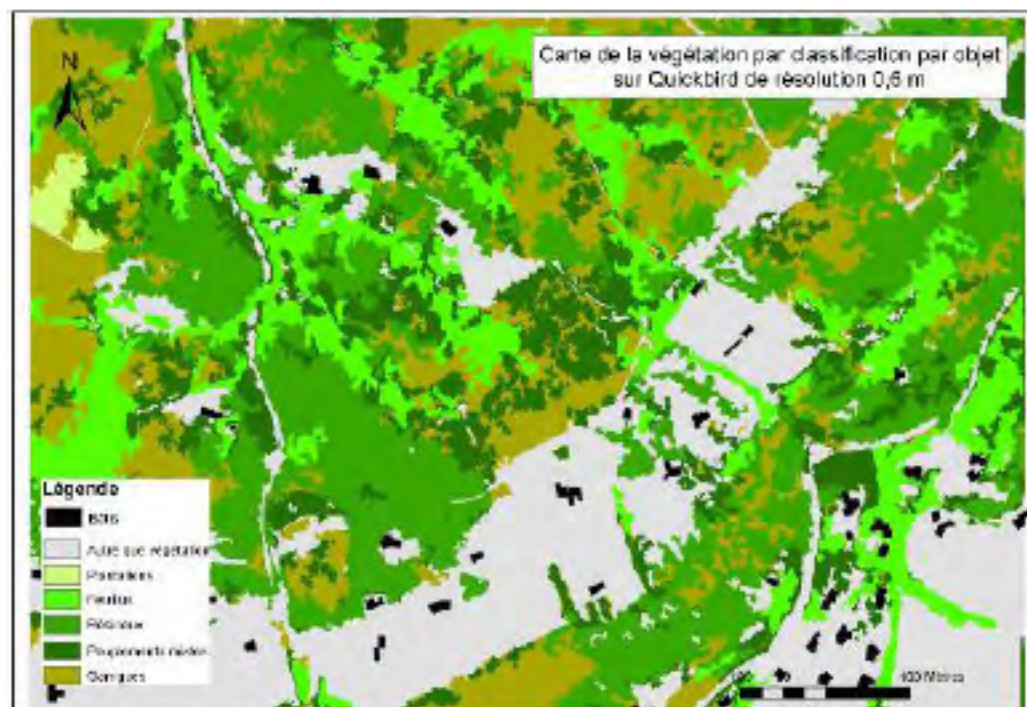
Carte 5-7 Carte de la végétation sur MEYR extraite d'une classification supervisée

b. Carte de végétation issue d'une classification orientée objet

A partir de la carte d'occupation du sol (Carte 3-7), réalisée sur la zone d'étude située sur la commune de Meyreuil MEYR (l'image n'étant disponible que sur cette emprise), par une classification par analyse de texture de l'image satellite Quickbird de résolution 0,6 m, une carte de la végétation (Carte 5-8) a été extraite. Elle fait apparaître les différentes classes de végétation identifiées lors de la classification et une classe « autre que végétation » pour ce

qui n'est pas de la végétation. Comme avec la classification supervisée, une carte de végétation précise et fiable a été élaborée en mode matriciel (raster). Le niveau de détail n'est pas appréhendé en termes de taille de pixel de 0,6 m, fixé par la résolution de l'image satellite Quickbird, mais en termes de taille d'objet correspondant à un agrégat de pixels homogènes, reconnus comme identifiant un même objet par analyse de la texture et de la radiométrie. Il reste très précis correspondant à un agrégat minimum de quelques pixels.

Cette carte met en évidence les mêmes quatre grandes classes de végétation reconnues dans la classification supervisée du paragraphe précédent, à savoir, les feuillus, les résineux, les peuplements mixtes et la garrigue, mais également les zones débroussaillées, les linéaires, les plantations.



Carte 5-8 Carte de la végétation issue de la classification objet sur MEYR

c. Des cartes de végétation de nature et de qualité hétérogènes

Selon la méthode choisie (classification pixel ou objet) et les données disponibles (images de diverses résolutions), la nature des cartes de végétation peut varier et avoir une incidence sur la méthode permettant de caractériser la structure horizontale de cette végétation. Sur une même emprise d'une centaine d'hectares de la zone d'étude MEYR de Meyreuil, les deux classifications, par pixel et par objet, ont été mises en œuvre à partir de l'image satellite Quickbird (résolution de 0,6 m) produisant chacune une carte d'occupation du sol (Figure 5-16 (a) et (c)). Toujours sur la même zone, la classification par pixel a été réalisée à partir de l'image satellite Spot 5 (résolution de 2,5 m) produisant une nouvelle carte d'occupation du sol au format raster (Figure 5-16 (d)). Par ailleurs une vérité terrain a été réalisée, ayant pour but de décrire la nature et les caractéristiques de l'environnement des interfaces habitat-forêt. Le protocole de description du terrain et de sa mise en œuvre est détaillé en Annexe C. Les zones décrites ont été délimitées et digitalisées sous forme de polygones produisant là encore une nouvelle carte d'occupation du sol au format vecteur à partir de laquelle a été extraite la carte de la végétation (Figure 5-16 (b)).

Des écarts dans la reconnaissance des différents types de peuplements

Les quatre cartes ainsi obtenues ont été comparées sur la Figure 5-16. Sur une image de même résolution mais avec une approche par pixel ((c) de la Figure 5-16) ou par objet ((a) de la Figure 5-16), les écarts ont été mesurés sur les principales classes de végétation. Ainsi respectivement 91 %, 46 % et 68 % des surfaces classées en feuillus, résineux et garrigues par l'approche objet ont été classés de la même façon par l'approche pixel. Mais 47 % et 25 % des surfaces classées en résineux et garrigues par l'approche objet ont été classés garrigues et feuillus par l'approche pixel. Inversement respectivement 43 %, 78 % et 33 % des surfaces classées en feuillus, résineux et garrigues par l'approche pixel ont été classés de la même façon par l'approche objet. Mais par l'approche pixel, 11 % des surfaces classées en résineux ont été classés mixtes par l'approche objet, 28 % et 16 % des surfaces classées en feuillus ont été classés mixtes et garrigues, enfin 35 % et 13 % des surfaces classées en garrigues ont été classés résineux et mixtes (Journet, 2008). Comparées à la photo-interprétation de l'orthophoto corrigée par une description terrain ((b) de la Figure 5-16), les classifications par pixel et par objet ont respectivement en commun avec le terrain, 29 % et 40 % pour la classe feuillus, 60 % et 66 % pour la classe résineux et enfin 7 % et 15 % pour la classe garrigue. Pour la classification par pixel, 13 % à 18 % des surfaces de ces classes (feuillus, résineux, garrigues) étaient classées en mixte sur le terrain, ce taux variant de 15 % à 22 % pour la classification objet. Pour la classification par pixel, 30 % et 49 % des surfaces classées feuillus et garrigues étaient classées résineux sur le terrain, et enfin pour la classification objet, 22 % et 45 % de ces mêmes classes feuillus et garrigues étaient là aussi classées résineux sur le terrain.

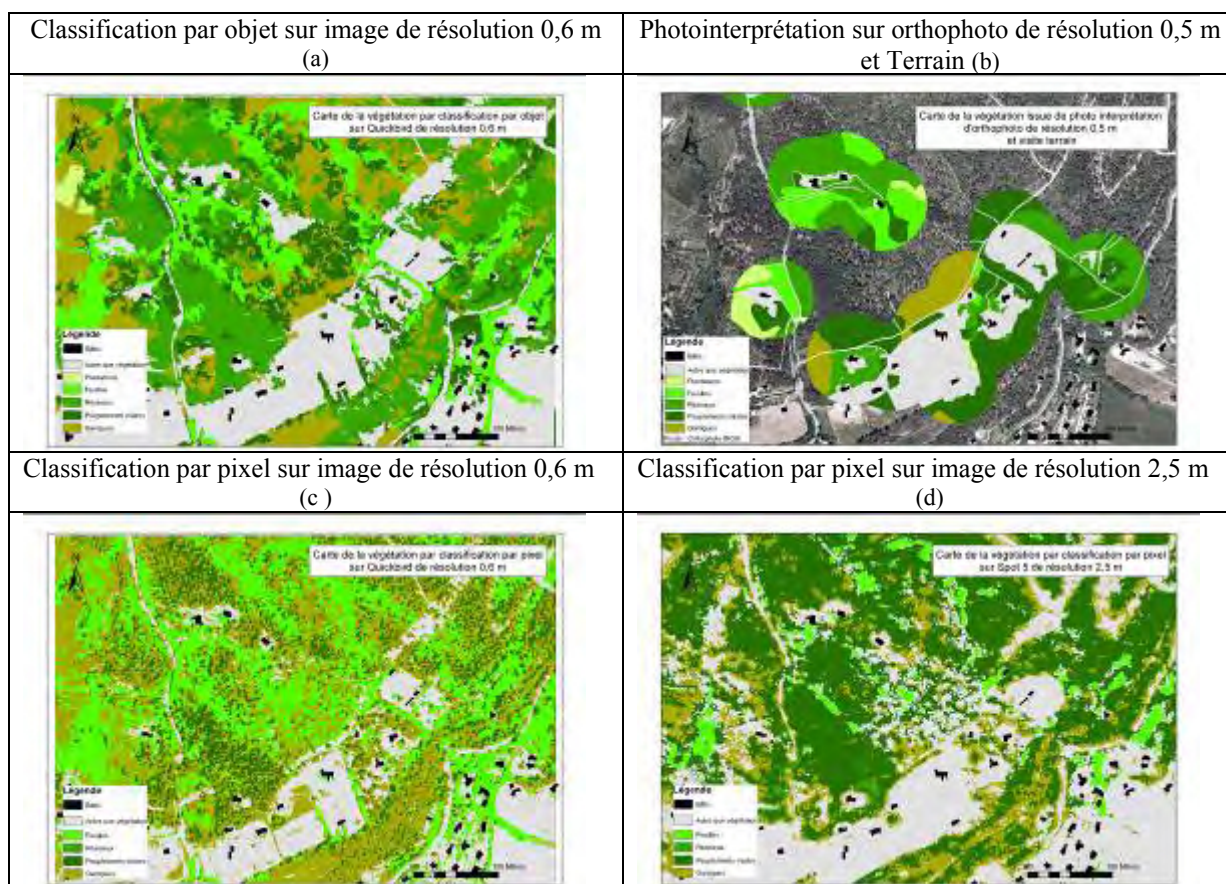


Figure 5-16 Carte de végétation élaborée sur une même emprise à partir de méthodes de classification et images différentes

Les confusions observées sont en partie liées à la définition du peuplement mixte qui prend en compte un mélange de feuillus et résineux qui, dans une image de résolution fine (0,6 m), se traduit par l'une ou l'autre des essences feuillues ou résineuses.

Des écarts entre végétation et non végétation

Il est aussi intéressant de mesurer les écarts sur les deux classes, végétation (toutes natures de végétation confondues) et non végétation (autre que végétation), entre les trois cartes issues de différentes classifications et images (soit Figure 5-17 extraite des cartes (d), (c) et (a) de la Figure 5-16).

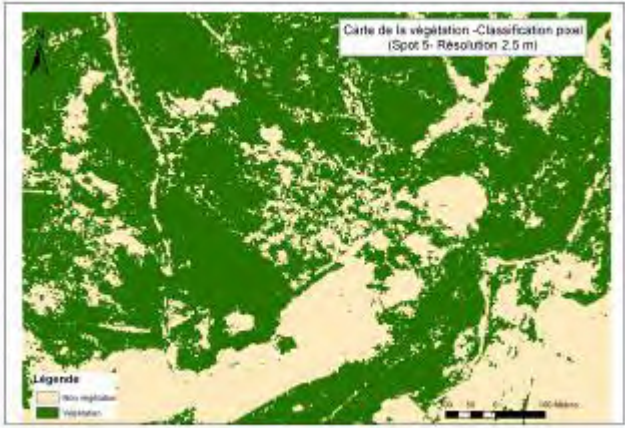


<p>Avec image Spot 5 et classification par pixel</p> <p>S1 : classe non-végétation obtenue par classification par pixel avec l'image Spot 5.</p> <p>S2 : classe végétation obtenue par classification par pixel avec l'image Spot 5.</p>	
<p>Avec image Quickbird et classification par pixel</p> <p>Q1 : classe non-végétation obtenue par classification par pixel avec l'image Quickbird</p> <p>Q2 : classe végétation obtenue par classification par pixel avec l'image végétation Quickbird</p>	
<p>Avec image Quickbird et classification objet</p> <p>F1 : classe non-végétation obtenue par classification objet avec l'image Quickbird</p> <p>F2 : classe végétation obtenue par classification objet avec l'image Quickbird</p>	

Figure 5-17 Cartes de végétation et non-végétation issues des différentes images et méthodes de classification

La mise en œuvre des analyses statistiques par Analyse Factorielle à Composantes Multiples (AFCM) et par Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) a permis de mettre en évidence les ressemblances ou différences entre les deux classes, végétation (toutes natures de végétation confondues) et non végétation, un tableau de Burt ayant été élaboré (Tableau 5-22) pour répartir les pixels et de mesurer les écarts entre les cartes prises deux à deux.

Répartition des pixels	Q1	Q2	F1	F2	S1	S2
Q1	555447	0	516019	39428	483978	71469
Q2	0	2167680	225188	1942492	516475	1651205
F1	516019	225188	741207	0	597904	143303
F2	39428	1942492	0	1981920	402549	1579371
S1	483978	516475	597904	402549	1001695	0
S2	71469	1651205	143303	1579371	0	1724198

Tableau 5-22 Tableau de Burt

Les résultats de la Figure 5-18 montrent que les classes de non végétation (de type 1) et de végétation (de type 2) sont opposées, ce qui est normal. En revanche au sein de la classe végétation (de type 2), les représentations de la classe végétation effectuées par les deux méthodes de classification (pixel et objet) avec l'image Quickbird, respectivement Q2 et F2, sont semblables mais elles sont relativement éloignées de celle obtenue avec la méthode de classification par pixel S2 avec l'image Spot 5. Les représentations de la classe non-végétation effectuée par les deux méthodes de classification (pixel et objet) avec l'image Quickbird, respectivement Q1 et F1, sont relativement proches mais elles sont très éloignées de celle de la classe non-végétation obtenue par la méthode de classification par pixel S1 avec l'image Spot 5.

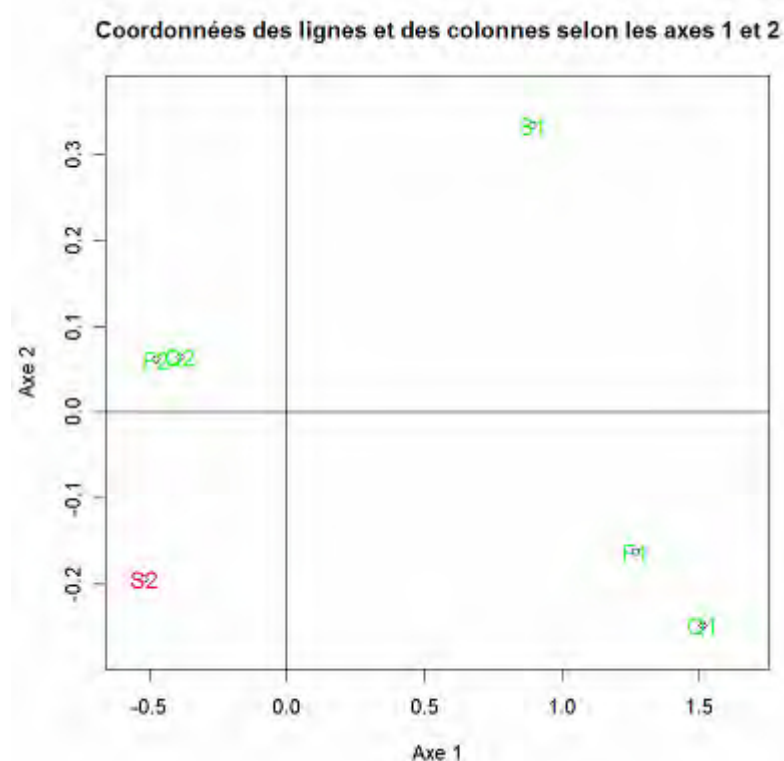


Figure 5-18 Résultats de l'AFCM

Ainsi sur une même zone, selon la méthode de classification utilisée (approche pixel ou objet) et le choix de l'image traitée (disponibilité, nature de l'image traitée, résolution de l'image), le résultat cartographique de la végétation peut être différent. La qualité de la caractérisation de la structure de la végétation donc dépendra de la qualité de la carte de végétation produite au préalable. La production de la carte de végétation à partir d'une classification supervisée réalisée sur une image satellite de type Spot 5, ayant une résolution de 2,5 m voire 5 m et couvrant de grandes surfaces (60 km sur 60 km), est recommandée de façon à garantir une certaine homogénéité de la qualité de la carte de la végétation sur une grande surface.

5.2.2. Critère traduisant la structure horizontale de la végétation

Disposant d'une carte de végétation, la recherche a consisté à définir un indice ou un critère qui soit capable de traduire la continuité horizontale de cette végétation. Un feu se propage s'il existe une continuité de l'agent de propagation, en l'occurrence la végétation. Ainsi une végétation continue facilite l'avancée d'un feu en le « nourrissant » en continu, alors qu'une végétation éparse, discontinue, présentant une certaine porosité, entraîne une diminution brutale de l'intensité d'un feu en cours de propagation, pouvant aller même jusqu'à stopper la progression du feu. Ainsi Syphard et al. (2007a, 2007b, 2008) considèrent que le risque d'incendie est lié à l'arrangement spatial d'une végétation combustible continue au contact de sources de départ de feu, comme les structures bâties. Ils ajoutent que le développement des feux est conditionné par la continuité de la végétation et que les espaces brûlent davantage quand la végétation y est continue. La mise en évidence de la structure horizontale de la végétation est donc apparue essentielle dans le contexte d'évaluation du risque d'incendie, même si elle n'était pas suffisante.

Selon le format de la carte de la végétation, vecteur ou raster, et, pour le format raster, selon l'approche pixel ou objet, la méthode de caractérisation de la structure de la végétation est différente. La première méthode a été développée à partir d'une carte de végétation au format raster définie au pixel près et la seconde à partir d'une carte de végétation, au format vecteur ou raster, définie par des polygones ou des objets (agrégat de pixels).

a. Indice d'agrégation pour une carte de végétation pixelisée

Pour caractériser la structure horizontale de la végétation, à partir d'une information délivrée au niveau du pixel, le calcul d'indices empruntés à l'écologie du paysage (Burel et Baudry, 1999) est apparu approprié et prometteur (Jappiot et al., 2002). L'un d'entre eux, l'indice d'agrégation (Turner, 1990 ; McGarigal, 2002), indice à représentation spatiale, cartographiable, est apparu particulièrement intéressant. Cet indice fait référence à l'arrangement spatial de pixels sur une image donnée, à leur regroupement, leur niveau d'agrégation. C'est un indice de configuration spatiale (structure) qui renseigne sur la fréquence des connexions entre pixels d'une même classe de paysage, se prêtant ainsi à une quantification de l'organisation du paysage (Robbez-Masson et al., 1999).

Principe

Appelé AI (Aggregation Index), il rapporte l'ouverture du paysage à travers le calcul du niveau d'agrégation des classes qui composent ce paysage. Ainsi comme l'illustre la Figure 5-19 adaptée de Turner (1990), une mesure d'agrégation est forte, égale à 100 lorsqu'une classe (ex : classe jaune de la figure) est totalement agrégée dans la fenêtre de voisinage. Une mesure est faible, proche de 0, lorsque la classe étudiée (ex : classe jaune de la Figure 5-19) est constituée de tâches disjointes les unes des autres.

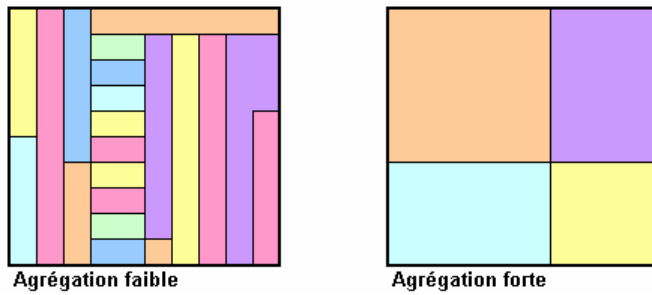


Figure 5-19 Représentation d'une structure à faible agrégation (gauche), à forte agrégation (droite)

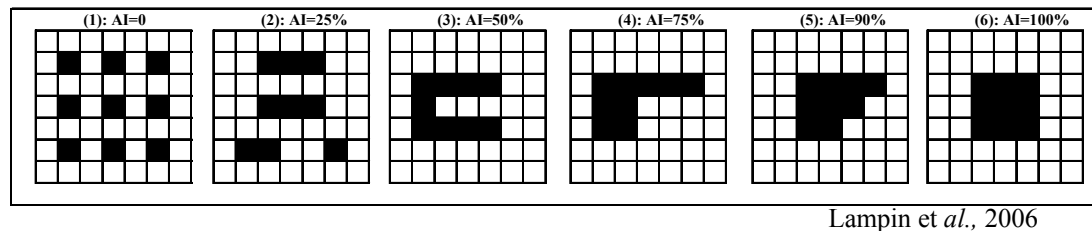
L'indice calcule le ratio entre le nombre de contacts entre les pixels et le nombre maximal possible de contacts (le résultat étant en pourcentage) selon la formule ci-dessous :

$$AI = \left[\frac{g_{ii}}{\max \rightarrow g_{ii}} \right] (100)$$

Avec g_{ii} = nombre de contacts entre les pixels d'une classe i

\max - g_{ii} = nombre maximal de contacts entre les pixels d'une classe i

L'indice d'agrégation peut être calculé de façon globale sur l'ensemble d'une image ou à partir d'une fenêtre glissante parcourant l'image et dont la taille est fixée par l'utilisateur. Cette fenêtre définit alors l'environnement dans lequel s'effectue le calcul de l'indice. Le résultat de ce calcul est attribué au pixel central de la fenêtre glissante. La Figure 5-20 illustre l'évolution des valeurs de l'indice d'agrégation d'une classe représentée par les pixels noirs.



Lampin et al., 2006

Figure 5-20 Evolution de l'indice d'agrégation de la classe représentée par les pixels noirs

Le schéma (6) de la Figure 5-20 correspond à l'agrégation maximale, c'est-à-dire au nombre maximal de contacts entre les pixels noirs. Dans ce cas, on compte 40 contacts entre pixels noirs, dénombrés verticalement, horizontalement et diagonalement comme le montre (b) de la Figure 5-21, la flèche à double sens comptabilisant deux contacts entre 2 pixels (pixel 1 vers pixel 2, pixel 2 vers pixel 1). A l'opposé, le schéma (1) de la Figure 5-20 correspond à une agrégation nulle, aucun contact n'existe entre les pixels noirs qui sont isolés les uns des autres. Le schéma (4) de la Figure 5-20, correspondant à une agrégation de 75 %, est le rapport du nombre de contacts entre les pixels noirs, ici 30 comme le montre (c) de la Figure 5-21, et du nombre maximal de contacts entre les 9 pixels noirs, c'est-à-dire 40.

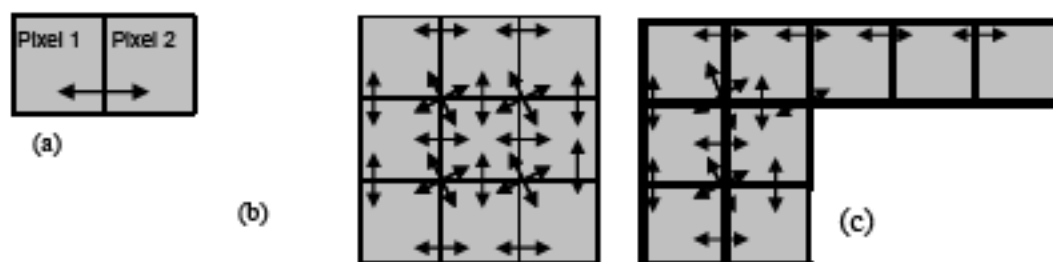


Figure 5-21 a Dénombrement de 2 contacts entre deux pixels (pixel1-pixel2, pixel2-pixel1) ; b : Dénombrement de 40 contacts entre les pixels ; c : Dénombrement de 30 contacts entre les pixels

D'autres indices existent pour mesurer et cartographier des niveaux d'agrégation de patrons spatiaux à l'intérieur d'une classe donnée, He et al. (2000) en rappellent l'existence citant l'indice de contagion, l'indice de forme ou la probabilité d'adjacence de pixels d'une même classe. Mais He et al. (2000) en exposent les limites et présentent l'indice d'agrégation comme l'indice le plus adapté. Bogeat et al. (2002) établissent une relation mathématique entre l'indice de forme et l'indice d'agrégation calculé pour une classe donnée. L'indice d'agrégation apparaît donc approprié pour mettre en évidence la structure horizontale de la végétation.

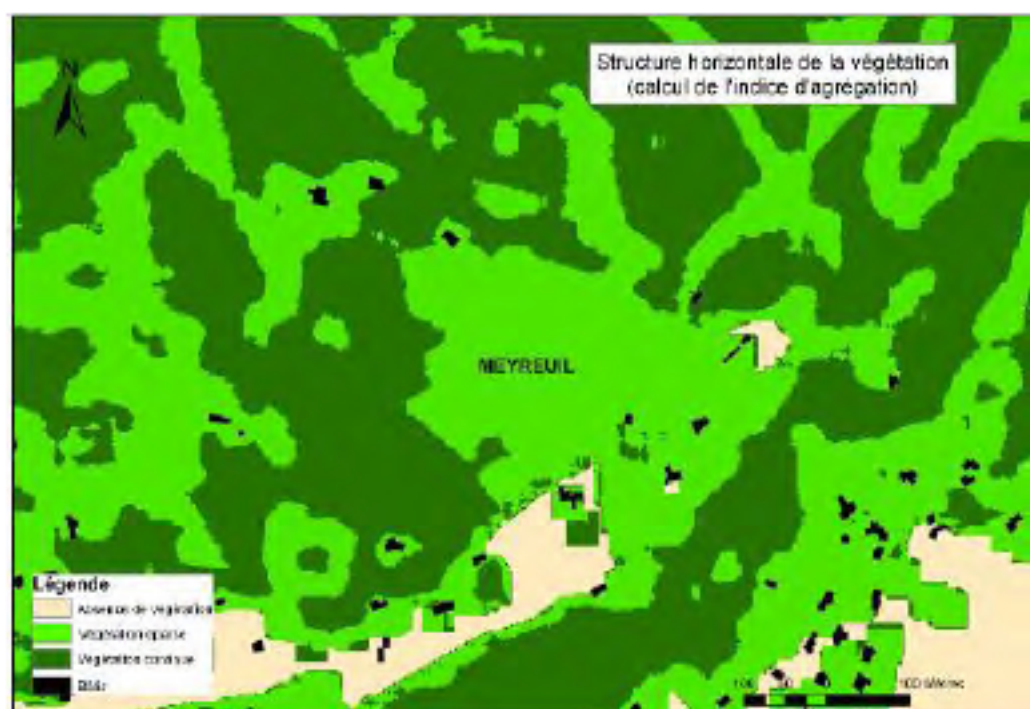
Le calcul de cet indice d'agrégation a été réalisé sur la classe végétation. En se référant à la Figure 5-20, une forte agrégation des pixels de la classe végétation (jusqu'à 100 %) met en évidence une organisation de cette végétation en ensembles compacts, soit une structure horizontale continue de la végétation. Une faible agrégation met en évidence une organisation plutôt éparse de la végétation, soit une structure horizontale discontinue de la végétation. Enfin une valeur nulle d'agrégation souligne l'absence de connexion entre tout élément de végétation. La Figure 5-22 illustre les environnements possibles correspondants.



Figure 5-22 Illustration des types de structure de la végétation mis en évidence selon les valeurs de l'indice d'agrégation AI

Résultat cartographique

L'indice d'agrégation calculé sous FRAGSTATS a été cartographié (Carte 5-9) selon la procédure développée en Annexe D.



Carte 5-9 Carte de la structure horizontale de la végétation pixélisée

b. Identification qualitative pour une carte de végétation de nature objet

Pour caractériser la structure horizontale de la végétation, à partir d'une carte de végétation issue d'une classification objet (format raster, pixels déjà agrégés) ou d'une numérisation de polygones homogènes (format vecteur), le calcul de l'indice d'agrégation qui s'intéresse à l'arrangement des pixels ne présentait plus d'intérêt. Une approche de substitution a donc été proposée.

Principe

La carte de végétation (Carte 5-8) obtenue par classification orientée objet met en évidence différents types de végétation à savoir les feuillus, les résineux, les peuplements mixtes et la garrigue, mais également les zones débroussaillées, les linéaires, les plantations sous la forme de zones homogènes. Il en est de même avec une carte de végétation obtenue par photo-interprétation qui met en évidence différentes classes de végétation par numérisation de polygones homogènes (Carte 3-8 par exemple).

L'identification de la structure horizontale de la végétation s'est faite alors de façon qualitative en regroupant les classes de végétation selon la règle suivante :

- ☞ Classes de végétation à structure horizontale continue ;

Ce regroupement a correspondu aux classes de végétation dont la couverture arborée était dense : la surface au sol se trouvait totalement couverte de végétation (forêts de résineux, feuillus, mixtes non débroussaillées, garrigues, maquis, etc.).

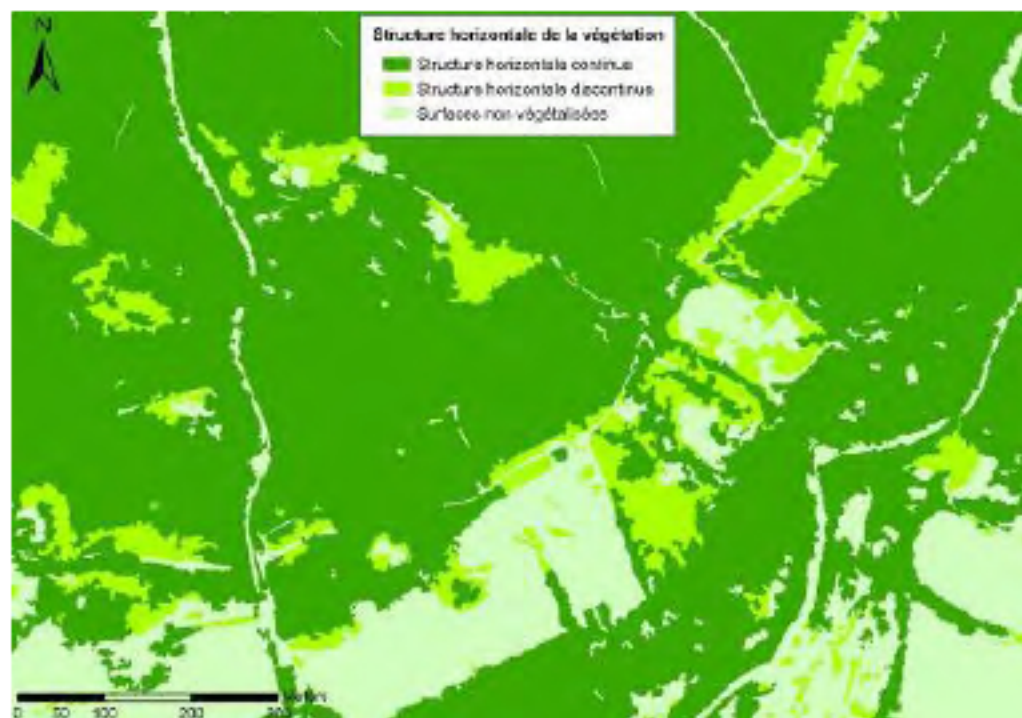
- ☞ Classes de végétation à structure horizontale discontinue ;

Ce regroupement a correspondu aux classes de végétation éparse : la surface au sol n'était pas totalement couverte de végétation, il s'agissait souvent de zones entretenues (débroussaillées, végétation d'agrément, plantations, haies, etc.) ou de zones ouvertes en bord de route ou de zones bâties.

- ☞ Autres classes.

Les autres classes d'occupation du sol constituaient des surfaces autres que des espaces naturels de types forêts, garrigues, maquis... (sol nu, surfaces bâties, surfaces agricoles, etc.). Ces surfaces n'étaient pas pour autant systématiquement non combustibles (surfaces agricoles notamment).

Résultat cartographique



Carte 5-10 Carte de la structure horizontale de la végétation (issue d'une classification objet)

Pour caractériser et cartographier la structure horizontale de la végétation, deux approches ont été présentées selon le support cartographique de la végétation disponible. Mais seule l'approche par le calcul de l'indice d'agrégation a été développée dans la thèse.

5.2.3. Paramètres de calcul de l'indice d'agrégation pour une représentation spatiale pertinente de la structure de la végétation

Calculé sur la classe de végétation, l'indice d'agrégation permet de représenter la structure horizontale de la végétation : sa continuité, sa discontinuité, voire son absence. Sa cartographie est possible en choisissant le mode de calcul par fenêtre glissante. Mais ce choix suppose de fixer certains paramètres de calcul de façon à caractériser au mieux la structure de la végétation au contact des zones habitées, dans les interfaces habitat-forêt.

a. Un rayon de calcul fixé à 20 m

Le calcul de l'indice d'agrégation se fait au sein d'une fenêtre glissante, qui se déplace d'un pixel à chaque nouveau calcul, couvrant ainsi la totalité de l'image sur laquelle les valeurs de l'indice doivent être calculées. La taille de cette fenêtre glissante est déterminée par un rayon de calcul fixé par l'utilisateur. Pour chaque emprise délimitée par la fenêtre glissante, l'indice d'agrégation est calculé et le résultat est affecté au pixel central de la fenêtre. Autrement dit, la valeur de l'indice d'agrégation, affectée au pixel central, traduit le niveau de l'agrégation de la végétation dans l'environnement de ce pixel défini par le rayon fixé par l'utilisateur.

Pour fixer ce rayon de calcul, il convient de s'interroger sur la taille la plus pertinente d'une emprise au sol sur laquelle on apprécierait la continuité, ou la discontinuité, de la végétation présente. Par rapport à la propagation du feu, à la protection d'un bâti contre la radiation des flammes d'un incendie, les résultats de travaux d'expérimentation et les analyses de retours d'expérience ont permis de définir des distances assurant au mieux la mise en protection de bâtis en cas d'incendie. Ainsi une distance de 20 m entre la maison et toute végétation a été préconisée par Davis (1990) pour obtenir une baisse significative de l'inflammation d'une structure bâtie en cas d'incendie. Des retours d'expérience ont mis en évidence que 95 % des maisons avaient été épargnées, lorsque la végétation avait été débroussaillée dans un rayon de 10 à 18 m autour de la maison (Cohen, 1999). Des études expérimentales et de modélisation ont montré qu'un enlèvement partiel d'arbres dans les 40 m autour de la maison protégeait cette maison contre l'inflammation par radiation d'un feu total (Cohen et Butler, 1998; Cohen, 2000). En France, la loi oblige à débroussailler la végétation dans un rayon de 50 m autour des maisons. Des retours d'expérience, concernant les maisons situées dans l'emprise d'incendies datant de 2001 à 2007, ont montré que 98 % des maisons n'avaient pas été endommagées par l'incendie lorsque le débroussaillage avait été réalisé de façon conforme, et que 18 % d'entre elles avaient connu des dégâts extérieurs. Seuls 2 % des maisons avaient connu des dégâts intérieurs (Duché et Raymond, 2007).

Au regard du risque d'incendie, connaître l'état de la végétation (présence continue, discontinue ou absence) aux abords d'une maison, dans un rayon de 20 m autour de cette maison délimitant ainsi une emprise de 40-50 m de côté, apparaît judicieux et pertinent. Ainsi, le rayon de calcul de la fenêtre glissante a été fixé à 20 m pour calculer l'indice d'agrégation de la végétation, quelque soit la résolution de la carte de végétation.

b. *Seuillage des valeurs de l'indice d'agrégation*

Le calcul de l'indice d'agrégation a été réalisé sur la carte de végétation (Carte 5-6) d'une résolution de 2,5 m. Les valeurs de l'indice d'agrégation varient entre 0 à 100 %. Pour mettre en évidence les trois types de structure de végétation (végétation continue, discontinue, absente), il a été nécessaire de regrouper, de discrétiser les valeurs de l'indice en trois classes. Il a donc fallu définir les seuils les plus appropriés pour discriminer chacune de ces classes. Il existe différentes méthodes de seuillage des valeurs. Celles-ci doivent respecter prioritairement la forme de la distribution initiale des valeurs et trouver le meilleur compromis entre l'homogénéité des individus au sein d'une même classe et la plus grande hétérogénéité entre les classes. Mais la plupart de ces méthodes de seuillage ont pour hypothèse une distribution normale de la répartition des valeurs. Or la distribution observée des valeurs de l'indice d'agrégation ne suit pas une loi normale.

Les seuils ont donc été choisis manuellement de façon à ce que la représentation cartographique des types de structure de la végétation soit la meilleure possible. Ce choix a aussi été conditionné par le fait que les seuils devaient rester optimaux quelque soit la résolution des cartes de végétation utilisées car la taille de la fenêtre de calcul et la résolution de l'image peuvent affecter directement les résultats d'une recherche donnée, notamment les résultats du calcul de l'indice d'agrégation (Mayer et Cameron, 2003). Cette sensibilité de l'indice a d'ailleurs déjà été mesurée (Saura, 2004, 2002 ; Lampin, 2004a), selon l'échelle à laquelle l'observation est faite, selon la taille de la fenêtre de calcul, la texture peut être prise en compte différemment (Desachy, 1991 cité dans Sauer, 2001). Ainsi l'augmentation de la taille de la fenêtre glissante augmente la proportion des valeurs fortes d'agrégation (He et al., 2000). Pour une même taille de fenêtre de calcul, la représentation spatiale des valeurs de

l'indice d'agrégation peut varier avec des résolutions d'image différentes, pour 20 % des pixels en moyenne (Lampin, 2004a).

Pour vérifier que la représentation spatiale de l'indice d'agrégation par classe ne différait pas de façon significative pour différentes résolutions d'image et pour les seuils choisis, différentes cartes d'indice d'agrégation de résolutions différentes ont été élaborées. Une zone de plus de 9 000 ha (4 communes dont la zone d'étude MEYR) a été extraite de la carte de la végétation d'une résolution de 2,5 m (Carte 5-6) pour travailler sur une surface plus petite que la zone d'étude MAM Métropole Aix-Marseille et pour réduire ainsi les temps de calcul et faciliter l'analyse, sans compromettre pour autant la significativité des résultats. L'extrait de la carte de végétation ainsi obtenu a été dégradé successivement avec un facteur 2 de façon à obtenir une carte de végétation d'une résolution de 5 m, un facteur 4 de façon à obtenir une carte de végétation d'une résolution de 10 m, un facteur 6 de façon à obtenir une carte de végétation d'une résolution de 15 m, et enfin un facteur 8 de façon à obtenir une carte de végétation d'une résolution de 20 m. Le calcul de l'indice d'agrégation a alors été réalisé sur chacune des 5 cartes avec une fenêtre glissante d'un rayon fixé à 20 m selon la méthode explicitée dans l'Annexe D. Le rayon de calcul étant fixé à 20 m, la taille de la fenêtre de calcul a varié avec la résolution de l'image à partir de laquelle a été calculé l'indice d'agrégation. En effet, avec une résolution d'image de 2,5 m, l'environnement de calcul avec un rayon de calcul à 20 m (8 pixels) est une fenêtre carrée de 42,5 m de côté (17 pixels sur 17 pixels), avec une résolution d'image de 5 m, l'environnement de calcul avec un rayon de calcul à 20 m (4 pixels) est une fenêtre carrée de 45 m de côté (9 pixels sur 9 pixels) et ainsi de suite pour les différentes résolutions étudiées.

La mesure de l'importance des écarts entre les représentations cartographiques de l'indice issues de taille de fenêtre de calcul et de résolution d'image différentes a porté sur les 3 classes de valeurs de l'indice d'agrégation, et non les valeurs brutes, classes qui nous intéressaient pour caractériser la structure de la végétation. Parallèlement les seuils pour discriminer ces trois classes valeurs de l'indice d'agrégation ont été déterminés.

La préfiguration d'un seuil à 95 % pour discriminer la structure continue de la structure discontinue de la végétation

Chaque pixel des cartes d'indice d'agrégation produites a une valeur variant de 0 à 100 %. Les distributions observées des valeurs de l'indice d'agrégation en fonction de la résolution de l'image sont illustrées sur la Figure 5-23.

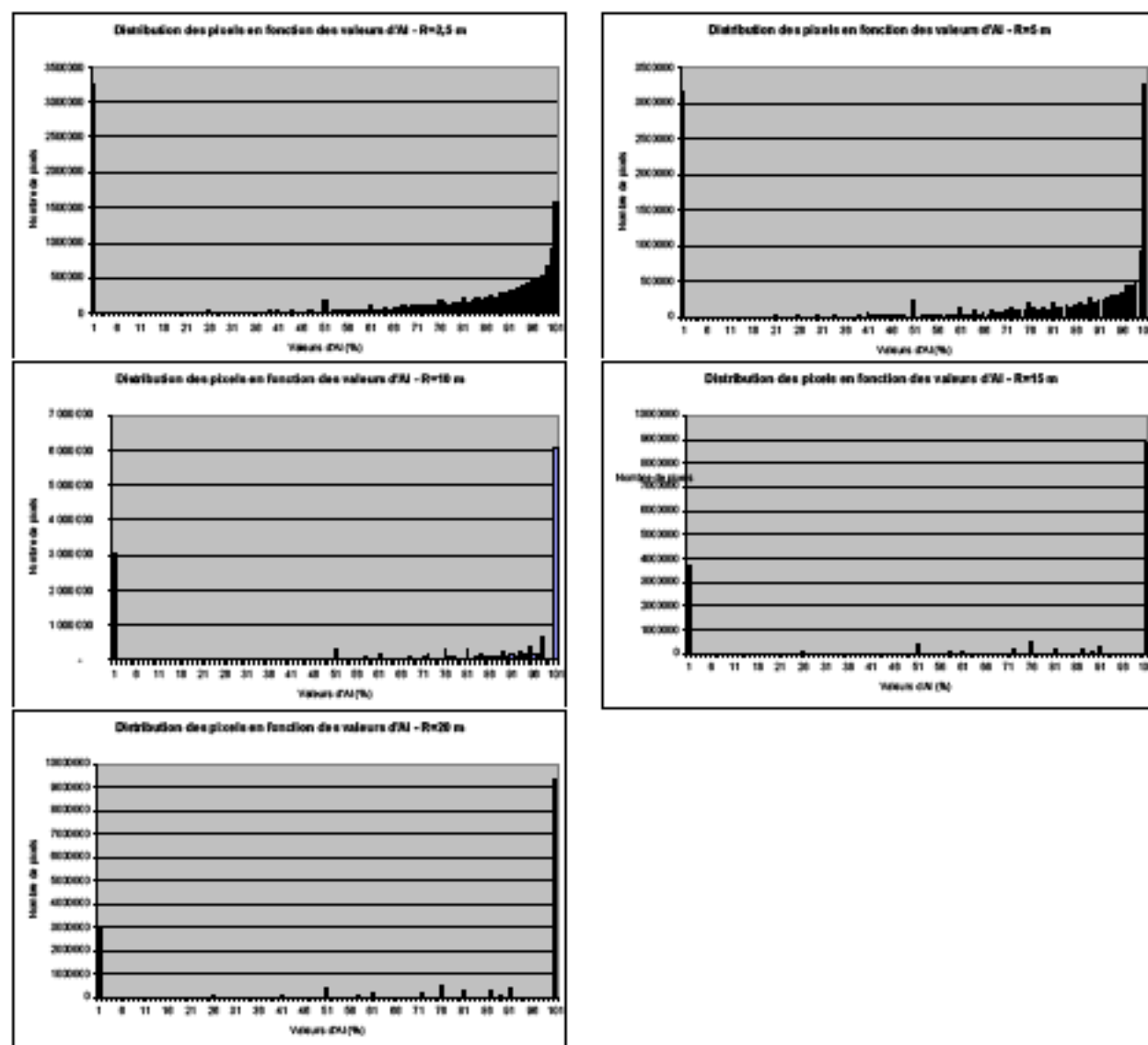


Figure 5-23 Répartition du nombre de pixels en fonction des valeurs d'AI selon la résolution de l'image

L'effectif des pixels d'une valeur « nulle » représente de 20 à 25 % de l'effectif total pour chacune des résolutions étudiées. Compte tenu de leur signification (pas de végétation ou pas de connexion entre les pixels de végétation existants), les pixels ayant pour attribut cette valeur « nulle » ont constitué une classe à part entière.

Pour aider au choix du seuillage manuel entre les deux classes, autres que celle de la valeur nulle, discriminant une classe de végétation continue d'une classe de végétation discontinue, l'effectif des pixels restants (d'une valeur non nulle) a alors été réparti en deux classes selon plusieurs méthodes de seuillage sous ArcGIS©9.2. Le Tableau 5-23 synthétise les valeurs des seuils ainsi obtenues.

Méthodes de seuillage	Résolutions de l'image				
	2,5 m	5 m	10 m	15 m	20 m
Effectifs égaux	92 %	95 %	97 %	90 %	90 %
Seuils naturels (Jenks)	77 %	80 %	81 %	80 %	80 %
Intervalle géométrique	92 %	94 %	97 %	91 %	91 %

Tableau 5-23 Variation des valeurs du seuil discriminant en fonction de la résolution de l'image

La représentation cartographique avec les seuils proches de ceux proposés par les seuils naturels de Jenks (seuil de l'ordre de 80 %) ne discrimine pas suffisamment les deux classes. La structure de la végétation est pratiquement toujours continue. La représentation cartographique avec les seuils proches de ceux proposés par la méthode des effectifs égaux ou celle des intervalles géométriques offre une meilleure discrimination entre les deux classes. Ces seuils varient entre 90 % et 97 % selon les résolutions de l'image.

Compte tenu de la taille du rayon de calcul de l'indice d'agrégation (20 m), la caractérisation de la structure de la végétation au sein des interfaces habitat-forêt devrait être optimale si elle est réalisée avec des cartes de végétation d'une résolution maximale de 10 m (correspondant à une fenêtre glissante de calcul de 50 m de côté). Il est donc apparu que le seuil commun pouvait être de 95 %, seuil intermédiaire entre 92 % obtenu pour la résolution de 2,5 m et 97 % obtenu pour la résolution de 10 m.

Comparaison de cartes d'indice d'agrégation de résolutions différentes

Les valeurs de l'indice d'agrégation, calculé sur chacune des 5 cartes de végétation de résolution différente, ont été classées de deux façons.

La première façon a été de considérer un seuil variable SV pour discriminer deux classes de valeurs non nulles d'agrégation. Ce seuil variable SV a été déterminé selon la résolution de l'image en appliquant le principe de répartition en effectifs égaux des valeurs non nulles de l'indice d'agrégation (Tableau 5-23). Les pixels ont été répartis en trois classes.

- ☞ les valeurs de l'indice d'agrégation, égales à 0, ont constitué la première classe C0 ;
- ☞ les valeurs de l'indice d'agrégation inférieures ou égales à la valeur du seuil variable SV, ont constitué la classe des valeurs faibles C1 de l'indice d'agrégation ;
- ☞ les valeurs de l'indice d'agrégation supérieures à la valeur du seuil variable SV, ont constitué la classe des valeurs fortes C2 de l'indice d'agrégation.

La seconde façon a été de considérer un seuil fixé à 95 % SF pour discriminer deux classes de valeurs non nulles d'agrégation. Les pixels ont été répartis en trois classes :

- ☞ Les valeurs de l'indice d'agrégation AI, égales à 0, constituent la première classe C0 ;
- ☞ les valeurs de l'indice d'agrégation inférieures ou égales à 95 %, ont constitué la classe des valeurs faibles C1 de l'indice d'agrégation ;
- ☞ les valeurs de l'indice d'agrégation supérieures à 95 %, ont constitué la classe des valeurs fortes C2 de l'indice d'agrégation.

Les résultats cartographiques sont illustrés sur les Figure 5-24 et Figure 5-25. Ils ont été comparés deux à deux et les écarts ont été mesurés.

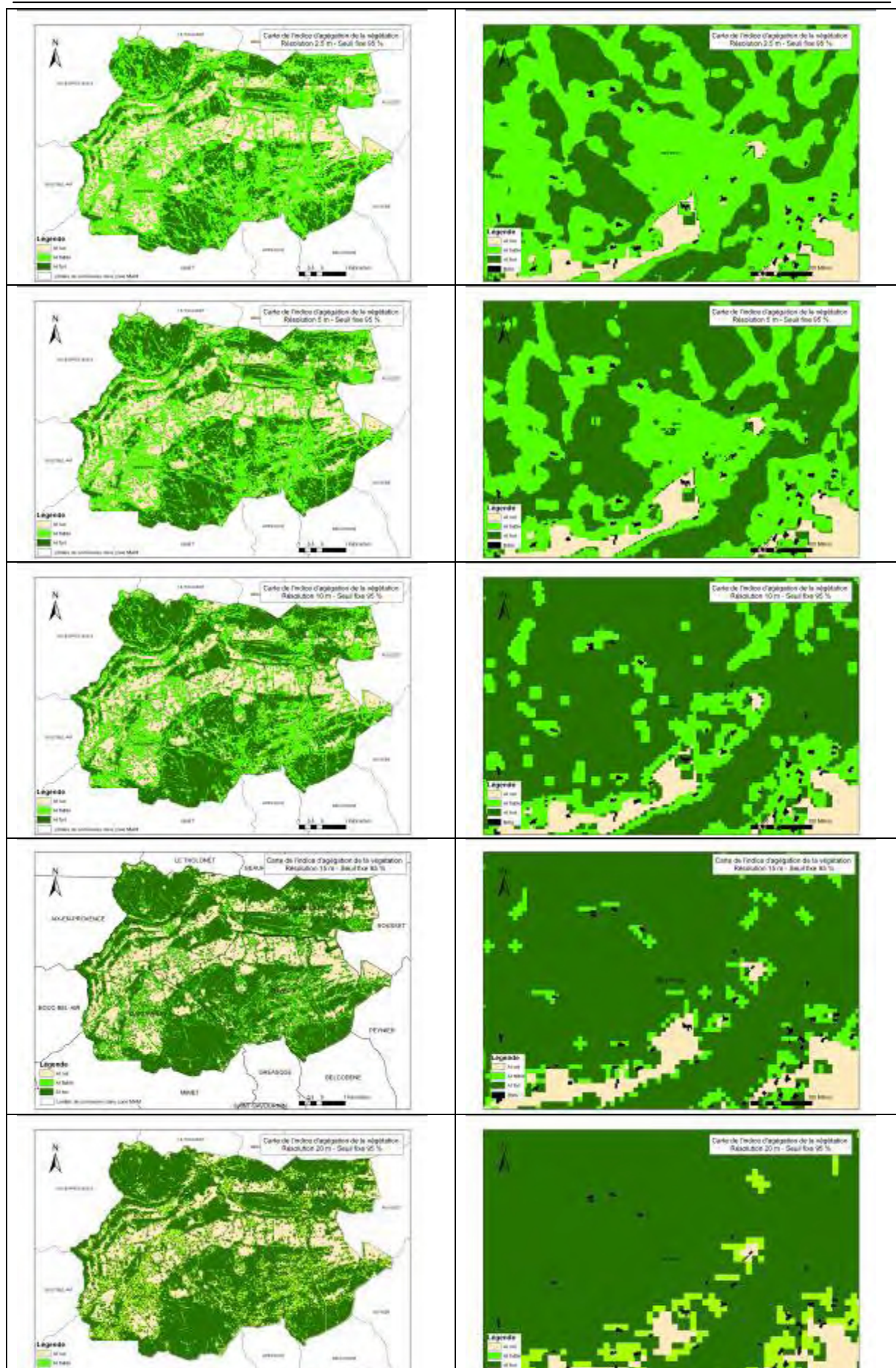


Figure 5-24 AI en trois classes : AI=0, seuil fixe de 95 % discriminant AI faible de l'AI fort selon la résolution

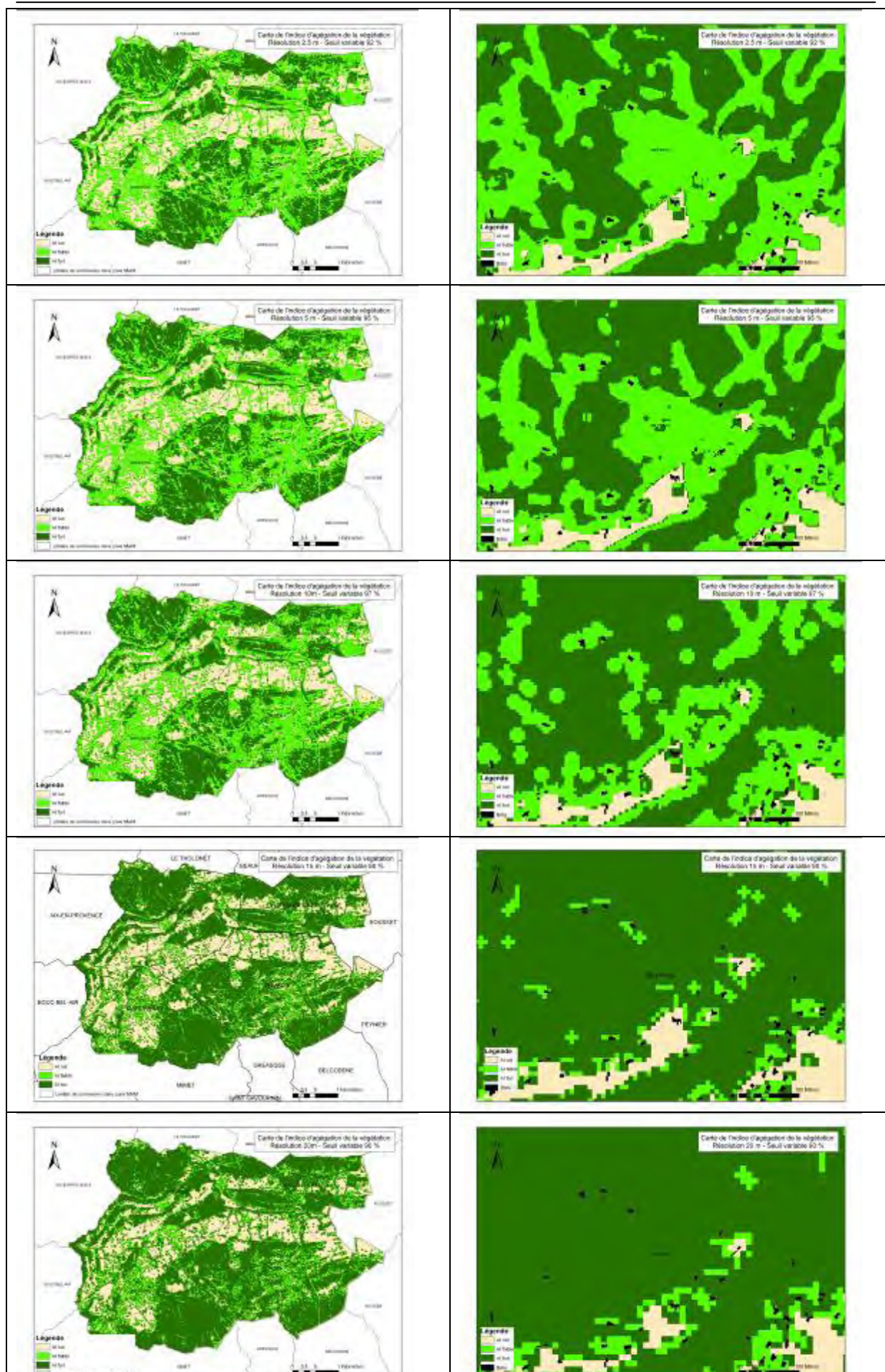


Figure 5-25 AI en trois classes : AI=0, seuil variable discriminant AI faible de l'AI fort selon la résolution

Après avoir ré-échantillonné chaque carte avec une résolution commune (soit 2,5 m) afin de permettre les comparaisons, la répartition du nombre de pixels par classes de l'indice d'agrégation a été représentée graphiquement selon les deux modalités de seuil, seuil variable SV et seuil fixe à 95 % SF et les 5 résolutions 2,5 m, 5 m, 10 m, 15 m et 20 m (Figure 5-26).

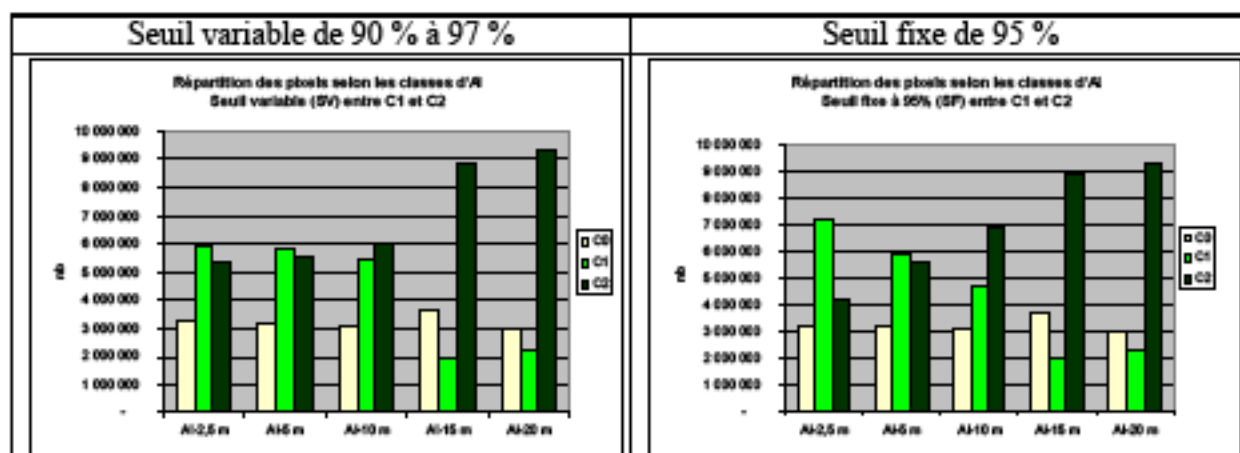


Figure 5-26 Répartition des pixels selon les classes d'AI

Les histogrammes de la Figure 5-26 montrent que :

- le nombre de pixels de la classe des valeurs nulles de l'indice d'agrégation C0 est le même pour 4 résolutions (2,5 m, 5 m, 10 m et 20 m) et est légèrement plus important pour la résolution de 15 m. Il ne varie pas non plus entre les modalités, seuil variable SV et seuil fixe SF, qui n'interviennent que pour discriminer la classe des valeurs d'indice d'agrégation non nulles ;
- le nombre de pixels de la classe C1 des valeurs de l'indice d'agrégation inférieures ou égales à la valeur du seuil variable SV diminue avec une résolution croissante alors que celui de la classe C2 des valeurs de l'indice d'agrégation supérieures à la valeur du seuil variable SV augmente avec une résolution croissante. Cette évolution a été observée dans les deux modalités : seuil variable SV et seuil fixe SF ;
- de gros écarts apparaissent dans la répartition des pixels des classes C1 et C2 entre les résolutions de 2,5 m, 5 m et 10 m d'une part et celles de 15 m et 20 m d'autre part, ceci dans les deux modalités, seuil variable SV et seuil fixe SF ;
- des nuances apparaissent selon les résolutions. Ainsi la répartition des pixels entre les deux classes C1 et C2 est relativement constante pour les résolutions de 2,5 m, 5 m et 10 m pour la modalité seuil variable SV. Elle l'est moins pour la modalité seuil fixe SF. Cette répartition est relativement constante pour les résolutions de 15 m et 20 m et ceci pour les deux modalités, seuil variable SV et seuil fixe SF.

Pour compléter ces observations, une analyse statistique multivariée a été réalisée pour comparer les écarts sur la représentation cartographique de l'indice d'agrégation selon la résolution et pour les deux modalités de seuils, seuil variable SV et seuil fixe SF (méthode inspirée de travaux de comparaison de diverses cartes d'aléa comportant plusieurs niveaux d'aléa - Narbaix-Jaureguy, 2008). A l'aide d'un SIG, il a été relativement aisé d'effectuer une comparaison à l'échelle du pixel. Pour les cinq cartes de l'indice d'agrégation issues de 5 résolutions différentes et pour chacune des modalités, seuil variable SV et seuil fixe SF, les valeurs des pixels appartenant aux 3 classes C0, C1 et C2 ont été codées respectivement en 1, 2, 3 pour la carte de résolution 2,5 m, 10, 20, 30 pour la carte de résolution 5 m, 100, 200, 300 pour la carte de résolution 10 m, 1000, 2000, 3000 pour la carte de résolution 15 m et 10000, 20000, 30000 pour la carte de résolution 20 m. Pour chacune des deux modalités, seuil

variable SV et seuil fixe SF, les cartes ont été additionnées deux à deux. Les valeurs obtenues par cette addition ont permis d'alimenter deux tableaux de contingence, dit de « Burt », croisant l'ensemble des variables avec elles-mêmes (Tableau 5-24 pour la modalité seuil variable SV et Tableau 5-25 pour la modalité seuil fixe SF).

Chaque tableau est construit ainsi :

- Les cinq sous-tableaux sur la diagonale (de couleur grise) croisent les trois variables AI entre elles, seule la diagonale de ces cinq sous-tableaux porte donc un effectif ;
- Les dix sous-tableaux situés au-dessus de la diagonale du tableau de Burt croisent les 3 classes de pixels d'AI 5, AI 10, AI 15, AI 20 avec les mêmes classes d'AI 2,5 ; les 3 classes de pixels d'AI 10, AI 15, AI 20 avec les mêmes classes d'AI 5 ; les 3 classes de pixels d'AI 15, AI 20 avec les mêmes classes d'AI 10, les 3 classes de pixels d'AI 20 avec les mêmes classes d'AI 15 ;
- Les dix sous-tableaux situés au-dessous de la diagonale du tableau de Burt sont les transposés des tableaux précédents.

Observation : Les 15 modalités des tableaux de Burt ont été codifiées par un acronyme construit comme le montre l'exemple ci-après. La modalité AI2,5-C0 regroupe les pixels d'une valeur appartenant à la classe C0 (valeur nulle de l'indice d'agrégation) résultant du calcul de l'indice d'agrégation sur une carte de résolution de 2,5 m. La modalité AI2,5-C1 regroupe les pixels d'une valeur appartenant à la classe C1 (valeur de l'indice d'agrégation inférieure ou égale à la valeur du seuil variable pour la modalité seuil variable, ou du seuil fixe pour la modalité seuil fixe) résultant du calcul de l'indice d'agrégation sur une carte de résolution de 2,5 m. La modalité AI2,5-C2 regroupe les pixels d'une valeur appartenant à la classe C1 (valeur de l'indice d'agrégation supérieure à la valeur du seuil variable pour la modalité seuil variable, ou du seuil fixe pour la modalité seuil fixe) résultant du calcul de l'indice d'agrégation sur une carte de résolution de 2,5 m.

Une Analyse Factorielle des Correspondances Multiples (AFCM) a été réalisée pour chacun de ces tableaux de Burt. Son application à la géographie a été particulièrement traitée par Sanders (1989). En d'autres termes, l'AFCM, cas particulier de l'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) permet d'analyser les liaisons (proximité et éloignement) entre les différentes modalités de variables qualitatives.

L'application de l'analyse factorielle des correspondances aux tableaux de Burt pour les modalités, seuil variable SV et seuil fixe SF, a permis de réaliser les graphes de la Figure 5-27 qui représentent la position des différentes modalités de l'indice d'agrégation telles que définies pour les tableaux de Burt ci-dessus. Ces modalités ont dû cependant être recodées pour une lecture plus facile sur les graphes. Ainsi les trois classes de l'indice d'agrégation C0, C1 et C2 pour des classes de valeurs nulles, faibles et fortes de l'indice d'agrégation ont été codées 1, 2 et 3. Les 5 résolutions de 2,5 m, 5 m, 10 m, 15 m et 20 m ont été respectivement codées a, b, c, d et e. Les 15 modalités de l'indice d'agrégation ont donc été codifiées en 1a, 2a, 3a, 1b, ...3e par combinaison des 3 classes de l'indice et des 5 résolutions.

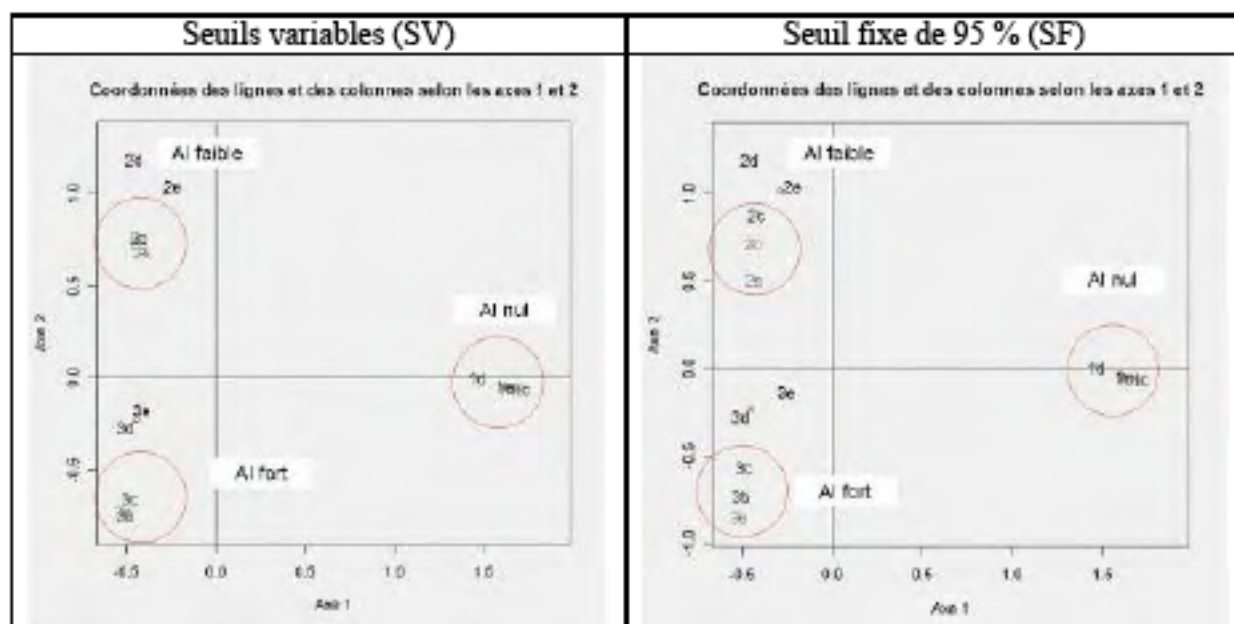


Figure 5-27 Représentation des 15 modalités sur les axes factoriels selon les modalités, SV et SF

Ces graphes permettent de visualiser la position des 15 modalités sur les axes factoriels. On observe ainsi :

- que les trois classes de valeurs de l'indice d'agrégation AI nul correspondant à la classe C0 codé 1, AI faible correspondant à la classe C1 codé 2 et AI fort correspondant à la classe C2 codé 3 sont en opposition, de part et d'autre des axes, dans chacun des deux cas étudiés, seuil variable SV et seuil fixe SF ;
- qu'au sein de chacune de ces trois classes de valeurs de l'indice d'agrégation codées 1, 2 et 3, une grande proximité des trois résolutions 2,5 m codé a, 5 m codé b et 10 m codé c apparaît dans les deux cas étudiés, seuil variable SV et seuil fixe SF. Et ce rapprochement est encore plus fort dans le cas du seuil variable SV ;
- qu'au sein de chacune de ces trois classes de valeurs de l'indice d'agrégation 1, 2 et 3, une proximité des deux résolutions 15 m codé d et 20 m codé e apparaît de façon quasi identique dans les deux cas étudiés, SV et SF.

Seuil variable-SV	AI 2,5-C0	AI 2,5-C1	AI 2,5-C2	AI 5-C0	AI 5-C1	AI 5-C2	AI 10-C0	AI 10-C1	AI 10-C2	AI 15-C0	AI 15-C1	AI 15-C2	AI 20-C0	AI 20-C1	AI 20-C2	
1a	AI 2,5-C0	3235789	0	0	3039221	92321	103522	2819472	191779	223028	2930680	59577	243136	2455732	244329	533562
2a	AI 2,5-C1	0	5952013	0	66733	5190673	692448	159881	4361494	1426156	569426	1725420	3650012	374816	1713829	3854378
3a	AI 2,5-C2	0	0	5382281	64178	582924	4733562	90134	890035	4398674	182499	216230	4977877	141509	294130	4938612
1b	AI 5-C0	3039221	66733	64178	3170760	0	0	2873892	125362	169932	2969352	32840	166260	2512642	200624	454970
2b	AI 5-C1	92321	5190673	582924	0	5868216	0	84524	4640808	1137828	453960	1837476	3570000	271736	1795628	3791554
3b	AI 5-C2	103522	692448	4733562	0	0	5531236	110896	676760	4739810	259984	130896	5134868	186312	256212	5080838
1c	AI 10-C0	2819472	159881	90134	2873892	84524	110896	3070944	0	0	2949876	18312	99994	2582112	143072	343072
2c	AI 10-C1	191779	4361494	890035	125362	4640808	676760	0	5448656	0	378244	1903558	3157572	165560	1859656	3412784
3c	AI 10-C2	223028	1426156	4398674	169932	1137828	4739810	0	0	6050624	352972	79302	5612722	222704	249648	5571224
1d	AI 15-C0	2930680	569426	182499	2969352	453960	259984	2949876	378244	352972	3693564	0	0	2761364	343024	572988
2d	AI 15-C1	59577	1725420	216230	32840	1837476	130896	18312	1903558	79302	0	2001528	0	33120	973088	994724
3d	AI 15-C2	243136	3650012	4977877	166260	3570000	5134868	99994	3157572	5612722	0	0	8873676	174512	936068	7757708
1e	AI 20-C0	2455732	374816	141509	2512642	271736	186312	2582112	165560	222704	2761364	33120	174512	2985792	0	0
2e	AI 20-C1	244329	1713829	294130	200624	1795628	256212	143072	1859656	249648	343024	973088	936068	0	2253056	0
3e	AI 20-C2	533562	3854378	4938612	454970	3791554	5080838	343072	3412784	5571224	572988	994724	7757708	0	0	9332416

Tableau 5-24 Tableau de Burt Répartition du nombre de pixels - Seuils variables

Seuil fixe-SF	AI 2,5-C0	AI 2,5-C1	AI 2,5-C2	AI 5-C0	AI 5-C1	AI 5-C2	AI 10-C0	AI 10-C1	AI 10-C2	AI 15-C0	AI 15-C1	AI 15-C2	AI 20-C0	AI 20-C1	AI 20-C2	
1a	AI 2,5-C0	3235789	0	0	3039221	92321	103522	2819472	191779	223028	2930680	59577	243136	2455732	244329	533562
2a	AI 2,5-C1	0	7179602	0	66855	5605800	1504362	163400	4202366	2808436	601429	1839203	4730423	401543	1843591	4923612
3a	AI 2,5-C2	0	0	4154692	64056	167797	3921648	86615	235564	3829993	150496	102447	3897466	114782	164368	3869378
1b	AI 5-C0	3039221	66855	64056	3170760	0	0	2873892	125362	169932	2969352	32840	166260	2512642	200624	454970
2b	AI 5-C1	92321	5605800	167797	0	5868216	0	84524	4172778	1605858	453960	1837476	3570000	271736	1795628	3791554
3b	AI 5-C2	103522	1504362	3921648	0	0	5531236	110896	331302	5085268	259984	130896	5134868	186312	256212	5080838
1c	AI 10-C0	2819472	163400	86615	2873892	84524	110896	3070944	0	0	2949876	18312	99994	2582112	143072	343072
2c	AI 10-C1	191779	4202366	235564	125362	4172778	331302	0	4633760	0	367514	1831810	2427474	151544	1774544	2699312
3c	AI 10-C2	223028	2808436	3829993	169932	1605858	5085268	0	0	6865520	363702	151050	6342820	236720	334760	6284696
1d	AI 15-C0	2930680	601429	150496	2969352	453960	259984	2949876	367514	363702	3693564	0	0	2761364	343024	572988
2d	AI 15-C1	59577	1839203	102447	32840	1837476	130896	18312	1831810	151050	0	2001528	0	33120	973088	994724
3d	AI 15-C2	243136	4730423	3897466	166260	3570000	5134868	99994	2427474	6342820	0	0	8873676	174512	936068	7757708
1e	AI 20-C0	2455732	401543	114782	2512642	271736	186312	2582112	151544	236720	2761364	33120	174512	2985792	0	0
2e	AI 20-C1	244329	1843591	164368	200624	1795628	256212	143072	1774544	334760	343024	973088	936068	0	2253056	0
3e	AI 20-C2	533562	4923612	3869378	454970	3791554	5080838	343072	2699312	6284696	572988	994724	7757708	0	0	9332416

Tableau 5-25 Tableau de Burt Répartition du nombre de pixels - Seuil fixe

La suite logique d'une analyse statistique utilisant l'Analyse Factorielle des Correspondances Multiples AFCM est la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) qui permet d'établir une classification des variables analysées. Développées par les statisticiens dans les années 70, les méthodes de classification dont la CAH fait partie (Jambu (1978) cité dans Narbaïs-Jaureguy, 2008) s'avèrent très adaptées aux problèmes que se posent les géographes car elles permettent d'aboutir à une cartographie de l'analyse statistique effectuée. En règle générale, la CAH permet de rassembler les individus statistiques en fonction de leur « ressemblance » du point de vue de l'analyse statistique multivariée. Dans le cas de l'AFCM qui a été réalisée à partir d'un tableau de Burt (tableau symétrique dont les informations des lignes sont équivalentes aux informations des colonnes), la CAH permet de classer des variables, et non pas des individus comme cela est généralement le cas.

Réalisée sur les deux tableaux de Burt (Tableau 5-24 et Tableau 5-25), la CAH a permis de regrouper les variables selon leur ressemblance et de constater si les représentations spatiales de l'indice d'agrégation, selon les trois classes de valeurs de l'indice d'agrégation codées 1, 2 et 3 réalisées avec les 5 différentes résolutions codées a, b, c, d et e, se ressemblaient ou pas. Le critère d'agrégation choisi (méthode Ward) a permis de minimiser la variance à l'intérieur d'une même classe pour créer des groupes homogènes les plus différents possibles les uns des autres. La CAH a permis d'obtenir les dendrogrammes de la Figure 5-28 dans chacun des cas étudiés, seuil variable SV et seuil fixe SF.

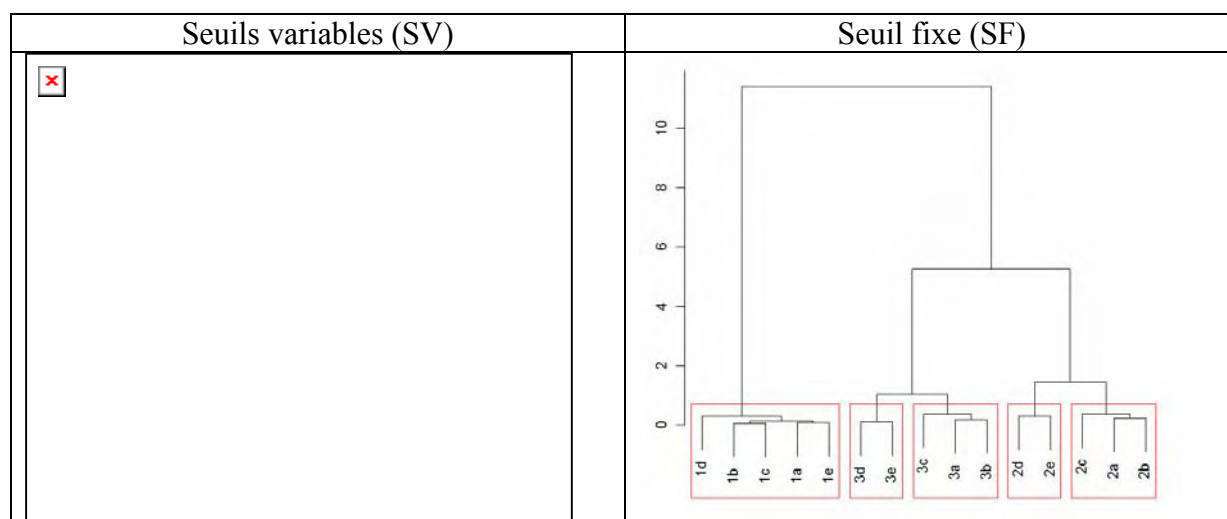


Figure 5-28 Dendrogrammes de la CAH obtenus dans les cas des seuils variable SV et seuil fixe SF

Dans les deux cas, les résultats de la CAH ont fait apparaître cinq mêmes groupes de variables. Le premier groupe a rassemblé les classes de valeurs nulles de l'indice d'agrégation (C0 codé 1) pour les 5 résolutions (codées a à e). Les deuxième et troisième groupes rassemblent les classes de valeurs fortes de l'indice d'agrégation (C2 codé 3) mais en distinguant d'une part les résolutions 15 m et 20 m (codées d et e) et, d'autre part, les résolutions 2,5 m, 5 m et 10 m (codées a, b et c). Les quatrième et cinquième groupes rassemblent les classes de valeurs faibles de l'indice d'agrégation (C1 codé 2) mais en distinguant d'une part les résolutions 2,5 m, 5 m et 10 m (codées a, b, c) et d'autre part 15 m et 20 m (codées d, e). L'axe des ordonnées correspond à un indice de niveau qui permet de mesurer et de représenter l'importance des différences entre les classes formant un nœud. Ainsi la différence entre les classes de valeurs nulles de l'indice d'agrégation (C0 codé 1) et les classes de valeurs non nulles de l'indice d'agrégation (C1 et C2 codés 2 et 3) est forte de l'ordre de 11, celle entre les classes de l'indice d'agrégation, faible (C1 codé 2) et fort (C2

codé 3) est importante également de l'ordre de 5, celle au sein des classes de l'indice d'agrégation faible (C1 codé 2) est de 1,7 entre les deux groupes de résolution et celle au sein des classes de l'indice d'agrégation fort (C2 codé 3) est de 1,5 entre les deux groupes de résolution. On a ainsi une cohérence globale en ce qui concerne les modalités (C0, C1 et C2 codés 1, 2 et 3) de l'indice d'agrégation. En revanche on observe une différence dans le regroupement des résolutions au sein des modalités C1 codé 2 et C2 codé 3. Les résultats de l'indice d'agrégation se ressemblent pour des résolutions de 2,5 m, 5 m et 10 m mais diffèrent nettement de ceux obtenus pour des résolutions de 15 m et 20 m, ce qui confirme les résultats globaux de la Figure 5-26.

La comparaison des cartes de l'indice d'agrégation a permis :

- de considérer que le calcul de l'indice d'agrégation, réalisé avec un rayon de calcul de 20 m à partir d'une carte de végétation de 2,5 m, avec un seuil fixe de 95 % ou un seuil variable pour discriminer les classes de valeurs faibles de l'indice d'agrégation de celles de valeurs fortes, pouvait être réalisé sur des images de résolution inférieures ou égales à 10 m sans qu'il y ait de différences significatives dans la représentation cartographique de l'indice. Ces résolutions sont par ailleurs optimales pour caractériser la structure de la végétation au sein des interfaces habitat-forêt, sachant que l'étude d'un environnement de 20 m autour de la maison est essentielle en termes de prévention du risque d'incendie ;
- de mettre en évidence les fortes différences dans la représentation cartographique de l'indice d'agrégation avec des images de résolutions de 15 m et 20 m. Le calcul de l'indice d'agrégation sur des images de telles résolutions ne peut donc être mis en oeuvre dans les conditions préconisées dans la thèse (notamment rayon de 20 m).
- de montrer que le choix du seuil variable pour discriminer les deux classes d'agrégation, agrégation faible et agrégation forte, donnait des résultats cartographiques légèrement plus stables que lorsque le seuil était fixé à 95 %.

Comparaison de cartes d'indice d'agrégation d'étendues différentes

Les valeurs brutes de l'indice d'agrégation ne varient pas en fonction de la taille de l'image sur laquelle est calculé l'indice d'agrégation (Lampin, 2004a). En revanche pour une résolution d'image donnée, les valeurs seuils discriminant les classes, valeurs faibles et valeurs fortes de l'indice d'agrégation, proposées par la méthode des effectifs égaux ou celle des intervalles géométriques peuvent varier avec l'étendue de l'image. Pour le vérifier, différentes étendues ont été prises en compte sur les cartes des trois résolutions 2,5 m, 5 m et 10 m. Les cartes de résolution de 15 m et 20 m n'ont pas été prises en considération au vu des résultats énoncés dans le paragraphe ci-dessus. Pour chacune des cartes, le seuil a été calculé selon la méthode des effectifs égaux. La zone sélectionnée de 9000 ha couvrant 4 communes a été partitionnée de façon à identifier 3 nouvelles emprises de taille croissante : la première couvrant 1 commune (zone 1), la deuxième couvrant deux communes (zone 2) et la troisième couvrant 4 communes (zone 3). Les valeurs seuils enregistrées ainsi que celles de la zone des 9 000 ha figurent sur le Tableau 5-26.

Valeur du seuil variable défini par la méthode des effectifs égaux	Résolution de l'image		
	2,5 m	5 m	10 m
Zone 1 (1 commune)	93 %	97 %	97 %
Zone 2 (2 communes)	93 %	96 %	97 %
Zone 3 (3 communes)	92 %	96 %	97 %
Zone des 9 000 ha	92 %	95 %	97 %

Tableau 5-26 Valeurs seuils discriminant les classes d'agrégation faible et forte - Zones d'étendue différente

On constate que pour une même résolution, le seuil proposé varie.

La méthode de caractérisation de la structure de la végétation doit pouvoir être généralisable, car elle constitue un des deux piliers de la caractérisation des interfaces habitat-forêt avec celui de la caractérisation de l'habitat étudiée dans le paragraphe 5.1. Pour cela, les paramètres de calcul doivent être fixés de façon précise, notamment le seuil pour discriminer la classe des valeurs d'agrégation faible et celle des valeurs d'agrégation forte. La valeur proposée est de 95 %, intermédiaire entre 92 % obtenu pour la résolution de 2,5 m et 97 % obtenu pour la résolution de 10 m sachant que les cartes de végétation devront avoir une résolution maximale de 10 m (correspondant à une fenêtre glissante de calcul de 50 m de côté) pour un rayon de calcul de l'indice d'agrégation fixé à 20 m. La représentation cartographique des trois classes de l'indice d'agrégation, avec les seuils de 0 % et 95 %, permet de traduire de façon satisfaisante la structure horizontale de la végétation.

En conclusion les paramètres de calcul de l'indice d'agrégation pour une représentation spatiale pertinente de la structure de la végétation sont les suivants :

- utilisation de carte de végétation d'une résolution au plus égale à 10 m
- un rayon de calcul de 20 m
- des valeurs brutes de l'indice d'agrégation répartis en trois classes :
 - Valeurs de l'indice d'agrégation = 0 : Agrégation nulle de la végétation ;
 - $0 < \text{Valeurs de l'indice d'agrégation} \leq 95 \%$: Agrégation faible de la végétation ;
 - $95 \% < \text{Valeurs de l'indice d'agrégation}$: Agrégation forte de la végétation.

5.2.4. *Artefact de calcul de l'indice d'agrégation*

Le résultat cartographique des classes de l'indice d'agrégation a mis en évidence les zones d'agrégation nulle, faible et forte de la végétation. Les caractéristiques et le mode de calcul de l'indice d'agrégation sur la végétation conduit à émettre l'hypothèse suivante, quant à la nature de l'occupation du sol en fonction de ces valeurs. Les valeurs nulles de l'indice correspondent à des zones où la végétation est absente (elle se trouve à une vingtaine de mètres, taille du rayon de calcul). Les valeurs supérieures à 95 % de l'indice (agrégation forte) pour les résolutions de 2,5 m, 5 m et 10 m, correspondent à des zones où la végétation est présente à 100 %. Enfin les valeurs non nulles inférieures ou égales à 95 % de l'indice (agrégation faible) correspondent à des zones ouvertes (végétation au contact de routes, de bâtis, agriculture...).

Pour confirmer cette hypothèse, les valeurs de l'indice d'agrégation réparties par classes, codées de 1 à 3 ont été croisées avec les valeurs de présence-absence de la végétation, codées 10 et 20, issues de la carte de végétation dans chaque résolution 2,5 m, 5 m et 10 m. Les valeurs résultantes sont codées de 11 à 23 dont la signification est précisée dans le Tableau 5-27.

Résolutions de 2,5 m, 5 m, 10 m	Présence-absence de végétation	Codes issus du croisement	Signification
Code 1 : AI = 0 %	Code 10 : non	11	Pas de végétation et AI=0
		12	Pas de végétation et AI faible
		13	Pas de végétation et AI fort
Code 2 : $0 < AI \leq 95$ %	Code 20 : oui	21	Végétation et AI=0
		22	Végétation et AI faible
Code 3 : $95 \% < AI$		23	Végétation et AI fort

Tableau 5-27 Principe de codification

Ainsi la répartition des surfaces codifiées pour chaque résolution a été représentée sur les graphes de la Figure 5-29.

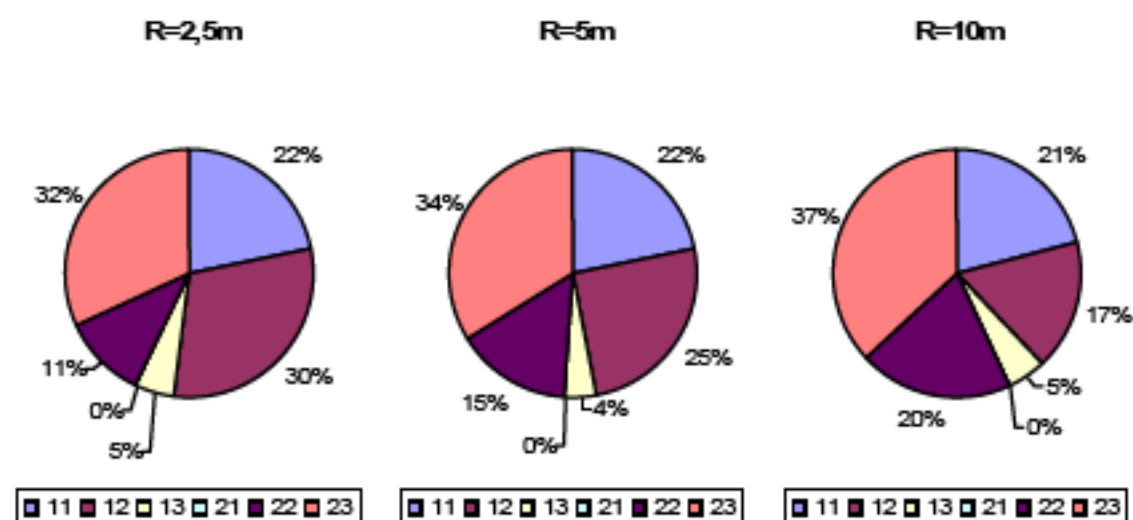


Figure 5-29 Répartition des surfaces selon le croisement codifié dans le Tableau 5-27 selon les résolutions

Cette répartition en surface varie peu avec le changement de résolution. La répartition moyenne sur les trois résolutions étudiées est illustrée dans le Tableau 5-28.

Représentativité en surface (en moyenne sur les 3 résolutions)	AI=0	AI faible	AI fort
Végétation : NON	Code 11 : 22 %	Code 12 : 24 %	Code 13 : 4 %
Végétation : OUI	Code 21 : 0 %	Code 22 : 15 %	Code 23 : 34 %

Tableau 5-28 Représentativité en surface de l'indice d'agrégation

Les zones où l'indice d'agrégation AI a une valeur nulle sont telles que la végétation est totalement absente (code 11). Dans les zones de végétation, l'indice d'agrégation ne prend jamais une valeur nulle (code 21).

A l'opposé les zones où l'indice d'agrégation est fort sont telles que la végétation est toujours présente (code 23). On observe cependant une valeur aberrante, qui représente 4 % de la surface concernée, où l'indice d'agrégation est fort alors que la végétation est absente (code 13). Ceci correspond :

- ☞ D'une part à des pixels isolés de non végétation, pixels disséminés et noyés au milieu de pixels de végétation, qui se retrouvent affectés d'une valeur forte d'indice traduisant le contexte des pixels au sein d'une fenêtre de 42,5 à 50 m de côté. Cela aurait pu ne pas apparaître si au préalable un lissage avait été réalisé sur la

classification supervisée ayant eu pour effet de supprimer les pixels isolés et disséminés (1,5 à 2 % de la surface) ;

- D'autre part à un effet de bord, en limite de zone, des valeurs fortes de l'indice d'agrégation (artéfact du calcul avec une fenêtre glissante et une valeur ramenée au pixel central).

Enfin les zones où l'indice d'agrégation est faible, correspondent à des zones où le milieu est plus ouvert, la végétation est mélangée à des zones sans végétation. Elles constituent généralement des zones tampons entre une zone à indice fort d'agrégation et une zone à indice nul d'agrégation de l'ordre d'une vingtaine de mètres d'épaisseur correspondant à la taille du rayon de calcul déterminant la fenêtre glissante (Figure 5-30).

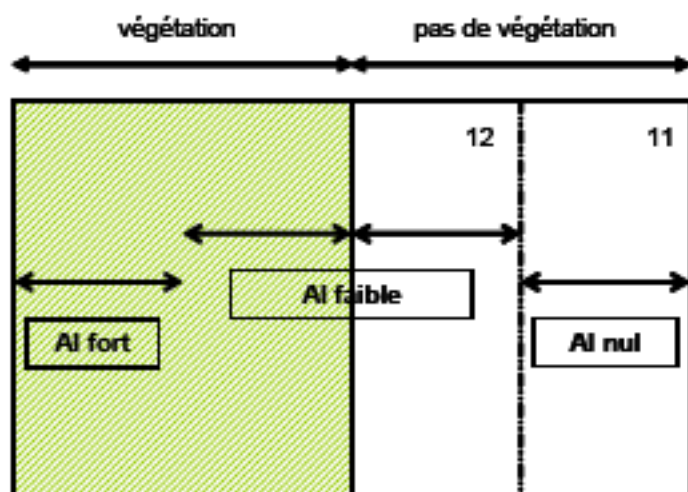
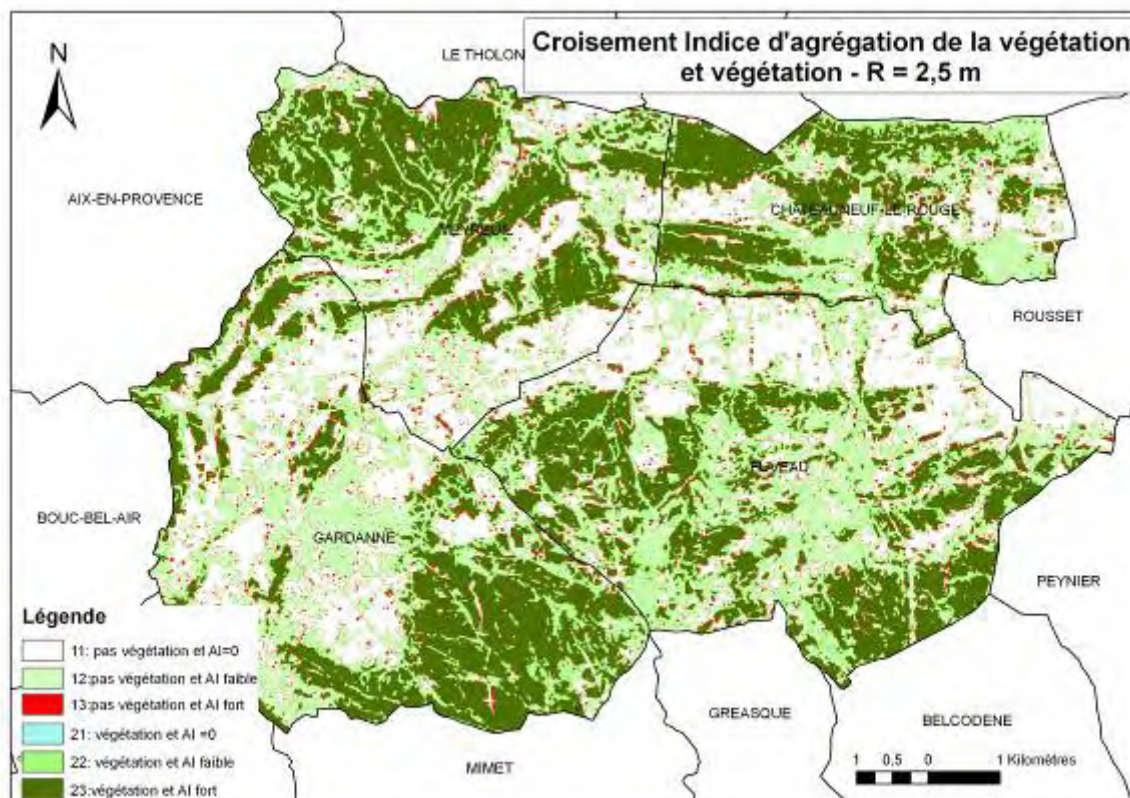
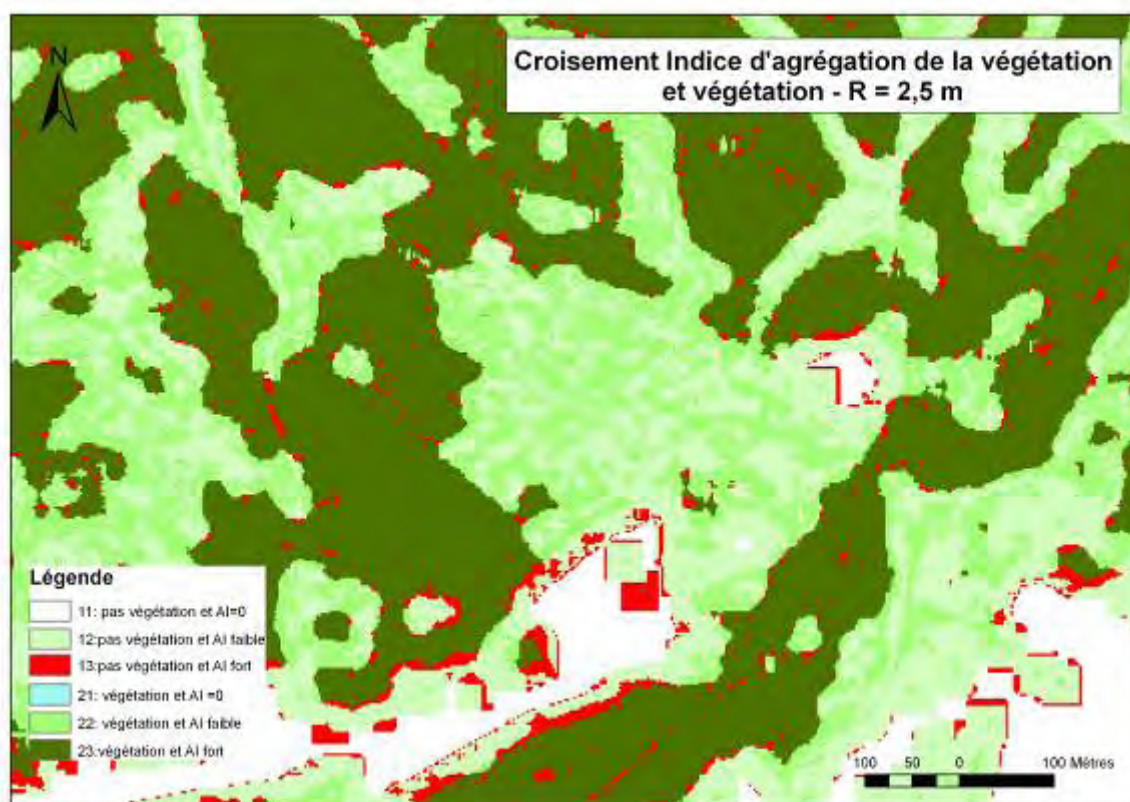


Figure 5-30 Correspondance codification AI-végétation avec nature d'AI et présence de végétation

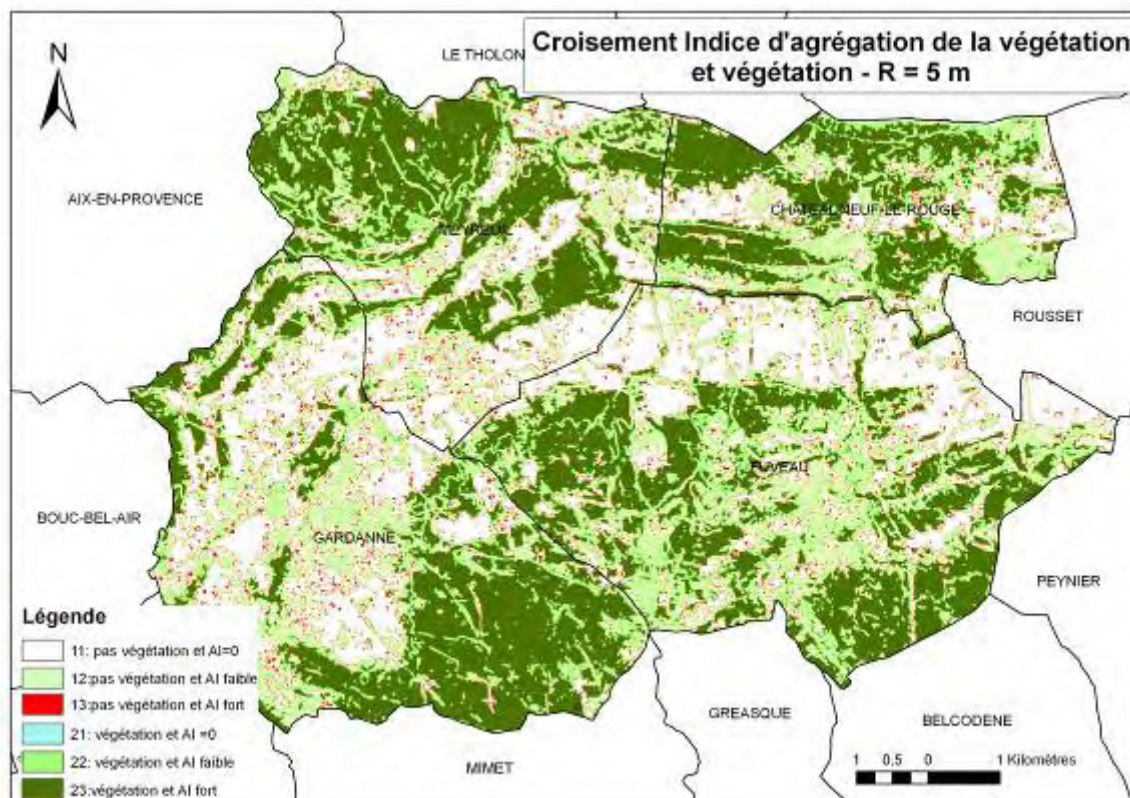
La représentation cartographique de ces croisements est illustrée sur les Cartes 5-11 à 5-16 ainsi que l'effet du passage d'un filtre majoritaire visant à supprimer les pixels isolés pour chacune des trois résolutions étudiées.



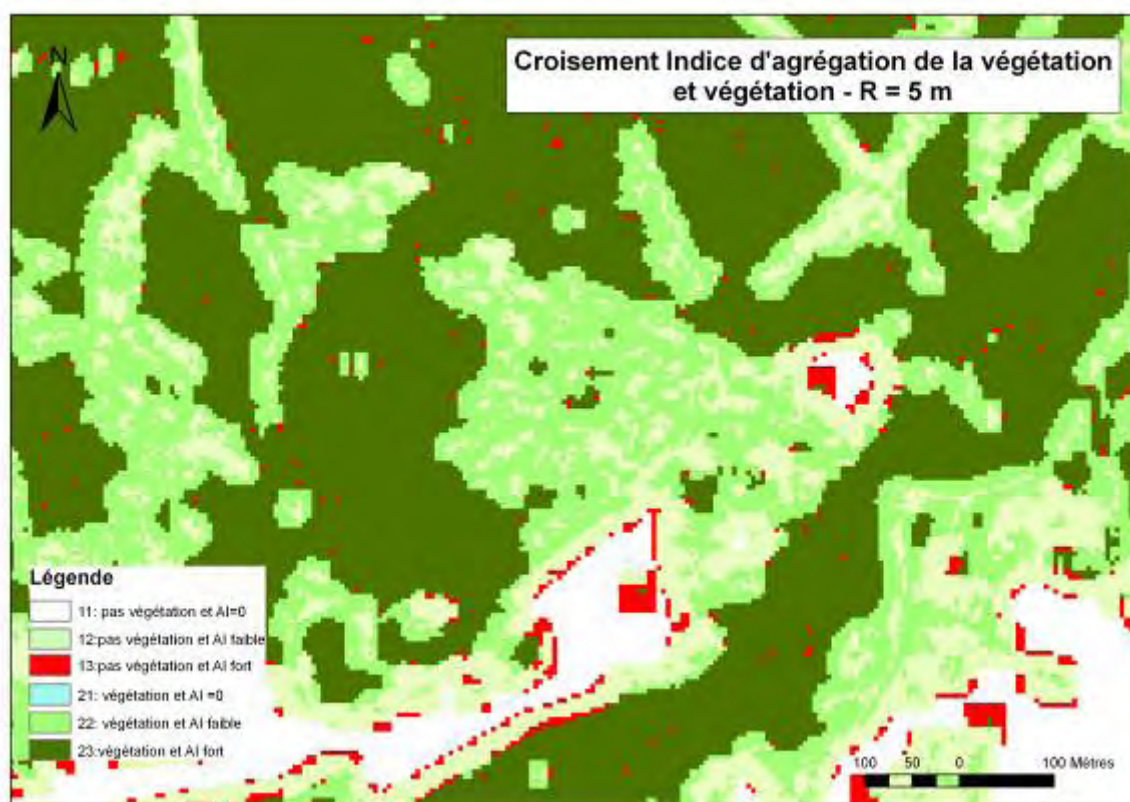
Carte 5-11 Représentation cartographique des croisements AI-végétation- Résolution de 2,5 m



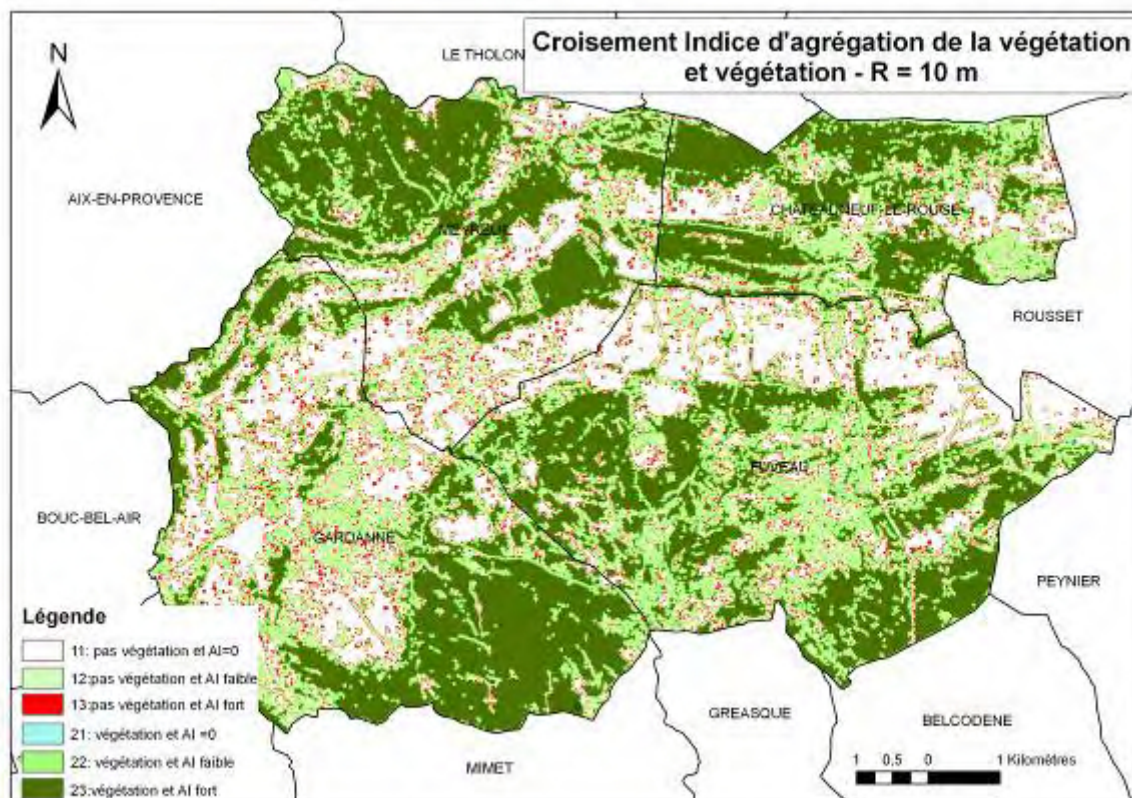
Carte 5-12 Représentation cartographique des croisements AI-végétation- Résolution de 2,5 m - Zoom



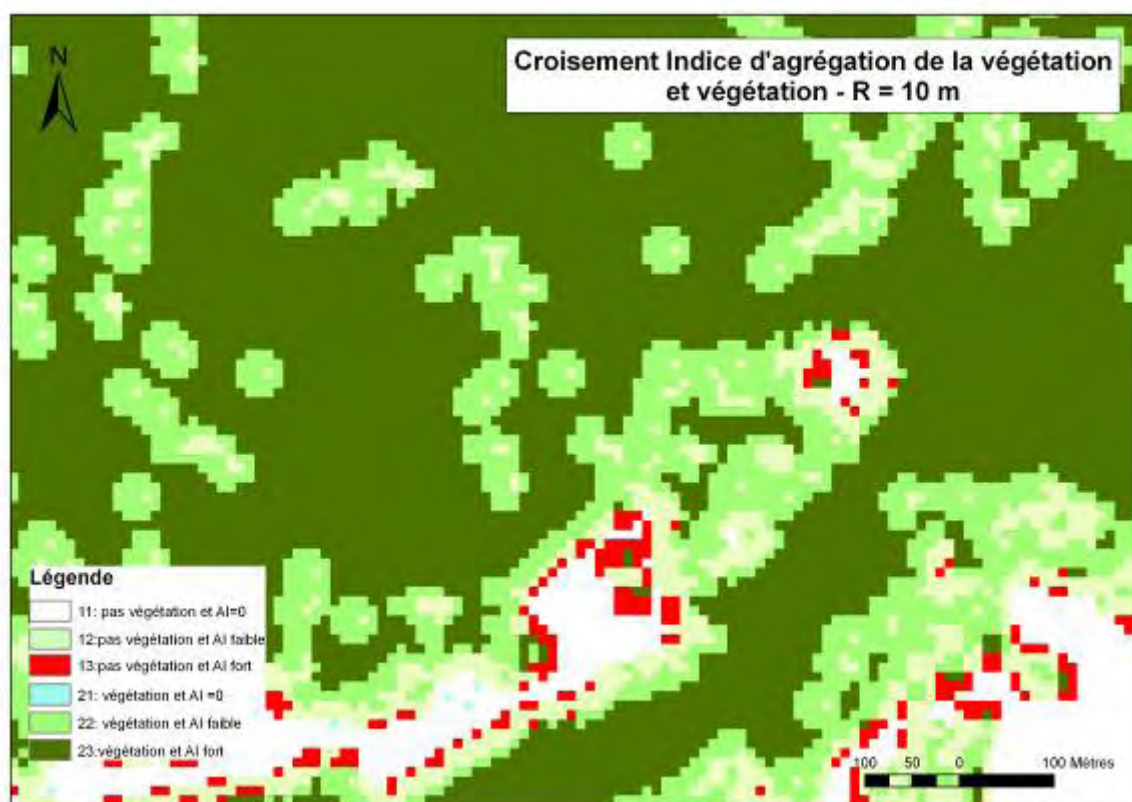
Carte 5-13 Représentation cartographique des croisements AI-végétation- Résolution de 5 m



Carte 5-14 Représentation cartographique des croisements AI-végétation - Résolution de 5 m - Zoom



Carte 5-15 Représentation cartographique des croisements AI-végétation - Résolution de 10 m



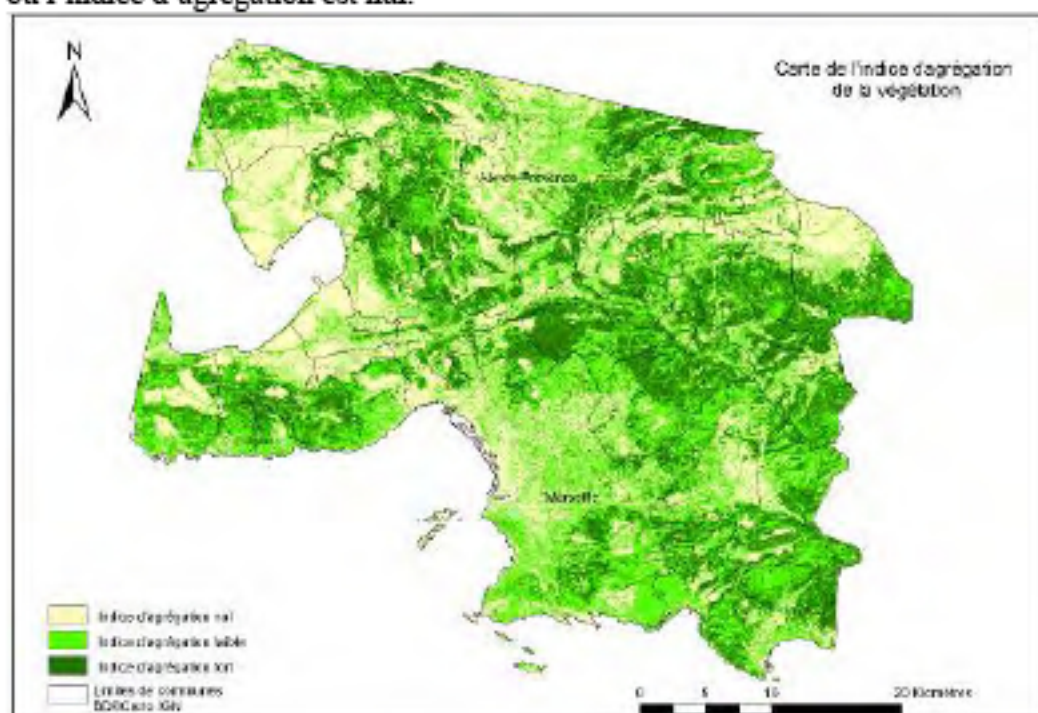
Carte 5-16 Représentation cartographique des croisements AI-végétation - Résolution de 10 m - Zoom

5.2.5. Carte de l'indice d'agrégation élaborée sur la zone d'étude MAM entre les métropoles Aix et Marseille

La carte de l'indice d'agrégation (Carte 5-17) a été réalisée sur la zone d'étude située entre les Métropoles Aix-Marseille MAM à partir de la carte de végétation réalisée avec une classification supervisée de l'image satellite Spot 5 à 2,5 m de résolution. L'indice d'agrégation a été calculé avec une fenêtre glissante d'un rayon de calcul de 20 m. Les valeurs de l'indice ont été réparties en trois classes :

- $0 < \text{Valeurs de l'indice d'agrégation} \leq 95 \%$: Agrégation faible de la végétation
- $95 \% < \text{Valeurs de l'indice d'agrégation}$: Agrégation forte de la végétation
- Valeurs de l'indice d'agrégation = 0 : Agrégation nulle de la végétation.

La structure de la végétation apparaît comme continue là où l'indice d'agrégation est fort, comme discontinue, éparse là où l'indice d'agrégation est faible. La végétation est absente là où l'indice d'agrégation est nul.



Carte 5-17 Carte de l'indice d'agrégation sur la zone MAM

La répartition des classes de l'indice est illustrée par la Figure 5-31, elle est en cohérence avec la caractérisation de la zone d'étude développée dans le paragraphe 3.1.1.b. Les zones de végétation continue (AI fort) et éparse (AI faible) représentent 65 % de la zone MAM, elles sont à comparer aux 60 % de végétation caractérisant cette zone d'étude auquel s'ajoute la part des espaces de végétation des zones urbaines. Les 35 % de zones d'indice d'agrégation nulle correspondent aux espaces agricoles et en partie aux espaces urbains (hors végétation).

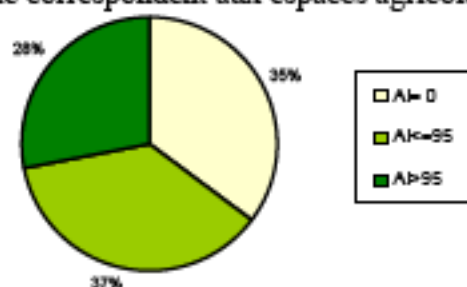


Figure 5-31 Répartition des classes de l'indice d'agrégation - Zone d'étude MAM

Chapitre 6. Les types d'interfaces habitat-forêt et leur représentation cartographique

Le choix d'élaborer une typologie pour caractériser les interfaces habitat-forêt s'est traduit par la combinaison des quatre types de structure d'habitat (habitat isolé, diffus, groupé dense et groupé très dense) et des trois types de structure de végétation (agrégation nulle, faible et forte) définis dans le Chapitre 5.

6.1 Les différents types d'interfaces habitat-forêt

La combinaison des quatre types de structure d'habitat et des trois types de structure de végétation conduit à 12 types d'interfaces illustrés à travers la clé photographique de la Figure 6-1.

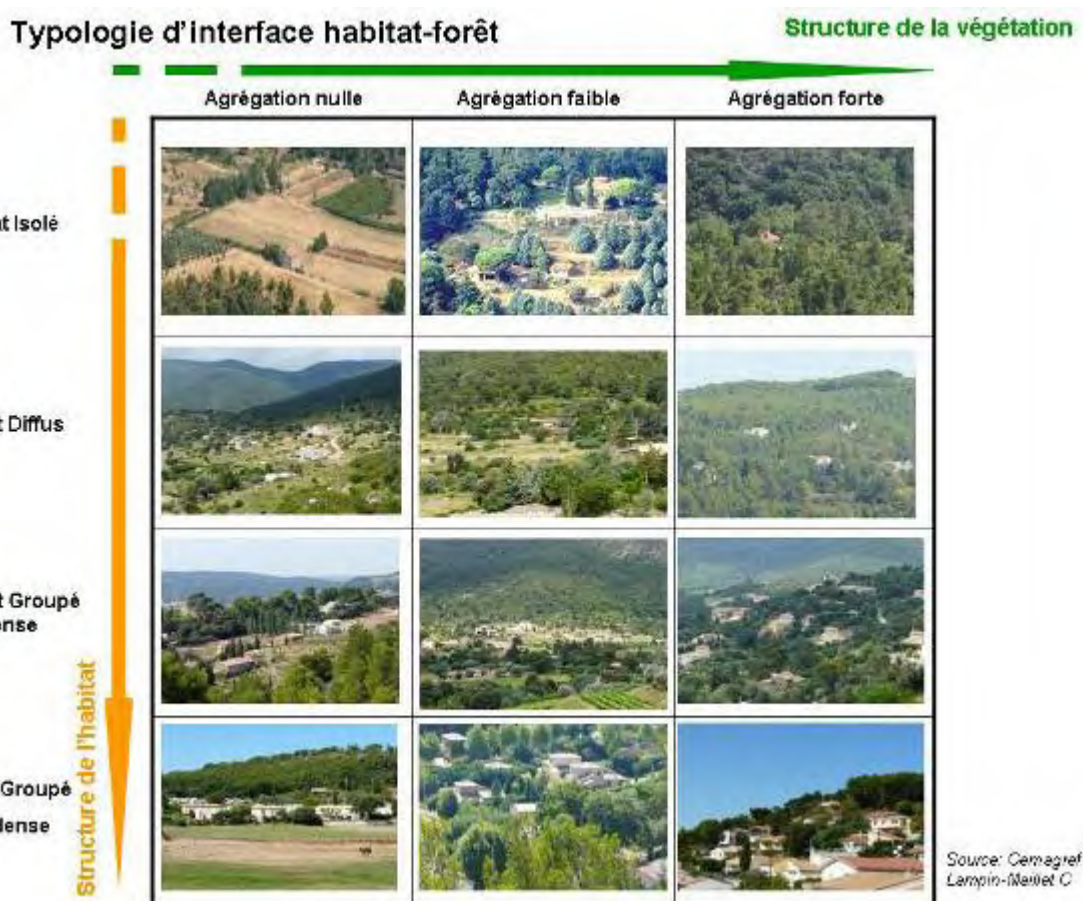


Figure 6-1 Typologie d'interfaces habitat-forêt

Les 12 types d'interfaces habitat-forêt sont énumérés dans le Tableau 6-1.

Type 1	Habitat isolé & agrégation nulle	Habitat isolé au contact de zones agricoles, urbains sans végétation
Type 2	Habitat isolé & agrégation faible	Habitat isolé au contact de végétation peu agrégée, discontinue, éparse
Type 3	Habitat isolé & agrégation forte	Habitat isolé au contact de végétation très agrégée, continue, compacte
Type 4	Habitat diffus & agrégation nulle	Habitat diffus au contact de zones agricoles, urbains sans végétation
Type 5	Habitat diffus & agrégation faible	Habitat diffus au contact de végétation peu agrégée, discontinue, éparse
Type 6	Habitat diffus & agrégation forte	Habitat diffus au contact de végétation très agrégée, continue, compacte
Type 7	Habitat groupé dense & agrégation nulle	Habitat groupé dense au contact de zones agricoles, urbains sans végétation
Type 8	Habitat groupé dense & agrégation faible	Habitat groupé dense au contact de végétation peu agrégée, discontinue, éparse
Type 9	Habitat groupé dense & agrégation forte	Habitat groupé dense au contact de végétation très agrégée, continue, compacte
Type 10	Habitat groupé très dense & agrégation nulle	Habitat groupé très dense au contact de zones agricoles, urbains sans végétation
Type 11	Habitat groupé très dense & agrégation faible	Habitat groupé très dense au contact de végétation peu agrégée, discontinue, éparse
Type 12	Habitat groupé très dense & agrégation forte	Habitat groupé très dense au contact de végétation très agrégée, continue, compacte

Tableau 6-1 Types d'interfaces habitat-forêt

6.2 La méthode de cartographie des interfaces habitat-forêt

La méthode de cartographie des interfaces habitat-forêt a été développée sous le logiciel ArcGIS©9.2.

6.2.1. Procédure mise en œuvre

a. Cartographie de la structure de la végétation

La procédure de cartographie de la structure de la végétation est réalisée en plusieurs étapes. A partir d'une carte d'occupation du sol est extraite une carte différenciant les zones de végétation des zones ne présentant pas de végétation. En utilisant le logiciel FRAGSTATS©3.3, le calcul de l'indice d'agrégation des zones de végétation est développé selon la procédure détaillée en Annexe D. Puis la carte brute de l'indice d'agrégation est seuillée en trois classes de valeurs : valeurs nulles, valeurs faibles et valeurs fortes d'indice d'agrégation en utilisant ArcGIS©9.2. La carte des trois classes de l'indice d'agrégation est alors recodée pour les traitements ultérieurs de combinaison de critères.

La Figure 6-2 rappelle les grandes étapes du traitement.

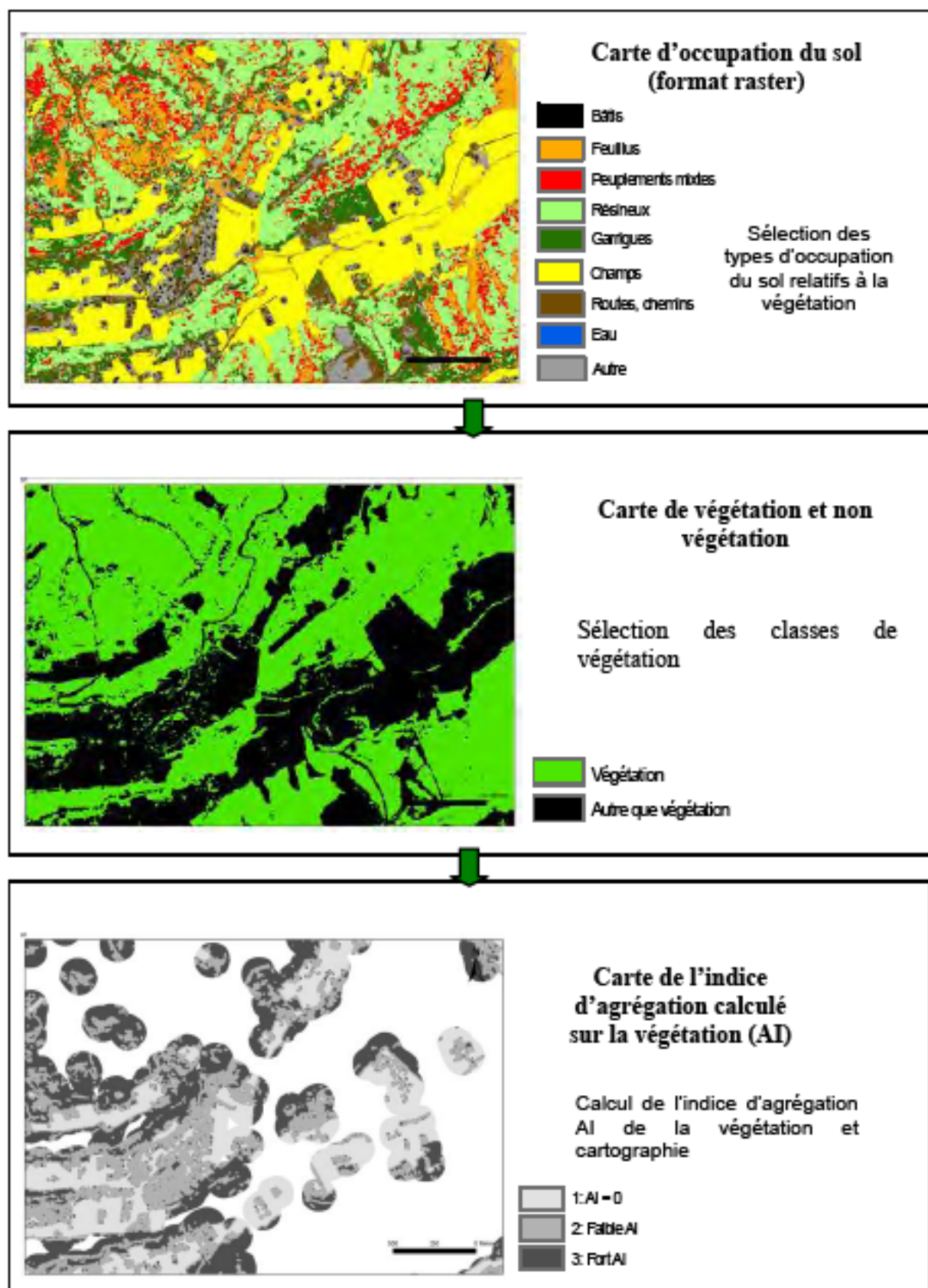


Figure 6-2 Etapes de cartographie de la structure de la végétation pour les interfaces habitat-forêt

b. Cartographie de la structure de l'habitat

La procédure de cartographie de la structure de l'habitat a été mise au point en utilisant le logiciel ArcGIS©9.2 et a été automatisée en partie avec l'outil Modèle builder. La procédure de calcul est détaillée en Annexe B. La carte des quatre types d'habitat (isolé, diffus, groupé dense et groupé très dense) est élaborée selon cette procédure, puis recodée pour les traitements ultérieurs de combinaison de critères. La Figure 6-3 rappelle les grandes étapes du traitement.

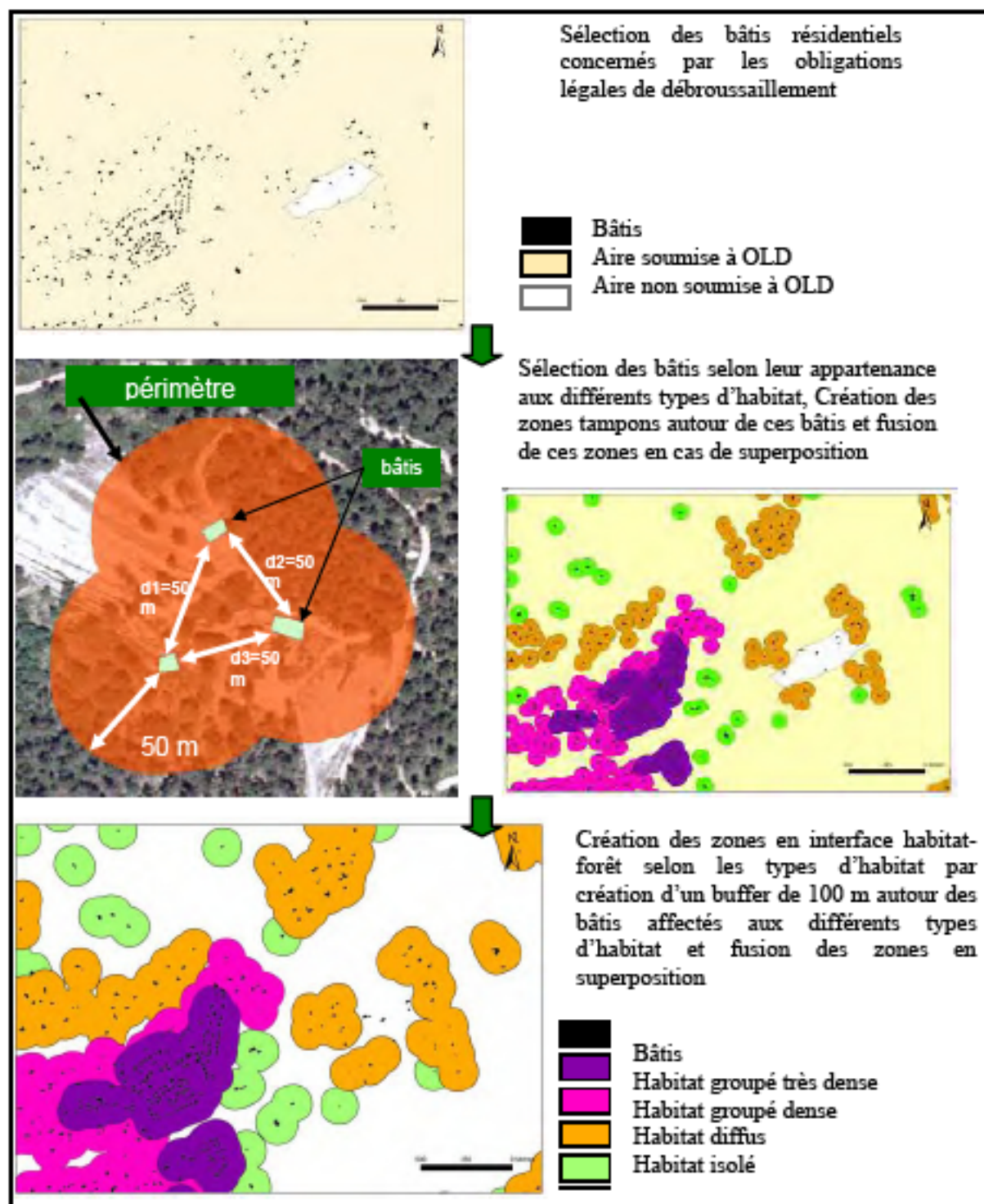


Figure 6-3 Étapes de cartographie de l'habitat pour les interfaces habitat-forêt

c. Combinaison des cartes de structures de végétation et de bâtis

La procédure de combinaison des deux critères, structure de l'habitat et structure de la végétation, a été mise au point en utilisant le logiciel ArcGIS©9.2 et automatisée en partie avec l'outil Modèle builder. Elle repose sur une addition des deux cartes au format raster, recodées de façon à identifier facilement le résultat de l'addition. La procédure figure en Annexe B. La Figure 6-4 rappelle les grandes étapes du traitement.

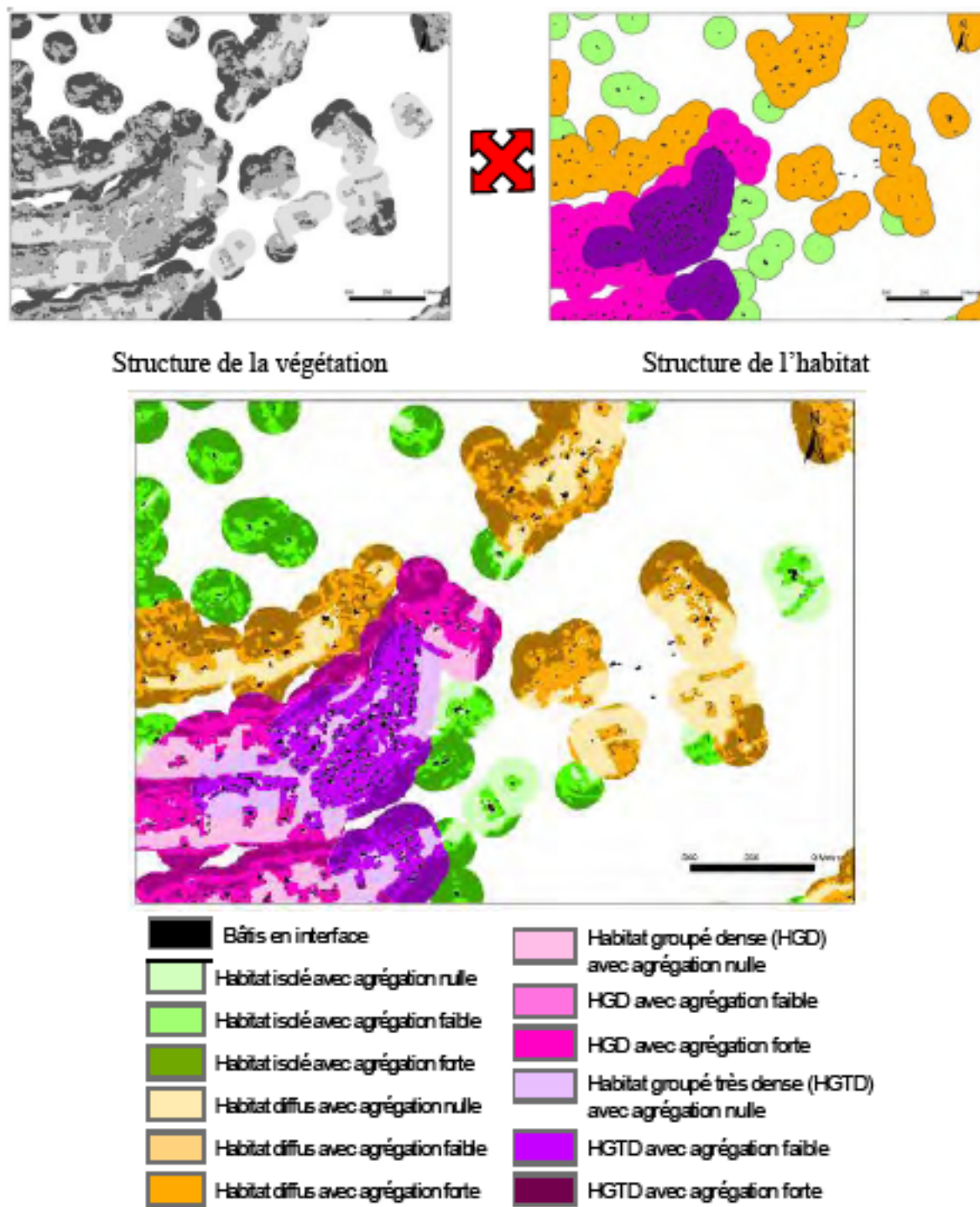


Figure 6-4 Étapes de cartographie des interfaces habitat-forêt par combinaison de critères habitat et végétation

6.2.2. Automatisation de la procédure

A partir de la procédure détaillée, développée en Annexe B et compte tenu de l'évolution récente du logiciel ArcGIS® dans sa version 9.3, une automatisation des calculs avec l'approche modèle Builder et le langage Python, est en cours de développement au sein du laboratoire (Annexe E).

6.3 Application sur les deux zones test

La méthode de cartographie des interfaces habitat-forêt a été mise en œuvre sur les deux zones d'étude AIX et VAR située respectivement dans les Bouches-du-Rhône et dans le Var.

6.3.1. Résultats cartographiques sur la zone d'étude AIX

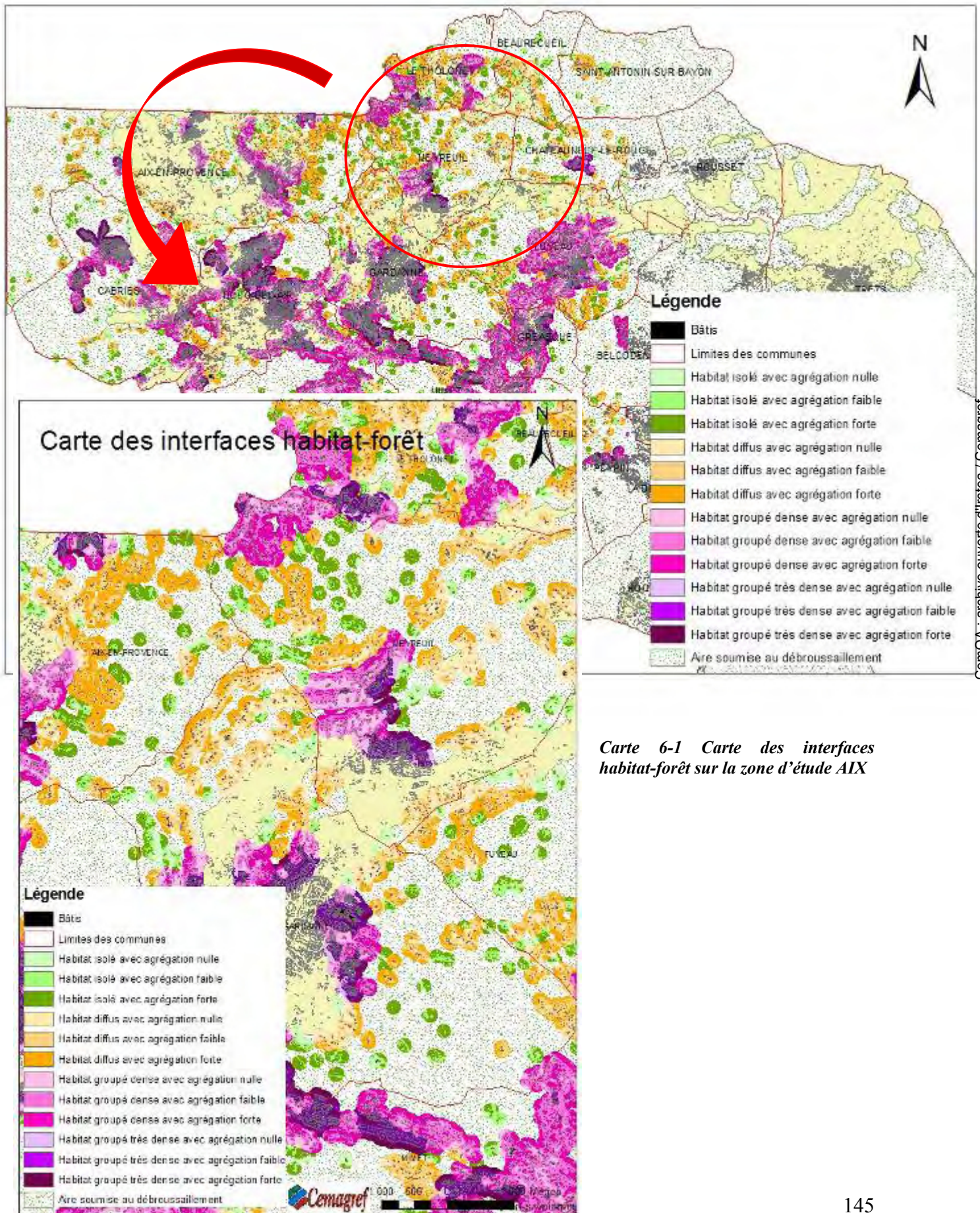
La surface concernée par l'obligation légale de débroussaillage représente 86 % de la zone d'étude AIX et 74 % des bâtis résidentiels qui sont situés dans AIX sont en zone d'interface habitat-forêt. La carte des interfaces habitat-forêt élaborée permet de quantifier l'importance de l'étendue des interfaces sur le territoire étudié. La surface délimitée par les interfaces représente 32 % de la zone d'étude (20 950 ha). En surface, ces interfaces se répartissent selon la nature de l'habitat entre interface à habitat isolé (16 %), diffus (29 %) et groupé (55 %). La carte des interfaces habitat-forêt est ainsi produite (Carte 6-1) sur l'ensemble de la zone d'étude.

6.3.2. Résultats cartographiques sur la zone d'étude VAR

La surface concernée par l'obligation légale de débroussaillage représente 93 % de la zone d'étude VAR et 78 % des bâtis résidentiels qui sont situés dans VAR sont en zone d'interface habitat-forêt. La carte des interfaces habitat-forêt élaborée permet de quantifier l'importance de l'étendue des interfaces sur le territoire étudié. La surface délimitée par les interfaces représente 19 % de la zone d'étude (14 196 ha). En surface, ces interfaces se répartissent selon la nature de l'habitat entre interface à habitat isolé (31 %), diffus (26 %) et groupé (43 %). La carte des interfaces habitat-forêt est ainsi produite (Carte 6-2) sur l'ensemble de la zone d'étude.

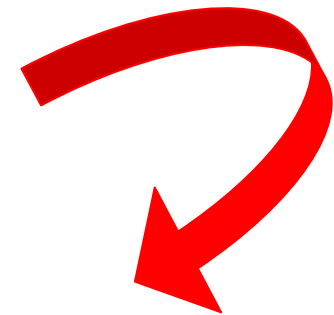
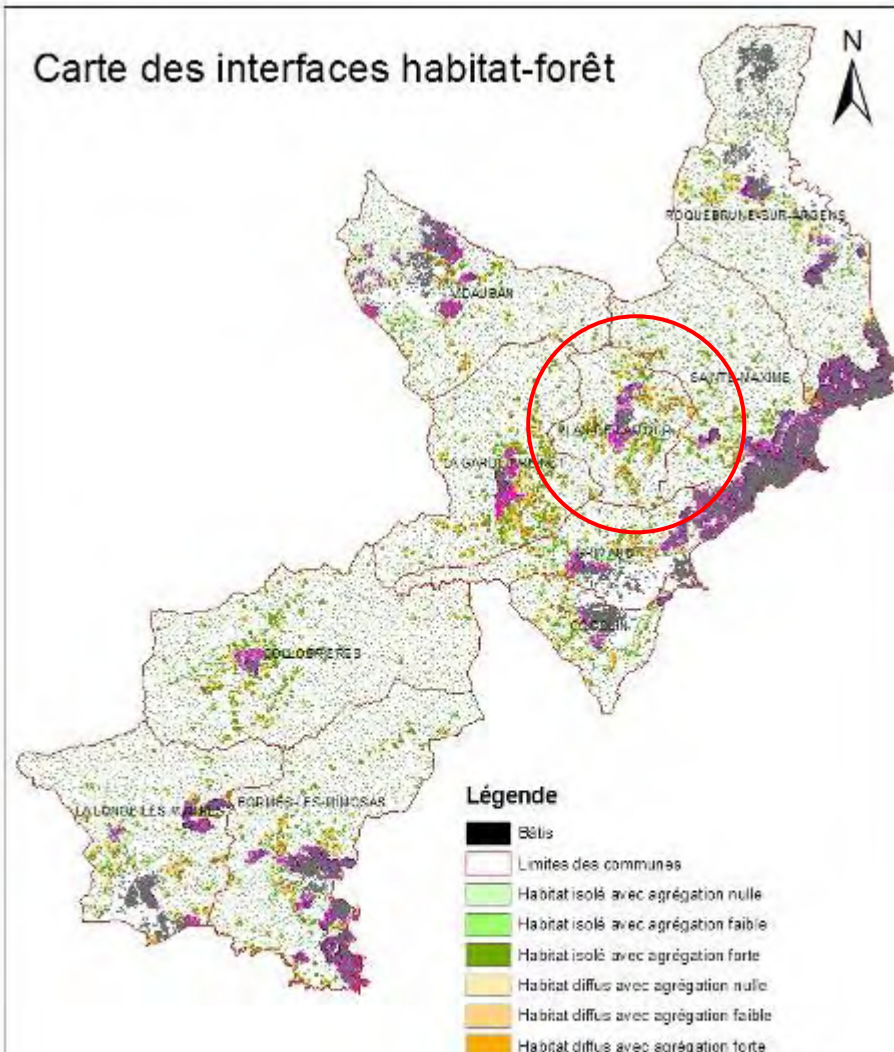
6.3.3. Comparaison des résultats

Sur la zone AIX, les interfaces habitat-forêt occupent 38 % de la zone soumise à obligation légale de débroussaillage (OLD) alors que, sur la zone VAR, ce pourcentage est presque deux fois moins important avec 20 %. De façon cohérente, ce rapport est le même que celui observé sur l'emprise de l'habitat développé dans le paragraphe 5.1.4. La zone d'étude AIX, plus urbanisée que la zone VAR, fait ainsi apparaître que les interfaces en habitat isolé sont deux fois moins représentées sur la zone AIX que sur la zone VAR et, au contraire, que les interfaces en habitat groupé sont 1,3 fois plus représenté. Les interfaces en habitat diffus sont représentées de façon analogue dans les deux zones d'étude. Sur la zone AIX comme sur la zone VAR, la surface soumise au débroussaillage obligatoire (OLD) représente 60 % des surfaces d'interfaces habitat-forêt (12 682 ha sur AIX et 8 465 ha sur VAR). En moyenne, l'emprise d'une interface habitat-forêt est de 0,6 ha sur les deux zones AIX et VAR.

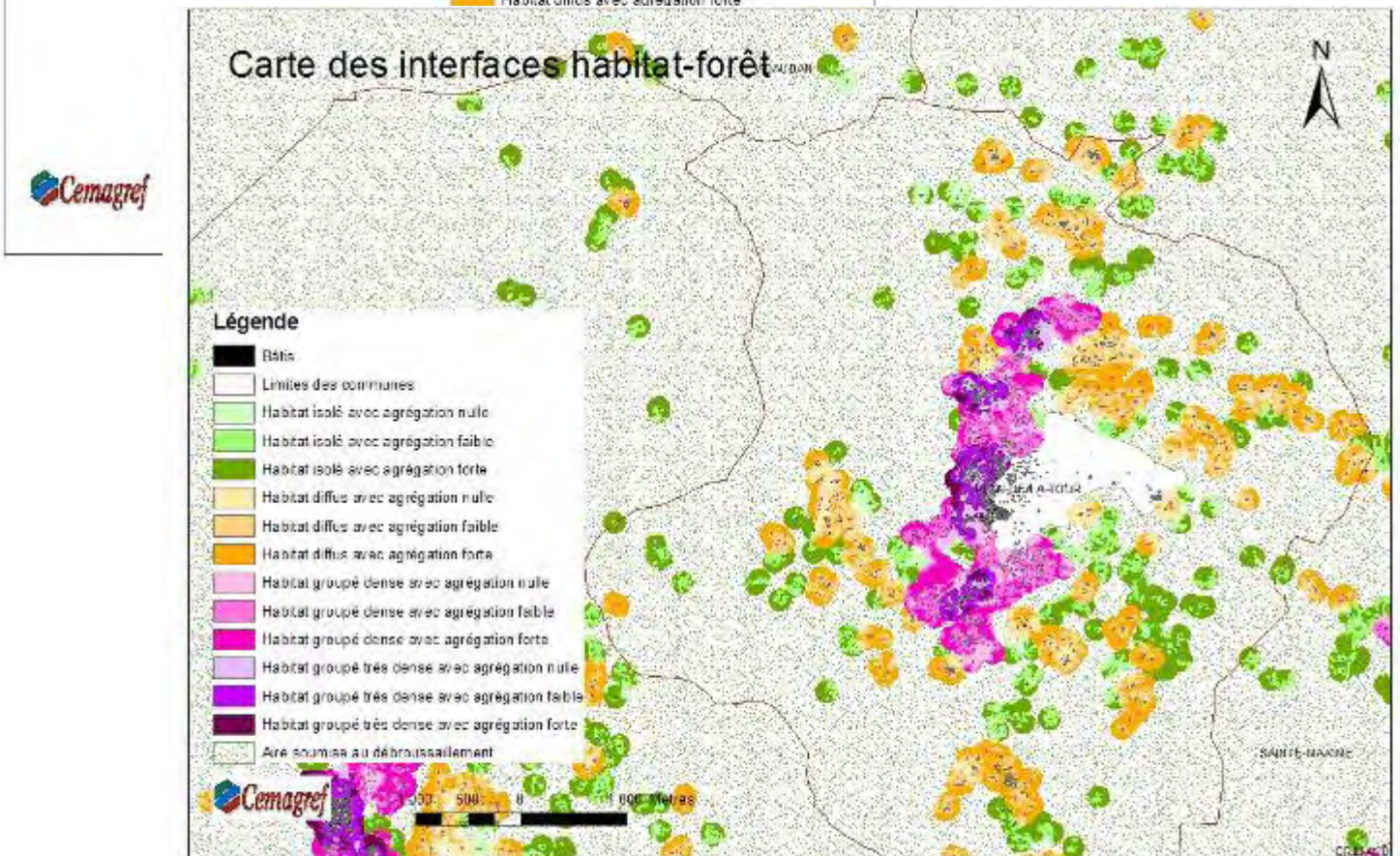


CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Carte 6-1 Carte des interfaces habitat-forêt sur la zone d'étude AIX



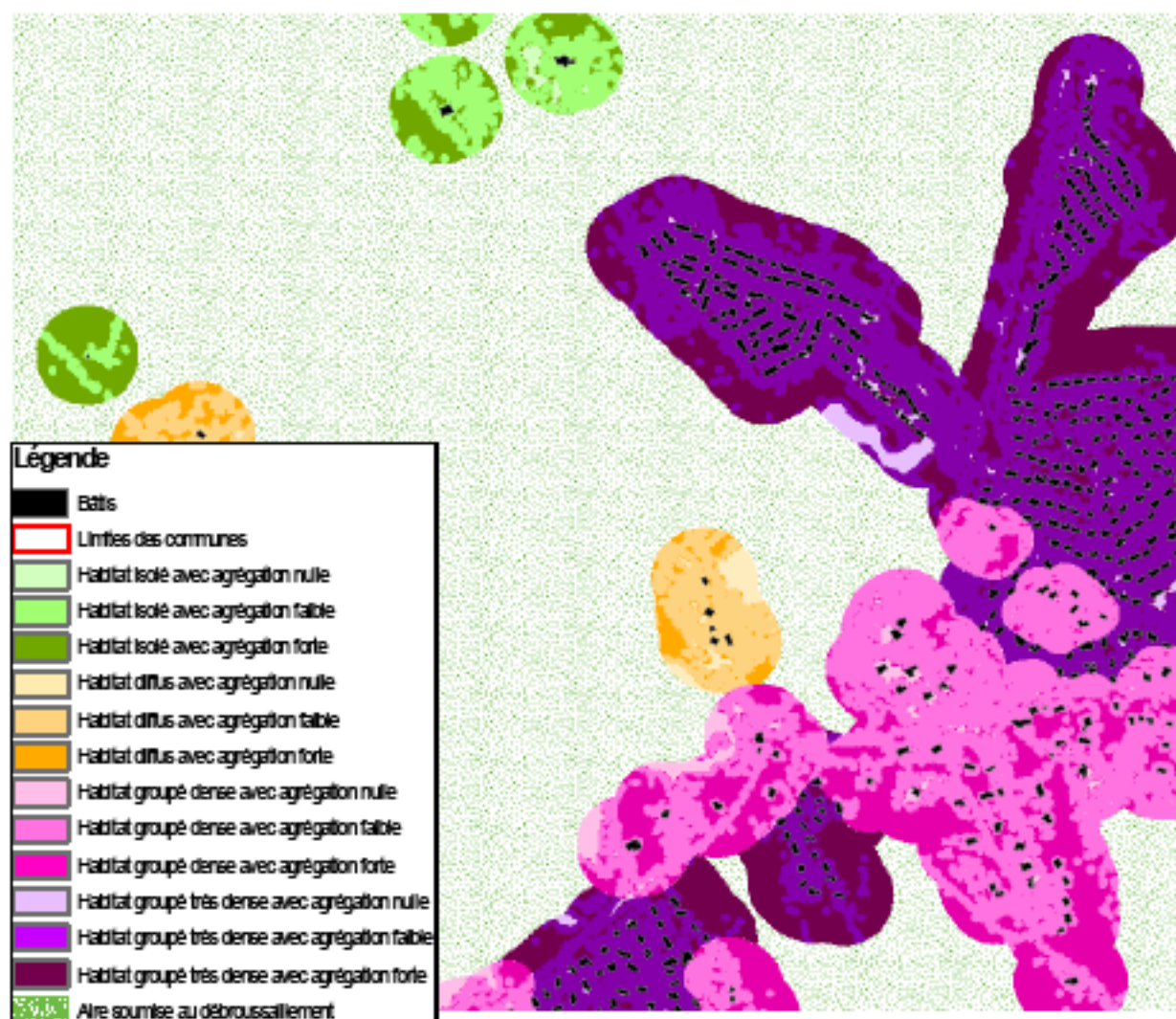
Carte 6-2 Carte des interfaces habitat-forêt sur la zone d'étude VAR



6.4 Validation des résultats et généralisation de la méthode

6.4.1. Résultats cartographiques et confrontation terrain

Les illustrations de la Figure 6-5 (zoom sur la Carte 6-3) à la Figure 6-7 permettent de comparer le résultat cartographique avec la réalité du terrain vue à travers des vues aériennes ou des photos issues de sorties de terrain.



Carte 6-3 Cartographie des interfaces habitat-forêt

D'une part les résultats de cartographie des interfaces habitat-forêt, obtenus sur les deux zones d'étude AIX et VAR, ont été confrontés à la réalité du terrain à travers des comparaisons avec des vues aériennes mais aussi des sorties de terrain.

D'autre part, en 2008 la méthode de caractérisation et de cartographie des interfaces habitat-forêt a été portée à la connaissance des services de l'Etat susceptibles de la mettre en œuvre (DDAE, DREAL...). Elle a été appliquée par certains d'entre eux à des fins opérationnelles et grandeur réelle.

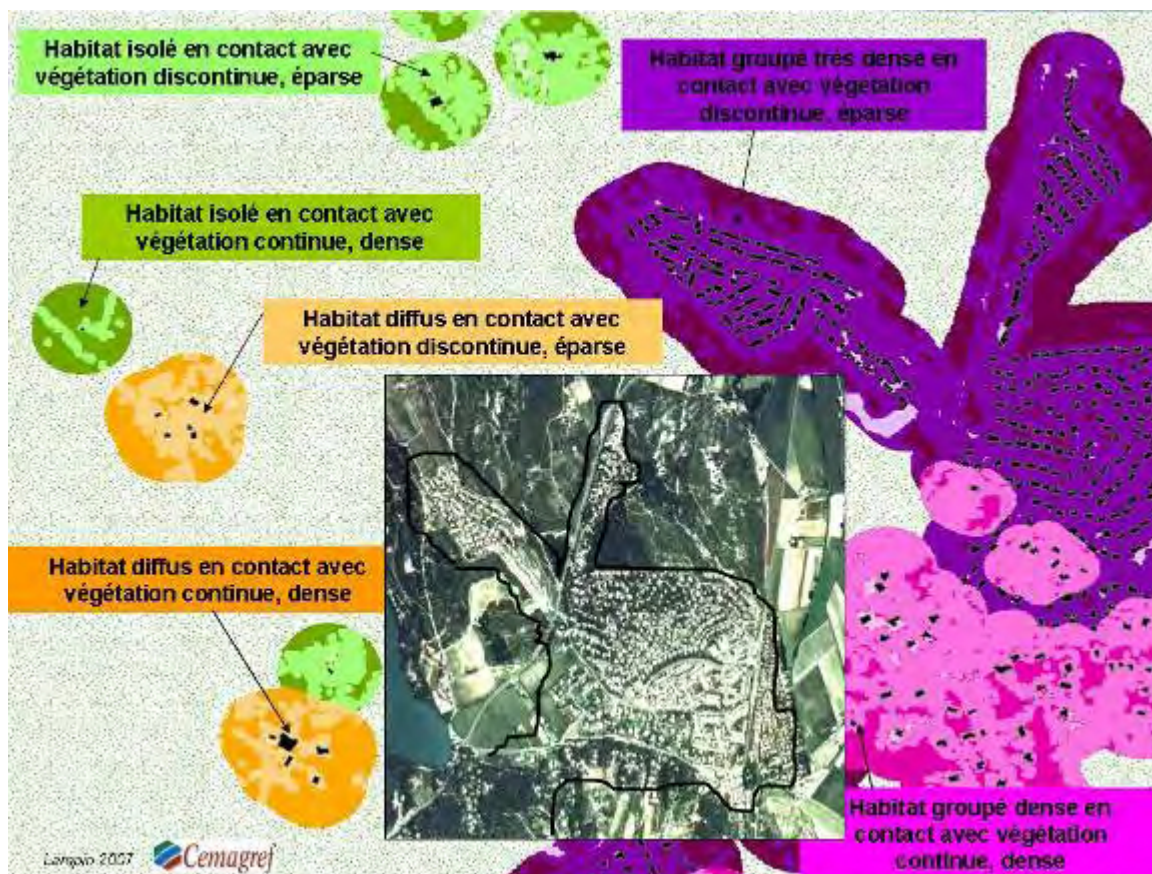
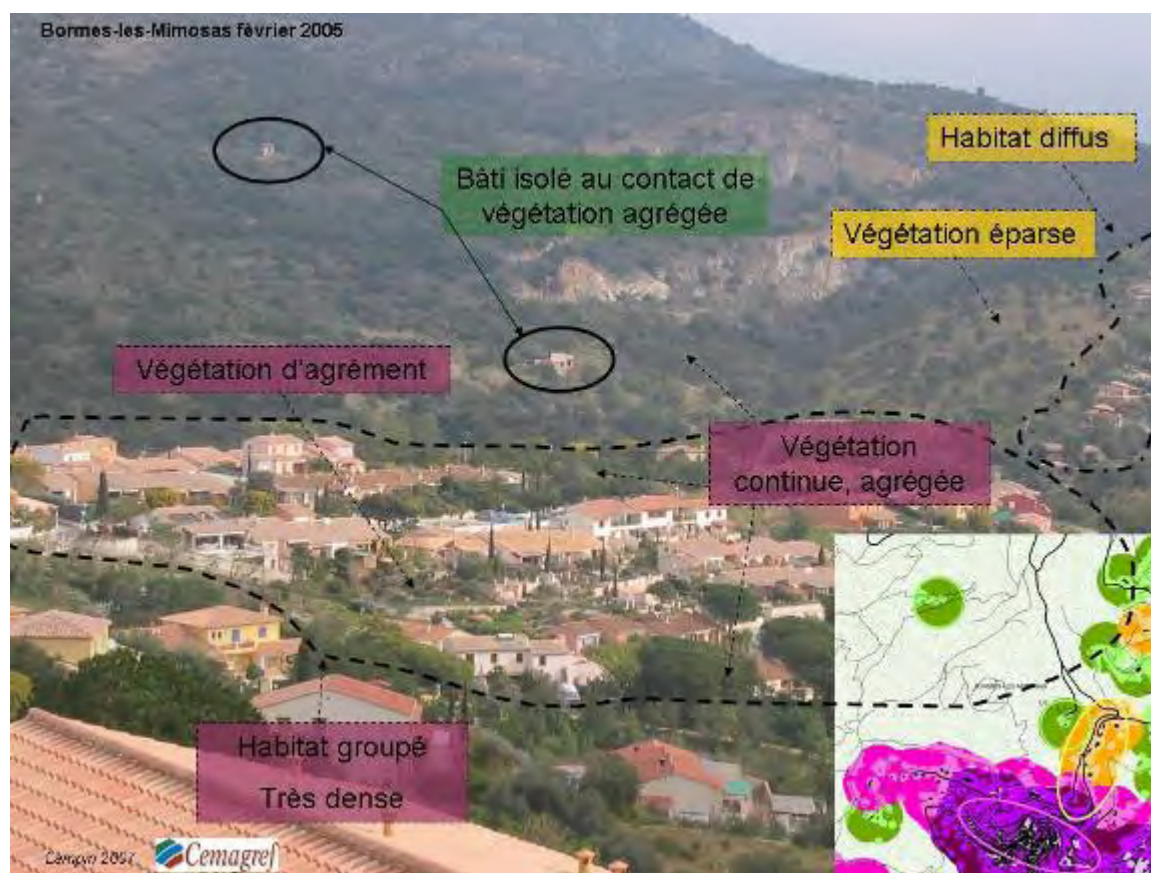


Figure 6-5 Zoom sur la cartographie des interfaces habitat-forêt, sur la zone d'étude AIX



Figure 6-6 Vue aérienne de la zone d'interface cartographiée-La Londe des Maures, sur la zone d'étude VAR



Crédit photo : Cemagref/Long.M

Figure 6-7 Photographies de la zone d'interface cartographiée-Bormes- les- Mimosas, sur la zone d'étude VAR

Les illustrations de la Figure 6-8 permettent de comparer le résultat cartographique avec la réalité du terrain.

A la clé photographique de la typologie des interfaces habitat-forêt, présentée dans le 6.1 a été associée la représentation cartographique présentée sur la Figure 6-9.

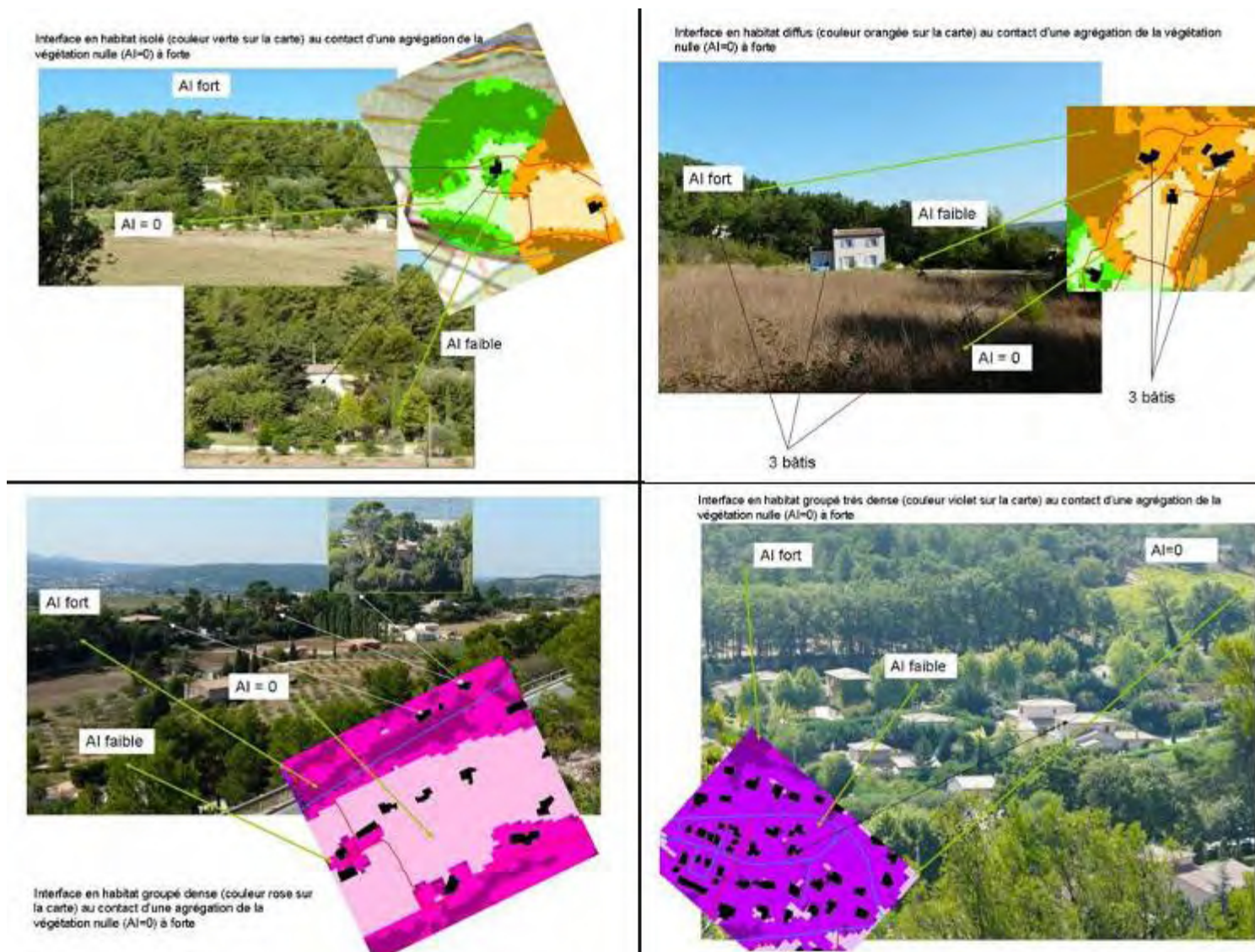


Figure 6-8 Photographies de la zone d'interface cartographiée, sur la zone d'étude de Meyreuil (MEYR)

		Structure de la végétation					
		Occupation du sol autre que végétation		Végétation discontinue, éparse		Végétation continue, dense	
Structure de l'habitat	Habitat isolé						
		Type 1		Type 2		Type 3	
	Habitat diffus						
		Type 4		Type 5		Type 6	
	Habitat groupé dense						
		Type 7		Type 8		Type 9	
	Habitat groupé très dense						
		Type 10		Type 11		Type 12	

Figure 6-9 Illustration des types d'interfaces habitat-forêt

6.4.2. Validation en conditions opérationnelles

La méthode de caractérisation et de cartographie des interfaces habitat-forêt a été portée à la connaissance des services de l'état susceptibles de la mettre en œuvre dans le cadre de leurs travaux de cartographie du risque dans les PPRiF notamment.

Une aide méthodologique explicitant le processus a été produite à cet effet (Lampin et al., 2008, 2007b). Le département de l'Hérault ainsi que le département de la Gironde ont cartographié les interfaces habitat-forêt sur l'ensemble du département. Ils ont donné un avis très positif quant à la mise en œuvre de la méthode et quant à son rendu cartographique, à l'occasion d'une réunion du comité de pilotage de l'étude « Guide de caractérisation et de cartographie des interfaces habitat-forêt » réalisée pour le compte du MEEDDAT-DPPR, qui s'est tenue le 9 mars 2009 au Cemagref d'Aix-en-Provence.

Deux extraits du compte-rendu de cette réunion du 9 mars 2009, présentés ci-après, relatent les expériences de la mise en œuvre de la méthode dans les deux départements cités précédemment.

a. Cartographie des interfaces habitat-forêt à l'échelle du département de l'Hérault

La cartographie des interfaces habitat-forêt a été réalisée dans le cadre d'une étude départementale de l'aléa feux de forêt, menée par la DDAF de l'Hérault, visant à déterminer les communes qui seraient prioritaires dans un cadre de la prescription de PPRiF. Cette étude a été confiée à l'agence MTDA qui a appliqué la méthode de cartographie des interfaces habitat-forêt en utilisant l'aide méthodologique. L'ensemble des constructions soumises à obligation légale de débroussaillage (et non pas seulement les bâtis résidentiels) a été pris en compte. La carte des interfaces a été combinée à la carte d'aléa. Le résultat cartographique jugé satisfaisant a permis de confirmer les zones qui, à dire d'expert, étaient considérées comme les plus sensibles au risque d'incendie. A partir de cette carte des interfaces, le besoin d'une méthodologie pour déterminer les zones les plus sensibles au risque d'incendie a été exprimé. Dans l'attente, la hiérarchisation des enjeux a été réalisée en fonction du type d'habitat : les enjeux forts ont été considérés dans les zones d'habitat groupé, les enjeux moyens dans les zones d'habitat diffus et les enjeux faibles dans les zones d'habitat isolé. Une bonne corrélation a été observée entre les valeurs de l'indice d'agrégation AI et le niveau d'aléa.

D'un point de vue pratique, le bureau d'étude MTDA a quantifié le temps de travail nécessaire à cette cartographie des interfaces. Réalisée sur la totalité du département de l'Hérault (613 000 ha), l'élaboration de cette cartographie a nécessité 2 jours : 0,5 Homme-Jours pour la cartographie de l'indice d'agrégation de la végétation, 1 Homme-Jour pour la cartographie des types d'habitat et 0,5 Homme-Jour pour la cartographie des interfaces proprement dites. Le travail préalable de calage d'images satellites, de leur mosaïquage et de classification d'images en 2 classes (végétation-non végétation) a quant à lui demandé 8 HJ. Enfin, aucune difficulté n'a été rencontrée pour la mise en œuvre de la méthode. La méthode exige de travailler avec des données à jour.

b. *Cartographie des interfaces habitat-forêt à l'échelle du département de la Gironde*

La cartographie des interfaces habitat-forêt a été réalisée dans le but de mieux connaître les enjeux sur le territoire de la Gironde (1 072 500 ha), de développer des actions de communication, des atlas, des PPRiF, et le suivi du débroussaillage en hiérarchisant notamment les communes. Cette étude a été réalisée par le GIP ATGeRI en appliquant la méthode développée dans l'aide méthodologique. La cartographie des interfaces habitat-forêt a été réalisée sans problème particulier.

Les données de végétation utilisées sont celles de l'IFN. Cette couche de données, au format vecteur, cartographie le territoire avec des entités surfaciques minimales de 25 ha dans lesquelles les formations végétales et forestières sont appréhendées selon leurs essences majoritaires. L'approche qualitative de la végétation développée dans l'aide méthodologique a donc été mise en œuvre (cf. paragraphe.5.2.2). Cependant, la végétation en Aquitaine étant continue (forêt de production homogène), seules 2 classes de structure ont été mises en évidence : l'une correspondant à une absence de végétation (équivalent à la valeur nulle de l'indice d'agrégation AI) et l'autre correspondant à une structure continue de la végétation (équivalent à la valeur non nulle de l'indice d'agrégation AI). La végétation discontinue n'est donc pas représentée sur la zone d'étude. Pour tenter d'affiner la structure de la végétation, l'attribut « végétation » de la BD TOPO@IGN, identifiant la végétation avec un niveau de précision de 80 m², a été pris en compte. Cette couche a permis la caractérisation de la structure de la végétation *via* le calcul de l'indice d'agrégation AI après transformation de la donnée vecteur en raster, en faisant apparaître alors des niveaux de l'indice d'agrégation AI faible le long des routes et en bordure de massif. La combinaison des données de l'Inventaire Forestier National (qui précisent la structure de la végétation en place) et des données de la BD TOPO@IGN (qui indique si il y a présence ou non de végétation avec une précision de 80 m²) ont permis d'affiner la carte de la structure de végétation obtenue. L'habitat a été traité à partir des données de la BD TOPO@IGN « bâti » de l'IGN selon les trois natures (isolé, diffus et groupé) présentées dans l'aide méthodologique. La prise en compte des zones de bâti dense d'une part et des zones de bâti très dense d'autre part n'était pas justifiée pour le cas étudié.

La combinaison des 2 classes de végétation avec les 3 classes d'habitat a conduit à 6 types d'interfaces habitat-forêt. L'intérêt de la carte des interfaces habitat-forêt a permis de souligner les zones sensibles au risque d'incendie, soient les zones d'interfaces habitat-forêt, les autres bâtis hors interfaces étant en dehors de cette zone sensible.

6.4.3. *Généralisation de la méthode : représentativité des deux zones d'étude*

La méthode a été développée et appliquée sur les zones d'étude AIX et VAR du Var situées respectivement dans les Bouches-du-Rhône et le Var. Si ces deux zones s'avèrent représentatives des départements du sud de la France soumis au risque d'incendie, alors la méthode pourra être généralisée à l'ensemble des départements du sud de la France concernés par le risque d'incendie de forêt.

Les quinze départements du sud de la France concernés par le risque d'incendie font l'objet d'un suivi de leurs incendies de forêt dans la base de données Prométhée. Il s'agit des départements des régions Provence-Alpes-Côtes d'Azur et Languedoc-Roussillon ainsi que de la Drôme, l'Ardèche et la Corse. Afin de situer les deux zones d'étude AIX et VAR, dans le contexte de ces départements soumis au risque d'incendie, une analyse multivariée a été réalisée sur des variables calculées pour chaque département et pour chaque zone d'étude. Les

variables choisies pour caractériser au mieux ces espaces étudiés concernant la nature de l'occupation du sol et l'importance des incendies de forêt.

a. Nature des variables calculées

Les données relatives à la nature de l'occupation du sol ont été extraites de la base de données Corine land cover 2000 (IFEN, 2005), disponibles sur l'ensemble des départements et zones d'études analysées. Il s'agit de :

- La surface occupée par les forêts et les milieux à végétation arbustive et/ou herbacée correspondant aux codes 3.1 et 3.2 de la nomenclature Corine land cover ; cette surface correspond à la surface combustible, susceptible d'être incendiée ;
- La surface occupée par les territoires agricoles correspondant au code 2 de la nomenclature Corine land cover.

Les variables « *part de la surface occupée par les forêts et les milieux à végétation arbustive et/ou herbacée* » et « *part de la surface occupée par les territoires agricoles* » ont été calculées en rapportant la surface occupée respectivement par les forêts et les milieux à végétation arbustive et/ou herbacée et par les territoires agricoles sur la surface totale de la zone étudiée (département ou aire d'étude).

La variable *densité de la population* a été calculée à partir des données de populations issues du recensement INSEE de 1999 rapportée à la surface des territoires analysés. Elle a été retenue pour estimer la pression urbaine.

La variable *densité des dépôts de feu* a été calculée comme le ratio du nombre de points d'éclosion dénombrés dans la base de données Prométhée sur la période 1997-2006 relatifs aux feux de forêts supérieurs à 1 ha rapporté à la surface combustible,

La variable *proportion de surface incendiée* est calculée comme le ratio de la surface brûlée déclarée dans la base de données Prométhée sur la période 1997-2006 relatifs aux feux de forêts supérieurs à 1 ha rapportée à la surface combustible.

Le Tableau 6-2 de synthèse présente l'ensemble des valeurs des variables calculées par département et zone d'étude AIX des Bouches-du-Rhône et VAR du Var.

Zone étudiée	Densité de population (hab/km ²)	Part de végétation brûlée (%)	Densité d'éclosion de feux (écl/km ²)	Part d'espaces agricoles (%)	Part d'espaces forêts et arbustes (%)
Alpes de Hautes-Provence (04)	20	1,60	0,08	21,98	77,10
Hautes-Alpes (05)	22	0,17	0,01	21,24	77,62
Alpes Maritimes (06)	235	3,05	0,16	5,91	86,28
Bouches-du-Rhône (13)	361	11,15	0,29	44,13	41,29
Var (83)	150	7,20	0,12	22,02	70,44
Vaucluse(84)	140	0,81	0,11	55,17	38,91
Aude (11)	50	1,75	0,10	49,46	48,11
Gard (30)	106	1,32	0,14	41,21	53,15
Hérault (34)	147	2,40	0,27	42,27	51,30
Lozère (48)	14	1,20	0,06	24,48	74,93
Pyrénées Orientales (66)	95	2,56	0,24	30,65	64,53
Ardèche (07)	52	0,23	0,04	27,71	70,00
Drôme (26)	67	2,14	0,17	41,93	55,25
Corse du Sud (2A)	30	3,74	0,20	10,97	87,12
Haute Corse (2B)	30	14,84	0,44	12,49	85,85
AIX	326	13,72	0,29	27,13	58,58
VAR	86	25,37	0,07	17,74	74,54

Tableau 6-2 Caractéristiques des départements du sud de la France et zones d'étude soumis au risque d'incendie

b. Résultats de l'analyse multivariée

Une analyse en composantes principales est mise en œuvre à l'aide du logiciel STATGRAPHICS®Centurion. Deux composantes ont été extraites (Tableau 6-3), ces 2 composantes ayant des valeurs propres supérieures ou égales à 1, expliquent 78 % de la variabilité des données d'origine.

Variables	Composante 1 Valeurs	Variables	Composante 2 Valeurs
Part d'espaces agricoles	0,64	Part de végétation brûlée	0,6
Densité de population	0,35	Densité d'éclosion de feux	0,59
Densité d'éclosion de feux	0,09	Densité de population	0,50
Part de végétation brûlée	-0,12	Part d'espaces forêts et arbustes	0,04
Part d'espaces forêts et arbustes	-0,67	Part d'espaces agricoles	-0,21

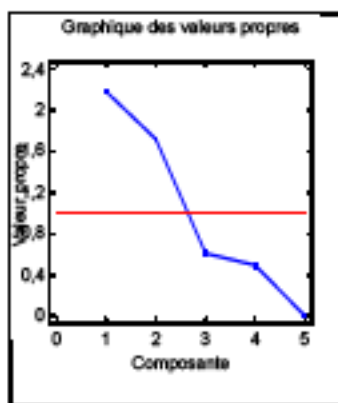


Tableau 6-3 Tableau des poids des variables sur chacune des deux composantes et valeurs propres

L'interprétation des résultats des Figure 6-10 et Figure 6-11 permet de mettre en évidence la signification de chacune de ces deux composantes. La composante 1 différencie à gauche de l'axe des territoires plutôt forestiers pour lesquels plus des 2/3 de la surface est occupée par de la forêt et de la végétation arbustive et à droite de l'axe des territoires plutôt agricoles pour lesquels 30 % de la surface est occupée par de l'agricole. La composante 2 différencie en haut de l'axe des territoires pour lesquels la pression d'incendie de forêt est forte (forte densité de feux et forte part de la surface combustible brûlée) et en bas de l'axe des territoires à faible pression incendie.

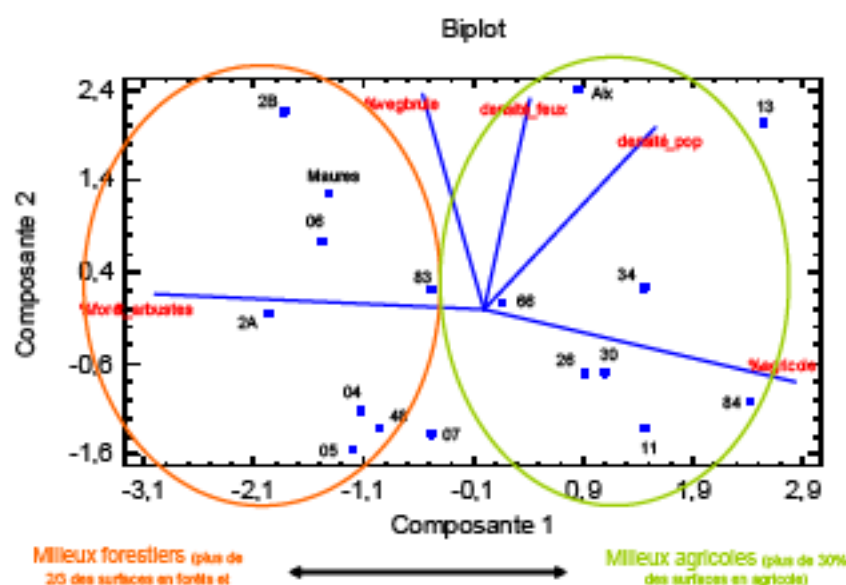


Figure 6-10 Interprétation de la composante 1

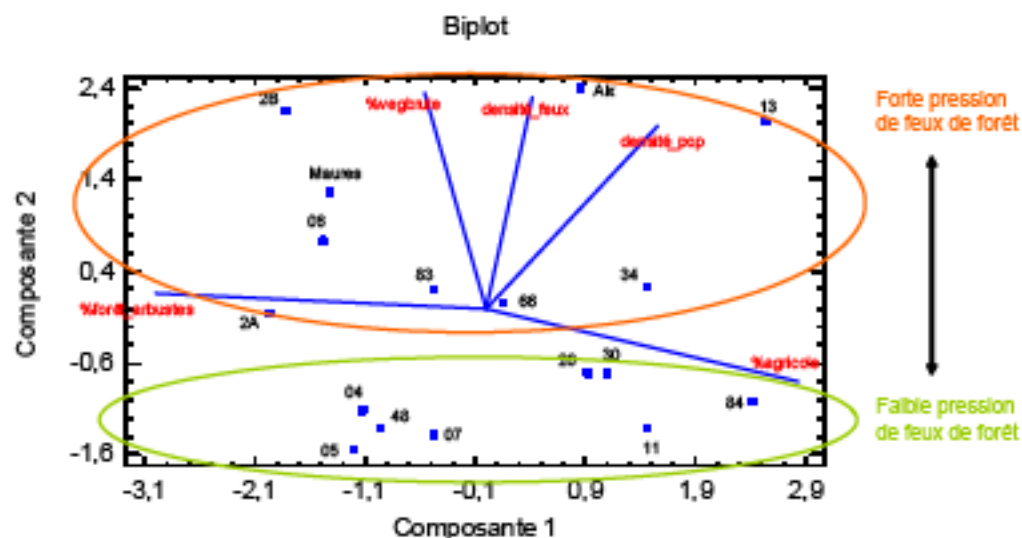


Figure 6-11 Interprétation de la composante 2

Les deux zones d'étude choisies AIX et VAR situées dans les Bouches-du-Rhône et dans le Var représentent deux grands types d'environnement caractéristiques des départements du sud de la France concernés par le risque d'incendie. La zone VAR située dans le Var est représentative de départements à forte composante forestière et aussi à forte pression d'incendie de forêt comme le Var, les Alpes maritimes et la Corse du sud. La zone AIX située dans les Bouches-du-Rhône est représentative de départements à forte composante agricole et aussi à forte pression incendie de forêt comme les Bouches-du-Rhône, l'Hérault et les Pyrénées orientales. Si la pression incendie de forêt devait augmenter dans les départements à faible pression actuelle, les départements Alpes de Hautes-Provence, Hautes-Alpes, Lozère et Ardèche seraient représentés par la zone d'étude VAR alors que les départements Aude, Drôme, Gard et Vaucluse seraient représentés par la zone d'étude AIX.

Ce résultat permet, après avoir validé le développement de la méthode de caractérisation et de cartographie des interfaces habitat-forêt, une généralisation de cette méthode à l'ensemble des départements concernés par les interfaces habitat-forêt et le risque d'incendie.

6.5 Cartographie et caractérisation des interfaces habitat-forêt sur la zone d'étude MAM entre les métropoles Aix-Marseille

Pour les analyses développées dans la suite de la thèse, la cartographie des interfaces habitat-forêt a été réalisée sur une zone d'étude de grande surface soit sur les 167 736 ha de la zone d'étude située entre les métropoles d'Aix-en-Provence et Marseille MAM (Carte 6-4). Afin de caractériser la nature de l'occupation du sol qui compose les différents types d'interfaces, cette carte des interfaces habitat-forêt a été intersectée avec la carte d'occupation du sol Occsol SPOT5 (Carte 3-8).

6.5.1. Importance et nature des interfaces sur le territoire étudié

La surface délimitée par les interfaces habitat-forêt, qui est dénommée WUI pour *Wildland Urban Interface*, occupe 30 % de la zone d'étude MAM située entre les métropoles Aix-Marseille et 56 % des bâtis résidentiels sont en interface habitat-forêt. Parmi ces bâtis, 3 %

sont dans les interfaces en habitat isolé, 10 % en habitat diffus, 16 % en habitat groupé dense et 71 % en habitat groupé très dense. La Figure 6-12 présente la proportion des différents types d'interface habitat-forêt.

Selon le type d'habitat, on compte 12 % d'interfaces habitat-forêt en habitat isolé, 25 % d'interfaces habitat-forêt en habitat diffus, 28 % d'interfaces habitat-forêt en habitat groupé dense et 35 % en habitat groupé très dense. Selon la structure de la végétation, la répartition est de 45 % d'interfaces habitat-forêt avec une faible agrégation, 17 % d'interfaces habitat-forêt avec une forte agrégation et 38 % d'interfaces habitat-forêt avec une agrégation nulle.

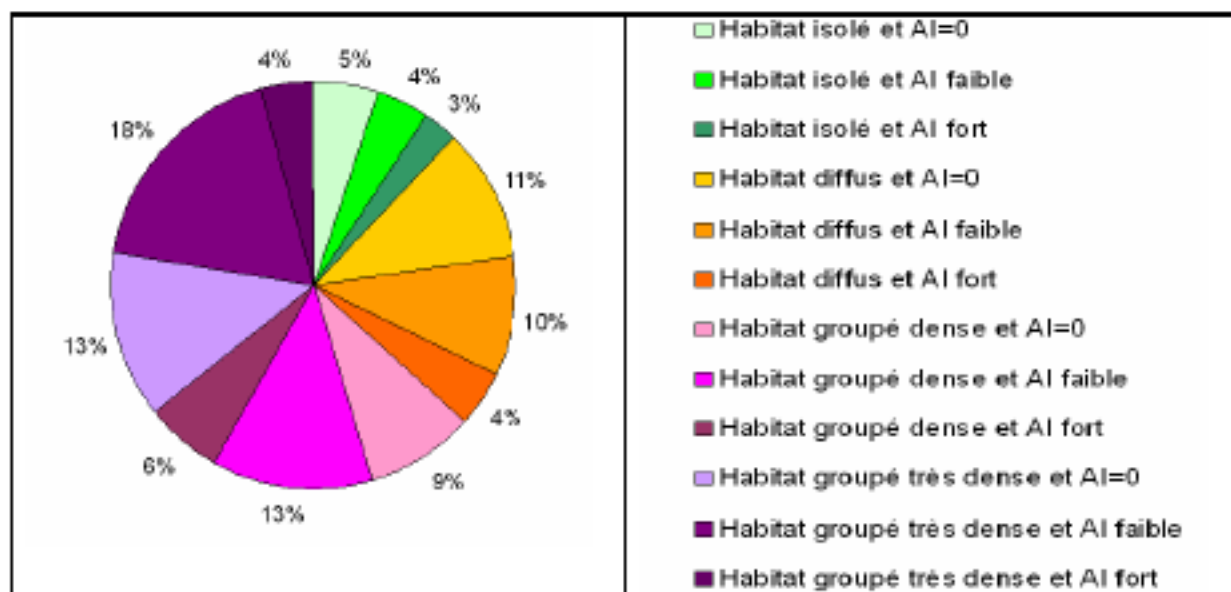


Figure 6-12 Répartition en surface des types d'interfaces habitat-forêt sur la zone d'étude MAM

6.5.2. Caractéristiques d'occupation du sol des différents types d'interface

Selon le type d'habitat, la Figure 6-13 présente la répartition des principaux types d'occupation du sol au sein des interfaces et en dehors.

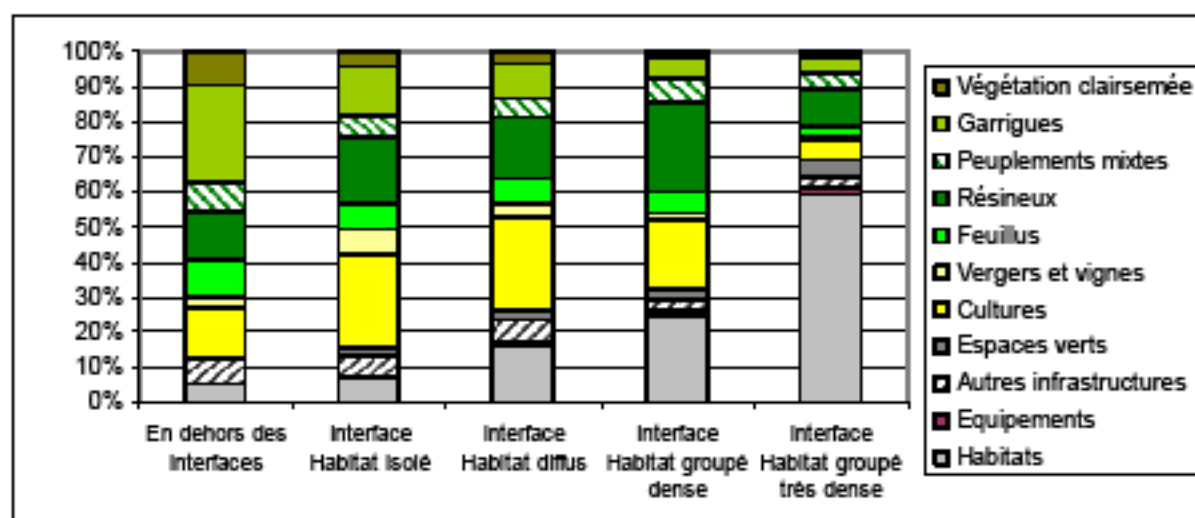


Figure 6-13 Répartition des types d'occupation du sol au sein des interfaces habitat-forêt

Elle montre **trois grands points**.

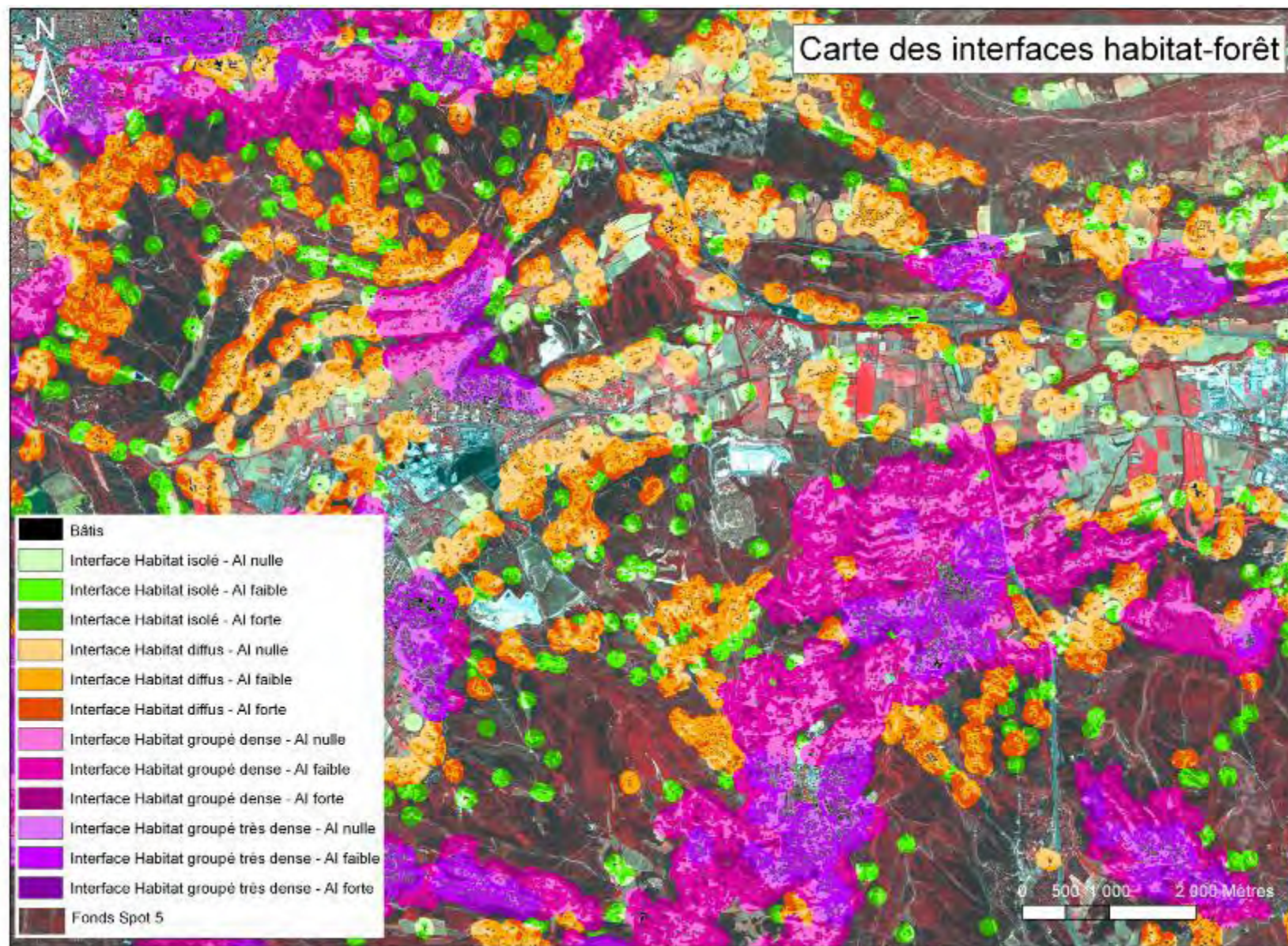
- Premièrement, la composante végétation est la plus importante en dehors des interfaces qu'au sein des interfaces, correspondant à une large part de garrigues et de végétation clairsemée. Au sein des interfaces la végétation prédomine avec plus de 40 % de végétation dans chaque type, à l'exception du type d'interface habitat groupé très dense. Les peuplements résineux et mixtes sont davantage représentés au sein des interfaces qu'en dehors, en revanche la part des peuplements feuillus est plus élevée en dehors des interfaces.
- Deuxièmement, la composante agricole est plus représentée au sein des interfaces qu'en dehors, à l'exception du type d'interface en habitat groupé très dense. Cette proportion est décroissante des interfaces en habitat isolé, en habitat diffus, puis en habitat groupé dense et enfin en habitat groupé très dense où elle est nettement inférieure. La vigne et les vergers sont davantage présents dans les interfaces en habitat isolé.
- Troisièmement la composante urbaine occupe une part relativement similaire en interface en habitat isolé qu'en dehors des interfaces. Cette part augmente fortement de l'interface en habitat isolé à l'interface en habitat diffus puis à l'interface en habitat groupé. Cette proportion est la plus forte pour l'interface en habitat groupé très dense (4,6 fois plus élevée qu'en interface en habitat isolé).

Selon la structure de la végétation, les types d'interface correspondant à une agrégation nulle de la végétation correspondent à des surfaces dépourvues de végétation. Les champs, le sol nu, les espaces urbanisés occupent généralement ces surfaces. Au contraire quand les types d'interface sont concernés par une forte agrégation, la végétation est toujours présente. Les types d'interface où l'agrégation est faible concernent davantage des espaces ouverts, qui peuvent être jointifs de zones où il n'y a pas de végétation ou à l'opposé avec des zones très forestières ou autres végétations denses et continues.

6.5.3. Discussion

Les travaux développés dans cette Deuxième Partie de la thèse ont permis de caractériser et de cartographier les 12 types d'interfaces habitat-forêt de la clé photographique (Figure 6-1), sur de grandes surfaces et à grande échelle. Il a été possible de quantifier l'importance de l'extension des interfaces sur le territoire (ex : application à la zone d'étude MAM située entre les métropoles Aix-Marseille). Le développement des interfaces habitat-forêt est conséquent : près du tiers de la surface et plus de la moitié des bâtis résidentiels sont situés en interface habitat-forêt. Près de la moitié des surfaces en interface habitat-forêt sont en habitat groupé dense et très dense combiné avec une agrégation de la végétation nulle à faible. Cela correspond à la proximité des deux pôles urbains que sont Aix-en-Provence et Marseille. Au contraire, les surfaces en interface habitat-forêt en habitat isolé ne représentent que 12 %. Même s'il est faible, ce pourcentage n'est cependant pas négligeable.

Parce que ces interfaces sont des aires où les incendies détruisent le plus de bâtiments, quand l'état de la végétation combustible et les conditions climatiques sont propices au développement d'incendies (Covington, 2000 cité dans Radeloff et al., 2005a) et parce que les départs de feu y sont le plus fréquemment liés à l'activité de l'homme (Cardille et al., 2001), elles sont devenues prioritaires en termes de gestion du risque d'incendie (Stephens, 2005 cité dans Zhang et Wimberley, 2007). Les interfaces habitat-forêt sont devenues un sujet sensible et d'importance croissante en matière de prévention et d'aménagement du territoire.



Carte 6-4 Carte des interfaces habitat-forêt sur la zone d'étude Aix-Marseille MAM

TROISIÈME PARTIE

LES RELATIONS ENTRE TERRITOIRE ET RISQUE D'INCENDIE

Une méthode de caractérisation et de cartographie des interfaces habitat-forêt a été développée dans la partie II sur les deux zones d'étude AIX et VAR situées respectivement dans les Bouches-du-Rhône et dans le Var, zones représentatives des départements du sud de la France. Elle a été testée sur d'autres sites, grandeur réelle, par des services gestionnaires de territoire. La méthode a pu être appliquée sur de grandes surfaces et à grande échelle. Reproductible, elle est généralisable à l'ensemble des départements du sud de la France concernés par le risque d'incendie.

L'objectif de cette partie III est d'établir des relations stables et reproductibles entre territoire et risque. Elle s'intéresse particulièrement aux interfaces habitat-forêt mais aussi aux espaces autres que ces interfaces, développant ainsi la notion de type de territoire.

En rappel, la partie III s'organise autour des Chapitre 7 à Chapitre 9.

Le **chapitre 7** met en évidence les premières relations entre les types de territoire et la distribution spatiale des départs de feu et incendies. Le **chapitre 8** développe des analyses statistiques et spatiales approfondies afin de mieux comprendre ces premières relations. Il prend alors en compte des variables d'occupation du sol, complémentaires de celles relatives aux types de territoire étudiés dans le chapitre 7. Il introduit trois indicateurs élémentaires de risque (densité de départ de feu, densité d'incendie, taux de surfaces brûlées). Enfin le **chapitre 9** identifie les variables significatives qui expliquent le mieux les trois indicateurs élémentaires de risque définis précédemment. Il conduit à leurs modélisations déduites de formules de calcul pondérées selon les variables d'occupation du sol et les types de territoire retenus.

Chapitre 7. Relation entre types de territoire dont les interfaces habitat-forêt et distribution spatiale des départs de feu et des incendies

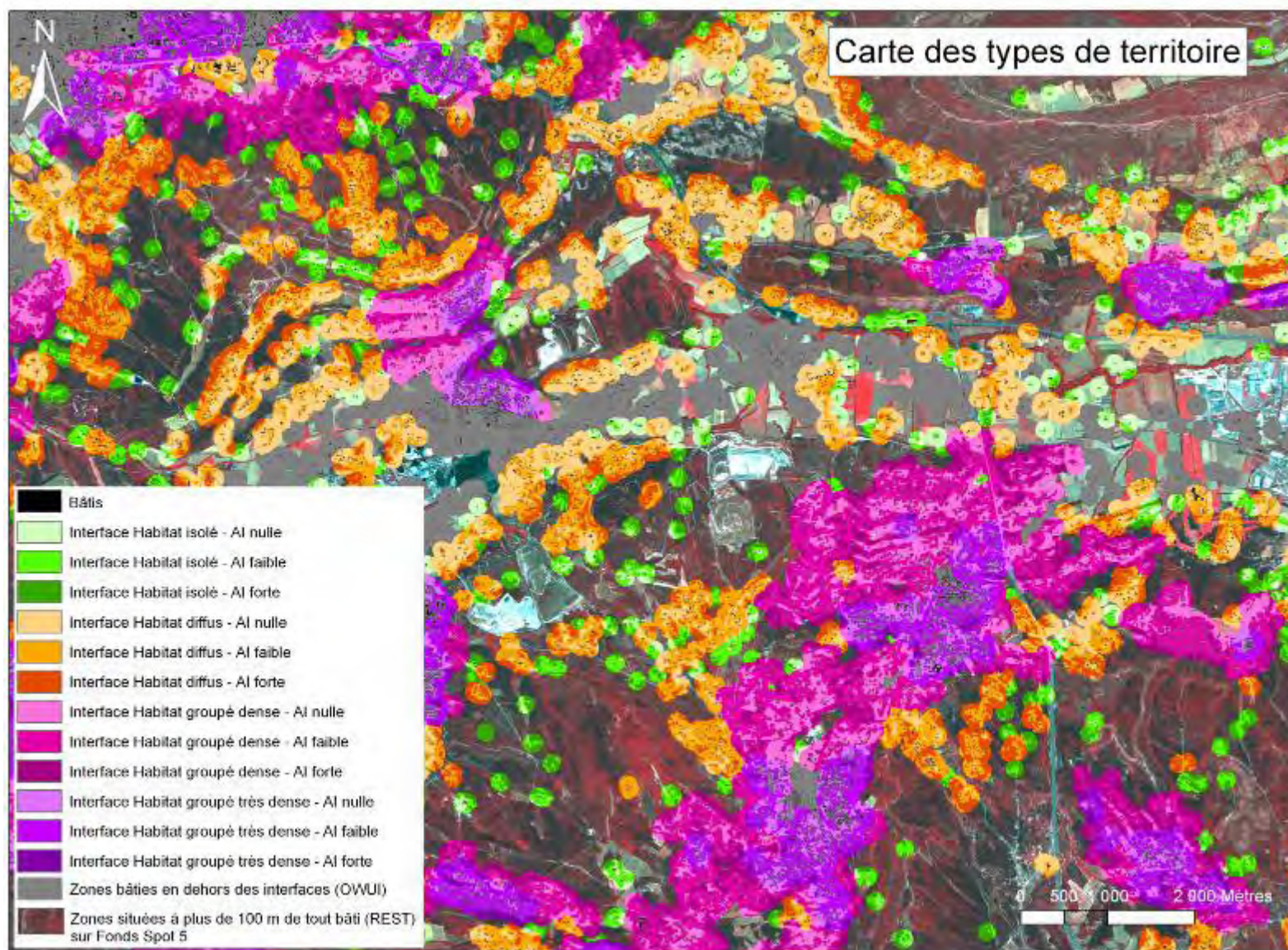
Pour mettre en évidence l'existence, ou non, de relations entre les types d'interfaces habitat-forêt et le risque d'incendie, appréhendé à travers l'historique des feux, une analyse spatiale a été réalisée sur la zone d'étude située entre les Métropoles Aix-Marseille MAM. L'objectif était de déterminer quel type d'interface habitat-forêt était le plus sujet au risque d'incendie en termes de plus forte densité de départs de feu et de plus fort taux de surfaces brûlées.

7.1 Contribution de la typologie des interfaces à une typologie de territoires

La carte des interfaces habitat-forêt réalisée sur la zone d'étude MAM (Carte 6-4) a conduit à compartimenter le territoire étudié : selon les 12 types d'interfaces habitat-forêt et les espaces situés en dehors des interfaces habitat-forêt. Parmi ces derniers, il a semblé judicieux de distinguer d'une part les zones dans lesquelles se trouvaient des bâtis, non situés en interface habitat-forêt, et d'autre part les zones restantes correspondant à des zones non bâties, situées ainsi à plus de 100 m de tout bâti. En calquant la définition des interfaces habitat-forêt, les zones bâties hors interfaces habitat-forêt ont été délimitées par un environnement de 100 m autour des bâtis situés en dehors des interfaces, les zones restantes étant déduites par complémentarité. Ainsi trois types de territoire se trouvent définis sur le territoire étudié (Carte 7-1) :

- Les interfaces habitat-forêt : **WUI** comme *Wildland-Urban Interface* ;
- Les zones bâties en dehors des interfaces habitat-forêt : **OWUI** comme *Outside Wildland-Urban Interface* ;
- Les zones restantes non bâties : **REST**.

La surface délimitée par les interfaces habitat-forêt WUI sur la zone d'étude MAM représente 30 % du territoire, les zones bâties situées en dehors des interfaces habitat-forêt OWUI, représentent 13 % du territoire et les zones restantes non bâties en occupent 57 %.



Carte 7-1 Carte des types de territoires

7.2 Types de territoire et distribution spatiale des points d'éclosion

La carte des types de territoire (Carte 7-1) a été intersectée avec la carte de la répartition spatiale des départs de feu digitalisés pour la période 1997-2007 (Carte 3-10). Ces points d'éclosion répartis sur l'ensemble de la zone d'étude ont été dénombrés selon leur localisation dans les types de territoire, et notamment selon les types d'interfaces habitat-forêt. Le test du Khi2 a alors été utilisé pour mesurer la significativité des différences observées dans la distribution des points d'éclosion. Un indicateur de densité d'éclosion a alors été calculé en rapportant le nombre de points d'éclosion dénombrés dans chacun des types de territoire sur la surface de chacun de ces types de territoire. Le calcul a été ramené aux 1 000 ha : l'unité est donc un nombre de points d'éclosion aux 1 000 ha. Une première analyse a été réalisée selon les types de territoires WUI, OWUI et REST et une seconde selon les 12 types d'interfaces habitat-forêt constituant le type de territoire WUI.

7.2.1. Distribution des points d'éclosion selon les types de territoire

La répartition observée des points d'éclosion selon les différents types de territoire sans différencier les types d'interfaces habitat-forêt figure dans le Tableau 7-1.

Types de territoire	WUI	OWUI	REST	Total
Nombre de points d'éclosion	256	12	297	565

Tableau 7-1 Répartition des points d'éclosion selon le type de territoire observés sur la zone d'étude

Le test du Khi 2 a été réalisé pour mesurer si les différences observées dans la distribution des points d'éclosion étaient statistiquement significatives ou non, comparant les fréquences observées dans les types de territoire avec leurs fréquences attendues. L'hypothèse nulle H_0 formulée est que la répartition des points d'éclosion selon les différents types de territoire est identique à la répartition de leur surface (il n'y a pas de différence significative). L'hypothèse est formulée de façon à être rejetée. L'alternative H_1 (il y a une différence significative) doit être acceptée.

Le nombre observé de points d'éclosion dans chaque type de territoire peut être comparé à un nombre espéré sur la base de l'hypothèse nulle. Cette hypothèse nulle fixe la proportion de points d'éclosion dans chaque type de territoire de la population théorique (fréquences attendues). Le test du Khi2 vérifie si les fréquences observées sont suffisamment proches des fréquences attendues pour représenter la population théorique.

Le Khi2 est tel que : $\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - T_i)^2}{T_i}$

Où O_i = fréquence observée dans chaque type i et T_i = fréquence théorique dans chaque type i .

La valeur du Khi 2 observée est nulle lorsque les fréquences observées sont toutes égales aux fréquences attendues, c'est-à-dire quand il y a concordance absolue entre la distribution observée et la distribution théorique. Cette valeur est d'autant plus grande que les écarts entre les fréquences observées et les fréquences théoriques sont plus grands. La signification de la valeur observée se fait par référence à la table des valeurs critiques du Khi 2. On rejettera l'hypothèse nulle lorsque la probabilité associée à la valeur observée, pour un degré de liberté égale à $k-1$, est égale ou inférieure à α .

Parmi les 565 points d'éclosion répartis sur l'ensemble du territoire d'étude, 256 sont en zone WUI, 12 en zone OWUI et 297 en zone REST. Ces fréquences observées sont-elles compatibles avec l'hypothèse d'une répartition des points selon le poids des surfaces

occupées par chacune des zones WUI, OWUI et REST respectivement 30,3 %, 13,1 % et 56,6 % soit 171,2 [565 (30,3/100)] en WUI, 74,0 [565 (13,1/100)] en OWUI et 319,8 [565 (56,6/100)] en REST ?

Test statistique : Niveau de signification $\alpha = 0,001$ et $N=565$

Le degré de liberté ddl est $k-1=2$

H_0 sera rejetée si la valeur observée du khi 2 est telle que sa probabilité associée, sous H_0 , avec $ddl=2$ est égale ou inférieure à $\alpha = 0,001$

Les résultats sont présentés dans le Tableau 7-2.

	WUI	OWUI	REST	TOTAL
Fréquences observées	256	12	297	565
Fréquences théoriques	171,2	74,0	319,8	565
Différences	84,8	-62	-22,8	0
χ^2	41,9	51,8	1,6	95,3
Contribution au χ^2	+ 43,9 %	- 54,4 %	-1,7 %	

Tableau 7-2 Résultat duKhi2 calculé selon les types de territoire

Le calcul est : $\chi^2 = (256-171,2)^2/171,2 + (12-74)^2/74 + (297-319,8)^2/320=95,4$

La table du Khi2-loi de Pearson indique une valeur de 13,82 pour un $ddl=2$ et un seuil de signification choisi $\alpha = 0,001$. La valeur calculée du Khi2 qui est égale à 95,4 a une probabilité d'apparition inférieure à 0,001. Comme cette probabilité est largement inférieure au seuil de signification choisi $\alpha = 0,001$, nous pouvons rejeter l'hypothèse nulle. Il y a moins de 1% de chance de se tromper en disant que les différences observées dans le tableau sont significatives. La distribution des points d'éclosion ne correspond pas à la répartition spatiale des surfaces des différents types de territoire de la zone d'étude.

Ces résultats testés avec le χ^2 montrent qu'il y a une **différence très significative dans la distribution des points d'éclosion qui est fonction des types de territoire** (résultats du χ^2 avec 1%). Les contributions au χ^2 sont respectivement 43,9 %, -54,4 % et -1,7 % pour WUI, OWUI et REST. Il y a beaucoup plus de points d'éclosion dans les interfaces habitat-forêt (WUI).

Les valeurs de densité de points d'éclosion ont été calculées pour les différents types de territoire sans différencier les types d'interfaces habitat-forêt, elles sont représentées sur la Figure 7-1.

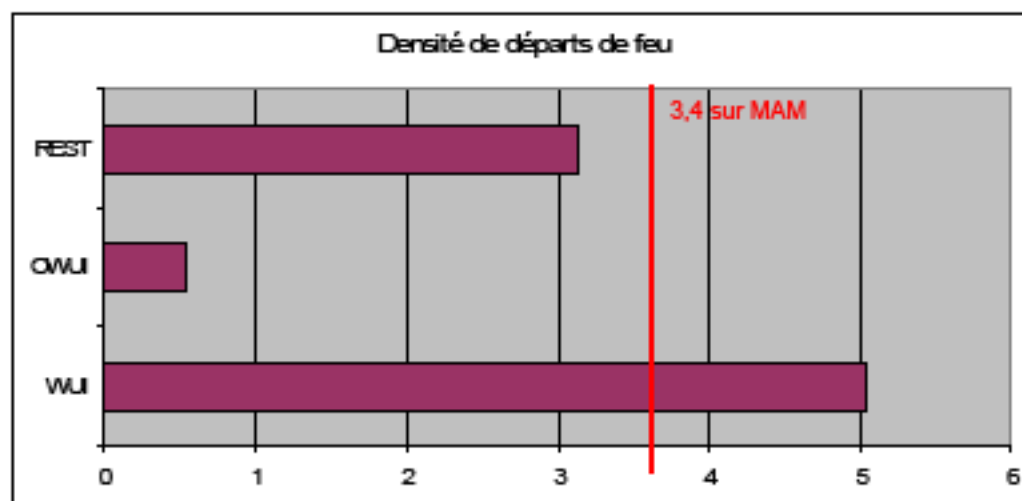


Figure 7-1 Densité de départs de feu selon les types de territoire

La valeur moyenne de la densité d'éclosion sur la zone d'étude MAM atteint 3,4 points d'éclosion aux 1 000 ha. Elle est significativement plus élevée dans les interfaces habitat-forêt qu'ailleurs : 1,5 fois plus grande que la valeur moyenne, 10 fois plus élevée qu'en OWUI et 1,6 fois plus élevée qu'en REST (résultats du test du χ^2 avec 1‰).

7.2.2. Distribution des points d'éclosion au sein des interfaces habitat-forêt

La répartition observée des points d'éclosion au sein des 12 types d'interfaces habitat-forêt figure dans le Tableau 7-3.

Pour faciliter la lecture du tableau, les types d'interface habitat-forêt ont été codifiés de 1 à 12 en référence à la typologie des interfaces habitat-forêt du Tableau 6-1 :

1=Type1 : habitat isolé-Indice d'agrégation de la végétation (AI) nul ; 2=Type2 : habitat isolé-AI faible ; 3=Type3 : habitat isolé-AI fort ; 4 = Type4 : habitat diffus-AI nul ; 5=Type5 : habitat diffus -AI faible ; 6=Type6 : habitat diffus -AI fort ; 7=Type7 : habitat groupé dense-AI nul ; 8=Type8 : habitat groupé dense -AI faible ; 9=Type9 : habitat groupé dense -AI fort ; 10=Type10 : habitat groupé très dense-AI nul ; 11=Type11 : habitat groupé très dense -AI faible ; 12=Type12 : habitat groupé très dense -AI fort.

Types d'interface habitat-forêt	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total
WUI													
Nombre de points d'éclosion	13	26	10	20	28	20	10	28	13	18	52	18	256

Tableau 7-3 Répartition des points d'éclosion selon le type d'interfaces habitat-forêt

Le test du Khi 2 a été réalisé comme pour l'analyse de la répartition selon les types de territoire, la remarque formulée est que cette répartition des points d'éclosion n'est peut-être que la traduction de la répartition des surfaces de chacun des types d'interface habitat-forêt. La même question a été posée à savoir si les différences observées dans la distribution des points d'éclosion sont statistiquement significatives ou non. Le test statistique du Khi 2 a été réalisé de la même façon (Tableau 7-4).

Types d'interface	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total
Fréquences observées (WUI)	13	26	10	20	28	20	10	28	13	18	52	18	256
Fréquences théoriques (WUI)	13,5	10,8	6,8	27,2	24,4	11,3	22,2	32,3	15,5	34,1	47,6	10,4	256
Différences	-0,5	15,2	3,2	-7,2	3,6	8,7	-	-4,3	-2,5	-	4,4	7,6	0
χ^2	0,016	21,34	1,5	1,9	0,53	6,8	6,7	0,56	0,4	7,6	0,4	5,6	53,41
Contribution au χ^2	-	+	+	-	+	+	-	-	-	-	+	+	
	0,03 %	40,0 %	2,8 %	3,6 %	1 %	12,7 %	12,6 %	1,1 %	0,8 %	14,2 %	0,8 %	10,6 %	

Tableau 7-4 Résultat du calcul du Khi2 selon les types d'interface

La table du Khi2-loi de Pearson indique une valeur de 31,26 pour un ddl=11 et un seuil de signification choisi $\alpha = 0,001$. La valeur calculée du Khi2 qui est égale à 53,41 a une probabilité d'apparition inférieure à 0,001. Comme cette probabilité est largement inférieure au seuil de signification choisi $\alpha = 0,001$, nous pouvons rejeter l'hypothèse nulle. Il y a moins de 1‰ de chance de se tromper en disant que les différences observées dans le tableau sont significatives. La distribution des points d'éclosion ne correspond pas à la répartition spatiale des surfaces des différents types d'interface de la zone d'étude.

Ces résultats testés avec le χ^2 montrent qu'il y a une **différence très significative dans la distribution des points d'éclosion au sein des types d'interface** (résultats du χ^2 avec 1%). Les plus fortes contributions au χ^2 sont respectivement 40,0 %, +12,7 %, -12,6 % et -14,2 % pour les types 2 (*isolé-AI faible*), 6 (*diffus -AI fort*), 7 (*groupé dense-AI nul*) et 10 (*groupé très dense-AI nul*).

Les valeurs de densité de points d'éclosion ont été calculées pour chaque type d'interface habitat-forêt, elles sont représentées sur la Figure 7-2.

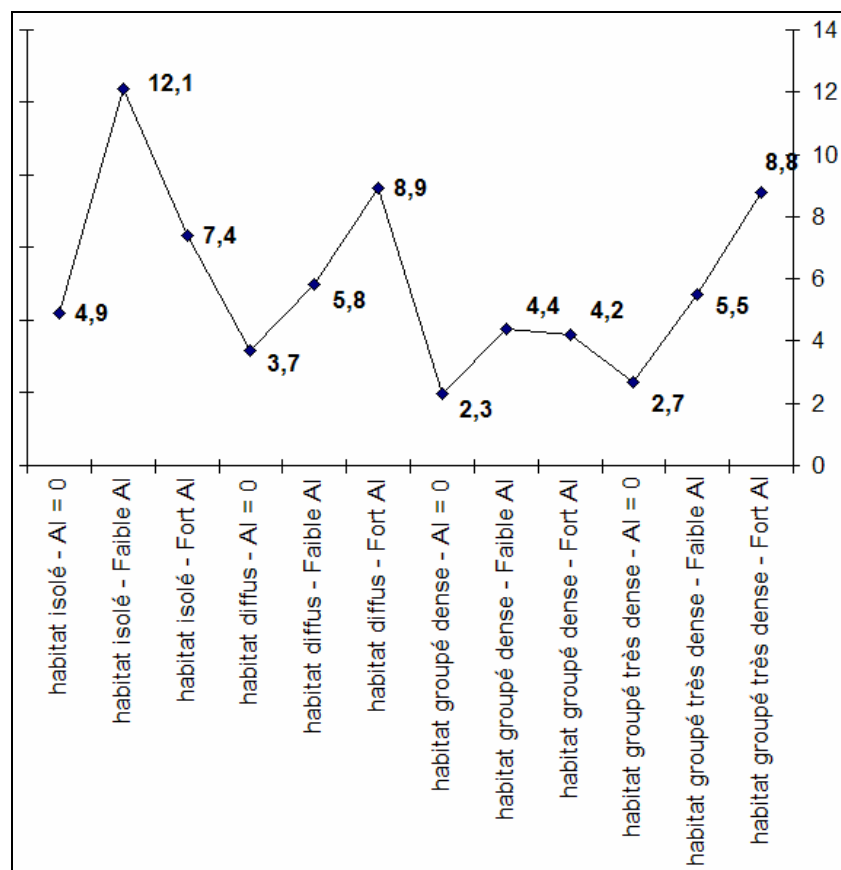


Figure 7-2 Densités d'éclosion selon le type d'interfaces habitat-forêt

Au sein des interfaces habitat-forêt, les résultats montrent que la densité d'éclosion est 3,4 fois plus forte dans les interfaces en habitat isolé que dans les interfaces en habitat groupé. Les valeurs de densité augmentent de façon significative avec une diminution de la densité des bâtis : 7,9 en interface en habitat isolé, 5,4 en interface en habitat diffus puis 4,3 en interface en habitat groupé (dense et très dense). Cette densité est 2,2 fois plus élevée dans les interfaces présentant de forte valeur d'agrégation de la végétation que dans celles présentant une agrégation nulle. Les valeurs augmentent fortement avec une augmentation de l'agrégation de la végétation : 3,2 en interface avec une agrégation de la végétation nulle, 5,9 en interface avec une agrégation de la végétation faible et 7,0 en interface avec une agrégation de la végétation forte. Les interfaces habitat-forêt caractérisées par un habitat isolé au contact d'une agrégation faible présentent les plus fortes valeurs de densité d'éclosion, de départs de feu.

7.3 Types de territoire et distribution spatiale des surfaces incendiées

La carte des types de territoire (Carte 7-1) a été intersectée avec la carte de la répartition spatiale des surfaces incendiées digitalisées pour la période 1990-2007 (Carte 3-11). Les surfaces brûlées réparties sur l'ensemble de la zone d'étude ont été comptabilisées pour chaque type de territoire, et notamment pour chaque type d'interface habitat-forêt. Un indicateur de taux de surfaces brûlées a alors été calculé en rapportant la surface brûlée dans chacun des types de territoire sur la surface de chacun de ces types de territoire. L'unité est donc un pourcentage de surfaces brûlées.

7.3.1. Distribution des surfaces incendiées selon les types de territoire

La surface brûlée sur le territoire d'étude situé entre les métropoles Aix-Marseille MAM est de 22 071 ha, certaines parties de ce territoire étant parcourues par le feu, une à quatre fois. La répartition des surfaces brûlées entre les types de territoire est de 7,1 % en interface habitat-forêt WUI, 0,2 % en zones bâties hors interfaces habitat-forêt OWUI et 92,7 % en zone située à plus de 100 m de bâtis résidentiels REST, alors que le poids des surfaces occupées par chacune de ces zones WUI, OWUI et REST est respectivement 30 %, 13 % et 57 %. Les surfaces brûlées restent majoritairement localisées en dehors des zones habitées (composées à 70 % de surfaces de végétation combustible) mais lorsque le feu affecte des zones habitées, ce sont les interfaces habitat-forêt qui sont les plus touchées. Le Tableau 7-5 rappelle les surfaces de chaque type de territoire de la zone d'étude et fait état de la répartition des surfaces brûlées selon les types de territoire.

Types de territoire	Surfaces (ha)	Surfaces parcourues (ha) par				Surfaces brûlées (ha)	Taux de surfaces brûlées
		1 feu	2 feux	3 feux	4 feux		
WUI	50 864	1 422	70	2	0	1 567	3,1 %
OWUI	21 263	34	0	0	0	34	0,2 %
REST	95 609	17 199	1 572	41,5	0,5	20 471	21,4 %
Total	167 736	18 665	1 642	43,5	0,5	22 071	13,2 %

Tableau 7-5 Répartition des surfaces brûlées sur le territoire

Les valeurs du taux de surfaces brûlées ont été calculées pour les différents types de territoire sans différencier les types d'interfaces habitat-forêt, elles sont représentées dans le Tableau 7-5. La valeur moyenne de ce taux de surfaces brûlées pour la zone d'étude MAM atteint 13,2 %. Cette valeur est 4,2 fois moins élevée dans les interfaces habitat-forêt avec un ratio de 3,1 % : ratio qui est 7 fois moins élevé dans les interfaces habitat-forêt que dans REST mais 15,5 fois plus élevé dans les interfaces habitat-forêt WUI que dans les zones habitées en dehors des interfaces habitat-forêt OWUI.

7.3.2. Distribution des surfaces incendiées au sein des interfaces habitat-forêt

La surface brûlée au sein des interfaces habitat-forêt est de 1 567 ha : 2,8 % de cette surface ont brûlé 1 fois, 0,1 % de cette surface a brûlé 2 à 3 fois et aucune surface n'a brûlé 4 fois. Les surfaces qui ont brûlé 2 à 3 fois dans les interfaces restent donc peu représentatives. La répartition de ces surfaces brûlées selon les types d'interface habitat-forêt est représentée dans le Tableau 7-6. Toutes valeurs d'indice d'agrégation confondues, 452 ha ont brûlé en interface en habitat isolé (29 %), 446 ha en interface en habitat diffus (28 %), 273 ha en interface en

habitat groupé dense (17 %) et 396 ha en interface en habitat groupé très dense (25 %), alors que le poids des surfaces occupées par chacune des zones est respectivement de 12 %, 25 %, 36 % et 27 %. Toutes natures d'habitat confondues, 532 ha ont brûlé en interface à indice d'agrégation AI nul (34 %), 706 ha en interface à indice d'agrégation faible (45 %) et 329 ha en interface à indice d'agrégation fort (21 %) alors que le poids des surfaces occupées par chacune des zones est respectivement de 38 %, 45 % et 17 %. Bien que faibles, les surfaces brûlées affectent plus fréquemment les interfaces en habitat isolé et habitat diffus en contact avec des agrégations de la végétation faible et forte. L'environnement y est composé de végétation combustible sur près de 50 % de la surface, végétation forestière (indice d'agrégation fort) mais aussi mixte et de milieu ouvert (indice d'agrégation faible). Le feu peut être alimenté par ce combustible en quantité suffisante, contrairement aux interfaces de type groupé où la part de surface combustible représente une part plus faible.

Types de territoire	Surfaces (ha)	Surfaces parcourues (ha) par				Surfaces Brûlées (ha)	Taux de surfaces brûlées
		1 feu	2 feux	3 feux	4 feux		
Isolé-AI nul	2 674	132	5	1	0	143	5,4 %
Isolé-AI faible	2 148	179	10	0	0	199	9,3 %
Isolé-AI fort	1 355	99	5	0	0	110	8,1 %
Diffus-AI nul	5 402	149	8	1	0	167	3,1 %
Diffus-AI faible	4 847	168	4	0	0	177	3,7 %
Diffus-AI fort	2 239	101	1	0	0	102	4,6 %
Groupé dense-AI nul	4 420	78	2	0	0	82	1,9 %
Groupé dense-AI faible	6 412	122	4	0	0	130	2,0 %
Groupé dense-AI fort	3 079	59	1	0	0	61	2,0 %
Groupé très dense-AI nul	6 777	115	13	0	0	140	2,1 %
Groupé très dense-AI faible	9 454	171	14	0	0	199	2,1 %
Groupé très dense-AI fort	2 057	50	3	0	0	56	2,7 %
Total	50 864	1 422	70	2	0	1 567	3,1 %

Tableau 7-6 *Tableau de répartition des surfaces brûlées selon les types d'interfaces*

Au sein de chaque type d'interface habitat-forêt, le taux de surfaces brûlées a été calculé et les valeurs sont présentées dans le Tableau 7-6, accompagné de la Figure 7-3.

Les résultats montrent que le taux de surfaces brûlées augmente avec une densité de bâtis qui décroît. Il est 3,7 fois plus élevé en interface en habitat isolé (7,3 %) qu'en interface en habitat groupé (2,1 %), 2 fois plus élevé en interface en habitat isolé qu'en interface en habitat diffus (3,6 %). Le taux de surfaces brûlées est 1,4 fois plus élevé en interface avec forte valeur d'agrégation de la végétation (3,8 %) qu'en interface avec valeur d'agrégation nulle (2,8 %). Il augmente avec une augmentation de l'agrégation de la végétation, il est de 3,1 % en interface avec valeur d'agrégation faible. Les interfaces habitat-forêt caractérisées par un habitat isolé au contact d'une agrégation faible présentent le plus fort taux de surfaces brûlées.

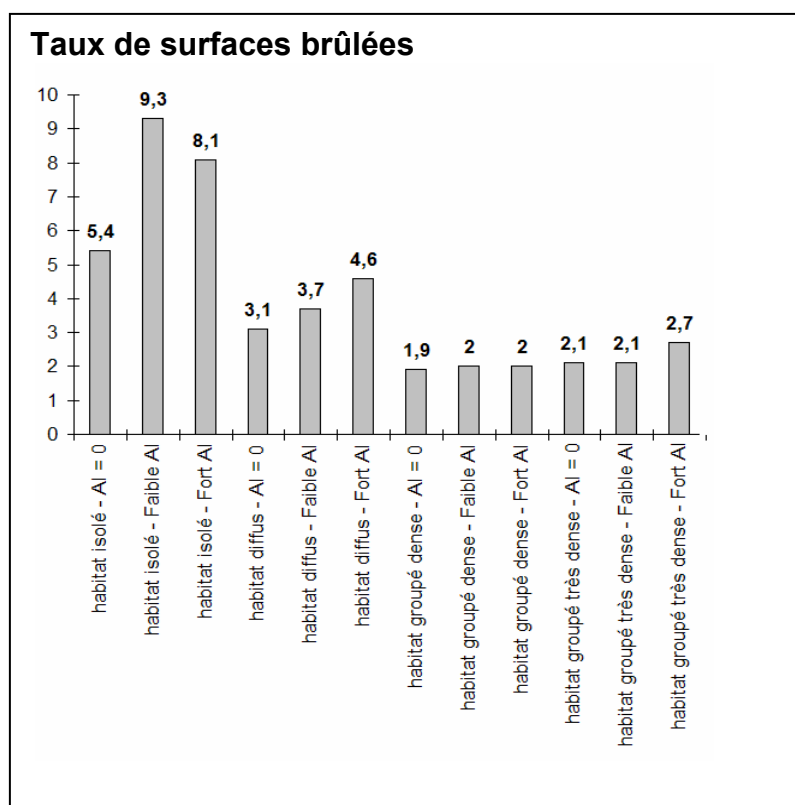


Figure 7-3 Taux de surfaces brûlées selon les types interfaces habitat-forêt

7.4 Synthèse-Discussion

Les résultats de la Figure 7-4 (synthèse des Figure 7-2 et Figure 7-3) montrent qu'au regard de la densité de départs de feu et du taux de surfaces brûlées, les interfaces habitat-forêt relevant de l'habitat isolé au contact d'une végétation faiblement à fortement agrégée sont les plus exposées alors qu'elles ne couvrent que 2,1 % du territoire étudié. Il convient de noter également que les interfaces relevant de l'habitat diffus au contact d'une végétation faiblement à fortement agrégée présentent, elles aussi, des niveaux élevés de densité d'éclosion et de taux de surfaces brûlées même si ces derniers restent inférieurs à ceux des interfaces en habitat isolé avec agrégation faible à forte de la végétation. Ces interfaces couvrent 4,2 % du territoire étudié. Ainsi environ 7 % du territoire apparaissent comme les plus vulnérables à l'incendie et les plus propices aux départs de feu suggérant des actions de prévention renforcées.

Concernant le taux de surfaces brûlées, les résultats montrent que ce taux de surfaces brûlées décroît des interfaces en habitat isolé aux interfaces en habitat groupé dense et très dense et que ce taux décroît des interfaces à forte agrégation de la végétation aux interfaces à agrégation nulle. Ceci peut être expliqué par la diminution correspondante de la proportion de végétation dans les interfaces contrebalancée par une augmentation de la proportion de surfaces urbanisées. Ainsi en dessous de 30 % de couverture végétale, la perméabilité de la végétation combustible est perdue et la propagation de l'incendie limitée, de plus à partir d'une certaine proportion d'espaces urbanisés, la continuité de la végétation combustible est interrompue (Syphard et al., 2007a). Ce qui est le cas des interfaces en habitat groupé dense et très dense (avec plus de 60 % de surfaces urbanisées). Par ailleurs comme le suggèrent Sturtevant et Cleland (2007), les interfaces en habitat isolé sont davantage menacées par les grands feux, du fait de la dispersion des moyens de lutte, des temps de réponse plus longs liés à l'isolement et parfois à l'inaccessibilité des habitations correspondantes. Enfin les résultats

montrent que le risque d'incendie n'est pas nul dans les interfaces ayant une agrégation nulle de la végétation au regard des valeurs du taux de surfaces brûlées. Ces zones peuvent en effet être parcourues par le feu, de nombreux exemples peuvent illustrer la propagation de feux par les champs, notamment les chaumes (Sturtevant et Cleland, 2007).

Concernant la seule densité d'éclosion, les résultats montrent que cette densité est plus élevée en zone d'habitat isolé et diffus avec des agrégations fortes mais aussi faible, mais un pic est également observé en zone d'habitat groupé très dense avec des agrégations fortes. Ces départs de feux, essentiellement liés à l'activité humaine, sont souvent liés aux imprudences de la vie quotidienne (barbecue, activités de jardinage avec étincelles provenant d'outils...).

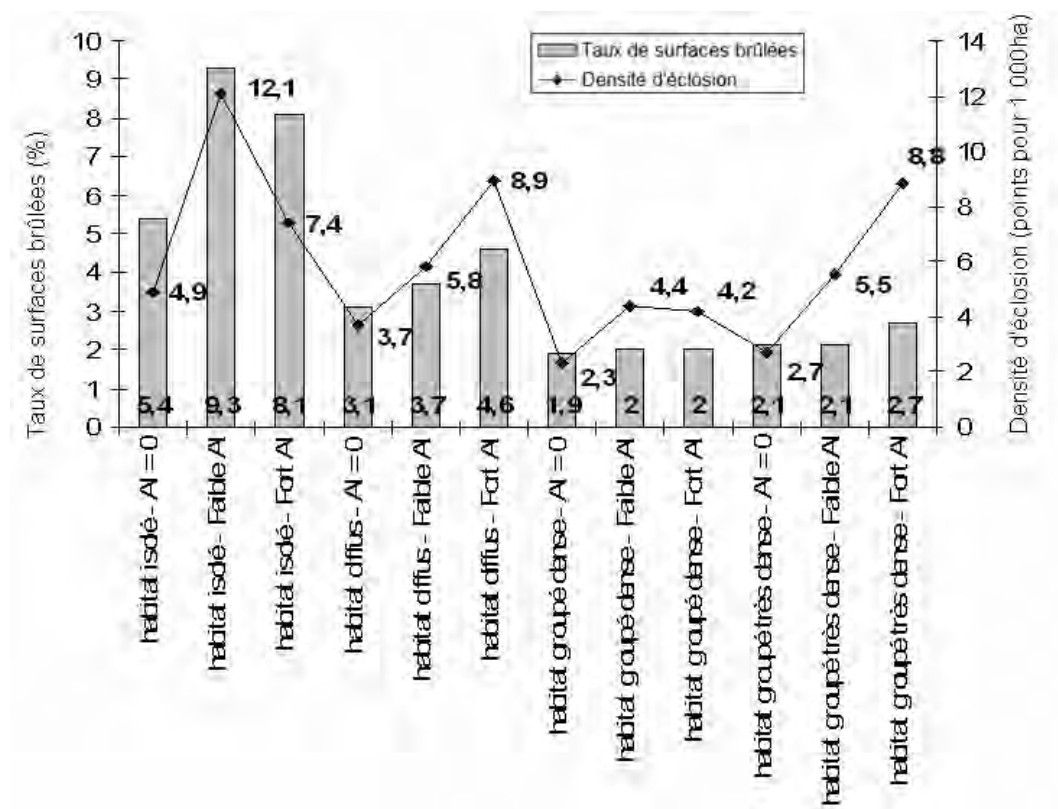


Figure 7-4 Densité d'éclosion et taux de surfaces brûlées selon les types d'interface habitat-forêt

L'existence de relations entre types d'interface habitat-forêt et risque d'incendie, analysé au travers des indicateurs de densité d'éclosion de feu et de taux de surfaces brûlées, a été mise en évidence : la relation est forte entre types d'interface habitat-forêt et densité d'éclosion, elle est moindre entre types d'interface habitat-forêt et surfaces brûlées. Ce résultat illustre aussi le point de vue de Brosofske et *al.* (2007) qui considèrent que la densité d'éclosion est une expression intégrée des influences naturelles (foudre) et humaines, et que la taille d'un incendie, son intensité, est davantage une mesure écologique de l'inflammabilité et de la continuité (connectivité) de la végétation affectant le comportement du feu après ignition.

Chapitre 8. Introduction de nouvelles variables d'occupation du sol dans l'étude des relations types de territoire et risque d'incendie

L'analyse spatiale développée dans le Chapitre 7 a mis en lumière l'existence de relations entre types de territoire et risque d'incendie : certains types et, notamment certains types d'interface habitat-forêt sont davantage soumis au risque d'incendie en termes de densité de départs de feu et de taux de surfaces brûlées. Ces premiers résultats ont conduit à lancer de nouvelles investigations pour mieux connaître et comprendre l'environnement tant écologique, topographique que socio-économique qui conditionne les départs de feu et l'extension des surfaces incendiées. Une analyse spatiale et statistique approfondie est donc entreprise en prenant en compte une large palette de variables d'occupation du sol disponibles, autres que les seuls types de territoire ou types d'interfaces habitat-forêt, variables définies dans ce Chapitre 8.

L'objectif de ce chapitre est de préciser le cadre de l'analyse statistique et spatiale, de définir les variables tant à expliquer qu'explicatives de la matrice d'analyse et de rendre compte de la nature des différenciations introduites par les types de territoire et par les niveaux du risque d'incendie, ces derniers étant appréciés en termes de départs de feu, de passages d'incendies et de surfaces détruites par les incendies de forêt. Pour cela une analyse univariée de chacune des variables définies a été réalisée permettant de décrire chaque variable et d'analyser leur organisation selon les types de territoire et selon les niveaux de risque.

Cette analyse univariée a été développée sur la zone d'étude MAM située entre les Métropoles Aix-Marseille.

8.1 Domaine de définition de l'étude pour l'analyse spatiale et statistique

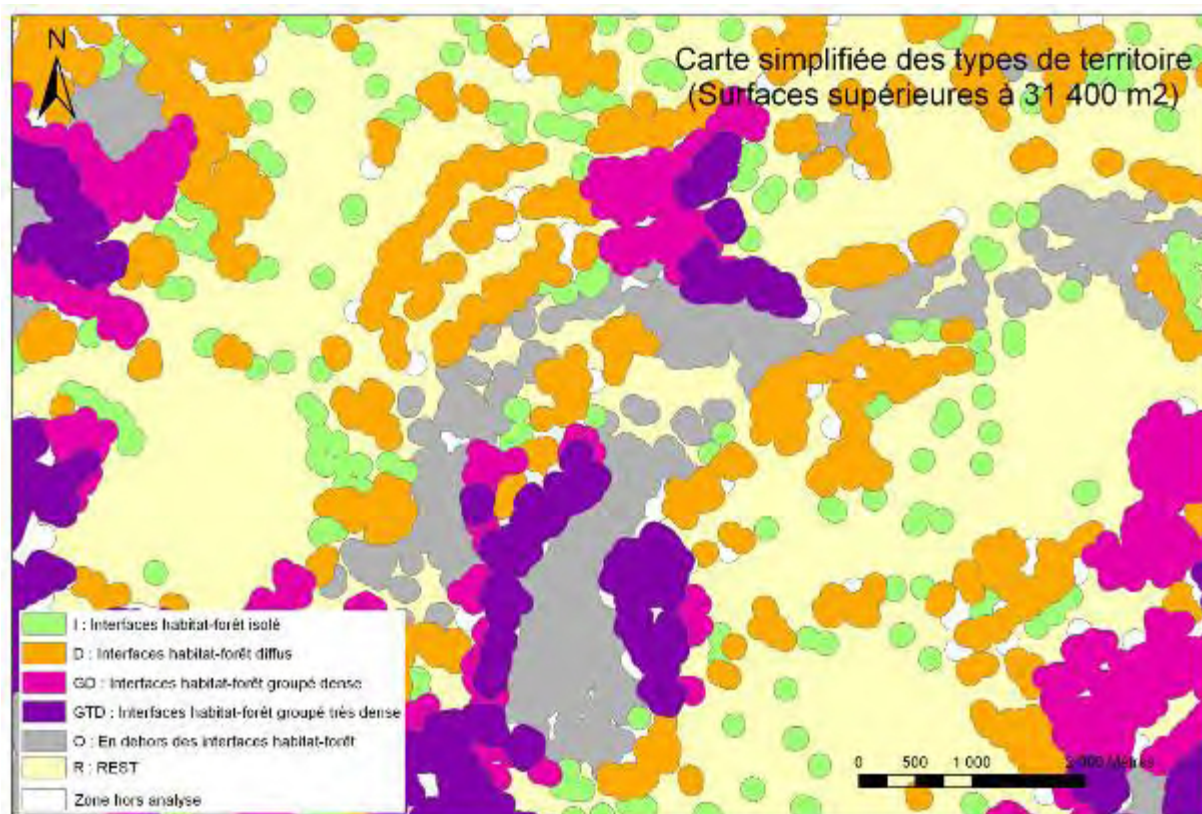
Pour conduire cette analyse, la première étape a consisté à découper le territoire étudié en unités spatiales élémentaires (« individus spatiaux ») qui seraient ensuite décrites par une série d'indicateurs (« variables ») relatifs au problème géographique posé (Sanders, 1989).

Partant de la carte des types de territoire (Carte 7-1), le territoire se trouvait découpé selon les 12 types d'interfaces habitat-forêt, les zones bâties en dehors des interfaces habitat-forêt (appelées OWUI) et les zones restantes, faisant le complément pour couvrir tout le territoire (appelées REST).

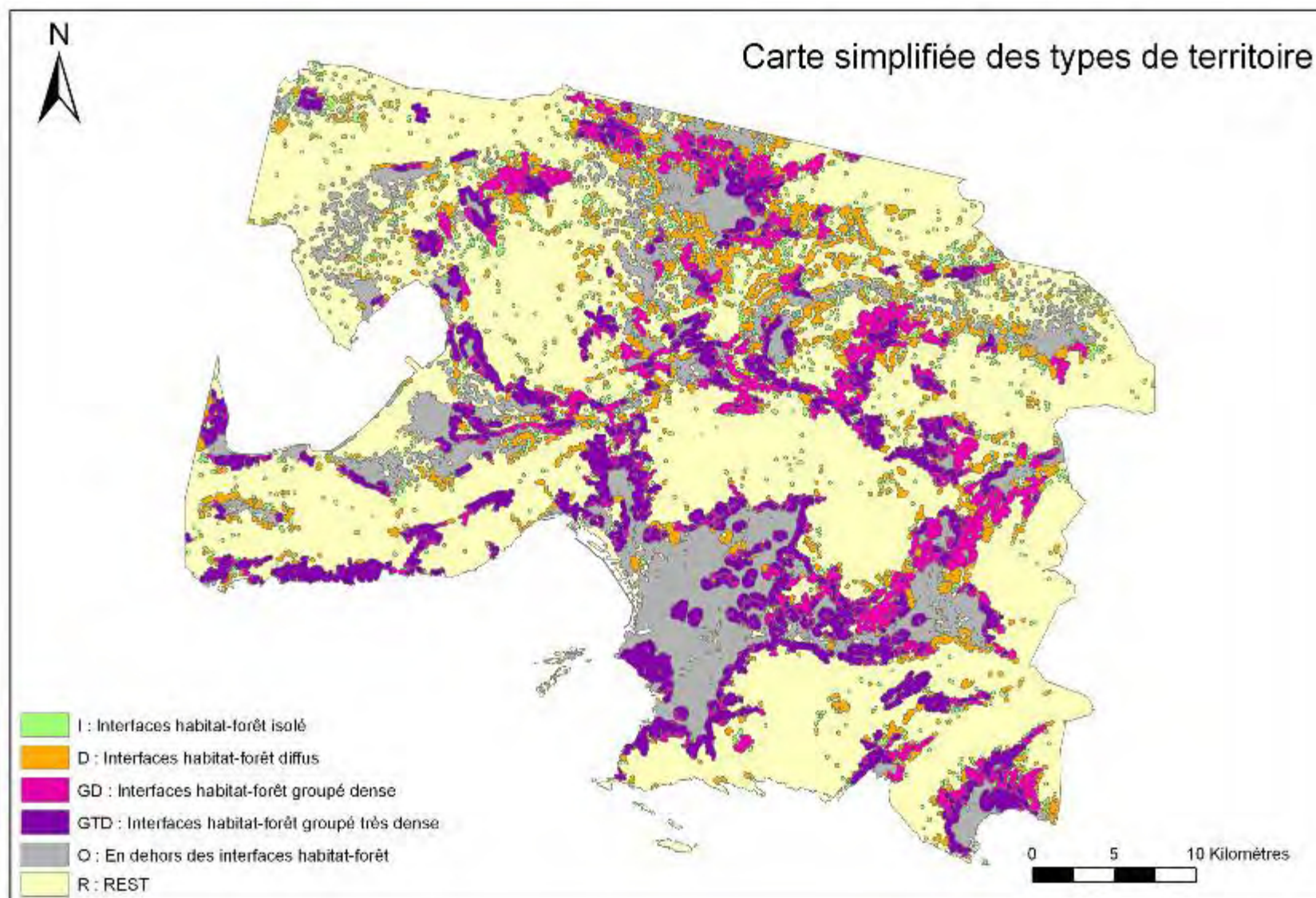
Cette carte au format raster a été convertie au format vecteur (polygones), les polygones constituant les unités spatiales élémentaires sur lesquelles devait porter l'analyse. Mais le niveau de précision de la carte raster (déterminé par le critère agrégation de la végétation calculé), a généré près de 700 000 polygones d'une surface moyenne de 250 m² (Coefficient de variation de 7 000 %). L'analyse statistique n'était alors pas réalisable avec les moyens disponibles (logiciel pouvant traiter jusqu'à 3 000 polygones). Par ailleurs les unités spatiales présentaient une surface moyenne très petite et probablement trop petite pour que les variables calculées aient vraiment un sens. Plusieurs options ont alors été possibles :

- Dégrader la carte des territoires au format raster, par agrégation ou élimination de pixels isolés, pour limiter ainsi le caractère pixélisé de la carte avant conversion au format vecteur polygone. Mais cela pouvait aussi avoir pour conséquence de dégrader l'information de base portée par la carte des types de territoire.
- Partir de la carte avec ses 700 000 polygones et ne sélectionner que ceux d'une surface supérieure à 31 400 m² correspondant à la surface occupée par un bâti et son environnement délimité par un cercle d'un rayon de 100 m [$3,14 * (100 \text{ m})^2$], à rapprocher de la définition de l'interface habitat-forêt. Malgré cela, le nombre de polygones restait trop important.
- Les interfaces étant issues de la combinaison de la nature de l'habitat et du niveau d'agrégation de la végétation, appliquer une valeur moyenne d'agrégation de la végétation calculée au sein de chaque entité délimitée par une nature d'habitat. Mais du fait du calcul, les interfaces habitat-forêt avec une agrégation nulle n'étaient plus représentées, alors qu'elles ne devaient pas être écartées de l'analyse.
- Enfin considérer que la clé d'entrée du territoire est de prendre comme critère prévalant de l'interface habitat-forêt, le critère de la nature de l'habitat au sein de laquelle la composante agrégation de la végétation est conservée dans son état d'origine. En termes de vulnérabilité face à l'incendie de forêt, ce critère nature d'habitat est par ailleurs essentiel.

Cette dernière option aboutit à ce que l'espace analysé se trouve compartimenté selon 4 grands types d'interfaces habitat-forêt déclinés comme interface habitat-forêt isolé I, interface habitat-forêt diffus D, interface habitat-forêt groupé dense GD et interface habitat-forêt groupé très dense GTD et selon des zones bâties hors interfaces O (ou OWUI) et zone restante R (ou REST) conduisant à une carte simplifiée des types de territoire (Carte 8-2). La conversion de cette carte simplifiée des types de territoire du format raster au format vecteur a généré 10 487 polygones affectés aux différents types de territoire (I, D, GD, GTD, O, R). Pour un nombre d'entre eux, il s'agit de zones interstitielles ou peu significatives, car trop petites pour une analyse spatiale et statistique ultérieure. Il a donc été décidé de supprimer les polygones de faible surface, tout comme Martinez *et al.* (2009) qui dans leur analyse sur l'occurrence des feux enlèvent de leur champ d'étude les communes de surfaces forestières trop petites, et de fait, peu significatives. Seuls les polygones d'une surface supérieure à 31 400 m² ont été conservés. A l'issue de cette sélection, 2 961 polygones ont été conservés et serviront à l'analyse spatiale et statistique. Ce nombre de polygones reste suffisant pour permettre une analyse statistique fiable et autorise un traitement efficace des données par les logiciels à disposition (capacité mémoire du logiciel et mémoire machine déclarées suffisantes pour réaliser les traitements d'analyse). L'ensemble de ces 2 961 polygones couvrent une surface de 158 560 ha soit environ 95 % de la surface de la zone d'étude MAM. La Carte 8-1 est un zoom de la carte simplifiée des territoires dans laquelle les polygones d'une surface inférieure à 31 400 m² ont été exclus de l'analyse.



Carte 8-1 Zoom sur le découpage du territoire de la zone d'étude



Carte 8-2 Carte simplifiée des types de territoire

8.2 Définition des variables étudiées

Les variables étudiées sont de natures différentes : environnementales, physiques et socio-économiques, quantitatives ou qualitatives. Elles ont été construites à partir de données spatiales disponibles et directement exploitables et de données spécifiquement élaborées.

8.2.1. *Densité d'éclosion, densité d'incendie et taux de surfaces brûlées : trois variables à expliquer*

Tel qu'il a été rappelé dans le paragraphe 1.3.1, le risque d'incendie est déterminé par la combinaison d'éléments du risque : l'occurrence (probabilité d'éclosion, probabilité d'incendie), l'intensité et la vulnérabilité. Dans des études récentes, on peut identifier un certain nombre d'indicateurs de risque. Ils concernent l'occurrence des feux (éclosion), la récurrence (fréquence) des incendies et enfin les surfaces brûlées. Ainsi Mercer et Prestemon (2005) ont modélisé le nombre d'ignitions par canton par an (sur 10 ans d'archives) en fonction de variables météorologiques, de la population, du taux de chômage, du taux de pauvreté, de la densité de bâtis et du nombre de policiers. Sturtevant et Cleland (2007) ont considéré un indicateur de risque de départ de feu, évalué par la distribution spatiale de l'occurrence des feux. Martinez et al. (2009) ont défini un nombre de feux cumulés dans une commune dans une période divisé par la surface de chaque commune. L'indicateur est une densité d'éclosion portant sur des entités administratives de taille variable. Comme le souligne Velez (2000) cité dans Martinez et al. (2009), la densité évite le biais de comparer des nombres de départs de feu sur des surfaces variables dans l'analyse. Bien que le régime de feu comprenne de multiples caractéristiques incluant saisonnalité, intensité, sévérité et prédictibilité, Syphard et al. (2007b) ont restreint l'analyse aux questions de surfaces brûlées et de récurrence (fréquence) de feu. Mercer et Prestemon (2005) ont modélisé la surface brûlée sur la surface forestière. Prestemon et al. (2002) ont développé des modèles reliant le nombre d'incendies par unité de surface forestière à un certain nombre de facteurs dont la densité de bâtis. Ils ont ainsi défini une densité d'incendie.

Au vu de ce qui a été étudié jusqu' alors et compte tenu des données disponibles (Base de données géoréférencées des incendies de forêt du paragraphe 3.1.2e), trois indicateurs de risque ont été élaborés pour l'analyse spatiale et statistique des 2 961 polygones de la zone d'étude MAM située entre les métropoles Aix-Marseille. Ces indicateurs, considérés comme variables à expliquer ou dépendantes sont : la densité de départs de feu ou Densité de points d'Éclosion DE, le taux d'occurrence des incendies ou Densité d'Incendie de forêt DI et le taux de surfaces parcourues par les incendies ou taux de Surfaces Brûlées SB.

Le mode de calcul des trois variables à expliquer est défini ci-dessous et est illustré sur la Figure 8-1 :

☞ La densité des points d'éclosion DE a été calculée comme le ratio du nombre de départs de feu cumulé sur la période 1997-2007 inclus dans un polygone sur la surface de ce polygone. Pour éviter le biais occasionné par la variabilité des surfaces de chaque polygone, la densité a été choisie, et non le nombre.

Observation : Une variante de cette variable avait été calculée mais n'est pas apparue intéressante lors des analyses. Elle n'a donc pas été reprise dans le rapport de thèse. Il

s'agissait de la variante DEv calculée en considérant le dénominateur comme la surface des seuls espaces de végétation combustible (BOI et ESN);

☞ La densité d'incendie de forêt DI a été calculée comme le ratio du nombre d'incendies de forêt cumulé sur la période 1990-2007 ayant parcouru le polygone sur la surface de ce polygone. Comme pour l'indicateur précédent, la densité a été choisie.

Observation : Plusieurs variantes de cet indicateur avaient été calculées mais ne sont pas apparues intéressantes lors des analyses. Elles n'ont donc pas été reprises dans le rapport de thèse. Il s'agissait de la variante DIv calculée en considérant le dénominateur comme la surface des seuls espaces de végétation combustible (BOI et ESN), des variantes DI1 à DI4, calculées en considérant le numérateur comme respectivement le nombre d'incendies de 1 à 50 ha sur la période 1990-2007 inclus dans un polygone, le nombre d'incendies de 50 à 500 ha, le nombre d'incendies de plus de 500 ha et le nombre d'incendies de moins de 1 ha (sautes) ;

☞ Le taux de surfaces brûlées du polygone SB a été calculé comme le ratio de la somme des surfaces brûlées (1 à 4 fois) intersectant un polygone sur la surface de ce polygone.

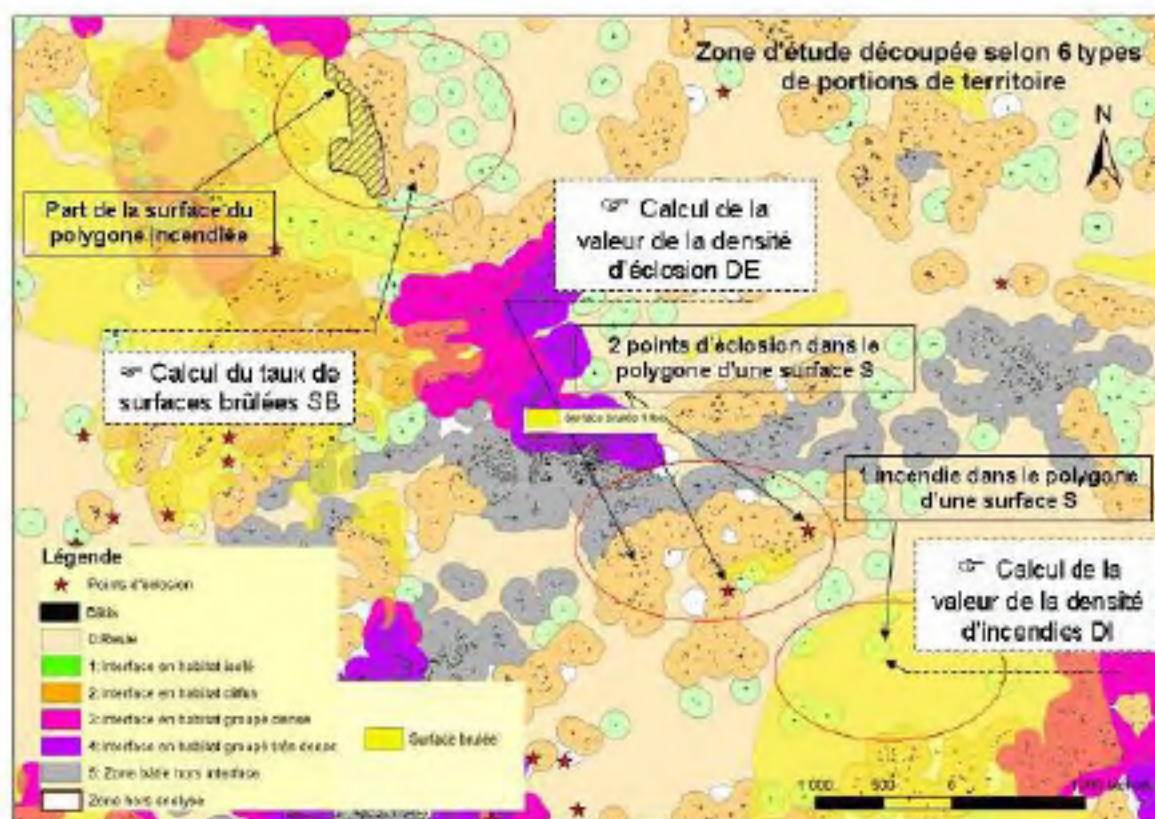


Figure 8-1 Définition des trois indicateurs de risque Densité de points d'Ecllosion DE, Densité d'incendie de forêt DI et taux de Surfaces Brûlées SB

L'intersection des données des bases de données géoréférencées (distribution spatiale des départs de feu et des contours des surfaces incendiées) décrites dans le paragraphe 0, avec les unités spatiales que sont les types de territoire définis précédemment, a permis d'attribuer à chaque unité spatiale ou polygone une valeur de chaque variable à expliquer. L'énumération de ces variables figure en synthèse dans le Tableau 8-1. Les valeurs ont été calculées sous SIG à l'aide du logiciel ArcGIS©9.2.

8.2.2. Variables explicatives

Les variables explicatives sont des variables issues de données directement disponibles ou ayant nécessité des calculs spécifiques.

a. Données directement disponibles

La nature et l'origine de chacune de ces données figurent dans le paragraphe 0.

Données relatives à l'occupation du sol

Carte 3-8 Carte d'occupation du sol Occsol SPOT5 sur la zone d'étude MAM

A partir des données issues de Occsol SPOT 5 (Carte 3-8), les 5 grands thèmes d'occupation du sol que sont l'espace urbain, l'espace agricole, l'espace boisé, les autres espaces naturels et les espaces récréatifs ont été sélectionnés correspondant respectivement aux valeurs 1 à 3, 5, 6, 7 et 4 de l'attribut ST_02_S de la table attributaire de la base de données Occsol SPOT 5.

Carte 3-5 Carte d'occupation du sol issue d'une classification supervisée de l'image satellite SPOT5 sur MAM

Carte 5-17 Carte de l'indice d'agrégation sur la zone MAM

Données de relief

Carte 3-12 Carte du relief sur la zone d'étude MAM

Données diverses

Carte 3-14 et Carte 3-15 Carte des réseaux de routes et de chemins, et des bâtis.

Carte 3-16 Carte de l'indice KR de Becker.

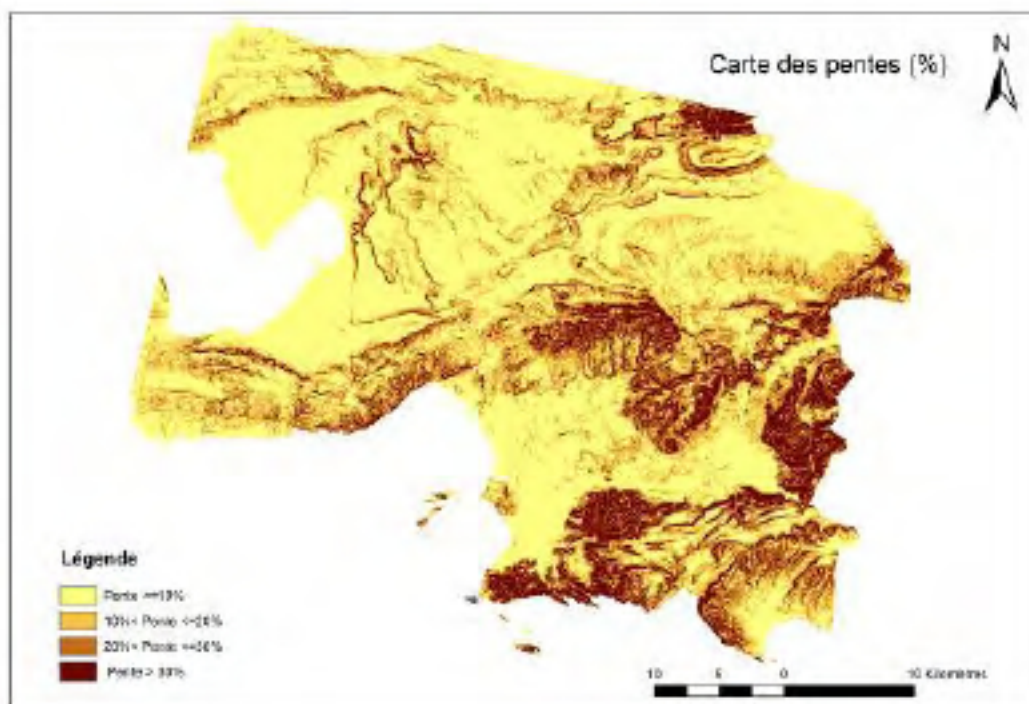
b. Données élaborées spécifiquement

Données physiques

Pente

A partir du Modèle Numérique de Terrain (Carte 3-12), la pente est calculée en tout point de l'espace en utilisant la fonction Pente du menu Analyse en Surface de l'extension Spatial Analyst du logiciel ArcGIS©9.2. Le résultat exprimé en % se traduit par une carte au format raster avec un pixel d'une taille de 50 m sur 50 m imposée par la résolution du Modèle Numérique de Terrain disponible et produit par l'IGN. Les valeurs de pente sont réparties en quatre classes de pentes pour fournir la Carte 8-3 :

- ☛ Pente faible pour une valeur de pente inférieure à 10 % (codé PT1) ;
- ☛ Pente moyenne pour une valeur de pente comprise entre 10 % et 20 % (codé PT2) ;
- ☛ Pente forte pour une valeur de pente comprise entre 20 % et 30 % (codé PT3) ;
- ☛ Pente très forte pour valeur de pente supérieure à 30 % (codé PT4).



Carte 8-3 Carte des classes de pente (exprimée en %)

Exposition au vent dominant

A partir du modèle numérique de terrain (Carte 3-12), l'exposition est calculée en tout point de l'espace en utilisant la fonction Exposition du menu Analyse en Surface de l'extension Spatial Analyst du logiciel ArcGIS©9.2. Le résultat exprimé en ° se traduit par une carte au format raster avec un pixel d'une taille de 50 m sur 50 m imposée par la résolution du modèle numérique de terrain (MNT) disponible et produit par l'IGN. Pour une direction principale de vent donnée (vent de mistral : vent de nord-ouest), 3 classes de combinaison exposition/direction du vent peuvent être déterminantes pour le risque d'incendie (Mariel et Jappiot, 1997). Ces trois classes notées de 1 à 3 ont les significations suivantes : la note 1 correspond aux zones protégées du vent, la note 3 correspond aux zones exposées au vent alors que la note 2 correspond aux zones intermédiaires. La direction de vent prédominante dans la zone d'étude est le mistral de direction 300°. Comme l'illustre la Figure 8-2, par vent de mistral, les zones 1 correspondent aux expositions de 90° à 180°, les zones 3 aux expositions de 270° à 360° et les zones 2 aux expositions de 0° à 90° et de 180° à 270°.

Vent de mistral

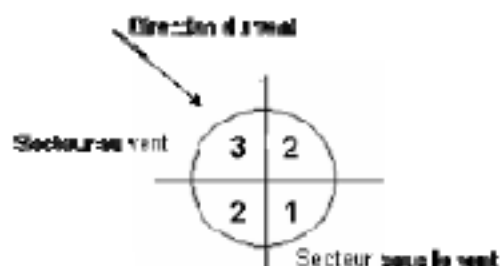
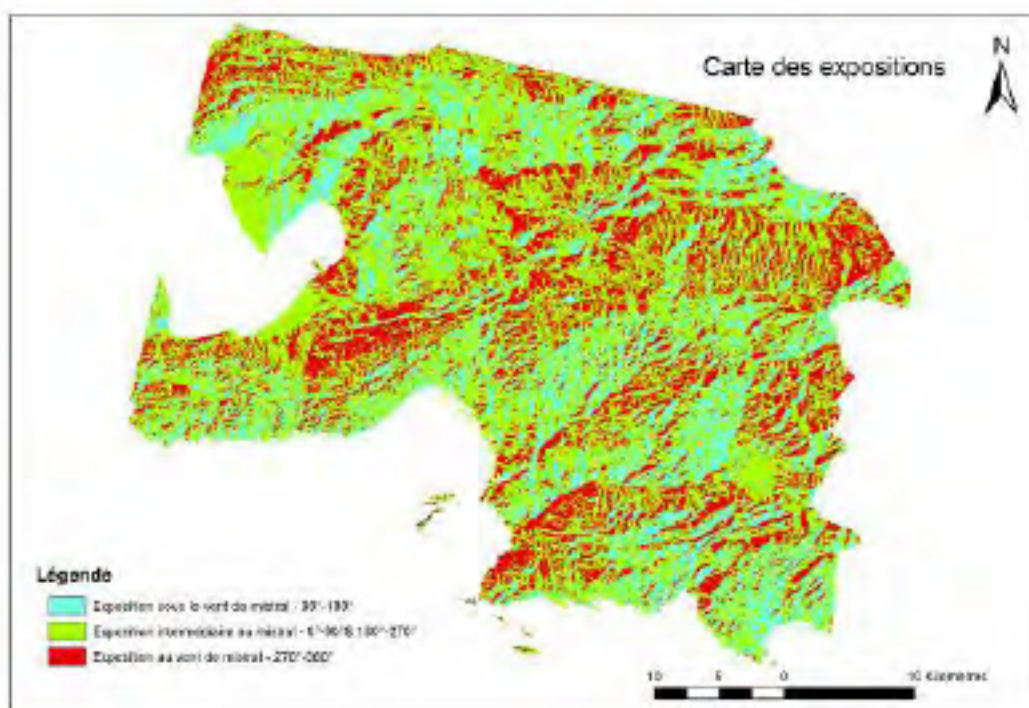


Figure 8-2 Définition des zones exposées au vent dominant (vent de mistral)

Les valeurs d'exposition sont réparties en trois classes d'exposition pour fournir la Carte 8-4 :

- ☞ Exposition sous le vent pour une valeur d'exposition entre 90° et 180° (codé EX1) ;
- ☞ Exposition intermédiaire au vent pour une valeur d'exposition comprise entre 0° et 90° et entre 180° et 270° (codé EX2) ;
- ☞ Exposition au vent pour une valeur d'exposition entre 270° et 360° (codé EX3).



Carte 8-4 Carte des classes d'exposition au vent de mistral sur la zone d'étude MAM

L'indice KR

L'indice KR élaboré par Becker (Becker, 1982) dont la définition et la formule ont été présentées dans le paragraphe 3.1.2e est interprété (Venetier, 2007) comme ci-après.

L'indice KR n'est pas symétrique par rapport à la valeur de référence 1. En raison de l'inclinaison du soleil à la latitude de la zone d'étude, il atteint une valeur maximale de 1,33 en versant sud, lorsque le soleil frappe la pente à la perpendiculaire aux équinoxes. En revanche, un versant nord en pente très forte ne peut quasiment jamais voir le soleil directement même au solstice d'été et ne peut recevoir que la lumière indirecte diffusée par l'atmosphère, et a ainsi une valeur d'indice proche de 0. Cet indice très représentatif du « climat lumineux » d'un site, est une variable importante pour la végétation, influant directement à la fois sur la photosynthèse, *via* l'énergie lumineuse reçue, et sur le micro-climat local. Ainsi les valeurs peuvent être spatialisées et classées en 5 niveaux en conservant 1 comme valeur de référence :

- ☞ Versant très frais pour une valeur d'indice KR inférieure à 0.8 (codé KR1) ;
- ☞ Versant frais pour une valeur d'indice KR comprise entre 0.8 à 0.95 (codé KR2) ;
- ☞ Versant neutre pour une valeur d'indice KR comprise entre 0.95 et 1,05 (codé KR3) ;
- ☞ Versant chaud pour valeur d'indice KR comprise entre 1,05 et 1,15 (codé KR4) ;
- ☞ Versant très chaud pour valeur d'indice KR supérieure à 1,15 (codé KR5).

La Figure 8-3 permet de lire directement la valeur de l'indice KR pour une pente donnée, exprimée en % ou en degré, et une exposition donnée, exprimée en grades.

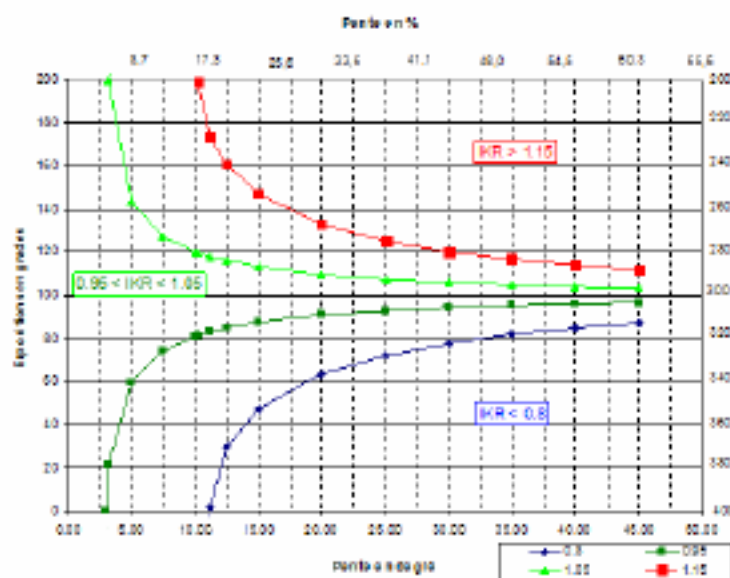


Figure 8-3 Représentation des classes de l'indice KR par rapport à la pente et à l'exposition.

La variable représentée par cet indice a été calculée sur l'ensemble de la zone d'étude MAM, les valeurs obtenues ont été classées selon les 5 niveaux établis ci-dessus et codés de KR1 à KR5. La variable a été représentée spatialement, le résultat figure sur la Carte 3-16.

c. Calcul des variables affectées à chaque unité spatiale

L'intersection de ces données avec les unités spatiales, que sont les types de territoire définis précédemment, a permis d'attribuer un ensemble de variables homogènes pour toutes les unités spatiales définies. Chaque unité spatiale (ou polygone appelé « poly ») est affectée d'un numéro ou identifiant et se voit donc attribuer des valeurs de variables dont l'énumération figure en synthèse dans le Tableau 8-1. Ces valeurs sont calculées en effectuant divers traitements sous SIG à l'aide du logiciel ArcGIS©9.2.

Pour chaque polygone, sont affectées les variables élémentaires suivantes :

- ☞ le périmètre P (en m) du polygone et sa surface S (en m²) ;

Observation : L'indice de forme de Patton étudié lors de la caractérisation de l'habitat en interface (paragraphe 5.1.3.c) n'ayant pas apporté de résultat probant, 3 nouveaux indices de forme ont été calculés pour chaque polygone et ont fait l'objet de l'analyse spatiale. Les définitions étaient les suivantes :

- ☞ la dimension fractale du polygone FD, cet indice sans dimension permet de séparer les polygones de forme circulaire des polygones à géométrie complexe. Il est proche de 1 pour des formes géométriques simples (cercle pour un polygone) et tend vers 2 pour des formes complexes. Il se calcule comme $FD = 2 \ln P / \ln S$ avec $FD \in] 1, 2[$;
- ☞ l'indice de forme du polygone SI, mesure également la complexité d'une forme. Ainsi une valeur de SI égale à 1 correspond à une forme circulaire pour un polygone donné. Cette valeur augmente avec l'irrégularité croissante de la forme. Il se calcule comme P/\sqrt{S} ;
- ☞ le ratio périmètre P du polygone sur surface S du polygone PAR.

Là encore, les résultats n'ont pas apporté d'informations pertinentes, ils n'ont pas été développés dans le rapport de thèse.

Variables relatives aux types de territoire

Chacun des 2 961 polygones (ou unités spatiales) appartient à un type de territoire défini comme une zone d'interface en habitat Isolé I, une zone d'interface en habitat Diffus D, une zone d'interface en habitat Groupé Dense GD, une zone d'interface en habitat Groupé Très Dense GTD, une zone d'habitat en dehors d'une zone d'interface habitat-forêt O ou une zone restante non bâtie de bâtis résidentiels R. Chaque type de territoire constitue une variable qui prend une valeur de 100 % ou 0 % selon que le polygone appartient ou non au type de territoire considéré.

Variables environnementales

Ont été calculées pour les grands thèmes d'occupation du sol :

- ☞ La part du polygone occupée par de l'espace agricole AGR exprimée en % de surface du polygone. Elle est calculée en rapportant la surface de l'espace agricole dans le polygone sur la surface du polygone.

Il est fait de même avec :

- ☞ La part du polygone occupée par de l'espace boisé BOI ;
- ☞ La part du polygone occupée par des autres espaces naturels ESN ;
- ☞ La part du polygone occupée par de l'espace urbain URB ;
- ☞ La part du polygone occupée par de l'espace récréatif CRE.

Ont été calculées pour la végétation :

- ☞ La part du polygone occupée par de la végétation feuillue VG1 exprimée en % de surface du polygone. Elle est calculée en rapportant la surface de la végétation feuillue dans le polygone sur la surface du polygone.

Il en a été fait de même avec :

- ☞ La part du polygone occupée par de la végétation résineuse VG2 ;
- ☞ La part du polygone occupée par de la végétation mixte feuillus-résineux VG3 ;
- ☞ La part du polygone occupée par de la végétation de garrigue VG4 ;
- ☞ La part du polygone occupée par autre chose que de la végétation VG0.

Concernant la structure horizontale de la végétation

- ☞ La part du polygone occupée par un indice d'agrégation nulle AI1 exprimée en % de surface du polygone. Elle est calculée en rapportant la surface couverte par une valeur nulle d'agrégation de la végétation dans le polygone sur la surface du polygone.

Il en a été fait de même avec :

- ☞ La part du polygone occupée par un indice d'agrégation faible AI2 ;
- ☞ La part du polygone occupée par un indice d'agrégation fort AI3.

Variables physiques

Ont été calculées :

- ☞ La part du polygone occupée par un indice KR correspondant à une exposition très fraîche KR1 exprimée en % de surface du polygone. Elle est calculée en rapportant la surface couverte par des valeurs de KR1 dans le polygone sur la surface du polygone.

Il en a été fait de même avec :

- ☞ La part du polygone occupée par une exposition fraîche KR2 ;
- ☞ La part du polygone occupée par une exposition neutre KR3 ;
- ☞ La part du polygone occupée par une exposition chaude KR4 ;
- ☞ La part du polygone occupée par une exposition très chaude KR5.

- ☞ La part du polygone occupée par des pentes de 0 à 10 % PT1 exprimée en % de surface du polygone. Elle est calculée en rapportant la surface couverte par des valeurs de pentes de 0 à 10 % dans le polygone sur la surface du polygone.

Il en a été fait de même avec :

- ☞ La part du polygone occupée par des pentes de 10 à 20 % PT2 ;
- ☞ La part du polygone occupée par des pentes de 20 à 30 % PT3 ;
- ☞ La part du polygone occupée par des pentes supérieures à 30 % PT4.

La pente moyenne du polygone a également été calculée selon la formule :

$$[(PT1*5) + (PT2*15) + (PT3*25) + (PT4*35)] / 100.$$

Les valeurs respectives de 5, 15, 25 et 35 correspondent à la valeur du milieu de chaque classe de pente.

- ☞ La part du polygone, occupée par des expositions sous le vent (90-180°) EX1 exprimée en % de surface du polygone. Elle est calculée en rapportant la surface couverte par des valeurs d'expositions sous le vent (90-180°) dans le polygone sur la surface du polygone.

Il en a été fait de même avec :

- ☞ La part du polygone occupée par des expositions intermédiaires (0-90°; 180-270°) EX2 ;
- ☞ La part du polygone occupée par des expositions au vent (270-360°) EX3.

Enfin a été calculée la valeur médiane de l'altitude ALT au sein de chaque polygone.

Variables socio-économiques

Ont été calculées :

- ☞ la densité du bâti DB, exprimée en nombre de bâtis résidentiels/km². Elle est calculée en comptabilisant le nombre de bâtis dont le centroïde se trouve dans le polygone et en divisant par la surface du polygone ;
- ☞ la densité de routes DR, exprimée en linéaires de routes en km/km². Elle est calculée en comptabilisant le linéaire de routes se trouvant dans le polygone et en divisant par la surface du polygone ;
- ☞ la densité de chemins DC, exprimée en linéaires de chemins en km/km². Elle est calculée en comptabilisant le linéaire de chemins se trouvant dans le polygone et en divisant par la surface du polygone ;
- ☞ la densité moyenne de population DP est calculée en considérant la somme des populations (valeurs 1999) des communes intersectant un polygone donné divisée par la somme des surfaces des mêmes communes. Une valeur moyenne de densité de population est ainsi attribuée à chaque polygone.

Deux variables complémentaires ont été calculées :

- ☞ La distance (médiane) du (des) point(s) d'éclosion au chemin le plus proche DiC a été calculée dans chaque polygone contenant un ou plusieurs points de départ de feu ;
- ☞ La distance (médiane) du (des) point(s) d'éclosion à la route la plus proche DiR a été calculée dans chaque polygone contenant un ou plusieurs points de départ de feu.

8.2.3. *Matrice d'analyse*

La base de données élaborée (Tableau 8-1) comporte 2 961 lignes et 42 colonnes. Comme l'exprime Sanders (1989), face à la matrice constituée d'autant de lignes que d'unités spatiales et de colonnes que de variables choisies, le géographe souhaite extraire deux types d'informations complémentaires, l'une issue de l'analyse des colonnes et l'autre de celle des lignes :

- ☞ Les colonnes décrivent des répartitions géographiques ;

L'analyse univariée permet de décrire chacune des variables, d'analyser leur organisation dans l'espace et de rendre compte de la nature des différenciations introduites par chacun des phénomènes étudiés. L'analyse multivariée permet une analyse qui passe par une confrontation des différentes distributions qui permettra de découvrir des régularités, d'analyser de façon précise les interrelations entre les variables sélectionnées, d'essayer de mettre en évidence des combinaisons plus ou moins systématiques de variables et de dégager des composantes qui structurent l'espace géographique étudié.

- ☞ Les lignes caractérisent chaque unité géographique par rapport à un ensemble d'indicateurs.

Acronyme	Libellé	Unité
Variables à expliquer liées au risque d'incendie		
DE	Densité d'éclosion : Nombre de points d'éclosion sur la surface du polygone sur la période 1997-2007	éclos/1000 ha
DI	Densité d'incendie : Nombre d'incendies de forêt cumulé sur la période 1990-2007 ayant parcouru le polygone sur la surface du polygone	feux/1000h a
SB	Surface du polygone parcourue par un (ou plusieurs) feu(x) sur la période 1990-2007 (% de surface du polygone)	%
Variables explicatives relatives aux types de territoire		
I	Zone d'interface en habitat isolé (0 ou 100 % du polygone)	%
D	Zone d'interface en habitat diffus (0 ou 100 % du polygone)	%
GD	Zone d'interface en habitat groupé dense (0 ou 100 % du polygone)	%
GTD	Zone d'interface en habitat groupé très dense (0 ou 100 % du polygone)	%
O	Zone d'habitat en dehors d'une zone d'interface (0 ou 100 % du polygone)	%
R	Zone qui constitue le reste du territoire situé à plus de 100 m de tout bâti résidentiel (0 ou 100 % du polygone)	%
Variables explicatives relatives à l'environnement écologique et topographique		
AGR	Espaces agricoles (% de surface du polygone)	%
BOI	Espaces boisés (% de surface du polygone)	%
ESN	Autres espaces naturels (% de surface du polygone)	%
URB	Espaces urbains (% de surface du polygone)	%
CRE	Espaces récréatifs (% de surface du polygone)	%
Vg0	Autre que les classes Vg1 à Vg4 définies ci-après	%
Vg1	Feuillus (% de surface du polygone)	%
Vg2	Résineux (% de surface du polygone)	%
Vg3	Mélange Feuillus et résineux ((% de surface du polygone)	%
Vg4	Garrigue (% de surface du polygone)	%
AI1	Agrégation nulle de la végétation (% de surface du polygone)	%
AI2	Agrégation faible de la végétation (% de surface du polygone)	%
AI3	Agrégation forte de la végétation (% de surface du polygone)	%

Tableau 8-1 Définition des variables calculées pour chaque polygone de la zone d'étude

KR1	Exposition très fraîche (% de surface du polygone)	%
KR2	Exposition fraîche (% de surface du polygone)	%
KR3	Exposition neutre (% de surface du polygone)	%
KR4	Exposition chaude (% de surface du polygone)	%
KR5	Exposition très chaude (% de surface du polygone)	%
PT1	Surface occupée par des pentes de 0 à 10 % (% de surface du polygone)	%
PT2	Surface occupée par des pentes de 10 à 20 % (% de surface du polygone)	%
PT3	Surface occupée par des pentes de 20 à 30 % (% de surface du polygone)	%
PT4	Surface occupée par des pentes supérieures à 30 % (% de surface du polygone)	%
PTm	Pente moyenne du polygone calculée comme $[(Pt1*5) + (Pt2*15) + (Pt3*25) + (Pt4*35)] / 100$	%
EX1	Surface occupée par des expositions sous le vent (90-180 °) (% de surface du polygone)	%
EX2	Surface occupée par des expositions intermédiaires (0-90 °; 180-270 °) (% de surface du polygone)	%
EX3	Surface occupée par des expositions au vent (270-360 °) (% de surface du polygone)	%
ALT	Altitude médiane observée dans le polygone	m
Variables explicatives socio-économiques		
DB	Densité de bâtis : Nombre total de bâtis rapporté à la surface du polygone	nb/km ²
DR	Densité de routes : Nombre total de routes rapporté à la surface du polygone	km/km ²
DC	Densité de chemins : Nombre total de chemins rapporté à la surface du polygone	km/km ²
DP	Densité de population : Nombre d'habitants (INSEE99) de communes divisé par la surface de ces communes	hab/ha
DiC	Distance (médiane) du (des) point(s) d'éclosion au chemin le plus proche	m
DiR	Distance (médiane) du (des) point(s) d'éclosion à la route la plus proche	m

Tableau 8-1 Définition des variables calculées pour chaque polygone de la zone d'étude (suite)

8.3 Différenciation des types de territoire par une analyse de l'occupation du sol

Une analyse univariée a été développée pour chaque variable étudiée définie dans le paragraphe précédent, au sein de chaque type de territoire. Son objectif est d'essayer de mieux connaître les caractéristiques qui composent l'environnement naturel et humain de chaque type de territoire, mais il est surtout de voir si ces caractéristiques diffèrent selon le contexte observé de risque d'incendie. Des conditions particulières d'occupation du sol sont-elles davantage propices aux départs de feu, à la présence d'incendies ou à des taux de surfaces brûlés plus ou moins importants ?

8.3.1. *Caractéristiques d'occupation du sol dégagées par type de territoire*

Au sein de chaque type de territoire représenté sur l'ensemble de la zone d'étude (isolé I, diffus D, groupé dense GD, groupé très dense GTD, zone bâtie hors interface habitat-forêt O et zone restante non bâtie de bâtis résidentiels R), chaque variable, définie dans le paragraphe précédent, a été analysée.

Le Tableau 8-2 affiche les valeurs des médianes, moyennes, écart-types et coefficients de variation de chaque variable étudiée au sein de chacun des 6 types de territoire. La taille des 6 échantillons constitués des polygones ou unités spatiales appartenant à chacun de ces 6 types de territoire varie de 1 086 à 186 polygones. Pour tester si les différences, observées pour chacune des variables étudiées entre les 6 types de territoire, étaient significatives, ou non, le test non paramétrique de Kruskal-Wallis a été choisi de façon quasi générale, la majorité des variables analysées ne suivant pas une loi normale. En complément, les boîtes à moustache représentant l'encoche sur la médiane et le graphique des médianes avec intervalle de confiance à 95 %, ont permis de préciser pour quels types de territoire ces différences étaient significatives.

Dans ce même Tableau 8-2, les valeurs qui sont significativement différentes des autres ne sont pas surlignées d'une couleur. Les valeurs surlignées d'une même couleur ne sont significativement pas différentes entre elles mais sont significativement différentes des autres. Les boîtes à moustache des Figures 1 à 9 de l'annexe F permettent de visualiser la distribution des valeurs des variables étudiées dans chacun des 6 échantillons des types de territoire.

Echantillons	I	D	GD	GTD	O	R	K-Wallis	Probabilité	Dif.signif
Taille-échantillon	1086	728	323	226	412	186			
DE	0 - 7,6 (46) 605%	0 - 7,4 (35) 473%	0 - 6 (27) 450%	0 - 3,4 (11) 323%	0 - 0,7 (12) 1714%	0 - 2,3 (46) 2000%	99,1312	0.0	OUI
DI	0 - 44 (133) 302%	0 - 26 (129) 496%	0 - 20 (69) 345%	0 - 5 (16) 320%	0 - 3 (22) 733%	0 - 1 (11) 1100%	65,1607	1,03E-12	OUI
SB (%)	0 - 27 (41) 152%	0 - 21 (35) 167%	0 - 14 (26) 186%	0 - 9 (20) 222%	0 - 1 (8) 800%	0 - 7 (20) 285%	230,46	0.0	OUI
AGR (%)	25-32 (31) 97%	28- 31 (26) 84%	14-18 (18) 100%	11 - 13 (11) 85%	64- 56 (33) 59%	21-37 (37)100%	291.006	0.0	OUI
BOI (%)	26-33 (31) 94%	25- 30 (25) 83%	31- 33 (24) 73%	18 - 20 (14) 70%	0- 5 (8) 160%	11-25 (30) 120%	472.93	0.0	OUI
ESN (%)	6-20 (27) 135%	7- 16 (21) 131%	4- 12 (19) 158%	3 - 7 (10) 143%	0- 5 (15) 300%	0-6 (28) 467%	220.575	0.0	OUI
URB (%)	7-13 (19) 118%	15- 22 (19) 87%	27- 33 (22) 67%	58 - 57 (16) 28%	23- 34 (31) 91%	3-0 (33) ND%	838.45	0.0	OUI
CRE (%)	0- 1 (8) 800%	0- 2 (7) 350%	0- 3 (10) 333%	0 - 2 (7) 350%	0- 1 (5) 500%	0-2 (11) 550%	272.226	0.0	OUI
DB (nb bâtis/km2)	36-41 (27) 66%	79- 94 (57) 61%	115-131(87)66%	398-394(124)31%	50-103(143)139%	0- 0 (0) ND%	1918.38	0.0	OUI
DC (km/km2)	7- 7 (5) 71%	7- 7 (4) 57%	6- 6 (3) 50%	5- 5 (3) 60%	5- 5 (4) 80%	4- 5 (5) 100%	197.62	0.0	OUI
DR (km/km2)	1- 3 (5) 167%	4- 5 (5) 100%	6- 8 (6) 75%	11- 12 (4) 33%	5- 7 (7) 100%	2- 4 (5) 125%	618.274	0.0	OUI
DP (nb hab/ km2)	1,9-4 (7) 175%	2,1- 5 (8) 160%	3- 10 (13) 130%	2,4- 9 (12) 133%	1,6- 4 (7) 175%	7,2-11(13) 118%	109.982	0.0	OUI
EX1 (%)	7-23 (29) 126%	12-24 (29) 121%	15-23 (24) 104%	23 -26 (23) 88%	6-23 (31) 135%	12-21 (26) 124%	32.553	0.0000046	OUI
EX2 (%)	52-52 (30) 58%	51- 51 (27) 53%	51- 51 (23) 45%	52- 51 (19) 37%	56- 54 (31) 57%	53- 53 (26) 49%	3.92898	0.559686	NON
EX3 (%)	14-25 (30) 120%	15-25 (28) 112%	20- 26 (25) 96%	19 - 23 (22) 96%	6- 23 (30) 130%	16-26 (28) 108%	20.0342	0.0012314	OUI
PT1 (%)	100-82 (28) 34%	96-82 (25) 30%	87-78 (26) 33%	89 -84 (18) 21%	100-98 (10) 10%	100-86 (23) 27%	354.228	0.0	OUI
PT2 (%)	0-15 (23) 153%	4-16 (22) 137%	13-19 (21) 110%	10 -15 (16) 107%	0-1 (8) 800%	0-12 (19) 158%	355.523	0.0	OUI
PT3 (%)	0-2 (8) 400%	0-2 (7) 350%	0-3 (8) 267%	0 -1 (3) 300%	0-0 (3) ND%	0-2 (6) 300%	133.101	0.0	OUI
PT4 (%)	0-0 (3) ND%	0-0 (2) ND%	0-0 (2) ND%	0 -0 (0) ND%	0-0 (1) ND%	0-0 (3) ND%	20.0412	0.0012277	OUI
PTm (%)	5-7 (3) 43%	5-7 (3) 43%	6-8 (3) 38%	6 -7 (2) 28%	5-5 (1) 20%	5-7 (3) 43%	357.192	0.0	OUI
ALT (m)	206-206(120)58%	194-192(106) 55%	171-172 (99) 58%	156-164 (98) 60%	118-122 (97) 80%	182-166(104) 63%	178.478	0.0	OUI
KR1 (%)	0-1 (6) 600%	0 -1 (6) 600%	0-3 (9) 300%	0 -1 (3) 300%	0-0 (3) ND%	0-2 (7) 350%	154.69	0.0	OUI
KR2 (%)	0-14 (23) 164%	4 -14 (20) 143%	8-15 (19) 127%	8 -12 (14) 117%	0-2 (9) 450%	0-12 (18) 150%	232.411	0.0	OUI
KR3 (%)	57-56 (35) 63%	55 -56 (32) 57%	50-51 (22) 43%	55 -54 (24) 44%	100 -91 (20) 22%	76 -67 (32) 48%	487.162	0.0	OUI
KR4 (%)	8-22 (27) 123%	15 -22(25) 114%	20-24 (23) 96%	23 -27 (21) 78%	0-6 (15) 250%	8-16 (21) 131%	299.188	0.0	OUI
KR5 (%)	0-6 (16) 267%	0 -6 (14) 233%	0-7 (14) 200%	1 -5 (9) 180%	0-1 (3) 300%	0-4 (9) 225%	216.828	0.0	OUI
VG0 (%)	67-63 (28) 44%	70 -67 (23) 34%	66-64 (22) 34%	76 -74 (13) 18%	97-95 (6) 6%	87 -73 (30) 41%	666.235	0.0	OUI
VG1 (%)	0-2 (5) 250%	0 -2 (4) 200%	0-1 (3) 300%	0 -1 (1) 100%	0-0 (1) ND%	0-1 (4) 400%	125.076	0.0	OUI
VG2 (%)	1-5 (10) 200%	2 -5 (8) 160%	3-8 (11) 137%	3 -5 (6) 120%	0-0 (1) ND%	0-4 (10) 250%	540.017	0.0	OUI
VG3 (%)	6-15 (20) 133%	7 -13 (15) 115%	9-14 (15) 107%	6 -8 (8) 100%	0-1 (2) 200%	3-13 (21) 161%	525.281	0.0	OUI
VG4 (%)	11-14 (13) 93%	10 -13 (10) 77%	12-14 (8) 57%	12 -12 (5) 42%	2-3 (4) 133%	5-9 (11) 122%	596.471	0.0	OUI
AI1 (%)	40-42 (32) 76%	41 -42 (26) 62%	33 -37 (16) 43%	35 -37 (16) 43%	85-81 (17) 21%	69-59 (34) 58%	633.589	0.0	OUI
AI2 (%)	35-34 (19) 56%	38 -38 (16) 42%	45 -44 (14) 32%	50 -49 (12) 24%	12-16 (15) 94%	18-22 (17) 77%	707.984	0.0	OUI
AI3 (%)	17-23 (21) 91%	15 -20 (16) 80%	18 -22 (16) 73%	13 -15 (8) 53%	3-3 (3) 100%	7-19 (25) 131%	619.823	0.0	OUI

Tableau 8-2 Valeurs de la médiane – moyenne (écart-type) CV % dans la comparaison des 6 types de territoire

a. Résultats par grands types de variables

Pour la moitié des variables, les valeurs au sein de chaque type de territoire sont peu hétérogènes (coefficient de variation $CV < 100\%$). Certaines variables dont la valeur de la médiane est proche de la valeur moyenne, ont par ailleurs une distribution symétrique par rapport à cette moyenne. Les valeurs qui sont rappelées dans le texte sont des valeurs moyennes accompagnées de leur coefficient de variation.

Pour les variables relatives au risque d'incendie.

Pour chacune des variables étudiées, densité d'éclosion DE, densité d'incendie DI et taux de surfaces brûlées SB, la différence sur les valeurs entre les 6 échantillons est statistiquement différente (valeurs de probabilité du test de $KW < 0,05$). L'examen des boîtes à moustaches n'a pas permis de voir les encoches des médianes et d'identifier quelles étaient les valeurs significativement différentes pour une variable donnée entre les 6 types de territoire (Figure 1 de l'Annexe F). Le test non-paramétrique complémentaire de Mann-Whitney a donc été réalisé comparant deux à deux les échantillons pour chacune des trois variables étudiées.

Au sein des interfaces habitat-forêt (types I, D, GD et GTD), les variables densité d'incendie DI et taux de surfaces brûlées SB ne sont statistiquement pas différentes alors que la variable densité d'éclosion DE diffère statistiquement - les valeurs médianes des types D, GD (couleur violette), I (couleur jaune) et GTD (sans couleur) sont statistiquement différentes. Avec les autres types de territoire, les variables DI et SB sont statistiquement différentes alors que la variable DE s'apparente tantôt au type O, tantôt au type R.

Ceci dit on observe un très fort coefficient de variation sur l'ensemble des valeurs observées (jusqu'à 2000%). Les valeurs médianes et moyennes des variables ne sont pas proches, leur distribution n'est donc pas symétrique à la moyenne. Il est donc difficile d'extraire une information pertinente. Seules quelques tendances peuvent être observées. Ainsi les valeurs moyennes des trois variables DE, DI et SB diminuent des types d'interface isolé I, diffus D, groupé dense GD à groupé très dense GTD, puis aux zones d'habitat en dehors des interfaces habitat-forêt O. Ce sont les interfaces habitat-forêt de type isolé I et diffus D qui présentent à la fois les plus fortes densités de départs de feu et d'incendie ainsi que le taux le plus élevé de surfaces brûlées.

Les variables, distance médiane du (des) point(s) d'éclosion au chemin le plus proche DiC et distance médiane du (des) point(s) d'éclosion à la route la plus proche DiR, n'ont pas été analysées précisément dans cette approche univariée. En effet leurs valeurs n'ont été calculées que dans les unités spatiales qui contenaient au moins un point d'éclosion, dans les unités spatiales qui ne contenaient pas de point d'éclosion une valeur de 1000 m a été affectée par défaut. Cependant sur les seuls polygones contenant au moins un point d'éclosion, la moyenne des distances médianes des points à la route la plus proche est de 73 m ($CV = 121\%$) et celle des points au chemin le plus proche est de 47 m ($CV = 89\%$).

Pour les variables relatives à la topographie, l'exposition. Au sein des interfaces, les pentes inférieures à 10% PT1 sont majoritaires à environ 80%. Les zones à faible pente PT1 inférieure à 10% sont quasiment toujours présentes dans les types R et O (86 à 98%). Les zones à forte pente PT2, PT3 et PT4 sont peu représentées sur la zone d'étude. Les quelques pentes PT2 de 10 à 20% sont davantage représentées dans les interfaces de types GD, D puis GTD et I. La pente moyenne PTm reste globalement faible, inférieure à 10% en cohérence avec les résultats précédents.

La répartition des expositions au vent de mistral (EX1, EX2 et EX3) est en moyenne peu différente quelque soit le type de territoire : un quart exposé sous le vent, la moitié en

exposition intermédiaire et le quart restant exposé au vent. La variable, exposition intermédiaire au vent EX2, n'est d'ailleurs pas significativement différente entre les types de territoire.

L'altitude médiane ALT est la plus faible en zone habitée en dehors des interfaces habitat-forêt O (122 m). Elle varie faiblement de 164 à 172 m pour R, GTD, GD et de 192 m et 206 m pour D et I.

Les expositions à l'ensoleillement conduisant à des situations très fraîches KR1 et des situations très chaudes KR5 sont très faiblement représentées sur la zone d'étude. La proportion médiane reste autour de 0 et la moyenne n'atteint guère plus de 7 %. La proportion de situation neutre KR3 est plus marquée : prépondérante dans O (91 %), importante dans R (67 %), elle atteint 51 à 56 % dans les interfaces habitat-forêt. Les écarts apparaissent davantage sur les valeurs intermédiaires : les expositions moyennement fraîches KR2 et moyennement chaudes KR4 sont davantage représentées dans les interfaces de types GD et GTD (39 %) que dans les types O et R. Les types I et D possèdent des valeurs intermédiaires avec 14 % à 22 %.

Pour les variables relatives à l'occupation humaine. La densité de bâtis DB varie de façon significative selon les 6 types de territoire. Nulle pour les zones restantes non bâties de bâtis résidentiels R, elle augmente de l'interface habitat-forêt de type isolé I au type groupé très dense GTD : d'une valeur moyenne de 41 bâtis par km² (CV = 60 %) en isolé I, elle est 2,3 fois plus grande en diffus D (94 bâtis/km², CV = 61 %), 3,2 fois plus grande en groupé dense GD (131 bâtis/km², CV = 66 %), et 9,6 fois plus grande en groupé très dense GTD (394 bâtis/km², CV = 31 %). Cette valeur est relativement faible pour les zones bâties en dehors des interfaces habitat-forêt O (101 bâtis/km², CV = 139 %), située entre les valeurs des types interface en habitat isolé I et diffus D. La densité des routes DR évolue de façon parallèle à celle du bâti. Faible dans les interfaces en habitat isolé I (3 km/km², CV = 167 %) et dans les zones restantes non bâties de bâtis résidentiels R (4 km/km², CV = 125 %), elle augmente des types D, O, GD à GTD où elle est la plus forte avec une valeur de 12 km/km² (CV = 33 %). Inversement la densité des chemins DC qui a une valeur semblable pour les interfaces en habitat isolé I, diffus D et groupé dense GD avec 6 à 7 km/km² (CV de 50 % à 71 %) diminue pour les interfaces en habitat groupé très dense GTD, en O et R (5 km/km², CV de 50 % à 71 %).

Au sein des interfaces habitat-forêt, la densité de population augmente d'une valeur de 4 à 5 habitants/km² pour I et D (CV de l'ordre de 170 %), à une valeur de 9 à 10 habitants/km² pour GD et GTD (CV de l'ordre de 130 %). Elle est de 4 habitants/km² pour les zones d'habitat en dehors des interfaces habitat-forêt O (CV de 175 %). Cette densité présente une valeur anormale sur les zones restantes non bâties de bâtis résidentiels R qui par construction sont dépourvues de zones bâties et donc de population (11 habitants/km², CV = 118 %). Ce résultat aberrant traduit probablement un biais dans le mode de calcul très global de la variable.

Concernant la nature de l'occupation du sol dans chacun des types de territoire, on constate que la part de l'espace agricole AGR est comparable dans les interfaces en habitat isolé I et diffus D de l'ordre de 30 %, puis dans les interfaces en habitat groupé dense GD et groupé très dense GTD de l'ordre de 15 %. Cette part augmente dans le type R et prédomine dans le type O (55 %).

Les zones boisées BOI et autres espaces naturels ESN occupent plus de 50 % de la surface en interface habitat-forêt isolé I et un peu moins de la moitié (45 %) en interface habitat-forêt diffus D et groupé dense GD. Elles représentent 41 % des types de territoire R. En revanche la part de ces espaces naturels (BOI + ESN) diminue nettement dans les interfaces habitat-forêt

de type groupé très dense GTD (27 %) ainsi que dans les zones bâties en dehors des interfaces O (10 %).

L'espace occupé par les zones urbaines URB augmente au sein des interfaces habitat forêt occupant 13 % de l'environnement en habitat isolé, à 22 % en habitat diffus, à environ un tiers en habitat groupé dense (34 %) et plus de la moitié en habitat groupé très dense (58 %). La part occupée par les zones urbaines URB est comparable dans les interfaces habitat forêt de type groupé dense et dans les zones bâties en dehors des interfaces O (34 %). Elle est comparable dans les interfaces habitat forêt de type diffus et dans les zones non bâties R (20 %).

Enfin la part d'espace récréatif CRE même si elle est statistiquement différente selon les types de territoire n'est pas représentative occupant en moyenne 1 à 3 % de la surface.

Pour les variables relatives à la végétation. La composition de la végétation au sein des interfaces habitat-forêt ne varie pas dans l'ensemble. La part de végétation feuillue VG1 est très faible variant de 3 % à 6 %. La part des peuplements résineux VG2 et des peuplements mixtes VG3 représente un peu plus de la moitié des surfaces d'espaces naturels (50 à 59 %). Les garrigues VG4 occupent 38 % à 46 %, elles sont le plus représentées en interface en habitat groupé très dense GTD. En dehors des interfaces, c'est la garrigue VG4 qui domine à 75 % dans les zones bâties O et qui occupe un tiers de la surface d'espaces naturels dans les zones non bâties R. La part des peuplements résineux VG2 et mixtes VG3 représente 25 % dans les zones bâties O et presque la moitié de la surface d'espaces naturels dans les zones non bâties R alors que la part de la végétation feuillue VG1 est faible à nulle.

Enfin la part de non végétation VG0 représente les 2/3 aux 3/4 des surfaces des interfaces habitat forêt (I, D, GD et GTD) et plus des 3/4 en dehors des interfaces (O et R). La répartition des valeurs d'agrégation de la végétation varie très peu entre les types d'interfaces avec 37 % à 43 % de valeurs nulles de l'indice d'agrégation AI1 de la végétation, 34 % à 48 % de valeurs faibles AI2 et 15 % à 23 % de valeurs fortes AI3. En dehors des interfaces, la valeur nulle de l'indice d'agrégation AI1 de la végétation occupe plus de 80 % des zones bâties O alors que l'agrégation forte AI3 est peu représentée. Cette valeur nulle AI1 occupe 59 % des zones non bâties R alors que les agrégations faible AI2 et forte AI3 représentent chacune environ 20 %.

Observation :

On ne trouve pas une correspondance parfaite entre la proportion des valeurs nulles de l'indice d'agrégation AI1 et le part de non végétation VG0. De même on ne trouve pas une correspondance parfaite entre les valeurs non nulles d'indice et les parts occupées par de la végétation (VG1 à VG4) comme avec les parts occupées par les espaces naturels (ESN+BOI).

- La surface occupée par une valeur nulle de l'indice d'agrégation AI1 sera en général moins importante que celle occupée par une surface de non végétation VG0. En effet une part des espaces de non végétation est prise en compte dans l'indice d'agrégation faible, quand ces espaces constituent des zones tampons avec des espaces boisés (cf.Figure 5-30).
- De même, la surface occupée par une valeur forte de l'indice d'agrégation AI3 sera en général moins importante que celle occupée par une surface non végétation (VG1 à VG4). En effet une part des espaces de végétation est prise en compte dans l'indice d'agrégation faible, quand ces espaces constituent des zones tampons avec des espaces non boisés (cf.Figure 5-30).
- Dans les espaces urbains URB on trouve des espaces occupés par de la végétation de type haies, alignement d'arbres, etc... qui sont pris en compte dans l'indice d'agrégation non nul mais pas dans les espaces naturels (ESN + BOI).

b. *Carte d'identité des types de territoire*

La carte d'identité de chaque type de territoire est représentée sur la Figure 8-4. Les valeurs moyennes de chacune des grandes catégories de variables étudiées sur la zone d'étude entre les Métropoles Aix-en-Provence Marseille MAM sont données par type de territoire, essentiellement issues du Tableau 8-1 :

- La densité moyenne des bâtis DB et coefficient de variation, en nombre de bâtis/km² ;
- La densité moyenne des routes DR et coefficient de variation, en km/km² ;
- La densité moyenne des chemins DC et coefficient de variation, en km /km² ;
- La pente moyenne PTm et coefficient de variation, en % ;
- L'altitude moyenne ALT et coefficient de variation, en m ;
- La surface moyenne à débroussailler par bâti (SD) et coefficient de variation, en ha/bâti, issue du Tableau 5-21
- Le périmètre moyen à protéger par bâti (PP) et coefficient de variation, en m/bâti, issue du Tableau 5-21
- Répartition moyenne des types d'occupation du sol (OCCSOL) : espace agricole-AGR, espace urbain-URB, espace récréatif-CRE, espace boisé-BOI, autres espaces naturels-ESN ;
- Répartition moyenne des valeurs de l'indice d'agrégation de la végétation (AI) : agrégation nulle AI1, agrégation faible AI2, agrégation forte AI3 ;
- Répartition moyenne des valeurs de l'indice KR : versant très frais KR1, versant frais KR2, versant neutre KR3, versant chaud KR4, versant très chaud KR5 ;
- Répartition moyenne des types de végétation (VG) : végétation feuillue VG1, végétation résineuse VG2, mélange feuillus-résineux VG3, garrigues VG4 ;

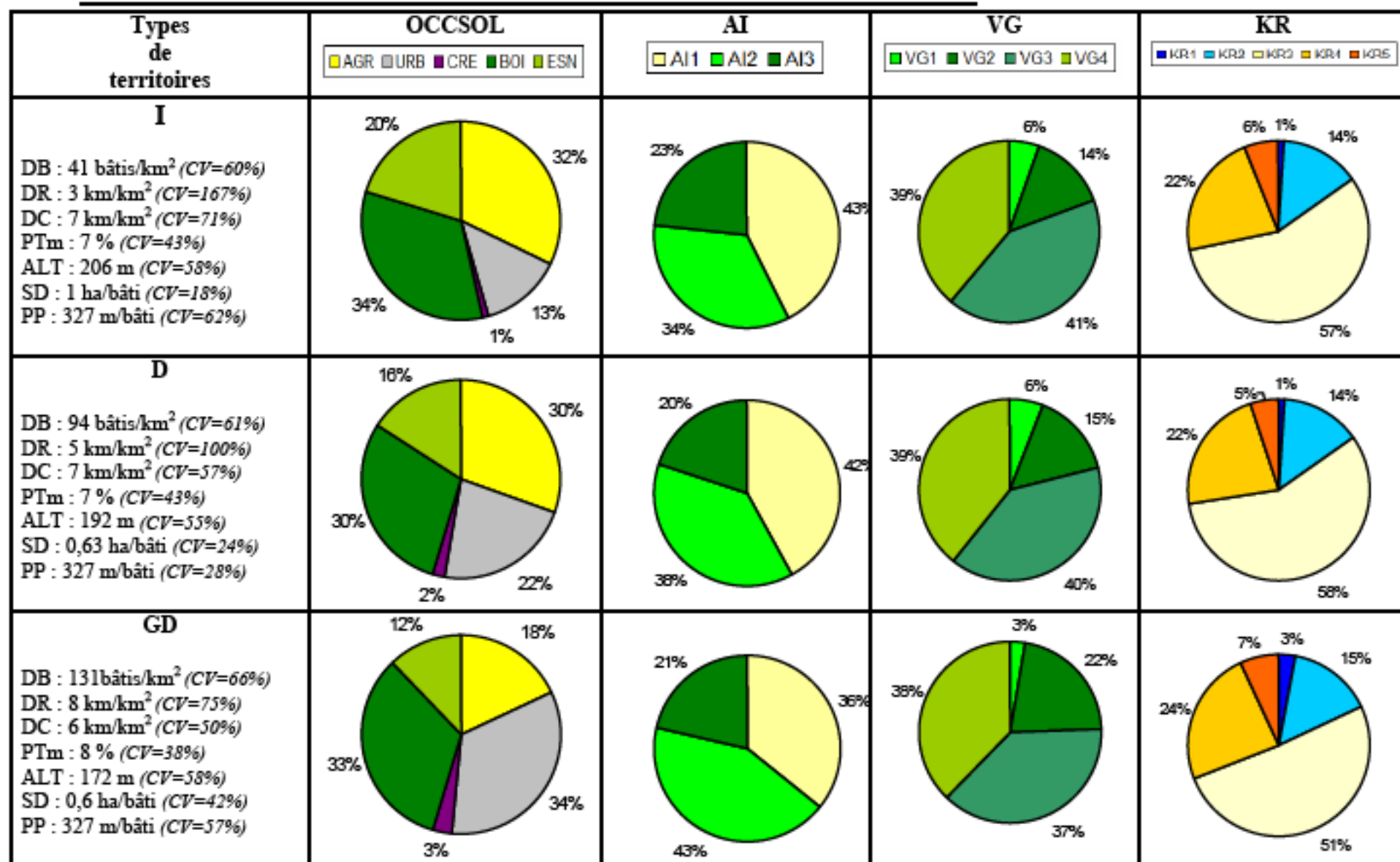


Figure 8-4 Carte d'identité des types de territoire sur la zone d'étude (Valeurs moyennes et coefficient de variation en % pour certaines variables)

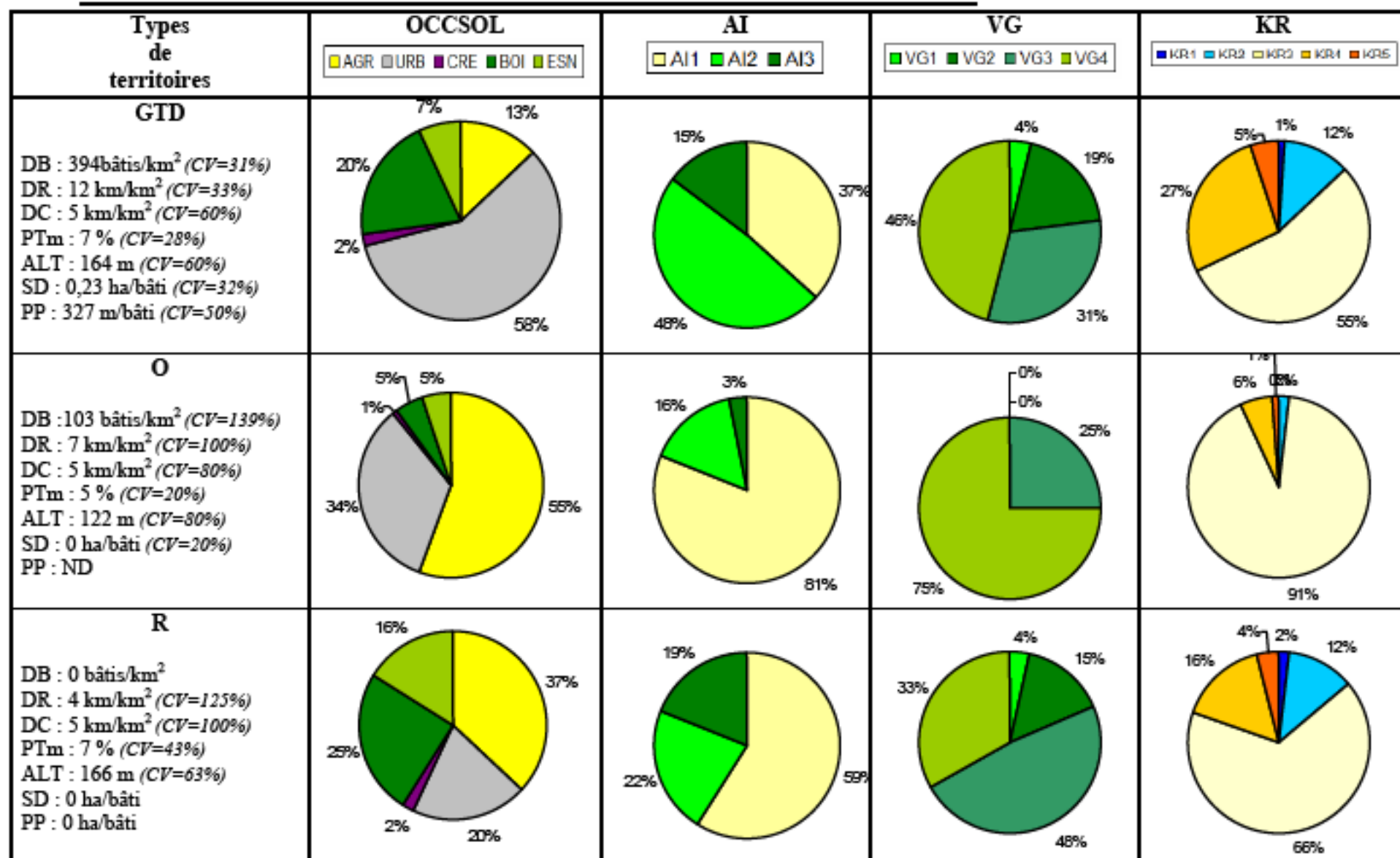


Figure 8-4 Carte d'identité des types de territoire sur la zone d'étude (Valeurs moyennes et coefficient de variation en % pour certaines variables) suite

8.3.2. Caractéristiques d'occupation du sol par type de territoire exposé au risque d'incendie

L'analyse univariée sur les variables densité d'éclosion DE, densité d'incendie DI et taux de surfaces brûlées réalisée sur l'ensemble des 2 961 unités spatiales ou polygones de la zone d'étude n'a pas apporté d'information pertinente. En effet les coefficients de variation qui oscillent entre 300 % et 2000 % montrent une grande hétérogénéité dans les distributions de variables. Aussi cette analyse a été reproduite sur des ensembles plus restreints de polygones afin de mieux définir l'environnement des polygones soumis au risque d'incendie.

Ainsi dans un **premier temps**, l'analyse a consisté à comparer les polygones à densité d'éclosion DE non nulle avec ceux ayant une densité d'éclosion nulle, puis à comparer les polygones à faible densité d'éclosion avec ceux à forte densité d'éclosion.

Dans leur analyse sur l'occurrence des feux, Martinez et *al.* (2009) ont enlevé de leur champ d'étude les communes n'ayant pas eu de feux durant la période d'analyse et ont supprimé des valeurs intermédiaires d'occurrence de façon à avoir plus de contrastes sur les situations analysées et à faciliter l'interprétation des résultats. Ainsi l'analyse a consisté à comparer seulement les 2/3 des polygones à DE non nulle de façon à mieux discriminer les conditions de faible densité d'éclosion DE et de forte densité d'éclosion, tout en préservant un nombre suffisant d'observations. Dans un **deuxième temps**, l'analyse a porté sur la variable densité d'incendie DI en procédant comme pour l'analyse de la densité d'éclosion DE présentée ci-dessus. Enfin, dans un **troisième temps**, l'analyse a porté sur la variable taux de surfaces brûlées SB en procédant comme pour les deux variables précédentes DE et DI.

Dans chacun des cas étudiés, pour la moitié des variables, les valeurs au sein de chaque modalité sont peu hétérogènes (coefficient de variation CV < 100 %). Certaines variables dont la valeur de la médiane est proche de la valeur moyenne, ont par ailleurs une distribution symétrique par rapport à cette moyenne.

a. Caractéristiques des polygones par rapport à la densité d'Éclosion DE

On dénombre 192 polygones pour lesquels la densité d'éclosion est non nulle et 2 769 polygones pour lesquels la densité d'éclosion est nulle qui se répartissent selon les types de territoire comme illustré sur la Figure 8-5.

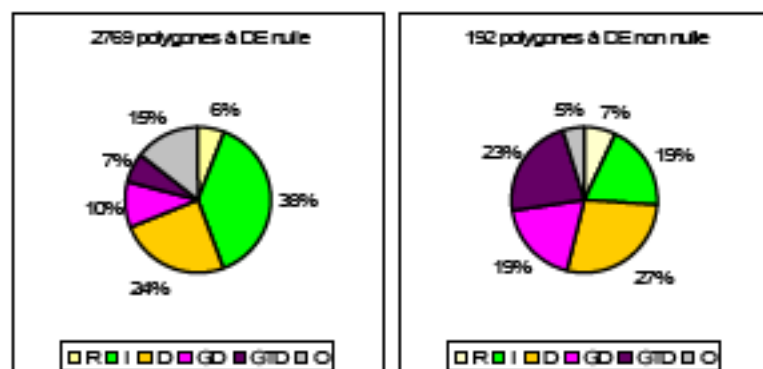


Figure 8-5 Répartition des polygones selon les types de territoire dans chacune des deux échantillons (DE)

La répartition des polygones à densité d'éclosion DE non nulle montre que l'effectif des polygones est réparti de façon équilibrée entre les types de territoire isolé I, diffus D, groupé

dense GD et groupé très dense GTD avec 46 % de polygones à faible densité de bâtis DB (isolé I et diffus D) et 42 % de polygones à forte densité de bâtis DB (groupé dense GD et groupé très dense GTD). L'effectif des polygones appartenant aux types, zone restante non bâtie de bâtis résidentiels R et zone d'habitat en dehors d'une zone d'interface habitat-forêt O, ne représentent que 5 à 7 % de l'effectif total des polygones. La répartition des polygones à densité nulle montre, quant à elle, que presque les 2/3 des polygones sont des polygones de type I et D, les polygones de type groupé (GD et GTD) représente 17 % un peu plus que ceux de type O (15 %). La part des polygones de type R ne représente que 6 % comme pour les polygones à densité d'éclosion non nulle.

Les polygones à densité d'éclosion non nulle DE ont été répartis en trois groupes ayant le même effectif (64) selon trois niveaux de valeur de densité : polygones à densité d'éclosion **DE faible** ($DE \leq 18$ points/1 000ha), d'éclosion **DE moyenne** et d'éclosion **DE forte** ($DE \geq 102$ points/1 000ha). Leur répartition selon les types de territoire est représentée sur la Figure 8-6. Cette répartition fait apparaître davantage de polygones à densité d'éclosion forte et moyenne dans les types de territoire interface habitat-forêt de nature habitat isolé I et diffus D.

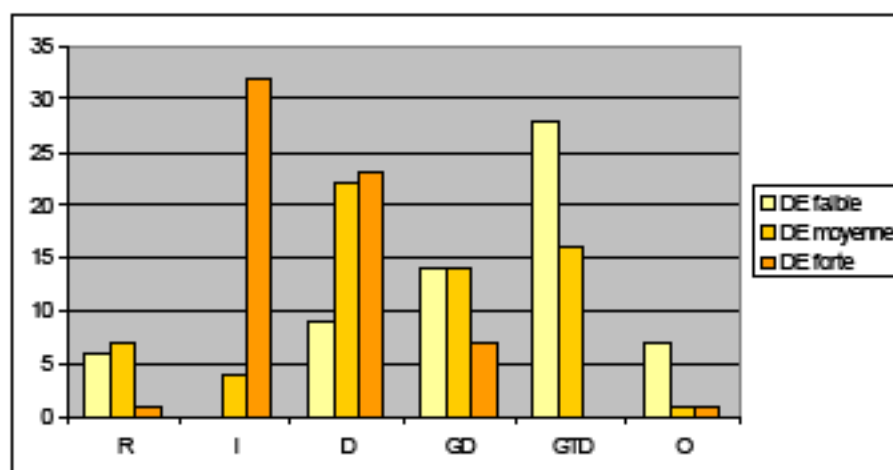


Figure 8-6 Répartition des polygones à DE faible, moyenne et forte selon les types de territoire

Les Tableau 8-3 et Tableau 8-4 affichent les valeurs des médianes, moyennes, écart-types et coefficients de variation de chaque variable étudiée au sein d'une part des deux échantillons, 192 polygones à densité d'éclosion non nulle et 2 769 polygones à densité nulle, et d'autre part des 64 polygones à densité faible et les 64 polygones à densité forte. Les valeurs non significativement différentes sont en rouge.

Les différences les plus significatives qui ont été observées sont développées ci-après. Les valeurs moyennes sont rappelées dans le texte accompagnées du coefficient de variation.

	DE nulle	DE non nulle	Test Kruskal-Wallis	Probabilité	Différence significative	Test Mood sur médiane	Probabilité	Différence significative
Taille de l'échantillon	2769	192						
AGR (%)	27 – 33 (31) 94%	13 – 18 (19) 105%	28,5828	8,97757E-8	OUI	32,1144	1,45355E-8	OUI
BOI (%)	18– 26 (27) 104%	27 – 32 (23) 72%	21,1135	0,00000432871	OUI	17,5063	0,0000286355	OUI
ESN (%)	2– 15 (23) 153%	9– 18 (22) 122%	42,6066	6,69346E-11	OUI	41,254	1,3368E-10	OUI
URB (%)	14– 24 (25) 104%	24– 30 (23) 77%	20,3108	0,00000658272	OUI	24,3083	8,20837E-7	OUI
CRE (%)	0– 1,6 (8) 500%	0– 2 (10) 500%	57,3676	0,0	OUI	68,6796	0,0	OUI
DB	54– 91 (112) 123%	100–178 (185) 104%	64,0052	0,0	OUI	43,1936	4,95826E-11	OUI
DC	6– 7 (4) 57%	6– 6 (3) 50%	0,0168309	0,896777	NON	0,0862459	0,769005	NON
DR	4– 5 (6) 120%	6– 7 (5) 71%	42,3984	7,44509E-11	OUI	32,2242	1,37369E-8	OUI
DP	2– 6 (9) 150%	2– 5 (8) 160%	0,245714	0,620109	NON	0,00435656	0,947374	NON
EX1 (%)	10– 23 (28) 122%	15– 24 (25) 104%	5,01257	0,025161	OUI	5,91311	0,0150262	OUI
EX2 (%)	52– 52 (28) 54%	52– 50 (21) 42%	1,24948	0,26365	NON	0,0268224	0,869908	NON
EX3 (%)	14– 25 (29) 116%	23– 27 (24) 89%	7,63091	0,00573613	OUI	8,06979	0,00449962	OUI
PT1 (%)	100–85 (25) 29%	88–77 (26) 34%	49,674	1,81544E-12	OUI	-1,#IND	1,0	OUI
PT2 (%)	0–13 (21) 161%	12–19 (20) 105%	46,2625	1,03423E-11	OUI	68,6283	0,0	OUI
PT3 (%)	0–2 (7) 350%	0–3 (8) 267%	111,153	0,0	OUI	127,108	0,0	OUI
PT4 (%)	0–0,2 (2) 1000%	0–0,4 (2) 500%	60,5741	0,0	OUI	61,7238	0,0	OUI
PTm (%)	5–7 (3) 43%	6,3–8 (3) 37%	52,6359	0,0	OUI	68,6283	0,0	OUI
ALT (m)	181–181 (112) 62%	187–182 (101) 55%	0,0992271	0,752759	NON	0,0450157	0,831975	NON
KR1 (%)	0–1,4 (6) 428%	0–2 (4) 200%	126,802	0,0	OUI	144,523	0,0	OUI
KR2 (%)	0–12 (20) 167%	10–17 (19) 111%	42,0002	9,12647E-11	OUI	59,5724	0,0	OUI
KR3 (%)	65–62 (33) 53%	48–50 (26) 52%	28,8077	7,99347E-8	OUI	35,5869	2,43925E-9	OUI
KR4 (%)	8–20 (25) 125%	20–24 (21) 87%	23,4335	0,00000129306	OUI	26,0984	3,24462E-7	OUI
KR5 (%)	0–5 (13) 260%	1–8 (15) 187%	68,4247	0,0	OUI	90,643	0,0	OUI
VG0 (%)	78–71 (26) 37%	66–63 (21) 33%	32,0171	1,52822E-8	OUI	32,1144	1,45355E-8	OUI
VG1 (%)	0,04–1,4 (4) 285%	0,1–1,1 (3) 273%	11,0325	0,000894806	OUI	10,8143	0,00100667	OUI
VG2 (%)	0,8–5 (9) 180%	4–8 (10) 125%	77,2765	0,0	OUI	67,4701	0,0	OUI
VG3 (%)	4–12 (17) 142%	9–14 (14) 100%	27,9113	1,27005E-7	OUI	24,3083	8,20837E-7	OUI
VG4 (%)	9–12 (11) 92%	13–15 (8) 53%	41,8321	9,94596E-11	OUI	51,3976	0,0	OUI
AI1 (%)	47–48 (31) 65%	31–34 (22) 65%	38,3269	5,98324E-10	OUI	45,0478	1,92286E-11	OUI
AI2 (%)	34–33 (19) 58%	44–43 (14) 33%	48,248	3,75577E-12	OUI	37,5084	9,10201E-10	OUI
AI3 (%)	11–18 (19) 105%	20–23 (16) 70%	39,1046	4,01693E-10	OUI	43,1936	4,95826E-11	OUI

Tableau 8-3 Valeurs de la médiane – moyenne (écart-type) CV % pour chaque échantillon (DE nulle et DE non nulle) et tests statistiques de comparaison d'échantillons

	DE faible	DE forte	Test Kruskal-Wallis	Probabilité	Différence significative	Test Mood sur médiane	Probabilité	Différence significative
Taille de l'échantillon	64	64						
AGR (%)	16 - 19 (16) 84%	6 - 18 (22) 122%	4,73	0,0296536	OUI	3,125	0,0770962	NON
BOI (%)	25 - 26 (16) 62%	33 - 35 (27) 77%	2,81424	0,0934277	NON	3,125	0,0770962	NON
ESN (%)	5 - 9 (10) 111%	21- 28 (27) 96%	12,5755	0,000390566	OUI	12,5	0,000406681	OUI
URB (%)	53 - 44 (23) 52%	10 - 15 (16) 107%	46,0597	1,14704 ^E -11	OUI	45,125	1,84851 ^E -11	OUI
CRE (%)	1 - 1 (2) 200%	0 - 3 (14) 467%	40,9213	1,58484 ^E -10	OUI	50,294	1,3235E-12	OUI
DB	249 - 299 (215) 72%	53 - 59 (31) 53%	54,7828	0,0	OUI	66,125	0,0	OUI
DC	5,5- 5,8 (2) 34%	7 - 7,3 (4,6) 63%	4,99598	0,0254033	OUI	4,5	0,0338916	OUI
DR	9,7- 9,3 (4,8) 52%	4,8- 6 (6) 100%	15,3325	0,0000901512	OUI	6,125	0,0133261	OUI
DP	2,7- 8 (11) 137%	1,7- 3 (4,7) 157%	10,6626	0,0010927	OUI	3,125	0,0770962	NON
DiC	32- 46 (39) 85%	31- 48 (49) 102%	0,116139	0,73326	NON	0	1	NON
DiR	41- 51 (50) 98%	41- 114 (192) 168%	1,29774	0,254625	NON	0	1	NON
EX1 (%)	24- 26 (20) 77%	10- 23 (30) 130%	6,33326	0,0118473	OUI	8	0,0046764	OUI
EX2 (%)	52- 49 (12) 24%	53- 50 (28) 56%	0,308251	0,578755	NON	0,125	0,723673	NON
EX3 (%)	22- 25 (19) 76%	19- 27 (29) 107%	0,993845	0,318803	NON	0,125	0,723673	NON
PT1 (%)	86- 81 (16) 20%	88- 73 (32) 44%	0,334675	0,580966	NON	0,125	0,723673	NON
PT2 (%)	12- 16 (13) 81%	10- 22 (26) 118%	0,419867	0,517003	NON	0	1	NON
PT3 (%)	0,5- 2 (4) 200%	0- 5 (10) 200%	5,54621	0,0185181	OUI	16,8648	0,0000401407	OUI
PT4 (%)	0- 0,2 (1,1) 550%	0- 0,3 (1,1) 367%	2,39644	0,121608	NON	2,88722	0,0892813	NON
PTm (%)	6,6- 7,1 (2,1) 29%	6,3- 8,3 (4) 48%	0,539293	0,462725	NON	0,5	0,479499	NON
ALT (m)	185 - 172 (91) 53%	187 - 196 (111) 57%	1,04986	0,305536	NON	0	1	NON
KR1 (%)	0,4- 1,8 (3) 167%	0- 1,6 (4) 250%	15,9913	0,0000636342	OUI	27,0813	1,95081E-7	OUI
KR2 (%)	11- 14 (11) 78%	4- 18 (26) 144%	2,90382	0,0883664	NON	3,125	0,0770962	NON
KR3 (%)	51- 54 (20) 37%	36- 41 (31) 76%	7,26395	0,00703359	OUI	4,5	0,0338916	OUI
KR4 (%)	22- 25 (17) 68%	18- 26 (27) 104%	0,952231	0,31915	NON	1,125	0,288842	NON
KR5 (%)	4- 6 (6) 100%	0- 11 (20) 181%	8,81	0,00299481	OUI	15,125	0,000100623	OUI
VG0 (%)	70- 69 (16) 23%	57- 59 (24) 41%	6,6716	0,00979413	OUI	4,5	0,0338916	OUI
VG1 (%)	0,4- 0,8 (1) 125%	0- 1,8 (4) 222%	13,3011	0,000265066	OUI	15,125	0,000100623	OUI
VG2 (%)	5- 5 (4) 80%	4- 7 (10) 143%	0,785746	0,375388	NON	1,125	0,288842	NON
VG3 (%)	10- 12 (10) 83%	10- 17 (18) 106%	0,188068	0,664529	NON	0,125	0,723673	NON
VG4 (%)	13- 13 (6) 46%	13- 16 (10) 63%	1,07931	0,298851	NON	0,0	1	NON
AI1 (%)	35 - 39 (17) 44%	23 - 32 (25) 78%	4,88953	0,027017	OUI	1,125	0,288842	NON
AI2 (%)	44 - 42 (12) 108%	43 - 43 (16) 37%	0,0090843	0,924067	NON	0,125	0,723673	NON
AI3 (%)	17 - 19 (11) 58%	22 - 25 (18) 73%	3,33142	0,0679646	NON	6,125	0,0133261	OUI

Tableau 8-4 Valeurs de la médiane – moyenne (écart-type) CV % de chaque échantillon (DE faible et DE forte) et tests statistiques de comparaison d'échantillons

La densité du bâti DB est 2 fois plus importante (178 bâtis/km², CV = 104 %) et celle des routes DR 1,4 fois plus (7 km/km², CV = 71 %) là où la densité d'éclosion est non nulle. Au sein de cette densité non nulle, la densité du bâti DB est 5 fois moins élevée (59 bâtis/km², CV = 53 %) et la densité des chemins DC est 0,8 fois plus forte (7,3 km/km², CV = 63 %) alors que la densité des routes DR est 1,6 fois moins grande (6 km/km², CV = 100 %) dans les densités fortes d'éclosion.

La Figure 8-7 montre que comparés aux polygones à densité d'éclosion DE nulle, les polygones à densité d'éclosion DE non nulle ont 0,5 fois moins de surface agricole AGR (18 %, CV = 105 %) mais 1,2 fois plus de végétation BOI (32 %, CV = 72 %) et ESN (18 %, CV = 122 %) et 1,3 fois plus de zones urbaines URB (30 %, CV = 77 %). Au sein de la densité non nulle, la part d'espaces naturels ESN est 3 fois plus importante (28 %, CV = 96 %), l'espace urbain URB est au contraire 3 fois moins important (15 %, CV = 107 %) là où la densité d'éclosion DE est la plus forte.

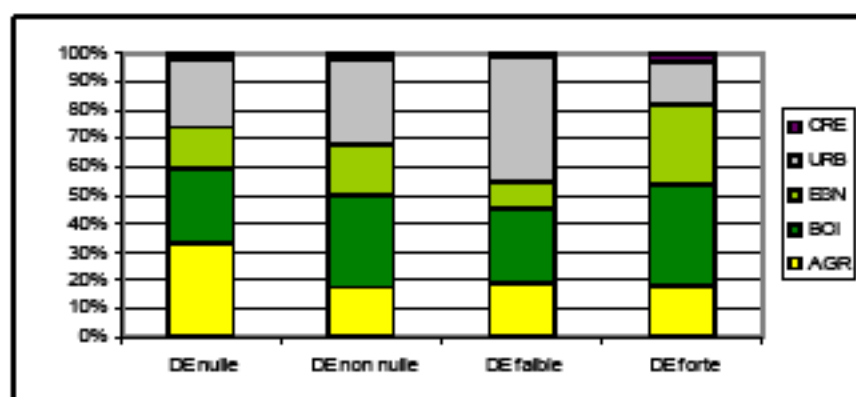


Figure 8-7 Nature de l'occupation du sol – Densité d'éclosion nulle, non nulle, faible et forte

La Figure 8-8 montre que les parts de surface à faible agrégation de la végétation AI2 (43 %, CV = 33 %) et à forte agrégation de la végétation AI3 (23 %, CV = 70 %) sont légèrement plus élevées, soit 1,3 fois plus fortes, dans les polygones à densité d'éclosion DE non nulle. Au sein de la densité d'éclosion DE non nulle, la part de valeur nulle de l'indice d'agrégation AI1 de la végétation est un peu moins importante (32 %, CV = 78 %) là où la densité d'éclosion DE est la plus forte.

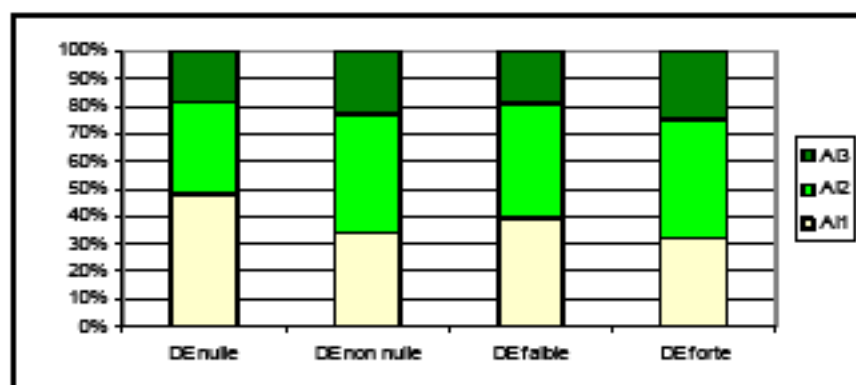


Figure 8-8 Indice d'agrégation – Densité d'éclosion nulle, non nulle, faible et forte

La Figure 8-9 ne montre pas de différences sur la composition des essences.

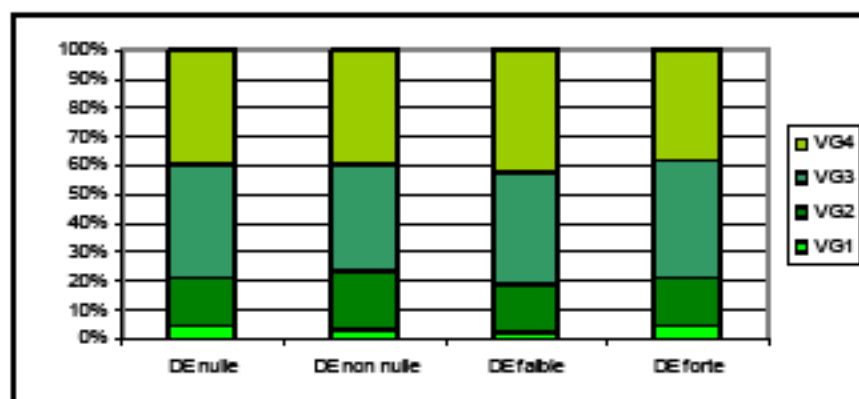


Figure 8-9 Nature de la végétation – Densité d'éclosion nulle, non nulle, faible et forte

La Figure 8-10 montre que les parts des zones fraîches KR2 (17 %, CV = 11 %) et chaudes KR4 (24 %, CV = 87 %), ainsi que celles des zones très chaudes KR5 (8 %, CV = 187 %) sont davantage représentées dans les polygones à densité d'éclosion DE non nulle. Au sein de la densité non nulle, les parts d'exposition très fraîche KR1 (1,6 %, CV = 250 %) et neutre KR3 (41 %, CV = 76 %) sont moindres et celle d'exposition très chaude KR5 (11 %, CV = 181 %) est plus importante là où la densité d'éclosion DE est la plus forte.

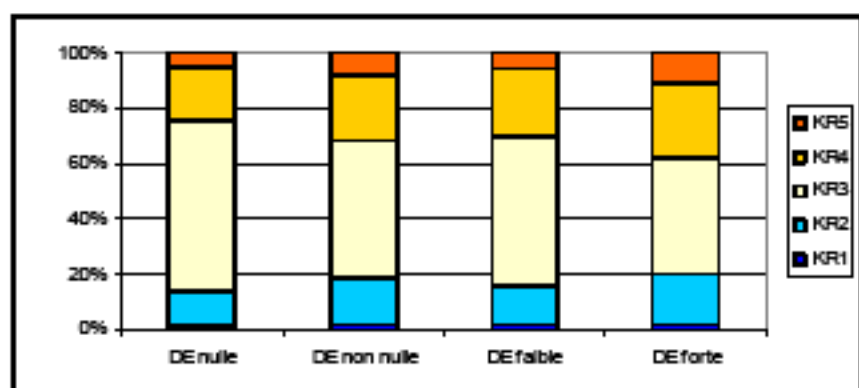


Figure 8-10 Nature de l'exposition – Densité d'éclosion nulle, non nulle, faible et forte

Pour les autres variables, on n'observe pas de différences significatives entre les situations analysées.

b. *Caractérisation des polygones par rapport à la densité d'incendie DI*

On dénombre 373 polygones pour lesquels la densité d'incendie est non nulle et 2 588 polygones pour lesquels la densité d'incendie est nulle qui se répartissent selon les types de territoire comme illustré sur la Figure 8-11.

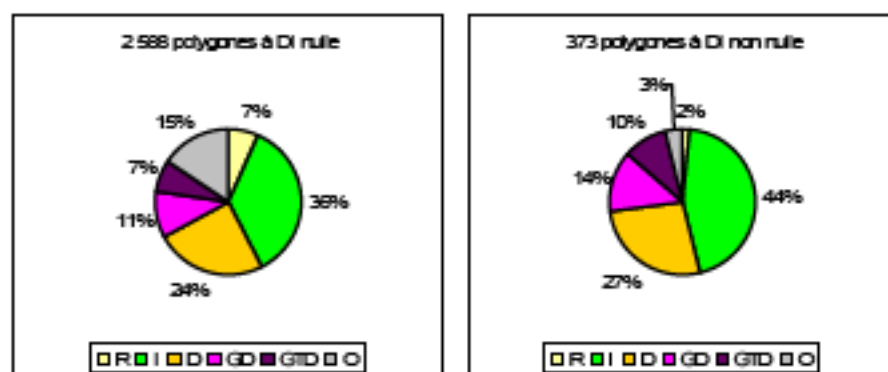


Figure 8-11 Répartition des polygones selon les types de territoire dans chacune des deux échantillons (DI)

La répartition des polygones à densité d'incendie DI non nulle montre que l'effectif des polygones à densité d'incendie DI non nulle concerne majoritairement les types isolé I et diffus D avec près des 3 /4 des polygones. Le reste des polygones appartient à la catégorie groupé (groupé dense GD et groupé très dense GTD) pour 24 %. Comparé à celui des polygones à densité d'incendie DI nulle, l'effectif dans les types I et D demeure majoritaire avec 60 % des polygones, la part du groupé (GD et GTD) est moindre (18 %) en revanche la part du type O est plus grande avec 15 % contre 3 %.

Les polygones à densité d'incendie DI non nulle ont été répartis en trois groupes ayant le même effectif (124) selon trois niveaux de valeur de densité : polygones à densité d'incendie **DI faible** ($DI \leq 97$ feux/1 000ha), d'incendie **DI moyenne** et d'incendie **DI forte** ($DI \geq 227$ feux/1 000ha), l'analyse a consisté à comparer le groupe des polygones à densité d'incendie faible et celui des polygones à densité d'incendie forte. Leur répartition selon les types de territoire est représentée sur la Figure 8-12. L'effectif des polygones à densité d'incendie DI faible se répartit plutôt sur les types diffus D, groupé très dense GTD puis groupé dense GD. En revanche l'effectif des polygones à densité d'incendie DI forte est majoritairement confiné au territoire de type isolé I.

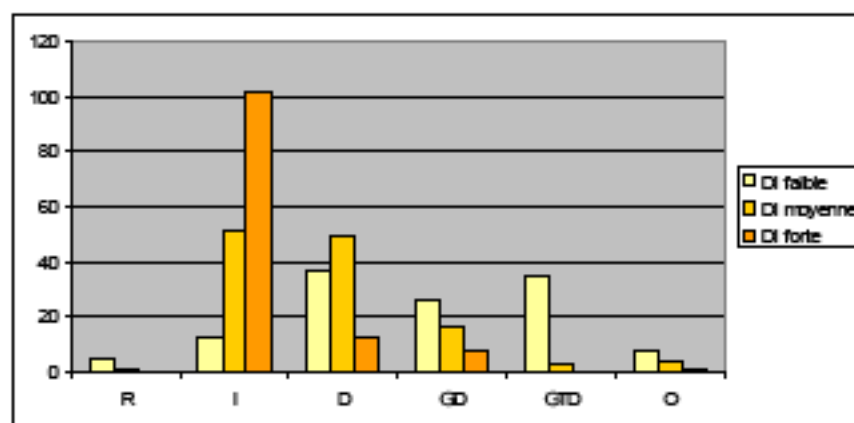


Figure 8-12 Répartition des polygones à DI faible, moyenne et forte selon les types de territoire

Les Tableau 8-5 et Tableau 8-6 affichent les valeurs des médianes, moyennes, écart-types et coefficients de variation de chaque variable étudiée au sein d'une part des deux échantillons, 373 polygones à densité d'incendie non nulle et 2 588 polygones à densité nulle, et d'autre part des 124 polygones à densité faible et les 124 polygones à densité forte. Les valeurs non significativement différentes sont en rouge. Les différences les plus significatives qui ont été observées sont développées ci-après. Les valeurs moyennes sont rappelées dans le texte accompagnées de leur coefficient de variation.

Taille de l'échantillon	DI nulle	DI non nulle	Test Kruskal-Wallis	Probabilité	Différence significative	Test Mood sur médiane	Probabilité	Différence significative
	2588	373						
AGR (%)	27– 34 (31) 91%	13– 22 (25) 114%	49,6091	1,87639E-12	OUI	32,4621	1,21539E-8	OUI
BOI (%)	18– 27 (27) 100%	22– 27 (25) 93%	1,33255	0,24835	NON	5,18797	0,0227409	OUI
ESN (%)	1,5– 13 (22) 169%	21– 29 (21) 72%	211,579	0,0	OUI	175,396	0,0	OUI
URB (%)	14– 25 (26) 104%	12– 20 (22) 110%	6,66675	0,00982084	OUI	4,17068	0,041126	OUI
CRE (%)	0– 1,7 (8) 470%	0– 1,1 (6) 545%	0,110909	0,739111	NON	0,318291	0,572636	NON
DB	56– 95 (119) 125%	57– 108 (134) 124%	1,74641	0,186326	NON	0,25546	0,613256	NON
DC	6– 6,6 (4) 61%	6,7– 7,2 (4) 56%	8,03502	0,00458684	OUI	7,40266	0,00651116	OUI
DR	4,2– 5,5 (6) 109%	3,3– 4,7 (5) 106%	7,01517	0,00808039	OUI	3,73052	0,0534231	NON
DP	2– 5,4 (9) 167%	2,5– 8,5 (9) 106%	14,7476	0,000122905	OUI	22,8715	0,000001732	OUI
EX1 (%)	9– 23 (28) 122%	21– 28 (27) 96%	20,5956	0,00000567282	OUI	21,7125	0,00000316724	OUI
EX2 (%)	52– 52 (28) 54%	53– 53 (26) 49%	0,55946	0,454477	NON	0,166968	0,682821	NON
EX3 (%)	17– 26 (29) 111%	10– 19 (24) 126%	11,3349	0,000760195	OUI	7,93885	0,00483709	OUI
PT1 (%)	100 – 86 (24) 28%	86– 75 (28) 37%	71,7622	0,0	OUI	-1, #IND	1,0	NON ?
PT2 (%)	0 – 13 (21) 161%	13– 20 (22) 110%	63,0662	0,0	OUI	60,3442	0,0	OUI
PT3 (%)	0 – 1,6 (6) 375%	0– 4 (10) 250%	72,3253	0,0	OUI	69,5104	0,0	OUI
PT4 (%)	0 – 1,6 (2) 125%	0– 0,5 (3) 600%	70,1028	0,0	OUI	70,5903	0,0	OUI
PTm (%)	5 – 6,6 (3) 45%	6– 8 (4) 50%	75,9149	0,0	OUI	60,3442	0,0	OUI
ALT (m)	187– 183 (114) 62%	153 – 168 (94) 56%	6,35584	0,0116974	OUI	17,4214	0,0000299441	OUI
KR1 (%)	0 – 1,4 (6) 428%	0 – 1,7 (6) 353%	12,3115	0,000449887	OUI	13,4226	0,000248436	OUI
KR2 (%)	0 – 12 (20) 167%	3 – 11 (16) 145%	0,375909	0,5398	NON	4,30665	0,0379603	OUI
KR3 (%)	67 – 63 (33) 52%	43 – 47 (31) 66%	80,4616	0,0	OUI	55,7984	0,0	OUI
KR4 (%)	6 – 18 (24) 133%	26 – 30 (26) 87%	100,2	0,0	OUI	94,8876	0,0	OUI
KR5 (%)	0 – 5 (13) 260%	0 – 10 (17) 170%	79,5508	0,0	OUI	72,2292	0,0	OUI
VG0 (%)	78 – 71 (26) 37%	66 – 65 (23) 35%	31,7765	1,7297E-8	OUI	33,7366	6,31024E-9	OUI
VG1 (%)	0,07 – 1,5 (4) 267%	0 – 0,5 (2) 400%	60,6622	0,0	OUI	52,5379	0,0	OUI
VG2 (%)	0,7 – 4,5 (9) 200%	2,7 – 7 (11) 157%	51,7786	0,0	OUI	37,8788	7,52779E-10	OUI
VG3 (%)	4,7 – 12 (17) 142%	4,4 – 9 (12) 133%	0,493289	0,482463	NON	0,0253366	0,873531	NON
VG4 (%)	8 – 11 (10) 91%	15 – 18 (13) 72%	144,353	0,0	OUI	116,787	0,0	OUI
AI1 (%)	48 – 49 (31) 63%	36– 38 (26) 68%	43,1784	4,9969E-11	OUI	49,3754	2,11375E-12	OUI
AI2 (%)	34 – 33 (19) 58%	43 – 42 (18) 43%	68,7045	0,0	OUI	46,5013	9,15601E-12	OUI
AI3 (%)	11 – 18 (19) 105%	16 – 21 (16) 76%	25,1706	5,24773E-7	OUI	24,3654	7,96866E-7	OUI

Tableau 8-5 Valeurs de la médiane – moyenne (écart-type) CV % pour chaque échantillon (DI nulle et DI non nulle) et tests statistiques de comparaison d'échantillon

Taille de l'échantillon	DI faible	DI fort	Test Kruskal-Wallis	Probabilité	Différence significative	Test Mood sur médiane	Probabilité	Différence significative
	124	124						
AGR (%)	14 21 (22) 105%	2- 18 (25) 139%	11,2471	0,00079704	OUI	4,12903	0,0421501	OUI
BOI (%)	22- 27 (20) 74%	20- 28 (30) 107%	1,37403	0,241117	NON	0,580645	0,446059	NON
ESN (%)	12- 17 (18) 106%	36- 42 (33) 78%	34,4261	4,42753E-9	OUI	40,3226	2,15306E-10	OUI
URB (%)	28- 34 (23) 68%	5- 11 (16) 145%	88,4019	0,0	OUI	83,6129	0,0	OUI
CRE (%)	0- 1 (2) 200%	0- 1 (7) 700%	44,6905	2,30775E-11	OUI	47,0805	6,81299E-12	OUI
DB	133-212 (186) 88%	29- 42 (28) 67%	117,202	0,0	OUI	113,806	0,0	OUI
DC	5,8- 6 (3) 50%	7,3- 8 (5) 62%	10,9376	0,000941849	OUI	9,29032	0,0023028	OUI
DR	6,7- 8 (5) 62%	0- 3 (5) 167%	58,4752	0,0	OUI	28,4516	9,60698E-8	OUI
DP	2,5- 9 (12) 133%	3- 9 (12) 133%	0,864265	0,352546	NON	0,258065	0,611453	NON
EX1 (%)	28- 29 (23) 79%	14- 25 (29) 116%	5,77785	0,0162269	OUI	5,82296	0,0158159	OUI
EX2 (%)	51- 51 (20) 39%	60- 59 (30) 51%	5,32371	0,0210344	OUI	3,16129	0,0753999	NON
EX3 (%)	13- 20 (20) 100%	0- 16 (25) 156%	13,6738	0,000217309	OUI	14,5161	0,000138966	OUI
PT1 (%)	77- 75 (23) 31%	86- 73 (32) 44%	2,19712	0,138266	NON	1,03253	0,309564	NON
PT2 (%)	22- 20 (16) 80%	7- 21 (25) 119%	2,82387	0,0928685	NON	3,16211	0,0753619	NON
PT3 (%)	0- 4 (8) 200%	0- 5 (12) 240%	10,206	0,0013992	OUI	18,8952	0,0000138099	OUI
PT4 (%)	0 - 1 (3) 300%	0- 1 (3) 300%	4,30941	0,0378989	OUI	5,02899	0,0249235	OUI
PTm (%)	7 - 8 (3) 37%	6- 8 (4) 50%	3,1683	0,0750767	NON	2,7274	0,0986359	NON
ALT (m)	156 - 158 (84) 53%	159-188 (103) 55%	3,80298	0,051158	NON	0,403252	0,525414	NON
KR1 (%)	0 - 2 (5) 250%	0- 1 (7) 700%	33,8764	5,87263E-9	OUI	38,2923	6,09033E-10	OUI
KR2 (%)	7 - 11 (13) 118%	0- 12 (19) 158%	5,16748	0,0230107	OUI	3,16129	0,0753999	NON
KR3 (%)	39 - 43 (25) 58%	36- 43 (34) 79%	0,205505	0,650313	NON	0,580645	0,446059	NON
KR4 (%)	30 - 34 (23) 68%	21- 31 (29) 93%	3,47577	0,0622701	NON	1,6129	0,204081	NON
KR5 (%)	5 - 10 (14) 140%	0- 13 (21) 161%	4,82345	0,0280721	OUI	14,5161	0,000138966	OUI
VG0 (%)	69 - 69 (19) 28%	64- 62 (26) 42%	3,25452	0,0712231	NON	1,03226	0,309627	NON
VG1 (%)	0 - 0,4 (1) 250%	0 - 1 (2) 200%	47,3211	6,02596E-12	OUI	70,718	0,0	OUI
VG2 (%)	4 - 8 (10) 125%	1 - 6 (10) 167%	13,1145	0,000292808	OUI	9,29032	0,0023028	OUI
VG3 (%)	6 - 9 (9) 100%	3 - 10 (17) 170%	4,13088	0,042104	OUI	6,45161	0,0110831	OUI
VG4 (%)	13 - 14 (9) 64%	18 - 22 (16) 73%	12,4996	0,000406776	OUI	7,80645	0,00520458	OUI
AI1 (%)	37 - 40 (23) 57%	29 - 34 (29) 85%	5,98626	0,0144154	OUI	3,16129	0,0753999	NON
AI2 (%)	43 - 41 (15) 36%	45 - 44 (20) 45%	1,75365	0,185416	NON	0,580645	0,446059	NON
AI3 (%)	17 - 19 (13) 68%	14 - 22 (19) 86%	0,00263593	0,959054	NON	0,258065	0,611453	NON

Tableau 8-6 Valeurs de la médiane – moyenne (écart-type) CV % pour chaque échantillon (DI faible et DI forte) et tests statistiques de comparaison d'échantillons

La densité des chemins DC est plus grande de 10 % (7,2 km/km², CV = 56 %) ainsi que celle de la population DP de 1,6 fois (8,5 habitants/ km², CV = 106 %) là où la densité d'incendie DI est non nulle.

Au sein de la densité d'incendie DI non nulle, la valeur de la densité du bâti DB est 5 fois inférieure (42 bâtis/km², CV = 67 %), celle des routes DR est 2,7 fois inférieure (3 km/km², CV = 167 %) alors que la densité des chemins DC est 1,3 fois plus grande (8 km/km², CV = 62 %) là où la densité d'incendie DI est la plus forte.

La Figure 8-11 montre que comparés aux polygones pour lesquels la densité d'incendie DI est nulle, les polygones à densité d'incendie DI non nulle présentent une part d'espace agricole AGR environ 1,5 fois moindre (22 %, CV = 114 %) et une part d'espace urbain URB de 12,5 % moindre (20 %, CV = 110 %). En revanche la part d'autres espaces naturels ESN est 2,2 fois plus importante (29 %, CV = 72 %).

Au sein de la densité d'incendie DI non nulle, la part des autres espaces naturels ESN est 2,5 fois plus forte (42 %, CV = 78 %) et celles des espaces agricoles AGR et urbains URB sont respectivement 1,2 et 3 fois moins fortes (respectivement 18 %, CV = 139 % ; 11 %, CV = 145 %) là où la densité d'incendie DI est la plus forte.

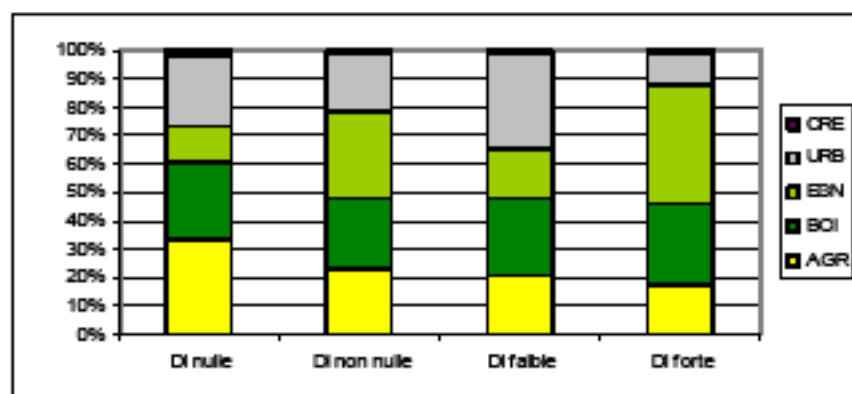


Figure 8-13 Nature de l'occupation du sol – Densité d'incendie nulle, non nulle, faible et forte

La Figure 8-14 montre que la part d'indice d'agrégation de la végétation de valeur nulle AI1 est 1,3 fois moindre (34 %, CV = 85 %) alors que celle des valeurs faibles AI2 et fortes AI3 de l'indice d'agrégation de la végétation l'est 1,3 fois plus (respectivement 44 %, CV = 45 % ; 22 %, CV = 86 %) là où la densité d'incendie DI est la plus forte.

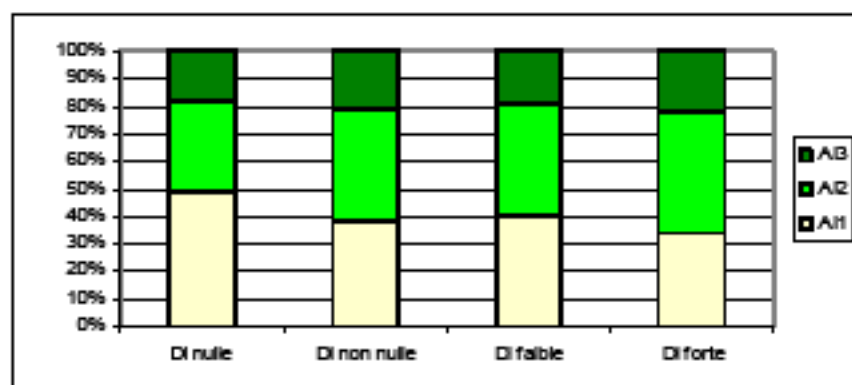


Figure 8-14 Indice d'agrégation – Densité d'incendie nulle, non nulle, faible et forte

La Figure 8-15 montre que dans les polygones à densité d'incendie DI non nulle la part de végétation de garrigue VG4 (18 %, CV = 72 %) et de peuplements mixtes VG2 (7 %, CV =

157 %) est supérieure alors que celle des peuplements résineux VG3 (9 %, CV = 133 %) est inférieure. Au sein de la densité d'incendie DI non nulle, on observe plus de garrigue VG4 (22 %, CV = 73 %) au détriment des peuplements mixtes VG2 (6 %, CV = 162 %) là où la densité d'incendie DI est forte.

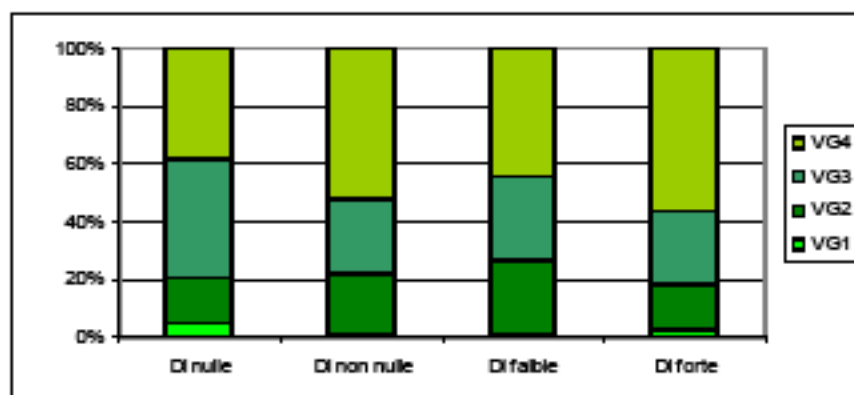


Figure 8-15 Nature de la végétation – Densité d'incendie nulle, non nulle, faible et forte

La Figure 8-16 indique que dans les polygones à densité d'incendie DI non nulle les parts d'exposition chaude KR4 (30 %, CV = 87 %) et très chaude KR5 (10 %, CV = 170 %) sont environ 2 fois plus représentées. Au sein de la densité d'incendie DI non nulle, c'est cette part d'exposition très chaude KR5 qui est 1,3 fois plus importante (13 %, CV = 161 %) là où la densité d'incendie DI est forte.

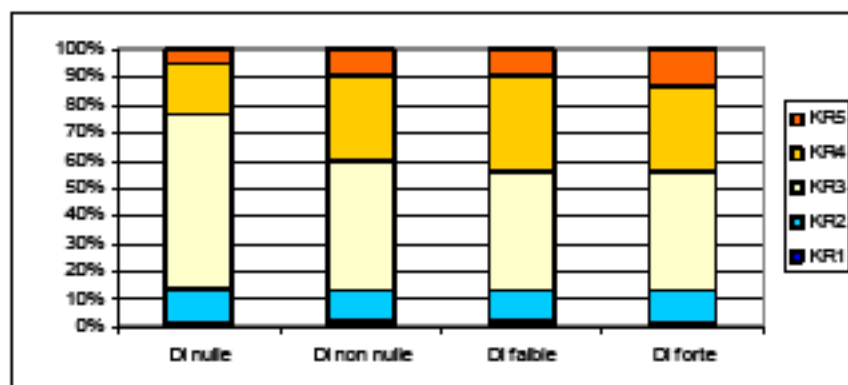


Figure 8-16 Nature de l'exposition – Densité d'incendie nulle, non nulle, faible et forte

Pour les autres variables, on n'observe pas de différences significatives entre les situations analysées.

c. *Caractérisation des polygones par rapport à taux de surfaces brûlées SB*

On dénombre 1 957 polygones pour lesquels le taux de surfaces brûlées est non nul et 1 004 polygones pour lesquels le taux de surfaces brûlées est nul qui se répartissent selon les types de territoire comme illustré sur la Figure 8-17.

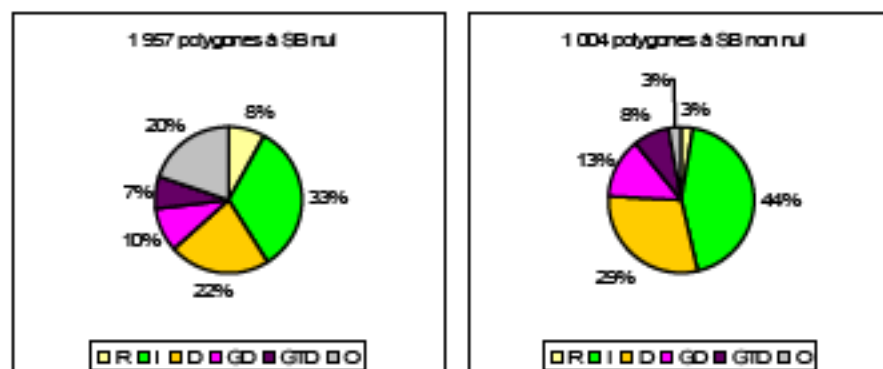


Figure 8-17 Répartition des polygones selon les types de territoire dans chacune des deux échantillons (SB)

La répartition des polygones à taux de surfaces brûlées SB non nul montre que l'effectif des polygones à taux de surfaces brûlées SB non nul est prédominant dans les types isolé I et diffus D avec près des 3 / 4 des polygones. Le reste des polygones appartient à la catégorie groupé (groupé dense GD et groupé très dense GTD) pour 21 %. Comparé à celui des polygones à taux de surfaces brûlées SB nul, l'effectif dans les types I et D demeure majoritaire avec 55 % des polygones, la part du groupé (GD et GTD) est moindre (17 %) en revanche la part du type O est plus grande avec 20 % contre 3 %.

Les polygones à taux de surfaces brûlées non nul ont été répartis en trois groupes ayant le même effectif (335) selon trois niveaux de valeur de taux de surfaces brûlées : polygones à taux de surfaces brûlées **SB faible** ($SB \leq 23 \%$), **SB moyen** et **SB fort** ($SB \geq 92 \%$), l'analyse a consisté à comparer le groupe des polygones à taux de surfaces brûlées faible et celui des polygones à taux de surfaces brûlées fort. Leur répartition selon les types de territoire est représentée sur la Figure 8-18.

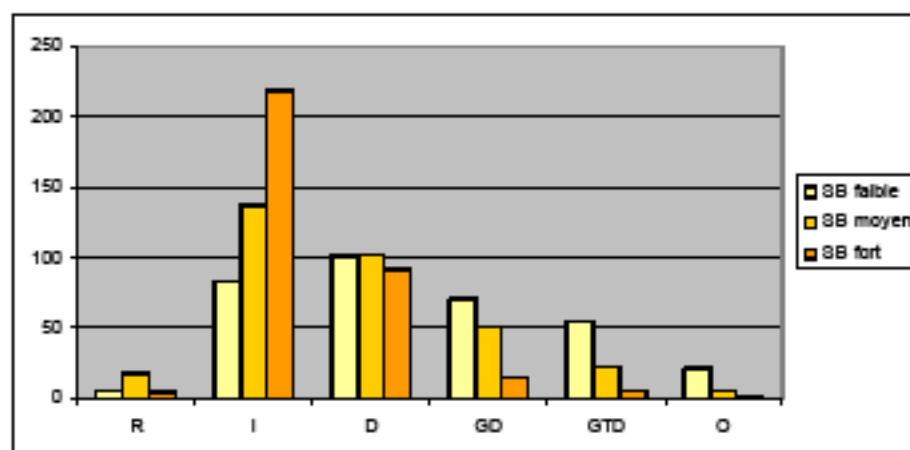


Figure 8-18 Répartition des polygones à SB faible, moyen et fort selon les types de territoire

L'effectif des polygones à taux de surfaces brûlées faible se répartit plutôt sur les types diffus D, groupé dense GD et groupé très dense GTD. En revanche l'effectif des polygones à taux de

surfaces brûlées fort et moyen est majoritairement confiné aux territoires de types isolé I et diffus D.

Les Tableau 8-7 et Tableau 8-8 affichent les valeurs des médianes, moyennes, écart-types et coefficients de variation de chaque variable étudiée au sein d'une part des deux échantillons, 1 957 polygones à densité d'éclosion non nulle et 1 004 polygones à densité nulle, et d'autre part des 335 polygones à densité faible et les 335 polygones à densité forte. Les valeurs non significativement différentes sont en rouge.

Les différences les plus significatives qui ont été observées sont développées ci-après. Les valeurs moyennes sont rappelées dans le texte accompagnées de leur coefficient de variation.

Taille de l'échantillon	SB nul	SB non nul	Test Kruskal-Wallis	Probabilité	Différence significative	Test Mood sur médiane	Probabilité	Différence significative
	1957	1004						
AGR (%)	36– 39 (32) 82%	14– 21 (23) 109%	210,107	0,0	OUI	142,646	0,0	OUI
BOI (%)	14– 24 (27) 112%	27– 32 (27) 84%	65,2788	0,0	OUI	82,7567	0,0	OUI
ESN (%)	0– 8 (17) 212%	19– 28 (28) 100%	662,639	0,0	OUI	543,134	0,0	OUI
URB (%)	16– 27 (27) 100%	11– 18 (20) 111%	68,053	0,0	OUI	46,5012	9,15623E-12	OUI
CRE (%)	0– 1,8 (9) 500%	0– 1,3 (7) 538%	0,642814	0,422692	NON	0,317784	0,572942	NON
DB	56–98–(123) 125%	57–95–(115) 121%	1,38164	0,239819	NON	0,402317	0,525894	NON
DC	5,7– 6,1 (4,2) 69%	7,3–7,8 (4,5) 58%	96,2323	0,0	OUI	70,5316	0,0	OUI
DR	4,6– 6 (6,3) 105%	3,1–4,3 (4,8) 112%	53,2006	0,0	OUI	40,3649	2,10692E-10	OUI
DP	2,2– 6 (9) 150%	1,9–5,6 (9,4) 168%	12,7007	0,000365262	OUI	14,9658	0,000109481	OUI
EX1 (%)	6– 21 (28) 133%	20– 27 (28) 104%	59,6341	0,0	OUI	67,1267	0,0	OUI
EX2 (%)	53– 52 (29) 56%	51– 52 (26) 50%	0,566681	0,45158	NON	2,53115	0,111616	NON
EX3 (%)	17– 27 (30) 111%	13– 21 (24) 114%	15,0574	0,00010429	OUI	7,73889	0,00540295	OUI
PT1 (%)	100– 89 (21) 23%	86– 74 (29) 39%	297,274	0,0	OUI	-1, #IND	1,0	NON
PT2 (%)	0– 10 (18) 180%	14– 22 (24) 109%	288,808	0,00	OUI	254,911	0,0	OUI
PT3 (%)	0– 1,1 (5,6) 509%	0– 3,4 (9) 265%	156,11	0,00	OUI	155,856	0,0	OUI
PT4 (%)	0– 0,1 (1,3) 1300%	0– 0,4 (3,5) 875%	50,4723	1,20859E-12	OUI	50,7189	1,06593E-12	OUI
PTm (%)	5– 6,2 (2,5) 40%	6,4– 7,9 (3,4) 43%	300,269	0,00	OUI	254,911	0,0	OUI
ALT (m)	167–166–(107) 64%	201–209 (117) 56%	69,587	0	OUI	24,0808	9,23765E-7	OUI
KR1 (%)	0 – 1,1 (6) 545%	0 – 1,9 (6) 316%	63,5622	0,0	OUI	67,5523	0,0	OUI
KR2 (%)	0 – 11 (20) 181%	7 – 15 (20) 133%	77,9068	0,0	OUI	94,3697	0,0	OUI
KR3 (%)	79 – 69 (32) 46%	43 – 46 (30) 65%	336,805	0,0	OUI	235,918	0,0	OUI
KR4 (%)	0 – 16 (24) 150%	24 – 28 (25) 89%	260,061	0,0	OUI	227,308	0,0	OUI
KR5 (%)	0 – 3,4 (11) 323%	0 – 9,3 (17) 183%	231,18	0,0	OUI	223,954	0,0	OUI
VG0 (%)	84 – 76 (25) 33%	60 – 59 (24) 41%	343,165	0,0	OUI	321,189	0,0	OUI
VG1 (%)	0,07–1,4 (3,4) 243%	0,01–1,3 (4,4) 338%	18,8287	0,0000143001	OUI	20,1598	0,00000712332	OUI
VG2 (%)	0,6 – 4 (8,3) 207%	2 – 6,4 (10) 156%	105,417	0,00	OUI	70,5316	0,00	OUI
VG3 (%)	3,4 – 11 (16) 145%	8 – 14 (17) 121%	117,674	0,00	OUI	94,4433	0,00	OUI
VG4 (%)	6 – 8 (8) 100%	16 – 19 (12) 63%	618,264	0,00	OUI	500,576	0,00	OUI
AI1 (%)	57 – 55 – (30) 54%	29 – 33 – (25) 76%	356,831	0	OUI	307,4	0	OUI
AI2 (%)	29 – 29 – (19) 66%	44 – 43 – (17) 39%	335,852	0	OUI	266,265	0	OUI
AI3 (%)	8 – 16 – (18) 112%	22 – 24 – (17) 71%	307,196	0	OUI	281,684	0	OUI

Tableau 8-7 Valeurs de la médiane – moyenne (écart-type) CV % pour chaque échantillon (SB nul et SB non nul) et tests statistiques de comparaison d'échantillons

	SB faible	SB fort	Test Kruskal-Wallis	Probabilité	Différence significative	Test Mood	sur	Probabilité	Différence significative
Taille de l'échantillon	335	335							
AGR (%)	20–27 (25) 92%	2 – 14 (19) 135%	66,8746	0,0	OUI	37,2597		1,03399E-9	OUI
BOI (%)	29–32 (24) 75%	22 – 30 (28) 93%	3,51177	0,0609307	NON	2,63284		0,104671	NON
ESN (%)	7–13 (16) 123%	41 – 45 (31) 69%	193,243	0,0	OUI	191,29		0,0	OUI
URB (%)	19–27 (23) 85%	6 – 10 (14) 140%	127,437	0,0	OUI	96,2925		0,0	OUI
CRE (%)	0–1,7 (7) 412%	0 – 1,1 (8) 727%	49,4125	2,07423E-12	OUI	52,9639		0,0	OUI
DB	82–141(145) 103%	40 – 53 (52) 98%	149,826	0,0	OUI	112,054		0,0	OUI
DC	6,1–6,4 (3,5) 55%	8,7 – 9 (5) 55%	54,8355	0,0	OUI	39,1701		3,88434E-10	OUI
DR	5,4–6,4 (5) 78%	0–2,4 (3,5) 146%	128,703	0,0	OUI	105,606		0,0	OUI
DP	2,1–5,1 (9) 176%	1,8–5,5 (10) 182%	3,94499	0,0470078	OUI	2,63284		0,104671	NON
EX1 (%)	19–26 (27) 104%	20–27 (28) 104%	0,00091766	0,975834	NON	0,00597015		0,938411	NON
EX2 (%)	51–51 (25) 49%	53–52 (27) 52%	0,361006	0,547948	NON	0,59702		0,439716	NON
EX3 (%)	14–23 (25) 109%	14–21 (24) 114%	1,18457	0,276425	NON	0,483582		0,486803	NON
PT1 (%)	89–80 (23) 29%	79–69 (32) 46%	8,66572	0,00324144	OUI	6,50149		0,0107763	OUI
PT2 (%)	10–17 (20) 118%	20–26 (27) 104%	0,0107763	0,00275653	OUI	6,90155		0,0166057	OUI
PT3 (%)	0 – 2,3 (5) 217%	0 – 4 (10) 250%	0,996049	0,318266	NON	4,25359		0,0391642	OUI
PT4 (%)	0 – 0,5 (4) 800%	0– 0,4 (4) 1000%	4,44671	0,0349652	OUI	4,72571		0,0297119	OUI
PTm (%)	6 – 7 (3) 43%	7 – 9 (3) 33%	7,19531	0,00730772	OUI	5,73731		0,0166057	OUI
ALT (m)	185–188(108) 57%	241–249(132) 53%	38,3255	5,98755E-10	OUI	25,2248		5,10226E-7	OUI
KR1 (%)	0 – 1,4 (5) 357%	0 – 2,3 (7) 304%	3,64671	0,0561764	NON	7,47694		0,00624784	OUI
KR2 (%)	7 – 14 (17) 121%	7 – 16 (21) 131%	0,121589	0,727318	NON	0,023891		0,877163	NON
KR3 (%)	48 – 50 (28) 56%	37 – 43 (31) 72%	12,201	0,000477338	OUI	5,73731		0,0166057	OUI
KR4 (%)	23 – 27 (24) 89%	22 – 27 (25) 92%	0,107512	0,742995	NON	0,0537313		0,816693	NON
KR5 (%)	0 – 8 (14) 175%	0 – 12 (20) 167%	0,08918	0,765222	NON	2,19306		0,138631	NON
VG0 (%)	69 – 66 (22) 33%	53 – 53 (23) 43%	52,2644	0,0	OUI	31,8149		1,69585E-8	OUI
VG1 (%)	0 – 1,3 (4) 307%	0 – 1,5 (6) 400%	29,7249	4,97901E-8	OUI	39,1701		3,88434E-10	OUI
VG2 (%)	3 – 7 (9) 128%	1 – 4 (9) 225%	32,5063	1,18805 ^E -8	OUI	25,2239		5,10464 ^E -7	OUI
VG3 (%)	8 – 13 (15) 115%	10–16 (18) 112%	4,37655	0,0364334	OUI	1,34328		0,246453	NON
VG4 (%)	12 – 13 (8) 61%	23 – 25 (15) 60%	144,59	0,0	OUI	122,084		0,0	OUI
AI1 (%)	36 – 40 (25) 62%	19 – 25 (23) 92%	69,4389	0,0	OUI	47,2896		6,12377E-12	OUI
AI2 (%)	41 – 39 (16) 41%	49 – 48 (17) 35%	42,7064	6,36032E-11	OUI	25,2239		5,10464E-7	OUI
AI3 (%)	19 – 21 (15) 71%	23 – 27 (18) 66%	22,5399	0,0000020583	OUI	15,5284		0,0000812781	OUI

Tableau 8-8 Valeurs de la médiane – moyenne (écart-type) CV % pour chaque échantillon (SB faible et SB forte) et tests statistiques de comparaison d'échantillons.

Là où le taux de surfaces brûlées SB est non nul, la densité des chemins DC est 1,3 fois plus grande (7,8 km/km², CV = 58 %) alors que celle des routes DR est 1,4 fois moindre (4,3 km/km², CV = 112 %) et celle de la population DP de 0,7 fois moindre (5,6 habitants/km², CV = 168 %).

Comparés aux polygones à taux de surfaces brûlées SB faible, la valeur de la densité du bâti DB est 2,7 fois inférieure (53 bâtis/km², CV = 98 %), de même celle des routes DR est 1,4 fois inférieure (2,4 km/km², CV = 146 %) alors que la densité des chemins DC est 1,3 fois plus grande (9 km/km², CV = 55 %) et la densité de population (DP) est 1,1 fois plus grande (5,5 habitants/km², CV = 182 %) dans les forts taux de surfaces brûlées SB.

L'altitude ALT y est en revanche plus forte avec une altitude de 209 m (CV = 56 %) où le taux de surfaces brûlées SB est non nul. Au sein du taux de surfaces brûlées SB non nul, l'altitude est de 249 m (CV = 53 %), soit 1,3 fois plus élevée dans les forts taux de surfaces brûlées SB.

La Figure 8-19 montre que comparés aux polygones pour lesquels le taux de surfaces brûlées SB est nul, la part d'espace agricole AGR est environ 1,9 fois moindre (21 %, CV = 109 %) et celle des espaces urbains URB est 1,5 fois moindre (18 %, CV = 111 %) et en revanche celle des autres espaces naturels ESN (28 %, CV = 100 %) et boisements BOI (32 %, CV = 84 %) est 1,9 fois plus importante là où le taux de surfaces brûlées SB est non nul.

Au sein des polygones à taux de surfaces brûlées SB non nuls, la part des autres espaces naturels ESN est 3,5 fois plus forte (45 %, CV = 69 %) alors que celles des espaces agricoles AGR (14 %, CV = 135 %) et urbains URB (10 %, CV = 140 %) sont respectivement 2 et 2,7 fois moindres dans les forts taux de surfaces brûlées SB.

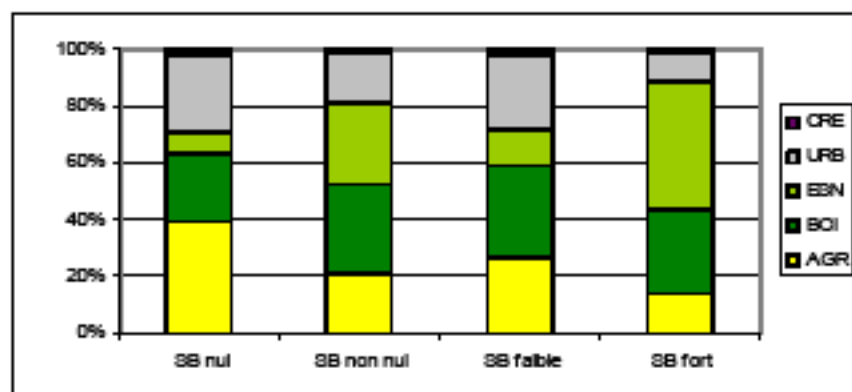


Figure 8-19 Nature de l'occupation du sol – Taux de surfaces brûlées nul, non nul, faible et fort

La Figure 8-20 montre que la part de valeur nulle de l'indice d'agrégation AI1 de la végétation est moins importante (33 %, CV = 76 %) là où le taux de surfaces brûlées SB est non nul (- 22 %). Au sein des polygones à taux de surfaces brûlées SB non nuls, la part d'indice d'agrégation de la végétation de valeur nulle est plus faible encore (25 %, CV = 92 %) dans les forts taux de surfaces brûlées SB.

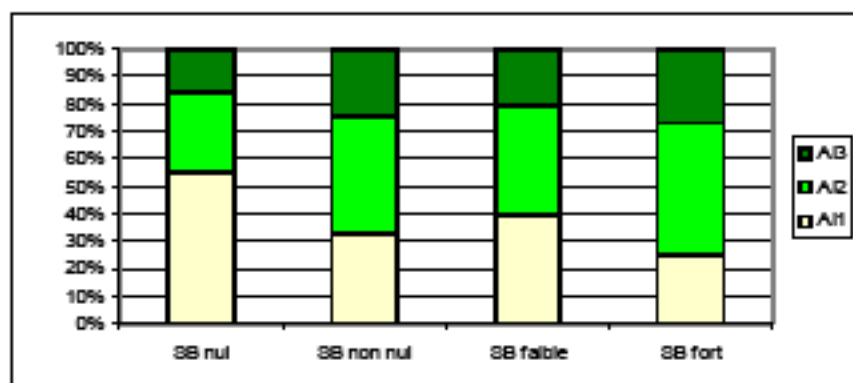


Figure 8-20 Indice d'agrégation – Taux de surfaces brûlées nul, non nul, faible et fort

La Figure 8-21 montre que les parts de végétation résineuse VG3 et de garrigue VG4 varient entre les zones à taux de surfaces brûlées SB nuls et celles à taux de surfaces brûlées SB non nuls. On observe davantage de garrigues VG4 (19 %, CV = 63 %) là où le taux de surfaces brûlées SB est non nul. Cette proportion de garrigue VG4 est encore plus forte (25 %, CV = 60 %) là où le taux de surfaces brûlées SB est particulièrement fort.

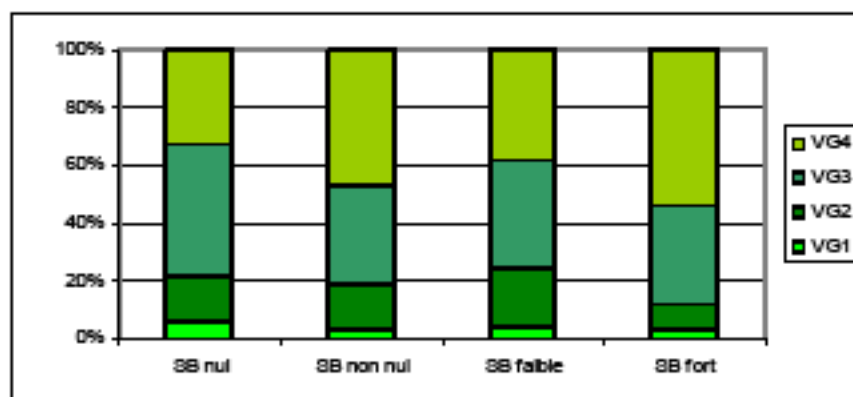


Figure 8-21 Nature de la végétation – Taux de surfaces brûlées nul, non nul, faible et fort

La Figure 8-22 souligne une plus forte représentation des expositions chaudes KR4 (27 %, CV = 92 %) et très chaudes KR5 (12 %, CV = 167 %) là où le taux de surfaces brûlées SB est non nul, faible comme fort.

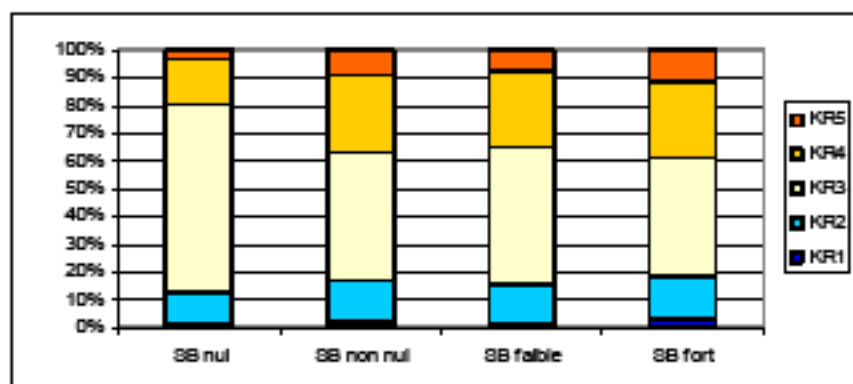


Figure 8-22 Nature de l'exposition – Taux de surfaces brûlées nul, non nul, faible et fort

Pour les autres variables, on n'observe pas de différences significatives entre les situations analysées.

8.4 Synthèse-Discussion

L'analyse préalable des caractéristiques des types de territoires (paragraphe 8.3.1) permet de préciser que sur la zone d'étude, les pentes relevées sont dans l'ensemble faibles (inférieures à 10 %) et que les expositions au vent et sous le vent se répartissent de façon similaire au sein des types de territoire. On peut aussi noter que les expositions sous le vent, *a priori* moins propices au développement des feux, par vent de mistral signifient aussi expositions plein sud, bénéficiant donc d'un ensoleillement et de conditions de sécheresse importants, cette fois propices au développement des feux.

Synthèse sur la composition des polygones à densité d'éclosion DE non nulle

La composition des polygones pour lesquels la densité de départ de feu DE est non nulle est un espace plutôt naturel BOI et ESN (50 % ; CV de 72 % à 122 %) au détriment de l'espace agricole AGR (18 %, CV = 105 %) avec une part d'espace urbain URB plutôt forte (30 %, CV = 77 %) qui va de pair avec une densité de bâtis DB (178 bâtis/km², CV = 104 %) et de routes DR plus forte (7 km/km², CV = 71 %). Sur le plan de l'environnement naturel, ce sont plutôt des zones d'exposition chaudes KR4 (24 %, CV = 87 %) et très chaudes KR5 (8 %, CV = 187 %). Les zones de végétation correspondant à des indices d'agrégation faible AI2 (43 %, CV = 33 %) et élevé AI3 (23 %, CV = 70 %) sont prédominantes, la nature de la végétation ne joue pas de rôle prédéterminant.

Au sein de ces espaces à densité DE non nulle, la densité d'éclosion DE y est d'autant plus forte que l'espace urbain URB y est moindre (15 %, CV = 107 %) avec une densité de bâtis DB (59 bâtis/km², CV = 53 %) et de routes DR moindres également (6 km/km², CV = 100 %) mais une densité de chemins élevée (7,3 km/km², CV = 63 %). La part d'espaces naturels ESN est en revanche plus importante (28 %, CV = 96 %). L'exposition très chaude KR5 y est plus importante (11 %, CV = 181 %). Ces caractéristiques s'apparentent davantage aux zones d'interfaces habitat-forêt qu'ailleurs.

Synthèse sur la composition des polygones à densité d'incendie DI non nulle

La composition des polygones pour lesquels la densité d'incendie de forêt DI est non nulle est à environ 60 % un espace plutôt forestier BOI (27 %, CV = 93 %) et d'autres espaces naturels ESN (29 %, CV = 72 %) au détriment de l'espace agricole AGR (22 %, CV = 114 %) et l'espace urbain URB (20 %, CV = 110 %) qui va de pair avec une densité de chemins DC plus forte (7,2 km/km², CV = 56 %). La prédominance des espaces de végétation est confirmée par des parts d'agrégation faible AI2 (44 %, CV = 45 %) et d'agrégation forte AI3 (22 %, CV = 86 %) plus fortes, des parts de peuplements mixtes VG2 (7 %, CV = 157 %) et surtout de garrigues VG4 (18 %, CV = 72 %) plus fortes. Les expositions plutôt chaudes KR4 (30 %, CV = 87 %) et très chaudes KR5 (10 %, CV = 170 %) sont davantage présentes. Au sein de ces espaces à densité DI non nulle, la densité d'incendie DI y est d'autant plus forte que les espaces urbain URB (11 %, CV = 145 %) et agricole AGR (18 %, CV = 139 %) y sont moindres avec une densité de bâtis DB (42 bâtis/km², CV = 67 %) et de routes DR moindres également (3 km/km², CV = 167 %) mais avec une densité de chemins DC élevée (8 km/km², CV = 62 %). Le reste ne varie pratiquement pas. Ces caractéristiques s'apparentent davantage aux zones d'interfaces habitat-forêt qu'ailleurs.

Synthèse sur la composition des polygones à taux de surfaces brûlées SB non nul

Comme pour la densité d'incendie, la composition des polygones pour lesquels le taux de surfaces brûlées SB est non nul est à environ 60 % un espace plutôt forestier BOI (32 %, CV = 84 %) et d'autres espaces naturels ESN ((28 %, CV = 100 %)) au détriment de l'espace agricole AGR (21 %, CV = 109 %) et l'espace urbain URB (18 %, CV = 111 %) qui va de

pair avec une densité de chemins DC plus forte (7,8 km/km², CV = 58 %) et une densité de bâtis DB (95 bâtis/km², CV = 121 %) et de routes DR plus faible (4,3 km/km², CV = 112 %). La prédominance des espaces de végétation est confirmée par des parts d'indice d'agrégation de la végétation faible AI2 (43 %, CV = 39 %) et d'indice d'agrégation de la végétation faible AI3 (24 %, CV = 71 %) plus fortes et des parts de garrigues VG4 (19 %, CV = 63 %) plus fortes également. L'altitude ALT y est en revanche plus forte avec une altitude de 209 m (CV = 56 %).

Au sein de ces espaces à taux de surfaces brûlées SB non nul, le taux de surfaces brûlées SB y est d'autant plus fort que les espaces urbain URB (10 %, CV = 140 %) et agricole AGR (14 %, CV = 135 %) y sont moindres avec une densité de bâtis DB (53 bâtis/km², CV = 98 %) et de routes DR (2,4 km/km², CV = 146 %) moindres également, alors que la part des espaces naturels ESN (45 %, CV = 69 %) est plus importante associée à une densité de chemins DC plus élevée également (9 km/km², CV = 55 %). L'altitude ALT y est parmi les plus élevées (249 m, CV = 53 %) et les stations les plus chaudes, KR4 (27 %, CV = 92 %) et chaudes KR5 (12 %, CV = 167 %), sont le plus représentées. La garrigue VEG4 y est la végétation particulièrement dominante à plus de 60 % (25 %, CV = 60 %). Ces caractéristiques s'apparentent là encore davantage aux zones d'interfaces habitat-forêt qu'ailleurs.

Chapitre 9. Démarche de modélisation d'indicateurs de risque

Les résultats de l'analyse univariée réalisée dans le chapitre précédent ont permis de souligner quelques caractéristiques d'occupation du sol, d'environnement naturel et topographique, les plus propices aux départs de feu, à la présence d'incendies et à leur extension.

Après cette analyse univariée, l'objectif des analyses, bivariée et multivariée, développées dans ce chapitre est dans un premier temps de permettre de découvrir des régularités, d'analyser de façon précise les interrelations entre les variables sélectionnées, d'essayer de mettre en évidence des combinaisons plus ou moins systématiques de variables et de dégager des composantes qui structurent l'espace géographique étudié. Dans un second temps son objectif est de trouver la meilleure combinaison possible de variables, parmi les variables explicatives, permettant d'expliquer chacune des trois variables, appelées indicateurs de risque, densité d'éclosion DE, densité d'incendie DI et taux de surfaces brûlées SB.

Ces analyses ont été développées sur la zone d'étude MAM située entre les Métropoles Aix-Marseille dans les conditions définies dans le paragraphe 8.1. L'ensemble des variables à expliquer et explicatives a été défini dans le paragraphe 8.2.

9.1 Corrélation des variables étudiées

Le tableau détaillé des corrélations entre les variables étudiées (Tableau 9-1) a permis de souligner des corrélations plus ou moins fortes entre certaines variables.

Pour les variables relatives au risque d'incendie. La densité d'éclosion DE augmente avec la diminution de la distance du point d'éclosion à la route DiR ($r = -0,61$) ou au chemin DiC ($r = -0,63$). Aucune autre corrélation n'apparaît avec une autre variable. La densité d'incendie DI montre une corrélation modérée avec la variable taux de surfaces brûlées SB ($r = 0,31$) et la variable relative aux zones occupées par d'autres espaces naturels ESN ($r = 0,25$). Le taux de surfaces brûlées SB présente une bonne corrélation avec les variables autres espaces naturels ESN ($r = 0,52$) et garrigues VG4 ($r = 0,51$), il est par ailleurs corrélé positivement aux variables relatives à la végétation faiblement agrégée AI2 ($r = 0,32$) et fortement agrégée AI3 ($r = 0,22$), à un habitat isolé I ($r = 0,22$), à de forte densité de chemins DC ($r = 0,22$), aux pentes de plus de 10 % PT2 ($r = 0,27$), aux zones d'exposition très chaudes KR5 ($r = 0,20$) et à l'altitude ALT ($r = 0,21$).

Pour les variables relatives à la topographie, l'exposition. La variable relative aux zones exposées sous le vent (vent de mistral) EX1 est corrélée positivement à la variable relative aux zones d'exposition chaude KR4 ($r = 0,26$), à l'inverse de la variable relative aux zones exposées au vent EX3 ($r = -0,35$). Ceci signifie que dans le contexte des incendies ces deux environnements sont sensibles à l'incendie : l'un favorisera une propagation du feu car exposé au vent et l'autre favorisera une inflammabilité de la végétation car exposé à plus de chaleur et donc à plus de sécheresse. Les variables relevant des pentes supérieures à 10 % PT2, PT3, PTm sont bien corrélées à la variable relative aux zones d'exposition très chaude KR5 (respectivement $r = 0,65$; $r = 0,54$; $r = 0,21$).

Pour les variables relatives à l'occupation humaine. La variable relative aux zones urbaines URB est bien corrélée à celles relatives à des densités fortes de bâtis DB ($r = 0,54$) et de routes DR ($r = 0,71$), elle l'est aussi à celles relatives à un habitat groupé très dense GTD ($r = 0,38$) et à des densités fortes de population DP ($r = 0,29$). Elle est négativement corrélée aux variables relatives aux fortes densités de chemins DC ($r = -0,31$) et à l'habitat isolé I ($r = -0,32$). La variable relative aux zones agricoles AGR est corrélée avec celles relatives aux zones bâties en dehors des interfaces habitat-forêt O ($r = 0,31$), avec de moindres densités de bâtis DB ($r = -0,20$), de routes DR ($r = -0,24$) et de population DP ($r = -0,22$). La densité du bâti DB est positivement corrélée à celle des routes DR ($r = 0,46$), alors que cette dernière DR est corrélée positivement à la variable densité de population DP ($r = 0,21$) et négativement à celle de la densité des chemins DC ($r = -0,42$).

Pour les variables relatives à la végétation. Les variables relatives aux zones où la végétation est absente VG0 ou d'agrégation nulle de la végétation AI1 ainsi qu'aux zones agricoles AGR se trouvent corrélées à la variable traduisant les endroits plats PT1 (respectivement $r = 0,50$; $r = 0,47$; $r = 0,39$). La variable relative aux zones d'agrégation nulle AI1 est par ailleurs corrélée à celles relatives aux zones agricoles AGR ($r = 0,69$) et aux zones urbaines URB ($r = 0,23$). Les variables relatives aux zones de forte agrégation de la végétation AI3, aux zones boisées BOI et autres espaces naturels ESN sont corrélées aux variables relatives aux zones de plus forte pente PT2 (respectivement $r = 0,47$; $r = 0,42$; $r = 0,21$) et d'exposition très chaude KR5 (respectivement $r = 0,23$; $r = 0,20$; $r = 0,21$). Les variables relatives aux garrigues VG4 et peuplements résineux VG3 sont corrélées aux variables relatives aux zones de plus forte pente PT2 (respectivement $r = 0,34$; $r = 0,45$). La garrigue VG4 est corrélée aux zones d'exposition très chaude KR5 ($r = 0,26$). La variable relative aux zones de forte agrégation AI3 est par ailleurs fortement corrélée aux variables traduisant les zones forestières BOI ($r = 0,82$). Enfin la variable relative aux peuplements résineux VG3 est très bien corrélée avec les variables traduisant les zones forestières BOI ($r = 0,78$) et les zones de forte agrégation de la végétation AI3 ($r = 0,83$).

9.2 Analyse en Composantes Principales

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) a été réalisée de façon à mettre en évidence les interrelations entre les variables, et les ressemblances et oppositions entre les unités géographiques analysées. Ses résultats se présentent sous forme de composantes, combinaisons linéaires de variables différenciant au maximum les individus statistiques, analysés et correspondant à une association de variables conceptuellement liées qui classent les unités géographiques de manière comparable (Sanders, 1989). Les axes factoriels ou composantes principales sont mis en évidence, hiérarchisés, selon le degré de différenciation qu'ils introduisent entre les individus et donc dans l'espace géographique analysé.

Une première analyse en composantes principales a été réalisée sur l'ensemble des 2 961 polygones ou unités spatiales avec les 42 variables. Puis trois autres analyses en composantes principales ont été réalisées : la première a porté sur l'ensemble des 192 polygones pour lesquels la densité d'éclosion était non nulle, la deuxième a porté sur l'ensemble des 373 polygones pour lesquels la densité d'incendie était non nulle, et la troisième a porté sur l'ensemble des 1957 polygones pour lesquels le taux de surfaces brûlées était non nul.

9.2.1. Résultats de l'ACP sur l'ensemble des polygones

Les trois composantes principales ont des poids respectifs de 20 %, 8 % et 7 %. La Figure 9-1 présente les seules variables dont les coordonnées étaient supérieures à 0,2 ou inférieures à -0,2, et triées dans l'ordre décroissant de ces coordonnées.

ACP sur l'ensemble des polygones

Facteur 1	Poids du facteur 1	20%
AI3	Agrégation forte de la végétation	0,80
BOI	Espaces boisés	0,75
PT2	Surface occupée par des pentes de 10 à 20 %	0,74
PTM	Pente moyenne du polygone	0,74
VG3	Mélange Feuillus et résineux	0,71
VG4	Garrigue	0,66
AI2	Agrégation faible de la végétation	0,63
KR5	Exposition très chaude	0,52
PT3	Surface occupée par des pentes de 20 à 30 %	0,45
ALT	Altitude	0,45
SB	% de surface du polygone parcourue par feu(x)	0,43
KR2	Exposition fraîche	0,39
VG2	Résineux	0,37
KR1	Exposition très fraîche	0,36
ESN	Autres espaces naturels	0,35
KR4	Exposition chaude	0,32
DC	Densité de chemins	0,30
I	Zone d'interface en habitat isolé	0,22
DR	Densité de routes	-0,29
URB	Espaces urbains	-0,36
O	Zone d'habitat en dehors d'une zone d'interface	-0,47
AGR	Espaces agricoles	-0,61
KR3	Exposition neutre	-0,74
PT1	Surface occupée par des pentes de 0 à 10 %	-0,77
AI1	Agrégation nulle de la végétation	-0,88
VG0	Autre que les classes Vg1 à Vg4	-0,89

Facteur 2	Poids du facteur 2	8%
I	Zone d'interface en habitat isolé	0,43
AGR	Espaces agricoles	0,42
DIR	Distance point(s) d'éclosion à la route la plus proche	0,38
DIC	Distance point(s) d'éclosion au chemin le plus proche	0,38
DC	Densité de chemins	0,30
ALT	Altitude	0,30
VG3	Mélange Feuillus et résineux	0,25
BOI	Espaces boisés	0,24
PT1	Surface occupée par des pentes de 0 à 10 %	0,24
AI3	Agrégation forte de la végétation	0,22
EX3	Surface occupée par des expositions au vent	0,20
KR3	Exposition neutre	0,20
DE	Densité d'éclosion (pts éclosion/surface)	-0,20
PT2	Surface occupée par des pentes de 10 à 20 %	-0,20
PT3	Surface occupée par des pentes de 20 à 30 %	-0,21
EX1	Surface occupée par des expositions sous le vent	-0,22
KR4	Exposition chaude	-0,24
GD	Zone d'interface en habitat groupé dense	-0,24
PTM	Pente moyenne du polygone	-0,25
AI2	Agrégation faible de la végétation	-0,26
KR5	Exposition très chaude	-0,27
DP	Densité de population	-0,42
GTD	Zone d'interface en habitat groupé très dense	-0,56
DR	Densité de routes	-0,65
DB	Densité de bâtis	-0,69
URB	Espaces urbains	-0,69

Facteur 3	Poids du facteur 3	7%
PT1	Surface occupée par des pentes de 0 à 10 %	0,41
EX3	Surface occupée par des expositions au vent	0,38
KR2	Exposition fraîche	0,37
BOI	Espaces boisés	0,36
DB	Densité de bâtis	0,32
AI3	Agrégation forte de la végétation	0,31
GTD	Zone d'interface en habitat groupé très dense	0,29
VG2	Résineux	0,28
AI2	Agrégation faible de la végétation	0,27
VG3	Mélange Feuillus et résineux	0,27
DR	Densité de routes	0,23
URB	Espaces urbains	0,22
KR3	Exposition neutre	0,20
SB	% de surface du polygone parcourue par feu(x)	-0,24
DI	Densité de feu (nb feux/surface)	-0,25
KR4	Exposition chaude	-0,26
DIC	Distance point(s) d'éclosion au chemin le plus proche	-0,26
DIR	Distance point(s) d'éclosion à la route la plus proche	-0,26
AGR	Espaces agricoles	-0,27
PT4	Surface occupée par des pentes supérieures à 30 %	-0,27
VG0	Autre que les classes Vg1 à Vg4	-0,31
PT2	Surface occupée par des pentes de 10 à 20 %	-0,32
ESN	Autres espaces naturels	-0,33
EX1	Surface occupée par des expositions sous le vent	-0,35
AI1	Agrégation nulle de la végétation	-0,36
PT3	Surface occupée par des pentes de 20 à 30 %	-0,43
PTM	Pente moyenne du polygone	-0,47
KR5	Exposition très chaude	-0,52

Figure 9-1 Coordonnées des variables présentant de bonnes corrélations sur chacune des trois composantes principales (ensemble des polygones)

Ces résultats de l'ACP sur l'ensemble des 2 961 polygones montrent que :

Le facteur 1 oppose très nettement :

- ☞ D'une part des variables qui représentent une occupation du sol à dominante de milieu naturel : des espaces boisés BOI (score $s = 0,75$), continus et compacts AI3 ($s = 0,80$) composés de peuplements mélangés de feuillus-résineux VG3 ($s = 0,71$), des garrigues VG4 ($s = 0,66$) et des espaces de végétation plus ouverts AI2 ($s = 0,63$) ;
- ☞ D'autre part des variables qui représentent une occupation du sol sans végétation VG0 ($s = -0,89$), plutôt agricole AGR ($s = -0,61$), qui est confirmée par une agrégation de la végétation nulle AI1 ($s = -0,88$).

Le facteur 2 oppose :

- ☞ d'une part des variables relatives à un habitat isolé I ($s = 0,43$), de fortes densités de chemins DC ($s = 0,38$) et des distances élevées de points d'éclosion au plus proche chemin DiC ($s = 0,38$) et à la plus proche route DiR ($s = 0,38$) ;
- ☞ d'autre part des variables relevant d'un niveau d'urbanisation élevé URB ($s = -0,69$) et GTD ($s = -0,56$), de fortes densités de bâtis DB ($s = -0,69$), de routes DR ($s = -0,65$) et de population DP ($s = -0,42$).

Le facteur 3 oppose :

- ☞ d'une part des variables relatives à des pentes faibles PT1 ($s = 0,41$) exposées au vent EX3 ($s = 0,38$) et en exposition plutôt fraîche KR2 ($s = 0,37$) ;
- ☞ d'autre part des variables relatives à des expositions très chaudes KR5 ($s = -0,52$), des pentes moyennes PTm ($s = -0,47$) et des pentes fortes PT3 ($s = -0,43$) plutôt exposées sous le vent EX1 ($s = -0,35$).

On observe également que :

- la variable Taux de surfaces brûlées SB est corrélée au facteur 1 ($s = 0,43$), au facteur 3 ($s = -0,24$) ;
- la variable Densité d'éclosion DE est corrélée au facteur 2 ($s = -0,20$) ;
- la variable Densité d'incendie DI est corrélée au facteur 3 ($s = -0,25$).

9.2.2. Résultats de l'ACP sur les polygones à densité d'éclosion non nulle

Les trois composantes principales ont des poids respectifs de 19 %, 9,2 % et 8,7 %. La Figure 9-2 présente les seules variables dont les coordonnées étaient supérieures à 0,2 ou inférieures à -0,2, et triées dans l'ordre décroissant de ces coordonnées.

ACP sur les polygones à Densité d'éclosion non nulle (DE non nulle)

Facteur 1 Poids du Facteur 1 19%			Facteur 2 Poids du Facteur 2 9,20%			Facteur 3 Poids du Facteur 3 8,70%		
AI3	Agrégation forte de la végétation	0,78	KR5	Exposition très chaude	0,60	AGR	Espaces agricoles	0,53
PTM	Pente moyenne du polygone	0,71	PTM	Pente moyenne du polygone	0,49	DE	Densité d'éclosion (pts éclosion/surface)	0,52
PT2	Surface occupée par des pentes de 10 à 20 %	0,69	PT3	Surface occupée par des pentes de 20 à 30 %	0,45	DC	Densité de chemins	0,47
BOI	Espaces boisés	0,69	AI1	Agrégation nulle de la végétation	0,44	I	Zone d'interface en habitat isolé	0,42
VG3	Mélange Feuillus et résineux	0,67	KR4	Exposition chaude	0,44	PT1	Surface occupée par des pentes de 0 à 10 %	0,36
VG4	Garrigue	0,61	VG0	Autre que les classes Vg1 à Vg4	0,43	DI	Densité de feu (nb feux/surface)	0,28
PT3	Surface occupée par des pentes de 20 à 30 %	0,51	DIV	Densité de feu (nb feux/surface végétation)	0,39	DIR	Distance point(s) d'éclosion à la route la plus proche	0,25
KR5	Exposition très chaude	0,48	DI	Densité de feu (nb feux/surface)	0,38	AI1	Agrégation nulle de la végétation	0,24
KR1	Exposition très fraîche	0,43	EX1	Surface occupée par des expositions sous le vent	0,37	D	Zone d'interface en habitat diffus	0,24
SB	% de surface du polygone parcourue par feu(x)	0,42	I	Zone d'interface en habitat isolé	0,36	KR3	Exposition neutre	0,23
ALT	Altitude	0,40	PT2	Surface occupée par des pentes de 10 à 20 %	0,36	VG1	Feuillus	0,22
ESN	Autres espaces naturels	0,40	ESN	Autres espaces naturels	0,35	ALT	Altitude	0,21
DIR	Distance point(s) d'éclosion à la route la plus proche	0,31	DE	Densité d'éclosion (pts éclosion/surface)	0,34			
AI2	Agrégation faible de la végétation	0,31	PT4	Surface occupée par des pentes supérieures à 30 %	0,34			
R	Zone restante	0,31	CRE	Espaces récréatifs	0,23			
VG2	Résineux	0,30	DIC	Distance point(s) d'éclosion au chemin le plus proche	0,23			
DC	Densité de chemins	0,29						
KR2	Exposition fraîche	0,28						
DE	Densité d'éclosion (pts éclosion/surface)	0,27						
PT4	Surface occupée par des pentes supérieures à 30 %	0,24						
VG1	Feuillus	0,23						
O	Zone d'habitat en dehors d'une zone d'interface	-0,38	AI2	Agrégation faible de la végétation	-0,20	DIC	Distance point(s) d'éclosion au chemin le plus proche	-0,20
GTD	Zone d'interface en habitat groupé très dense	-0,38	ALT	Altitude	-0,25	PT3	Surface occupée par des pentes de 20 à 30 %	-0,24
AGR	Espaces agricoles	-0,44	VG2	Résineux	-0,27	KR5	Exposition très chaude	-0,26
DB	Densité de bâtis	-0,52	KR3	Exposition neutre	-0,36	KR1	Exposition très fraîche	-0,28
DR	Densité de routes	-0,62	VG3	Mélange Feuillus et résineux	-0,39	DP	Densité de population	-0,34
KR3	Exposition neutre	-0,64	AI3	Agrégation forte de la végétation	-0,43	PTM	Pente moyenne du polygone	-0,35
URB	Espaces urbains	-0,66	PT1	Surface occupée par des pentes de 0 à 10 %	-0,45	PT2	Surface occupée par des pentes de 10 à 20 %	-0,35
PT1	Surface occupée par des pentes de 0 à 10 %	-0,73	BOI	Espaces boisés	-0,47	AI2	Agrégation faible de la végétation	-0,35
AI1	Agrégation nulle de la végétation	-0,77	KR2	Exposition fraîche	-0,48	DR	Densité de routes	-0,45
VG0	Autre que les classes Vg1 à Vg4	-0,86	EX3	Surface occupée par des expositions au vent	-0,48	URB	Espaces urbains	-0,61
						GTD	Zone d'interface en habitat groupé très dense	-0,66
						DB	Densité de bâtis	-0,67

Figure 9-2 Coordonnées des variables présentant de bonnes corrélations sur chacune des trois composantes principales (polygones à densité d'éclosion non nulle)

Ces résultats de l'ACP sur l'ensemble des 192 polygones à densité d'éclosion non nulle montrent que :

Le facteur 1 oppose :

- ☞ d'une part des variables qui représentent une occupation du sol à dominante de milieu naturel : des espaces boisés BOI ($s = 0,69$), continus et compacts AI3 ($s = 0,78$) composés de peuplements mélangés de feuillus-résineux VG3 ($s = 0,67$), et des garrigues VG4 ($s = 0,61$) ;
- ☞ d'autre part des variables qui représentent une occupation du sol sans végétation VG0 ($s = -0,86$), qui est confirmée par une agrégation de la végétation nulle AI1 ($s = -0,77$).

Le facteur 2 oppose :

- ☞ d'une part des variables relatives à des expositions très chaudes KR5 ($s = 0,60$) et chaudes KR4 ($s = 0,44$), de pentes moyennes PTm ($s = 0,49$) à forte PT3 ($s = 0,45$) plutôt exposées sous le vent EX1 ($s = 0,37$) ;
- ☞ d'autre part des variables relatives à des pentes faibles PT1 ($s = -0,45$) exposées au vent EX3 ($s = -0,48$) et en exposition plutôt fraîche KR2 ($s = -0,48$).

Le facteur 3 oppose :

- ☞ d'une part des variables qui représentent des espaces agricoles AGR ($s = 0,53$), un habitat isolé I ($s = 0,42$), de fortes densités de chemins DC ($s = 0,47$) ;
- ☞ d'autre part des variables relevant de fortes densités de bâtis DB ($s = -0,67$), un niveau d'urbanisation élevé URB ($s = -0,61$), GTD ($s = -0,66$) et de routes DR ($s = -0,45$).

On observe également que :

- la variable Taux de surfaces brûlées SB est corrélée au facteur 1 ($s = 0,42$) ;
- la variable Densité d'éclosion DE est corrélée au facteur 1 ($s = 0,27$), au facteur 2 ($s = 0,34$), au facteur 3 ($s = 0,52$) ;
- la variable Densité d'incendie DI est corrélée au facteur 2 ($s = 0,38$), au facteur 3 ($s = 0,28$).

9.2.3. Résultats de l'ACP sur les polygones à densité d'incendie non nulle

Les trois composantes principales ont des poids respectifs de 14,8 %, 11,8 % et 9 %. La Figure 9-3 présente les seules variables dont les coordonnées étaient supérieures à 0,2 ou inférieures à -0,2, et triées dans l'ordre décroissant de ces coordonnées.

ACP sur les polygones à Densité d'Incendies non nulle (DI non nulle)

Facteur 1	Poids du Facteur 1	14,80%
AI3	Agrégation forte de la végétation	0,69
VG4	Garrigue	0,65
BOI	Espaces boisés	0,62
AI2	Agrégation faible de la végétation	0,60
PTM	Pente moyenne du polygone	0,58
VG3	Mélange Feuillus et résineux	0,57
PT2	Surface occupée par des pentes de 10 à 20 %	0,55
PT3	Surface occupée par des pentes de 20 à 30 %	0,43
ALT	Altitude	0,42
KR2	Exposition fraîche	0,41
KR5	Exposition très chaude	0,39
KR1	Exposition très fraîche	0,34
SB	% de surface du polygone parcourue par feu(x)	0,31
ESN	Autres espaces naturels	0,29
VG2	Résineux	0,29
EX3	Surface occupée par des expositions au vent	0,25
DC	Densité de chemins	0,22
EX1	Surface occupée par des expositions sous le vent	-0,23
DB	Densité de bâtis	-0,26
DR	Densité de routes	-0,31
O	Zone d'habitat en dehors d'une zone d'interface	-0,35
KR3	Exposition neutre	-0,35
URB	Espaces urbains	-0,39
PT1	Surface occupée par des pentes de 0 à 10 %	-0,60
AGR	Espaces agricoles	-0,62
VG0	Autre que les classes Vg1 à Vg4	-0,83
AI1	Agrégation nulle de la végétation	-0,85

Facteur 2	Poids du Facteur 2	11,80%
PT1	Surface occupée par des pentes de 0 à 10 %	0,68
KR3	Exposition neutre	0,59
I	Zone d'interface en habitat isolé	0,52
AI3	Agrégation forte de la végétation	0,37
DC	Densité de chemins	0,31
EX3	Surface occupée par des expositions au vent	0,29
AGR	Espaces agricoles	0,27
VG4	Garrigue	0,26
SB	% de surface du polygone parcourue par feu(x)	0,25
DIR	Distance point(s) d'éclosion à la route la plus proche	0,24
BOI	Espaces boisés	0,24
VG3	Mélange Feuillus et résineux	0,23
DIC	Distance point(s) d'éclosion au chemin le plus proche	0,22
GD	Zone d'interface en habitat groupé dense	-0,21
EX1	Surface occupée par des expositions sous le vent	-0,23
KR1	Exposition très fraîche	-0,29
KR4	Exposition chaude	-0,29
PT4	Surface occupée par des pentes supérieures à 30 %	-0,34
VG0	Autre que les classes Vg1 à Vg4	-0,35
DP	Densité de population	-0,37
GTD	Zone d'interface en habitat groupé très dense	-0,46
DR	Densité de routes	-0,51
PT3	Surface occupée par des pentes de 20 à 30 %	-0,56
URB	Espaces urbains	-0,56
PT2	Surface occupée par des pentes de 10 à 20 %	-0,57
DB	Densité de bâtis	-0,57
KR5	Exposition très chaude	-0,66
PTM	Pente moyenne du polygone	-0,70

Facteur 3	Poids du Facteur 3	9%
DIC	Distance point(s) d'éclosion au chemin le plus proche	0,68
DIR	Distance point(s) d'éclosion à la route la plus proche	0,67
SB	% de surface du polygone parcourue par feu(x)	0,45
ESN	Autres espaces naturels	0,44
DI	Densité de feu (nb feux/surface)	0,38
KR5	Exposition très chaude	0,33
I	Zone d'interface en habitat isolé	0,33
AI1	Agrégation nulle de la végétation	0,30
VG0	Autre que les classes Vg1 à Vg4	0,29
PTM	Pente moyenne du polygone	0,29
PT3	Surface occupée par des pentes de 20 à 30 %	0,27
AGR	Espaces agricoles	0,21
EX1	Surface occupée par des expositions sous le vent	0,21
KR4	Exposition chaude	0,21
PT2	Surface occupée par des pentes de 10 à 20 %	0,20
KR2	Exposition fraîche	-0,21
KR3	Exposition neutre	-0,26
PT1	Surface occupée par des pentes de 0 à 10 %	-0,26
VG3	Mélange Feuillus et résineux	-0,31
VG2	Résineux	-0,31
EX3	Surface occupée par des expositions au vent	-0,31
AI3	Agrégation forte de la végétation	-0,31
DE	Densité d'éclosion (pts éclosion/surface)	-0,32
BOI	Espaces boisés	-0,34
DR	Densité de routes	-0,43
URB	Espaces urbains	-0,44
GTD	Zone d'interface en habitat groupé très dense	-0,47
DB	Densité de bâtis	-0,49

Figure 9-3 Coordonnées des variables présentant de bonnes corrélations sur chacune des trois composantes principales (polygones à densité d'incendie non nulle)

Ces résultats de l'ACP sur l'ensemble des 373 polygones à densité d'incendie non nulle DI montrent que :

Le facteur 1 oppose :

- ☞ d'une part des variables qui représentent une occupation du sol à dominante de milieu naturel : des espaces boisés BOI (score $s = 0,62$), continus et compacts AI3 ($s = 0,69$) composés de peuplements mélangés de feuillus-résineux VG3 ($s = 0,57$), des garrigues VG4 ($s = 0,65$) et des espaces de végétation plus ouverts AI2 ($s = 0,60$) ;
- ☞ d'autre part des variables qui représentent une occupation du sol sans végétation VG0 ($s = -0,83$), qui est confirmée par une agrégation de la végétation nulle AI1 ($s = -0,85$) et d'espaces agricoles AGR ($s = -0,62$).

Le facteur 2 oppose :

- ☞ d'une part des variables, de pentes faibles PT1 ($s = 0,68$) exposées au vent EX3 ($s = 0,29$) et en exposition neutre KR3 ($s = 0,59$) et un habitat isolé I ($s = 0,52$) ;
- ☞ d'autre part des variables d'exposition très chaude KR5 ($s = -0,66$), de pentes moyennes PTm ($s = -0,70$), des pentes modérées PT2 ($s = -0,52$) à fortes PT3 ($s = -0,56$) et des espaces urbains URB ($s = -0,56$) et forte densité de bâtis DB ($s = -0,57$) plutôt exposées sous le vent EX1 ($s = -0,23$).

Le facteur 3 oppose :

- ☞ d'une part des variables relatives à des distances élevées de points d'éclosion au plus proche chemin DiC ($s = 0,68$) et à la plus proche route DiR ($s = 0,67$), des espaces de type autres espaces naturels ESN ($s = 0,44$) ;
- ☞ d'autre part des variables relevant de fortes densités de bâtis DB ($s = -0,49$), un niveau d'urbanisation élevé URB ($s = -0,44$), GTD ($s = -0,47$) et de routes DR ($s = -0,43$).

On observe également que :

- la variable Taux de surfaces brûlées SB est corrélée au facteur 1 ($s = 0,31$), au facteur 2 ($s = 0,25$), au facteur 3 ($s = 0,45$) ;
- la variable Densité d'éclosion DE est corrélée au facteur 3 ($s = -0,32$) ;
- la variable Densité d'incendie DI est corrélée au facteur 3 ($s = 0,38$).

9.2.4. Résultats de l'ACP sur les polygones à taux de surfaces brûlées non nul

Les trois composantes principales ont des poids respectifs de 15,3 %, 9,6 % et 8 %. La Figure 9-4 présente les seules variables dont les coordonnées étaient supérieures à 0,2 ou inférieures à -0,2, et triées dans l'ordre décroissant de ces coordonnées.

ACP sur les polygones à Taux de Surfaces Brûlées non nul (SB non nul)

Facteur 1 Poids du facteur 1 15,30%			Facteur 2 Poids du facteur 2 9,60%			Facteur 3 Poids du facteur 3 8%		
AI3	Agrégation forte de la végétation	0,74	PT1	Surface occupée par des pentes de 0 à 10 %	0,60	BOI	Espaces boisés	0,45
VG3	Mélange Feuillus et résineux	0,66	KR3	Exposition neutre	0,48	EX3	Surface occupée par des expositions au vent	0,43
PTM	Pente moyenne du polygone	0,64	I	Zone d'interface en habitat isolé	0,45	DB	Densité de bâtis	0,41
PT2	Surface occupée par des pentes de 10 à 20 %	0,63	DIR	Distance point(s) d'éclosion à la route la plus proche	0,35	KR2	Exposition fraîche	0,39
BOI	Espaces boisés	0,62	DC	Densité de chemins	0,34	AI3	Agrégation forte de la végétation	0,37
VG4	Garrigue	0,53	DIC	Distance point(s) d'éclosion au chemin le plus proche	0,34	VG2	Résineux	0,36
AI2	Agrégation faible de la végétation	0,48	SB	% de surface du polygone parcourue par feu(x)	0,26	GTD	Zone d'interface en habitat groupé très dense	0,35
ALT	Altitude	0,42	AI3	Agrégation forte de la végétation	0,24	DR	Densité de routes	0,35
PT3	Surface occupée par des pentes de 20 à 30 %	0,41	EX3	Surface occupée par des expositions au vent	0,23	URB	Espaces urbains	0,34
KR5	Exposition très chaude	0,39	AGR	Espaces agricoles	0,22	VG3	Mélange Feuillus et résineux	0,33
SB	% de surface du polygone parcourue par feu(x)	0,39				KR3	Exposition neutre	0,27
KR1	Exposition très fraîche	0,35				PT1	Surface occupée par des pentes de 0 à 10 %	0,26
KR2	Exposition fraîche	0,34						
ESN	Autres espaces naturels	0,27	KR1	Exposition très fraîche	-0,21	PT2	Surface occupée par des pentes de 10 à 20 %	-0,20
DC	Densité de chemins	0,23	PT4	Surface occupée par des pentes supérieures à 30 %	-0,22	PT3	Surface occupée par des pentes de 20 à 30 %	-0,25
VG1	Feuillus	0,21	EX1	Surface occupée par des expositions sous le vent	-0,22	AGR	Espaces agricoles	-0,27
I	Zone d'interface en habitat isolé	0,21	GD	Zone d'interface en habitat groupé dense	-0,23	DI	Densité de feu (nb feux/surface)	-0,28
			VG0	Autre que les classes Vg1 à Vg4	-0,23	PTM	Pente moyenne du polygone	-0,29
GTD	Zone d'interface en habitat groupé très dense	-0,24	KR4	Exposition chaude	-0,26	I	Zone d'interface en habitat isolé	-0,33
DB	Densité de bâtis	-0,34	DP	Densité de population	-0,32	VG0	Autre que les classes Vg1 à Vg4	-0,35
O	Zone d'habitat en dehors d'une zone d'interface	-0,34	PT3	Surface occupée par des pentes de 20 à 30 %	-0,47	AI1	Agrégation nulle de la végétation	-0,35
DR	Densité de routes	-0,41	GTD	Zone d'interface en habitat groupé très dense	-0,49	EX1	Surface occupée par des expositions sous le vent	-0,36
KR3	Exposition neutre	-0,49	PT2	Surface occupée par des pentes de 10 à 20 %	-0,51	KR4	Exposition chaude	-0,37
URB	Espaces urbains	-0,49	DR	Densité de routes	-0,52	SB	% de surface du polygone parcourue par feu(x)	-0,38
AGR	Espaces agricoles	-0,57	URB	Espaces urbains	-0,55	KR5	Exposition très chaude	-0,40
PT1	Surface occupée par des pentes de 0 à 10 %	-0,67	KR5	Exposition très chaude	-0,56	ESN	Autres espaces naturels	-0,46
AI1	Agrégation nulle de la végétation	-0,83	DB	Densité de bâtis	-0,60	DIC	Distance point(s) d'éclosion au chemin le plus proche	-0,47
VG0	Autre que les classes Vg1 à Vg4	-0,85	PTM	Pente moyenne du polygone	-0,61	DIR	Distance point(s) d'éclosion à la route la plus proche	-0,47

Figure 9-4 Coordonnées des variables présentant de bonnes corrélations sur chacune des trois composantes principales (polygones à taux de surfaces brûlées non nul)

Ces résultats de l'ACP sur l'ensemble des 1 957 polygones à taux de surfaces brûlées SB non nul montrent que :

Le facteur 1 oppose :

- ☞ d'une part des variables qui représentent une occupation du sol à dominante de milieu naturel : des espaces boisés BOI (score $s = 0,62$), continus et compacts AI3 ($s = 0,74$) composés de peuplements mélangés de feuillus-résineux VG3 ($s = 0,66$), des garrigues VG4 ($s = 0,53$) et des espaces de végétation plus ouverts AI2 ($s = 0,48$) ;
- ☞ d'autre part des variables qui représentent une occupation du sol sans végétation VG0 ($s = -0,85$) qui est confirmée par une agrégation de la végétation nulle AI1 ($s = -0,83$) et des espaces agricoles AGR ($s = -0,57$).

Le facteur 2 oppose :

- ☞ d'une part des variables relatives à des pentes faibles PT1 ($s = 0,60$) et en exposition neutre KR3 ($s = 0,48$) et un habitat isolé I ($s = 0,45$) avec forte densité de chemins DC ($s = 0,34$) et des distances élevées de points d'éclosion au plus proche chemin DiC ($s = 0,34$) et à la plus proche route DiR ($s = 0,35$) ;
- ☞ d'autre part des variables relatives à des expositions très chaudes KR5 ($s = -0,56$), des pentes moyennes PTm ($s = -0,61$), des pentes modérées PT2 ($s = -0,51$) à fortes PT3 ($s = -0,47$) et des espaces urbains URB ($s = -0,55$) et forte densité de bâtis DB ($s = -0,60$).

Le facteur 3 oppose :

- ☞ d'une part des variables relatives à des expositions au vent EX3 ($s = 0,43$), plutôt fraîches KR2 ($s = 0,39$) ;
- ☞ d'autre part des variables relatives à des distances élevées de points d'éclosion au plus proche chemin DiC ($s = 0,47$) et à la plus proche route DiR ($s = 0,47$), des espaces de type autres espaces naturels ESN ($s = 0,46$) et des expositions très chaudes KR5 ($s = 0,40$).

On observe également que :

- la variable Taux de surfaces brûlées SB est corrélée au facteur 1 ($s = 0,39$), au facteur 2 ($s = 0,26$), au facteur 3 ($s = -0,38$) ;
- la variable Densité d'éclosion DE est corrélée au facteur 3 ($s = -0,32$) ;
- la variable Densité d'incendie DI est corrélée au facteur 3 ($s = -0,38$).

9.2.5. Conclusion

L'analyse en composantes principales a permis de dégager trois facteurs principaux : le premier facteur porte sur le milieu naturel, le deuxième sur les niveaux d'urbanisation et le troisième sur l'environnement topographique. Les trois autres analyses supplémentaires ont porté sur des unités spatiales plus spécifiques dans lesquelles des départs de feu avaient été enregistrés (densité d'éclosion non nulle), des incendies étaient survenus une ou plusieurs fois (densité d'incendie non nulle) et des surfaces avaient brûlé (taux de surfaces brûlées non nul). Les résultats ont permis de constater une relative régularité, les unités spatiales restent classées de façon comparable : les composantes restent les mêmes. De façon synthétique, on peut considérer :

- un premier facteur qui oppose des variables relatives à des espaces boisés BOI, continus et compacts AI3 composés de peuplements mélangés de feuillus-résineux VG3 (scores de 0,7 à 0,8), des garrigues VG4 et des espaces de végétation plus ouverts AI2 (scores de 0,6 à 0,7) à des variables qui représentent une occupation du sol sans végétation VG0 qui est confirmée

par une agrégation de la végétation nulle AI1 (scores de - 0,85) et des espaces agricoles AGR (score de -0,6) ;

- un deuxième facteur qui oppose des variables relatives à un habitat isolé I, de fortes densités de chemins DC (scores de 0,45) à des variables relevant d'un niveau d'urbanisation élevé URB, d'interface habitat-forêt groupé très dense GTD, de fortes densités de bâtis DB et de routes DR (scores de l'ordre de -0,60) ;
- un troisième facteur qui oppose des variables relatives aux pentes faibles PT1 (score de 0,6), aux expositions au vent EX3 et aux expositions fraîches KR2 (scores de 0,4) à des variables d'exposition très chaude KR5 et de pentes moyennes PTm (scores de -0,6), des pentes fortes PT3 (score de -0,5) et des expositions sous le vent EX1 (score de -0,4).

Elles soulignent par ailleurs les corrélations qui peuvent exister entre les variables explicatives retenues pour l'analyse.

9.3 Modélisation des indicateurs de risque DE, DI et SB

9.3.1. Choix de la méthode de régression à plusieurs facteurs PLS

a. Intérêts de la méthode de type Moindres carrés partiels PLS - Partial Least Squares

Dans le cas étudié dans la thèse, on cherche à réaliser une régression de chacune des trois variables à expliquer, densité d'éclosion DE, densité d'incendie DI et taux de surfaces brûlées SB (ou indicateur de risque), sur des variables explicatives $x_1, x_2, x_3, \dots, x_i$ qui peuvent être plus ou moins fortement corrélées entre elles. Par ailleurs les coefficients de régression doivent pouvoir être interprétables et permettre de mesurer la contribution de chaque variable x_i à la construction de chacune des trois variables, densité d'éclosion DE, densité d'incendie DI et taux de surfaces brûlées SB.

Des approches statistiques comme la loi de Poisson, loi Négative binomiale, « point process », « survival model », la régression logistique, la fonction distance, les corrélations canoniques... sont fréquemment citées. Mercer et Prestemon (2005) comparent les nombreuses méthodes statistiques employées pour modéliser différents types d'indicateurs de risque relatifs à l'éclosion des feux, à l'extension des surfaces brûlées, à l'intensité, aux dommages... Certaines d'entre elles ne peuvent être mises en œuvre que sous certaines conditions comme une faible corrélation entre variables. Par ailleurs la forte corrélation entre certaines variables observée dans les analyses en composantes principales (ACP), peut obliger à ne pas conserver toutes les variables étudiées, selon l'approche statistique choisie. Or, comme le stipulent Sturtevant et Cleland (2007) dans leurs travaux sur la modélisation de l'occurrence des feux, le fait de conserver toutes les variables étudiées peut permettre d'améliorer les analyses, du fait des nuances subtiles qu'elles peuvent introduire et ce malgré l'existence de fortes corrélations entre certaines d'entre elles. Ainsi croissance de population et densité de bâtis sont fortement corrélées, densité de routes, population et densité de bâtis sont positivement fortement corrélées, % de surfaces forestières et % de surfaces agricoles sont fortement négativement corrélées. Certaines de ces variables citées en exemples, du fait des fortes corrélations observées, pourraient être mises à l'écart alors qu'elles peuvent apporter une information intéressante et pertinente pour l'analyse.

Les résultats du tableau des corrélations des variables (Tableau 9-1) présentés dans le paragraphe 9.1 et l'intérêt de conserver chacune d'entre elles démontré dans les résultats des ACP développées dans le paragraphe 9.2 ont conduit à choisir la méthode de régression à plusieurs facteurs de type Moindres carrés partiels PLS (Partial Least Squares). Cette méthode est conçue pour construire un modèle statistique reliant plusieurs variables explicatives X qui peuvent être corrélées entre elles, à une ou plusieurs variables à expliquer Y (Tenenhaus, 1998). Cette procédure est utile lorsqu'il y a de nombreux facteurs et que le but est de prévoir les variables de réponse. Les variables étudiées peuvent *a priori* être toutes conservées pour l'analyse.

Par ailleurs la régression PLS permet de fournir une estimation des variables à expliquer, sous forme de variable continue, directement cartographiable et segmentable en classes d'amplitude contrôlée. Ceci est essentiel dans un but d'évaluation et de cartographie du risque.

b. Mise en œuvre de la procédure PLS

La régression PLS a donc été mise en œuvre pour réaliser la régression de chacun des trois indicateurs densité d'éclosion DE, densité d'incendie DI et taux de surfaces brûlées SB sur l'ensemble des variables explicatives. Le logiciel STATGRAPHICS®Centurion a permis de réaliser les calculs, mais certaines étapes ont été renforcées en utilisant des logiciels complémentaires comme le logiciel ADE4 et le logiciel R, pour s'assurer de la robustesse des résultats obtenus et de leur significativité.

Nombre de composantes significatives. Le résultat affiché de la régression PLS est fonction du nombre de composantes jugées significatives, or sur le même jeu de données pour la même analyse PLS, ce nombre peut varier fortement d'un logiciel à l'autre en fonction de la méthode de validation (bootstrap, validation croisée, permutation aléatoire, ...) et du critère associé de décision (intervalle de confiance, PRESS (PRediction Error Sum of Squares), variance expliquée) (Venetier, 2007). La significativité des composantes de la régression PLS a donc été évaluée par un test de permutation des observations avec 10 000 itérations (Good, 1994 cité dans Venetier, 2007) réalisé avec le logiciel ADE4 dont les résultats sont jugés robustes pour ce test. Les composantes sont proposées avec leur niveau de significativité et le taux de variance expliquée. Seules ont été jugées significatives, les composantes pour lesquelles la fréquence des permutations aléatoires, qui donnent un pourcentage de variance expliquée supérieur ou égal à celui de la base de données non permutée, était inférieure à 5 %. La PLS a alors été réalisée sous STATGRAPHICS®Centurion en sélectionnant le nombre de composantes considéré comme significatif sous ADE4. Un tri sur 2 variables a été réalisé pour permettre le calcul du PRESS, un moyen supplémentaire de confirmer la significativité des composantes. En effet lorsque la valeur du PRESS commence à diminuer pour un nombre de composantes donné, le nombre de composantes est considéré comme optimal.

Tri des variables. La PLS a permis alors sous STATGRAPHICS®Centurion d'obtenir les coefficients de régression des variables et leur poids en valeur absolue. Le tri par ordre décroissant des coefficients standardisés des variables a permis de sélectionner les variables qui avaient le plus de poids. Les variables qui possédaient une valeur de coefficient de régression très faible (en principe inférieur à 0,05) ont été supprimées et la régression PLS a été réitérée avec les seules variables sélectionnées. La procédure a été réalisée pas à pas pour éviter de supprimer trop rapidement une variable qui aurait pu être finalement significative, elle a été accompagnée du contrôle sous ADE4 de la significativité du nombre de composantes retenues avec les variables sélectionnées. Si le nombre n'était pas confirmé, la PLS était relancée sous STATGRAPHICS®Centurion avec le nouveau nombre de composantes.

Modèle et significativité des variables. Le modèle a été obtenu avec un niveau de R^2 ajusté correspondant à la part de variance expliquée. Il a été défini avec des coefficients de régression pour chacune des variables sélectionnées.

Pour s'assurer de la significativité des variables sur les composantes retenues, une procédure de Bootstrap a été réalisée sous le logiciel R (Amato et Vinzi, 2003). Cette procédure tire un nombre de 1 000 polygones à partir desquels elle construit un modèle avec les variables sélectionnées et elle mesure le niveau de validation du modèle obtenu avec un autre jeu de données n'ayant pas été utilisé pour établir le modèle. Le tirage des polygones est réalisé au hasard avec remise. 1000 itérations ont alors été réalisées. Le niveau de significativité des variables avec leur coefficient de régression encadrés dans leur intervalle de confiance avec le

seuil de significativité a été obtenu et a permis de juger de la robustesse du modèle élaboré. Seules les variables dont l'intervalle de confiance à 5 % du coefficient de corrélation partiel ne comprend pas la valeur 0 ont été jugées significatives (Venetier, 2007).

L'analyse développée dans la thèse a donc consisté à définir quelles variables, et avec quel poids, expliquaient la variable densité d'éclosion DE, la variable densité d'incendie DI et la variable taux de surfaces brûlées SB.

De nombreux essais de linéarisation des variables explicatives ont été réalisés de façon à améliorer les résultats. Aucun d'entre eux ne s'est avéré vraiment efficace et pertinent. En revanche, deux des trois variables à expliquer ont été transformées. Ainsi l'analyse a porté sur LOG(DE) au lieu de DE et sur LOG(DI) au lieu de DI. Les essais de transformation de la variable SB n'ayant pas permis d'améliorer les résultats, la variable SB n'a finalement pas été transformée.

9.3.2. Modélisation de l'indicateur de risque densité d'éclosion DE

a. Régression PLS sur la variable LOG(DE)

Détail de la procédure

Le nombre de composantes significatives est déterminé dans la procédure de PLS sous ADE4. Un test de permutations est réalisé avec 10 000 répétitions.

- Avec les 39 variables explicatives et la variable LOG(DE) à expliquer, à partir des 192 polygones à densité d'éclosion non nulle

Le test de permutations réalisé avec 10 000 répétitions montre que seules deux composantes sont significatives au seuil de 5 % (Tableau 9-2).

Step	Nrepet	X>Xobs	Frequency
1	10000	0	0,000e+00
2	10000	0	0,000e+00
3	10000	2229	2,229e-01
4	10000	9980	9,980e-01

Tableau 9-2 Résultat du test de permutations avec 39 variables pour LOG(DE)

Ainsi la PLS est réalisée sous STATGRAPHICS@Centurion en considérant deux composantes et avec le retrait de 1 sur 2 pour le test de validation croisée.

Moindres carrés partiels (PLS) sous STATGRAPHICS@Centurion

Nombre de variables à expliquer : LOG_DE_

Nombre de variables explicatives : 39

I, D, GD, GTD, O, R, DB, DR, DC, DP, DiR, DiC, EX1, EX2, EX3, PT1, PT2, PT3, PT4, PTm, KR1, KR2, KR3, KR4, KR5, VG0, VG1, VG2, VG3, VG4, AI1, AI2, AI3, ALT, AGR, BOI, ESN, URB, CRE

Nombre de sujets complets : 192

Nombre de composantes extraites : 2

Validation croisée : retirer 1 sur 2

Analyse de la variance pour LOG DE

Source	Somme des carrés	Ddl	Moyenne quadratique	Rapport F	Probabilité
Modèle	42,8143	2	21,4071	106,055	0,0
Résidu	38,1494	189	0,201849		
Total (corr.)	80,9637	191			

Modèle pour LOG DE

	% de variation		Moyenne quadratique	Prévision
Composante	de Y	R-carré	PRESS	R-carré
1	35,8521	35,8521	28,6985	25,4702
2	17,0288	52,8808	24,1221	37,355

Variables à expliquer et explicatives

	% de variation	% cumulé	% de variation	% cumulé	Prévision moyenne
Composante	de X	de X	de Y	de Y	R-carré
1	16,2367	16,2367	35,8521	35,8521	25,4702
2	9,93426	26,1709	17,0288	52,8808	37,355

Tableau 9-3 Tableaux de résultats de la PLS avec 39 variables pour LOG(DE)

Le Tableau 9-3 affiche les résultats de l'ajustement du modèle pour 1 variable à expliquer basés sur 39 variables prédictives. Pour ajuster le modèle, 2 composantes ont été extraites. Les valeurs des probabilités dans le tableau de l'ANOVA indiquent qu'il y a 1 modèle significatif au niveau de signification de 5 %. 96 observations ont été ajustées pour tester la capacité de prévision des modèles. En se basant sur le R-carré moyen de prévision, le meilleur modèle est celui qui utilise 2 composantes.

En procédant par étapes, l'analyse des valeurs des coefficients de régression de chacune des variables montre que les 28 variables, dont les acronymes ont été définis dans le Tableau 8-1, BOI, KR4, PTm, AGR, PT1, PT3, PT2, DR, EX2, VG2, AI2, VG3, VG4, PT4, EX3, KR2, VG1, AI3, DC, AI1, VG0, DiR, DiC, KR5, KR3, EX1, KR1, ALT, citées selon un ordre croissant de la valeur du coefficient de régression, présentaient un coefficient de régression standardisé inférieur à 0,05 avec deux composantes significatives, elles ont donc été exclues du modèle car jugées non significatives.

- Avec les 11 variables explicatives et la variable LOG(DE) à expliquer, à partir des 192 polygones à densité d'éclosion non nulle

Le nombre de composantes significatives est vérifié et recalculé dans la procédure de PLS sous ADE4. Un test de permutations est réalisé de la même façon avec 10 000 répétitions

Step	Nrepet	X>Xobs	Frequency
1	10000	0	0,000e+00
2	10000	1	1,000e-4
3	10000	9889	9,889e-01
4	10000	9190	9,190e-01

Tableau 9-4 Résultat du test de permutations avec 11 variables pour LOG(DE)

Le Tableau 9-4 montre que toujours seules deux composantes sont significatives au seuil de 5 %. Ainsi la PLS est réalisée sous STATGRAPHICS@Centurion en considérant deux composantes et avec le retrait de 1 sur 2 pour le test de validation croisée.

Moindres carrés partiels (PLS) sous STATGRAPHICS@Centurion

Nombre de variables à expliquer : LOG_DE

Nombre de variables explicatives : 11

I, D, GD, GTD, O, R, DB, DP, ESN, URB, CRE

Nombre de sujets complets : 192

Nombre de composantes extraites : 2

Validation croisée : retirer 1 sur 2

Analyse de la variance pour LOG DE

Source	Somme des carrés	Ddl	Moyenne quadratique	Rapport F	Probabilité
Modèle	45,5909	2	22,7955	121,798	0,0
Résidu	35,3728	189	0,187157		
Total (corr.)	80,9637	191			

Modèle pour LOG DE

	% de variation		Moyenne quadratique	Prévision
Composante	de Y	R-carré	PRESS	R-carré
1	48,3852	48,3852	22,9693	40,3489
2	7,92517	56,3103	21,6873	43,6782

Variables à expliquer et explicatives

	% de variation	% cumulé	% de variation	% cumulé	Prévision moyenne
Composante	de X	de X	de Y	de Y	R-carré
1	24,9883	24,9883	48,3852	48,3852	40,3489
2	12,7796	37,7679	7,92517	56,3103	43,6782

Tableau 9-5 Tableaux de résultats de la PLS avec 11 variables pour LOG(DE)

Le Tableau 9-5 affiche les résultats de l'ajustement du modèle pour 1 variable à expliquer basés sur 11 variables prédictives. Pour ajuster le modèle, 2 composantes ont été extraites. Les valeurs des probabilités dans le tableau de l'ANOVA indiquent qu'il y a 1 modèle significatif au niveau de signification de 5 %. 96 observations ont été ajustées pour tester la capacité de prévision des modèles. En se basant sur le R-carré moyen de prévision, le meilleur modèle est celui qui utilise 2 composantes. Le modèle obtenu possède un $R^2 = 56,3 \%$ avec deux composantes. La prévision moyenne est de 43,7 %. Les coefficients de régression associés à chacune des variables figurent dans le Tableau 9-6 .

Coefficients standardisés		Coefficients non standardisés	
	LOG DE		LOG DE
Constante	0,0	Constante	1,76038
I	0,315455	I	0,00524832
D	0,0774532	D	0,0011251
GD	-0,115763	GD	-0,00192598
GTD	-0,0670211	GTD	-0,0010355
O	-0,156834	O	-0,00481825
R	-0,197108	R	-0,00492295
DB	-0,164086	DB	-0,000577057
DP	-0,113064	DP	-0,00902112
ESN	0,143548	ESN	0,00421781
URB	-0,153679	URB	-0,00428583
CRE	0,0616017	CRE	0,00412734

Tableau 9-6 Coefficients de régression des 11 variables issues de la PLS pour LOG(DE)

Pour s'assurer de la significativité des coefficients du modèle, une procédure Bootstrap est réalisée sous le logiciel R, fournissant ainsi pour chaque variable son niveau de significativité ainsi que l'intervalle de confiance de son coefficient de régression. Le Tableau 9-7 fait apparaître que toutes les variables sont significatives, cependant certaines d'entre elles ne le sont qu'au seuil de 5 % (* pour P-value). Il est donc décidé de procéder à une nouvelle PLS en ne considérant que les variables ayant une significativité au seuil de 1 % et 0,1 % (respectivement ** et *** pour P-value).

Variables	0.1 %	1 %	5 %	Coeff	95 %	99 %	99.9 %	BootSize	P-value
I	0,2343	0,2514	0,2687	0,3155	0,3625	0,3757	0,4032	1000	***
D	-0,0536	-0,0202	0,0062	0,0775	0,1387	0,164	0,1884	1000	*
GD	-0,2548	-0,2293	-0,1965	-0,1158	-0,0366	-0,007	0,0163	1000	**
GTD	-0,1536	-0,1371	-0,1168	-0,0670	-0,0179	-0,0028	0,0184	1000	**
O	-0,2874	-0,2725	-0,2394	-0,1568	-0,045	0,0038	0,0597	1000	*
R	-0,2965	-0,2782	-0,2543	-0,1971	-0,1204	-0,0897	-0,0602	1000	***
DB	-0,232	-0,2108	-0,1991	-0,1641	-0,131	-0,1212	-0,1092	1000	***
DP	-0,258	-0,2168	-0,1865	-0,1131	-0,0309	0,0024	0,0471	1000	*
ESN	0,0374	0,0589	0,0847	0,1435	0,1997	0,2193	0,2559	1000	***
URB	-0,2274	-0,2113	-0,1941	-0,1537	-0,1062	-0,0904	-0,0664	1000	***
CRE	-0,0997	-0,0363	0,0039	0,0616	0,1013	0,1197	0,1286	1000	*

Tableau 9-7 Coefficients de corrélation partielle par variable et ses intervalles de confiance à 5 %, 1 %, 0.1 %

Une nouvelle PLS est réalisée avec les seules variables les plus significatives.

Moindres carrés partiels (PLS)

Nombre de variables à expliquer : LOG_DE

Nombre de variables explicatives : 7

I, GD, GTD, R, DB, ESN, URB

Nombre de sujets complets : 192

Nombre de composantes extraites : 2

Validation croisée : retirer 1 à la fois

Analyse de la variance pour LOG DE

Source	Somme des carrés	Ddl	Moyenne quadratique	Rapport F	Probabilité
Modèle	41,2479	2	20,624	98,1456	0,0
Résidu	39,7158	189	0,210136		
Total (corr.)	80,9637	191			

Modèle pour LOG DE

	% de variation		Moyenne quadratique	Prévision
Composante	de Y	R-carré	PRESS	R-carré
1	42,8892	42,8892	47,8322	40,9214
2	8,05698	50,9462	42,1753	47,9084

Variables à expliquer et explicatives

	% de variation	% cumulé	% de variation	% cumulé	Prévision moyenne
Composante	de X	de X	de Y	de Y	R-carré
1	41,1447	41,1447	42,8892	42,8892	40,9214
2	19,4796	60,6243	8,05698	50,9462	47,9084

Tableau 9-8 Tableaux de résultats de la PLS avec 7 variables

Le Tableau 9-8 affiche les résultats de l'ajustement du modèle pour 1 variable à expliquer basés sur 7 variables prédictives. Pour ajuster le modèle, 2 composantes ont été extraites. Les valeurs des probabilités dans le tableau de l'ANOVA indiquent qu'il y a 1 modèle significatif au niveau de signification de 5 %. 96 observations ont été ajustées pour tester la capacité de prévision des modèles. En se basant sur le R-carré moyen de prévision, le meilleur modèle est celui qui utilise 2 composantes. Le modèle obtenu possède un $R^2 = 51\%$ avec deux composantes. La prévision moyenne est de 47,9 %. Il est un peu moins bon que le précédent mais la prévision moyenne est améliorée de + 4,2 % avec 47,9 %. Les coefficients de régression figurent sur le Tableau 9-9.

	Coefficients standardisés	Coefficients non standardisés
	<i>LOG_DE</i>	<i>LOG_DE</i>
Constante	0,0	1,76489
I	0,335898	0,00558842
GD	-0,144353	-0,00240165
GTD	-0,0685838	-0,00105965
R	-0,244145	-0,00609774
DB	-0,186585	-0,00065618
ESN	0,158393	0,00465397
URB	-0,183855	-0,00512739

Tableau 9-9 Coefficients de régression pour les variables

Pour s'assurer de la significativité des coefficients du modèle, une procédure Bootstrap est réalisée sous le logiciel R, fournissant ainsi pour chaque variable son niveau de significativité ainsi que l'intervalle de confiance de son coefficient de régression. Le Tableau 9-10 fait apparaître que toutes les variables sont très significatives aux seuils de 1 % et 0,1 % (respectivement ** et *** pour P-Value), à l'exception de la variable GTD qui est significative au seuil de 5 % (* pour P-Value). Il est décidé de conserver le modèle tel qu'il est.

Variables	0,1 %	1 %	5 %	Coeff	95 %	99 %	99,9 %	BootSize	P-value
I	0,2549	0,269	0,2861	0,335898	0,3902	0,4104	0,4362	1000	***
ESN	0,0504	0,0705	0,0954	0,158393	0,2169	0,2413	0,2688	1000	***
GTD	-0,1709	-0,145	-0,1221	-0,06858	-0,0047	0,0273	0,0594	1000	*
GD	-0,3134	-0,2667	-0,2309	-0,14435	-0,0541	-0,0192	0,0091	1000	**
URB	-0,2932	-0,2653	-0,2417	-0,18386	-0,1299	-0,1031	-0,0886	1000	***
DB	-0,2603	-0,247	-0,2246	-0,18658	-0,1501	-0,136	-0,1198	1000	***
R	-0,4149	-0,3741	-0,3395	-0,24415	-0,1549	-0,1198	-0,0825	1000	***

Tableau 9-10 Coefficients de corrélation partielle par variable et ses intervalles de confiance à 5 %, 1 %, 0,1 %

b. Résultat

Sur les 39 variables prises en compte pour la régression PLS, seules 7 variables sont retenues comme significatives sur deux composantes. Elles expliquent la variable LOG(DE), soit le logarithme de la densité des points d'éclosion des feux de forêt calculé comme le ratio du nombre de points d'éclosion recensés dans le polygone par la surface de ce polygone. Le modèle obtenu possède un $R^2 = 51 \%$ avec deux composantes. Le poids des variables dans le modèle est représenté sur la Figure 9-5 .

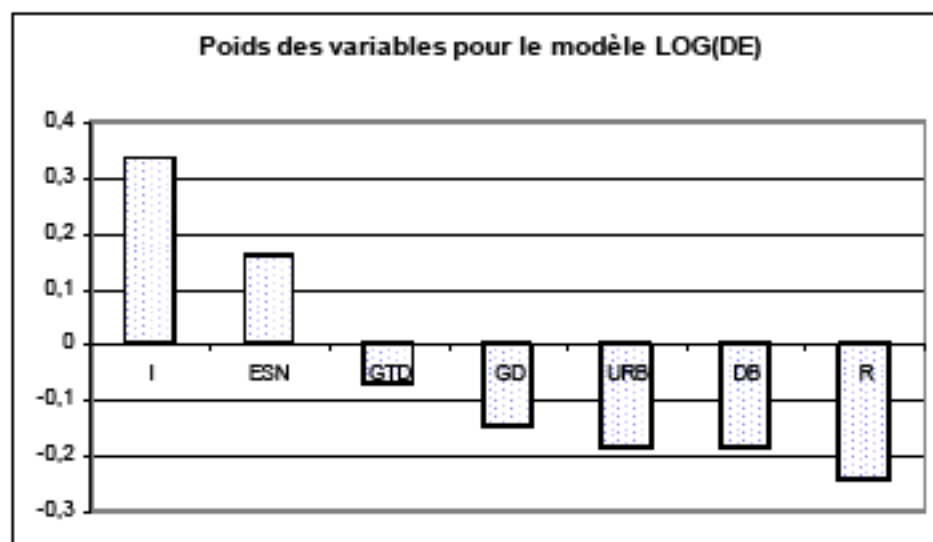


Figure 9-5 Poids des variables dans le modèle LOG(DE)

Le modèle issu de la démarche exposée est représenté par la Figure 9-6. Son équation est la suivante :

$$LOG(DE) = 1,76489 + 0,00558842 I - 0,00240165 GD - 0,00105965 GTD - 0,00609774 R - 0,00065618 DB + 0,00465397 ESN - 0,00512739 URB$$

Sachant que :

$$DE = \exp(LN10 * LOG(DE))$$

$$= \exp(2,30258509 * LOG(DE))$$

on en déduit :

$$DE = \exp(2,30258509 * [1,76489 + 0,00558842 I - 0,00240165 GD - 0,00105965 GTD - 0,00609774 R - 0,00065618 DB + 0,00465397 ESN - 0,00512739 URB])$$

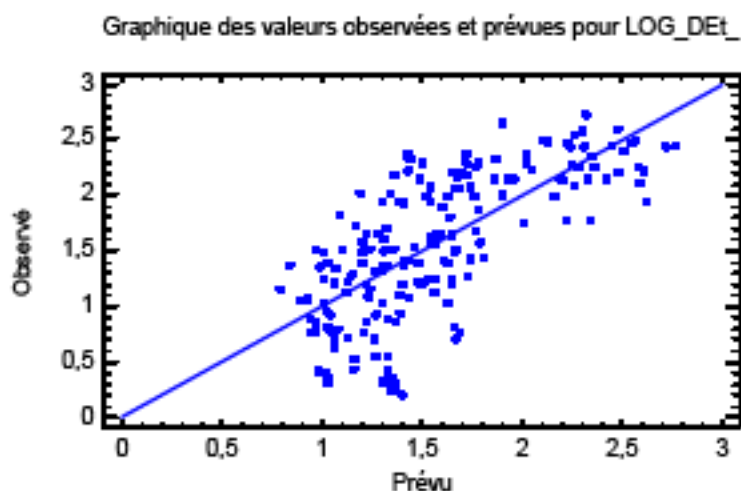


Figure 9-6 Modèle LOG(DE)

9.3.3. Modélisation de l'indicateur de risque densité d'incendie DI

a. Régression PLS sur la variable LOG(DI)

Détail de la procédure

Le nombre de composantes significatives est déterminé dans la procédure de PLS sous ADE4. Un test de permutations est réalisé avec 10 000 répétitions.

- Avec les 37 variables explicatives et la variable LOG(DI) à expliquer, à partir des 373 polygones à densité d'incendie non nulle.

Observation : Les 2 variables, distance médiane des points d'éclosion au chemin le plus proche DiC et distance médiane des points d'éclosion à la route la plus proche DiR n'ont pas été prises en compte du fait des valeurs manquantes pour les unités spatiales contenant au moins un point d'éclosion.

Le test de permutations réalisé avec 10 000 répétitions montre que trois composantes sont significatives au seuil de 5 % (Tableau 9-11).

Step	Nrepet	X>Xobs	Frequency
1	10000	0	0,000e+00
2	10000	0	0,000e+00
3	10000	22	2,200e-03
4	10000	7712	7,712e-01

Tableau 9-11 Résultat du test de permutations avec 37 variables pour LOG(DI)

Ainsi la PLS est réalisée sous STATGRAPHICS@Centurion en considérant deux composantes et avec le retrait de 1 sur 2 pour le test de validation croisée.

Moindres carrés partiels (PLS) sous STATGRAPHICS@Centurion

Nombre de variables à expliquer : LOG_DI_

Nombre de variables explicatives : 37

I, D, GD, GTD, O, R, DB, DR, DC, DP, EX1, EX2, EX3, PT1, PT2, PT3, PT4, PTm, KR1, KR2, KR3, KR4, KR5, VG0, VG1, VG2, VG3, VG4, AI1, AI2, AI3, ALT, AGR, BOI, ESN, URB, CRE

Nombre de sujets complets : 373

Nombre de composantes extraites : 3

Validation croisée : retirer 1 sur 2

Analyse de la variance pour LOG_DI

Source	Somme des carrés	Ddl	Moyenne quadratique	Rapport F	Probabilité
Modèle	63,1843	3	21,0614	173,003	0.0
Résidu	44,9222	369	0,12174		
Total (corr.)	108,106	372			

Modèle pour LOG_DI

Composante	% de variation de Y	R-carré	Moyenne quadratique PRESS	Prévision R-carré
1	46,4822	46,4822	30,5572	44,4069
2	7,53974	54,022	28,2399	48,6229
3	4,42439	58,4464	27,8352	49,359

Variables à expliquer et explicatives

Composante	% de variation de X	% cumulé de X	% de variation de Y	% cumulé de Y	Prévision moyenne R-carré
1	11,3876	11,3876	46,4822	46,4822	44,4069
2	12,9289	24,3165	7,53974	54,022	48,6229
3	7,96286	32,2793	4,42439	58,4464	49,359

Tableau 9-12 Tableaux de résultats de la PLS avec 37 variables pour LOG(DI)

Le Tableau 9-12 affiche les résultats de l'ajustement du modèle pour 1 variable à expliquer basés sur 37 variables prédictives. Pour ajuster le modèle, 3 composantes ont été extraites. Les valeurs des probabilités dans le tableau de l'ANOVA indiquent qu'il y a 1 modèle significatif au niveau de signification de 5 %. 187 observations ont été ajustées pour tester la capacité de prévision des modèles. En se basant sur le R-carré moyen de prévision, le meilleur modèle est celui qui utilise 3 composantes.

En procédant par étapes, l'analyse des valeurs des coefficients de régression de chacune des variables montre que les 20 variables, dont les acronymes sont définis dans le Tableau 8-1, CRE, KR2, KR4, KR3, D, DC, EX3, DP, BOI, VG0, EX1, VG4, PT4, ALT, AI2, DR, PT2, KR1, PTm, EX2, citées selon un ordre croissant de la valeur du coefficient de régression, présentaient un coefficient de régression standardisé inférieur à 0,04 avec trois composantes significatives, elles ont donc été exclues du modèle car jugées non significatives. Dans un second temps, les 8 variables AGR, VG1, PT1, PT3, O, AI3, VG3 et AI1, toujours citées selon un ordre croissant de la valeur du coefficient de régression, présentaient un coefficient de régression standardisé inférieur à 0,05 avec deux composantes significatives, elles ont donc été exclues du modèle car jugées non significatives.

- Avec les 9 variables explicatives et la variable LOG(DI) à expliquer, à partir des 373 polygones à densité d'incendie non nulle

Le nombre de composantes significatives est vérifié et recalculé dans la procédure de PLS sous ADE4. Un test de permutations est réalisé de la même façon avec 10 000 répétitions.

Step	Nrepet	X>Xobs	Frequency
1	10000	0	0,000e+00
2	10000	1	1,000e-04
3	10000	3521	3,521e -01
4	10000	4470	4,470e -01

Tableau 9-13 Résultat du test de permutations avec 9 variables pour LOG(DI)

Le résultat du Tableau 9-13 montre que seules deux composantes sont significatives au seuil de 5 %. Ainsi la PLS est réalisée sous STATGRAPHICS@Centurion en considérant deux composantes et avec le retrait de 1 sur 2 pour le test de validation croisée.

Moindres carrés partiels (PLS) sous STATGRAPHICS@Centurion

Nombre de variables à expliquer : LOG DI

Nombre de variables explicatives : 9 soient \bar{I} , GD, GTD, R, DB, KR5, VG2, ESN, URB

Nombre de sujets complets : 373

Nombre de composantes extraites : 2

Validation croisée : retirer 1 sur 2

Analyse de la variance pour LOG DI

Source	Somme des carrés	Ddl	Moyenne quadratique	Rapport F	Probabilité
Modèle	61,7482	2	30,8741	246,416	0,0
Résidu	46,3582	370	0,125292		
Total (corr.)	108,106	372			

Modèle pour LOG DI

	% de variation de Y	R-carré	Moyenne quadratique PRESS	Prévision R-carré
Composante 1	52,0929	52,0929	27,5311	49,9123
Composante 2	5,02514	57,118	26,1669	52,3942

Variables à expliquer et explicatives

	% de variation	% cumulé	% de variation	% cumulé	Prévision moyenne
Composante	de X	de X	de Y	de Y	R-carré
1	31,3708	31,3708	52,0929	52,0929	49,9123
2	12,9562	44,327	5,02514	57,118	52,3942

Tableau 9-14 Tableaux de résultats de la PLS avec 9 variables pour LOG(DI)

Ce Tableau 9-14 affiche les résultats de l'ajustement du modèle pour 1 variable à expliquer basés sur 9 variables prédictives. Pour ajuster le modèle, 2 composantes ont été extraites. Les valeurs des probabilités dans le tableau de l'ANOVA indiquent qu'il y a 1 modèle significatif au niveau de signification de 5 %. 187 observations ont été ajustées pour tester la capacité de prévision des modèles. En se basant sur le R-carré moyen de prévision, le meilleur modèle est celui qui utilise 2 composantes. Le modèle obtenu possède un $R^2 = 57,1 \%$ avec deux composantes. La prévision moyenne est de 52,4 %. Les coefficients de régression figurent sur le Tableau 9-15.

Coefficients standardisés		Coefficients non standardisés	
	LOG DI		LOG DI
Constante	0,0	Constante	2,09384
I	0,228607	I	0,00247646
GD	-0,0713852	GD	-0,0011186
GTD	-0,169161	GTD	-0,00301069
R	-0,27364	R	-0,0117099
DB	-0,247824	DB	-0,000994732
KR5	0,0828373	KR5	0,00258941
VG2	-0,0820495	VG2	-0,00420811
ESN	0,16073	ESN	0,00303519
URB	-0,120577	URB	-0,00301263

Tableau 9-15 Coefficients de régression des 9 variables issues de la PLS pour LOG(DI)

Pour s'assurer de la significativité des coefficients du modèle, une procédure Bootstrap est réalisée sous le logiciel R, fournissant ainsi pour chaque variable son niveau de significativité ainsi que l'intervalle de confiance de son coefficient de régression. Le Tableau 9-16 fait apparaître que toutes les variables sont très significatives aux seuils de 1 % et 0,1 % (respectivement ** et *** pour P-Value), à l'exception de la variable Groupé Dense GD qui est significative au seuil de 5 % (* pour P-Value). Il est décidé de conserver le modèle tel qu'il est.

Variables	0,1 %	1 %	5 %	Coef.	95 %	99 %	99,9 %	BootSize	P-value
I	0,141	0,1616	0,1814	0,2287	0,2746	0,2991	0,3179	1000	***
ESN	0,0788	0,0995	0,1186	0,1607	0,2029	0,2143	0,231	1000	***
KR5	-0,0185	0,0081	0,0274	0,0828	0,1325	0,1502	0,1772	1000	**
GD	-0,1859	-0,1567	-0,1296	-0,0714	-0,0061	0,0159	0,0449	1000	*
VG2	-0,1767	-0,1515	-0,137	-0,0820	-0,0457	-0,0288	-0,0161	1000	***
URB	-0,2247	-0,2019	-0,1758	-0,1206	-0,0709	-0,0532	-0,0327	1000	***
GTD	-0,2456	-0,2351	-0,22	-0,1692	-0,1213	-0,0991	-0,0886	1000	***
DB	-0,3241	-0,3067	-0,2895	-0,2478	-0,2125	-0,1949	-0,183	1000	***
R	-0,4537	-0,4287	-0,3891	-0,2736	-0,1167	-0,0468	0,0094	1000	**

Tableau 9-16 Coefficients de corrélation partielle par variable et ses intervalles de confiance à 5 %, 1 %, 0.1 %

b. *Résultats*

Sur les 37 variables prises en compte pour la régression PLS, seules 9 variables sont significatives sur deux composantes expliquant la variable LOG(DI), soit le logarithme de la densité d'incendie de forêt calculé comme le ratio du nombre d'incendies recensés dans le polygone par la surface de ce polygone. Le modèle obtenu possède un $R^2 = 57,12\%$ avec deux composantes. Le poids des variables dans le modèle est représenté sur la Figure 9-7.

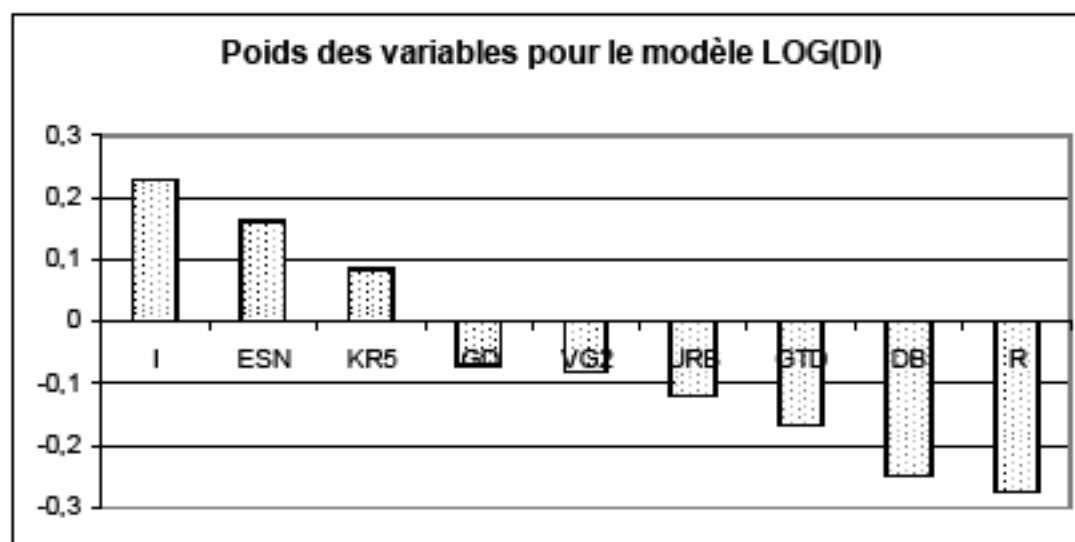


Figure 9-7 Poids des variables dans le modèle LOG(DI)

Le modèle issu de la démarche exposée est représenté par la Figure 9-8.

Son équation est la suivante :

$$\text{LOG(DI)} = 2,09384 + 0,00247646 I - 0,0011186 GD - 0,00301069 GTD - 0,0117099 R - 0,000994732 DB + 0,00258941 KR5 - 0,00420811 VG2 + 0,00303519 ESN - 0,00301263 URB$$

Sachant que :

$$\begin{aligned} DI &= \exp(\text{LN}10 * \text{LOG}(DI)) \\ &= \exp(2,30258509 * \text{LOG}(DI)) \end{aligned}$$

on en déduit :

$$DI = \exp(2,30258509 * [2,09384 + 0,00247646 I - 0,0011186 GD - 0,00301069 GTD - 0,0117099 R - 0,000994732 DB + 0,00258941 KR5 - 0,00420811 VG2 + 0,00303519 ESN - 0,00301263 URB])$$

Graphique des valeurs observées et prévues pour LOG_DI

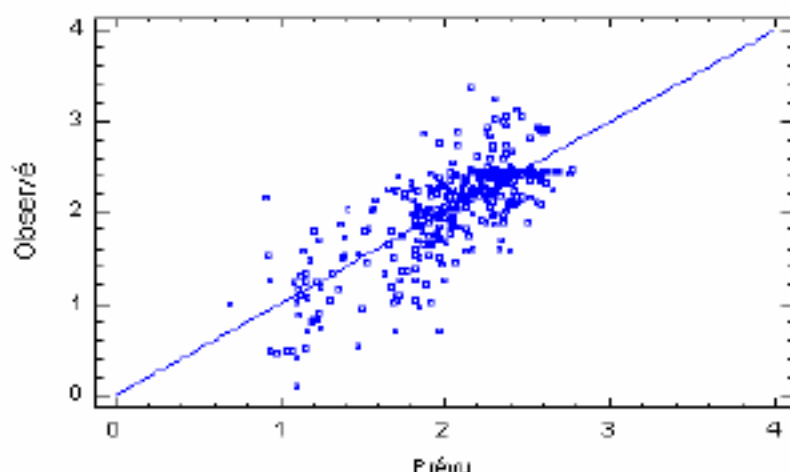


Figure 9-8 Modèle LOG(DI)

9.3.4. Modélisation de l'indicateur de risque taux de surfaces brûlées SB

a. Régression PLS sur la variable SB

Détail de la procédure

Le nombre de composantes significatives est déterminé dans la procédure de PLS sous ADE4. Un test de permutations est réalisé avec 10 000 répétitions.

- Avec les 37 variables explicatives et la variable SB à expliquer, à partir des 1 034 polygones à taux de surfaces brûlées non nul.

Observation : Les 2 variables, distance médiane des points d'éclosion au chemin le plus proche DiC et distance médiane des points d'éclosion à la route la plus proche DiR n'ont pas été prises en compte du fait des valeurs manquantes pour les unités spatiales contenant au moins un point d'éclosion.

Le test de permutations réalisé avec 10 000 répétitions montre que seules deux composantes sont significatives au seuil de 5 % (Tableau 9-17).

Step	Nrepet	X>Xobs	Frequency
1	10000	0	0,000e+00
2	10000	0	0,000e+00
3	10000	4629	4,629e -01
4	10000	9931	9,931e -01

Tableau 9-17 Résultat du test de permutations avec 37 variables pour SB

Ainsi la PLS est réalisée sous STATGRAPHICS®Centurion en considérant deux composantes et avec le retrait de 1 sur 2 pour le test de validation croisée.

Moindres carrés partiels (PLS) sous STATGRAPHICS®Centurion

Nombre de variables à expliquer : SB

Nombre de variables explicatives : 37

I, D, GD, GTD, O, R, DB, DR, DC, DP, EX1, EX2, EX3, PT1, PT2, PT3, PT4, PTm, KR1, KR2, KR3, KR4, KR5, VG0, VG1, VG2, VG3, VG4, AI1, AI2, AI3, ALT, AGR, BOI, ESN, URB, CRE

Nombre de sujets complets : 1033

Nombre de composantes extraites : 2

Validation croisée : retirer 1 sur 2

Analyse de la variance pour SB

Source	Somme des carrés	Ddl	Moyenne quadratique	Rapport F	Probabilité
Modèle	576599,	2	288299,	297,095	0,0
Résidu	999508,	1030	970,396		
Total (corr.)	1,57611E6	1032			

Modèle pour SB

	% de variation		Moyenne quadratique	Prévision
Composante	de Y	R-carré	PRESS	R-carré
1	29,707	29,707	579733,	28,1359
2	6,87677	36,5837	536523,	33,4922

Variables à expliquer et explicatives

	% de variation	% cumulé	% de variation	% cumulé	Prévision moyenne
Composante	de X	de X	de Y	de Y	R-carré
1	14,6904	14,6904	29,707	29,707	28,1359
2	9,83797	24,5284	6,87677	36,5837	33,4922

Tableau 9-18 Tableaux de résultats de la PLS avec 37 variables pour SB

Le Tableau 9-18 affiche les résultats de l'ajustement du modèle pour 1 variable à expliquer basés sur 37 variables prédictives. Pour ajuster le modèle, 2 composantes ont été extraites. Les valeurs des probabilités dans le tableau de l'ANOVA indiquent qu'il y a 1 modèle significatif au niveau de signification de 5 %. 517 observations ont été ajustées pour tester la capacité de prévision des modèles. En se basant sur le R-carré moyen de prévision, le meilleur modèle est celui qui utilise 2 composantes.

En procédant par étapes, l'analyse des valeurs des coefficients de régression de chacune des variables montre que les 11 variables, dont les acronymes ont été définis dans le Tableau 8-1, CRE, KR1, VG1, EX2, KR3, PT3, KR4, AI3, KR2, PTm, KR5, citées selon un ordre croissant de la valeur du coefficient de régression, présentaient un coefficient de régression standardisé inférieur à 0,01 avec deux composantes significatives, elles ont donc été exclues du modèle car jugées non significatives. Dans un second temps, les 15 variables D, VG0, R, PT4, DP, EX1, AI1, O, PT1, PT2, VG3, EX3, GTD, VG2, BOI toujours citées selon un ordre croissant de la valeur du coefficient de régression, présentaient un coefficient de régression standardisé inférieur à 0,05 avec deux composantes significatives, elles ont donc été exclues du modèle car jugées non significatives.

- Avec les 11 variables explicatives et la variable SB à expliquer, à partir des 1034 polygones à taux de surfaces brûlées non nul

Le nombre de composantes significatives est vérifié et recalculé dans la procédure de PLS sous ADE4. Un test de permutations est réalisé de la même façon avec 10 000 répétitions.

Step	Nrepet	X>Xobs	Frequency
1	10000	0	0,000e+00
2	10000	8	8,000e-04
3	10000	2703	2,703e-01
4	10000	9549	9,549e-01

Tableau 9-19 Résultat du test de permutations avec 11 variables pour SB

Le Tableau 9-19 montre que seules deux composantes sont significatives au seuil de 5 %. Ainsi la PLS est réalisée sous STATGRAPHICS®Centurion en considérant deux composantes et avec le retrait de 1 sur 2 pour le test de validation croisée.

Moindres carrés partiels (PLS) sous STATGRAPHICS®Centurion

Nombre de variables à expliquer : SB
 Nombre de variables explicatives : 11
 I, GD, DB, DR, DC, VG4, AI2, ALT, AGR, ESN, URB

Nombre de sujets complets : 1034
 Nombre de composantes extraites : **2**
 Validation croisée : retirer 1 sur 2

Analyse de la variance pour SB

Source	Somme des carrés	Ddl	Moyenne quadratique	Rapport F	Probabilité
Modèle	569864,	2	284932,	291,938	0,0
Résidu	1,00626E6	1031	976,003		
Total (corr.)	1,57612E6	1033			

Modèle pour SB

	% de variation		Moyenne quadratique	Prévision
Composante	de Y	R-carré	PRESS	R-carré
1	34,7198	34,7198	533532,	33,8631
2	1,4363	36,1561	529740,	34,333

Variables à expliquer et explicatives

	% de variation	% cumulé	% de variation	% cumulé	Prévision moyenne
Composante	de X	de X	de Y	de Y	R-carré
1	30,3403	30,3403	34,7198	34,7198	33,8631
2	15,8721	46,2124	1,4363	36,1561	34,333

Tableau 9-20 Tableaux de résultats de la PLS avec 11 variables pour SB

Ce Tableau 9-20 affiche les résultats de l'ajustement du modèle pour 1 variable à expliquer basés sur 11 variables prédictrices. Pour ajuster le modèle, 2 composantes ont été extraites. Les valeurs des probabilités dans le tableau de l'ANOVA indiquent qu'il y a 1 modèle significatif au niveau de signification de 5 %. 517 observations ont été ajustées pour tester la capacité de prévision des modèles. En se basant sur le R-carré moyen de prévision, le meilleur modèle est celui qui utilise 2 composantes. Le modèle obtenu possède un **R² = 36,2 %** avec deux composantes. La prévision moyenne est de 34,3 %.

Coefficients standardisés		Coefficients non standardisés	
	SB		SB
Constante	0,0	Constante	29,292
I	0,119124	I	0,093933
GD	-0,0879172	GD	-0,100626
DB	-0,0747657	DB	-0,0246026
DR	-0,0840783	DR	-0,663865
DC	0,0711258	DC	0,625354
VG4	0,130392	VG4	0,408128
AI2	0,0639114	AI2	0,149018
ALT	0,0599629	ALT	0,0199612
AGR	-0,111107	AGR	-0,18559
ESN	0,211759	ESN	0,296497
URB	-0,0637332	URB	-0,119762

Tableau 9-21 Coefficients de régression des 11 variables pour SB

Pour s'assurer de la significativité des coefficients du modèle, une procédure Bootstrap est réalisée sous le logiciel R, fournissant ainsi pour chaque variable son niveau de significativité

ainsi que l'intervalle de confiance de son coefficient de régression. Le Tableau 9-22 fait apparaître que toutes les variables sont très significatives aux seuils de 1 % et 0,1 % (respectivement ** et *** pour P-Value). Il est décidé de conserver le modèle tel qu'il est.

Variables	0,1 %	1 %	5 %	Coef.	95 %	99 %	99,9 %	BootSize	P-value
ESN	0,1624	0,1708	0,1824	0,211759	0,25	0,2679	0,2892	1000	***
VG4	0,0848	0,0934	0,1062	0,130392	0,1563	0,1652	0,1771	1000	***
I	0,0452	0,0719	0,0861	0,119124	0,1552	0,1715	0,1842	1000	***
DC	0,0161	0,0239	0,036	0,0711258	0,1069	0,1266	0,1367	1000	***
AI2	0,0012	0,0118	0,0286	0,0639114	0,0932	0,1022	0,1171	1000	***
ALT	-0,0105	0,0088	0,0238	0,0599629	0,0961	0,1127	0,1226	1000	**
URB	-0,106	-0,0967	-0,0876	-0,063733	-0,0295	-0,0163	-0,0032	1000	***
DB	-0,1186	-0,1079	-0,0962	-0,074766	-0,05	-0,0371	-0,0314	1000	***
DR	-0,139	-0,1221	-0,1109	-0,084078	-0,0573	-0,0449	-0,0324	1000	***
GD	-0,1499	-0,136	-0,1195	-0,087917	-0,0583	-0,0464	-0,0366	1000	***
AGR	-0,1682	-0,1523	-0,1416	-0,111107	-0,0852	-0,0724	-0,0614	1000	***

Tableau 9-22 Coefficients de corrélation partielle par variable et ses intervalles de confiance à 5 %, 1 %, 0,1 %

b. Résultats

Sur les 40 variables prises en compte pour la régression PLS, seules 11 variables sont significatives sur deux composantes expliquant la variable SB, soit le taux de surfaces brûlées par les incendies de forêt calculé comme le ratio du nombre d'hectares brûlés cumulés dans le polygone par la surface de ce polygone. Le modèle obtenu possède un $R^2 = 36,2 \%$ avec deux composantes. Le poids des variables dans le modèle est représenté sur la Figure 9-9.

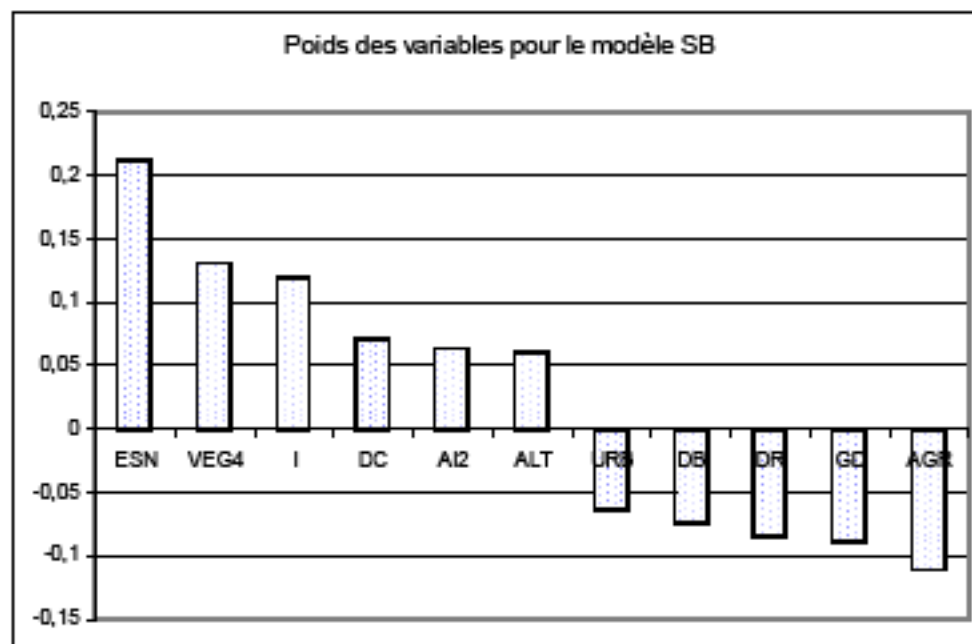


Figure 9-9 Poids des variables dans le modèle SB

Le modèle issu de la démarche exposée est représenté par la Figure 9-10. Son équation est la suivante :

$$SB = 29,292 + 0,093933 I - 0,100626 GD - 0,0246026 DB - 0,663865 DR + 0,625354 DC + 0,408128 VG4 + 0,149018 AI2 + 0,0199612 ALT - 0,18559 AGR + 0,296497 ESN - 0,119762 URB.$$

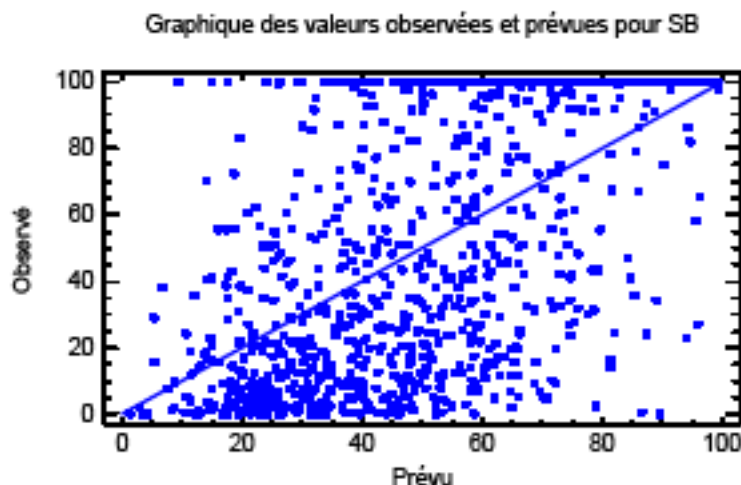


Figure 9-10 Modèle SB

9.4 Synthèse

Dans le modèle expliquant la densité d'éclosion, 7 variables contribuent à l'explication de façon significative (51 %). Ces variables sont :

- le type de territoire, interface habitat-forêt en habitat isolé I et la part occupée par les autres espaces naturels ESN qui contribuent positivement ;
- le type de territoire non bâti R, la densité de bâtis DB, la part occupée par l'espace urbain URB, l'interface habitat-forêt en habitat groupé dense GD et l'interface habitat-forêt en habitat groupé très dense GTD qui contribuent négativement.

Dans le modèle expliquant la densité d'incendie, 9 variables contribuent à l'explication de façon significative (57,1 %). Ces variables sont :

- le type de territoire, interface habitat-forêt en habitat isolé I et la part occupée par les autres espaces naturels ESN et les zones d'exposition très chaudes KR5 qui contribuent positivement ;
- le type de territoire non bâti R, la densité de bâtis DB, l'interface habitat-forêt en habitat groupé très dense GTD, la part occupée par l'espace urbain URB, la présence de végétation résineuse VG2 et l'interface habitat-forêt en habitat groupé dense GD qui contribuent négativement.

Dans le modèle expliquant le taux de surfaces brûlées, 11 variables contribuent à l'explication de façon significative (36,2 %). Ces variables sont :

- la part occupée par les autres espaces naturels ESN, et la végétation de garrigue VG4, le type de territoire, interface habitat-forêt en habitat isolé I, la densité de chemins DC, l'agrégation faible de la végétation AI2 et l'altitude ALT qui contribuent positivement ;
- la part occupée par l'espace agricole AGR, l'interface habitat-forêt en habitat groupé dense GD, la densité des routes DR, la densité de bâtis DB et la part occupée par l'espace urbain URB qui contribuent négativement.

La modélisation de chacun des trois indicateurs de risque est obtenue avec des valeurs du coefficient de détermination R^2 qui permettent de mesurer la fiabilité des modèles. Ainsi les modélisations LOG(DE) et LOG(DI) présentent des valeurs de R^2 respectivement de 51 % et 57 %. Les facteurs pris en compte peuvent expliquer de façon satisfaisante les densités d'éclosion et d'incendies. La modélisation SB présente une valeur plus faible de R^2 de 36 %. Le modèle est moins bon bien qu'il soit significatif. Syphard *et al.* (2007) ont trouvé également de meilleurs résultats sur la fréquence des incendies plutôt que sur les surfaces brûlées avec des coefficients de R^2 du même ordre de grandeur pour les surfaces brûlées.

La discussion est développée dans le paragraphe 10.1 suivant.

Ces coefficients de détermination pourraient être améliorés par une meilleure évaluation de certaines données, par le choix de meilleures variables, peut-être plus pertinentes. En effet la base de données exploitée n'était pas exhaustive : ainsi les dépôts de feu recensés ne représentent qu'une partie des éclosions, les contours de feux sélectionnés ne sont que les plus récents, supposés être les plus proches, sinon en adéquation, avec la description de l'occupation du sol disponible.

QUATRIÈME PARTIE

VERS UN MODÈLE D'ÉVALUATION GLOBALE DU RISQUE D'INCENDIE AVEC UNE CLÉ D'ANALYSE FONDÉE SUR LES TYPES D'INTERFACES HABITAT- FORÊT

Des relations entre types de territoire, notamment types d'interfaces habitat-forêt, et risque d'incendie ont été mises en évidence dans la partie III. Une méthode de modélisation a été développée permettant d'établir des relations stables et reproductibles entre territoire et risque d'incendie, à travers la modélisation de trois indicateurs de risque, la densité de départ de feu, la densité d'incendie et le taux de surfaces brûlées.

L'objectif de cette partie IV vise à élaborer et à valoriser un nouveau modèle d'évaluation du risque d'incendie dans les interfaces habitat-forêt, à partir des résultats obtenus précédemment.

En rappel, la partie IV s'organise autour des Chapitre 10 à Chapitre 11.

Ainsi le **chapitre 10** élabore la formule de combinaison des trois indicateurs élémentaires de risque identifiés en partie III, en un indice unique, global et synthétique qui servira de base aux processus d'évaluation et de cartographie du risque d'incendie. Il n'est donc nul besoin de maîtriser les techniques spécialisées de connaissance des aléas, ou de diagnostic des vulnérabilités exigés dans la plupart des méthodes traditionnelles d'évaluation du risque, qui sont réservées, quant à elles, aux seuls experts. Le **chapitre 11** démontre combien la simplicité d'utilisation du modèle proposé le rend particulièrement apte au suivi dynamique du risque d'incendie et apte au débat et à la discussion citoyenne autour du risque d'incendie de forêt. Il esquisse alors les apports potentiels d'un tel modèle dans une démarche de géogouvernance du risque d'incendie.

Chapitre 10. Indice global de risque d'incendie de forêt dans les interfaces habitat-forêt

L'objectif de ce chapitre est, dans un premier temps, de présenter une discussion sur les résultats issus du chapitre précédent mettant en évidence les relations entre risque d'incendie et territoire. Dans un second temps, il est de proposer un modèle d'évaluation du risque d'incendie fondé sur l'analyse préalable du territoire et son approche par les interfaces habitat-forêt.

10.1 Influence des facteurs anthropiques sur le risque d'incendie

10.1.1. Densité des départs de feux

a. Facteurs d'urbanisation

La première mise en relation de la distribution spatiale des départs de feux avec l'ensemble du territoire, a montré que de façon très significative la densité d'éclosion DE des feux était plus importante dans les interfaces habitat-forêt qu'ailleurs. Cette valeur de densité d'éclosion diminue de façon significative des types de territoire ayant une densité de bâtis faible, mais non nulle, à très forte.

L'indicateur de risque, Densité d'éclosion DE, prend les plus faibles valeurs en dehors des zones bâties (densité de bâtis résidentiels nulle et densité de routes faible). *A contrario*, il est fort dans les zones bâties. Mais il est d'autant plus fort que les densités de bâtis et de routes correspondantes diminuent, et que la part d'espace urbain est moindre : il est donc plus important dans les interfaces habitat-forêt de type habitat isolé que dans celles de type habitat groupé très dense. Parmi les variables qui expliquent le mieux l'indicateur DE, l'interface habitat-forêt de type habitat isolé I est positivement liée à l'indicateur alors que la densité de bâtis DB est liée négativement. Ces résultats confirment ceux que l'on trouve dans la littérature.

Mercer et Preston (2005) ont montré que les variables relatives aux interfaces sont très significativement corrélées avec plus de départs de feu, que l'augmentation de la densité de bâtis est corrélée avec moins de départs de feux et que les zones urbaines densément peuplées (à l'opposé des zones d'interface habitat-forêt moins densément peuplées) tendent à avoir moins de risque d'incendie. Syphard et al. (2007 a, b) montrent que le risque d'incendie est plus élevé à des niveaux intermédiaires d'urbanisation qui s'apparentent aux interfaces habitat-forêt de type isolé voire diffus, liant ceci à l'arrangement spatial des bâtis et de la végétation continue. Certes dans certaines régions, comme en Floride, les interfaces habitat-forêt les plus rurales connaissent moins d'éclosions et moins d'incendies que dans les zones les plus densément peuplées du fait de la pratique du brûlage dirigé et d'une gestion intense de la forêt (Mercer et al., 2005). Des études récentes sur l'analyse de la distribution spatiale des points d'éclosion mettent en évidence des relations positives avec les interfaces habitat-forêt (Badia-Perpinya et Pallares-Barbera, 2006; Martinez et al., 2009). La plus forte probabilité d'éclosion reflète l'influence du développement des interfaces et des routes (Syphard et al., 2008; Martinez et al., 2009; Vega-García et al., 1995; Ahineet et al., 1996; Thompson, 2000; Cardille et al., 2001; Vasconcelos et al., 2001).

La variable densité de routes DR très souvent utilisée en tant que variable anthropique (Dickson et al., 2006) n'est pas ressortie de façon explicite de l'analyse contrairement à la

variable densité de bâtis. Mais elle lui est aussi fortement corrélée ($r = 0,46$), observation déjà formulée par Sturtevant et Cleland (2007). La variable distance du point d'éclosion à la plus proche route DiR n'est pas ressortie de l'analyse alors que Brosofske et al. (2007) montrent que la distance à la route a une influence positive sur l'occurrence.

La variable densité de population DP n'est pas ressortie de l'analyse comme significative. Pourtant une présence permanente de population dans le paysage augmente fortement le risque de départ de feu, même avec des densités de bâtis faibles comme dans les « *intermix* » définis aux USA (Sturtevant et Cleland, 2007), type d'interface proches des interfaces de type habitat isolé et diffus définis dans la thèse. Ceci peut être expliqué du fait d'un mode de calcul de la variable, un peu trop global, ou du fait que l'on ne se soit intéressé qu'à des feux supérieurs à 1 ha, tout comme dans Cardille et al. (2001). Ces derniers, ne trouvant pas de forte relation entre occurrence des feux et densité de population, ont considéré que le manque de relations venait du fait qu'ils ne s'étaient intéressés qu'à des feux supérieurs à 0,4 ha. Saunders et al. (non publié 2006, cité par Brosofske et al., 2007) ont modélisé l'occurrence des feux sur de grandes régions géographiques et ont trouvé que lorsque la densité de population augmentait, les facteurs écologiques avaient moins d'effets sur l'occurrence suggérant que les influences humaines sur l'ignition, la détection et la lutte masquaient les influences des facteurs écologiques.

Enfin les activités humaines ont des influences fortes qui peuvent aussi être contradictoires sur l'occurrence d'un feu (Brosofske et al., 2007). Ainsi l'augmentation de la densité de population et de l'accès par la route (densité de routes) à des espaces inflammables augmentent souvent les niveaux d'ignition accidentels ou délibérés (Cardille et al., 2001; Prestemon et al., 2002; Guyette et Spetich, 2003) et au contraire l'augmentation de la densité de bâtis et la proximité de centres peuplés peuvent augmenter les chances de détection et la disponibilité des équipes de lutte (Prestemon et al., 2002).

b. Facteurs d'occupation du sol autre que urbaine

Au sein des interfaces habitat-forêt, ce sont les interfaces habitat-forêt au contact d'une végétation continue mais aussi éparse (espace plutôt forestier et de garrigues) qui présentent une densité d'éclosion significativement supérieure à celles en contact avec des espaces anthropisés (espace agricole avec champs, sols nus...).

La variable relative aux boisements forestiers BOI, n'explique pas la densité d'éclosion, même si les forêts de pins représentent le plus grand risque, la relative inflammabilité des forêts n'a pas d'influence sur les départs de feu (Sturtevant et Cleland, 2007). En revanche ce sont les autres espaces naturels de type garrigues ESN qui possèdent une part explicative significative positive de la densité d'éclosion. Enfin contrairement à Martinez et al. (2009) qui mettent en évidence des variables liées aux patrons relatifs à l'agriculture et à la déprise agricole et qui expliquent que de façon prioritaire, la densité de machines agricoles et de propriétés agricoles et la présence de cheptels augmentent le risque du fait d'écobuage ou d'étincelles de machines agricoles (étude en Espagne), la part de l'espace agricole AGR ne joue pas un rôle significatif dans l'explication de la densité d'éclosion. Cependant la densité d'éclosion n'y est pas nulle (par exemple dans les interfaces habitat-forêt avec une valeur nulle de l'indice d'agrégation de la végétation), ceci confirme les propos de Sturtevant et Cleland (2007) qui indiquent que le type d'occupation du sol agricole peut même être la variable la plus importante où l'on observe les feux, car ce sont des milieux souvent associés à un développement d'habitat rural (Radeloff et al., 2005b) qui augmente l'éclosion de feux. Même de petits pourcentages d'agriculture du fait du mélange type de sol agricole et type de sol forestier, peuvent augmenter la probabilité d'incendie (Radeloff et al., 2005b).

c. Facteurs de topographie

Les zones de pente modérée PT2 et de pente plus forte PT3 (qui restent cependant peu représentées sur la zone d'étude) et d'exposition chaude KR4 et très chaude KR5 sont propices aux départs de feu ainsi que les zones exposées au vent de mistral EX3. L'altitude ALT n'apparaît pas de façon nette, contrairement aux résultats de Maingi et Henry (2007) qui, en examinant les relations entre l'occurrence des feux et les facteurs abiotiques (indice de sécheresse, pente, exposition, altitude) et humains (taux de chômage, distance à la route, distance aux zones peuplées), montrent de fortes relations entre altitude, pente et occurrence mais aucune influence de l'exposition.

10.1.2. Densité d'incendie

a. Facteurs d'urbanisation

La première mise en relation de la distribution spatiale des incendies avec l'ensemble du territoire, a montré que la densité d'incendie DI était de façon très significative plus importante dans les interfaces habitat-forêt qu'ailleurs. Au sein des interfaces habitat-forêt, cette densité est la plus forte pour les zones d'interface en habitat isolé I.

Comme pour l'indicateur de densité d'éclosion, l'indicateur de risque Densité d'incendie DI, prend des valeurs plus faibles en dehors des zones bâties (densité de bâtis nulle et densité de routes faible). *A contrario*, il est fort dans les zones bâties. Mais il est d'autant plus fort que les densités de bâtis DB et de routes DR correspondantes diminuent, et que la part d'espace urbain URB est moindre : il est donc plus important dans les interfaces habitat-forêt de type habitat isolé I que dans celles de type habitat groupé très dense GTD.

Parmi les variables qui expliquent le mieux l'indicateur de risque Densité d'incendie DI, l'interface habitat-forêt de type habitat isolé I est positivement liée à l'indicateur alors que les espaces en dehors des zones bâties R, la densité de bâtis DB et l'interface habitat-forêt de type habitat groupé très dense GTD sont très négativement liés, et la part de l'espace urbain URB et l'interface de type habitat groupé dense GD également mais dans une moindre mesure. Ces résultats confirment également ceux que l'on trouve dans la littérature. La fréquence des feux tend à être plus élevée dans des niveaux intermédiaires d'activités humaines qui s'apparentent aux interfaces habitat-forêt de type isolé et diffus. Elle est une fonction du développement spatial des maisons et du combustible (Keeley, 2005 ; Syphard et al., 2007b). Syphard et al. (2007b) ont trouvé que les hommes et leur distribution spatiale expliquaient une part importante de la variabilité du nombre de feux alors que les surfaces brûlées étaient plus une fonction du type de végétation. Syphard et al. (2007a, b) considèrent qu'il existe un seuil pour lequel la fréquence des incendies liée à l'augmentation des éclosions, est compensée par la réduction du combustible disponible en zone urbaine.

Comme le montrent Cardille et al. (2001) et Pew et Larsen (2001), une relation hautement significative apparaît entre l'organisation spatiale de l'habitat et la fréquence des incendies. Syphard et al. (2007b) ont mis en avant une relation négative entre la densité de bâtis et l'incendie, densité de bâtis qui pour Sturtevant et Cleland (2007) est le plus important indicateur des observations de feu. Vasquez et Moreno (2001) montrent qu'il y a plus de feux enregistrés près des zones habitées que des zones éloignées des zones bâties : corrélation négative entre distance à la zone habitée et densité d'incendie (0 à 12 000 m) ainsi qu'une corrélation négative entre distance à la route et densité d'incendie (0 à 1 800 m). Syphard et al. (2007b) ont trouvé que la proportion d'interfaces de types habitat isolé et diffus expliquait,

plus que tout autre variable, mise à part la densité de population, les variations du nombre de feux. Ils suggèrent alors que les ingrédients, développement des bâtis et donc, de la population, et combustible, sont importants pour le développement des feux. La variable densité de population DP n'est pas ressortie de l'analyse, là encore, peut-être du fait de son mode de calcul, comme cela a été mentionné pour l'indicateur densité d'éclosion DE.

L'analyse d'une première variante de l'indicateur densité d'incendie, calculé comme le nombre d'incendies, survenus sur une zone donnée, divisé par la seule surface forestière de la zone (DIv) n'a donné aucun résultat. Tout comme Prestemon et *al.* (2002) qui, estimant des modèles reliant la quantité d'incendies par unité de surface forestière à un nombre de facteurs, dont la densité de bâtis, n'ont pas trouvé de relation entre le nombre de maisons et les incendies. L'analyse d'une seconde variante de l'indicateur densité d'incendie, décliné en DI1 à DI4 selon la taille des incendies, n'a fourni aucun résultat, tout comme l'analyse réalisée par Brosfske et *al.* (2007).

b. *Facteurs d'occupation du sol autre que urbaine*

L'environnement pour lequel la densité d'incendie DI de forêt est non nulle est un espace naturel, forestier BOI et autre ESN, (environ 60 %) au détriment de l'espace agricole AGR (20 %) et l'espace urbain URB (20 %) qui va de pair avec une densité de chemins DC plus forte. Les espaces de végétation prédominent avec des parts de résineux VG2 et surtout de garrigues VG4 plus fortes. Là où la densité d'incendie est plus forte, les zones de végétation y sont plus importantes à l'exception des peuplements résineux VG2 qui, au contraire, contribuent de façon négative à l'explication de la densité d'incendie. Ce résultat peut être expliqué par le fait qu'un peuplement de résineux affecté par un incendie demandera au moins 25 ans pour retrouver son état initial de peuplement. Par conséquent la densité d'incendie y sera moindre en l'absence de peuplement reconstitué. Contrairement aux garrigues qui après avoir été affectées par un incendie retrouveront leur état initial de garrigues au bout de trois ans. La densité d'incendie y sera donc plus importante.

c. *Facteurs de topographie*

Les zones de pente modérée PT2 et forte PT3 (qui restent cependant peu représentées sur la zone d'étude) sont propices à une plus forte fréquence d'incendies, résultats également présentés par Vasquez et Moreno (2001) qui trouvent que des terrains pentus brûlent plus fréquemment que des pentes plus douces, car plus secs, moins humides. Les expositions chaudes KR4 et très chaudes KR5 sont également propices à une plus forte fréquence d'incendies ainsi que les zones exposées au vent de mistral EX3. La zone exposée à la forte chaleur KR5 est d'ailleurs très explicative de la densité d'incendie DI tout comme Vasquez et Moreno (2001) qui montrent, quant à eux, que les feux se regroupent sur les pentes exposées au sud. L'altitude ALT est plutôt moindre. Syphard et *al.* (2008) montrent que la plus forte fréquence d'incendies reflète l'influence du développement humain, des pentes et de l'altitude.

10.1.3. Surfaces brûlées

a. Facteurs d'urbanisation

Au sein des interfaces habitat-forêt, l'indicateur de risque Taux de surfaces brûlées SB est plus important en interfaces habitat-forêt de type habitat isolé I qu'en type habitat groupé très dense GTD. Il diminue avec l'augmentation de la densité du bâti DB dans ces interfaces. Parmi les variables qui expliquent le mieux le Taux de surfaces brûlées SB, l'interface habitat-forêt de type habitat isolé I est positivement liée à l'indicateur, et dans une moindre mesure la densité de chemins. Il est négativement lié au type de territoire interface habitat-forêt de type habitat groupé dense GD, à la densité de bâtis DB et à celle des routes DR et à la part d'espace urbain URB. Ces résultats confirment également ceux que l'on trouve dans la littérature.

Le taux de surfaces brûlées tend à être plus élevé dans des niveaux intermédiaires d'activités humaines, il est fonction du développement spatial des maisons et du combustible (Keeley, 2005; Syphard, 2007b). Mais au sein de ces zones de développement humain, une augmentation de la densité de bâtis DB est corrélée à moins de surfaces brûlées. De façon plus nuancée, Mercer et Preston (2005) montrent que les variables relatives aux interfaces sont hautement significatives, qu'elles sont corrélées avec plus de surfaces brûlées de forte intensité, que l'augmentation de la densité de bâtis est corrélée avec moins de surfaces brûlées de faible intensité, et que les zones urbaines densément peuplées (à l'opposé des zones d'interface habitat-forêt moins densément peuplées) tendent à avoir moins de zones brûlées. Ils soulignent qu'en se déplaçant des zones non peuplées vers les zones les plus densément peuplées, les forêts sont moins intensément gérées et les brûlages dirigés sont plus rares, aussi les surfaces brûlées par unité de temps et de surface sont plus importants. Le brûlage dirigé est moindre à cause de la résistance des populations face à l'impact des fumées et face à leur souhait de conserver des forêts « naturelles » mais aussi à cause de très haute inflammabilité de forêts, souvent constituées de cypres, difficiles à contrôler en brûlage dirigé, notamment en année d'extrême sécheresse.

Les hommes ont aussi une forte influence sur la taille des feux *via* les politiques de lutte comme le soulignent Sturtevant et Cleland (2007). A terme, les activités de lutte peuvent avoir pour effet d'augmenter les charges en combustible créant un *continuum* végétal (Miller et Urban, 2000 dans Broszofske et al., 2007), augmentant potentiellement l'étendue et l'intensité des feux (Schoennegel et al., 2004 dans Broszofske et al., 2007). Les moyens de lutte sont aussi moins concentrés en dehors des zones urbaines (Calkin et al., 2005 dans Syphard et al. 2008), aussi les feux peuvent brûler davantage et se développer largement depuis leur source d'ignition jusqu'à des régions isolées. La densité de population DP peut être associée négativement aux plus grands feux, suggérant que les maisons isolées seraient plus à risque vis-à-vis des grands feux, les pompiers intervenant dans un délai plus long, ou étant informés trop tardivement (Sturtevant et Cleland, 2007). Même si la variable densité de population ne ressort pas de l'analyse, les variables interface habitat-forêt de type habitat isolé I et densité de bâtis DB expriment la même idée à savoir que l'on observe le taux de surfaces brûlées SB le plus important dans les interfaces habitat-forêt de type habitat isolé I et de faible densité de bâtis DB (soit d'une faible densité de population). De façon globale, les surfaces brûlées se situent davantage dans les zones non urbanisées R ayant une densité de bâtis résidentiels nulle. Au sein des interfaces habitat-forêt, les surfaces brûlées, qui restent cependant faibles, affectent principalement les interfaces habitat-forêt en habitat isolé I et celles avec la présence d'une végétation compacte et continue AI3 (indice d'agrégation fort).

b. Facteurs d'occupation du sol autre que urbaine

Le taux de surfaces brûlées SB est le plus faible dans les zones bâties hors interface O, zones les moins soumises au risque d'incendie et situées en dehors des obligations légales de débroussaillage. Ce type de territoire comporte à peine 10 % d'espaces naturels (boisement BOI et autres espaces naturels ESN) et plus d'un tiers d'espaces urbains URB (35 %). Par ailleurs, parmi les variables qui expliquent le mieux le taux de surfaces brûlées SB, le taux de surfaces brûlées SB est négativement lié à l'espace agricole AGR, qui est dominant à 55 % dans les zones bâties hors interface O. Or pour Syphard et al. (2007a), un paysage composé de moins de 30 % de couvert boisé conduit à réduire le développement d'un feu du fait d'une interruption dans la continuité des espaces combustibles. La propagation d'incendie est associée au moins en partie au couvert forestier (Sturtevant et Cleland, 2007), les plus grands incendies sont d'ailleurs associés à des feux de cimes, de pins par exemple (Radeloff et al., 1999). Cependant Butry et al. (2002) notent que les feux de forêt s'étendent aussi plus souvent dans des forêts fragmentées, écologiquement plus diversifiées. Dans ce cas, les feux ne sont pas interrompus par la fragmentation du combustible qui caractérise les zones urbanisées (Syphard et al., 2008) seule leur progression peut être ralentie comme le postulent Brosfske et al. (2007). Mais ces derniers considèrent aussi qu'une augmentation de cette fragmentation, liée à la présence d'objets humains, peut aussi diminuer la connectivité du combustible et en conséquence le potentiel de propagation (Davis et Burrows, 1994 dans le chaparral californien ; Duncan et Schmalzer, 2004 en Floride). La variable, traduisant la discontinuité de la végétation et les milieux plus ouverts AI2, contribue d'ailleurs positivement à l'explication du taux de surfaces brûlées. Cardille et Ventura (2001) ont montré que les grands feux étaient plus associés à des types d'occupation du sol non forestière. Ils suggèrent que des milieux ouverts ont une végétation plus inflammable et favorisent l'accès des hommes aux paysages proches de conditions forestières. Syphard et al. (2008) montrent aussi que plus de feux se développent loin des zones d'activités et des infrastructures humaines, là où la végétation est plus continue AI3.

La propagation de l'incendie est fonction des caractéristiques de la végétation, du climat et du terrain (Pyne et al., 1996). Le type de végétation a une influence sur l'inflammabilité du combustible et la vitesse de propagation du feu qui s'y propage (Bond and Van Wilgen, 1996, Pyne et al., 1996), la proportion de surface brûlée dépend elle aussi du type de végétation (herbes, garrigues, peuplements) selon Syphard et al. (2007b). Parmi les variables qui expliquent le mieux le taux de surfaces brûlées SB, la part d'autres espaces naturels ESN et notamment la végétation de type garrigue VG4, sont positivement les plus liés à l'indicateur.

c. Facteurs de topographie

Les zones qui présentent un taux de surfaces brûlées SB plus important sont plutôt des zones exposées plein sud KR5, avec des pentes PT2, PT3 et altitudes ALT plus fortes. Parmi les variables qui expliquent le mieux le taux de surfaces brûlées SB, l'altitude ALT est positivement liée à l'indicateur. Pour Vasquez et Moreno (2001), les surfaces brûlées se situent davantage en altitude, ce qui est lié à la nature de la végétation, des terrains pentus plus secs qui brûlent davantage.

10.2 Calcul d'un indice global de risque d'incendie IR

La synthèse du paragraphe précédent met l'accent sur l'importance de l'entrée interface habitat-forêt pour l'évaluation du risque d'incendie notamment au travers des trois indicateurs : densité d'éclosion, densité d'incendie et taux de surfaces brûlées

10.2.1. Rappel des définitions du risque

Si l'on dresse le panorama des définitions du risque que l'on trouve dans la bibliographie (cf paragraphe 1.3.1), toutes s'accordent à considérer les deux composantes : aléa et vulnérabilité. Mais lorsqu'il s'agit de définir ces composantes à l'aide d'éléments du risque, les approches peuvent différer comme le montre le Tableau 10-1 présentant une synthèse des principales définitions du risque d'incendie rencontrées dans la littérature. On observe que l'élément de risque intensité est tantôt appréhendé en termes d'aléa et tantôt en termes de vulnérabilité.

Définitions du risque							Références
Aléa				Vulnérabilité			Toutes
Occurrence		Intensité		Enjeux		Parade	(1), (2), (5), (6), (7), (10)
Probabilité d'éclosion	Probabilité d'incendie	Surface menacée	Intensité	Enjeux		Parade	(1), (3)
				Intensité	Exposition	Impact	(4)
				Intensité	Capacité à résister à un degré d'intensité pendant un temps donné		(5)
					Capacité à supporter un dommage suite à une exposition au phénomène		(8), (9)
Aléa				/ sensibilité /		vulnérabilité	(11)

Tableau 10-1 Synthèse des principales définitions du risque d'incendie observées dans la littérature

- (1) Bianchi et al., 2002
- (2) Chen et al., 2003
- (3) Jappiot et al., 2000
- (4) Wilson et al., 2005
- (5) Jappiot et al., 2009
- (6) Camia et al., 2004
- (7) Hardy, 2005
- (8) D'Ercole, 1998
- (9) Blaikie et al., 1994
- (10) Bachmann et Allgower, 2001
- (11) Carrega, 2005

Les trois indicateurs de risque définis dans le chapitre précédent, à savoir : Densité d'éclosion DE, Densité d'incendie DI et Taux de surfaces brûlées SB, permettent d'appréhender la notion de risque d'incendie. Chacun de ces indicateurs est en effet porteur de tout ou partie d'informations relatives à l'aléa et à la vulnérabilité. Ainsi DE et DI contribuent à apprécier l'occurrence du phénomène incendie de forêt (Probabilité d'éclosion, Probabilité d'incendie) et SB permet quant à lui de mesurer le niveau d'intensité de l'incendie (à considérer en termes d'aléa et de vulnérabilité) et le taux de dommages notamment l'impact sur les espaces naturels.

Un indice global du risque d'incendie dans les interfaces habitat-forêt a été défini à partir de ces indicateurs de risque et en faisant l'hypothèse forte à l'échelle du territoire que la

vulnérabilité des zones bâties est minimale et d'égale valeur sur tous les types de territoire par le déploiement de parades adaptées aux enjeux. En effet, la mise en œuvre des actions de prévention comme le débroussaillage obligatoire dans les zones d'interface habitat-forêt doit assurer une protection suffisante des habitations. D'autre part, les parades mises en place doivent être adaptées au regard des enjeux que représentent les types d'interfaces (dispositif de protection des bâtiments, positionnements des moyens de lutte...). Par exemple, les interfaces de type groupé très dense GTD représenteront l'enjeu le plus élevé à défendre en cas d'incendie du fait de la forte densité de bâtis (fort enjeu en termes de biens et de personnes). Les interfaces de type isolé I nécessiteront que des parades soient développées de façon importante pour les défendre en cas d'incendie (du fait de la dispersion des bâtis).

10.2.2. Combinaison des indicateurs de risque

Les trois indicateurs de risque (densité d'éclosion DE, densité d'incendie DI, taux de surfaces brûlées SB) ont été développés dans le cadre de l'analyse spatiale et statistique de la zone d'étude MAM située entre les métropoles d'Aix et Marseille. Chacun d'entre eux a été modélisé sous la forme d'une combinaison linéaire de variables relatives à l'environnement naturel, physique et socio-économique. Ces variables ont été considérées comme les plus significatives avec pour chacune un poids relatif, contribuant de façon positive ou négative à l'explication de chacun des trois indicateurs sur le territoire étudié.

Pour mémoire, ces indicateurs ont été définis par les trois équations suivantes :

$$DE = \exp (2,30258509 * [1,76489 + 0,00558842 I - 0,00240165 GD - 0,00105965 GTD - 0,00609774 R - 0,00065618 DB + 0,00465397 ESN - 0,00512739 URB])$$

La combinaison des variables explique 51 % de la variable DE (cf. Analyse du paragraphe 9.3.2.b).

$$DI = \exp (2,30258509 * [2,09384 + 0,00247646 I - 0,0011186 GD - 0,00301069 GTD - 0,0117099 R - 0,000994732 DB + 0,00258941 KR5 - 0,00420811 VG2 + 0,00303519 ESN - 0,00301263 URB])$$

La combinaison des variables explique 57 % de la variable DI (cf. Analyse du paragraphe 9.3.3.b).

$$SB = 29,292 + 0,093933 I - 0,100626 GD - 0,0246026 DB - 0,663865 DR + 0,625354 DC + 0,408128 VG4 + 0,149018 AI2 + 0,0199612 ALT - 0,18559 AGR + 0,296497 ESN - 0,119762 URB.$$

La combinaison des variables explique 36 % de la variable SB (cf. Analyse du paragraphe 9.3.4.b).

La part explicative de chacun des trois modèles n'est pas la même, DI est le meilleur modèle, SB est le moins bon.

A partir de la combinaison de ces trois indicateurs élémentaires de risque Densité d'éclosion DE, Densité d'incendie DI, Taux de surfaces brûlées SB, un indice de risque IR, unique, global et synthétique a été produit.

Sa formule est une combinaison linéaire des indicateurs DE, DI et SB pondérée de la performance du pouvoir explicatif de chaque indicateur. En considérant que le meilleur modèle obtenu pour les indicateurs de risque est celui de la densité d'incendie DI, DI a été pris en référence et on lui a affecté la valeur 1.

Ainsi pour l'indicateur Densité d'éclosion DE dont le pouvoir explicatif est de 51 %, on lui a affecté la valeur 0,89 correspondant au ratio de 51/57, 57 étant la valeur du pouvoir explicatif de l'indicateur Densité d'incendie DI. Et pour l'indicateur Taux de surfaces brûlées SB dont le pouvoir explicatif est de 36 %, on lui a affecté la valeur 0,63 correspondant au ratio de 36/57, 57 étant la valeur du pouvoir explicatif de l'indicateur Densité d'incendie DI.

Ainsi, l'indice global de risque d'incendie IR est défini par la formule suivante :

$$IR = 0,89 DE + DI + 0,63 SB$$

10.2.3. Principe de cartographie de l'indice de risque IR

L'indice global de risque IR a été cartographié en combinant les trois cartes prédictives de chaque indicateur de risque. Il suppose dans un premier temps de cartographier les trois indicateurs de risque élémentaires Densité d'éclosion DE, Densité d'incendie DI, Taux de surfaces brûlées SB, puis dans un second temps de leur affecter un coefficient de pondération (déterminé par le niveau de performance de leur pouvoir explicatif) et de les additionner.

Chaque variable intervenant dans la combinaison linéaire de chaque indicateur de risque élémentaire a été elle-même cartographiée au format raster avec l'attribution :

- d'une valeur 0 ou 100 pour les variables isolé I, groupé dense GD, groupé très dense GTD, zone restante (R) ayant une densité de bâtis résidentiels DB nulle, autre espace naturel ESN, espace urbain URB, espace agricole AGR, exposition très chaude KR5, peuplements résineux VG2, garrigues VG4. La valeur 100 correspond au fait que le pixel appartient à la classe considérée, la valeur 0 correspond au cas contraire ;
- d'une valeur de pixel exprimée respectivement en nb bâtis/km², km routes/km², km chemins/km² et en m pour densité de bâtis DB, densité de routes DR, densité de chemins DC et altitude ALT.

Les indicateurs sont alors calculés selon les formules rappelées dans le paragraphe précédent en utilisant la calculatrice raster disponible dans le logiciel SIG ArcGIS©9.2.

10.3 Cartographie de l'indice de risque

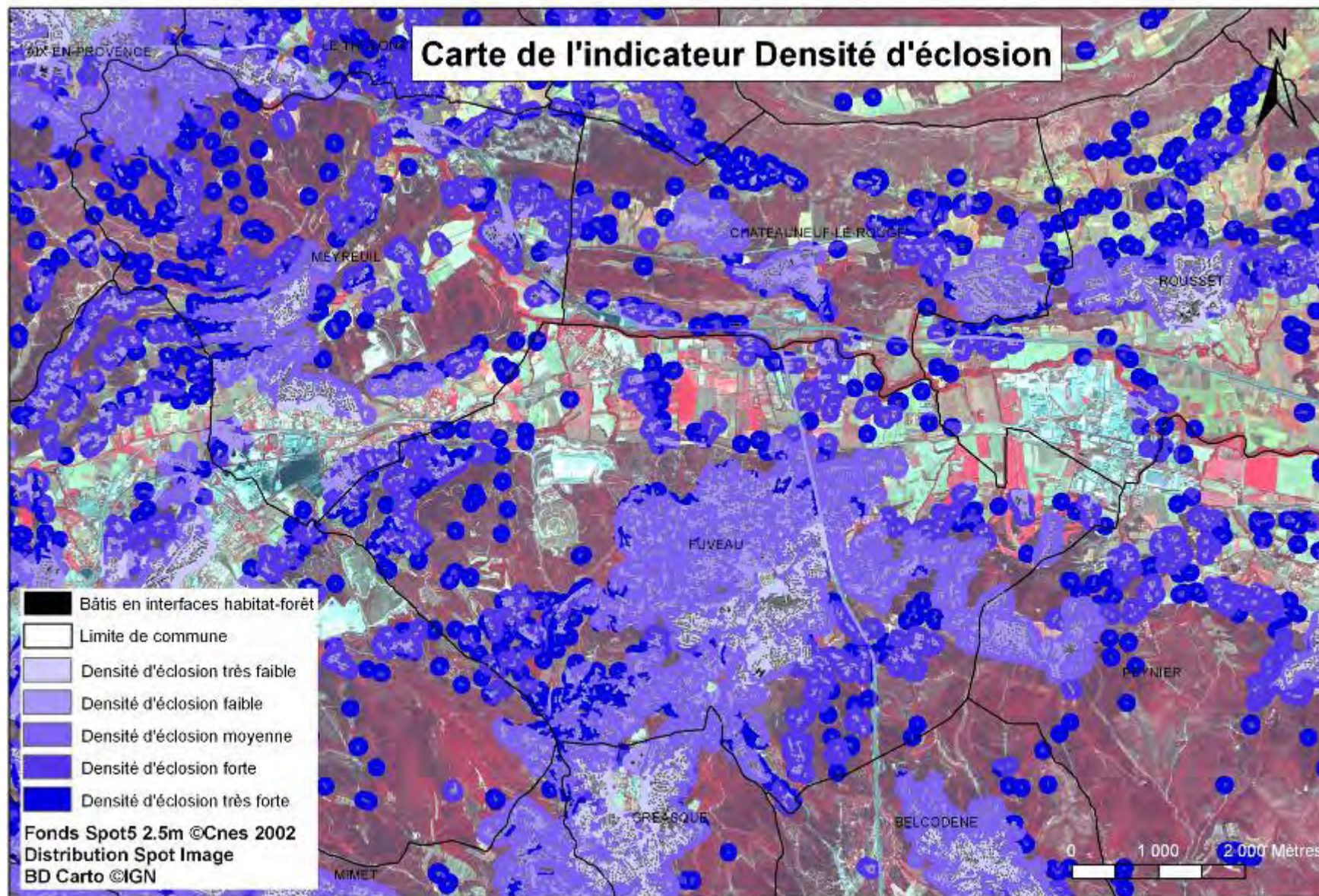
10.3.1. Cartographie des indicateurs de risque élémentaires

a. Principes de cartographie des indicateurs élémentaires de risque

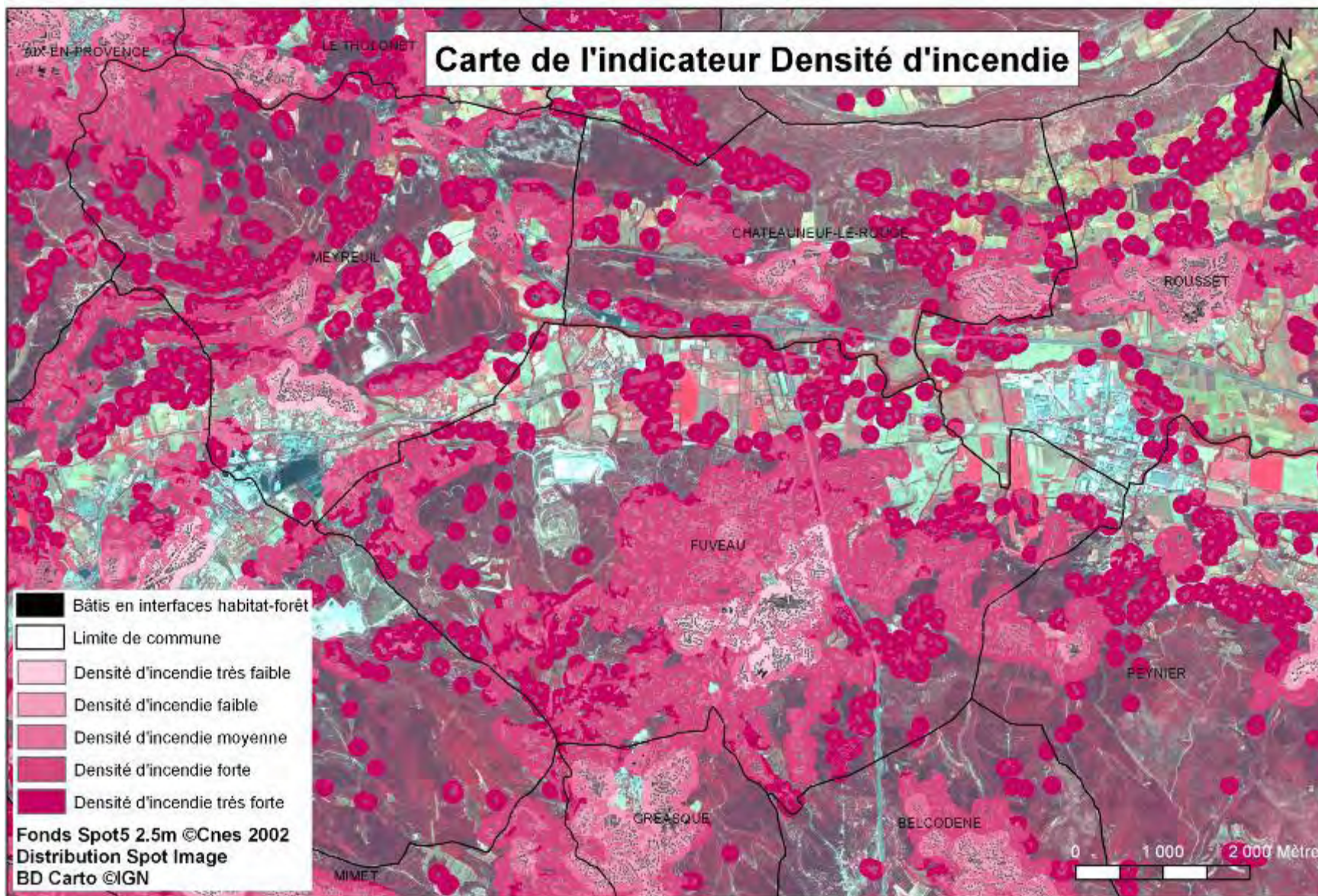
La calculatrice raster a ensuite permis de calculer chaque indicateur en additionnant les différentes couches de variable concernées dans la formule avec son coefficient de pondération. Le résultat du calcul a alors été seuillé en cinq classes. Le seuillage a été fixé de la même manière pour les trois indicateurs, les seuils retenus étant les plus proches de ceux proposés lors d'un seuillage en effectifs égaux.

b. Cartographie des indicateurs de risque DE, DI et SB

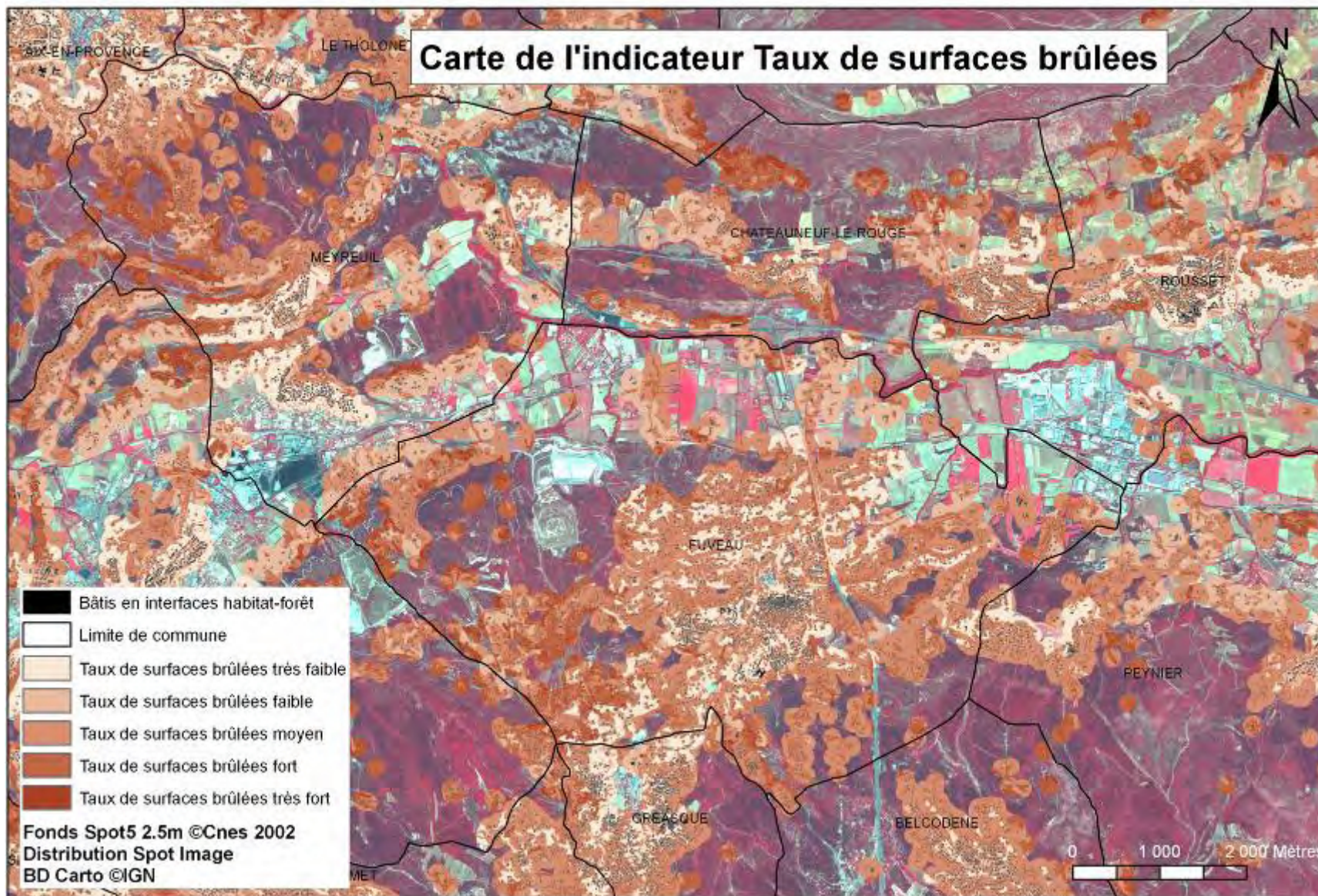
La cartographie des indicateurs de risque a été réalisée sur la zone d'étude MAM. Les Carte 10-1 à Carte 10-3 présentent le résultat cartographique sur un zoom de la zone d'étude MAM de la densité d'éclosion, de la densité d'incendie et du taux de surfaces brûlées en cinq classes : très faible, faible, modérée, forte, très forte.



Carte 10-1 Carte de l'indicateur élémentaire de risque DE - Zoom sur la zone d'étude MAM



Carte 10-2 Carte de l'indicateur élémentaire de risque DI - Zoom sur la zone d'étude MAM



Carte 10-3 Carte de l'indicateur élémentaire de risque SB - Zoom sur la zone d'étude MAM

10.3.2. Cartographie de l'indice global de risque d'incendie

a. Principe de cartographie de l'indice global de risque

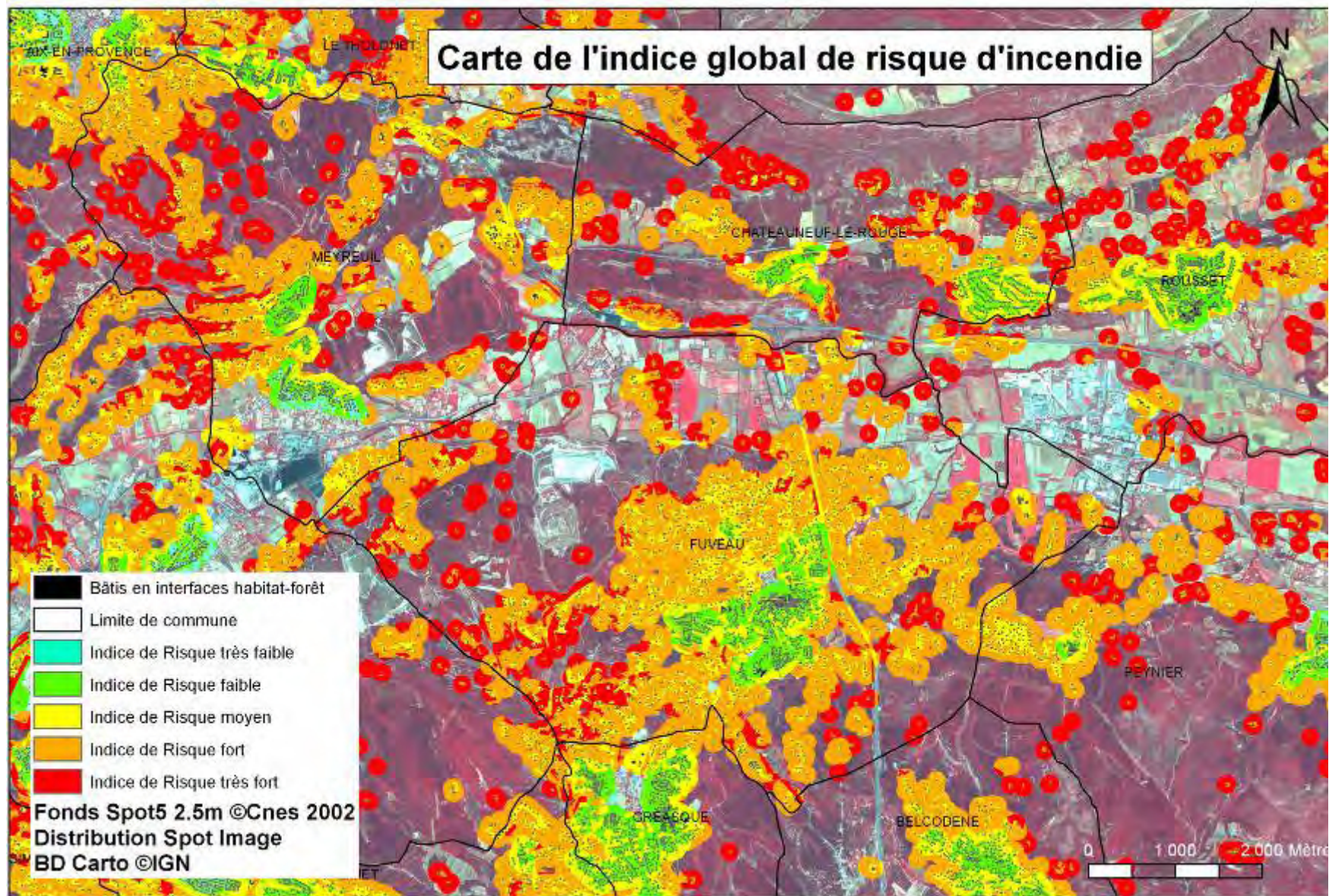
L'indice global de risque IR a été calculé en additionnant les trois couches relatives aux indicateurs de risque élémentaires DE, DI et SB pondérés du coefficient de pondération déterminé par le niveau de performance de leur pouvoir explicatif fixé dans la formule. Le résultat du calcul a alors été seuillé en cinq classes fixant ainsi 5 niveaux de l'indice de risque : très faible, faible, modéré, fort et très fort. Chaque indicateur élémentaire ayant été classé avec quatre seuils fixés à 10, 20, 50 et 100, l'indice de risque a été seuillé selon les valeurs seuils obtenues lors de la combinaison des indicateurs conformément à la Figure 10-1.

Pour les seuils des Indicateurs de risque DE, DI et SB :					
	Très faible	Faible	Moyen	Fort	Très fort
DE	$0 \leq DE \leq 10$	$10 < DE \leq 20$	$20 < DE \leq 50$	$50 < DE \leq 100$	$DE > 100$
DI	$0 \leq DI \leq 10$	$10 < DI \leq 20$	$20 < DI \leq 50$	$50 < DI \leq 100$	$DI > 100$
SB	$0 \leq SB \leq 10$	$10 < SB \leq 20$	$20 < SB \leq 50$	$50 < SB \leq 100$	$SB > 100$
$0,63 \cdot SB$	$0 \leq 0,63SB \leq 6,3$	$6,3 < 0,63SB \leq 12,6$	$12,6 < 0,63SB < 31,5$	$31,5 < 0,63SB < 63$	$0,63SB > 63$
$0,89 \cdot DE$	$0 \leq 0,89DE \leq 8,9$	$8,9 < 0,89DE \leq 17,8$	$17,8 < 0,89DE \leq 44,5$	$44,5 < 0,89DE \leq 89$	$0,89DE > 89$
$0,89 \cdot DE + DI$	$0 \leq 0,89DE + DI \leq 18,9$	$18,9 < 0,89DE + DI \leq 37,8$	$37,8 < 0,89DE + DI \leq 94,5$	$94,5 < 0,89DE + DI \leq 189$	$0,89DE + DI > 189$
Pour les seuils de l'indice de risque global IR : $IR = 0,89 \cdot DE + DI + 0,63 \cdot SB$					
	Très faible	Faible	Moyen	Fort	Très fort
IR	$0 \leq IR \leq 25$	$25 < IR \leq 50$	$50 < IR \leq 126$	$126 < IR \leq 252$	$IR > 252$

Figure 10-1 Valeurs seuils des indicateurs et indice de risque global

b. Cartographie de l'indice de risque

La Carte 10-4 présente le résultat cartographique sur un zoom de la zone d'étude MAM de l'indice global de risque en cinq classes : très faible, faible, modéré, fort, très fort.



Carte 10-4 Carte de l'indice global de risque d'incendie – Zoom sur la zone d'étude MAM

10.4 Analyse du risque d'incendie dans les interfaces habitat-forêt

10.4.1. Indicateurs de risque DE, DI et SB

a. Résultats cartographiques de l'indicateur densité d'éclosion DE

L'analyse de l'indicateur de risque densité d'éclosion DE a été développée à partir des résultats cartographiques obtenus sur la zone d'étude MAM située entre les métropoles Aix et Marseille. Les résultats de la Figure 10-2 montrent que plus d'un tiers (36 %) des surfaces en interfaces habitat-forêt sont situées en zone de fort et très fort risque d'éclosion. Cette surface n'inclut cependant que 4,5 % des bâtis situés dans les interfaces habitat-forêt. Ces bâtis sont pour 86 % d'entre eux situés en interfaces habitat-forêt de type habitat isolé et habitat diffus, ce qui représente par ailleurs un peu plus d'un tiers (34 %) de l'ensemble des bâtis situés en interfaces habitat-forêt de type habitat isolé et habitat diffus. Des efforts en termes de sensibilité des populations pour éviter au maximum les départs de feu par imprudences liées aux travaux, activités de plein air seraient à concentrer dans ces zones prioritairement.

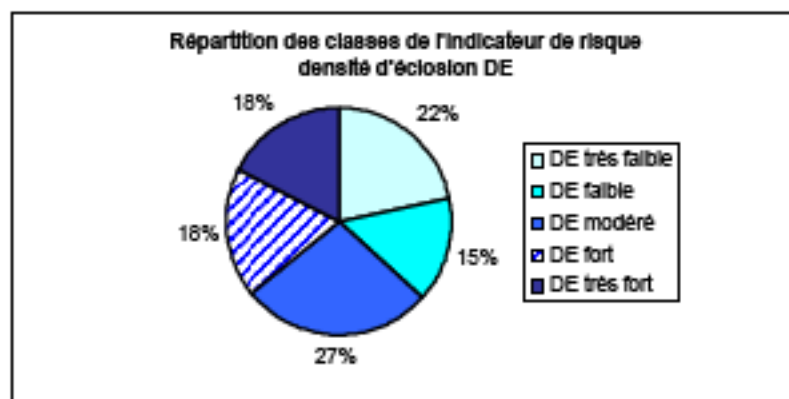


Figure 10-2 Répartition des classes de l'indicateur de risque DE sur la zone d'étude

La Figure 10-3 illustre la répartition des cinq niveaux de densité d'éclosion DE selon les types d'interface habitat-forêt.

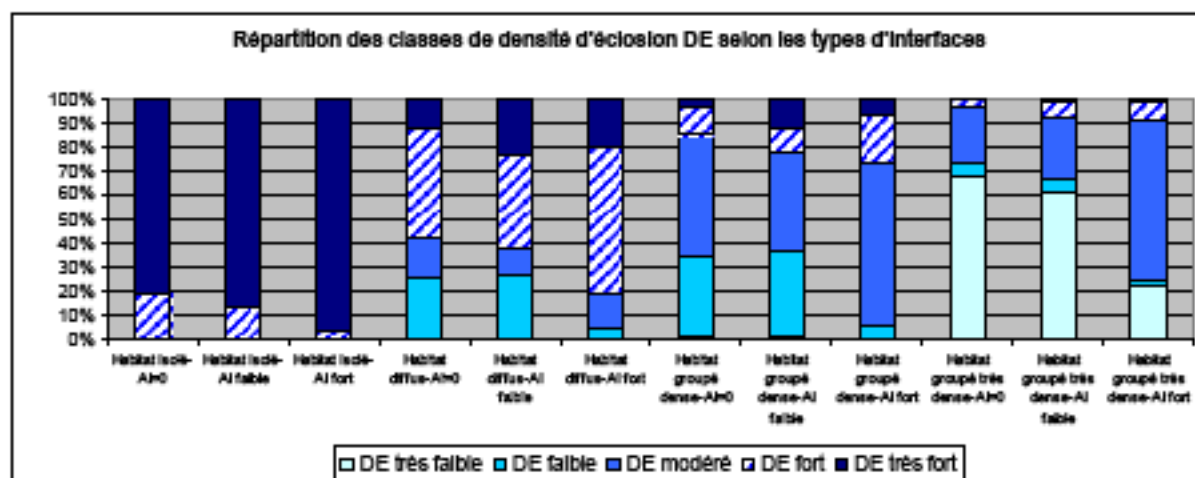


Figure 10-3 Répartition des 5 niveaux de l'indicateur de risque DE selon les types d'interfaces habitat-forêt

Presque 100 % (99,7 %) des zones situées dans les interfaces en habitat isolé et près des 2/3 (62 %) de celles en habitat diffus sont en zone à densité d'éclosion forte et très forte. Les zones de forte et très forte densité d'éclosion occupent à peine un tiers des surfaces des interfaces en habitat groupé dense et à peine plus de 6 % de celles des interfaces en habitat groupé très dense.

b. Résultats cartographiques de l'indicateur densité d'incendie DI

L'analyse de l'indicateur de risque densité d'incendie DI a été développée à partir des résultats cartographiques obtenus sur la zone d'étude MAM située entre les métropoles Aix et Marseille. Les résultats de la Figure 10-4 montrent que plus de la moitié (51 %) des interfaces habitat-forêt sont situées en zone de fort et très fort risque d'incendie. Cette surface inclut cependant près de 10 % des bâtis situés dans les interfaces habitat-forêt. Ces bâtis sont pour presque les 3/4 (72 %) situés en interfaces habitat-forêt de type habitat isolé et habitat diffus, ce qui représente par ailleurs plus de la moitié (54 %) des bâtis en interfaces habitat-forêt de type habitat isolé et habitat diffus. Des efforts en termes de préparation des populations à recevoir un feu seraient à concentrer dans ces zones pour que ces populations aient un comportement adapté aux circonstances définies par le passage d'un incendie.

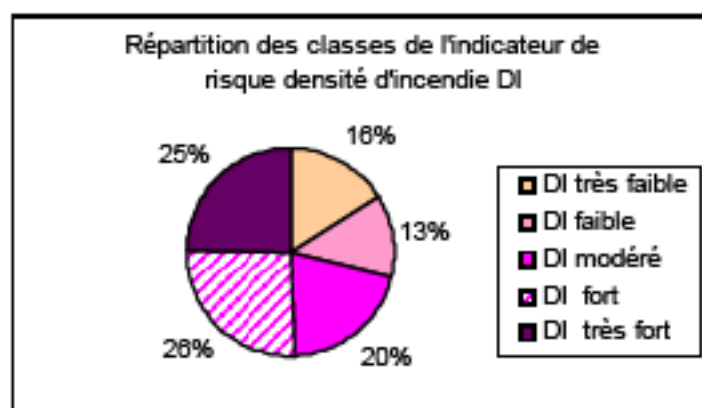


Figure 10-4 Répartition des classes de l'indicateur de risque DI sur la zone d'étude

La Figure 10-5 illustre la répartition des cinq niveaux de densité d'incendie DI selon les types d'interface habitat-forêt.

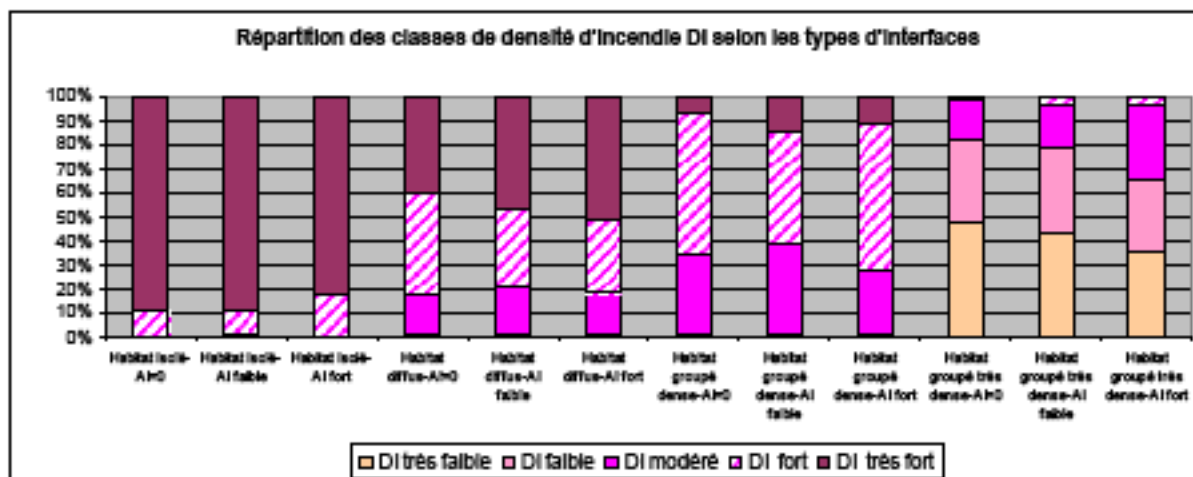


Figure 10-5 Répartition des 5 niveaux de l'indicateur de risque DI selon les types d'interfaces habitat-forêt

Presque 100 % (99,7 %) des zones situées dans les interfaces en habitat isolé et près des 80 % de celles en habitat diffus sont en zone à densité d'incendie forte et très forte. Les zones de forte et très forte densité d'éclosion occupent un peu plus des 2/3 (65 %) des surfaces des interfaces en habitat groupé dense et 2,5 % de celles des interfaces en habitat groupé très dense.

c. Résultats cartographiques de l'indicateur taux de surfaces brûlées SB

L'analyse de l'indicateur de risque taux de surfaces brûlées SB a été développée à partir des résultats cartographiques obtenus sur la zone d'étude MAM située entre les métropoles Aix et Marseille. Les résultats de la Figure 10-6 montrent que 20 % des interfaces habitat-forêt sont situées en zone de fort et très fort taux de surfaces brûlées. 11 % des bâtis situés en interfaces habitat-forêt isolé et diffus sont situés en zone de fort et très fort taux de surfaces brûlées. Des efforts en termes de prévention seraient à concentrer dans ces zones pour réduire au maximum les dommages lors du passage d'un incendie (en cherchant à réduire son intensité, en assurant une zone de protection autour de la zone bâtie).

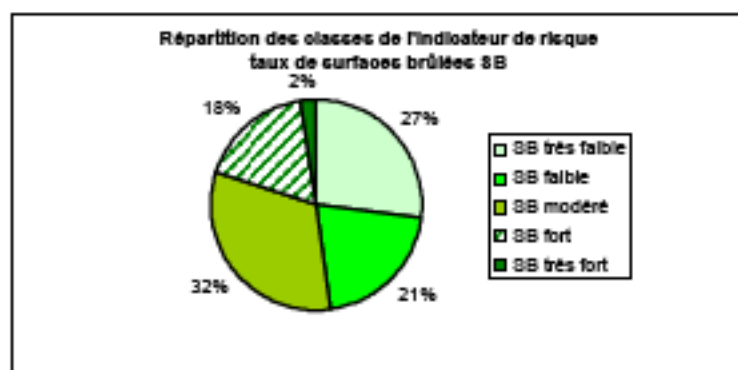


Figure 10-6 Répartition des classes de l'indicateur de risque SB sur la zone d'étude

La Figure 10-7 illustre la répartition des cinq niveaux du taux de surfaces brûlées SB selon les types d'interface habitat-forêt.

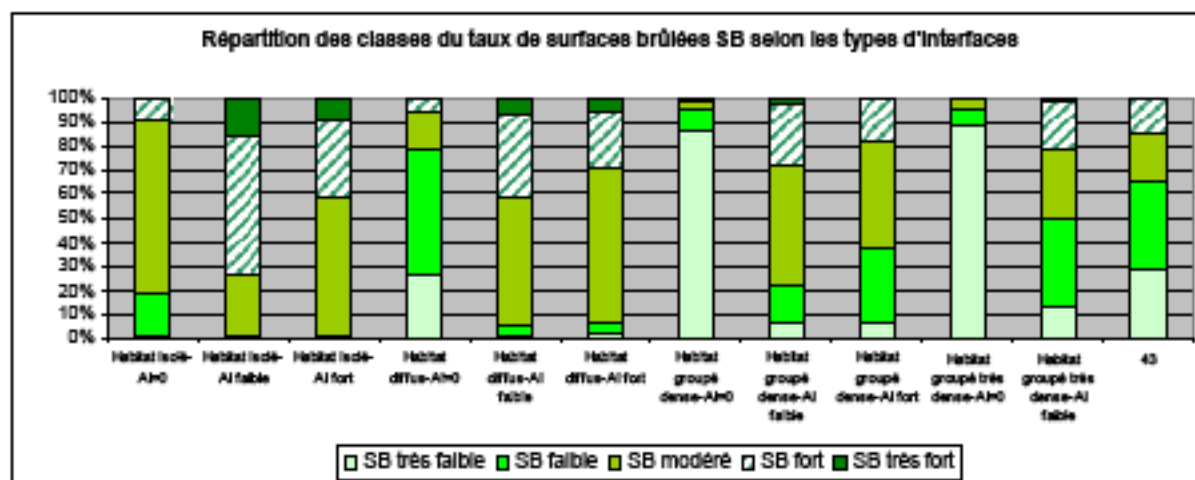


Figure 10-7 Répartition des 5 niveaux de l'indicateur de risque SB selon les types d'interfaces habitat-forêt

Un peu plus d'un tiers (38 %) des zones situées dans les interfaces en habitat isolé et près d'un quart (23 %) de celles en habitat diffus sont en zone à taux de surfaces brûlées fort et très fort. Les zones de forte et très forte densité d'éclosion occupent 17,3 % des surfaces des interfaces en habitat groupé dense et 13,3 % de celles des interfaces en habitat groupé très dense.

10.4.2. Indice global de risque d'incendie

L'analyse du risque d'incendie a été développée à partir des résultats cartographiques obtenus sur la zone d'étude MAM située entre les métropoles Aix et Marseille. Les résultats de la Figure 10-8 montrent que plus de 42 % des interfaces habitat-forêt sont situées en zone de fort et très fort risque. Cette surface importante n'inclut cependant que 5 % des bâtis situés dans les interfaces habitat-forêt. Les efforts qui seraient concentrés sur ces zones en termes de moyens de prévention et de mise en préparation à recevoir un feu auraient plus d'impacts positifs sur la réduction des dommages que s'ils étaient distillés sur la totalité des zones en interfaces habitat-forêt au regard du risque d'incendie.

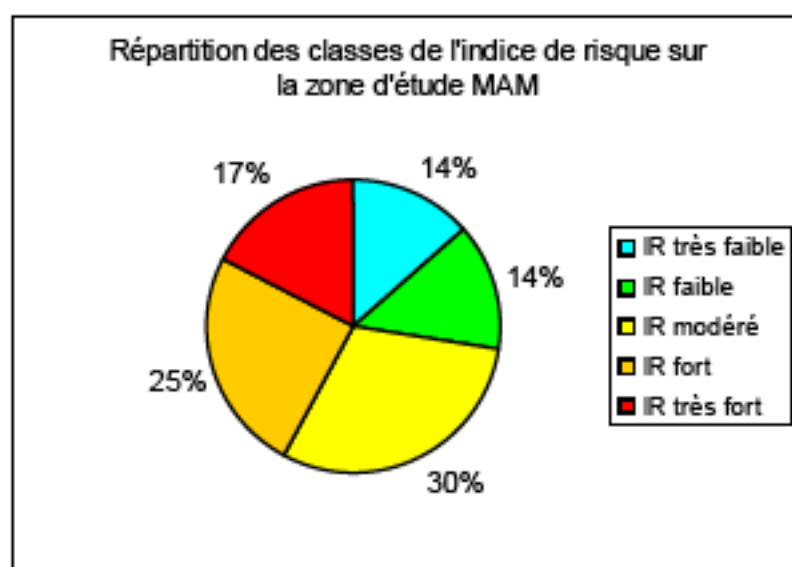


Figure 10-8 Répartition des classes de l'indice de risque sur la zone d'étude

La Figure 10-9 illustre la répartition des cinq niveaux de risque selon les types d'interface habitat-forêt.

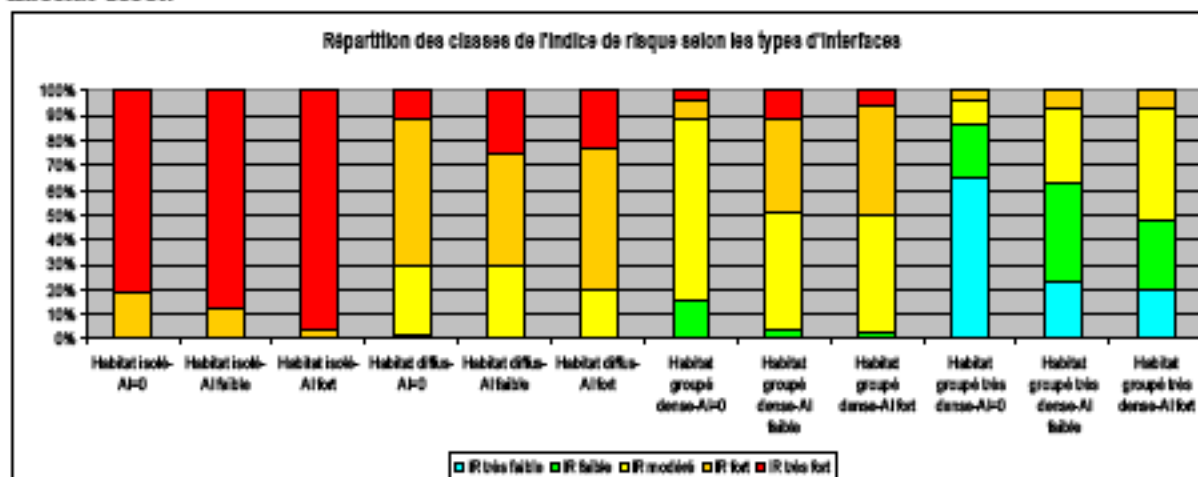


Figure 10-9 Répartition des 5 niveaux de l'indice de risque selon les types d'interfaces habitat-forêt

Presque 100 % (99,6 %) des zones situées dans les interfaces en habitat isolé et plus des 2/3 (71 %) de celles en habitat diffus sont en zone à risque fort et très fort. Elles sont caractérisées par une faible densité de bâti avec en moyenne 41 bâtis/km² pour l'habitat isolé et 94 bâtis/km² pour l'habitat diffus (cf. paragraphe 8.3.1.b). Ces seules interfaces en habitat isolé et en habitat diffus concernent plus des trois-quarts des bâtis (77%) situés dans les zones à risque fort et très fort. Le risque faible n'est pratiquement pas présent dans ces interfaces habitat-forêt et la valeur modérée de l'indice global de risque n'apparaît que pour les interfaces habitat-forêt en habitat diffus pour 20 % à 30 % des surfaces.

Près d'un quart des bâtis (23 %) situés dans des zones à risque fort et très fort sont dans des interfaces en habitat groupé (dense 20 % et très dense 3 %). On peut aussi souligner qu'il n'y a pas de risque très fort dans les interfaces habitat-forêt de type groupé très dense.

Ces interfaces sont caractérisées par des densités élevées de bâtis, (en moyenne 130 bâtis/km² pour le groupé dense et 394 bâtis/km² pour le groupé très dense -cf. paragraphe 8.3.1.b). En cas d'incendie, ce sont des zones qui nécessiteront éventuellement des plans d'évacuation. Or la mise en œuvre de tels plans est fonction du temps nécessaire à l'évacuation d'un quartier. Deux facteurs entrent dans la détermination de ce temps : le nombre de personnes à évacuer et la capacité du réseau routier à faire circuler un nombre important de voitures à la minute (Church et Cova cités dans Haight et al., 2004). Aussi la connaissance des zones à risque fort et très fort, combinée à la connaissance de la densité du bâti et de l'importance du réseau routier pourra aider à identifier les quartiers qui ont potentiellement le double handicap d'une forte densité de population et d'un réseau routier pas toujours adapté pour évacuer les populations et peut-être ainsi à préparer efficacement par exemple un plan communal de sauvegarde dans le cadre du risque d'incendie.

Au sein des interfaces habitat-forêt de type isolé et diffus, la répartition des classes de valeurs de l'indice de risque varie peu avec l'augmentation de l'indice d'agrégation de la végétation. En revanche, au sein des interfaces habitat-forêt de type groupé dense, les parts représentées par un indice de risque faible et modéré diminuent avec une augmentation de l'indice d'agrégation de la végétation passant de 90 % avec un indice d'agrégation de valeur nulle à 50 % avec un indice d'agrégation de valeur forte. Et au sein des interfaces habitat-forêt de type groupé très dense, les parts représentées par un indice de risque très faible et faible diminuent avec une augmentation de l'indice d'agrégation de la végétation passant de 85 % avec un indice d'agrégation de valeur nulle à 50 % avec un indice d'agrégation de valeur forte.

10.4.3. Discussion

La prédominance des interfaces habitat-forêt en habitat isolé et diffus, à risque d'incendie fort et très fort, suggère que l'environnement autour des bâtis soit propre pour limiter l'inflammation de la maison en cas d'incendie : le débroussaillage doit être suffisant pour réduire la biomasse combustible, la mise à distance des arbres par rapport au bâti s'impose, l'enlèvement de la végétation aux abords du bâti est une évidence si l'on souhaite maximiser la réduction des dommages possibles. L'Annexe G développe les principales mesures de prévention à déployer. Il est important de souligner alors que les obligations de débroussaillage en termes de surfaces sont 5 fois plus élevées dans les interfaces en habitat isolé (1ha) qu'en habitat groupé très dense (cf. résultats du paragraphe 5.1.3.c).

On peut souligner le fait qu'une maison située dans une interface habitat-forêt de type isolé en contact avec des zones où l'agrégation de la végétation est nulle n'est pas une garantie suffisante pour diminuer le risque d'incendie. Le feu peut se propager par les brandons qui peuvent parcourir des distances supérieures à 200 m. Aussi un bâti, en l'occurrence situé en plein champs à moins de 200 m d'un espace naturel, peut être l'objet d'une inflammation par

brandons incandescents. Par ailleurs le chaume est un vecteur de propagation du feu. Certes, dans ce cas, le feu est de faible intensité mais s'il trouve suffisamment de combustible pour se nourrir jusqu'à la maison, il pourra l'atteindre et l'enflammer. Le champ peut par ailleurs facilement s'enflammer sous l'effet d'une étincelle provoquée par un engin mécanique de type tracteur... (pièce d'acier touchant des pierres par exemple).

Contrairement aux interfaces en habitat groupé dense et très dense, dans les interfaces en habitat isolé et en habitat diffus la végétation et la zone bâtie sont fortement imbriquées et de fait la démarcation entre les deux n'est pas une ligne bien définie. Ceci rend la lutte contre l'incendie plus difficile pour les pompiers qui doivent atteindre chaque maison en veillant à leur propre sécurité pour la défendre ou la protéger durant un feu. D'ailleurs l'indicateur Périmètre moyen à protéger, défini dans le paragraphe 5.1.3.c, montre que sa valeur est 10 fois plus grande dans les interfaces en habitat isolé et qu'en habitat groupé très dense. Ces zones d'interfaces en habitat isolé et en habitat diffus sont dispersées sur le territoire, de fait elles sont plus difficiles à contrôler en termes de suivi de réglementation par rapport à l'usage du feu et aux imprudences qui occasionneraient des départs de feu. C'est dans cet esprit que la responsabilité de l'individu, habitant notamment dans ces zones à fort risque, doit être rappelée et davantage développée, peut-être favorisée dans le cadre d'une montée en puissance d'une géogouvernance du risque, idée développée dans le chapitre suivant. Il est important dans ces zones de promouvoir toutes les actions de prévention permettant de limiter au maximum l'inflammation de la maison en cas d'incendie : choix des matériaux de construction, pas de végétation au contact de la maison, absence de tas de bois ou tout autre combustible, toits nettoyés de toutes aiguilles de pin sèches... (cf. préconisations détaillées en Annexe G).

10.4.4. Validation des résultats

Les indicateurs de risque DE, DI et SB et l'indice global de risque IR associé ont été modélisés, pour la composante risque d'incendie, à partir de l'analyse de données historiques portant sur la distribution spatiale des points d'éclosion sur la période 1997-2007 sur la zone d'étude MAM située entre les métropoles Aix-Marseille et la distribution spatiale des incendies sur la période 1990-2007. Leur représentation spatiale en cinq niveaux pourrait être validée en la confrontant avec la distribution spatiale de nouveaux points d'éclosion et de nouveaux contours d'incendie des saisons 2008 et 2009, non encore disponibles à ce jour.

Observation : Sur les données historiques des feux, la répartition des 256 points d'éclosion de la période 1997-2007 sur la zone d'étude MAM dans les interfaces habitat-forêt est représentée sur la Figure 10-10.

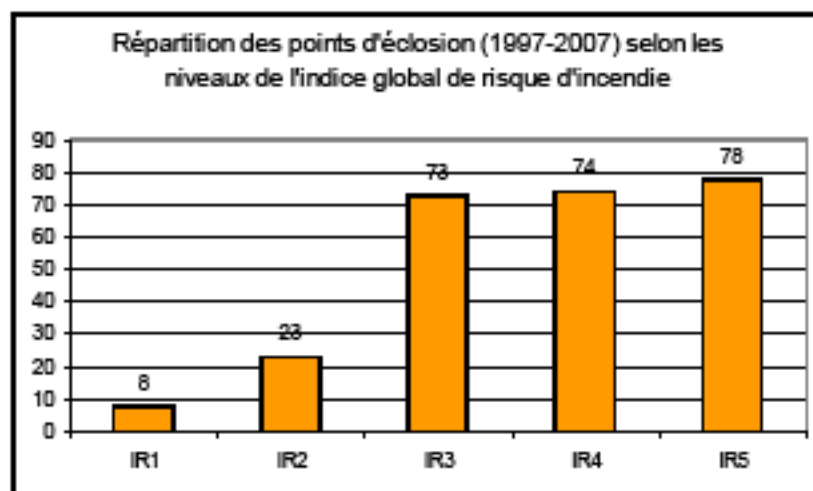


Figure 10-10 Répartition des points d'éclosion (1997-2007) selon les niveaux de l'indice global de risque d'incendie

10.5 Vers des cartes prédictives

Le fait que les variables qui ont le mieux prédit la densité d'éclosion, diffèrent de celles qui ont le mieux prédit la densité d'incendie ou le taux de surfaces brûlées explique pourquoi les patrons spatiaux dans les cartes prédictives associées sont différents les uns des autres. Dans une perspective de gestion, la superposition des trois cartes prédictives relatives à la densité d'éclosion, la densité d'incendie et le taux de surfaces brûlées, est utile conduisant à la carte de l'indice global de risque. Elle peut permettre d'identifier des zones qui sont non seulement soumises à un haut risque d'éclosion mais également d'identifier des zones pour lesquelles ces ignitions pourront générer un feu et impacter des surfaces plus ou moins importantes (Syphard, 2008). Puis les zones ayant un haut niveau de risque pourront être ciblées pour des actions de prévention comme la réduction du combustible, les zones moins sensibles pourront être traitées, si besoin, dans un second temps.

Ce modèle proposé permet une évaluation du risque par une approche purement descriptive. Il suffit en effet d'effectuer une lecture simple et directe du territoire à partir de la typologie d'interfaces habitat-forêt proposée, complétée par quelques descripteurs d'occupation du sol pour obtenir, grâce au modèle, le niveau de risque associé. Il n'est pas nécessaire de maîtriser les techniques spécialisées de connaissance des aléas, ou de diagnostic des vulnérabilités exigés dans la plupart des méthodes traditionnelles d'évaluation du risque, qui sont réservés, quant à elles aux seuls experts.

Mais ce modèle global de risque est construit et fondé sur des résultats issus d'analyses spatiales et statistiques réalisées sur une zone d'étude donnée, la zone MAM située entre les métropoles d'Aix-en-Provence et Marseille en l'occurrence. Pour prédire les trois indicateurs de risque élaborés, densité d'éclosion DE, densité d'incendie DI et taux de surfaces brûlées SB sur un autre territoire, les gestionnaires doivent être conscients que l'influence relative des variables humaines et biophysiques est probablement variable selon les régions, selon l'échelle spatiale ou temporelle d'analyse et selon le type d'activité humaine (Syphard, 2008). Si la méthode de construction du modèle peut être généralisée et appliquée sur un autre territoire disposant de données suffisantes (sur les dépôts de feu et distributions spatiales des incendies notamment), le modèle lui-même restera valide *a priori* pour la seule zone étudiée. Le choix des variables prédictives nécessaires à la construction d'un modèle applicable sur un autre territoire et leurs poids respectifs devra être validé par une analyse statistique préalable.

Chapitre 11. Simulation dynamique du risque d'incendie en fonction de la dynamique de territoire et géogouvernance

La simplicité d'utilisation du modèle de risque développé dans le chapitre précédent rend ce modèle proposé particulièrement apte d'une part au suivi dynamique du risque d'incendie, mais aussi et surtout, au débat et à la discussion citoyenne autour du risque d'incendie de forêt. L'objectif du chapitre est d'illustrer par un exemple la dynamique des interfaces habitat-forêt étudiée sur un territoire et de lui associer la dynamique du risque d'incendie. Puis il est d'introduire le concept de géogouvernance du risque d'incendie et de l'appliquer au cas des interfaces habitat-forêt.

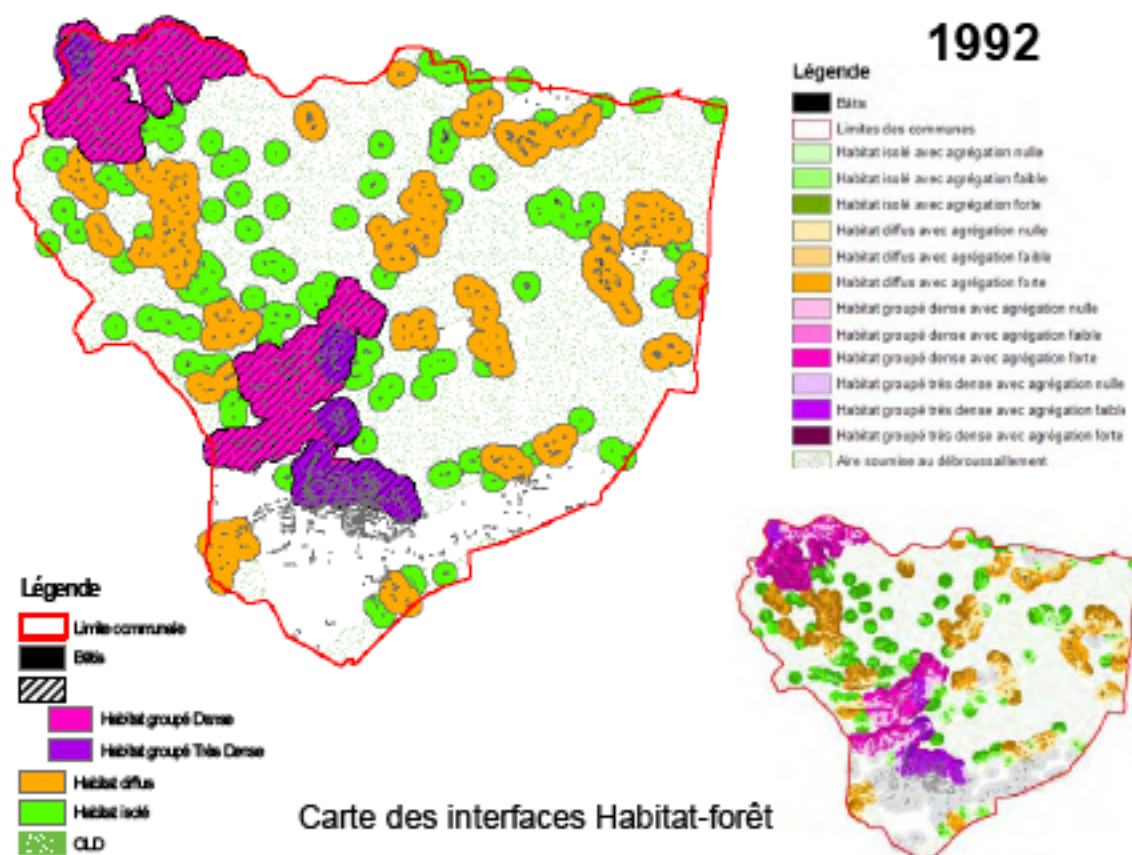
11.1 Dynamique du risque d'incendie associée à la dynamique d'interface

L'intérêt de suivre une dynamique des interfaces habitat-forêt s'inscrit dans un contexte de dynamique d'urbanisation associée à une dynamique végétale, le tout dans un contexte de changement global.

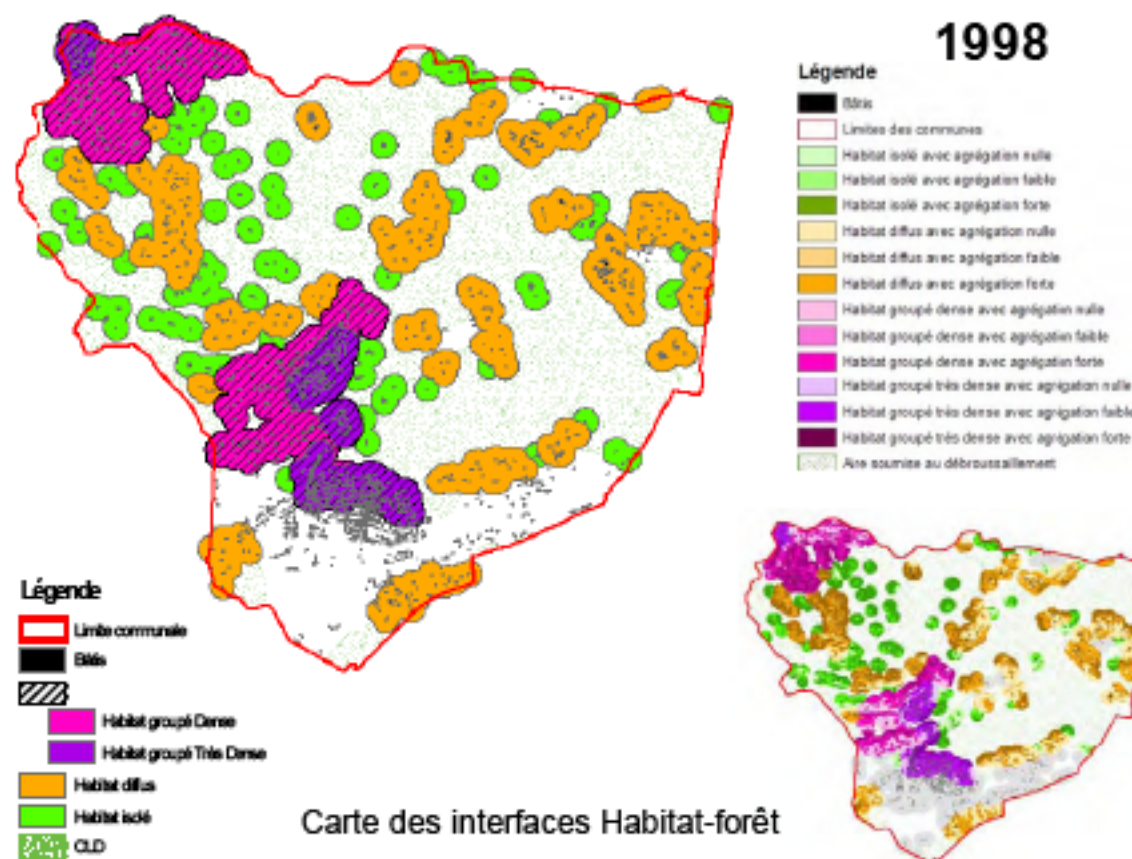
11.1.1. Dynamique des interfaces habitat-forêt

L'étude de la dynamique des interfaces habitat-forêt a été réalisée à l'échelle de la commune de Meyreuil située au sud d'Aix-en-Provence (2 021 ha), soit sur la zone d'étude MEYR. Pour cet exercice, la structure de la végétation a été considérée comme inchangée sur la période, seule la structure des zones bâties a été prise en compte. Des données de bâtis étaient disponibles sur 4 années : 1992, 1998, 2003 et 2006 soit sur la période de 15 ans de 1992 à 2006.

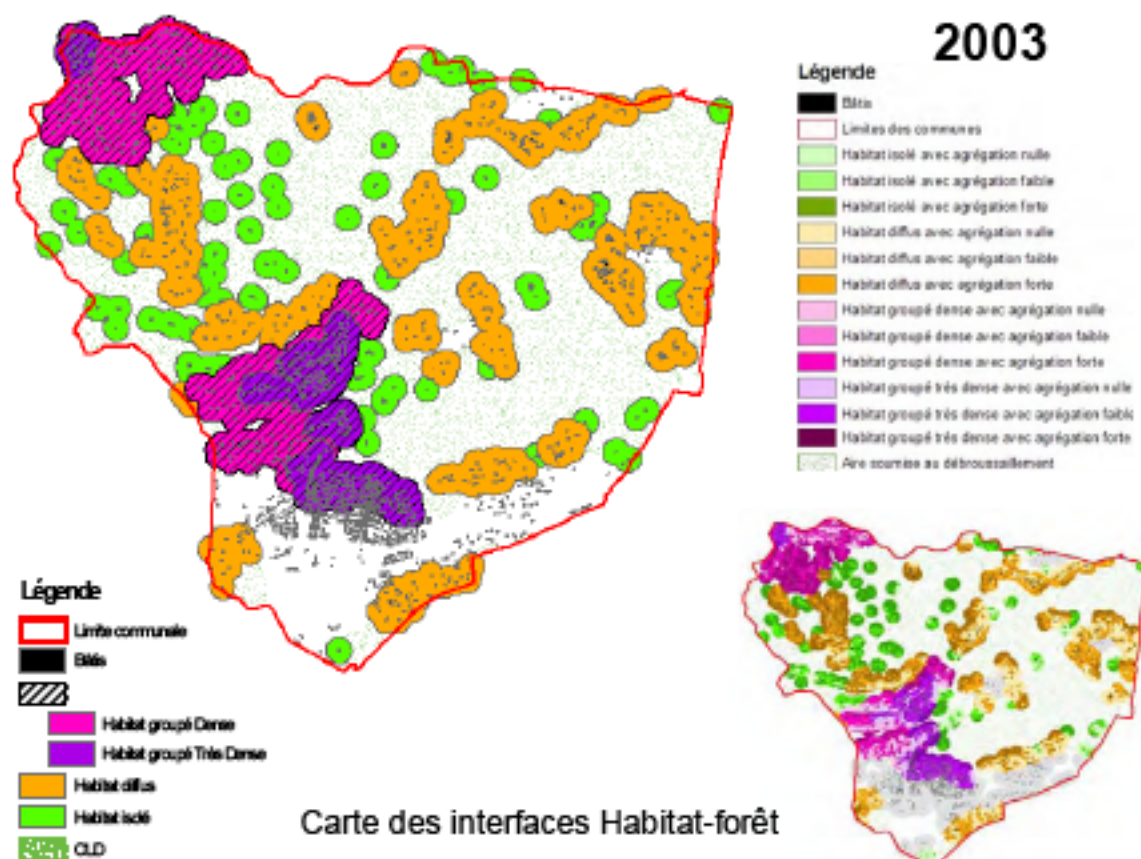
Les Carte 11-1 à Carte 11-4 illustrent la dynamique des interfaces habitat-forêt sur 15 ans liée à cette évolution des zones bâties étudiée sur la commune de la zone d'étude.



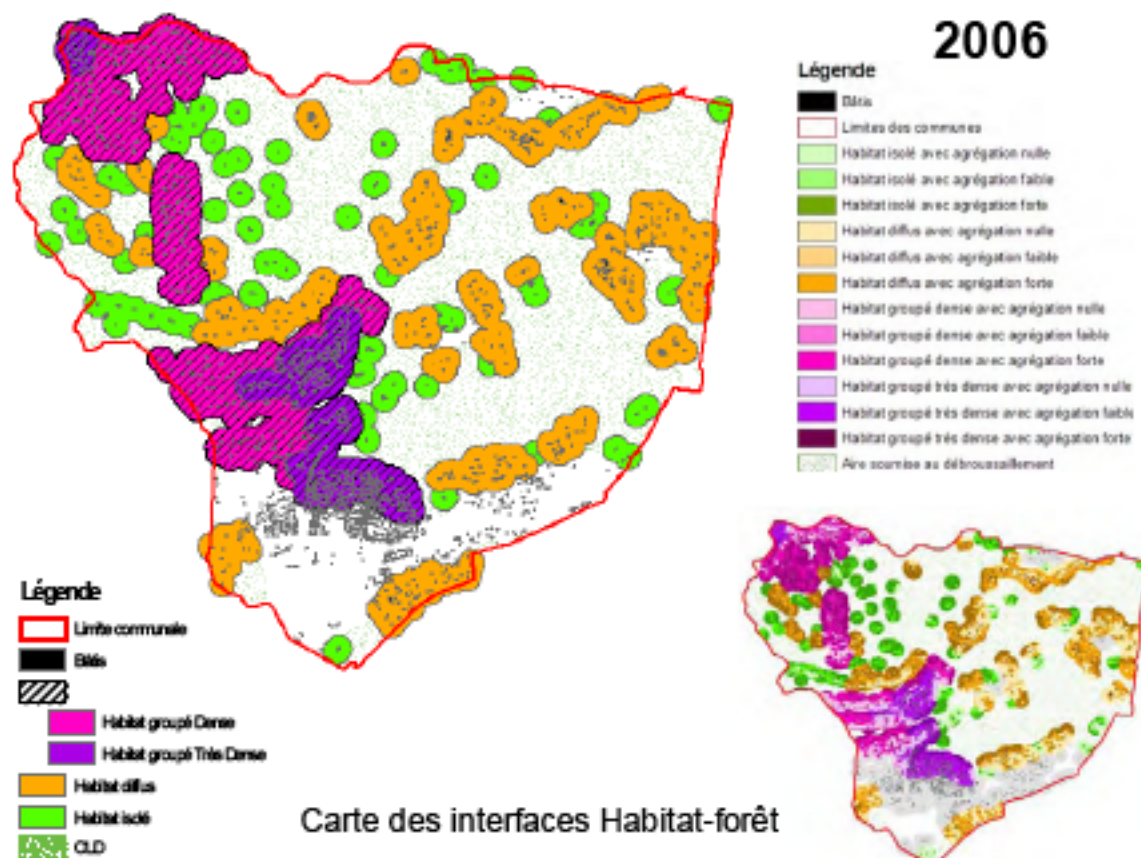
Carte 11-1 Cartes des interfaces habitat-forêt (droite) et carte de la structure de l'habitat (gauche) – Année 1992



Carte 11-2 Cartes des interfaces habitat-forêt (droite) et carte de la structure de l'habitat (gauche) – Année 1998



Carte 11-3 Cartes des interfaces habitat-forêt (droite) et carte de la structure de l'habitat (gauche) – Année 2003



Carte 11-4 Cartes des interfaces habitat-forêt (droite) et carte de la structure de l'habitat (gauche) – Année 2006

On observe une évolution du nombre de bâtis :

- Une augmentation de + 3,1 % par an du nombre de bâtis implantés en zone d'interface habitat-forêt ;
- Une augmentation de + 3 % par an du nombre de bâtis implantés en dehors des zones d'interface habitat-forêt.

Ainsi on constate que + 6 % du territoire communal se trouve en interface habitat-forêt pour une croissance de +0,54 % du territoire communal en dehors des interfaces (dont 0,48% sur terres agricoles). Cette dynamique se traduit par une densification de l'habitat (-3,1 % d'interface en habitat isolé, + 4,4 % d'interface en habitat diffus et + 4,6 % d'interface en habitat groupé) et par la poursuite de l'extension sur des zones agricoles et au sein de zones boisées ou de garrigues (+ 2,0 % d'interface en agrégation nulle, +1,7 % d'interface en agrégation faible et + 2,3 % d'interface en agrégation forte). Elle peut être appréciée précisément au sein même des interfaces habitat-forêt (Figure 11-1).

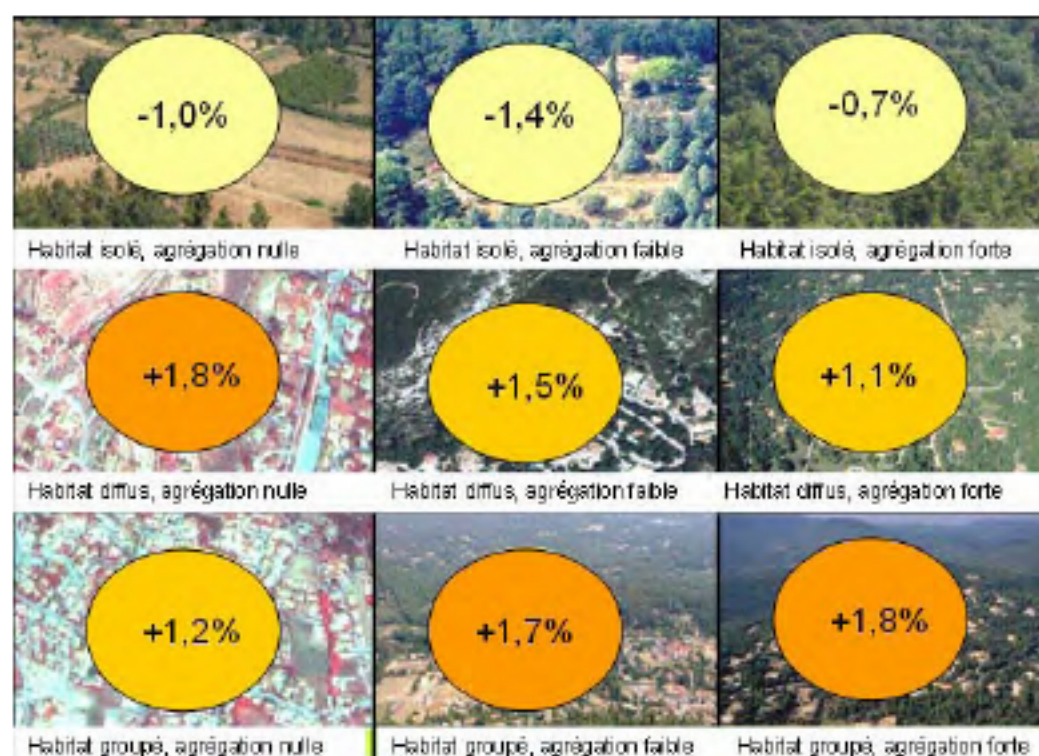


Figure 11-1 Dynamique des interfaces habitat-forêt sur la période 1992-2006 – zone d'étude MEYR

11.1.2. Dynamique du risque d'incendie dans les interfaces habitat-forêt

En faisant l'hypothèse que l'on se base sur le même historique des feux (même pression de dépôts de feux et mêmes surfaces brûlées), en appliquant le modèle de l'indice global de risque, le suivi dynamique du risque d'incendie, associé à celui des interfaces habitat-forêt devient possible. La Figure 11-2 illustre deux situations de l'indice de risque d'incendie en 1998 et en 2006. L'incidence des choix en matière de développement et d'aménagement du territoire pourra être mesurée en termes d'évolution du risque. Dans un cas, l'implantation d'un nouveau bâti isolé (situation a sur la carte 2006 de la Figure 11-2) en interface générera une nouvelle emprise avec un risque d'incendie fort alors que, dans un autre cas, un nouveau bâti viendra renforcer et densifier un habitat déjà en place (situation b sur la carte 2006 de la Figure 11-2) contribuant alors à une diminution du risque sur cette nouvelle emprise.

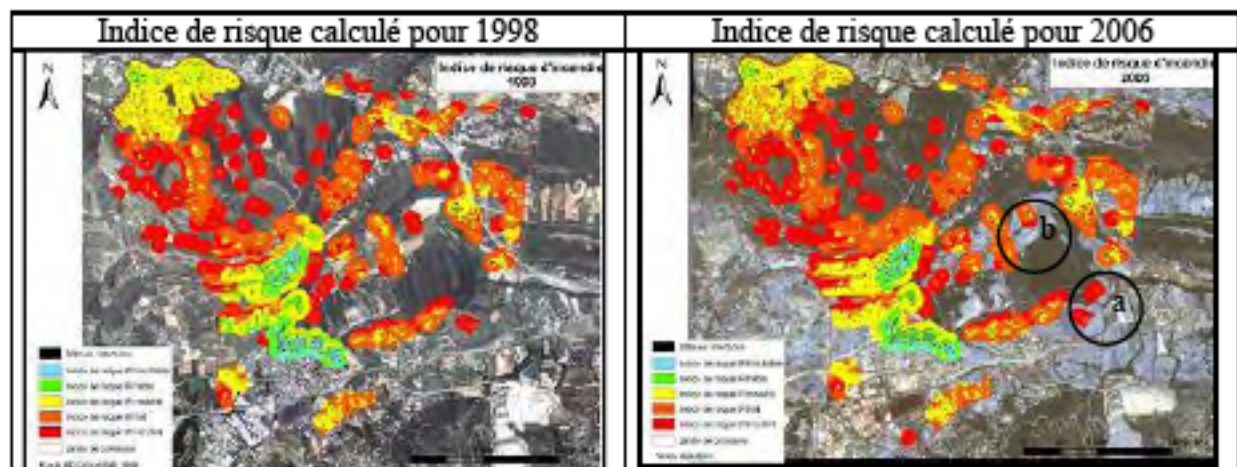


Figure 11-2 Cartographies de l'indice de risque en 1998 (gauche) et en 2006 (droite)

11.2 Parler de géogouvernance du risque d'incendie

L'aménagement du territoire est un enjeu primordial de notre société. En zone méditerranéenne française, cet aménagement doit intégrer le risque d'incendie, notamment du fait de l'expansion des interfaces habitat-forêt propices aux dépôts de feux et très vulnérables à l'incendie. Cette expansion devrait se poursuivre et avec le changement climatique, les épisodes de sécheresse pourraient pérenniser des conditions extrêmes propices aux incendies au-delà même des seuls territoires méditerranéens aujourd'hui concernés. Cette intégration du risque doit s'appuyer sur des actions conjointes : de gestion de l'espace naturel, de planification et de réglementation de l'urbanisation, de maîtrise foncière, et de développement de l'action citoyenne.

L'évaluation spatiale du risque d'incendie avec sa cartographie est une des composantes nécessaires à une intégration réussie. En effet afficher le risque est essentiel. Certes la démarche n'est pas nouvelle, mais elle doit être complétée par « afficher le risque et le faire connaître par la biais d'une information ciblée ». L'information diffusée ne peut effectivement pas être la même pour le citoyen résidant dans un habitat isolé en plein cœur de forêt ou pour le citoyen habitant un lotissement en lisière forestière. Fort d'une connaissance du risque adaptée à son cas particulier, le citoyen peut devenir acteur de la prévention, se placer au centre de cette prévention dont l'efficacité sera alors renforcée voire améliorée. « Apprendre à vivre avec le feu » prendra alors tout son sens.

Faire connaître le risque, c'est un des points clé d'une géogouvernance de la gestion du risque. Le modèle théorique de la Gouvernance et de la Géogouvernance, développé dans le cadre du groupe de recherche « Géogouvernance », a été confronté et appliqué au cas de la gestion du risque d'incendie.

11.2.1. Objectifs du groupe de recherche intersites Géogouvernance

Le groupe de recherche intitulé : « Géogouvernance : l'utilité sociale de l'analyse spatiale » (Gouvernance et citoyenneté dans une gestion durable des territoires), piloté par M. Masson-Vincent de l'UMR Espace, analyse la manière dont les scientifiques, et les géographes en particulier, participent à la gouvernance territoriale, voire à la géogouvernance, considérant cette question à la fois comme un principe pour l'action et comme un objet de recherche (<http://www.univ-provence.fr/gsite/document.php?pagendx=2826&project=umrespace>).

La réflexion du groupe s'engage dans le contexte d'une application au territoire du concept de développement durable, conduisant à concevoir de nouvelles démarches de gestion à travers une nouvelle vision territoriale. Cette dernière interpelle désormais les scientifiques en sciences sociales à qui il est demandé d'aider les aménageurs à définir des projets de territoire, qui soient partagés par l'ensemble des acteurs : rendre intelligible la complexité territoriale, produire de l'information pertinente, la traiter de façon choisie pour aider à la compréhension du fonctionnement territorial (ex : mise en œuvre de fonctions d'analyse spatiale) et à la prise de décision. La durabilité des territoires et leur géogouvernance impliquent aussi l'anticipation de la dynamique de ces territoires. Celle-ci, fondée sur des simulations spatiales, s'appuie sur l'analyse spatiale qu'il convient alors de faire connaître et de promouvoir à travers de nouvelles démarches. Ainsi un objectif double assigné à la géogouvernance est d'une part, de contribuer à la définition des enjeux de territoire dans l'optique du développement durable, de la durabilité et d'autre part, d'informer et former le gestionnaire comme le citoyen, pour assurer la compréhension des enjeux du territoire et associer le citoyen aux décisions.

L'objectif du groupe de travail est de démontrer l'apport de l'analyse spatiale à la géogouvernance : de la formulation des problèmes, l'identification des enjeux de territoire et des acteurs, la simulation de scénarios d'actions jusqu'à la stratégie de communication. La démarche d'analyse spatiale doit contribuer au transfert de l'information, des experts aux populations et décideurs, et *vice-versa*, en donnant à tous, les moyens d'une véritable compréhension des devenir possibles du territoire, et mettant à disposition les connaissances nécessaires à l'évaluation des tenants et aboutissants de la prise de décision.

11.2.2. Application à la géogouvernance du risque d'incendie

Dans le contexte de l'aménagement du territoire soumis au risque d'incendie, peut-on parler de géogouvernance du risque d'incendie ?

Ainsi appliqué au cas de la gestion du risque d'incendie, le modèle conceptuel de la géogouvernance peut être illustré par la Figure 11-3.

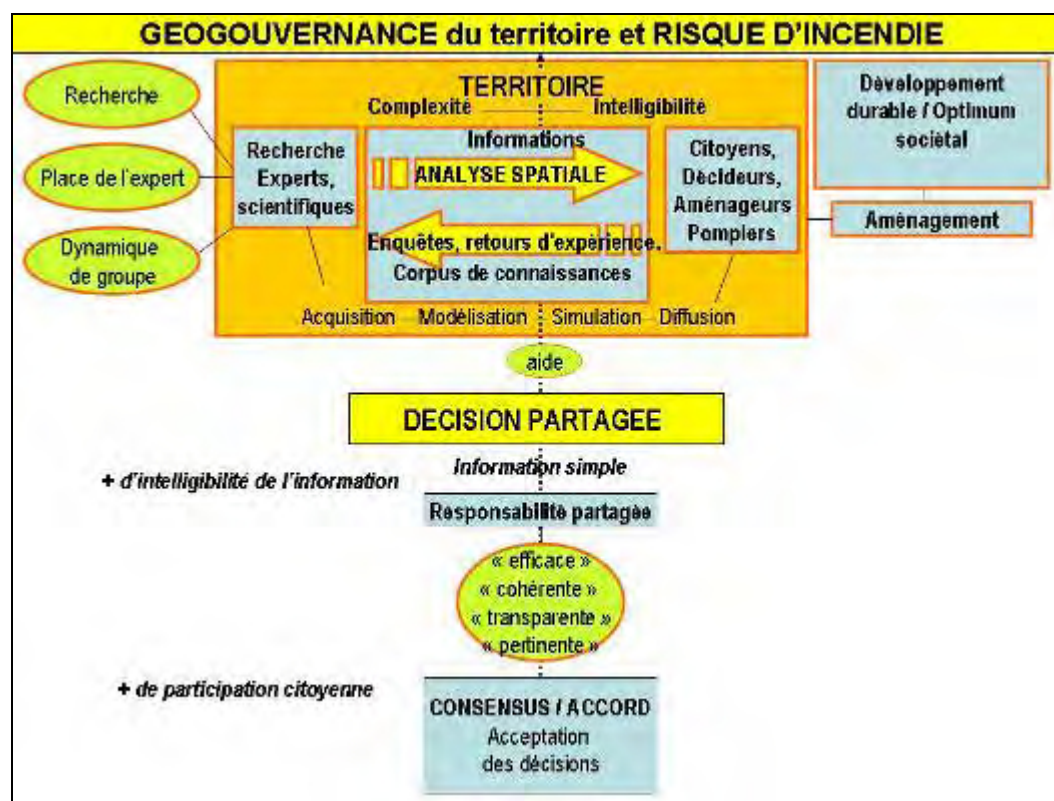


Figure 11-3 Pour une géogouvernance du risque

Du concept géogouvernance naît alors la notion de territoire géogouverné. Un territoire **géogouverné** concerne des acteurs citoyens, décideurs, aménageurs, pompiers... et des acteurs chercheurs, experts, géographes qui sur leur territoire construisent des projets concertés, pour répondre à l'intérêt général ou à des objectifs de qualité de vie... de façon plus générale au développement durable, à la quête d'un optimum sociétal *via* l'aménagement de ce territoire. La démarche mise en œuvre pour aboutir à la construction de tels projets s'appuie sur des processus d'information, de formulation de préoccupations, de décision, et de post-évaluation. Les méthodes et outils déployés sont l'analyse spatiale, l'analyse des retours d'expérience, les outils de communication... Ils doivent permettre une meilleure compréhension de la complexité, des enjeux territoriaux et aider ainsi à la prise de décision. La recherche d'une décision partagée (obtenue sur un consensus si ce n'est un accord complet) est essentielle car elle assure le succès de la mise en œuvre de cette décision par le fait d'une responsabilité partagée entre les acteurs. Une information simple et intelligible permettra de véhiculer et de garantir une perception positive de la décision, reconnue comme efficace, cohérente, transparente et pertinente, et donc, acceptée.

Le modèle d'évaluation du risque d'incendie développé dans la thèse est une méthode, un outil qui peut s'inscrire dans le cadre général de la géogouvernance du territoire en matière de risque : à travers la connaissance, la prévention et la gestion du risque. La carte du territoire issue de l'approche par les interfaces habitat-forêt offre une grille de lecture et d'interprétation des enjeux sur le territoire soumis au risque d'incendie. Cette grille doit aider non seulement le citoyen mais aussi les décideurs, aménageurs, scientifiques à comprendre les enjeux sur leur territoire. Calé sur cette grille et construit à partir de l'analyse spatiale du territoire, l'affichage du risque d'incendie pourra aider à définir les actions à mener en termes de prévention, voire de lutte, et de gestion du risque. En offrant une information intelligible, pertinente car actualisée conformément à la dynamique du territoire, cet affichage du risque

permettra de définir des actions ciblées qui contribueront à réduire la vulnérabilité à l'échelle du territoire comme à celle du bâti. Un certain nombre de ces actions sont décrites en Annexe G. La mise en œuvre de ces actions sera d'autant plus effective qu'elles seront issues d'une décision concertée voire partagée, sinon, mieux comprise. Récemment les résultats d'une enquête conduite aux USA montrent que les habitants seraient même prêts à payer pour réduire le risque (Kaval, 2009).

Responsabiliser les habitants soumis à ce risque, dans les interfaces habitat-forêt en particulier, renforcer l'efficacité de la prévention, offrir une aide pour la lutte contre les incendies à travers la connaissance de l'organisation spatiale des habitations et leur localisation, maîtriser le développement des zones à risque sont autant d'actions à développer qui concourent à la géogouvernance en mettant en relation décideurs, aménageurs, scientifiques et citoyens, à la recherche d'un optimal sociétal qui est dans le cadre déterminé du risque d'incendie de forêt d'apprendre ou ré-apprendre à vivre avec le feu. Pour mieux gérer, « gouverner » un territoire soumis au risque d'incendie, le développement de méthodes et l'utilisation d'outils aidant à son analyse ou à la prise de décision s'exerçant sur un territoire soumis au risque d'incendie contribuent à la géogouvernance.

CONCLUSION-PERSPECTIVES

La thèse, qui relève des sciences de la géographie et de la cyndinique, voulait montrer toute la pertinence de l'utilisation de l'objet géographique « interface » dans le contexte de l'évaluation du risque d'incendie. Cet objet « interface » a été défini dans le cadre du groupe de travail Interface de l'UMR Espace conduisant à la publication d'un article dans *L'Espace géographique* (Groupe de recherches « Interface », 2008). Il a été appliqué dans la thèse au cas particulier de l'interface habitat-forêt. Après avoir défini, caractérisé et cartographié l'interface habitat-forêt, la thèse a alors examiné la valorisation possible de cette entrée par l'interface habitat-forêt dans le cadre d'une démarche d'analyse spatiale et de cartographie du risque d'incendie sur le territoire.

La caractérisation et la cartographie des interfaces habitat-forêt

L'interface habitat-forêt, associée à une définition précise, a fait l'objet d'une démarche de géo-métrisation. En effet, la délimitation sur une carte des contours des interfaces habitat-forêt a nécessité des choix méthodologiques, la définition de caractéristiques homogènes et de valeurs seuils.

La méthode de caractérisation et de cartographie des interfaces habitat-forêt, développée dans la thèse, repose sur la combinaison de deux critères, objectifs et quantifiés, l'un relatif à la structure de l'habitat et l'autre à la structure de la végétation.

En matière de structure de l'habitat, la thèse a ainsi conduit à proposer une définition, argumentée et précise, des types d'habitat résidentiel : habitat isolé, diffus, groupé dense et groupé très dense. Des principes de distances entre bâtis et de dénombrement des bâtis ont servi à les identifier. Ainsi quel que soit le niveau de l'observation, la cartographie de ces types d'habitat ne varie pas. Puis une analyse spatiale sur deux zones tests a permis de les caractériser en termes de densité de bâtis, de surfaces à débroussailler et de périmètre à défendre. Cette recherche a donné lieu à un article scientifique paru en 2009 dans *Computers, Environment and urban systems* (Lampin et al., 2009).

En matière de structure de végétation, le choix de caractériser la structure horizontale de la végétation a été privilégié. Un indice de l'écologie du paysage, l'indice d'agrégation, a été calculé pour traduire la continuité horizontale de la végétation. Des paramètres et environnement de calcul de l'indice (rayon de calcul de 20 m pour la fenêtre glissante, seuil à 95 % pour discriminer une agrégation faible d'une agrégation forte, résolution de l'image maximale de 10 m) ont été fixés ainsi que leurs limites de façon à pouvoir généraliser la méthode et à aider l'utilisateur final dans son souhait de cartographier la structure de la végétation. La méthode peut ainsi être mise en œuvre en utilisant des cartes de végétation au format raster d'une résolution maximale de 10 m. Cette recherche pourra être valorisée dans le cadre d'un article scientifique soulignant l'intérêt de l'indice dans une démarche appliquée de cartographie de la structure de la végétation des interfaces habitat-forêt.

La méthode de caractérisation et de cartographie des interfaces habitat-forêt, ainsi développée dans la thèse, est applicable sur de grandes surfaces et à une grande échelle dans les départements du sud de la France. Elle a permis pour la première fois en France de quantifier l'importance des interfaces habitat-forêt sur un territoire et son évolution. Ainsi les interfaces habitat-forêt occupent 30 % de la surface de la zone d'étude située entre les métropoles d'Aix-en-Provence et Marseille MAM et concernent 56 % des bâtis résidentiels. Cette recherche sur la caractérisation et la cartographie des interfaces a donné lieu à un article scientifique du *Journal of Environmental Management* (article sous presse). Elle a fait l'objet de présentations dans des colloques et de rapports listés en Annexe H.

Les résultats prometteurs d'une nouvelle méthode d'évaluation du risque d'incendie

La méthode d'évaluation du risque d'incendie développée dans la thèse est innovante et se différencie des méthodes traditionnelles.

En effet, premièrement, les approches traditionnelles modélisent le comportement physique du feu à partir de facteurs physiques du territoire (végétation, topographie, vent...). L'organisation du territoire dans le non-combustible n'y est pas prise en compte, comme si le territoire n'avait pas d'influence sur le phénomène. Or ces organisations du territoire, sans être liées directement à l'incendie, agissent sur son origine et son comportement, sur sa propagation et son intensité. Deuxièmement les approches traditionnelles évaluent le risque avec une démarche analytique selon les axes aléa/vulnérabilité sinon aléa/enjeux avant d'opérer une synthèse pour aboutir à la notion de risque.

La nouvelle méthode s'appuie sur une analyse spatiale et statistique du territoire, fondée sur une nouvelle cartographie de types de territoire déduite de la cartographie des interfaces habitat-forêt. L'analyse a consisté à croiser les types de territoire et les caractéristiques environnementales, topographiques et socio-économiques avec l'historique des feux à travers la distribution spatiale des départs de feu et celle des surfaces brûlées. Trois indicateurs de risque ont été définis : densité d'éclosion, densité d'incendie et taux de surfaces brûlées. Par rapport à ces trois indicateurs de risque, l'analyse a permis de mettre en évidence l'importance de certaines variables comme les interfaces habitat-forêt en habitat isolé, la part des espaces naturels autres que forestiers, la garrigue notamment, les exposition très chaudes, les zones de végétation éparse, la densité des chemins pour leur contribution positive. Elle a également permis de relever les variables relatives aux interfaces habitat groupé dense, interfaces habitat groupé très dense, à la densité de bâtis, à la densité de routes, à la part des espaces urbains, à celle des espaces agricoles et à la végétation résineuse pour leur contribution négative.

Les résultats de cette analyse ont conduit à la modélisation des trois indicateurs de risque et à la construction d'un indice global de risque qui permet de déduire facilement, et de manière assez directe, l'information synthétique sur les niveaux de risque à l'échelle du territoire.

L'approche par les « interfaces habitat-forêt », intrinsèquement porteuses de l'information synthétique aléa/enjeux/vulnérabilité, a servi de clé d'entrée pour une évaluation directe et globale du risque. Cette nouvelle approche est plus rapide, moins lourde, accessible, y compris à des non spécialistes des incendies de forêt. En effet, elle est fondée sur l'observation et la description des territoires d'une part, et en particulier des interfaces habitat-forêt, et sur une analyse spatiale et statistique de ces territoires. Cette recherche pourra être valorisée dans le cadre d'un article scientifique présentant une nouvelle méthode d'évaluation et de cartographie d'un indice global du risque d'incendie dans les interfaces habitat-forêt.

Les limites de la méthode

La mise en œuvre de cette méthode suppose de disposer de données fiables et exhaustives, à la fois, sur l'inventaire des bâtis et sur la présence de végétation, les deux composantes qui structurent les interfaces habitat-forêt. Elle nécessite également des données sur l'historique des feux avec une connaissance précise de la distribution spatiale des contours de feux et de celle des départs de feu.

Sur ce dernier point, des efforts devront être consentis à court terme. En effet aujourd'hui, peu de départements, concernés par le risque d'incendie, disposent d'une base de données sur la localisation précise des points d'éclosion des feux. On peut noter toutefois que des actions sont déjà lancées dans ce sens et pourraient être encouragées : par exemple le déploiement, sur le terrain après incendie, d'équipes pluridisciplinaires (pompier, forestier, gendarme) visant à connaître les causes de départs de feu, à identifier et localiser précisément les départs de feu (Long et *al.*, 2008).

Le traitement d'images satellites de haute voire très haute résolution, n'a pas permis d'extraire de façon fiable, rapide et efficace les données de bâtis avec leur localisation précise. Ce champ de recherche et développement permettrait d'être moins dépendant de bases de données issues du commerce. L'extraction de données actualisées du cadastre serait également à envisager avec la généralisation de la digitalisation des données cadastrales.

Le traitement d'image satellite de haute voire très haute résolution, a permis de produire les cartes de végétation avec un niveau de précision variable, qui pose aussi la question de la fiabilité de la carte produite variable selon la nature de l'image traitée (Spot5 ou QUICKBIRD...) mais aussi de la technique de traitement utilisé. La détermination de la structure de la végétation peut alors varier pour une même zone selon la qualité de la carte de végétation d'origine.

Enfin, la caractérisation des interfaces habitat-forêt, développée autour des indices de forme tels que l'indice de Patton, la dimension fractale, le ratio périmètre/surface, ne s'est pas montrée fructueuse. Elle mériterait probablement d'être réexaminée en particulier dans la recherche de la mise en évidence des formes allongées des interfaces augmentant le linéaire de contact entre bâtis et végétation.

Des enseignements tirés d'une meilleure connaissance du territoire et du risque d'incendie associé

La carte de l'indice global du risque d'incendie dans les interfaces habitat-forêt, a permis de quantifier le risque et de dégager des suggestions en termes de prévention du risque et de lutte. Les espaces présentant le plus de risque, qui sont les interfaces habitat-forêt en habitat isolé et en habitat diffus, ne représentent qu'une faible part du territoire (7 % de la zone d'étude). Ils méritent ainsi une attention privilégiée, les moyens d'action seront alors concentrés sur les interfaces « stratégiques » plutôt que sur la totalité du territoire, pour un maximum d'efficacité. La recommandation d'actions spécifiques peut être formulée :

(i) En termes de prévention contre les incendies, les mesures individuelles et collectives de protection contre l'incendie doivent être renforcées (débroussaillage, élagage d'arbres pour diminuer l'intensité et la propagation des incendies), notamment dans les interfaces en habitat isolé. Dans ces zones, les surfaces moyennes à débroussailler sont dix fois plus importantes (avec environ 1 ha/bâti et par an) que dans les interfaces habitat-forêt en habitat groupé très dense. Il convient aussi d'encourager à moins d'imprudences pour diminuer ainsi les éclosions possibles d'incendie, par la diffusion d'une information appropriée de prévention au sein des publics directement concernés.

(ii) En termes d'aménagement du territoire, les interfaces en habitat isolé devront être évitées alors que le développement de l'habitat groupé, la densification des zones bâties devront être encouragés. Ces mesures préventives aideront à diminuer les niveaux de risque dans les principales interfaces concernées en habitat isolé et diffus.

Une méthode particulièrement bien adaptée à la simulation dynamique

Le caractère descriptif, facilement applicable de la méthode proposée permet de mettre en évidence une dynamique de territoire, notamment des interfaces habitat-forêt. Ainsi cette dynamique du territoire a été mesurée quantitativement et qualitativement sur la zone d'étude de la commune de Meyreuil MEYR. La surface des zones d'interfaces habitat-forêt a augmenté de 6 % en 15 ans. Cette dynamique s'est traduite par une densification de l'habitat (-3,1 % d'interface en habitat isolé, + 4,4 % d'interface en habitat diffus et + 4,6 % d'interface en habitat groupé) et par la poursuite de l'extension sur des zones agricoles et au sein de zones boisées ou de garrigues (+ 2,0 % d'interface en agrégation nulle, +1,7 % d'interface en agrégation faible et + 2,3 % d'interface en agrégation forte).

Une dynamique du risque peut alors être facilement associée à cette dynamique de territoire. La méthode proposée permettrait également de simuler aisément des évolutions dynamiques du niveau de risque en fonction d'hypothèses construites sur des scénarios d'évolution des territoires : déploiement de modèles de dynamique de végétation (Mouillot et al., 2002) et de dynamique d'urbanisation (Maillé, 2008), qui fournirait les éléments d'évolution pour simuler la dynamique des interfaces habitat-forêt. De cette simulation découlerait alors celle de la dynamique du risque d'incendie.

Par ailleurs, un des champs d'application de ces simulations dynamiques est la prise en compte des effets du changement climatique sur les territoires et donc sur le risque d'incendie associé. En effet, les éléments scientifiques disponibles à ce jour démontrent que les conditions météorologiques extrêmes, telles que les sécheresses qui ont pu affecter ces dernières années l'ensemble des pays du bassin méditerranéen, sont attendues dans les années à venir (Adams, 2009). Elles sont liées au réchauffement climatique qui devrait ainsi s'accompagner d'une augmentation de la fréquence des incendies (Marlon et al., 2009) et des surfaces brûlées (Flannigan et al., 2009). Le paysage lui aussi est en mutation pouvant conduire à des changements d'aires de distribution de certaines espèces végétales du fait notamment des modifications de disponibilité en eau (Rigolot, 2009 ; Rambal, 2008 ; Mouillot et al., 2005). Certaines zones, qui aujourd'hui ne sont pas soumises au risque d'incendie, pourraient ainsi l'être à l'avenir si les conditions propices à l'incendie, végétation et climat, s'étendent à de nouveaux territoires.

Des perspectives encourageantes en matière de géogouvernance et développement durable

L'aptitude de la méthode proposée, et des outils associés, à simuler des dynamiques et l'évolution du risque d'incendie, en fonction de scénarios de transformation à court, moyen ou long terme des territoires, offre des perspectives en matière de géogouvernance. En effet, elle rend le dialogue entre acteurs du territoire plus transparent et interactif, et aide ainsi à la décision quant aux choix d'aménagement du territoire à privilégier. En ce sens, on peut dire que l'outil sert de point de départ à une géogouvernance plus marquée qui devrait permettre de trouver et faire accepter un rôle médian de gestion du risque, à mi-chemin des stratégies traditionnelles défendues à ce jour, soit par les Anglo-Saxons (*Let it burn*), soit par les Européens (lutte à outrance).

En Europe, quelques années après l'Amérique du Nord, on commence à constater que la politique d'éradication du feu, appliquée de manière systématique, aboutit le plus souvent à l'effet contraire à celui espéré. D'après le proverbe finlandais, « Le feu est un mauvais maître, mais un bon serviteur. », en effet, l'homme a besoin du feu pour réguler l'action de la nature, mais le feu non maîtrisé conduit souvent à des catastrophes écologiques menaçant des espèces de disparition. Le paradoxe du feu tient à ce qu'à vouloir lutter à tout prix contre cet élément, on augmente les dégâts potentiels des feux suivants, du fait de l'accumulation de biomasse (McKee et al., 2004). Certes, les forêts européennes n'ont pas la dimension suffisante et sont surtout trop habitées pour envisager une politique de type « *Let it burn* » (laisser brûler), telle qu'elle se pratique aux USA. Néanmoins, à partir des expériences connues et des résultats de programmes de recherche antérieurs, il est envisageable d'inventer une nouvelle politique de gestion du feu adaptée aux conditions européennes (Rego et al., 2007). Il faut apprendre ou ré-apprendre à vivre avec le feu. C'est l'ambition du projet intégré Fire Paradox.

Cette nouvelle stratégie, fondée sur l'apprentissage de la règle « Vivre avec le feu », suppose en effet l'adaptation permanente des organisations du territoire afin d'en améliorer la résilience face au passage du feu et l'amélioration de la sensibilisation et de la prise en compte du risque par les populations qui vivent sur ces territoires. Les pays concernés et menacés par les feux de forêts pourraient sauver, chaque année, des vies humaines, de grandes

superficielles de forêts, et faire l'économie des dépenses si ces populations étaient davantage impliquées, mieux informées et formées. A titre d'illustration, le bilan catastrophique des incendies enregistrés en ce début d'année 2009 en Australie est attribué au manque de préparation du comportement des populations des régions concernées face à l'incendie, populations venues s'installer à la campagne dans des zones particulièrement exposées aux feux de forêt et pour lesquelles la culture du feu n'existe pas. L'administration est même accusée de leur avoir accordé des permis de construire dans des zones à risque qui ne disposaient pas de système de protection renforcée. Le constat est de mettre en œuvre une formation accrue auprès des habitants, les renforts en moyens de lutte n'y feront rien (Stephens et al., 2009).

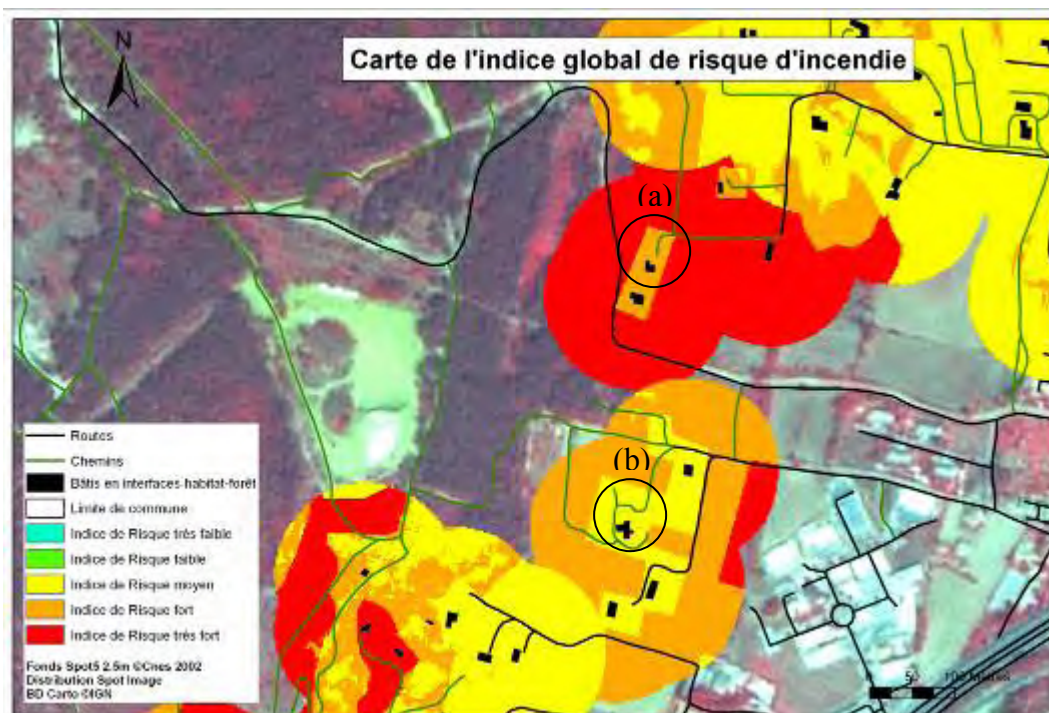
Enfin développer des outils qui aideront à une meilleure gestion du risque concourt à promouvoir le développement durable en préservant les forêts (Arnould et Clément, 2004). En effet d'une part, en invitant à une meilleure maîtrise du développement de l'urbanisation au sein de zones naturelles et d'autre part, en veillant à limiter au maximum les dommages causés par l'incendie qui vont à l'encontre d'une politique d'accueil des espaces naturels.

Perspective de développement d'un outil à l'échelle du bâti

L'outil proposé pour l'évaluation du risque d'incendie dans les interfaces repose sur l'hypothèse d'une vulnérabilité des zones bâties, minimale et de même valeur sur tous les types de territoire. Cette hypothèse est fondée si l'ensemble des acteurs mettent en œuvre les actions préconisées, en déployant les parades adaptées aux enjeux face à l'incendie (débroussaillage obligatoire, élagage des arbres, toiture nettoyée de toute végétation morte, bâti dégagé de toute végétation vivante, éléments de protection comme des volets...).

Ainsi à un premier niveau de l'ordre du 1/20 000, l'outil recense les entités spatiales selon les types de territoire (types d'interfaces habitat-forêt, hors interfaces, autres) avec des caractéristiques de densité de bâtis, densité de routes, d'occupation du sol... A chacune de ces entités qui correspond à un enjeu sur le territoire, correspond un niveau possible de dommages par le feu plus ou moins important, un niveau de vulnérabilité (densité de bâtis ou de routes plus ou moins importantes) mais aussi la mise en œuvre d'actions spécifiques (parades) visant à réduire ces dommages possibles, cette vulnérabilité (effort plus ou moins important en termes de niveau de débroussaillage, ou en termes de défense des bâtis en cas de lutte avec la notion de périmètre à défendre).

Mais il semble opportun de s'intéresser également à un second niveau de l'ordre du 1/5 000, qui est celui du bâti au sein d'une entité spatiale de type interface habitat-forêt. La carte de l'indice global peut être zoomée à l'échelle du bâti (Carte 11-5), précisant alors le niveau de risque dans lequel se situe le bâti ainsi que son environnement.



Carte 11-5 Carte de l'indice global de risque IR zoomée à l'échelle du bâti.

Ainsi le bâti (a) de la Carte 11-5 est situé dans une zone où l'indice de risque est fort à très fort. La nature de la voirie qui le dessert (chemin étroit cul de sac mais route large à proximité...), une situation isolée en contact avec l'espace forestier, une qualité insuffisante du débroussaillage... sont autant d'éléments qui permettront de préciser le niveau de vulnérabilité à l'échelle du bâti, en le diminuant ou au contraire en l'augmentant, et donc de nuancer le niveau de l'indice global de risque. Le bâti (b) de la Carte 11-5 est quant à lui situé dans une zone où l'indice de risque est modéré à fort. Tout comme pour le bâti (a), la nature de la voirie qui dessert le bâti (b) (chemin étroit mais en boucle, route à l'est du bâti permettant le positionnement sécurisé des pompiers en cas d'incendie par vent de mistral...), sa situation en bordure de lotissement sont autant d'autres éléments à prendre en compte.

A l'instar des travaux de Mattenberger (2006) sur l'évaluation de la qualité de sites pour l'habitat, un modèle multicritère pourrait alors être développé à l'échelle du bâti, prenant en compte tous les éléments susceptibles d'augmenter, ou au contraire, de diminuer la vulnérabilité du bâti en interface, et donc d'interférer sur le niveau de risque (qualité du débroussaillage, desserte du réseau routier en cul de sac, en boucle, bordure ou cœur de lotissement, bornes incendie...). Il pourrait aussi être associé à une approche du risque au niveau du bâti lui-même (Léonard et al., 2004 ; Blanchi et al., 2004), avec la prise en compte de critères conduisant ou non à diminuer son inflammabilité ou son exposition au rayonnement. Il pourrait aussi être associé à une prise en compte des effets de l'hétérogénéité de la végétation au contact du bâti sur le transfert de radiation lors des incendies de forêt (Pimont et al., 2009). La recherche d'indicateurs de vulnérabilité, portant sur la capacité de résistance d'un espace donné et la valeur de cet espace, pourrait aussi être mise en œuvre s'inspirant de travaux réalisés sur le risque d'érosion, indicateurs en nombre réduit, les plus pertinents, les plus mobilisables et les moins redondants possibles (Liégeois et al., 2005).

Les menaces d'incendie dans les interfaces habitat-forêt, décrites comme une fonction de la gestion du combustible, mais aussi de l'inflammabilité du bâti, doivent donc être traitées à ces deux niveaux : au niveau du territoire et de ses gestionnaires, et au niveau du citoyen qui a la responsabilité de sauvegarder sa maison (Kamp et Sampson, 2002).

La nouvelle approche développée pour l'évaluation du risque s'est affranchie de la combinaison aléa et vulnérabilité, elle examine le territoire, défini par son occupation du sol, face au phénomène incendie. La nouvelle carte des types de territoires obtenue *via* la cartographie des interfaces habitat-forêt découpe l'espace en unités spatiales qui sont les plus homogènes possibles en termes de densité de bâtis, densité de routes ou de chemins... Au sein de ces unités, des zones de végétation plus ou moins continue, ou de non-végétation sont mises en évidence. La clé d'entrée de l'analyse spatiale par les interfaces habitat-forêt a donc conduit à mettre en exergue de nouvelles configurations spatiales qui, souvent associées à de nouvelles configurations d'acteurs, peuvent être à l'origine de nouveaux processus de décision.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abhineet, J., Ravan, S.A., Singh, R.K., Das, K.K., Roy, P.S. (1996). Forest fire risk modelling using remote sensing and geographic information system. *Current science*. 70, 928-933.
- Adams, M. (2009). RAPID ROUNDUP : Victorian bushfires – experts respond. http://www.aussmc.org/Victorian_bushfires.php#Mark_Adams, en ligne le 17 mars 2009.
- Agee, J.K. (1998). The landscape ecology of western forest fire regimes. *Northwest Sci*. 72, 24-34 (special issue).
- Ahern, A., Chladil, M. (1999). How far do bushfires penetrate urban areas? Australian Bushfire Conference, Albury. Paper presented at 1999 Australian Disaster Conference, Emergency Manage of Aust., Canberra, A. C. T. 8p.
- Amatulli, G., Rodrigues, M.J., Trombetti, M., Lovreglio, R. (2006). Assessing long-term fire risk at local scale by means of decision tree technique. *Journal of geophysical research*. Vol.111, G04S05; doi: 10.1029/2005JG000133.2006.
- Avalapati, J.R.R., Carter, D.R., Newman, D.H. (2005). Wildland-urban interface: Challenges and Opportunities. *Forest policy and Economics*. 7:705-708.
- Alexander, M.E., Stocks, B.J., Wotton, B.M., Flannigan, M.D., Todd, J.B., Butler, B.W., Lanoville, R.A. (1998). The international crown fire modelling experiment: an overview and progress report. 20-23. In: Proceedings of the second symposium on fire and forest meteorology. January 12-14, 1998, Phoenix, AZ. Boston, MA: American Meteorological Society.
- Alexandrian, D., Jappiot, M., Lampin, C., Long, M., Chandiooux, O., Estève, R. (2005). Rapport PPRIF pour DDAF du Var.
- Alexandrian, D. (2002). Sautes de feu, analyse des mécanismes et modélisation. Modèle probabiliste développé dans le cadre du programme SALTUS. In Union des Sylviculteurs du sud de l'Europe/ Institut européen de la forêt cultivée/Association régionale de défense contre l'incendie, Stratégies de prévention des incendies dans les forêts d'Europe du Sud. Actes du forum européen « Feux de forêt ». Bordeaux 2002. Bordeaux : Editions Préventique, p185-192.
- Alexandrian, D., Rigolot, E. (2005). Construire une culture du feu: Fire Paradox, le nouveau programme intégré de l'union européenne. *Forêt Méditerranéenne*. 26 (3).
- Alexandrian, D. (1992). Guide technique du forestier méditerranéen français. Essences forestières.
- Amato, S., Vinzi, V.E. (2003). Bootstrap-based Q2kh for the selection of components and variables in PLS regression. *Chemometrics and intelligent Laboratory Systems*. 68, 5-16.
- Badia-Perpinya, A., Montserrat-Pallares, B. (2006). Spatial distribution of ignitions in Mediterranean periurban and rural areas: the case of Catalonia. *International Journal of Wildland Fire*. 15, 187-196.
- Backmann, A., Allgöwer, B. (2001). A consistent wildland fire risk terminology is needed!. *Fire Management Today*. 61, 4, 28-33.
- Becker, M. (1982). Influence relative du climat et du sol sur les potentialités forestières en moyenne montagne. Exemple des sapinières à fêtuque dans les Vosges alsaciennes. *Annales des Sciences forestières*. Vol-39, n°1.
- Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I., Wisner, B. (1994). At risk: natural hazards, people vulnerability and disaster. Routledge, London, New York. 280 p.
- Blanchi, R., Leonard, J., Maughan, D. (2004). Towards New Information Tools for Understanding Bushfire Risk at the Urban Interface. In: Bushfire 2004: Earth, Wind and Fire. Adelaide, South Australia
- Blanchi, R., Jappiot, M., Alexandrian, D. (2002). Forest fire risk assessment and cartography, a methodological approach. In: IV International. Conference on Forest Fire Research & Wildland.Fire Safety. Coimbra. Portugal (D.X. Viegas, Ed.). Millpress, Rotterdam, Netherlands.
- Boffer, A. (2001). Méthode de création d'information multi niveaux pour la généralisation cartographique de l'urbain. Thèse de doctorat. Université de Marne La Vallée.
- Bogaert, J., Myneni, R.B., Knyazikhin, Y. (2002). A mathematical comment on the formulae for the aggregation index and the shape index. *Landscape Ecology*. 17: 87-90.
- Borgniet, L., Lampin, C., Jappiot, M., Long, M., Dumas, E. (2004). Caractérisation des interfaces espaces urbains – forestiers – agricoles, hétérogénéité des sources et complexité des formes Incertitude en géomatique. Colloque Reglis, Montpellier, 18 – 20 octobre 2004.

- Bouisset, C. (1998). Les incendies de forêts méditerranéens : limites, marges, frontières. Des seuils écologiques aux limites politico-administratives, du local à l'euro-péen, un siècle de gestion des incendies en France, Espagne et Italie. Thèse de doctorat de l'Université d'Avignon en Géographie, 376 p.
- Bovio, G., Marzano, R., Aguado, I., Chuvieco, E., Martinez, J., Nieto, H., Salas, J., Berolo, W., Carrega, P., Fox, D., Geronimo, N., Robin, J.G., Gomez, I., Martin, P., Martinez-Vega, J., Vilar, L., Gitas, I., Karteris, M., Tsakalidis, S. (2006). Eufirelab: Euro-Mediterranean Wildland Fire Laboratory, a "wall-less" laboratory for wildland fire Sciences and technologies in the Euro-Mediterranean Region Deliverable D 08-06: Towards a Euro-Mediterranean Wildland Fire Danger Rating system. 126p.
- Bradstock, R.A., Gill, A.M. (1998). Bushfire risk at the urban interface estimated from historical weather records: consequences for the use of prescribed fire in the Sydney region of south-eastern Australia. *Journal of Environmental Management*. 52 (3): 259-271.
- Brososfske, K.D., Cleland, D.T., Saunders, S.C. (2007). Factors influencing Modern Wildfire Occurrence in the Mark Twain, National Forest, Missouri. *South J. Appl. For.* 31 (2).
- Bruneau, M., Kilian, J., Le Men, H., Mongkolsawat, C. (1985). Identification and dynamics of the agricultural environments in the northeast Thailand (Udon Thani. Sakon.Nakhon). Série cartosat n°56.
- Brunet, R., Ferras, R., Théry, H. (1993, 3^{ème} éd.). Les mots de la géographie. Paris, Montpellier. La documentation française, 518 pages.
- Brunet, R. (1967). Les phénomènes de discontinuité en géographie. Paris : Éditions du CNRS, 117 p.
- Burel, F., Baudry, J. (1999). Ecologie du paysage : concepts, méthodes et applications. Editions TEC & DOC. 360 p.
- Butry, D.T., Pye, J.M., Prestemon, J.P. (2002). Prescribed fire in the interface : separating the people from trees. In: Kenneth, O. W. (Eds), Proceedings of the eleventh biennial southern silvicultural research conference. Gen.Tech.Rep. SRS-48.Ashville, NC: Department of Agriculture, Forest service, Southern research station, pp.622.
- Caballero, D., Beltran, I. (2003). Concepts and ideas of assessing settlement fire vulnerability in the W-UI zone. In Proceedings (Eds Xanthopoulos, G.) of the international workshop WARM, Forest fires in the wildland-urban interface and rural areas in Europe: an integral planning and management challenge. Athens, Greece. pp 47-54.
- Caballero, D., Giroud, F., Picard, C., Xanthopoulos, G. (2004). EUFIRELAB/ Euro-Mediterranean Wildland Fire Laboratory, a "wall-less" laboratory for wildland fire Sciences and technologies in the Euro-Mediterranean Region - Deliverable D-10-01- Wildland-Urban Interface Management: A state of the art. <http://www.eufirelab.org/deliverable.php?unit=10>. 28p.
- Caballero, D. (2004). WARM. Conclusions of the III Workshop on forest fires in the wildland-urban interface and rural areas in Europe. Fires of 2003: lessons learnt and how can we use them. Madrid, Spain, 26-27th of May. 4p.
- Camia, A., Guglielmet, E., Bovio, G. Deshayes, M., Lampin, C., Salas, J., Martinez, J., Molina, D., Carrega, P., Fox, D., Berolo, W., Sabate, S., Vayreda, J., Martin, P., Martinez, J., Conese, C., Bonova, L., Karteris, M., Mallinis, G., Sergiopoulos, I., Gitas, I. (2004). Eufirelab: Euro-Mediterranean Wildland Fire Laboratory, a "wall-less" laboratory for wildland fire Sciences and technologies in the Euro-Mediterranean Region Deliverable D 08-02: Wildland fire danger and hazards: a state of the art. 57 pages.
- Camia, A., Valera, V., Marzano, R., Etchifidis, G. (2003). Spatial analysis in European Wildland-urban interface environment using GIS. In Proceedings (Eds Xanthopoulos, G.) of the international workshop WARM, Forest fires in the wildland-urban interface and rural areas in Europe: an integral planning and management challenge. Athens, Greece. p185-196.
- Camia, A., Bovio, G., Aguado, I., Stach, N. (1999). Meteorological Danger indices and remote sensing. Remote sensing of large wildfires in the European Mediterranean Basin (E.Chuvieco, Ed). Springer-Verlag, Berlin. 39-59.
- Cardille, J.A., Ventura, S.J. (2001). Occurrence of wildfire in the northern Great Lakes Region: effects of land cover and land ownership assessed at multiples scales. *International Journal of Wildland Fire*. 10, 145-154.

- Cardille, J.A., Ventura, S.J., Turner, M.G. (2001). Environmental and social factors influencing wildfires in the Upper Midwest, United states. *Ecological applications*. 11, 111-127.
- Carnat, J.L., Clément, V., Dumont, G.F., Tabarly, S. (2005). Glossaire Geoconfluence. La Méditerranée, une géographie paradoxale. <http://geoconfluences.ens-lsh.fr/doc/etpays/Medit/MeditVoc.htm>. Mise à jour partielle : 30-11-2005.
- Carrega, P. (2003). Les risques naturels liés à la pluie et à la sécheresse : élaboration des cartes des pluies extrêmes et des risques d'incendie de forêt dans une région méditerranéenne la Toscane. Riscuri si catastrofe. T.II (V.Sorocovschi), Universitatea Babes-Bolyai, Cluj-Napoca, Roumanie, pp 271-286.
- Carrega, P. (2005). Le risque d'incendie en forêt méditerranéenne semi-urbanisée : le feu de Cagnes-sur-Mer (31 août 2003). *L'espace géographique*. 2005-4, pp 305-314.
- Carroue, L., Claval, P., Di Meo, G., Miossec, A., Renard, J.P., Simon, L., Veyret, Y. (2002). Limites et discontinuité en géographie. Dossiers des images économiques du monde. Edition SEDES, 159p.
- CETE Lyon, CERTU. (2005). Les bases de données géographiques d'occupation du sol : Volet tâche urbaine. Descriptif et comparatif de 6 bases de données. <http://www.certu.fr>.
- Chen, K., Blond, R., Jacobson, C. (2003). Towards an integrated Approach to natural Hazards risk assessment using GIS: with reference to bushfires. *Environmental Management*. 31, 4, 546-560.
- Chuvieco, E., Allgöwer, B., Salas, F.J. (2003). Integration of physical and human factors in fire danger assessment. In: Chuvieco, E. (Ed), Wildland fire danger estimation and mapping. The role of remote sensing data. World scientific Publishing, Singapore, pp.197-218.
- Chuvieco, E. (1999). Ed.1999. Remote sensing of Large wildfires in the European Mediterranean Basin. Berlin. Springer-Verlag,, 212p.
- Chuvieco, E., Salas, F.J., Vega, C. (1997). A review of Remote sensing methods for the study of large fires-ENV-CT96-0256- Remote sensing and GIS for longterm fire risk mapping. In 'A review of remote sensing methods for the study of large wildland fires'. (Ed. E Chuvieco) pp. 91-108. Megafires Project ENV-CT96-0256. Alcalá de Henares, Spain.
- Clément, V. (2005). Les feux de forêt en Méditerranée : un faux procès contre Nature. *L'Espace Géographique* 2005 – 4 (Tome 34), p 289-304.
- Coburn, A.W., Spence, R.J.S., Pomonis, A. (1994). Vulnerability and risk assessment. Disaster management training Program. UNDP/DHA. 70p.
- Cohen, J. D. (2003). Preventing residential fire disasters during wildfires. In Proceedings (Eds Xanthopoulos, G.) of the international workshop WARM, Forest fires in the wildland-urban interface and rural areas in Europe: an integral planning and management challenge, Athens, Greece. p5-12.
- Cohen, J. D. (2002). Wildland-urban fire - A different approach. In: Proceedings of the Firefighter Safety Summit, International Association of Wildland Fire Missoula, MT, November 6-8 (2001).
- Cohen, J. D. (2001). Examination of the home destruction in Los Alamos associated with the Cerro grande Fire Examination of the home destruction in Los Alamos associated with the Cerro Grande Fire, July 10, 2000. Unpublished report. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fire Sciences Laboratory, Missoula, MT.
- Cohen, J.D. (2000). Preventing disaster : Home ignitability in the wildland-urban interface. *Journal of Forestry*. 98 (3). 15-21.
- Cohen, J. D. (1999). Reducing the Wildland Fire Threat to Homes: Where and How Much? Fire Economics Symposium, San Diego, California.From USDA Forest Service Report PSW-GTR-173.
- Cohen, J.D., Butler, B.W. (1998). Modeling potential structure ignitions from flame radiation exposure with implications for wildland-urban interface fire management. Thirteen Fire and forest meteorology Conference, Lorne, Australia 1996- International association of wildland fire.
- Cohen, J. D., Saveland, J. (1997). Structure ignition assessment can help reduce fire damages in the W-UI. *Fire Management Notes*. 57(4): 19-23.
- Colin, P.Y. (2006). Evaluation numérique et expérimentale des effets de la structure de la végétation sur l'écoulement de la couche de surface atmosphérique. Thèse de doctorat en mécanique des fluides. Université de la Méditerranée, Aix-Marseille II. 264 p.

- Colin, P.Y., Lampin, C., Delboulbe, E., Coste, N., Marcillat, J., Pereira, J.C., Bingelli, F., Gaulier, A., Bothelho, H., Loureiro, C., Loddo, G., Ditana, E., Guijarro, M., Hernando, C., Diez, C., Martinez, E., Madrigal, J., Vega, J.A., Gorostiaga, P., Alexandrian, D., Dimitrakopoulos, A. (2002). SALTUS program-Spot fires. Knowledge and modelling. Proceedings of the IV International Conference on Forest Fire Research - 18 novembre au 22 novembre 2002, Luso (Portugal).
- Colin, P.Y., Jappiot, M., Mariel, A., Lampin, C., Veillon, S., Brochiero, F. (2002). Protection des forêts contre l'incendie. Fiches techniques pour les pays du bassin méditerranéen. Cahier FAO Conservation 36. 149 p.
- Collectif Saltus. (2001). SALTUS – Spot fires :mechanisms analysis and modeling. Thematic final report, WP220- Experimentation. ENV98-CT98-0701.1998-2001.54 p.
- Collins, T. W. (2005). Households, forests, and fire hazard vulnerability in the American West: a study case of a California community. *Environmental Hazards*. 6, 23-37.
- Conard, S.G., Hartzell, T., Hilbruner M.W., Zimmerman, G.T. (2001). Changing fuel management strategies – The challenge of meeting new information and analysis needs. *International Journal of Wildland Fire*, 10, pp 267-275.
- Cutter, S.L., Boruff, B.J., Shirley, W.L. (1996). Social vulnerability to Environmental Hazards. *Social science quartely*. Vol 82, 2, pp 242-261.
- Davis, J. B. (1990). The wildland-urban interface : paradise or battleground ?. *Journal of forestry*. 6, 88 (1), 26-31.
- Davis, F.W., Burrows, D.A. (1994). Spatial simulation of fire regime in Mediterranean-climate landscape. In the series analytic: The role of fire in Mediterranean-type ecosystems. Edited by Moreno, J.M and Oechel, W.C.
- D'Ercole, R. (1998). Approches de la vulnérabilité et perspectives pour une meilleure logique de réduction du risque. *Pangea*. 29/39, p 20-28.
- D'Ercole, R. (1996). Représentation cartographiques des facteurs de vulnérabilité des populations exposées à une menace volcanique. Application à la région du volcan Cotopaxi (Equateur). Bulletin de l'IFEA, tome 25, 3, p 479-507.
- Deshayes, M., Chuvieco, E., Cocero, D., Karteris, M., Koutsias, N., Stach, N. (1998). Evaluation of different NOAA-AVHRR derived indices for fuel moisture content estimation: interest for short term fire risk assessment. Proceedings of III International Conference of Forest Research , 16/20 nov 1998. Vol1, Luso, Portugal, pp 1149-1167.
- Detry-Fouque, P. (2007). La rurbanisation, facteur aggravant du risqué feux de forêts dans les espaces naturels méditerranéens. Mémoire de master 2005-2006. urbanisme, projet territorial et développement durable. Institut d'aménagement régional. Université Paul Cezanne Aix-Marseille III.141 p.
- Diaz-Avalos, C., Peterson, D.L., Alvarado, E., Ferguson, S.A., Besag, J.E. (2001). Space-time modelling of lightning-caused ignitions in the Blues Montains, Oregon. *Canadian Journal of Forest Research*. 31, 1579-1593, doi:10.1139/CJFR631-9-1579.
- Dickson, B.G., Prather, J.W., Xu, Y.G., Hampton, H.M., Aumack, E.N., Sisk, T.D. (2006). Mapping the probability of large fire occurrence in northern Arizona, USA. *Landscape Ecology*, Vol 21, issue 5, 747-761.
- Dimitrakopoulos, A.P., Papaioannou, K.K. (2001). Flammability assessment of Mediterranean forest fuel. *Fire Technology*. 37, 143-152.
- Duché, Y., Raymond, B. ONF. (2007). Incendies de forêt : évaluation de la protection apportée par le débroussaillage autour des habitations. [http :/www.ofme.org/documents/](http://www.ofme.org/documents/) Synthèse : 1 Castelli, L. (2003). Résultats de l'analyse du feu de Coti-Chiavari. DDAF 2A-Rapport de stage INRA. 2 DDAF2A-MTDA. (2004). Etude de retour d'expérience sur les opérations d'incitation au débroussaillage légal menées par la DDAF 2A de 1997 à 2002. 3 Préfecture 04 - Agence ONF 04. Incendie du 7 août 2005 : éléments d'évaluation de la protection apportée par le débroussaillage et de l'efficacité des actions de sensibilisation dans ce domaine. 4 Office de l'environnement de la Corse. (2007). Opérations de sensibilisation au débroussaillage légal. Compte-rendu d'activités 2006.
- Dumas, E., Jappiot, M., Tatoni, T. (2008). Mediterranean urban-forest interface classification (MUFIC): A quantitative method combining SPOT5 imagery and landscape ecology indices. *Landscape and Urban Planning*. 84, 183–190.

- Duncan, B.W., Schmalzer, P.A. (2004). Anthropogenic influences on potential fire spread in a pyrogenic ecosystem of Florida, USA. *Landscape ecology*. 19, 2, 153-165.
- Dupuy, J.L. (1997). Mieux comprendre et prédire la propagation des feux de forêts : expérimentation, test et proposition de modèles. PIF1997-03; Thèse, Université Claude Bernard - Lyon I; 272p.
- Edwards, A., Regnault, N. (2000). Preserving the pattern of density in urban network simplification. Proceedings of the first International Conference on Geographic Information Science, Savannah, USA.
- Espace géographique (L'). (1997). t. 26, no 4, p. 297-353 et Espace géographique (L') . (1998). t. 27, no 1, p. 53-75 (sur les discontinuités en géographie).
- FAO (2009). Le problème brûlant des incendies. <http://www.fao.org/news/story/fr/item/29097/icode/> consulté le 7 août 2009.
- FAO. (2005). Former contre les feux de forêt - Malcolm Hadley Les incendies de forêt: causes et conséquences, prévention et remise en état - Note d'information sur les activités récentes, en cours et prévues dans le cadre des programmes de l'UNESCO. Archives FAO disponible sur <http://www.fao.org/docrep/003/x2095f/x2095f0n.htm>, consulté le 18 mars 2009
- Ferrier, J.P. (1998). « Pour une lecture post-urbaine de la France méridionale » dans Petites et grandes villes du bassin méditerranéen - Etude autour d'Etienne Dalmaso, collection de l'école française de Rome.
- Ferrier, J.P. (1984). Antée 1. La géographie, ça sert d'abord à parler du territoire, ou le métiers des géographes. La Calade (Bouches du Rhône) : Editions Edisud, 248 p.
- Flannigan, M.D., Krawchuk, M. A., DeGroot, W.J., Wotton, B.M., Gowman, L.M. (2009). Implications of changing climate for global wildland fire. *International Journal of Wildland Fire*. 18, 483-507.
- Follin, J.M. (2000). Approche méthodologique de caractérisation des interfaces "espaces naturels/espaces anthropiques" impliqués dans le risque d'incendie en milieu méditerranéen. Mémoire de DEA. Structures et dynamiques spatiales, Université de Provence. 49 p + annexes.
- Fried, J. S., Winter, G.J., Gilliss, J.K. (1999). Assessing the benefits of reducing fire risk in the wildland-urban interface: a contingent valuation approach. *International Journal of Wildland Fire*. 9 (1), 9-20.
- Galiana, L., Herrero, G., Solana, J. (2007). Caracterización y clasificación de Interfaces Urbano-Forestales mediante análisis paisajístico. El ejemplo de Sierra Calderona (Comunidad Valenciana, España). IV International Wildland Fire Conference, Seville (Spain), 13-18 May de 2007. *Book of abstracts*. Organismo Autónomo de Parques Nacionales, Ministerio de Medio Ambiente. p. 285. ISBN: 978-84-8014-, 691-3.
- Ganteaume, A., Lampin-Maillet, C., Long, M., Jappiot, M., Borgniet, L., Mantzavelas, A., Apostolopoulou, I., Partozis, T. (2008). Deliverable 5.1-2 Method to produce vegetation and fuel maps using satellite imagery. Fire paradox program Project no. FP6-018505. D.5.1.2
- Gibelin, A.L., Deque, M. (2003). Anthropogenic climate change over the mediterranean region simulated by a global variable resolution model. *Climate dynamics*. 20, 327-339.
- Genton, M.G., Butry, D.T., Gumpertz, M. L., Prestemon, J.P. (2006). Spatio-temporal analysis of wildfire ignitions in the St Johns River Water Management District, Florida. *International Journal of Wildland Fire*. 15, 87-97.
- Gonzalez-Abraham, C.E., Radeloff, V.C., Hammer, R.B. (2007). Building patterns and landscape fragmentation in northern Wisconsin, USA. *Landscape Ecology*. 22, pp 217-230
- Groupe de recherches « interfaces ». (2008). Chapelon, L., Allard, P., Christofle, S., Ensellem, K., Ferrier, J.P., Fusco, G., Gay, J.C., Kaddouri, L., Lampin-Maillet, C., Lavaud-Letilleul, V., Perez, S., Rozenblat, C. L'interface : contribution à l'analyse de l'espace géographique. *L'Espace Géographique*, 2008/03, Tome 37, 193-207.
- Guyette, R.P., Spetich, M.A. (2003). Fire history of oak-pine forests in the Lower Boston Mountains, Arkansas, USA. *Forest Ecology and Management*. Vol 180, 1-3, pp 463-474.
- Haight, R. G., Cleland, D.T., Hammer, R.B., Radeloff, V.C., Rupp, S.S. (2004). Assessing Fire Risk in the Wildland-Urban Interface. *Journal of Forestry*.
- Hammer, R.B., Stewart, S.I., Winkler, R.L., Radeloff, V.C., Voss, P.R. (2004). Characterizing dynamic spatial and temporal residential density patterns from 1940-1990 across the North Central United States. *Landscape and Urban Planning*, 69, pp 183-199.

- Hardy, C.C. (2005). Wildland fire hazard and risk: Problems, definitions, and context. *Forest ecology and management*. 211, 73-82.
- He, H.S., DeZonia, B.E., Mladenoff, D.J. (2000). An aggregation index (AI) to quantify spatial patterns of landscapes. *Landscape Ecology*. 15: 591-601.
- Hesseln, H. (2000). The economics of prescribed burning: a research review. *Forest Science*. 46 (3), 322-334.
- Hetier, J.P. (1993). Forêt méditerranéenne : vivre avec le feu ? Eléments pour une gestion patrimoniale des écosystèmes forestiers littoraux. Les cahiers du conservatoire du littoral, n°2, 147 p.
- IFEN. (2005). L'utilisation de Corine Land cover 2000. Institut français de l'Environnement. 15 p.
- IGN. (2004). BD CARTO® Descriptif du contenu. Edition 7. 2004 – 10p.
- IGN. (1999). BD TOPO® Gestion B V2.4: Descriptif de livraison au format shapefile2D avec z en attribut. Edition 1.0. Octobre 1999. P29.
- IGN. (1998). BD ALTI® Descriptif technique BD ALTI®. Edition 2. Janvier 1998 – 21p
- Corine Land Cover 2000 (2001) Nomenclatura del CORINE Land Cover al nivel 5° (CLC2000 y CLC90). Área de Teledetección. Subdirección General de Geomática y Teledetección.
- Iversen, K., VanDemark, R. (2006). Integrating fuel reduction management with local bioenergy operations and businesses—A community responsibility. *Biomass and energy*. 30, 304-307.
- Jacq, V. (2008). Les modèles de prévision météorologique en région méditerranéenne. Forêt méditerranéennes. Tome XXIX n°2 juin 2008. p 107.
- Jappiot, M., Gonzales-Olabarria, J.R., Lampin-Maillet, C., Borgniet, L. (2009). Assessing wildfire risk in time and space. In *Living with wildfires: What science can tell us? A contribution to the science-policy dialogue*. (Biot, Y. Eds- European Forest Institute). pp 41-47.
- Jappiot, M., Sauer, S., Alibert, N., Philibert-Caillat, C. (2002). Wildland / urban interfaces and fire risk. An automatic mapping IV International conference on Forest Fire Research 2002 Wildland Fire Safety summit, Luso, Portugal.
- Jappiot, M., Blanchi, R., Alexandrian, D. (2000). Cartographie du risque d'incendie de forêt. Recherche méthodologique pour la mise en adéquation des besoins, des méthodes et des données. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche et Ministère de l'Environnement. Rapport final. 52 p.
- Johnson, M. P. (2001). Environmental impacts of urban sprawl: a survey of the literature and proposed research agenda. *Environment and Planning A* 33:717–735.
- Joliclercq, F. (2003). OFME-EGA - Diaporama : Quelle politique de prévention et d'aménagement du territoire régional ? Débroussaillage obligatoire et autoprotection des habitations. Retours d'expérience après incendie. Etude réalisée par Joliclercq (EGA) et la participation d'Espaces Méditerranéens. <http://www.ofme.org/affdoc.php3?ID=95&Page=1>.
- Journet, S. (2008). Caractérisation et cartographie du combustible dans les interfaces habitat-forêt. Mémoire de Master 2: Evaluation et Gestion de l'environnement et des paysages de montagne. Encadrement : Lampin-Maillet, C et Rovera, G. Septembre 2008. 119 pages.
- JRC. (2006). Statistics 1980-2006, data source JRC-IES Report n°7/2006.
- Kalabokidis, K., Karavitis, C., Vasilakos, C. (2003). Automated fire and flood danger assessment system. In *Proceedings (Eds Xanthopoulos, G.) of the international workshop WARM, Forest fires in the wildland-urban interface and rural areas in Europe: an integral planning and management challenge*, Athens, Greece. p143-154.
- Kalabokidis, K.D, Omi, N.P. (1998). Reduction of fire hazard through thinning/residue disposal in the urban interface. *International Journal of Wildland Fire*. 8 (1): 29-35.
- Kalhor, A., Weber, C. (2005). Sectorisation de la qualité de l'air. Colloque international de géomatique SAGEO. Avignon, 21/22/23 juin 2005.
- Kamp, M., Sampson, N. (2002). Using GIS to identify potential wildland-urban interface areas based on population density. www.sampsongroup.com/Papers/wui_paper.pdf. 9 p.
- Kaval, P. (2009). Perceived and actual wildfire danger : an economic and spatial analysis study in Colorado (USA). *Journal of Environment Management*. 90 (2009) 1862-1867.
- Keane, R. E., Burgan, R., Van Wagendonk, J. (2001). Mapping wildland fuels for fire management across multiple scales: integrating remote sensing, GIS, and biophysical modelling. *International Journal of Wildland Fire*. 10, 4, 301-319.
- Keeley, J.E. (2005). Fire history of the San Francisco East Bay region and implications for landscape patterns. *International Journal of Wildland Fire*. 14, 285-296.

- Keller, J.A. (2005). A new look at wildland-urban interface hazard reduction. *Fire Management Today*. 65 (3): 8-10.
- Lampin-Maillet, C., Long, M., Jappiot, M. (2008). Une méthode pour caractériser et cartographier les interfaces habitat-forêt, un enjeu pour la prévention des incendies de forêt. *Revue Forestière Française*. Mai-juin 2008. n°3 /2008, 363-380.
- Lampin-Maillet, C., (2008). 2007, Summer Fires in the European Mediterranean – The Cases of Greece, Italy and Spain. *Mediterranean yearbook. European Institute of the Mediterranean. Med.2008, Economy and Territory- Sustainable Development, 243-247.* <http://www.iemed.org/anuari/2008/aarticles/EN243.pdf>.
- Lampin, C., Long, M., Jappiot, M., Morge, D. (2007a). Dwellings characterization and mapping for forest fire risk prevention. UDMS annual 2007. Proceedings of the urban data management society symposium 2007. Stuttgart, Germany, 10-12 october 2007. pp 427-440.
- Lampin-Maillet, C., Long, M., Jappiot, M., Morge, D., Bouillon, C. (2007b). Aide méthodologique à la caractérisation et la cartographie des interfaces habitat-forêt, dans le contexte de prévention aux incendies de forêt. Rapport MEEDDAT, 40p.
- Lampin, C., Jappiot, M., Long, M., Borgniet, L. (2006a). Cartographie des interfaces habitat-forêt. Une approche spatiale pour estimer le risque d'incendie de forêt, *Revue internationale de Géomatique*. European journal of GIS and Spatial analysis. Information géographique et gestion des risques, vol16, n°3-4 : 2006, 320-340.
- Lampin, C., Jappiot, M., Long, M., Mansuy, N., Borgniet, L. (2006b). WUI and road networks/vegetation interfaces characterizing and mapping for forest fire risk assessment. *Forest Ecology and Management*. 234S, pp. S137-S140.
- Lampin, C., Jappiot, M., Morge, D., Vennetier, M. (2006c). Statistical and spatial analysis of forest fire ignition points: a study case in South of France. *Forest Ecology and Management*. Volume 234, Supplement 1 pp. S12.
- Lampin, C., Jappiot, M., Borgniet, L., Long, M., Dumas, E. (2005). SIG -Analyse spatiale- Outils de caractérisation et cartographie des interfaces habitat-forêt. International remote sensing and Spatial analysis Conference, Avignon, France.
- Lampin, C. (2004a). Caractérisation par télédétection des zones de contact entre habitat et espaces naturels concernés par le risque incendie. Incidence de la résolution et de la taille des images. Mémoire de DEA Structures et dynamiques spatiales. 66 p.
- Lampin, C., Chandiooux, O., Paulet, V., Jappiot, M. (2004b). Typologie de la végétation combustible dans les interfaces agriculture forêt urbain. Conseil régional, Rapport final. 116 p
- Lampin, C., Jappiot, M., Alibert, N., Manlay, R., Guillaude, R. (2002a). Prototype of an Intensity Scale for the Natural Hazards: Forest Fire. Proceedings of the IV International Conference on Forest Fire Research - 18 novembre au 22 novembre 2002, Luso (Portugal).
- Lampin, C., Jappiot, M., Alibert, N., Manlay, R., Guillaude, R. (2002b). Prototype d'une échelle d'intensité pour le phénomène Incendie de forêts. *Ingénieries - E A T*, n° 31, 2002, p. 49-56.
- Lapucci, A., Lombardo, S., Petri, M., Santucci, A. (2005). A KDD based multicriteria decision making model for fire risk evaluation. Proceedings de la 8^{ème} conférence AGILE Conference on GIScience 26-28 Mai 2005 Estoril, Portugal.
- Le Corre, S., Guillaume, R., Galaup, M., Boissezon, H. (2000). Intérêts et limites de l'utilisation des images satellites en vue de la constitution d'un SIG pour la région urbaine d'Istanbul. Acte de colloque « Représenter Istanbul hier et aujourd'hui », 19 et 20 mai 2000, Istanbul.
- Lee, A., Slak, M.F. (2007). Les paysages français changent entre 1992 et 2002: artificialisation et fermeture des paysages aux dépens du mitage ou de la déprise des zones agricoles. *Agreste cahiers*. 22 p. <http://agreste.agriculture.gouv.fr>.
- Léon, O. (2008). Les projections régionales de population 2005-2030-Economie et statistiques n°408
- Léon, O., Godefroy, P. (2006). Projections régionales de population à l'horizon 2030. INSEE Première. N° 1111. Décembre 2006.
- Leonard, J.E., Bianchi, R., Leicester, R.H. (2004). On the development of a risk-model for bushfire attack on housing. Bushfire CRC- Risk conference 2004- Melbourne, Australia.
- Lévy, J., Lussault, M. (2003). Dictionnaire de la géographie et de l'espace des sociétés. Paris : Belin, 1033p.

- Liégeois, M., Arnould, P., Wicherek, S. (2005). Tous vulnérables ? Le diagnostic de vulnérabilité aux aléas de l'érosion : un outil pour l'action collective. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, Volume 6 Numéro 3 | décembre 2005, [En ligne], mis en ligne le 01 décembre 2005. URL : <http://vertigo.revues.org/index3628.html>.
- Lloret, F., Siscart, D., Dalmases, C. (2004). Canopy recovery after drought dieback in holm-oak Mediterranean forests of Catalonia (NE Spain). *Global Change Biology*. 10 (12), 2092-2099.
- Long, M., Ripert, C., Piana, C., Jappiot, M., Lampin, C., Ganteaume, A. (2008). Guide technique - Amélioration de la connaissance des causes de départ de feu de forêt. 116 p.
- Long, M., Lampin, C., Jappiot, M., Morge, D., Bouillon, C. (2007a). Automated feature extraction on Quickbird imagery required to map wildland urban interfaces (WUI) in the French Mediterranean region. 6th EARSeL Workshop on Forest Fires Greece from 27 - 29 September 2007.
- Long, M., Lampin, C., Jappiot, M., Morge, D., Bouillon, C. (2007b). Feature extraction on very high satellite images to map vegetation types required in forest fire risk to characterize wildland urban interfaces. Colloque Forestsat Montpellier 5-7 Novembre 2007.
- Long, M. (2004). Caractérisation des interfaces habitat-forêt grâce aux outils de télédétection et à l'écologie du paysage. Mémoire de DESS de télédétection Méthodes- Applications- Environnement. 35 p.
- Maillé, E. (2008). Intégration conceptuelle et opérationnelle de modèles spatio-dynamiques, Application à la dynamique du risqué d'incendie de forêt. Thèse de doctorat, Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes, UMR CNRS 6168, Université Paul Cézanne Aix-Marseille III, F., Cemagref, UR Ecosystèmes Méditerranéens et Risques, Aix-en-Provence, F.
- Maingi, J.K., Henry, M.C. (2007). Factors influencing wildfire occurrence and distribution in eastern Kentucky, USA. *International Journal of Wildland Fire*. 16, 23-33.
- Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International Journal of Wildland Fire*. 20, 7, 703-726.
- Malczewski, J. (1999). GIS and multicriteria decision analysis (New York: Wiley).
- Manche, Y. (2000). Analyse spatiale et mise en place de systèmes d'information pour l'évaluation de la vulnérabilité des territoires de montagne face aux risques naturels. Thèse de doctorat Université Joseph Fournier-Grenoble I. 152 p.
- Mantzavelas, A., Apostolopoulou, I., Lazaridou, T., Partozis, T., Lampin-Maillet, C., Borgniet, L., Jappiot, M., Brewer, S. (2008). Method to assess with good spatial accuracy the meteorological and fuel moisture components of the fire risk. Fire paradox program Project no. FP6-018505. Deliverable D.5.1.1.59 p.
- Mârell, A., Abdelmoula, K., Allgöwer, B., Borgniet, L., Cassagne, N., Curt, T., Ganteaume, A., Ghosn, D., Gitas, I., Jappiot, M., Jimenez, E., Kazakis, G., Koetz, B., Lampin, C., Machrouh, A., Morsdorf, F., Pimont, F., Rigolot, E., Sesbou, A., Vega, J.-A. and Wellani, W. (2008). Fuel description: first results. Deliverable D.3.4-3 of the Integrated project "Fire Paradox", Project no. FP6-018505, European Commission, 80 p.
- Mariel, A., Jappiot, M. (1997). Evaluation et cartographie du risque d'incendie de forêt dans le massif des Maures. Rapport final 66 p.
- Marin, J.M. (2006). Initiation au logiciel R. Université Paris Dauphine. U.F.R. Mathématiques de la Décision- MAT-6-3 : Statistique exploratoire et numérique (NOISE). 15p. Consulté sur le site internet <http://www.ceremade.dauphine.fr/>.
- Martinez, J., Vega-Garcia, C., Chuvieco, E. (2009). Human-caused wildfire risk rating for prevention planning in Spain. *Journal of Environmental Management*. 1-12- doi:10.1016/j.jenvman.2008.07.005.
- Martinez, E., Leonart, S. (2002). Prescribed fire to improve interface protection in front of wildfires. Forest fire research and Wildland fire safety, Coimbra, Luso Portugal.
- Marlon J.R., Bartlein P.J., Walsh M.K., Harrison S.P., Brown K.J., Edwards M.E., Higuera P.E., Power M.J., Anderson R.S., Briles C., Brunelle A., Carcaillet C., Daniels M., Hu F.S., Lavoie M., Long C., Minckley T., Richard P.J.H., Scott A.C., Shafer D.S., Timmer W., Umbanhowar C.E.Jr., Whitlock, C. (2009) Wildfire responses to abrupt climate change in North America. Proceedings of the National Academy of Sciences, 3 février 2009.

- Marzano, R., Bovio, G., Guglielmet, E., Camia, A., Deshayes, M., Lampin, C., Salas, J., Martinez, J., Molina, D., Geronimo, N., Carrega, P., Fox, D., Sabate, S., Vayreda, J., Martin, P., Martinez, J., Vilar, L., Conese, C., Bonora, L., Tsakalidis, S., Gitas, I., Karteris, M. (2006). D08-07 – Wildland Fire Danger and hazards: a state of the art. EVR1-CT-2002-40028-2006.64p.<http://www.eufirelab.org/>.
- Matheron, G., Serra, J. (1964). The birth of mathematical morphology. Proc. 6th Intl. Symp. Mathematical Morphology. Csiro Publishing.
- Mattenberger, Y. (2006). Evaluation de la qualité de sites pour l'habitat à travers la création de profils de territoire Rapport de master Sciences et ingénierie de l'environnement, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. 87 p.
- Mayer, A.L., Cameron, G.N. (2003). Consideration of grain and extent in landscape studies of terrestrial vertebrate ecology. *Landscape Urban Planning*. 65, pp 201-217.
- McGarigal, K. (2002). Landscape Pattern Metrics. Chapitre du livre Encyclopedia of Environmentrics, Volume 2, John Wiley & sons, Sussex, England. Pp 1135-1142.
- McGarigal, K., Marks, B. (1994). Spatial patterns analysis program for quantifying landscape structure. FRAGSTATS version 2.0. Forest Science Dept, Oregon State Univ., Corvallis, OR, USA.
- McKee, M., Berrens, R.P., Jones, M., Helton, R., Talberth, J. (2004). Using experimental economics to examine wildfire insurance and averting decisions in the wildland urban interfaces. *Society and Natural Resources*. 17, 491-507.
- Mercer, D.E., Prestemon, J.P. (2005). Comparing production function models for wildfire risk analysis in the wildland-urban interface. *Forest policy and economics*. 7, 782-795.
- Miller, S.R., Wade, D. (2003). Re-introducing fire at the wildland-urban interface: planning for success. *Forestry*. 76 (2), 253-259.
- MEDD. (2002). Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable. Les feux de forêt. Dossier. 20p.http://www.prim.net/professionnel/documentation/dossiers_info/nat/low/maqid_ff.pdf.
- Mouillot, F., Ratte, J.P., Joffre, R., Mouillot, D., Rambal, S. (2005). Long term forest dynamic after land abandonment in a fire prone Mediterranean landscape (Corsica). *Landscape Ecol.*, 20, 101-112.
- Mouillot, F., Rambal, S., Joffre, R. (2002). Simulating climate change impacts on fire frequency and vegetation dynamics in a Mediterranean-type ecosystem. *Global Change Biol.*, 8: 423-437.
- Morehouse, B., Christopherson, G., Crimmins, M., Orr, B., Overpeck, J., Swetnam, T., Yool, S. (2006). Modeling interactions among wildland fire, climate and society in the context of climatic variability and change in the Southwest US. In Regional Climate change and variability. pp 59-78.
- Morgan, P., Hardy, C.C., Swetnam, T.W., Rollins, M.G., Long, D.G. (2001). Mapping fire regimes across time and space: understanding coarse and fine-scale fire patterns. *International Journal of Wildland Fire*. 10, 329-342.
- Narbaïs-Jaureguy, D. (2008). Contribution à l'élaboration d'une méthodologie de comparaison de cartes d'aléa feux de forêt Mémoire de MASTER 2 GERINAT. Juillet 2008. 51 p.
- Nowicki, B. (2002). The Community protection Zone: Defending houses and Communities from the threat of forest fire. Center for Biological Diversity. <http://www.sw-center.org/swcbd/Programs/fire/wuil.pdf>. 4/15/03.
- OCR-INCENDI (2008). Guide interfaces forêt – habitat 2005 – 2008. Guide réalisé dans le cadre des thématiques : autoprotection, cartographie, coupures et plans locaux. 71p.
- Pascual, C., Garcia-Montero, L.G., Manzanera, J.A., Arroyo-Mendez, L.A., Beltran, I., Caballero, D. (2003). Preliminary description of urban settlement typologies related to forest fire risk (WARM project). In Proceedings (Eds Xanthopoulos, G.) of the international workshop WARM, Forest fires in the wildland-urban interface and rural areas in Europe: an integral planning and management challenge. Athens, Greece. pp 203-204.
- Patton, D.R. (1975). A diversity index for quantifying habitat "edge". *Wildlife Society bulletin*. 3: 171-173.
- Pausas, J.G., Keeley, J.E. (2009). A Burning Story: The role of fire in the history of life. *BioScience*. 59: 593-601.

- Pew, K.L., Larsen, C.P.S. (2001). GIS analysis of spatial and temporal patterns of human-caused wildfires in the temperate rain forest of Vancouver Island, Canada. *Forest ecology and management*. 140, 1, 1-18.
- Pimont, F., Dupuy, J.L., Caraglio, Y., Morvan, D. (2009). Effect of vegetation heterogeneity on radiative transfer in forest fires. *International Journal of Wildland Fire*. 18, 536–553.
- Preisler, H.K., Brillinger, D.R., Burgan, R.E., Benoit, J.W. (2004). Probability-based models for estimation of wildfire risk. *International Journal of Wildland Fire*. 13, 133-142, doi:10.1071/WF02061.
- Prestemon, J.P., Butry, D.T. (2005). Time to burn: Modeling wildland arson as an autoregressive crime function. *American Journal Agr.Econ.* 87(3), pp 756-770.
- Prestemon, J.P., Pye, J.M., Butry, D.T., Holmes, T.P., Mercer, D.E. (2002). Understanding broad scale wildfire risks in a human-dominated landscape. *Forest science*. 48, 685-693.
- Prosper-Laget, V., Douguédroit, A., Guinot, J.P. (1998). A satellite index of risk of forest fire occurrence in summer in the Mediterranean area. *International Journal of Wildland Fire*. 8(4) 173-182.
- Pumain, D. (2004). Analyse spatiale. <http://www.hypergeo.eu/spip.php>. Consulté en 03/2009.
- Pyne, S.J., Andrew, P.L., Laven, R.D. (1996). Introduction to Wildland fire. New York Wiley: 769p.
- Radeloff, V.C., Hammer R.B., Stewart, S.I., Fried, J.F., Holcomb, S.S., McKeefry, J.F. (2005a). The wildland urban interface in the United States. *Ecological applications*. 15 (3), 799-805.
- Radeloff, V.C., Hammer R.B., Stewart, S.I. (2005b). Rural and suburban sprawl in the U.S. Midwest from 1940 to 2000 and its relations to forest fragmentation. *Conserv. Biol.* 19 (3), 793-805.
- Rambal, S. (2008). Paysages méditerranéens et changements climatiques : quelques conjectures.. Colloque Agropolis. Montpellier, 12 décembre 2008.
- Randall, C.K. (2003). Fire in the wildland-urban interface: Understanding fire behaviour. University of Florida. Institute of Food and Agricultural Science. 6p.
- Rego, F., Alexandrian, D., Fernandes, P., Rigolot, E. (2007). FIRE PARADOX: An innovative Approach of Integrated Wildland Fire Management – A joint European initiative. IV International Wildland Fire conference. Seville, Espagne, 14-17 mai 2007.
- Rigolot, E. (2009). Perspectives : incendies et changement climatique. Forêt-Entreprise. N° 185 – Mars 2009. p p 47-48.
- Rigolot, E. (2008a). Impact du changement climatique sur les feux de forêt. Forêt méditerranéenne. Tome XXIX n°2, juin 2008. p 167.
- Rigolot, E. (2008b). Le feu... une arme contre l'incendie de forêt. <http://www.fireparadox.org/public/telechargements/rigolot.pdf>. La Provence p3.
- Rigolot, E., Castelli, L., Cohen, M., Costa, M., Duche, Y. (2003). Recommendations for fuel-break design and fuel management at the wildland urban interface: an empirical approach in South Eastern France. In Proceedings (Eds Xanthopoulos, G.) of the international workshop WARM, Forest fires in the wildland-urban interface and rural areas in Europe: an integral planning and management challenge. Athens, Greece. pp 131-142.
- Rigolot, E. (1997). Le Réseau National des Equipes de Brûlage Dirigé. 6p. <http://www.ofme.org/documents/ForetPrivee/fiches/312701.pdf>.
- Rinaudo, Y. (1994). La mort en direct : les forêts qui brûlent / La forêt malade. Dir A Corvol, Paris, L'Harmattan, 159-180.
- Robbez-Masson, J.M., Foltête, J.Ch., Cabello, L., Flitti, M. (1999). Prise en compte du contexte spatial dans l'instrumentation de la notion de paysage. Application à une segmentation géographique assistée. *Revue internationale de Géomatique*. Vol 9.2, 173-195.
- Robin, M. (2002). Télédétection. Des satellites aux SIG. Nathan université. 318p.
- Ruas, A. (1999). Modèle de généralisation de données géographiques à base de contraintes et d'autonomie. Thèse de doctorat. Université de Marne La Vallée <ftp://ftp.ign.fr/ign/generalisation/COMMUNICATIONS/THESES/RUAS>.
- San Miguel-Ayanz, J., Carlson, J.D., Alexander, M., Tolhurst, K., Morgan, G., Sneeuwjagt, R., Dudley, M. (2003). Current methods to assess fire danger potential. In: E. Chuvieco, Editor, Wildland Fire Danger Estimation and Mapping The Role of Remote Sensing Data. World Scientific Publishing, Singapore (2003), pp. 21–61

- Sanchez-Guisandez, M., Cui, W., Martell, D.L. (2003). FireSmart Strategies for wildland urban interface landscapes. In Proceedings (Eds Xanthopoulos, G.) of the international workshop WARM, Forest fires in the wildland-urban interface and rural areas in Europe: an integral planning and management challenge. Athens, Greece. pp 121-130.
- Sanders, L. (1989). L'analyse des données appliquée à la géographie. GIP RECLUS. 268 p.
- Saura, S. (2002). Forest cover mapping in Central Spain with IRS-WIFS images and multi-extent textual-contextual measures. *Remote sensing*. 23, 3, 603-608.
- Saura, S. (2004). Effects of remote sensor spatial resolution and data aggregation on selected fragmentation indices. *Landscape ecology*. 19, 197-209.
- Sauer, S. (2001). Caractérisation des interfaces habitat-forêt grâce aux outils de télédétection et à l'écologie du paysage. Diplôme d'ingénieur agronome, spécialisation Environnement, ENSA Nancy. 31 p+ annexes.
- Sebastián-López, A., San-Miguel-Ayán, J., Burgan, R.E. (2002). Integration of satellite sensor data, fuel type maps and meteorological observations for evaluation of forest fire risk at the pan-European scale. *International Journal of Remote Sensing*. 1366-5901, Volume 23, Issue 13, 2002, Pages 2713 – 2719.
- SilvisLab. (2006). The Wildland-urban Interface(WUI) defined. *Forest ecology and Management*. University of Wisconsin- Madison.
- Southern Forest Alliance. (2003). Southwest, F.F.i.t.A. Forest Fire in the American Southwest Analysis: The Wildland urban interface. Southern Center for Wildland-Urban Interface Research and Information. 2003. "Interface South." <http://www.interfacesouth.org/> 4/14/03. Website developed by the U.S. Forest Service "to heighten awareness of and provide information about WUI issues."
- Spot image. (2004). Occupation du sol Spot 5. Spécifications techniques détaillées de la base de données d'occupation du sol grande échelle réalisée à partir du traitement d'images Spot 5.
- Spyratos, V., Bourgeron, V., Ghil, M. (2007). Development at the wildland-urban interface and the mitigation of forest-fire risk *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 104: 14272-14276.
- Statgraphics®CenturionXV. (2006). Manuel de l'utilisateur par StatPoint, Inc. www.statgraphics.fr. 301 p.
- Stephens, S.L., Adams, M.A., Handmer, J., Kearns, F.R., Leicester, B., Leonard, J., Moritz, M.A. (2009). Urban-wildland fires: how California and other regions of the US can learn from Australia *Environ. Res. Lett.* 4 (January-March 2009). doi:10.1088/1748-9326/4/1/014010.
- Stewart, S.I., Radeloff, V.C., Hammer, R.B., Hawbaker, T.J. (2007). Defining the Wildland-Urban Interface. *Journal of Forestry*, 201- 207.
- Stewart, S.I., Radeloff, V.C., Hammer, R.B. (2003). Characteristics and location of the Wildland-Urban-Interface in the United States. p. 6. Proceedings of the 2nd International Wildland Fire Ecology and Fire Management Workshop, November 16-20, 2003, Orlando, Florida.
- Sturtevant, B.R., Cleland, D.T. (2007). Human and biophysical factors influencing modern fire disturbance in northern Wisconsin. *International Journal of Wildland Fire*. 16, 398-413.
- SUAMME. (2007). Guide méthodologique pour la gestion des coupures de combustible par le pastoralisme et l'agriculture. Piloté par Dimanche, M. 71p.
- Summerfelt, P. (2001). The Wildland-Urban interface. What's really At risk? <http://www.gffp.org/pine/risk/default.htm> 4/14/03.
- Syphard, A.D., Radeloff, V., Keuler, N.S., Taylor, R.S., Hawbaker, T.J., Stewart, S.I., Clayton, M.K. (2008). Predicting spatial patterns of fire on a southern California landscape. *International Journal of Wildfire*. 17, 602-613.
- Syphard, A.D., Clarke, K.C., Franklin, J. (2007a). Simulating fire frequency and urban growth in southern California coastal shrublands, USA. *Landscape Ecology*. 22, 431-445.
- Syphard, A.D., Radeloff, V., Keeley, J., Hawbaker, T.J., Clayton, M.K., Stewart, S.I., Hammer, R.G. (2007b). Human influence on California regimes. *Ecological applications*. 17 (5), 1388-1402.
- Tenenhaus, M. (1998). La régression PLS. Théorie et pratique. Editions Technip. 254 p.
- Theobald, D. M. (2001). Land-use dynamics beyond the American urban fringe. *Geogr. Rev.* 91 (3), pp 544-564.
- Theobald, D.M., Romme, W.H. (2007). Expansion of the US wildland-urban interface. *Landscape and Urban Planning*. 83, 340-354.

- Turner, M.G. (1990). Landscape changes in nine rural counties of Georgia. *Photogrammetry Engineering and Remote sensing*. 56, 379-386.
- Turner, M.G., Romme, W.H. (1994). Landscape dynamics in crown fire ecosystems. *Landscape Ecology*. 9:59-77.
- USDA-USDI. (2001). U.S.Department of Agriculture and U.S.Department of Interior. Urban wildland interface communities within vicinity of Federal lands that are at high risk from wildfire. Fed.Reg. 66. pp.751-777.
- Valette, J.C., Moro, C. (1990). Inflammabilités des espèces forestières méditerranéennes. *Revue Forestière Française*. pp76-92.
- Van Wilgen, B.W., Higgins, K.B., Bellstedt, D.U. (1990). The Role of Vegetation Structure and Fuel Chemistry in Excluding Fire From Forest Patches in the Fire-prone fynbos shrublands of south Africa. *Journal of Ecology*. Vol. 78, No. 1 (Mar., 1990), pp. 210-222.
- Vasconcelos, M.J.P., Silva, S., Tome, M., Alvim, M., Cardoso-Pereira, J.M. (2001). Spatial prediction of fire ignition probabilities: comparing logistic regression and neural networks. *Photogrammetric Engineering and Remote sensing*. Vol.67, N°1, January 2001, pp.73-81.
- Vasilakos, C., Kalabokidis, K., Hatzopoulos, J., Kallos, G., Matsinos, Y. (2007). Integrating new methods and tools in fire danger rating. *International Journal of Wildland Fire*. 16.306-316.
- Vasquez, A., Moreno, J.M. (1998). Patterns of lightning and people-caused fires in Peninsular Spain. *International Journal of Wildland Fire*. 8, 103-115.
- Veblen, T.T., Kitzberger, T., Donnegan, J. (2000). Climatic and human influences on wildfire regimes in ponderosa pine forests in the Colorado Front Range. *Ecological Applications*. 10 (4). 1178-1195.
- Vega-Garcia, C., Woodard, P.M., Titus, S.J., Adamowick, W.L., Lee, B.S. (1995). A logit model for predicting the daily occurrence of human caused forest fires. *International Journal of Wildland Fire*. 5, 101-111, doi:10.107/WF0050101.
- Vélez, R. (1997). Recent history of forest fires in Mediterranean area. In: Balabanis P, Eftichidis G, Fantechi R (eds) Forest fire risk and management. Proceedings of the European School of Climatology and Natural Hazards, Greece, 27 May-4 June 1992. European Commission, Brussels, 15-26.
- Vélez, R. (1992). Recent history of forest fires in the Mediterranean area. European School of Climatology and Natural Hazards course, Porto Carras, Halkidiki, Greece.
- Vennetier, M. (2007). Un nouveau modèle bioclimatique pour la forêt méditerranéenne. application à l'étude de l'impact du changement climatique sur la végétation et à l'évaluation de la productivité forestière. Thèse de doctorat, spécialité "Ecologie", Université Paul Cézanne (Aix-Marseille III), Cemagref Aix en Provence. 284 p.
- Vince, S.W., Duryea, M.L., Macie, E.A., Hermansen, L.A. (2005). Forests at the wildland-urban interface: conservation and management (Boca Raton, CRC Press).
- Voiron-Canicio, C. (1995a). Morphologie d'un semis de villes européennes. *Mappemonde* 4/95, p17-21.
- Voiron-Canicio, C. (1995b). Analyse spatiale et analyse d'images. GiP Reclus, coll Espaces Modes d'Emploi. 190 p.
- Wilson, K., Pressey, R.L., Newton, A., Burgman, M., Possingham, H., Weston, C. (2005). Measuring and incorporating vulnerability into conservation planning. *Environmental management*. 35, 5 527-543. DOI: 10.1007/s00267-004-0095-9.
- Winter, G., Fried, J.S. (2000). Homeowner perspectives on fire hazard, responsibility, and management strategies at the wildland-urban interface. *Society and Natural Resources*. 13 (1), 33-49.
- Yang, J., Healy, H.S., Shifley, S.R., Gustafson, E.J. (2007). Spatial patterns of modern period human-caused fire occurrence in the Missouri Ozark Highlands. *Forest Sciences*, 53:1-15.
- Yool, S.R., Eckhardt, D.W., Estes, J.E., Cosentino, M.J. (1985). Describing the brushfire hazard in southern California. *Annals of the association of American Geographers*. 75, 417-430.
- Zanin, C. (2004). La cartographie. <http://espacestemp.net/document584.html>. Consulté en mars 2009.
- Zhang, Y., Winberly, M.C. (2007). The importance of scale in using hierarchical Census data to identify the Wildland-Urban interface. *South. J. Appl. For.* 31(3), pp 138-147.

Autres références et sites consultés pour la thèse mais non cités dans le texte de la thèse

- Antrop, M. (2004) Landscape change and the urbanization process in Europe. *Landscape and urban planning*. 67, 9-26.
- Arnaud, J. L., Marion, S. (1994). "Feux de forêt et habitat." Forêt méditerranéenne. Tome XV, numéro 2. 171-173.
- Babbitt, B. (2000). Incendies de forêts catastrophes - Prévention et protection - Pour faire la paix avec les incendies de forêts. Conseil général du Génie Rural des Eaux et des Forêts. 45-58.
- Badia, A., Saurí, D., Cerdan, R., Llurdés, J.C. (2002) Causality and management of forest fires in Mediterranean environments: an example from Catalonia. *Environmental Hazards*. 4, 23-32.
- Beltran Jodar, I. M., Ruiz Cubas, E., Sanchez Cerrajero, R., Pascual Castano, C. (2003). A method to classify WUI situations in Europe: towards a common catalogue. In Proceedings (Eds Xanthopoulos, G.) of the international workshop WARM, Forest fires in the wildland-urban interface and rural areas in Europe: an integral planning and management challenge. Athens, Greece. pp55-66.
- Beringer, J. (2000). "Community fire safety at the urban/rural interface: the bushfire risk." *Fire Safety Journal*. 35, 1-23.
- Bertrand, N. et Marcelpoil, E. (1999). La périurbanisation ou l'émergence de nouveaux territoires. Ingénieries - E A T, n° 17, p.61-67, CEMAGREF DTGR, Grenoble.
- Brooks, J.J., Brenkert, H., Serby, J.E., Champ, J.G., Simons, T., Williams, D.R. (2006). "Integrating social science into forestry in the wildland-urban interface." *Fire Management today*. 66 (2), 35.
- Burel, F., Baudry, J. (2001). Écologie du paysage: concepts, méthodes et applications. Paris, Editions Tec & Doc-Lavoisier.
- Burrough, P.A., McDonnell, R.A. (1998). Principles of Geographic Information Systems. *Spatial Information Systems and Geostatistics*, Oxford University Press, UK.
- Carver, S.J. (1991). Integrating multi-criteria evaluation with geographical information systems. *International journal of Geographical Information systems*, 5 (3), 321-339.
- Chevrou, R. (2000). Incendies de forêts catastrophes - Prévention et protection - Prévention et lutte contre les grands incendies de forêts. Conseil général du génie rural des eaux et des forêts. 71-99. Protection des personnes et des biens contre l'arrivée d'un front de feu. 61-69.
- Cleaves, D. (2001). Fires in the wildland urban interface: Dilemme of duality and the role of the national science leadership. Natural disaster roundtable forum on urban and wildland fire, Washington DC, USA.
- Cohen, M., Valette, J.C. (2003). The ecosystems studies in the frame of Fire Star project. In Proceedings (Eds Xanthopoulos, G.) of the international workshop WARM, Forest fires in the wildland-urban interface and rural areas in Europe: an integral planning and management challenge. Athens, Greece. pp 67-72.
- Cohen, M., Rigolot, E., Valette, J.C. (2003). From the vegetation to the inputs of a fire model: fuel modeling for WUI management. In Proceedings (Eds Xanthopoulos, G.) of the international workshop WARM, Forest fires in the wildland-urban interface and rural areas in Europe: an integral planning and management challenge. Athens, Greece. pp 113-120.
- Davis, J. B., (1989). "Demography : a tool for understanding the wildland-urban interface fire problem." USDA Forest Service: 5.
- DiMauro-Roeser, S. (2005). "Los Alamos project: reducing fire hazards in the wildland-urban interface." *Fire Management today*. 65 (4), 21-23.
- Donadieu, P. (1998). Campagnes urbaines, Actes Sud.
- Dupuy, J. L., Valette, J.C., Morvan, D. (2003). A "complete" physical model of forest fire behaviour as a tool to manage the forest fuel on WUI. In Proceedings (Eds Xanthopoulos, G.) of the international workshop WARM, Forest fires in the wildland-urban interface and rural areas in Europe: an integral planning and management challenge. Athens, Greece. pp105-112.
- Eftichidis, G., Varela, V. (2000). The conflagration of 1998 in the wildland-urban interface of Athens. Euromediterranean Wildfire meetings research Special session, Hyères, France.
- Fedra, K. (1999). "Urban environmental management: monitoring, GIS and modeling." *Computers, Environment and Urban Systems*. 23, 443-457.

- Fernandes, P., Loureiro, C., Botelho, H. (2003). Outcomes of a high-intensity experimental fire in an maritime pine stand. In Proceedings (Eds Xanthopoulos, G.) of the international workshop WARM, Forest fires in the wildland-urban interface and rural areas in Europe: an integral planning and management challenge. Athens, Greece. pp155-160.
- Fiorucci, P., Gaetani, F., Minciardi, R. (2003). Structural and operational design of a decision support system aiming at forest fire risk management in WUI. In Proceedings (Eds Xanthopoulos, G.) of the international workshop WARM, Forest fires in the wildland-urban interface and rural areas in Europe: an integral planning and management challenge. Athens, Greece. pp219-228.
- Fouchier, V. (1999). "Vers des planchers de densité ?" *Etudes foncières*. 81: 24-29.
- Goldammer, J. G. (2000). Global fire Issues. International Forest Fire News. FAO, U. Nations and ECE. 23: 3-8.
- Greenberg, J.D., Bradley, G.A. (1997). Analyzing the Urban-Wildland Interface with GIS: two case studies. *Journal of forestry*. 95 (10), 18-22.
- Holec, J., Skvarenina, J., Tucek, J., Mindas, J. (2003). Fire risk insurance model for forest stands growing in the area of slovak paradise. In Proceedings (Eds Xanthopoulos, G.) of the international workshop WARM, Forest fires in the wildland-urban interface and rural areas in Europe: an integral planning and management challenge. Athens, Greece. pp161-172.
- Janaki, R.R.A., Carter, D.R., Newman, D.H. (2005). "Wildland-urban interface: Challenges and opportunities." *Forest policy and economics*. 7: 705-708.
- Kim, K.H., Pauleit, S. (2007) Landscape character, biodiversity and land use planning: The case of Kwaungju City Region, South Korea. *Land Use Policy*. 24, 264-274.
- Laaribi, A. (2000). SIG et analyse multicritère. Paris: Hermès Editions, 190 p.
- Lajzerowicz, N., Gattino, B., Cérutti, O. (1998). Construction d'indicateurs et tableaux de bord synthétiques. AFNOR, Editions Paris la Défense, 1-29 p.
- Larner, J. (2000). Incendies de forêts catastrophes - Prévention et protection - Un essai sur l'incendie d'Oakland. Conseil général du Génie Rural des Eaux et des Forêts. 37-44.
- Le Gauffre, P., Joannis, C. (2004a). Multi-criteria decision support approach to sewer asset management. In: DMUCE4 (Decision Making in Urban and Civil Engineering), Porto, Portugal, 28-30 octobre 2004. pp. 10
- Martin, H. (1994). "Habitat et forêt - Aspects réglementaires." Forêt méditerranéenne, tome XV, numéro 2: 176-180.
- McGee, T.K. (2005). Completion of recommended WUI fire mitigation measures within urban households in Edmonton, Canada. *Environmental Hazards*. 6, 147-157.
- Ohlson, D.W., Berry, T.M., Gray, R.W., Blackwell, B.A., Hawkes, B.C. (2006). Multi-attribute evaluation of landscape-level fuel management to reduce wildfire risk. *Forest policy and economics*. 8, 824-837.
- Plevel, S.R. (1997). Fire policy at the wildland-urban interface: a local responsibility. *Journal of Forestry*. 95 (10), 12-17.
- Reams, M. A., Haines, T.K., Renner, C.R., Wascom, M.W., Kingre, H. (2005). Goals, obstacles and effective strategies of wildfire mitigation programs in the Wildland-urban Interface. *Forest policy and Economics*. 7, 818-826.
- Renaud-Caillet. (2003). Analyse multicritère : étude et comparaison des méthodes existantes en vue d'application en analyse du cycle de vie. 2003s-53. Série scientifique. CIRANO Centre interuniversitaire de recherche en analyse des organisations Montréal. 52 p.
- Romero-Calcerrada, R., Novillo, C.J., Millington, J.D.A., Gomez-Jimenez, I. (2008). GIS analysis of spatial patterns of human-caused wildfire ignition risk in the SW of Madrid (Central Spain). *Landscape Ecology*. 23, 341-354
- Roy, B., Bouissou, D. (1993). Aide multicritère à la décision : méthode et cas. Paris : Editions Economica, 695 p.
- Sandberg, D.V., Ottmar, R.D., Gushon, G.H. (2001). Characterizing fuels in the 21st Century, *International Journal of Wildland Fire*. 10, 381-387.
- Slak, M.F., Vivière, J.L. (2000). Vers une modélisation du mitage - Périurbanisation et agriculture. *Etudes foncières*. n° 85, 33-38.

- Terrier C., Sylvander M., Khiati A. (2005). En haute saison touristique, la population présente double dans certains départements. INSEE Première. N° 1050. Novembre 2005. Sources des données de population présente en équivalents habitants permanents et population résidente en 2003.
- Toutain, S., Souiah, S.A. (2005). L'analyse démographique et spatiale. Editions du Temps. p15.
- Viegas, D. X., Allgöwer, B., Koutsias, N., Etchifidis, G. (2003). Fire spread and the wildland urban interface problem. In Proceedings (Eds Xanthopoulos, G.) of the international workshop WARM, Forest fires in the wildland-urban interface and rural areas in Europe: an integral planning and management challenge, Athens, Greece. pp 94-104.
- Vincke, P. (1989). L'aide multicritère à la décision. Bruxelles : Editions Ellipses, 179p.
- White, R.H. (2000). Wildland-urban interface fire research at the USDA forest service, forest products laboratory: past, present, and future. The international conference on fire safety, The greenbrier white sulphur springs, West Virginia, USA.
- Weber, C., Hirsch, J. (2000). Processus de croissance et limites urbaines. Cybergéo <http://www.cybergeo.presse.fr/teldschu/weber/weber.htm>.
- Wimberly, M.C., Zhang, Y., Stanturf, J.A. (2006). Digital Forestry in the Wildland Urban Interface. G. Shao and K.M. Reynolds (eds.), Computer Applications in Suitable Forest Management: Including Perspectives on Collaboration and Integration, Springer, Netherlands, 201-222.
- Xanthopoulos, G., Labris, C., Golfinos, C. (2003). The June 4, 2001 fire in the wildland urban interface areas of Northern Attica: evolution, firefighting problems and damages. In Proceedings (Eds Xanthopoulos, G.) of the international workshop WARM, Forest fires in the wildland-urban interface and rural areas in Europe: an integral planning and management challenge. Athens, Greece. pp 19-28.

Sites consulté sur internet:

- ☞ <http://agreste.agriculture.gouv.fr>
- ☞ Cemagref : <http://www.aix.cemagref.fr>
- ☞ Entente interdépartementale en vue de la protection de la forêt et de l'environnement contre l'incendie : <http://www.entente-foret.com>
- ☞ Fondation pour la forêt en Provence : <http://www.fondation-pour-la-foret.enprovence.com>
- ☞ <http://geoconfluences.ens-lsh.fr/doc/etpays/Medit/MeditVoc.htm>
- ☞ <http://www.insee.fr>: La France en faits et en chiffres
- ☞ Inventaire forestier national : <http://www.ifn.fr>
- ☞ Observatoire de la forêt méditerranéenne : <http://www.ofme.org>
- ☞ Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture : <http://www.fao.org/forestry/index.jsp>
- Portail de la prévention des risques majeurs : <http://www.prim.net>
- Prométhée database. Base documentaire. Statistiques et bilans. Prométhée : www.promethee.com. Banque de données sur les incendies de forêts en région méditerranéenne en France
- CRIGE PACA, Centre régional de l'Information Géographique <http://www.crige-paca.org/>
- <http://www.statistique-publique.fr/>
- http://www.prim.net/professionnel/documentation/dossiers_info/nat/low/maqid_ff.pdf
- <http://www.meteosudest.org> : MétéoSudEst pour la météo du sud-est de la France
- <http://www.firewise.org/> USA, (California) institution. Focussed on FIRE & architecture safety (e.g. Fire Hazard Assessment in the Wildland/Urban Interface).
- <http://www.interfacesouth.org/>. The Southern Research Station and Southern Region of the USDA Forest Service completed an assessment of the research, technology, and education issues that confront the wildland-urban interface in the South

Sites de programmes de recherche Européens :

- FIRESTAR project. A decision support system for fuel management and fire hazard reduction in Mediterranean wildland – urban interfaces. <http://www.eufirestar.org/index.php>
 - FIREPARADOX integrated project - An Innovative Approach of Integrated Wildland Fire Management Regulating the Wildfire Problem by the Wise Use of Fire: Solving the Fire Paradox. <http://www.fireparadox.org/>
- EUFIRELAB un Laboratoire sans-murs pour les Sciences et les Technologies de l'Incendie de Forêt en Région Euro-Méditerranéenne. <http://www.eufirelab.org/>

LISTE DES TABLES

Table des matières

Liste des Sigles	3
Introduction générale	5
Première partie Contexte de l'étude, Problématique de recherche, Données et Méthodes	9
Chapitre 1. Contexte de l'étude.....	11
1.1 L'incendie de forêt.....	11
1.1.1. Définition.....	11
1.1.2. Facteurs de développement de l'incendie.....	11
1.1.3. Les différents types de feux.....	13
1.1.4. Impacts de l'incendie sur l'homme et son environnement.....	13
1.1.5. Bilan mondial des incendies de forêt.....	14
1.2 Le cas de la zone méditerranéenne française.....	15
1.2.1. Le milieu méditerranéen.....	15
1.2.2. Dynamique du territoire méditerranéen.....	17
1.2.3. Un territoire coutumier de l'incendie de forêt.....	18
1.2.4. Importance des incendies de forêt en région méditerranéenne.....	19
1.3 Le risque d'incendie.....	22
1.3.1. Définition du risque.....	22
1.3.2. Risque d'incendie et aménagement du territoire.....	24
Chapitre 2. Problématique de recherche.....	27
2.1 Contexte scientifique.....	27
2.2 Objet de la recherche.....	28
2.2.1. L'évaluation du risque d'incendie.....	28
2.2.2. L'interface.....	31
2.2.3. Caractériser la relation entre l'organisation spatiale d'un territoire et le risque d'incendie.....	34
2.3 Objectifs de la thèse et démarche de recherche.....	37
2.3.1. Un objectif double.....	37
2.3.2. La démarche de recherche.....	37
Chapitre 3. Données et méthodes.....	43
3.1 Zones d'étude et données.....	43
3.1.1. Zones d'étude.....	43
3.1.2. Données de base.....	48
3.2 Méthodes et outils.....	63
3.2.1. Méthodes d'analyse spatiale.....	63
3.2.2. Méthodes statistiques.....	67
3.2.3. Méthodes de traitement d'images par télédétection.....	69
Deuxième partie Caractérisation puis Cartographie des Interfaces habitat-forêt	71
Chapitre 4. L'interface habitat-forêt, un objet géographique nouveau.....	75
4.1 Un objet géographique nouveau.....	75
4.1.1. Le concept d'interface en géographie.....	75
4.1.2. Le concept géographique appliqué à l'interface habitat-forêt.....	76
4.2 L'interface habitat-forêt.....	78
4.2.1. Définition des interfaces habitat-forêt dans le sud de la France.....	78
4.2.2. Des interfaces habitat-forêt vulnérables à l'incendie.....	81
Chapitre 5. La caractérisation des interfaces habitat-forêt.....	83
5.1 La structure de l'habitat et sa représentation cartographique.....	83
5.1.1. Approche exploratoire pour définir la structure des zones bâties.....	84

5.1.2.	Principes de définition des habitats isolé, diffus et groupé.....	90
5.1.3.	Caractéristiques spatiales des types d'habitat	93
5.1.4.	Analyse des résultats cartographiques sur les zones AIX et VAR.....	107
5.2	La structure de la végétation et sa représentation cartographique	109
5.2.1.	Choix de la carte de végétation	109
5.2.2.	Critère traduisant la structure horizontale de la végétation.....	115
5.2.3.	Paramètres de calcul de l'indice d'agrégation pour une représentation spatiale pertinente de la structure de la végétation.....	119
5.2.4.	Artefact de calcul de l'indice d'agrégation	132
5.2.5.	Carte de l'indice d'agrégation élaborée sur la zone d'étude MAM entre les métropoles Aix et Marseille	138
Chapitre 6.	Les types d'interfaces habitat-forêt et leur représentation cartographique	139
6.1	Les différents types d'interfaces habitat-forêt.....	139
6.2	La méthode de cartographie des interfaces habitat-forêt	140
6.2.1.	Procédure mise en œuvre	140
6.2.2.	Automatisation de la procédure.....	144
6.3	Application sur les deux zones test	144
6.3.1.	Résultats cartographiques sur la zone d'étude AIX	144
6.3.2.	Résultats cartographiques sur la zone d'étude VAR	144
6.3.3.	Comparaison des résultats	144
6.4	Validation des résultats et généralisation de la méthode.....	147
6.4.1.	Résultats cartographiques et confrontation terrain.....	147
6.4.2.	Validation en conditions opérationnelles	152
6.4.3.	Généralisation de la méthode : représentativité des deux zones d'étude	153
6.5	Cartographie et caractérisation des interfaces habitat-forêt sur la zone d'étude MAM entre les métropoles Aix-Marseille	156
6.5.1.	Importance et nature des interfaces sur le territoire étudié	156
6.5.2.	Caractéristiques d'occupation du sol des différents types d'interface ...	157
6.5.3.	Discussion	158
Troisième partie	Les relations entre territoire et risque d'incendie	161
Chapitre 7.	Relation entre types de territoire dont les interfaces habitat-forêt et distribution spatiale des départs de feu et des incendies	165
7.1	Contribution de la typologie des interfaces à une typologie de territoires.....	165
7.2	Types de territoire et distribution spatiale des points d'éclosion.....	167
7.2.1.	Distribution des points d'éclosion selon les types de territoire.....	167
7.2.2.	Distribution des points d'éclosion au sein des interfaces habitat-forêt..	169
7.3	Types de territoire et distribution spatiale des surfaces incendiées.....	171
7.3.1.	Distribution des surfaces incendiées selon les types de territoire	171
7.3.2.	Distribution des surfaces incendiées au sein des interfaces habitat-forêt	171
7.4	Synthèse-Discussion.....	173
Chapitre 8.	Introduction de nouvelles variables d'occupation du sol dans l'étude des relations types de territoire et risque d'incendie	175
8.1	Domaine de définition de l'étude pour l'analyse spatiale et statistique.....	175
8.2	Définition des variables étudiées.....	179
8.2.1.	Densité d'éclosion, densité d'incendie et taux de surfaces brûlées : trois variables à expliquer.....	179
8.2.2.	Variables explicatives	181
8.2.3.	Matrice d'analyse	187
8.3	Différenciation des types de territoire par une analyse de l'occupation du sol	190

8.3.1.	Caractéristiques d'occupation du sol dégagées par type de territoire	190
8.3.2.	Caractéristiques d'occupation du sol par type de territoire exposé au risque d'incendie	198
8.4	Synthèse-Discussion.....	215
Chapitre 9.	Démarche de modélisation d'indicateurs de risque.....	217
9.1	Corrélation des variables étudiées.....	217
9.2	Analyse en Composantes Principales.....	220
9.2.1.	Résultats de l'ACP sur l'ensemble des polygones.....	220
9.2.2.	Résultats de l'ACP sur les polygones à densité d'éclosion non nulle....	222
9.2.3.	Résultats de l'ACP sur les polygones à densité d'incendie non nulle ...	224
9.2.4.	Résultats de l'ACP sur les polygones à taux de surfaces brûlées non nul	226
9.2.5.	Conclusion.....	228
9.3	Modélisation des indicateurs de risque DE, DI et SB	230
9.3.1.	Choix de la méthode de régression à plusieurs facteurs PLS.....	230
9.3.2.	Modélisation de l'indicateur de risque densité d'éclosion DE.....	232
9.3.3.	Modélisation de l'indicateur de risque densité d'incendie DI.....	238
9.3.4.	Modélisation de l'indicateur de risque taux de surfaces brûlées SB.....	242
9.4	Synthèse	246
Quatrième partie Vers un modèle d'évaluation globale du risque d'incendie avec une clé d'analyse fondée sur les types d'interfaces habitat-forêt		249
Chapitre 10.	Indice global de risque d'incendie de forêt dans les interfaces habitat-forêt	253
10.1	Influence des facteurs anthropiques sur le risque d'incendie.....	253
10.1.1.	Densité des départs de feux.....	253
10.1.2.	Densité d'incendie.....	255
10.1.3.	Surfaces brûlées.....	257
10.2	Calcul d'un indice global de risque d'incendie IR.....	259
10.2.1.	Rappel des définitions du risque	259
10.2.2.	Combinaison des indicateurs de risque	260
10.2.3.	Principe de cartographie de l'indice de risque IR	261
10.3	Cartographie de l'indice de risque	261
10.3.1.	Cartographie des indicateurs de risque élémentaires	261
10.3.2.	Cartographie de l'indice global de risque d'incendie.....	265
10.4	Analyse du risque d'incendie dans les interfaces habitat-forêt	267
10.4.1.	Indicateurs de risque DE, DI et SB	267
10.4.2.	Indice global de risque d'incendie	270
10.4.3.	Discussion	271
10.4.4.	Validation des résultats	272
10.5	Vers des cartes prédictives	273
Chapitre 11.	Simulation dynamique du risque d'incendie en fonction de la dynamique de territoire et géogouvernance.....	275
11.1	Dynamique du risque d'incendie associée à la dynamique d'interface.....	275
11.1.1.	Dynamique des interfaces habitat-forêt.....	275
11.1.2.	Dynamique du risque d'incendie dans les interfaces habitat-forêt	279
11.2	Parler de géogouvernance du risque d'incendie.....	279
11.2.1.	Objectifs du groupe de recherche intersites Géogouvernance	280
11.2.2.	Application à la géogouvernance du risque d'incendie	280
Conclusion-Perspectives		283
Références bibliographiques		293
Liste des Tables.....		311

Annexes 325

Table des figures

Figure 1-1	Le triangle du feu.....	11
Figure 1-2	Evolution des surfaces brûlées en hectare de 1973 à 2008 (Source Prométhée).....	20
Figure 1-3	Evolution du nombre de feux de forêt de 1973 à 2008 (Source Prométhée).....	21
Figure 1-4	Répartition des causes de départ de feu sur la période 1998-2006 (Source Prométhée) .	22
Figure 1-5	Définition du risque d'incendie	23
Figure 1-6	Schéma conceptuel d'une approche intégrée pour l'évaluation du risque d'incendie de forêt adapté de Chen et al. (2003)	25
Figure 2-1	Etape I de la démarche de recherche.....	40
Figure 2-2	Etape II de la démarche de recherche	41
Figure 2-3	Etape III de la démarche de recherche.....	42
Figure 3-1	Quinze départements du sud de la France suivis dans Prométhée.....	48
Figure 3-2	Illustration de contrôles de mise à jour des données du bâti.....	51
Figure 3-3	Définition d'une fenêtre glissante de 5 pixels sur 5 pixels	65
Figure 3-4	Effets d'une fermeture illustrés à partir de deux exemples.....	66
Figure 3-5	Effets d'une ouverture illustrés à partir de deux exemples.....	66
Figure 4-1	Illustration des effets du débroussaillage sur l'environnement en interface- Photo SDIS Gard dans Detry-Fouque 2007)	79
Figure 4-2	Définition de l'interface habitat-forêt.....	80
Figure 5-1	Illustration de différents types de structure d'habitat	84
Figure 5-2	Distance entre deux bâtis d'un habitat isolé	84
Figure 5-3	Distance entre deux bâtis d'un habitat groupé	84
Figure 5-4	Distance entre deux bâtis d'un habitat diffus	84
Figure 5-5	Représentation à l'aide d'ArcGIS©9.2 des enveloppes déterminées avec le logiciel Image J des bâtis isolés (en bleu), bâtis diffus (en vert) et bâtis groupés (en orange)....	88
Figure 5-6	Définition de l'habitat isolé	91
Figure 5-7	Définition de l'habitat diffus.....	92
Figure 5-8	Définition de l'habitat groupé.....	93
Figure 5-9	Densité, surface à débroussailler et périmètre à défendre.....	94
Figure 5-10	Illustration du scénario avec 3 bâtis distants de 50 m au sein d'un polygone et zoom sur la valeur de 201,50... pour le périmètre à défendre	94
Figure 5-11	Evolution de l'indice de Patton IP en fonction de la forme.....	95
Figure 5-12	Boîtes à moustaches pour chacune des variables étudiées pour I, D, G sur AIX	97
Figure 5-13	Boîtes à moustaches pour chacune des variables étudiées pour GD, GTD sur AIX	99
Figure 5-14	Boîtes à moustaches pour chacune des variables étudiées pour I, D, G sur VAR.....	101
Figure 5-15	Boîtes à moustaches pour chacune des variables étudiées pour GD, GTD sur VAR....	103
Figure 5-16	Carte de végétation élaborée sur une même emprise à partir de méthodes de classification et images différentes.....	112
Figure 5-17	Cartes de végétation et non-végétation issues des différentes images et méthodes de classification.....	113
Figure 5-18	Résultats de l'AFCM	114
Figure 5-19	Composition d'une structure à faible agrégation (gauche), à forte agrégation (droite) .	116
Figure 5-20	Evolution de l'indice d'agrégation de la classe représentée par les pixels noirs	116
Figure 5-21	a Dénombrement de 2 contacts entre deux pixels (pixel1-pixel2, pixel2-pixel1) ; b : Dénombrement de 40 contacts entre les pixels ; c : Dénombrement de 30 contacts entre les pixels	117
Figure 5-22	Illustration des types de structure de la végétation mis en évidence selon les valeurs de l'indice d'agrégation AI	117
Figure 5-23	Répartition du nombre de pixels en fonction des valeurs d'AI selon la résolution de l'image.....	122
Figure 5-24	AI en trois classes : AI=0, seuil fixe de 95 % discriminant AI faible de l'AI fort selon la résolution.....	124

Figure 5-25	AI en trois classes : AI=0, seuil variable discriminant AI faible de l'AI fort selon la résolution.....	125
Figure 5-26	Répartition des pixels selon les classes d'AI.....	126
Figure 5-27	Représentation des 15 modalités sur les axes factoriels selon les modalités, SV et SF.	128
Figure 5-28	Dendrogrammes de la CAH obtenus dans les cas des seuils variable SV et seuil fixe SF.....	130
Figure 5-29	Répartition des surfaces selon le croisement codifié dans le Tableau 5-27 selon les résolutions.....	133
Figure 5-30	Correspondance codification AI-végétation avec nature d'AI et présence de végétation.....	134
Figure 5-31	Répartition des classes de l'indice d'agrégation - Zone d'étude MAM.....	139
Figure 6-1	Typologie d'interfaces habitat-forêt.....	139
Figure 6-2	Etapes de cartographie de la structure de la végétation pour les interfaces habitat-forêt	141
Figure 6-3	Etapes de cartographie de l'habitat pour les interfaces habitat-forêt.....	142
Figure 6-4	Etapes de cartographie des interfaces habitat-forêt par combinaison de critères habitat et végétation.....	143
Figure 6-5	Zoom sur la cartographie des interfaces habitat-forêt, sur la zone d'étude AIX.....	148
Figure 6-6	Vue aérienne de la zone d'interface cartographiée-La Londe des Maures, sur la zone d'étude VAR.....	148
Figure 6-7	Photographies de la zone d'interface cartographiée-Bormes- les- Mimosas, sur la zone d'étude VAR.....	149
Figure 6-8	Photographies de la zone d'interface cartographiée, sur la zone d'étude de Meyreuil (MEYR).....	150
Figure 6-9	Illustration des types d'interfaces habitat-forêt.....	151
Figure 6-10	Interprétation de la composante 1.....	155
Figure 6-11	Interprétation de la composante 2.....	156
Figure 6-12	Répartition en surface des types d'interfaces habitat-forêt sur la zone d'étude MAM..	157
Figure 6-13	Répartition des types d'occupation du sol au sein des interfaces habitat-forêt.....	157
Figure 7-1	Densité de départs de feu selon les types de territoire.....	168
Figure 7-2	Densités d'éclosion selon le type d'interfaces habitat-forêt.....	170
Figure 7-3	Taux de surfaces brûlées selon les types interfaces habitat-forêt.....	173
Figure 7-4	Densité d'éclosion et taux de surfaces brûlées selon les types d'interface habitat-forêt.....	174
Figure 8-1	Définition des trois indicateurs de risque Densité de points d'Eclosion DE, Densité d'incendie de forêt DI et taux de Surfaces Brûlées SB.....	180
Figure 8-2	Définition des zones exposées au vent dominant (vent de mistral).....	183
Figure 8-3	Représentation des classes de l'indice KR par rapport à la pente et à l'exposition.....	184
Figure 8-4	Carte d'identité des types de territoire sur la zone d'étude (Valeurs moyennes et coefficient de variation en % pour certaines variables).....	197
Figure 8-5	Répartition des polygones selon les types de territoire dans chacune des deux échantillons (DE).....	198
Figure 8-6	Répartition des polygones à DE faible, moyenne et forte selon les types de territoire..	199
Figure 8-7	Nature de l'occupation du sol – Densité d'éclosion nulle, non nulle, faible et forte.....	202
Figure 8-8	Indice d'agrégation – Densité d'éclosion nulle, non nulle, faible et forte.....	202
Figure 8-9	Nature de la végétation – Densité d'éclosion nulle, non nulle, faible et forte.....	203
Figure 8-10	Nature de l'exposition – Densité d'éclosion nulle, non nulle, faible et forte.....	203
Figure 8-11	Répartition des polygones selon les types de territoire dans chacune des deux échantillons (DI).....	204
Figure 8-12	Répartition des polygones à DI faible, moyenne et forte selon les types de territoire...	204
Figure 8-13	Nature de l'occupation du sol – Densité d'incendie nulle, non nulle, faible et forte.....	207
Figure 8-14	Indice d'agrégation – Densité d'incendie nulle, non nulle, faible et forte.....	207
Figure 8-15	Nature de la végétation – Densité d'incendie nulle, non nulle, faible et forte.....	208
Figure 8-16	Nature de l'exposition – Densité d'incendie nulle, non nulle, faible et forte.....	208
Figure 8-17	Répartition des polygones selon les types de territoire dans chacune des deux échantillons (SB).....	209

Figure 8-18	Répartition des polygones à SB faible, moyen et fort selon les types de territoire.....	209
Figure 8-19	Nature de l'occupation du sol – Taux de surfaces brûlées nul, non nul, faible et fort...	213
Figure 8-20	Indice d'agrégation – Taux de surfaces brûlées nul, non nul, faible et fort.....	214
Figure 8-21	Nature de la végétation – Taux de surfaces brûlées nul, non nul, faible et fort.....	214
Figure 8-22	Nature de l'exposition – Taux de surfaces brûlées nul, non nul, faible et fort	214
Figure 9-1	Coordonnées des variables présentant de bonnes corrélations sur chacune des trois composantes principales (ensemble des polygones)	221
Figure 9-2	Coordonnées des variables présentant de bonnes corrélations sur chacune des trois composantes principales (polygones à densité d'éclosion non nulle)	223
Figure 9-3	Coordonnées des variables présentant de bonnes corrélations sur chacune des trois composantes principales (polygones à densité d'incendie non nulle).....	225
Figure 9-4	Coordonnées des variables présentant de bonnes corrélations sur chacune des trois composantes principales (polygones à taux de surfaces brûlées non nul).....	227
Figure 9-5	Poids des variables dans le modèle LOG(DE).....	237
Figure 9-6	Modèle LOG(DE).....	237
Figure 9-7	Poids des variables dans le modèle LOG(DI).....	241
Figure 9-8	Modèle LOG(DI)	242
Figure 9-9	Poids des variables dans le modèle SB	245
Figure 9-10	Modèle SB	246
Figure 10-1	Valeurs seuils des indicateurs et indice de risque global.....	265
Figure 10-2	Répartition des classes de l'indicateur de risque DE sur la zone d'étude.....	267
Figure 10-3	Répartition des 5 niveaux de l'indicateur de risque DE selon les types d'interfaces habitat-forêt	267
Figure 10-4	Répartition des classes de l'indicateur de risque DI sur la zone d'étude	268
Figure 10-5	Répartition des 5 niveaux de l'indicateur de risque DI selon les types d'interfaces habitat-forêt	268
Figure 10-6	Répartition des classes de l'indicateur de risque SB sur la zone d'étude	269
Figure 10-7	Répartition des 5 niveaux de l'indicateur de risque SB selon les types d'interfaces habitat-forêt	269
Figure 10-8	Répartition des classes de l'indice de risque sur la zone d'étude	270
Figure 10-9	Répartition des 5 niveaux de l'indice de risque selon les types d'interfaces habitat-forêt	270
Figure 10-10	Répartition des points d'éclosion (1997-2007) selon les niveaux de l'indice global de risque d'incendie	273
Figure 11-1	Dynamique des interfaces habitat-forêt sur la période 1992-2006 – zone d'étude MEYR	278
Figure 11-2	Cartographies de l'indice de risque en 1998 (gauche) et en 2006 (droite)	279
Figure 11-3	Pour une géogouvernance du risque	281

Table des tableaux

Tableau 3-1	Tableau récapitulatif des données exploitées dans la thèse.....	95
Tableau 5-1	Statistiques résumées – Densité (nb bâtis/km ²) pour I, D, G sur AIX	95
Tableau 5-2	Statistiques résumées Surface à débroussailler (m ²) pour I, D, G sur AIX.....	96
Tableau 5-3	Statistiques résumées Périmètre à protéger (m) pour I, D, G sur AIX.....	96
Tableau 5-4	Statistiques résumées Indice de Patton pour I, D, G sur AIX	96
Tableau 5-5	Test de Kruskall-Wallis pour I, D, G sur AIX	97
Tableau 5-6	Statistiques résumées – Densité (nb bâtis/km ²) pour GD, GTD sur AIX	98
Tableau 5-7	Statistiques résumées Surface à débroussailler (m ²) pour GD, GTD sur AIX.....	98
Tableau 5-8	Statistiques résumées Périmètre à protéger (m) pour GD, GTD sur AIX.....	98
Tableau 5-9	Statistiques résumées Indice de Patton pour GD, GTD sur AIX	98
Tableau 5-10	Test de Kruskall-Wallis pour GD, GTD sur AIX	99
Tableau 5-11	Statistiques résumées – Densité (nb bâtis/km ²) pour I, D, G sur VAR.....	100
Tableau 5-12	Statistiques résumées - Surface à débroussailler (m ²) pour I, D, G sur VAR	100
Tableau 5-13	Statistiques résumées - Périmètre à protéger (m) pour I, D, G sur VAR	100
Tableau 5-14	Statistiques résumées - Indice de Patton pour I, D, G sur VAR.....	100
Tableau 5-15	Résultats de test de Kruskall-Wallis pour I, D, G sur VAR.....	101
Tableau 5-16	Statistiques résumées – Densité (nb bâtis/km ²) pour GD, GTD sur VAR	102
Tableau 5-17	Statistiques résumées Surface à débroussailler (m ²) pour GD, GTD sur VAR.....	102
Tableau 5-18	Statistiques résumées Périmètre à protéger (m) pour GD, GTD sur VAR.....	102
Tableau 5-19	Statistiques résumées Indice de Patton pour GD, GTD sur VAR	102
Tableau 5-20	Test de Kruskall-Wallis pour GD, GTD sur VAR	103
Tableau 5-21	Caractéristiques des types d'habitat: moyenne (écart-type ; CV%), médiane (1 ^{er} quartile- 3 ^{ème} quartile ; CVM%).....	104
Tableau 5-22	Tableau de Burt.....	114
Tableau 5-23	Variation des valeurs du seuil discriminant en fonction de la résolution de l'image..	122
Tableau 5-24	Tableau de Burt Répartition du nombre de pixels - Seuils variables	129
Tableau 5-25	Tableau de Burt Répartition du nombre de pixels - Seuil fixe.....	129
Tableau 5-26	Valeurs seuils discriminant les classes d'agrégation faible et forte - Zones d'étendue différente	132
Tableau 5-27	Principe de codification.....	133
Tableau 5-28	Représentativité en surface de l'indice d'agrégation	133
Tableau 6-1	Types d'interfaces habitat-forêt	140
Tableau 6-2	Caractéristiques des départements du sud de la France et zones d'étude soumis au risque d'incendie.....	154
Tableau 6-3	Tableau des poids des variables sur chacune des deux composantes et valeurs propres	155
Tableau 7-1	Répartition des points d'éclosion selon les type de territoire observés sur la zone d'étude	167
Tableau 7-2	Résultat du calcul du Khi2 selon les types de territoire	168
Tableau 7-3	Répartition des points d'éclosion selon le type d'interfaces habitat-forêt	169
Tableau 7-4	Résultat du calcul du Khi2 selon les types d'interface.....	169
Tableau 7-5	Répartition des surfaces brûlées sur le territoire	171
Tableau 7-6	Tableau de répartition des surfaces brûlées selon les types d'interfaces	172
Tableau 8-1	Définition des variables calculées pour chaque polygone de la zone d'étude	189
Tableau 8-2	Valeurs de la médiane – moyenne (écart-type) CV % dans la comparaison des 6 types de territoire.....	191
Tableau 8-3	Valeurs de la médiane – moyenne (écart-type) CV % pour chaque échantillon (DE nulle et DE non nulle) et tests statistiques de comparaison d'échantillons.....	200
Tableau 8-4	Valeurs de la médiane – moyenne (écart-type) CV % de chaque échantillon (DE faible et DE forte) et tests statistiques de comparaison d'échantillons.....	201

Tableau 8-5	Valeurs de la médiane – moyenne (écart-type) CV % pour chaque échantillon (DI nulle et DI non nulle) et tests statistiques de comparaison d'échantillon	205
Tableau 8-6	Valeurs de la médiane – moyenne (écart-type) CV % pour chaque échantillon (DI faible et DI forte) et tests statistiques de comparaison d'échantillons	206
Tableau 8-7	Valeurs de la médiane – moyenne (écart-type) CV % pour chaque échantillon (SB nul et SB non nul) et tests statistiques de comparaison d'échantillons	211
Tableau 8-8	Valeurs de la médiane – moyenne (écart-type) CV % pour chaque échantillon (SB faible et SB forte) et tests statistiques de comparaison d'échantillons	212
Tableau 9-1	Tableau des corrélations entre les variables étudiées	219
Tableau 9-2	Résultat du test de permutations avec 39 variables pour LOG(DE)	232
Tableau 9-3	Tableaux de résultats de la PLS avec 39 variables pour LOG(DE)	233
Tableau 9-4	Résultat du test de permutations avec 11 variables pour LOG(DE)	233
Tableau 9-5	Tableaux de résultats de la PLS avec 11 variables pour LOG(DE)	234
Tableau 9-6	Coefficients de régression des 11 variables issues de la PLS pour LOG(DE)	234
Tableau 9-7	Coefficients de corrélation partielle par variable et ses intervalles de confiance à 5 %, 1 %, 0.1 %	235
Tableau 9-8	Tableaux de résultats de la PLS avec 7 variables	235
Tableau 9-9	Coefficients de régression pour les variables	236
Tableau 9-10	Coefficients de corrélation partielle par variable et ses intervalles de confiance à 5 %, 1 %, 0.1 %	236
Tableau 9-11	Résultat du test de permutations avec 37 variables pour LOG(DI)	238
Tableau 9-12	Tableaux de résultats de la PLS avec 37 variables pour LOG(DI)	238
Tableau 9-13	Résultat du test de permutations avec 9 variables pour LOG(DI)	239
Tableau 9-14	Tableaux de résultats de la PLS avec 9 variables pour LOG(DI)	240
Tableau 9-15	Coefficients de régression des 9 variables issues de la PLS pour LOG(DI)	240
Tableau 9-16	Coefficients de corrélation partielle par variable et ses intervalles de confiance à 5 %, 1 %, 0.1 %	240
Tableau 9-17	Résultat du test de permutations avec 37 variables pour SB	242
Tableau 9-18	Tableaux de résultats de la PLS avec 37 variables pour SB	243
Tableau 9-19	Résultat du test de permutations avec 11 variables pour SB	243
Tableau 9-20	Tableaux de résultats de la PLS avec 11 variables pour SB	244
Tableau 9-21	Coefficients de régression des 11 variables pour SB	244
Tableau 9-22	Coefficients de corrélation partielle par variable et ses intervalles de confiance à 5 %, 1 %, 0.1 %	245
Tableau 10-1	Synthèse des principales définitions du risque d'incendie observées dans la littérature	259

Table des cartes

Carte 3-1	Zone d'étude AIX située dans les Bouches-du-Rhône.....	44
Carte 3-2	Zone d'étude VAR située dans le Var.....	45
Carte 3-3	Zone d'étude MAM entre les métropoles Aix-en-Provence et Marseille	46
Carte 3-4	Zone d'étude MEYR de Meyreuil.....	47
Carte 3-5	Carte d'occupation du sol issue d'une classification supervisée de l'image satellite SPOT5 sur MAM (Source, Morin 2007).....	53
Carte 3-6	Carte d'occupation du sol issue d'une classification supervisée de l'image satellite SPOT5 sur VAR.....	53
Carte 3-7	Carte d'occupation du sol par une classification orientée objet sur image satellite Quickbird (Long et <i>al.</i> , 2007).....	54
Carte 3-8	Carte d'occupation du sol Occsol SPOT5 sur la zone d'étude MAM.....	55
Carte 3-9	Carte d'occupation du sol Occsol SPOT5 sur la zone d'étude MEYR (zoom).....	56
Carte 3-10	Carte de la répartition des points d'éclosion sur la zone d'étude MAM	57
Carte 3-11	Carte de la récurrence des incendies sur la zone d'étude MAM	58
Carte 3-12	Carte du relief sur la zone d'étude MAM.....	59
Carte 3-13	Carte des altitudes zoomée sur la zone d'étude MEYR avec courbes de niveaux et points hauts.....	59
Carte 3-14	Carte des réseaux de routes et de chemins, des bâtis et limites de communes.....	60
Carte 3-15	Carte des réseaux de routes et de chemins, des bâtis et limites de communes-zoom.....	60
Carte 3-16	Carte de l'indice KR de Becker.....	60
Carte 5-1	Carte de la densité du bâti avec la fonction densité du logiciel ArcGIS©9.2	85
Carte 5-2	Représentation des enveloppes de bâtis isolés, diffus et groupé déterminées sous ArcGIS©9.2.....	89
Carte 5-3	Carte de l'habitat en interface	91
Carte 5-4	Carte des types d'habitat en interface habitat-forêt.....	107
Carte 5-5	Carte des types d'habitat en interface habitat-forêt (zoom)	108
Carte 5-6	Carte de la végétation sur MAM extraite d'une classification supervisée	110
Carte 5-7	Carte de la végétation sur MEYR extraite d'une classification supervisée.....	110
Carte 5-8	Carte de la végétation issue de la classification objet sur MEYR.....	111
Carte 5-9	Carte de la structure horizontale de la végétation pixélisée	118
Carte 5-10	Carte de la structure horizontale de la végétation (issue d'une classification objet).....	119
Carte 5-11	Représentation cartographique des croisements AI-végétation - Résolution de 2,5 m	119
Carte 5-12	Représentation cartographique des croisements AI-végétation - Résolution de 2,5 m Zoom	119
Carte 5-13	Représentation cartographique des croisements AI-végétation - Résolution de 5 m	136
Carte 5-14	Représentation cartographique des croisements AI-végétation avec résolution de 5 m Zoom	119
Carte 5-15	Représentation cartographique des croisements AI-végétation - Résolution de 10 m	137
Carte 5-16	Représentation cartographique des croisements AI-végétation - Résolution de 10 m Zoom	119
Carte 5-17	Carte de l'indice d'agrégation sur la zone MAM.....	138
Carte 6-1	Carte des interfaces habitat-forêt sur la zone d'étude AIX	145
Carte 6-2	Carte des interfaces habitat-forêt sur la zone d'étude VAR	146
Carte 6-3	Cartographie des interfaces habitat-forêt.....	147
Carte 6-4	Carte des interfaces habitat-forêt sur la zone d'étude Aix-Marseille MAM	159
Carte 7-1	Carte des types de territoires	166
Carte 8-1	Zoom sur le découpage du territoire de la zone d'étude.....	177
Carte 8-2	Carte simplifiée des types de territoire.....	178
Carte 8-3	Carte des classes de pente (exprimée en %).....	182
Carte 8-4	Carte des classes d'exposition au vent de mistral sur la zone d'étude MAM	183
Carte 10-1	Carte de l'indicateur élémentaire de risque DE - Zoom sur la zone d'étude MAM.....	262

Carte 10-2	Carte de l'indicateur élémentaire de risque DI - Zoom sur la zone d'étude MAM.....	263
Carte 10-3	Carte de l'indicateur élémentaire de risque SB - Zoom sur la zone d'étude MAM.....	264
Carte 10-4	Carte de l'indice global de risque d'incendie – Zoom sur la zone d'étude MAM.....	266
Carte 11-1	Cartes des interfaces habitat-forêt (droite) et carte de la structure de l'habitat (gauche) – Année 1992.....	276
Carte 11-2	Cartes des interfaces habitat-forêt (droite) et carte de la structure de l'habitat (gauche) – Année 1998.....	276
Carte 11-3	Cartes des interfaces habitat-forêt (droite) et carte de la structure de l'habitat (gauche) – Année 2003.....	277
Carte 11-4	Cartes des interfaces habitat-forêt (droite) et carte de la structure de l'habitat (gauche) – Année 2006.....	277
Carte 11-5	Carte de l'indice global de risque IR zoomée à l'échelle du bâti.	290

ANNEXES

Sommaire des annexes

A.	Différenciation spatiale par la morphologie mathématique	A-1
1.	Caractéristiques générales de l'image étudiée	A-1
2.	Application de la morphologie mathématique pour identifier et cartographier les types de bâtis rencontrés	A-3
B.	Méthode de cartographie des types d'habitat	B-9
C.	Une approche terrain pour caractériser finement la structure interne des interfaces	C-21
D.	Méthode de calcul de l'indice d'agrégation de la végétation	D-25
E.	Développement d'une automatisation de la procédure de cartographie des interfaces habitat-forêt sous ArcGIS©9.3	E-35
F.	Boîtes à moustaches des variables caractérisant les types de territoire	F-37
G.	Mesures pour réduire la vulnérabilité dans les interfaces habitat-forêt	G-47
1.	Des mesures collectives à l'échelle du territoire	G-47
2.	Des mesures individuelles : le rôle de l'habitant	G-49
H.	Publications et activités de recherche annexées à la thèse	H-57
1.	Journaux	H-57
2.	Conférences	H-58
3.	Rapports	H-60
4.	Recherches annexes	H-61

A. Différenciation spatiale par la morphologie mathématique

Extrait de Lampin, C. 2006. Caractérisation de la relation entre organisation spatiale d'un territoire et risque d'incendie de forêt. Rapport interne de Comité de suivi de thèse du 12 Décembre 2005.

1. Caractéristiques générales de l'image étudiée

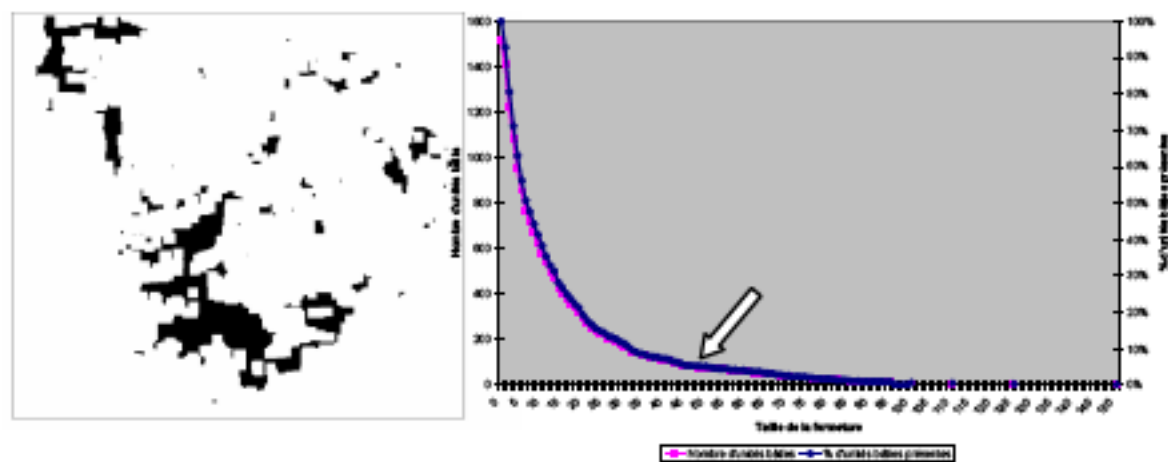
L'image du semis de points (Figure 1) représentant chaque bâti de la zone d'étude MEYR est traitée par analyse d'image, à l'aide de transformations de morphologie mathématique réalisées avec le logiciel IMAGE J. Cette image a été construite à partir de la base de données BD TOPO® IGN qui a été actualisée par numérisation manuelle des nouveaux bâtis (les données de base datant de 1998). Seuls les bâtis à usage d'habitation appelés « bâtiments quelconques » ont été pris en compte constituant ainsi une couche vecteur (polygones shape). Par un processus de conversion de format vecteur en format raster, la couche de bâtis au format vecteur est transformée au format raster TIFF (pour être traitée par le logiciel IMAGE J) avec une taille de cellule de sortie de 2 m.

L'image du semis produite a une taille de 5 808 * 5 198 pixels avec une valeur de pixel égale à 2 m. Le nombre de bâtis s'élève à 1515 sur une superficie de 2021,43 ha de la commune de Meyreuil. Sur l'image illustrée par la figure 4 ci-contre ne sont pas représentées les limites de la commune.



Figure1 Image d'origine avec 1 515 « particules » ou bâtis d'une surface moyenne de 216 m²

L'étude granulométrique proprement dite de l'image, dont les résultats figurent ci-dessous (Figure 2), montre qu'il faut aller jusqu'à une fermeture de taille 50 pour avoir une baisse significative du nombre de « composantes » de l'image. Ceci signifie qu'à l'issue d'une fermeture de 100 m (taille 50 avec un pixel de 2m), la dilatation a permis d'agréger les bâtis distants de moins de 200 m et l'érosion a permis de redonner à ces composantes leur taille initiale en laissant reliées entre elles celles qui auront été agrégées. Le nombre de composantes n'est plus que de 5 % du nombre initial et la surface moyenne des objets a augmenté fortement.



Distributions granulométriques en nombre et en surface du semic de bâtis

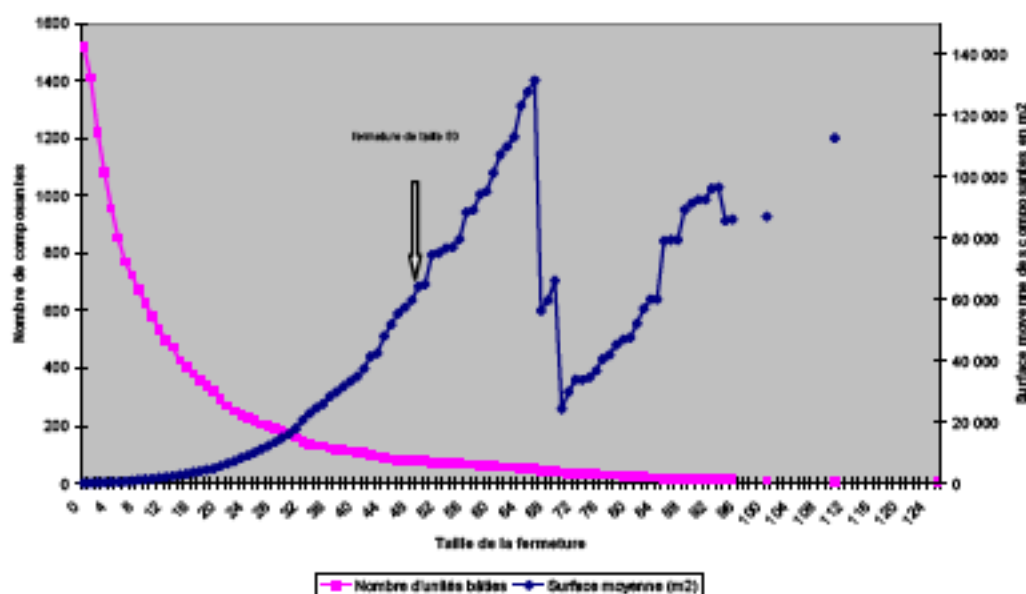


Figure 2 Image après une fermeture de taille 50 et distributions granulométriques

Dans le cas de l'image étudiée, on peut constater qu'après la première ouverture le nombre de composantes augmente légèrement du fait du découpage de certaines grandes composantes, soit de grands ensembles bâtis. La Figure 3 ci-dessous illustre cette augmentation possible du nombre de composantes après une ouverture d'ordre 1.

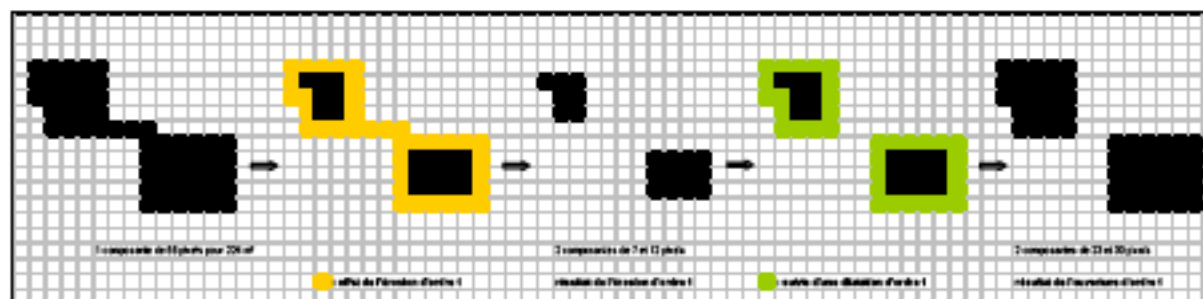


Figure 3 Effet d'une ouverture de taille 1 sur une composante de forme irrégulière et de grande surface

Puis à partir d'une ouverture de taille 2 le nombre de bâtis décroît fortement. La Figure 4 illustre l'effet d'une dilatation sur un objet de la taille d'un pixel et l'effet d'une érosion sur un objet de la taille de 25 pixels dans le cas étudié avec le logiciel IMAGE J.

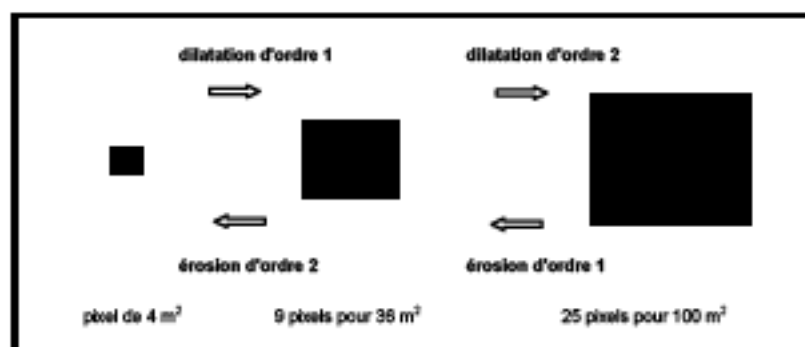


Figure 4 Effet d'une dilatation (d'une érosion) sur un objet de la taille d'un pixel (de 25 pixels)

Ainsi :

- tout bâti d'une surface inférieure à 36 m² soit 9 pixels de 4 m² disparaît après une ouverture d'ordre 1 (érosion suivie d'une dilatation) ;
- tout bâti d'une surface inférieure à 100 m² disparaît après une ouverture d'ordre 2;
- tout bâti d'une surface inférieure à 625 m² disparaît après une ouverture d'ordre 5.

Une ouverture d'ordre 6 fait disparaître la totalité des composantes comme le montre la Figure 5.

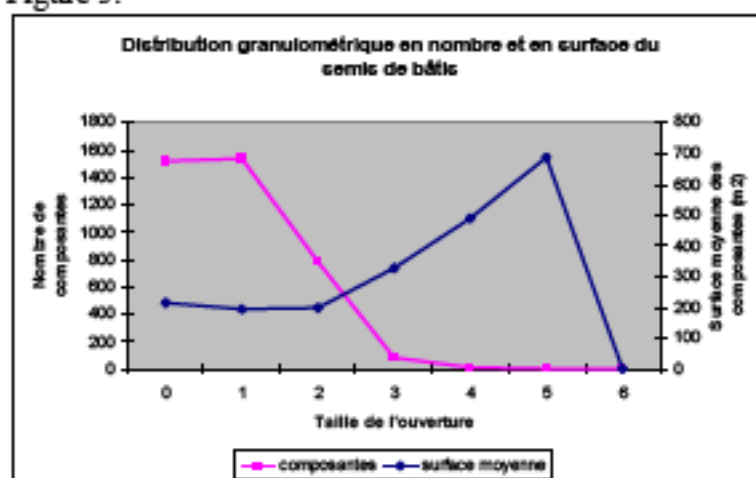


Figure 5 Distribution granulométrique d'une ouverture fonction de la taille d'ouverture

2. Application de la morphologie mathématique pour identifier et cartographier les types de bâtis rencontrés

A partir de l'image de semis du bâti (image tiff) de la zone d'étude MEYR illustrée par la Figure 6, on procède :

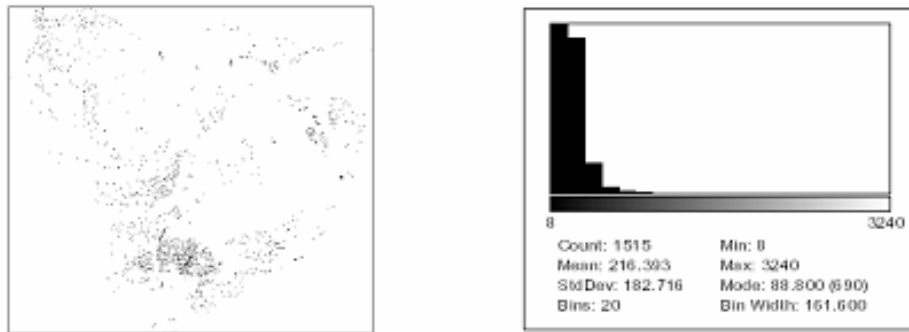


Figure 6 Image des bâtis situés sur la commune de Meyreuil (gauche) et ses caractéristiques (droite)

1) à une fermeture de taille 50 puis une ouverture de taille 5. Cette fermeture de taille 50 correspond à une dilatation suivie d'une érosion avec un élément structurant de 100 m. La fermeture a pour effet de regrouper tous les bâtis distants de moins de 200 m et de redonner aux bâtis non agrégés leur taille normale. Ce regroupement de bâtis (Figure 7) peut correspondre selon les critères de distance définis précédemment aux bâtis diffus et denses de la commune étudiée. Les particules isolées qui demeurent car la fermeture est restée sans effet correspondent au bâti isolé. Afin de ne mettre en évidence que le regroupement des bâtis diffus et dense, une ouverture de taille 5 qui suit la fermeture, avec un élément structurant de taille 5 soit 10 m a pour effet de faire disparaître ces bâtis isolés d'une surface inférieure à 625 m² (Figure 8).

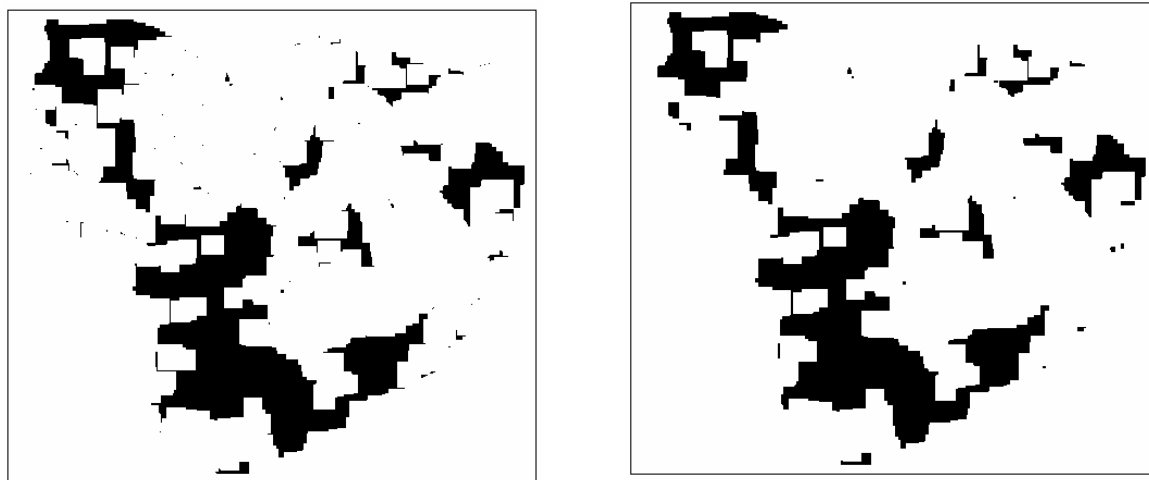


Figure 7 Résultat de la fermeture de taille 5 (gauche) et Figure 8 Résultat de la fermeture de taille 50 suivie d'une ouverture de taille 5 = enveloppe des bâtis diffus et dense (droite)

On obtient alors l'ensemble des bâtis diffus et dense (Figure 9) en intersectant l'enveloppe des bâti diffus et dense (Figure 8) avec l'ensemble des bâtis de la commune de la Figure 1 (fonction ADD du Process Image Calculator du logiciel Image J ou sous ArcGIS©9.2 après transformation en format vecteur des images obtenues).



Figure 9 Enveloppe bâtis diffus et dense

Par différence entre l'ensemble des bâtis et ces bâtis diffus et denses, on extrait les seuls bâtis isolés (fonction DIFFERENCE dans Image calculator du logiciel Image J).

2) On procède dans un second temps à une fermeture de taille 25 (Figure 10) puis une ouverture de taille 5 (Figure 11) sur l'image des seuls bâtis diffus et denses obtenue ci-dessus. Le choix de la taille 25 qui correspond à un élément structurant de 50 m permet de regrouper les bâtis distants d'au plus 100 m mettant ainsi en évidence le bâti défini comme dense.

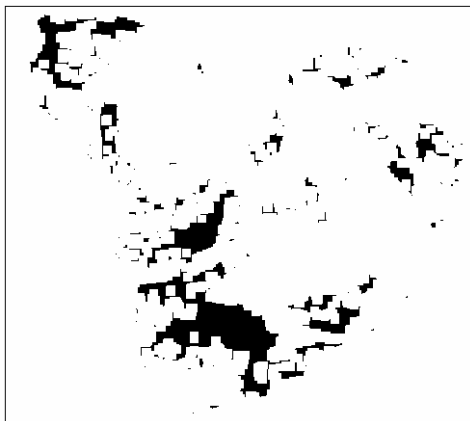


Figure 10 Résultat de la fermeture de taille 25

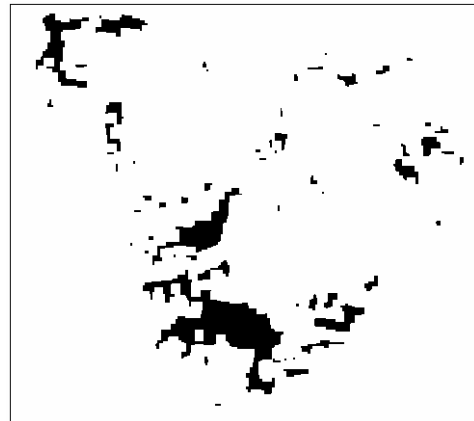


Figure 11 Résultat de la fermeture de taille 25 suivie d'une ouverture de taille 5

On obtient alors l'ensemble des bâtis denses en intersectant l'enveloppe du bâti dense (Figure 11) avec l'ensemble des bâtis diffus et dense de la commune (Figure 9).

Par différence entre l'ensemble des bâtis diffus et denses et ces bâtis denses, on extrait les seuls bâtis diffus (fonction DIFFERENCE dans Image calculator du logiciel Image J). La figure 12 résume les ensembles de bâtis isolés, diffus et denses ainsi identifiés sur la zone d'étude.

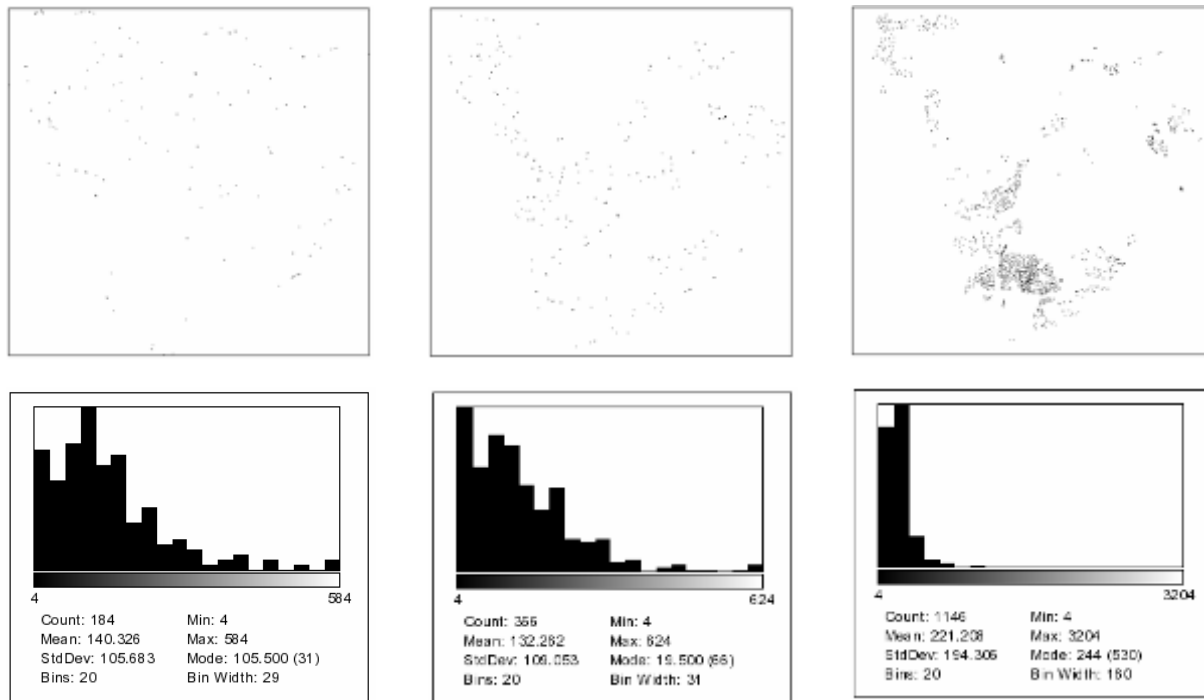


Figure 12 Bâti isolé (gauche), diffus (milieu) et dense (droite) et caractéristiques associées

Pour chaque image apparaissent les informations suivantes : le « count » soit le nombre de bâtis, « Mean » soit la surface moyenne du bâti, « Min » soit la surface minimale. Si l'on procède au contrôle de cohérence en faisant la somme des trois classes isolé, diffus et dense, on s'aperçoit que le résultat ($184+366+1146=1696$) est supérieur au nombre total de bâtis de l'image de départ (1515). On constate par ailleurs que la surface minimale du bâti dans chaque classe est de 4m^2 alors qu'elle n'est que de 8m^2 pour l'image de départ. En fait l'intersection de l'image du bâti initial avec les différentes enveloppes de bâtis (isolé, diffus et dense), génère des bâtis supplémentaires qui sont des parties de bâtis sectionnés alors qu'ils se trouvaient en limite de l'enveloppe et non strictement à l'intérieur.

Les enveloppes de chacun des types de bâti sont représentées en noir ci-dessous (Figure 13) avec de gauche à droite celle du bâti isolé, celle du bâti diffus et celle du bâti dense. L'enveloppe du bâti isolé doit être ajustée à la limite de la commune et doit présenter une enveloppe plus petite. avec pour surfaces totales respectives de 1 553.16 ha, 278.84 ha et 189.43 ha.

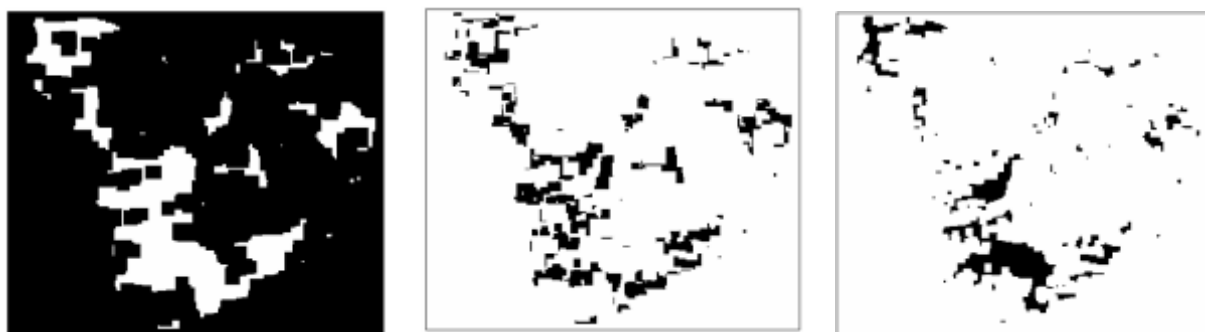


Figure 13 Enveloppe en noir du bâti isolé (gauche), diffus (milieu) et dense (droite)

Ces enveloppes peuvent être traitées et interprétées sous ArcGIS©9.2. La surface totale de chaque enveloppe peut être calculée, en limitant l'enveloppe du bâti isolé aux limites de la commune. Le nombre total de bâtis appartenant à chacune des enveloppes peut être défini par sélection des bâtis dont le centre se situe à l'intérieur de l'enveloppe considérée (Figure 14 ci-dessous).



Figure 14 Représentation sous ArcGIS©9.2 des enveloppes de bâti isolé (en bleu), bâti diffus (en vert) et bâti dense (en orange).

Le nombre de bâtis se répartit de la façon suivante :

- 150 bâtis pour le bâti isolé sur une surface de 1 553,16 ha ;
- 261 bâtis pour le bâti diffus sur une surface de 278,84 ha ;
- 1104 bâtis pour le bâti dense sur une surface de 189,43 ha.

Ainsi des densités moyennes peuvent ainsi être calculées et confrontées aux valeurs retenues pour les interfaces (p12 § 3.1.2.2) :

- pour le bâti isolé soit 0,097 bâti /ha, soit de l'ordre de 1 bâti /10 ha soit en surface 21 m²/ha (216 m² : surface moyenne du bâti, p 15 § 3.2.2) ;
- pour le bâti diffus soit 0,936 bâtis /ha, soit de l'ordre de 10 bâtis /10 ha soit en surface 202 m²/ha ;
- pour le bâti dense soit 5,828 bâtis /ha, soit de l'ordre 58 bâtis /10 ha soit en surface 1 259 m²/ha.

Pour mesurer la variabilité de la valeur de cette densité autour de ces valeurs moyennes, la densité a été calculée pour chacune des enveloppes de bâtis diffus (47 zones) d'une part et de bâtis denses (62 zones) d'autre part.

Les graphes et caractéristiques ci-dessous (Figure 15) représentant la répartition des valeurs de densité des différentes zones montrent une variabilité forte autour de la valeur moyenne calculée pour définir nos zones de bâtis.

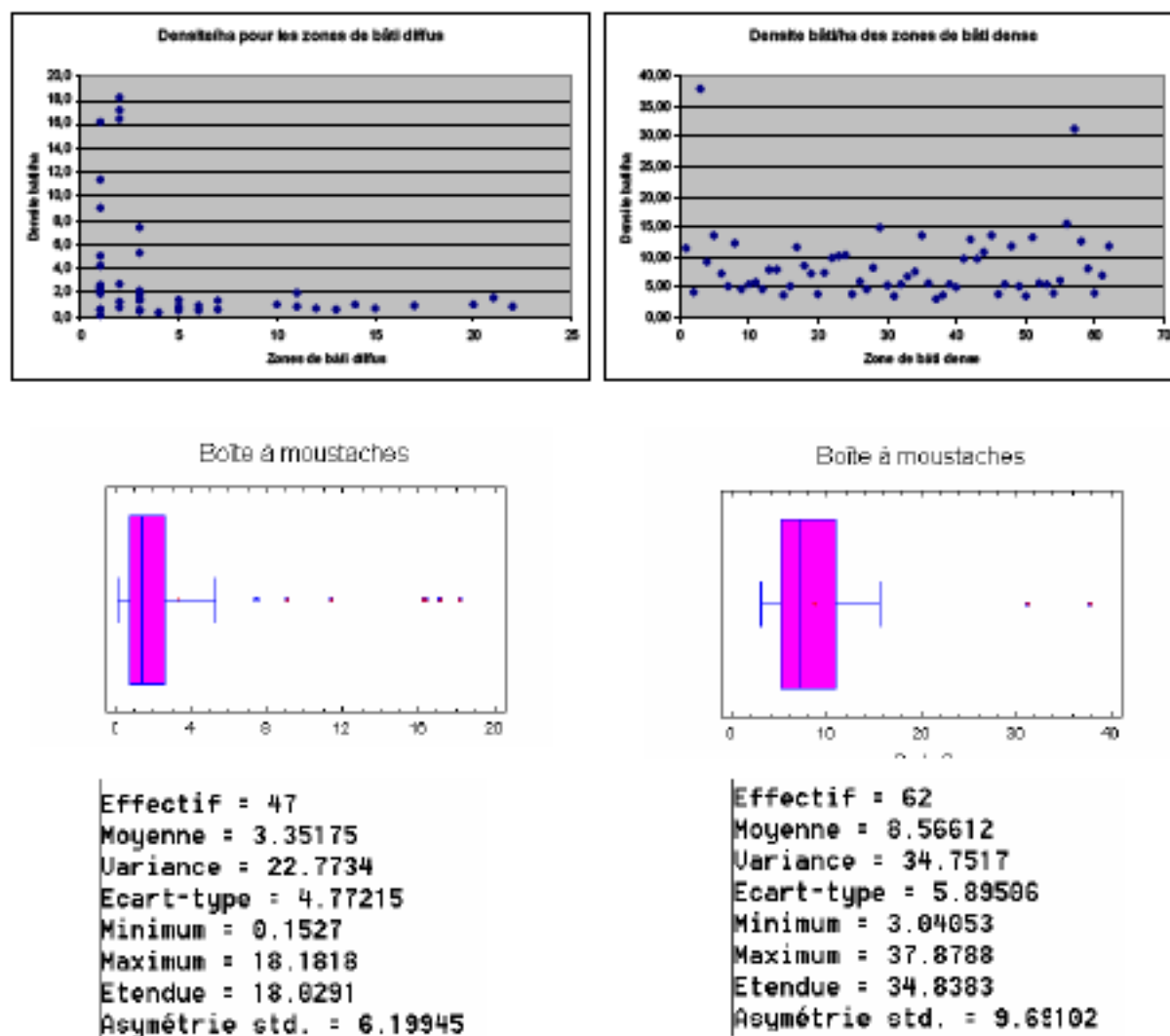


Figure 15 Nuage de points et caractéristiques statistiques des valeurs de densité des différentes zones de bâti diffus (gauche) et dense (droite)

On observe que la moyenne des densités s'écarte fortement de la densité moyenne et qu'elles doivent en fait être pondérées par la surface. Compte tenu de cette pondération par la surface, le critère densité devient difficile à exploiter car il est peu stable.

B. Méthode de cartographie des types d'habitat

La cartographie des types d'habitat nécessite de disposer d'une couche vecteur des données du bâti (polygone) ainsi que d'une couche vecteur délimitant les zones soumises à obligation légale de débroussaillage (OLD).

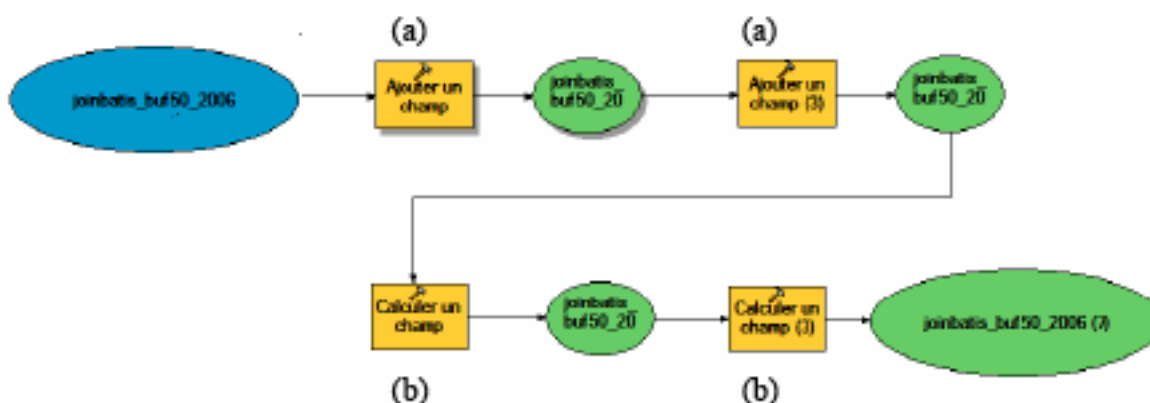
Observation : Une couche vecteur des données du bâti représentées par un point, et non par un polygone, peut également être utilisée mais un ajustement des distances définies pour le calcul des zones tampon est nécessaire. Les dimensions moyennes observées pour un bâti représenté par un polygone étant d'environ 15 m sur 15 m, la distance d de calcul des zones tampon autour d'un bâti représenté par un polygone est équivalente à une même distance d augmentée de 7,5 m pour le calcul de zones tampon autour d'un bâti représenté par un point.

La procédure de cartographie des interfaces habitat-forêt comporte plusieurs étapes successives. Elle a été mise au point en utilisant le logiciel SIG ArcGIS©9.2 et automatisée en partie avec l'outil Modèle builder. L'automatisation n'a pas pu être complète, car l'ensemble des fonctions développées dans le logiciel ne sont pas automatisables avec Model builder.

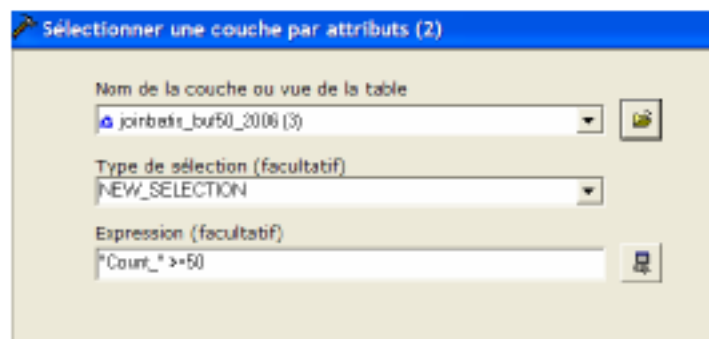
1. Sélectionner (a) les bâtis (*batisquick2006*) situés dans la zone soumise à obligation légale de débroussaillage (OLD), on obtient la couche des bâtis en interface habitat-forêt (*batis_qq_WUI*) et appliquer (b) une zone tampon de 50 m autour de ces bâtis. La couche ainsi obtenue doit alors être constituée (c) de polygones devenant chacun une entité (*buf50_2006*).



2. Effectuer une jointure spatiale de cette couche de zone tampon (*buf50_2006*) avec la couche de bâtis (*batis_qq_WUI*). La couche obtenue (*joinbuf50_2006*) fait apparaître un nouveau champ appelé Count qui indique le nombre de bâtis en interface comptabilisés dans chaque zone tampon. Deux champs sont ensuite ajoutés (a) Perimetre et Per_protect, ce dernier étant défini comme le ratio Perimetre sur Count. Les calculs de périmètre et le quotient du périmètre sur le nombre de bâtis Count sont réalisés (b) pour chaque polygone de la couche (*joinbuf50_2006*).

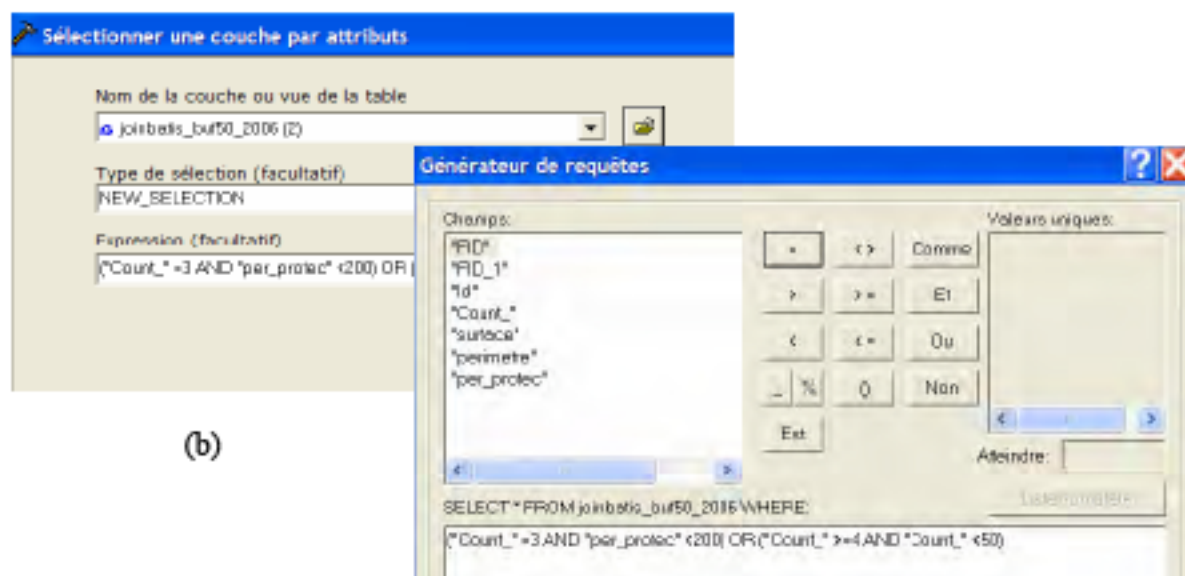


3. Procéder à la sélection des polygones constituant les différents types d'habitat selon le nombre de bâtis qu'ils contiennent. Ainsi sont identifiés trois groupes de polygones. Le premier est l'ensemble des polygones constituant l'habitat groupé. Le masque de sélection (a) sélectionne les polygones contenant au moins 50 bâtis.



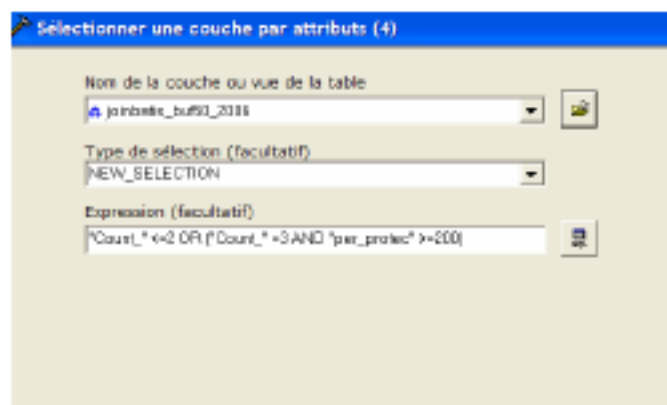
(a)

Le deuxième est l'ensemble des polygones constituant l'habitat diffus. Le masque de sélection (b) sélectionne les polygones contenant 3 bâtis et présentant un périmètre à protéger (Per_protect) inférieur à 200 m ou contenant 4 à moins de 50 bâtis.



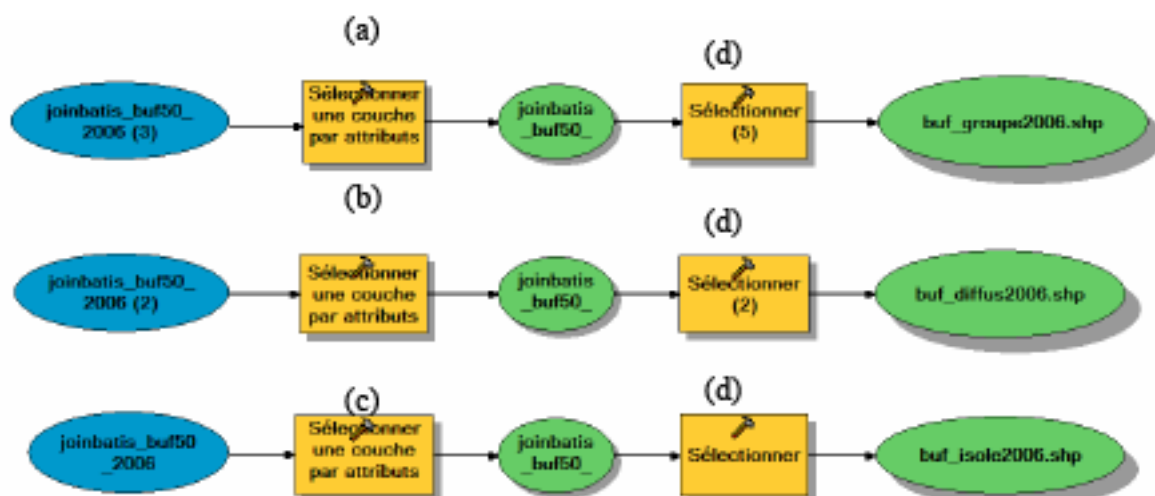
(b)

Le troisième est l'ensemble des polygones constituant l'habitat isolé. Le masque de sélection (c) sélectionne les polygones contenant 1 à 2 bâtis ou contenant 3 bâtis et présentant un périmètre à protéger (Per_protect) supérieur ou égal à 200 m.



(c)

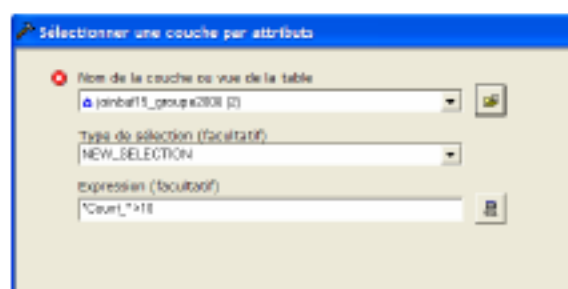
A partir de chacune de ces 3 sélections, trois nouvelles couches de polygones (*buf_groupe2006*, *buf_diffus2006*, *buf_isole2006*) sont créées (d).



4. Un traitement complémentaire est effectué sur les polygones de la couche relative à l'habitat groupé (*buf_groupe2006*) de façon à différencier un habitat groupé dense et un habitat groupé très dense. Les bâtis (*batisquick2006*) situés dans couche relative à l'habitat groupé (*buf_groupe2006*) sont sélectionnés (a), une zone tampon de 15 m est appliquée (b) autour de ces bâtis. La couche ainsi obtenue doit alors être constituée (c) de polygones devenant chacun une entité (*multibuf15_groupe2006*).

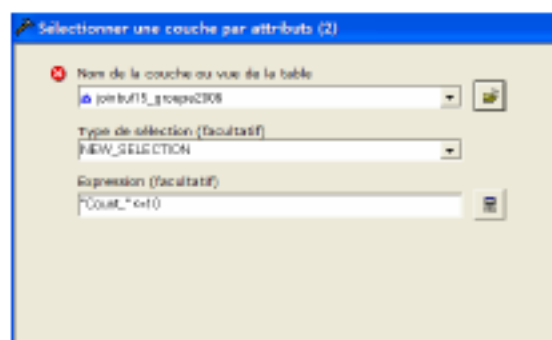


5. Effectuer une jointure spatiale de cette couche de zone tampon (*multibuf15_groupe2006*) avec la couche de bâtis (*batis_qq_WUI*). La couche obtenue (*joinbuf15_groupe2006*) fait apparaître un nouveau champ appelé Count qui indique le nombre de bâtis en interface comptabilisés dans chaque zone tampon. Procéder à la sélection des polygones constituant les deux sous classes de l'habitat groupé selon le nombre de bâtis qu'ils contiennent. Ainsi sont identifiés deux groupes de polygones. Le premier est l'ensemble des polygones constituant l'habitat groupé très dense. Le masque de sélection (a) sélectionne les polygones contenant plus de 10 bâtis. Une nouvelle couche est constituée (a') (*joinbuf15_groupetresdense2006*).



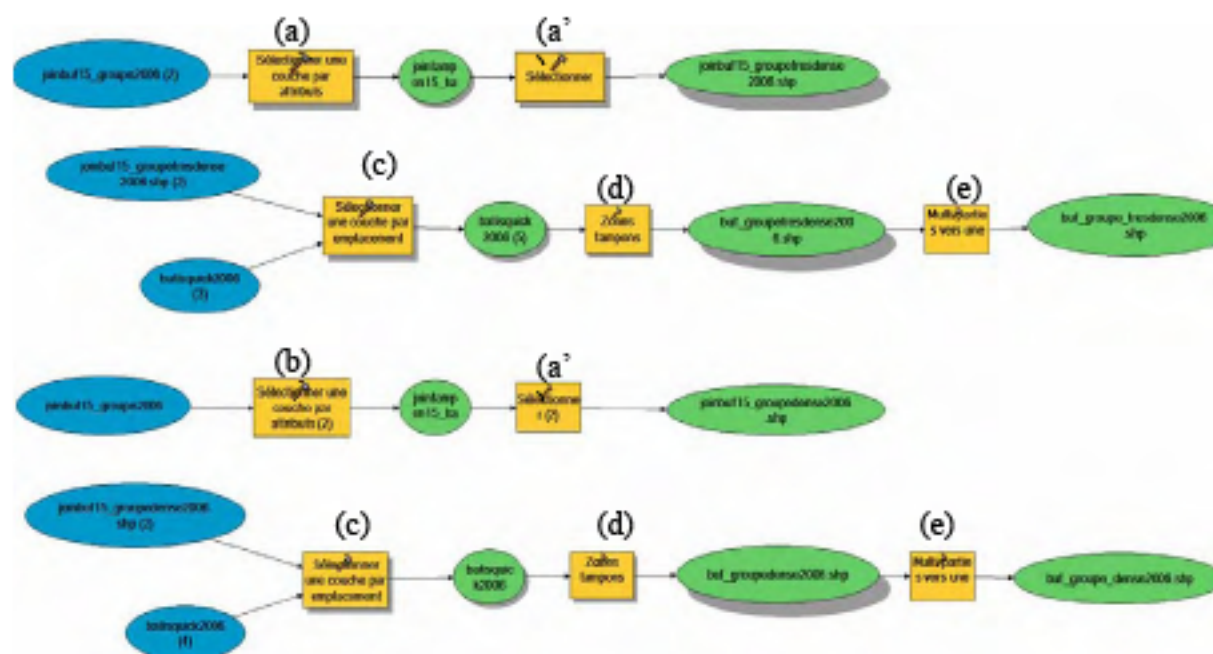
(a)

Le second est l'ensemble des polygones constituant l'habitat groupé dense. Le masque de sélection (b) sélectionne les polygones contenant jusqu'à 10 bâtis. Une nouvelle couche est constituée (a') (*joinbuf15_groupedense2006*).



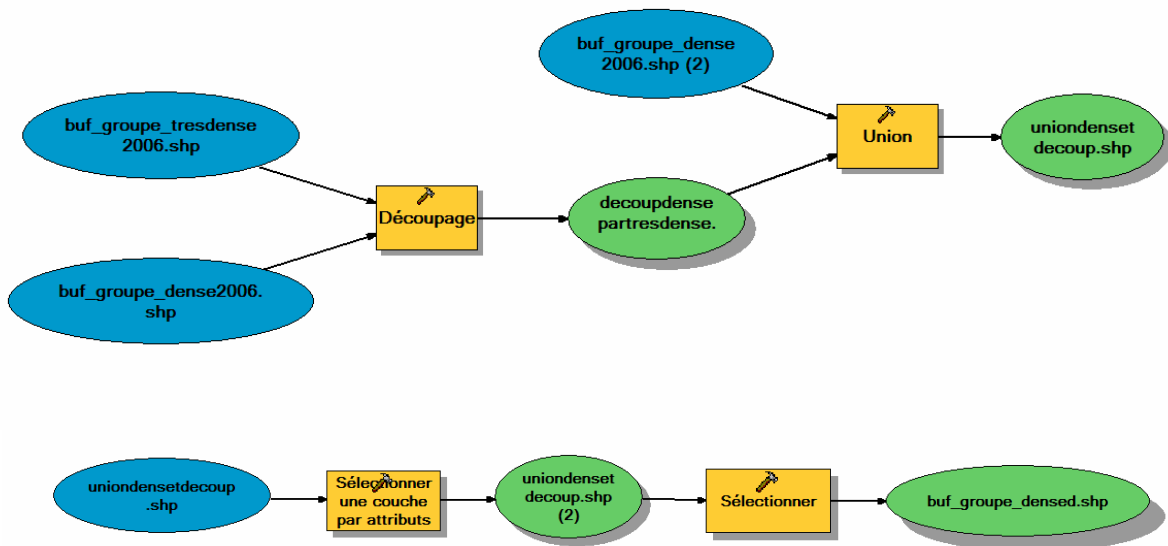
(b)

Les bâtis (*batis_qq_WUI*) de (*batisquick2006*) situés dans la couche relative à l'habitat groupé très dense (*joinbuf15_groupetresdense2006*) respectivement relative à l'habitat groupé dense (*joinbuf15_groupedense2006*) sont sélectionnés (c), une zone tampon de 50 m est appliquée (d) autour de ces bâtis. Les deux couches ainsi obtenues doivent alors être constituées (e) de polygones devenant chacun une entité (*buf_groupe_tresdense2006* et *buf_groupe_dense2006*).



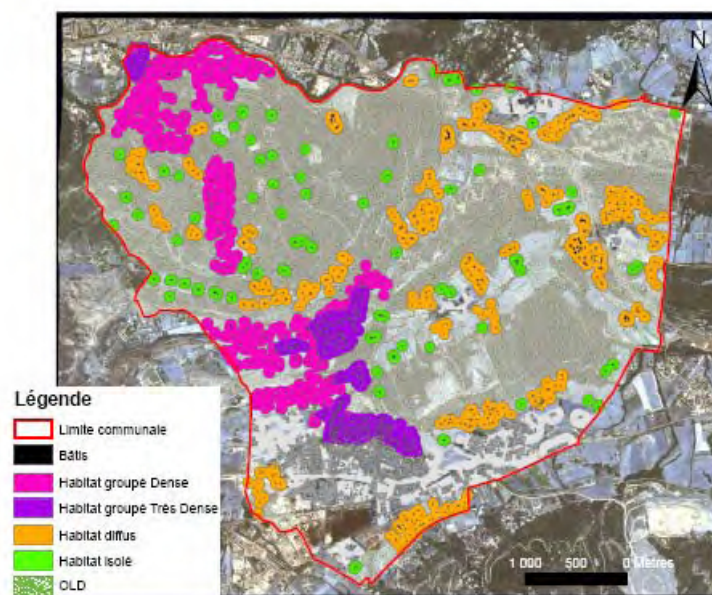
- Les polygones relatifs à l'habitat groupé très dense et à l'habitat groupé dense sont pour partie superposés. Il convient de les rendre jointifs en appliquant la règle suivante : un habitat groupé très dense est prioritaire sur un habitat groupé dense. Ainsi la couche des polygones de l'habitat groupé dense (*buf_groupe_dense2006*) est découpée (a) par la couche des polygones de l'habitat groupé très dense (*buf_groupe_tresdense2006*). La couche obtenue (*decoupdensepartresdense*) fait l'objet d'une union (b) avec la couche initiale de l'habitat groupé dense. Dans la couche résultante (*uniondenseetdecoup*), les

entités ne présentant pas une intersection avec la couche de l'habitat groupé très dense (*buf_groupe_tresdense2006*) sont sélectionnées (c) (elles correspondent aux entités ayant comme attribut -1 pour le champ créé par l'union et nommé automatiquement ID_buffer - le terme *buffer* est le terme anglais correspond à la « zone tampon »). Cette sélection (d) constitue alors la couche des polygones de l'habitat groupé dense



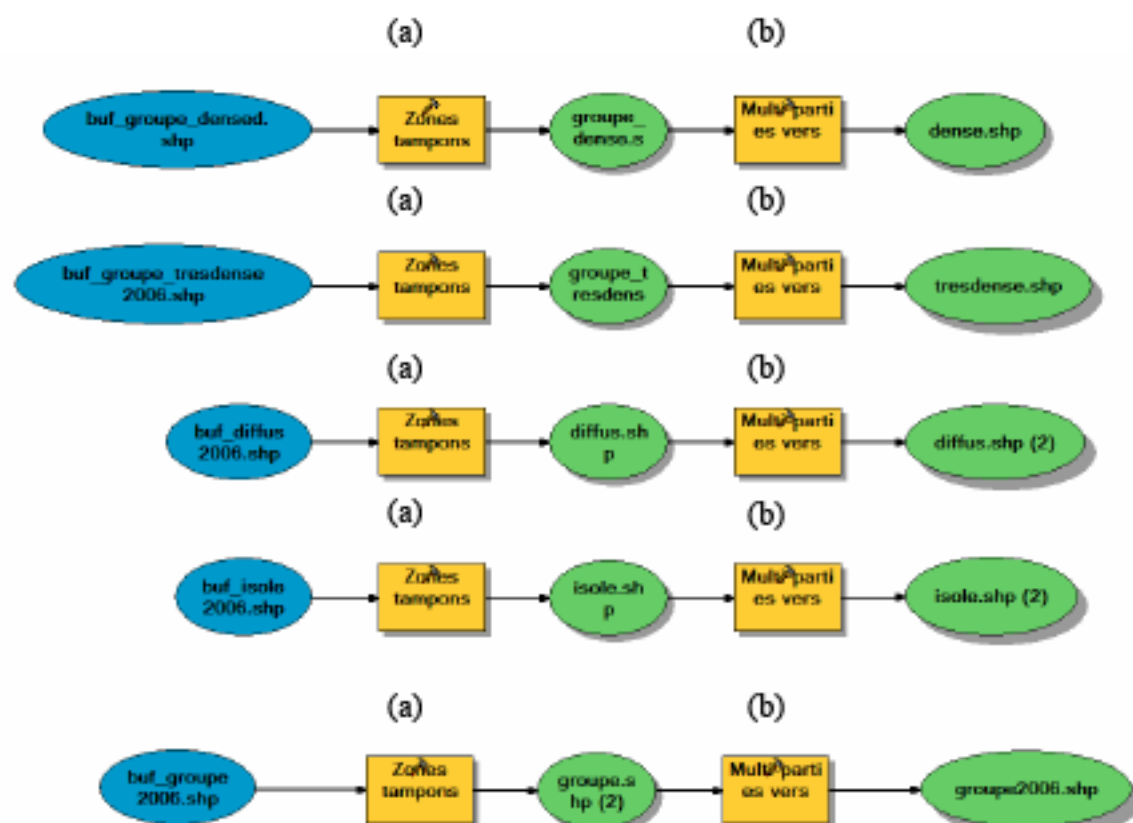
(*buf_groupe_densed2006*).

A ce stade de la procédure, on dispose d'une cartographie (Carte 1) des différents types d'habitat (habitat isolé, diffus, groupé dense et groupé très dense) représentés par des zones tampons jointives de 50 m autour des bâtis appartenant aux quatre catégories d'habitat rappelées ci-dessus.



Carte 1 Cartographie des 4 types d'habitat dans les zones tampons de 50 m (isolé, diffus, groupé dense et très dense)

7. La définition des interfaces a fixé une zone tampon de 100 m autour des bâtis. L'étape suivante consiste donc à représenter les types d'interfaces habitat-forêt. Une zone tampon de 50 m est réalisée autour de chaque des zones tampons (a) relatifs aux différents types d'habitat créés jusqu'alors (zones tampons de 50 m autour des bâtis appartenant aux différents types d'habitat définis). Les quatre couches ainsi obtenues doivent alors être constituées (b) de polygones devenant chacun une entité (*dense*, *tresdense*, *diffus* et *isole*). Il est fait de même pour la couche synthétique de l'habitat groupé (qui regroupe habitat groupé dense et très dense).



8. Les polygones relatifs aux quatre types d'habitat sont pour partie superposés. Il convient de les rendre jointifs en appliquant la règle suivante pour partie énoncée précédemment (§ 6) : un habitat groupé très dense est prioritaire sur un habitat groupé dense, un habitat diffus et un habitat isolé ; un habitat groupé dense est prioritaire sur un habitat diffus et un habitat isolé ; un habitat diffus est prioritaire sur un habitat isolé. Ainsi :

- la couche des polygones de l'habitat isolé (*isole*) est découpée (a) par la couche des polygones de l'habitat diffus (*diffus*). La couche obtenue (*decoup_isolepardiffus*) fait l'objet d'une union (b) avec la couche initiale de l'habitat isolé. Dans la couche résultante (*union_isole_decoup_isolepardiffus_2006*), les entités ne présentant pas une intersection avec la couche de l'habitat diffus (*diffus*) sont sélectionnées (c) (elles correspondent aux entités ayant comme attribut -1 pour le champ créé par l'union et nommé automatiquement *ID_buffer*). Cette sélection (d) constitue alors la couche des polygones de l'habitat isolé découpé par l'habitat diffus (*isole_decoupepardiffus_2006*) ;
- cette couche est elle-même découpée par la couche des polygones de l'habitat groupé (*groupe2006*). La couche obtenue (*decoup_isolepargroupe*) fait l'objet d'une union (b) avec la couche de l'habitat isolé découpé par l'habitat diffus (*isole_decoupepardiffus_2006*). Dans la couche résultante (*union_isole_decoup_isolepargroupe_2006*), les entités ne présentant pas une intersection avec la couche de l'habitat diffus (*diffus*) sont sélectionnées (c) (elles correspondent aux entités ayant comme attribut -1 pour le champ créé par l'union et nommé automatiquement *ID_buffer*). Cette sélection (d) constitue alors la couche des polygones de l'habitat isolé découpé par l'habitat diffus et par l'habitat groupé (*isole_decoupepardiffus&groupe_2006*) ;



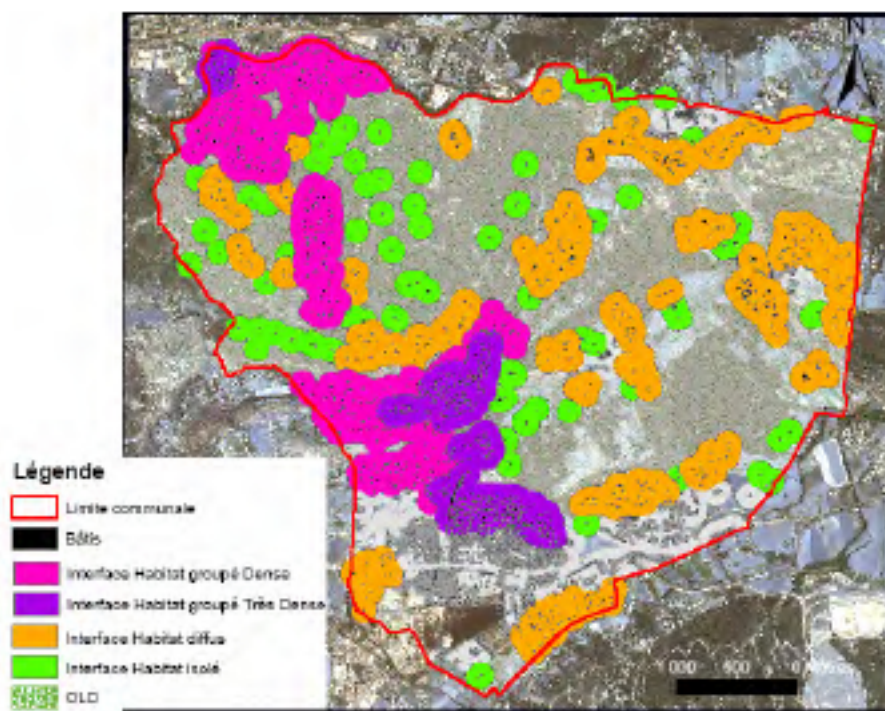
- la couche des polygones de l'habitat diffus (*diffus*) est découpée (a) par la couche des polygones de l'habitat groupé (*groupe2006*). La couche obtenue (*diffus_decoupepargroupe*) fait l'objet d'une union (b) avec la couche initiale de l'habitat diffus. Dans la couche résultante (*union_diffus_decoupepargroupe*), les entités ne présentant pas une intersection avec la couche de l'habitat groupé (*groupe2006*) sont sélectionnées (c) (elles correspondent aux entités ayant comme attribut -1 pour le champ créé par l'union et nommé automatiquement *ID_buffer*).

Cette sélection (d) constitue alors la couche des polygones de l'habitat diffus découpé par l'habitat groupé (*diffus_decoupepargroupe_2006*) ;

- enfin la couche des polygones de l'habitat groupé dense (*dense*) est découpée (a) par la couche des polygones de l'habitat groupé très dense (*tresdense*). La couche obtenue (*dense_decoupepartresdense*) fait l'objet d'une union (b) avec la couche initiale de l'habitat groupé dense. Dans la couche résultante (*union_dense_decoupepartresdense*), les entités ne présentant pas une intersection avec la couche de l'habitat groupé très dense (*tresdense*) sont sélectionnées (c) (elles correspondent aux entités ayant comme attribut -1 pour le champ créé par l'union et nommé automatiquement *ID_buffer*). Cette sélection (d) constitue alors la couche des polygones de l'habitat groupé dense découpé par l'habitat groupé très dense (*dense_decoupepartresdense*).



A ce stade de la procédure, on dispose d'une cartographie (Carte 2) des différents types d'habitat (habitat isolé, diffus, groupé dense et groupé très dense) représentés par des zones tampons jointives de 100 m autour des bâtis appartenant aux quatre catégories d'habitat définies précédemment.

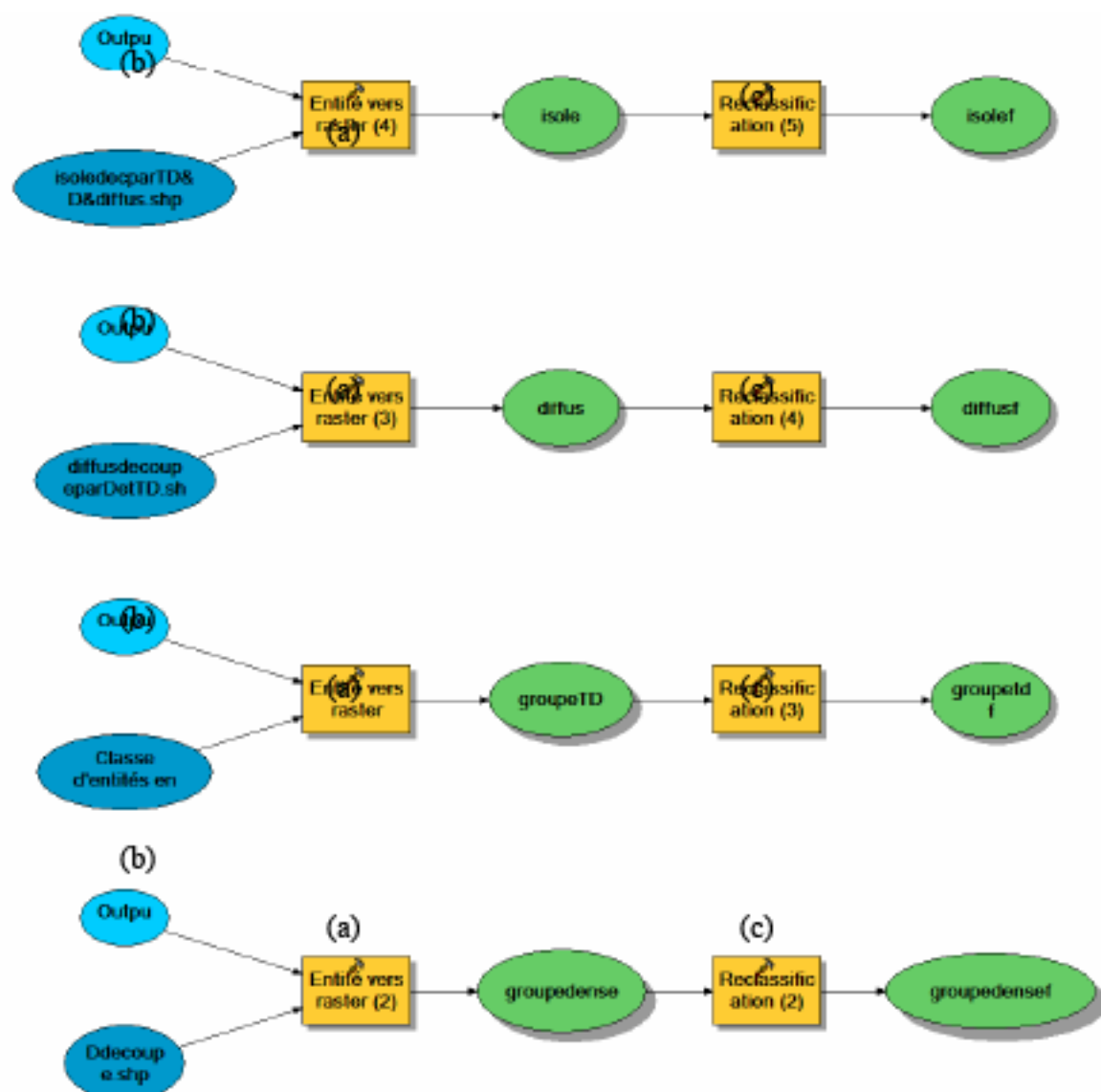


Carte 2 Cartographie des 4 types d'habitat dans buffers de 100 m (isolé, diffus, groupé dense et très dense)

9. Combiner les zones tampons caractérisant l'habitat avec l'indice d'agrégation

Chaque polygone relatif au type d'habitat est au format vecteur « shape ». Il est converti (a) au format raster (*isole*, *diffus*, *groupeTD*, *groupedense*) avec une résolution choisie, ici de 5 m (b). Les valeurs du raster, alors obtenu, sont reclassées (*isolef*, *diffusf*, *groupetdf*, *groupedensef*) (c) selon la codification suivante :

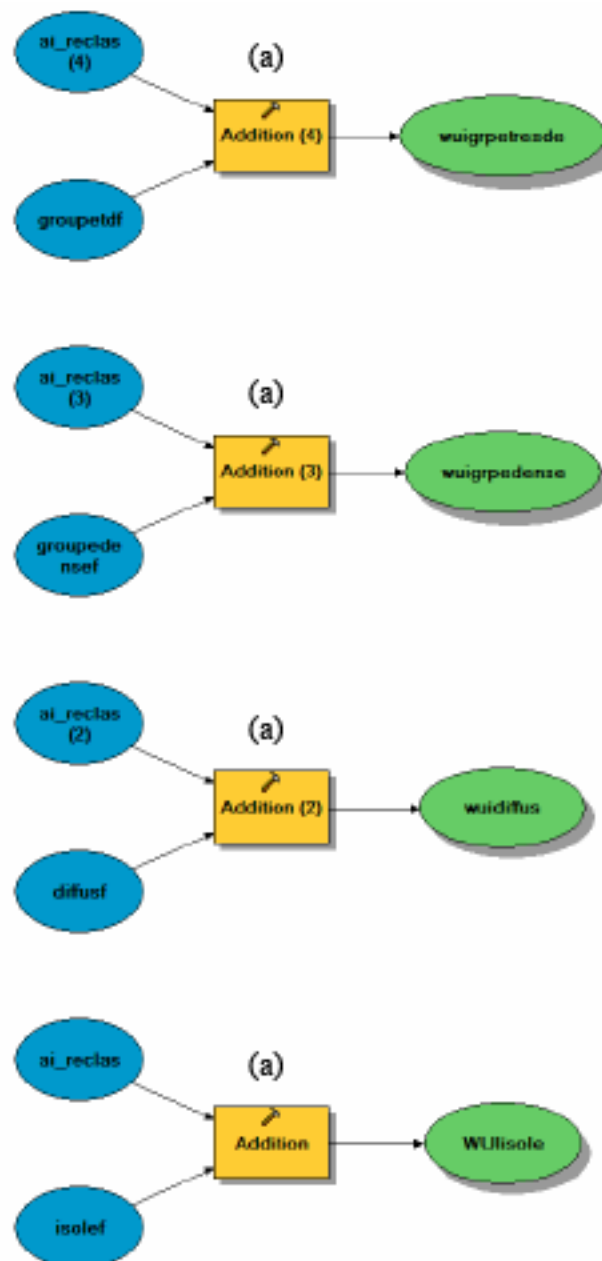
- Habitat isolé codé : 10 ;
- Habitat diffus codé : 20 ;
- Habitat groupé dense codé : 30 ;
- Habitat groupé très dense codé : 40.



Les 4 types de rasters obtenus codés 10, 20, 30 et 40, sont croisés avec le raster de l'indice d'agrégation (AI) calculé sur la végétation (rappel de la procédure définie en Annexe D). Ce dernier est codé en 1, 2 et 3 pour les valeurs suivantes d'AI :

- AI=0 codé : 1 ;
- AI < 95 % (AI faible) codé : 2 ;
- AI ≥ 95 % (AI fort) codé : 3.

La cartographie des interfaces habitat-forêt est alors obtenue en réalisant une addition (a) sur les rasters Types d'habitat (*isolef*, *diffusf*, *groupetdf*, *groupedensf*) et AI (*ai_reclass*). Les valeurs du raster résultant de l'addition (*WUIisole*, *WUIDiffus*, *WUIgrpedense*, *WUIgrpetresd*) varient comme précisé ci-après déterminant ainsi les types d'interface habitat-forêt.



- Interface habitat isolé en contact d'un AI=0 codé : 11
- Interface habitat isolé en contact d'un AI faible codé : 12
- Interface habitat isolé en contact d'un AI fort codé : 13
- Interface habitat diffus en contact d'un AI=0 codé : 21
- Interface habitat diffus en contact d'un AI faible codé : 22
- Interface habitat diffus en contact d'un AI fort codé : 23
- Interface habitat groupé dense en contact d'un AI=0 codé : 31
- Interface habitat groupé dense en contact d'un AI faible codé : 32
- Interface habitat groupé dense en contact d'un AI fort codé : 33
- Interface habitat groupé très dense en contact d'un AI=0 codé : 41
- Interface habitat groupé très dense en contact d'un AI faible codé : 42
- Interface habitat groupé très dense en contact d'un AI fort codé : 43

A l'issue de ce processus, on dispose d'une cartographie (Carte 3) des différents types d'interfaces habitat-forêt représentés par des zones tampons jointives de 100 m autour des bâtis appartenant aux différentes catégories définies précédemment.



Carte 3 Cartographie des interfaces habitat-forêt selon la codification définie précédemment.

C. Une approche terrain pour caractériser finement la structure interne des interfaces

1) Objectifs

Cette caractérisation par une approche terrain a pour objectifs de :

- Qualifier de façon précise les éléments constitutifs des interfaces qu'il s'agisse des éléments anthropiques (bâti, terrasse, surface non végétalisée, chemins, routes...) ou des éléments naturels (peuplements forestiers, aires débroussaillées, jardins d'agrément...);
- S'assurer de la qualité des classifications utilisées en particulier de la bonne reconnaissance de la végétation mais aussi de l'existence ou non de bâti, utilisées pour calculer les critères permettant la caractérisation des interfaces (agrégation de la végétation et présence de bâti);
- D'identifier certains objets caractéristiques ou de souligner certains aspects particuliers de l'état de la végétation sous couvert partiel...et de voir si les vols LIDAR et du spectroradiomètre seront capables de les identifier (positionnement et hauteur).

2) Zone d'étude

Trente interfaces habitat-forêt ont fait l'objet d'une description fine de terrain sur une zone d'étude MEYR, en limite et au cœur du Massif du Montaiguet. Située au sud d'Aix en Provence, cette commune présente une surface forestière importante ainsi qu'une urbanisation en forêt significative (ancien cabanon devenu résidence principale habitée). La description terrain des interfaces habitat-forêt a nécessité de pouvoir accéder aux propriétés privées. Une prise de contact avec la mairie de Meyreuil a permis de rencontrer l'adjoint au Maire chargé de l'environnement et des risques majeurs, et en particulier des actions concernant le risque d'incendie. Le contexte pour conduire l'étude était favorable car les habitants étaient particulièrement sensibilisés au problème du risque d'incendie. En effet la commune avait connu un incendie le 5 Août 2005 qui a brûlé 500 ha sur les 3 communes d'Aix en Provence, Gardanne et Meyreuil. Sur le territoire de Meyreuil, 22 ha ont été touchés et une quarantaine de maisons ont été frôlées par le feu n'entraînant que des dégâts sur la végétation. La commune a déposé une plainte contre X et une procédure a été lancée dès l'automne 2005 pour que les travaux de débroussaillage obligatoire soient réalisés par les propriétaires privés; la commune, quant à elle, a entrepris les travaux de débroussaillage qui lui incombaient le long des voies communales. La mairie a établi une lettre d'accréditation permettant ainsi à l'équipe de demander aux propriétaires l'accès de leur propriété pour procéder à la caractérisation de l'environnement de l'habitation en interface.

3) Protocole terrain

Le protocole de caractérisation des interfaces habitat-forêt a été élaboré de façon à être mis en œuvre sur une durée de 1h30 à 2h (durée acceptée par les propriétaires).

Avant le travail sur le terrain, une analyse sur les orthophotos de la BD ORTHO® IGN de 2003 a été réalisée sur chaque zone d'interface à caractériser.

Chaque bâti a été repéré par un identifiant représentant le centroïde du bâti repéré par ses coordonnées x, y dans le système Lambert II étendu. Trois zones tampons ont ensuite été représentées respectivement à 20m, 50m et 100m du contour du bâti (traitement réalisé avec le logiciel ArcGIS®9.2 (Figure 1). Les zones homogènes ont été dessinées sur un transparent

appliqué sur l'orthophoto de 2003, elles ont été confrontées aux classifications disponibles réalisées par télédétection à partir de l'image satellite Spot 5 de 2002, l'une au format raster (réalisation Dumas, 2002), l'autre au format vecteur Occsol Spot 5 (réalisation CRIGE PACA).



Figure 1 Identification des zones homogènes par photo-interprétation

Chaque zone dessinée constitue alors un polygone qui est numéroté et fait l'objet d'une caractérisation fine qualitative sur le terrain à l'appui d'une fiche terrain. L'orthophoto datant de 2003 et le travail de terrain étant réalisé en 2006, des écarts pourront être observés.

La caractérisation terrain s'est effectuée avec une équipe de trois personnes en mai et juin 2006. Chacun avait une tâche précise :

- Le premier renseignait la fiche terrain à partir de la description de chaque polygone identifié sur l'image. De nouveaux polygones ont pu être ajoutés et décrits parce que l'analyse d'image préalable ne les avait pas authentifiés ou parce qu'ils constituaient un objet particulier ;
- Le second annonçait le numéro du polygone qui devait être décrit, rectifiait éventuellement le contour de ce dernier sur papier et se repérait, le cas échéant, grâce à un GPS. Le GPS utilisé est le GPS MobileMapper CE Thales pour lequel un projet de type SIG aura été créé sous Arcpad rappelant les différentes zones tampons centrées sur le bâti de l'interface sur fond d'orthophoto puis installé sur le GPS. La précision est de l'ordre de 2.5 m, la valeur obtenue est la moyenne de 60 mesures effectuées par les satellites ;
- Le troisième aidait à la caractérisation des peuplements à l'appui de la clé photographique élaborée pour la Provence calcaire. Il prenait également des photos caractéristiques de l'interface habitat-forêt ou de points particuliers. Chaque photo était affectée à un polygone.

La fiche de terrain de description des interfaces habitat-forêt a été élaborée de façon à caractériser spatialement les éléments constitutifs de l'interface : le bâti proprement dit, les

éléments environnants du bâti et la végétation et à inventorier des éléments caractéristiques (tas de bois, citerne de gaz, piscine...).

Une fiche de terrain pour la caractérisation des interfaces schématisées sur la Figure 2 est élaborée et s'organise autour des points suivants :



Figure 2 Schématisation de l'interface habitat-forêt

- Identification de l'équipe de terrain
- Recueil de données décrivant l'environnement de l'interface : commune de situation, numéro d'identifiant du bâti décrit (identifiant du projet SIG), situation topographique (terrain plat, sommet de pente, forte pente, entre deux flancs de colline), pente et exposition moyennes (calculée dans un second temps sur SIG)
- Description du bâti principal, des bâtis annexes et de leur environnement (présence d'éléments pouvant aggraver le risque comme citerne de gaz, tas de bois proche de la maison...ou présence d'éléments pouvant favoriser la lutte (piscine, tuyau, réserve d'eau...)
- Description des accès : chemins, voies diverses...
- Description de la végétation (jardin d'agrément, peuplement forestier, état par rapport au débroussaillage avec un descriptif de la nature de la végétation présente, présence de litière au sol, pelouse arrosée, présence d'herbes sèches ...)

4) Base de données spatialisées issues du terrain

Une trentaine d'interfaces habitat-forêt ont été décrites. Les données ont été digitalisées (Carte 1) et sont localisées dans une base de données qu'il convient désormais d'analyser précisément.



Carte 1 Carte digitalisée des interfaces habitat-forêt décrites sur le terrain

D. Méthode de calcul de l'indice d'agrégation de la végétation

Le calcul de l'indice d'agrégation est réalisé à l'aide du logiciel FRAGSTAT© Version3.3.

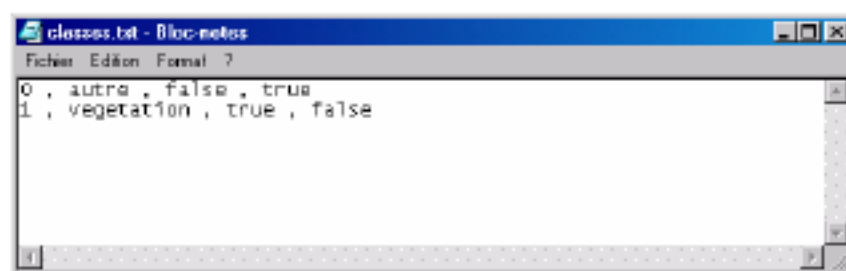
Ce logiciel gratuit peut être chargé sur le site suivant :

http://www.umass.edu/research/fragstats/documents/fragstats_documents.html

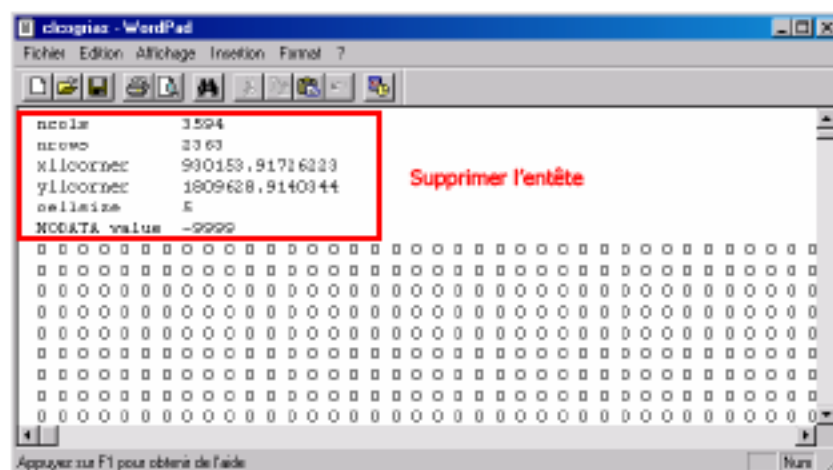
5) Avant le calcul

Avant de lancer le calcul, quelques étapes sont à réaliser.

- a) **Recodage de la classification en 2 classes** (fonction « Recode » menu « Interpreter » du logiciel Erdas Imagine© OU fonction « Reclassify » dans « Spatial Analyst » du logiciel ArcGIS©9.2) :
 - 0 : Autre ;
 - 1 : Végétation.
- b) **Création d'un fichier texte** permettant de renseigner les classes de la classification recodée



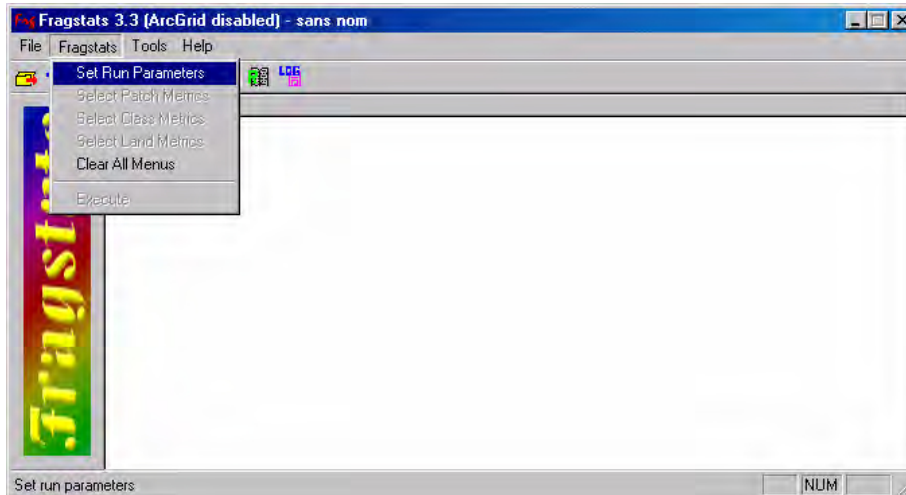
- c) **Conversion du fichier Raster en ASCII** : fonction « Imagegrid » (si le fichier de départ est en .img) suivie de la fonction « Gridascii » dans ArcInfo Workstation OU fonction « Raster to ASCII » dans le menu « Conversion Tools » de ArcToolbox du logiciel ArcGIS©9.2.
Une fois le fichier converti, l'ouvrir avec WordPad et supprimer l'entête du fichier. L'enregistrer sous un autre nom.



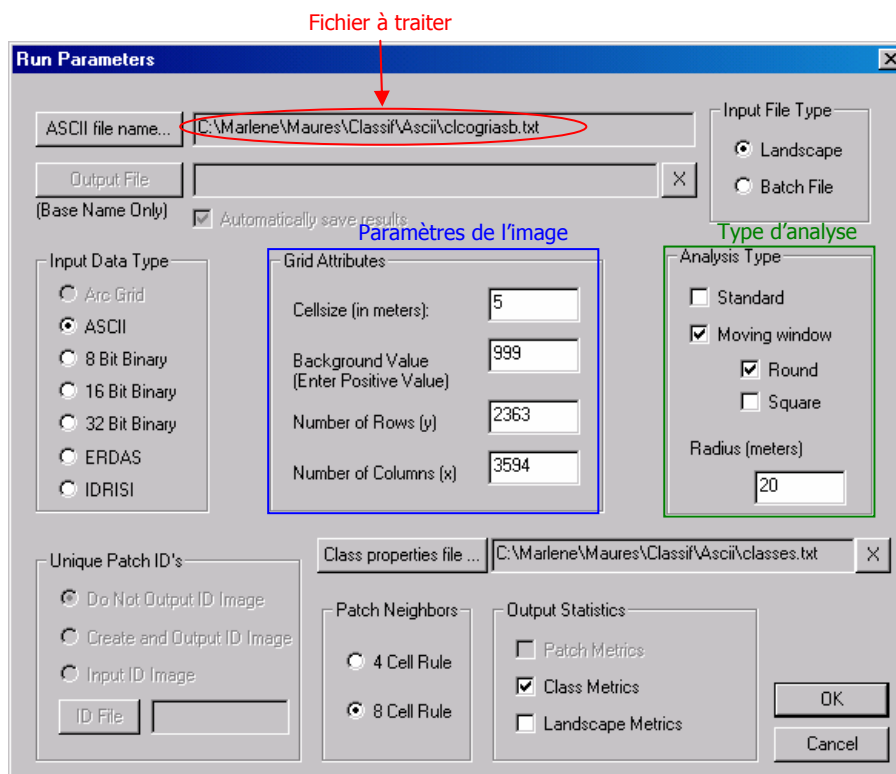
6) Calcul de l'indice d'agrégation

A présent, le logiciel FRAGSTAT©3.3 peut être lancé.

Dans le menu FRAGSTAT©3.3, sélectionnez le menu « Set Run Parameters ».

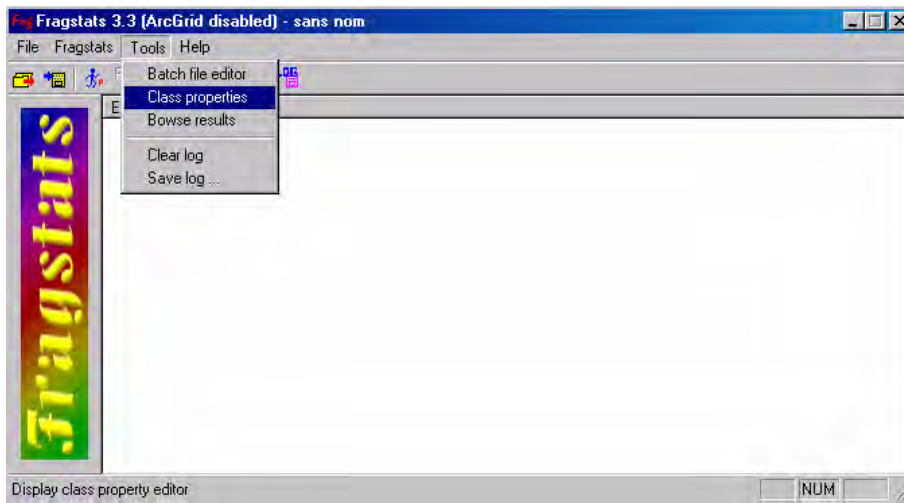


La fenêtre « Run Parameters » s'ouvre. Elle permet de renseigner les paramètres de l'image à prendre en compte pour le calcul, et de spécifier le type d'analyse utilisée.

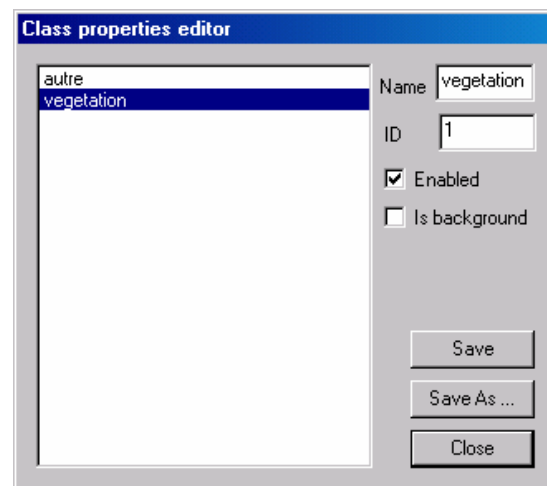
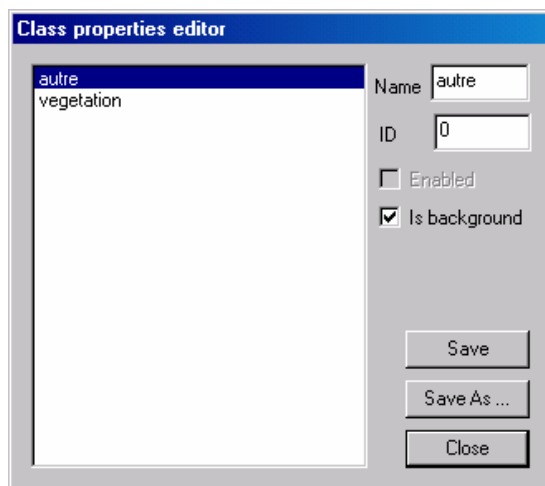


Les paramètres ci-dessus renseignés, cliquez OK.

Dans le menu « Tools », sélectionnez « Class Properties ».

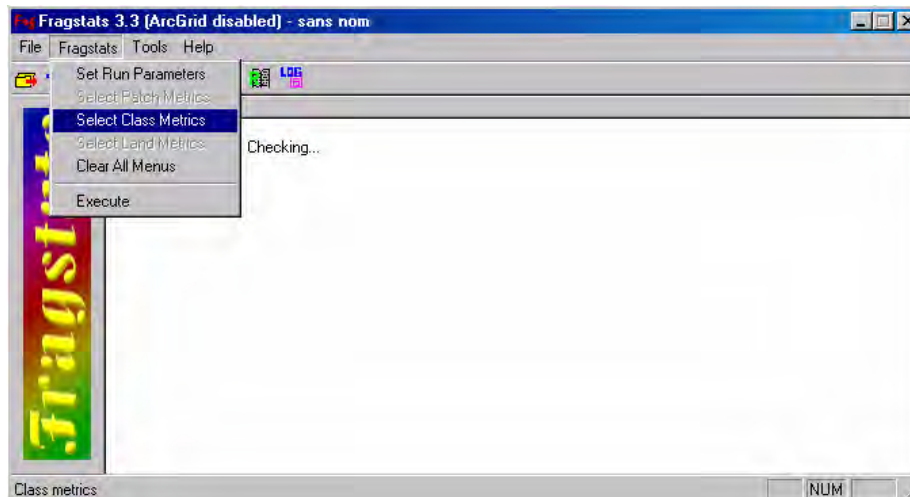


Cette étape permet de définir la classe sur laquelle va s'effectuer le calcul de l'indice d'agrégation. L'AI se calcule sur la classe Végétation : cochez « Enabled » pour la classe végétation et « Is background » pour la classe autre.

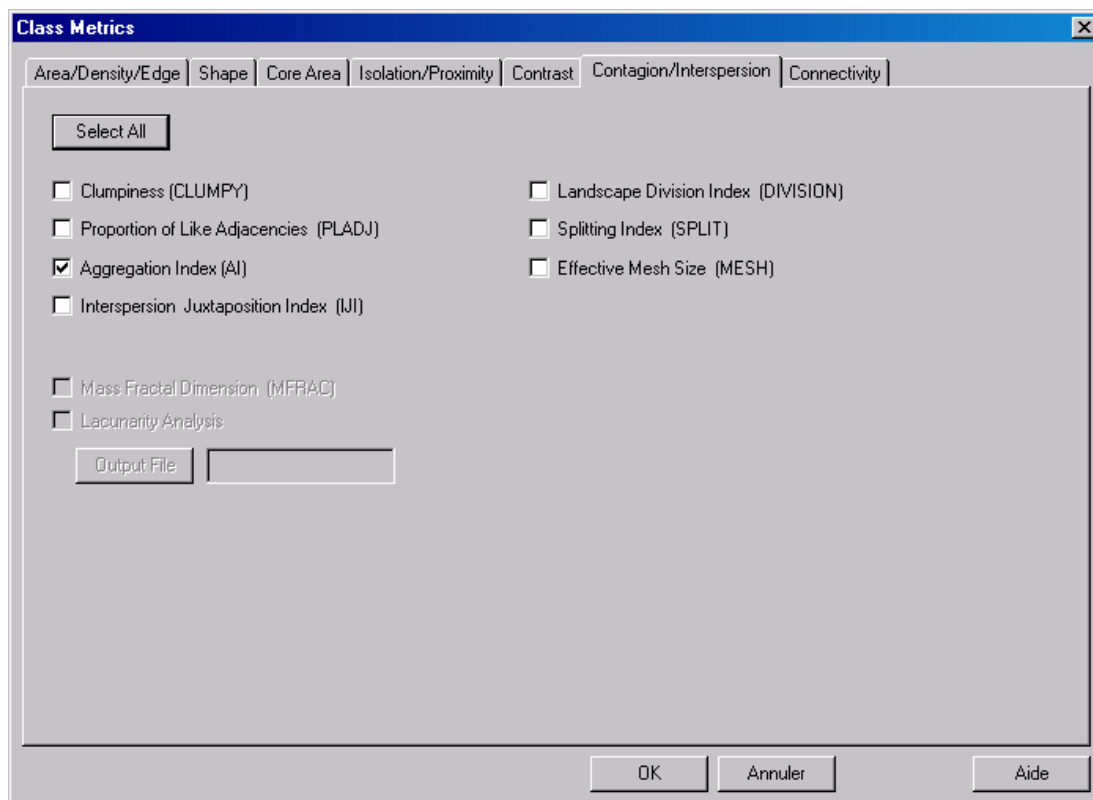


Sauvegardez (cliquer « Save ») puis fermez la fenêtre (cliquer « Close »).

Sélectionnez ensuite dans le menu FRAGSTATS©3.3 « Select Class Metrics ».



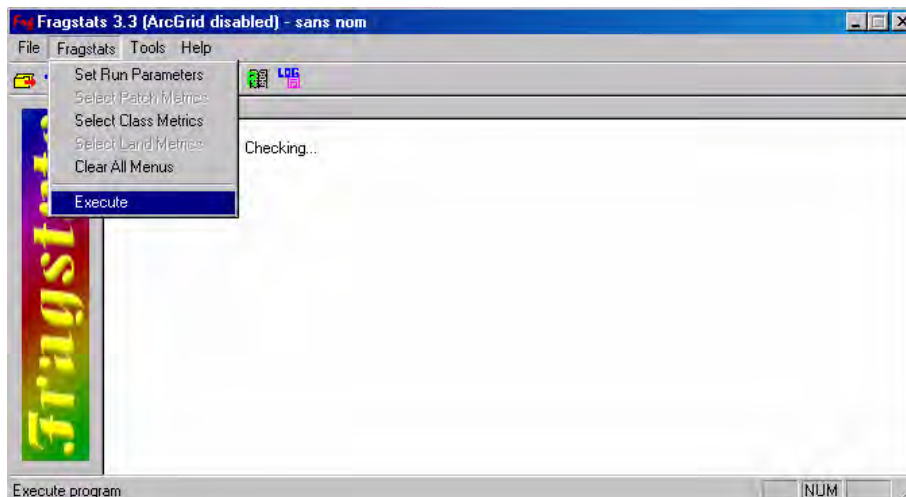
La fenêtre « Class Metrics » s'ouvre. Sélectionnez l'onglet « Contagion/Interspersion » et cochez la case correspondant à « Agregation Index (AI) ».



Cliquez OK.

Enfin, sélectionnez dans la menu FRAGSTATS©3.3 « Execute ».

Le calcul commence.



Une fois le calcul exécuté avec FRAGSTATS©3.3, il s'agit de lire le fichier avec le logiciel Erdas Imagine©. Pour cela, plusieurs étapes sont requises.

7) Après le calcul

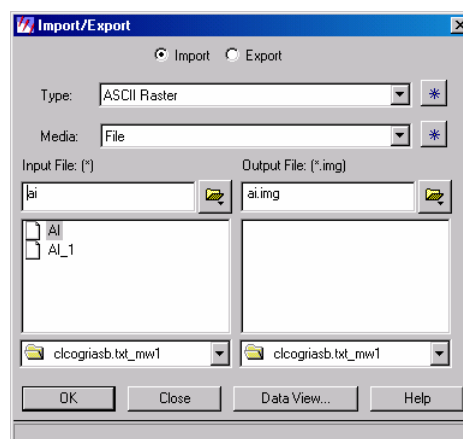
Après le calcul avec FRAGSTATS©3.3, le fichier Ascii doit être importé en raster pour être visualisé. Cette importation est présentée ci-dessous à partir des logiciels Erdas Imagine© et ArcGIS©9.2.

a) Importation du fichier Ascii en fichier .img sous Erdas Imagine©

Dans le menu principal de Erdas Imagine©, sélectionnez « Import ».

La fenêtre « Import/Export » s'ouvre.

Après avoir précisé le type de format à importer (cochez « Import » puis sélectionnez « ASCII Raster » dans le menu déroulant correspondant à « Type ») puis la source de la donnée (sélectionnez « File » dans le menu déroulant correspondant à « Media »), précisez le chemin du fichier à importer (menu déroulant dans « Input file ») puis celui du fichier créé (menu déroulant dans « Output file »).



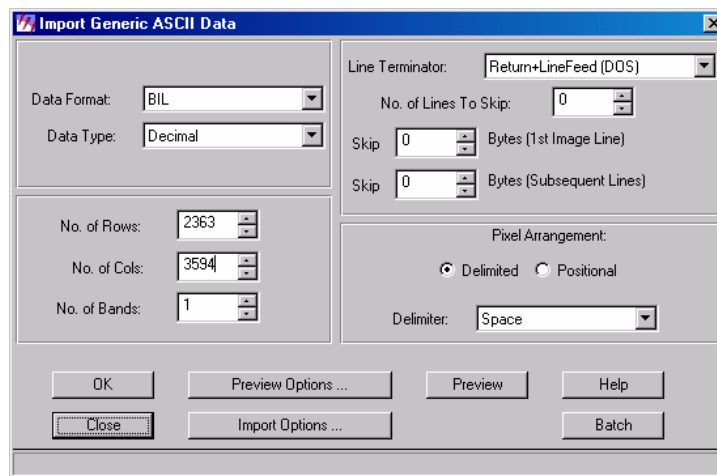
Cliquez OK.

La fenêtre « Import Generic ASCII Data » s'ouvre.

Sélectionnez « Return+LineFeed (DOS) » dans le menu déroulant correspondant à « Line Terminator ».

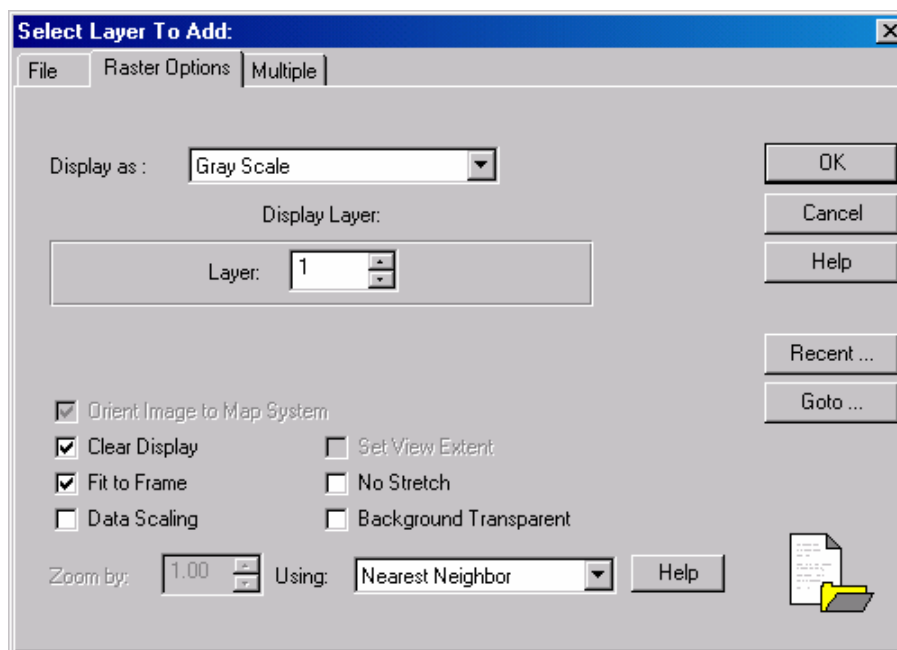
Précisez le nombre de lignes et de colonnes de l'image au niveau de « No. Of Rows » et « No. Of Cols ».

NB. : Le bouton « Import Options » permet de renseigner le format des nombres du fichier ASCII. Dans notre cas, cela n'est pas utile car le résultat du calcul de l'AI est codé sur 101 valeurs entières positives ($0 \leq AI \leq 100$) et que le format pris par défaut est Unsigned 8 bit (soit 256 valeurs entières positives possibles). Par contre, si le calcul générerait des valeurs décimales, des valeurs négatives et positives, etc., il faudrait modifier le format des nombres et préciser double ou float (pour les nombres décimaux), signed 8 bit (pour les nombres ayant un signe négatif et/ou positif), etc.

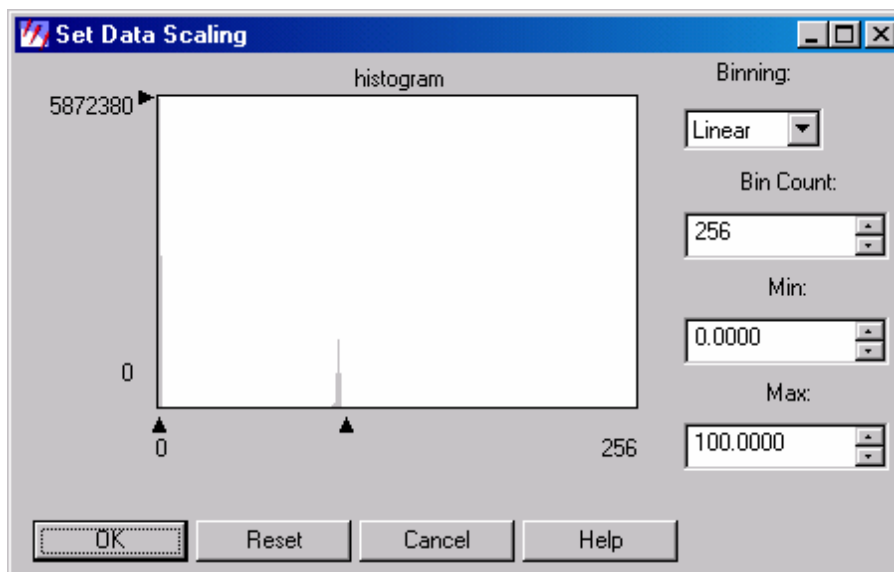


Cliquez OK. Le fichier est exporté.

Le fichier importé est ensuite visualisé en l'ouvrant dans le Viewer en échelle de gris.



Dans le menu Raster sélectionnez « Data Scaling ». La fenêtre « Set Data Scaling » s'ouvre.



Vérifiez que les bornes minimales et maximales correspondent bien à celles du calcul de l'indice d'agrégation (c'est le cas ici). Modifiez-les le cas échéant.

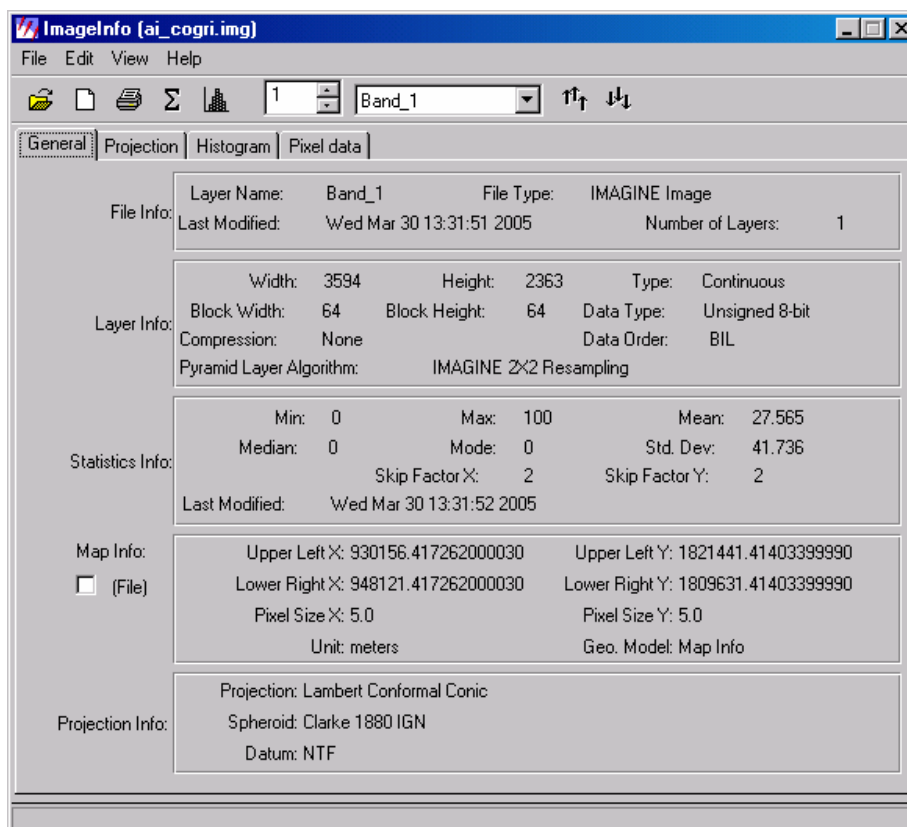
Cliquez OK.

Enregistrez l'image.

Enfin, l'image importée est dénuée de toute référence spatiale, elle ne peut pas être combinée à d'autres couches. Il faut lui redéfinir son géoréférencement.

Dans le menu « Utility », sélectionnez « Layer Info ».

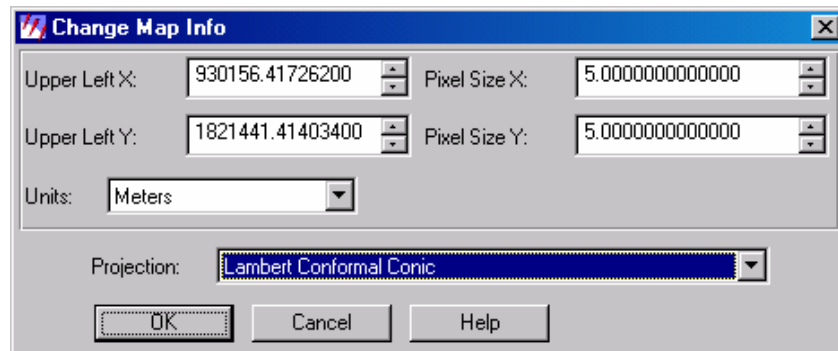
La fenêtre « Image Info » s'ouvre (voir page suivante).



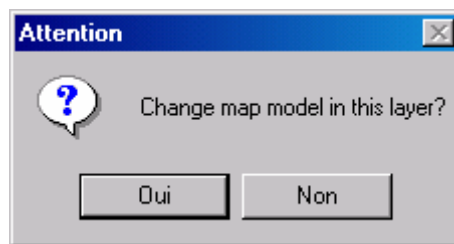
Dans le menu « Edit », sélectionnez « Change Map Model ».

La fenêtre « Change Map Info » s'ouvre.

Renseignez les coordonnées du point haut gauche de l'image (ce sont les mêmes que celles de l'image IMG avant la transformation sous ArcInfo), la taille du pixel (ici 5 mètres), les unités de la carte (ici mètres) ainsi que la projection utilisée (ici Lambert Conforme Conique)



Cliquez OK. La fenêtre ci-dessous s'ouvre.

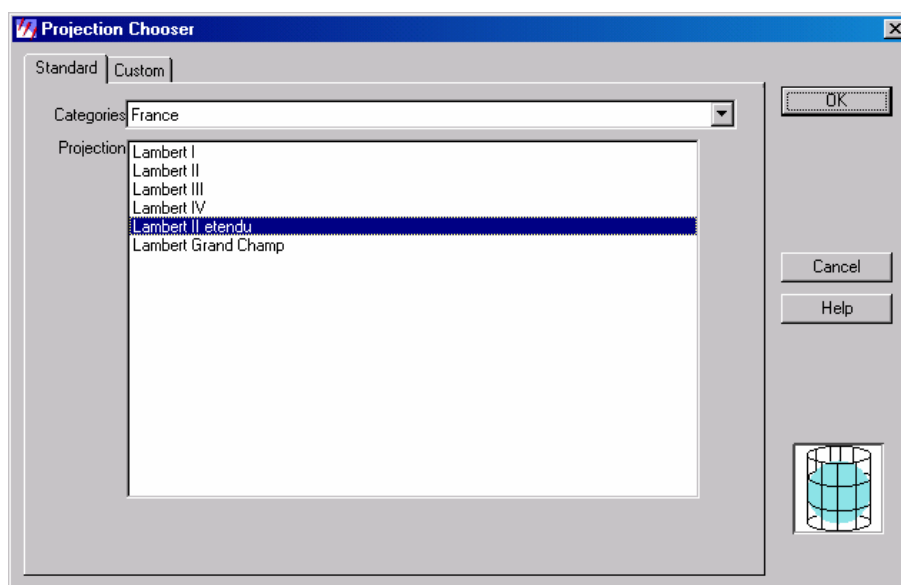


Cliquez Oui.

Sélectionnez ensuite dans le menu « Edit » « Add/Change Projection ».

Dans le menu déroulant correspondant à « Categories », sélectionner « France ».

Sélectionner la projection correspondante (ici « Lambert II étendu »).



Cliquez sur OK. La fenêtre ci-dessous s'ouvre.

E. Développement d'une automatisation de la procédure de cartographie des interfaces habitat-forêt sous ArcGIS©9.3

Un modèle conceptuel des traitements a été mis au point, il est illustré par la Figure 1.

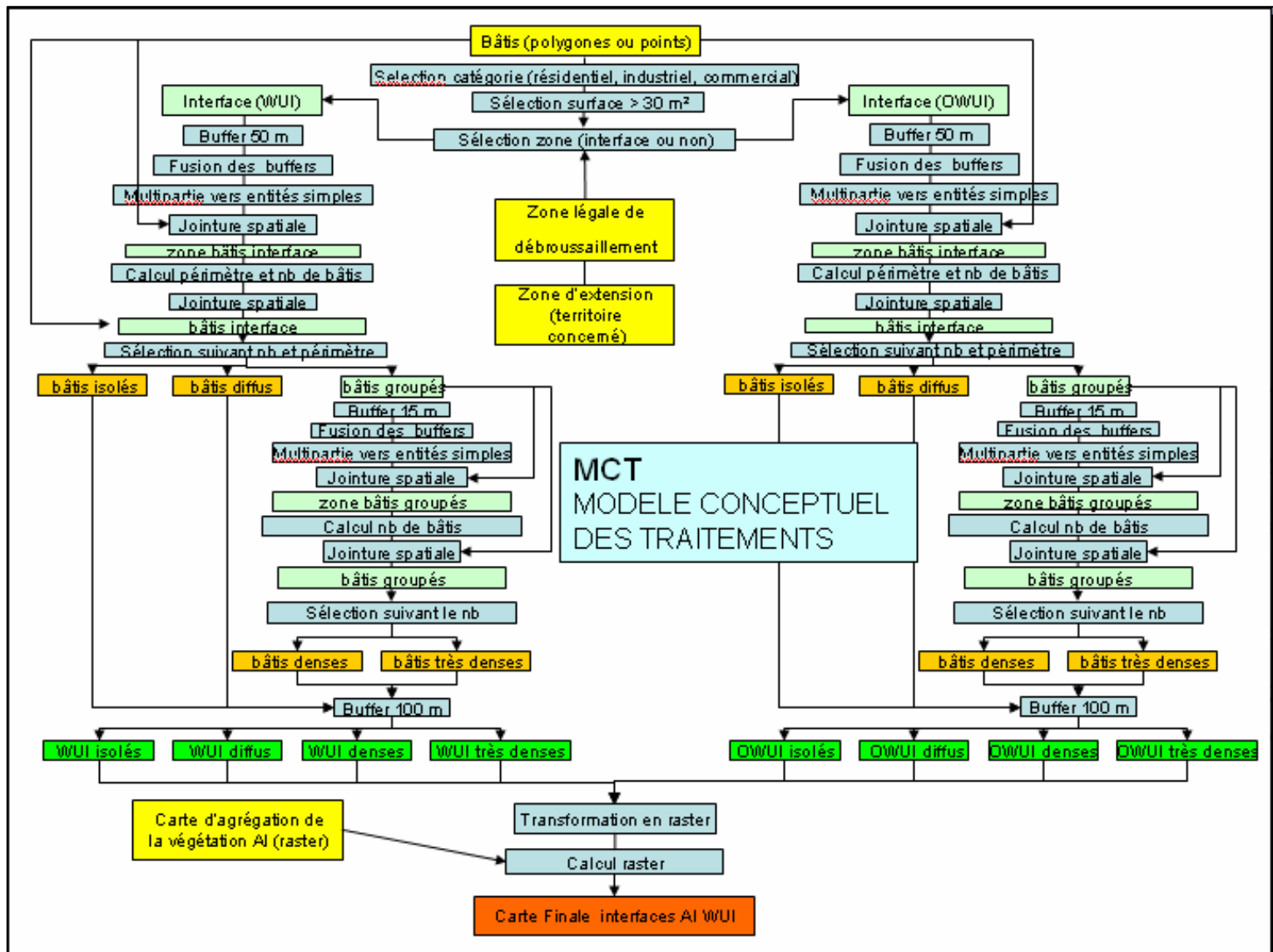


Figure 1 Modèle conceptuel de traitement pour la cartographie des interfaces habitat-forêt. Source Bouillon.B

L'automatisation par le modèle Builder sous ArcGIS©9.3, correspondant au modèle conceptuel des traitements de la Figure 1 est en cours. Elle est illustrée par l'organigramme de la Figure 2. Elle fait l'objet de tests de validation.

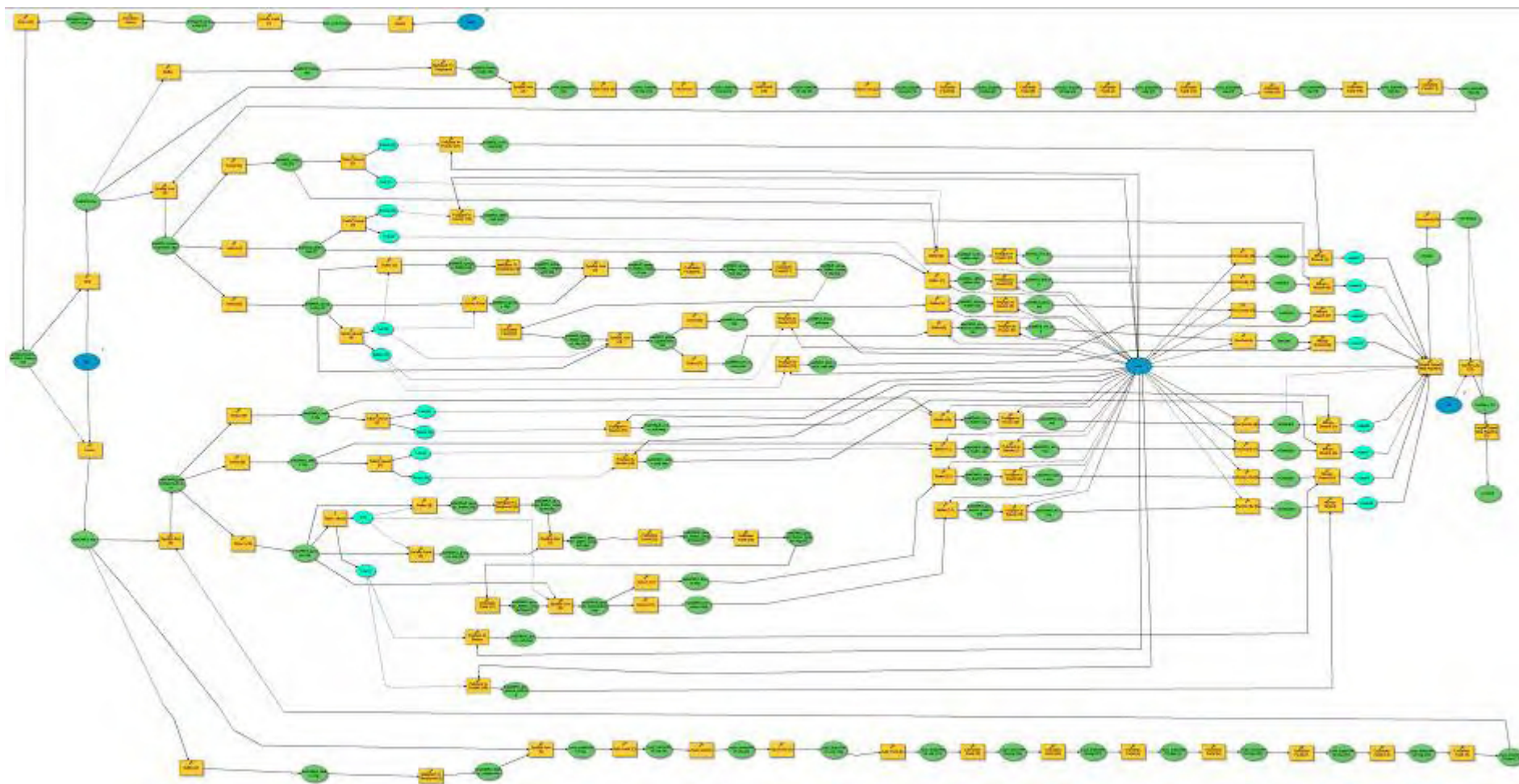


Figure2 Organigramme développé sous Modèle Builder pour cartographier automatiquement les interfaces habitat-forêt

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

F. Boîtes à moustaches des variables caractérisant les types de territoire

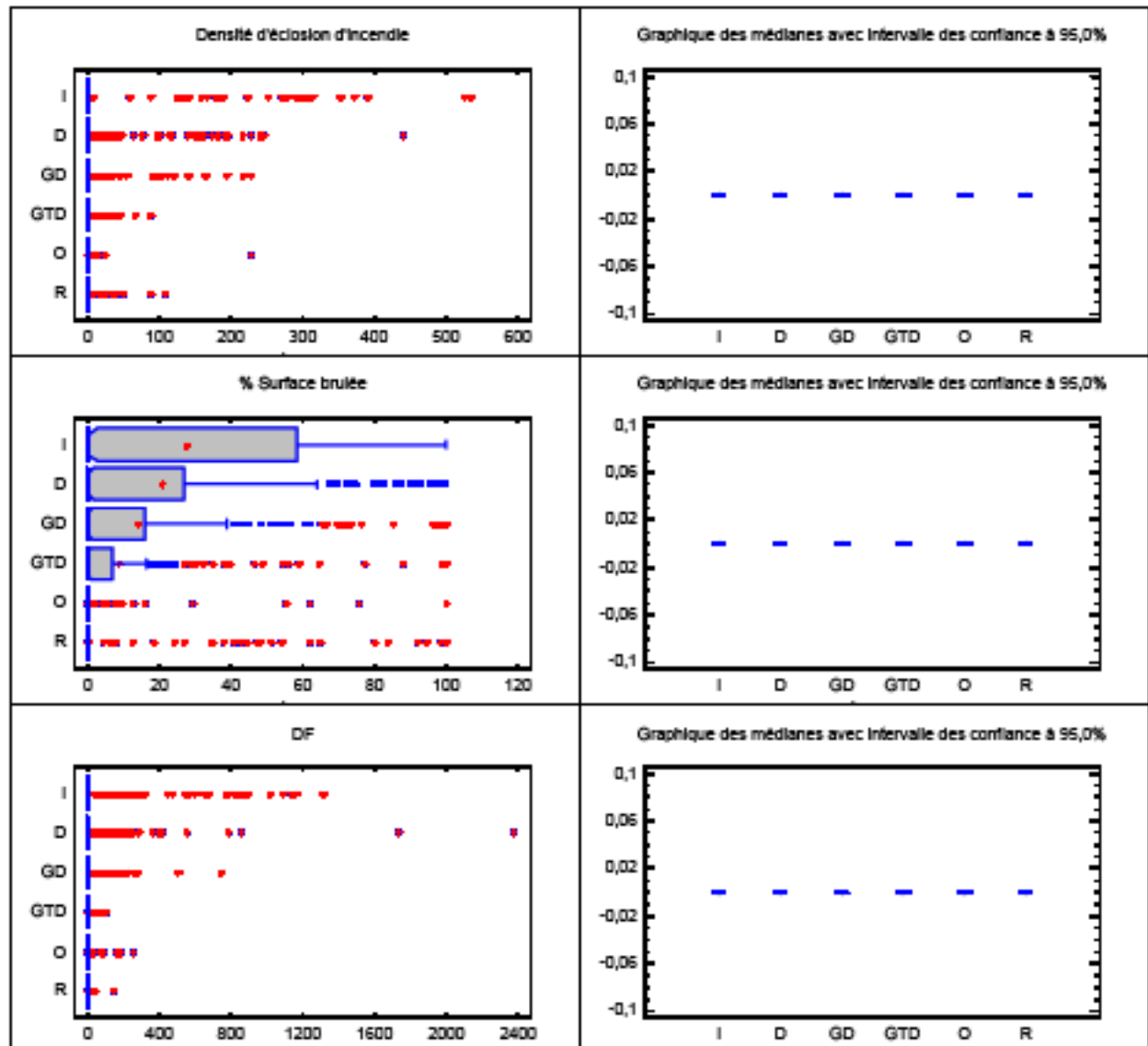


Figure 1 Boîtes à moustaches des variables DE, DI et SB pour les 6 échantillons, types de territoire

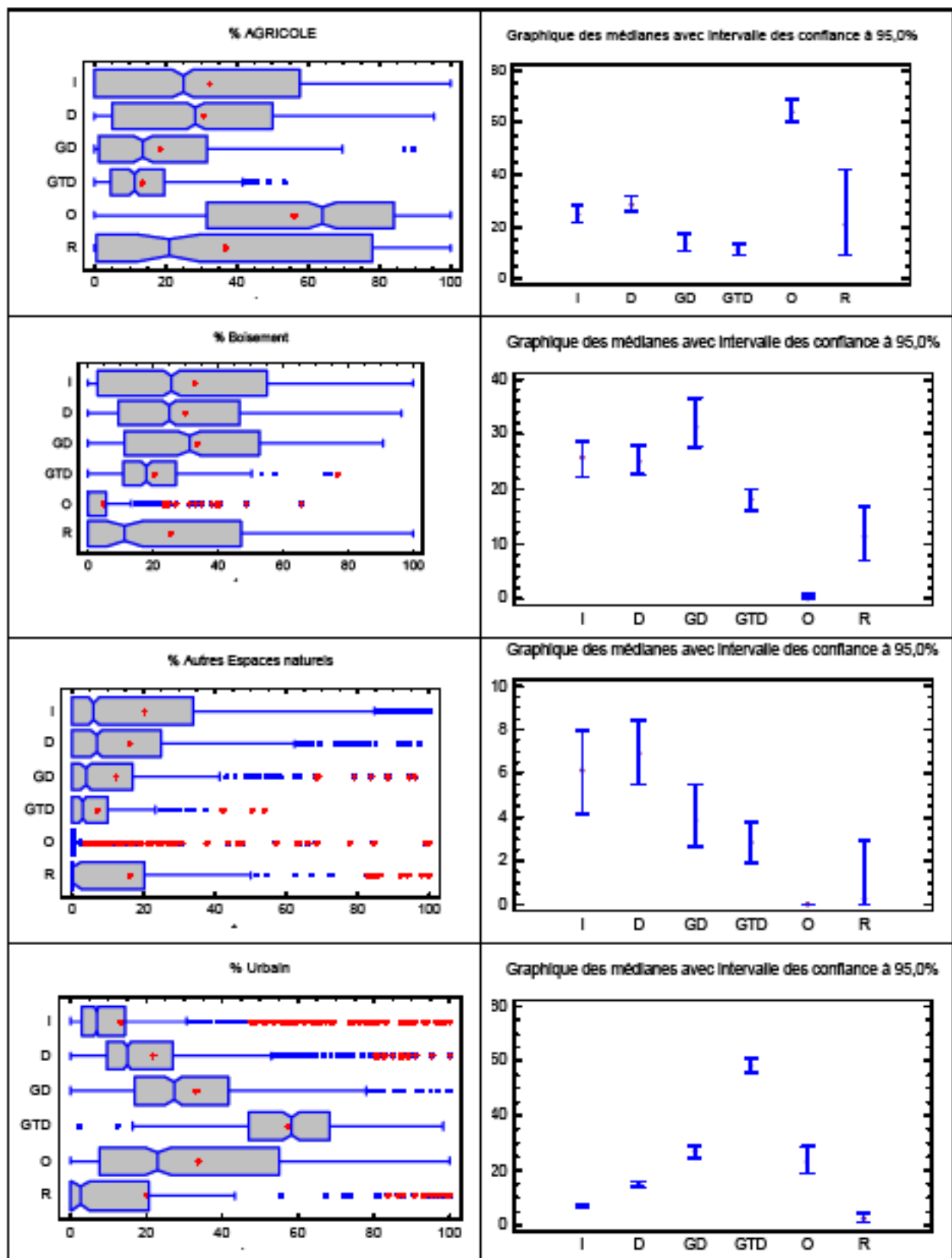


Figure 2 Boîtes à moustaches des variables AGR, BOI, ESN et URB

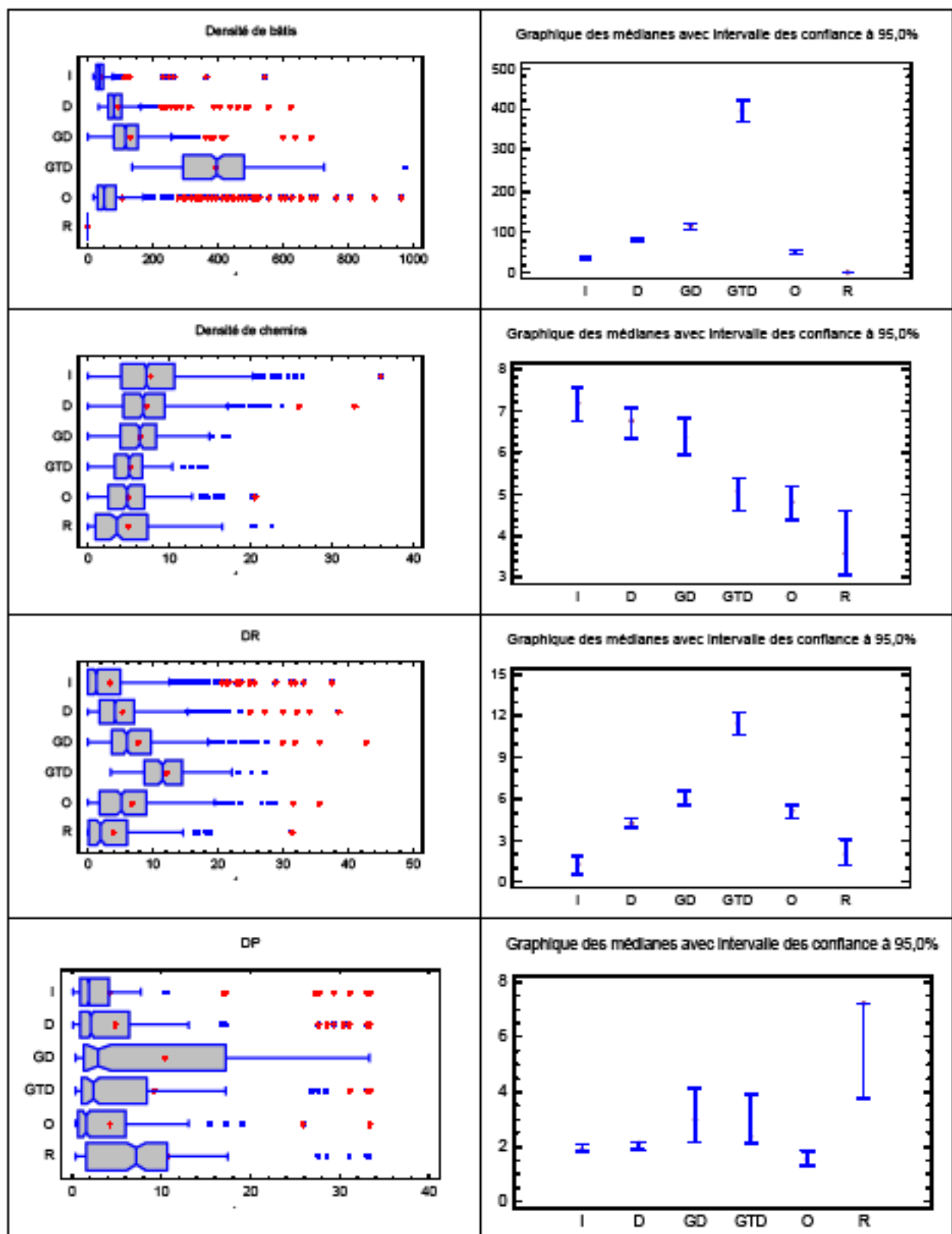


Figure 3 Boîtes à moustaches des variables DB, DC, DR et DP

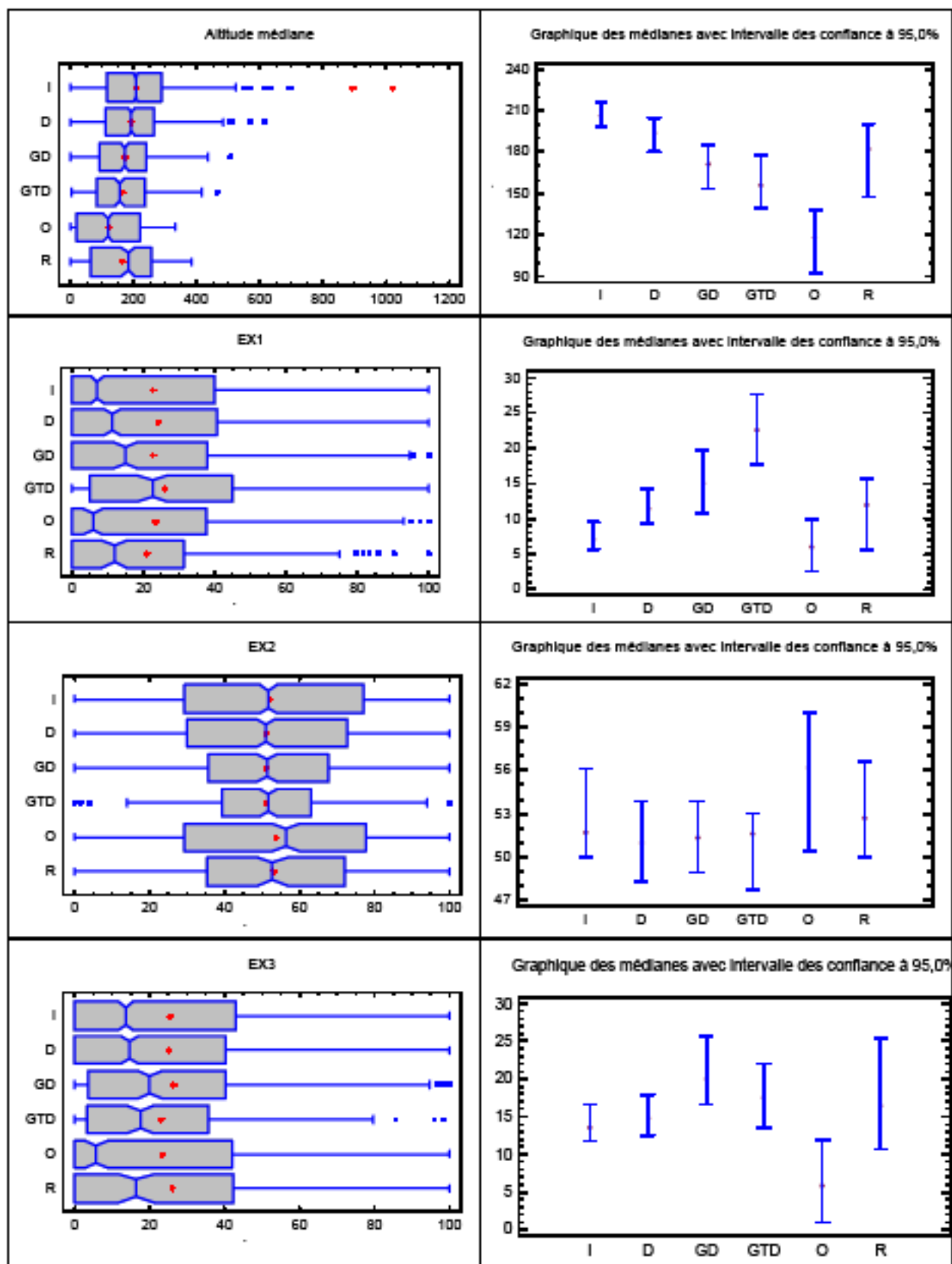


Figure 4 Boîtes à moustaches des variables ALT, EX1, EX2 et EX3

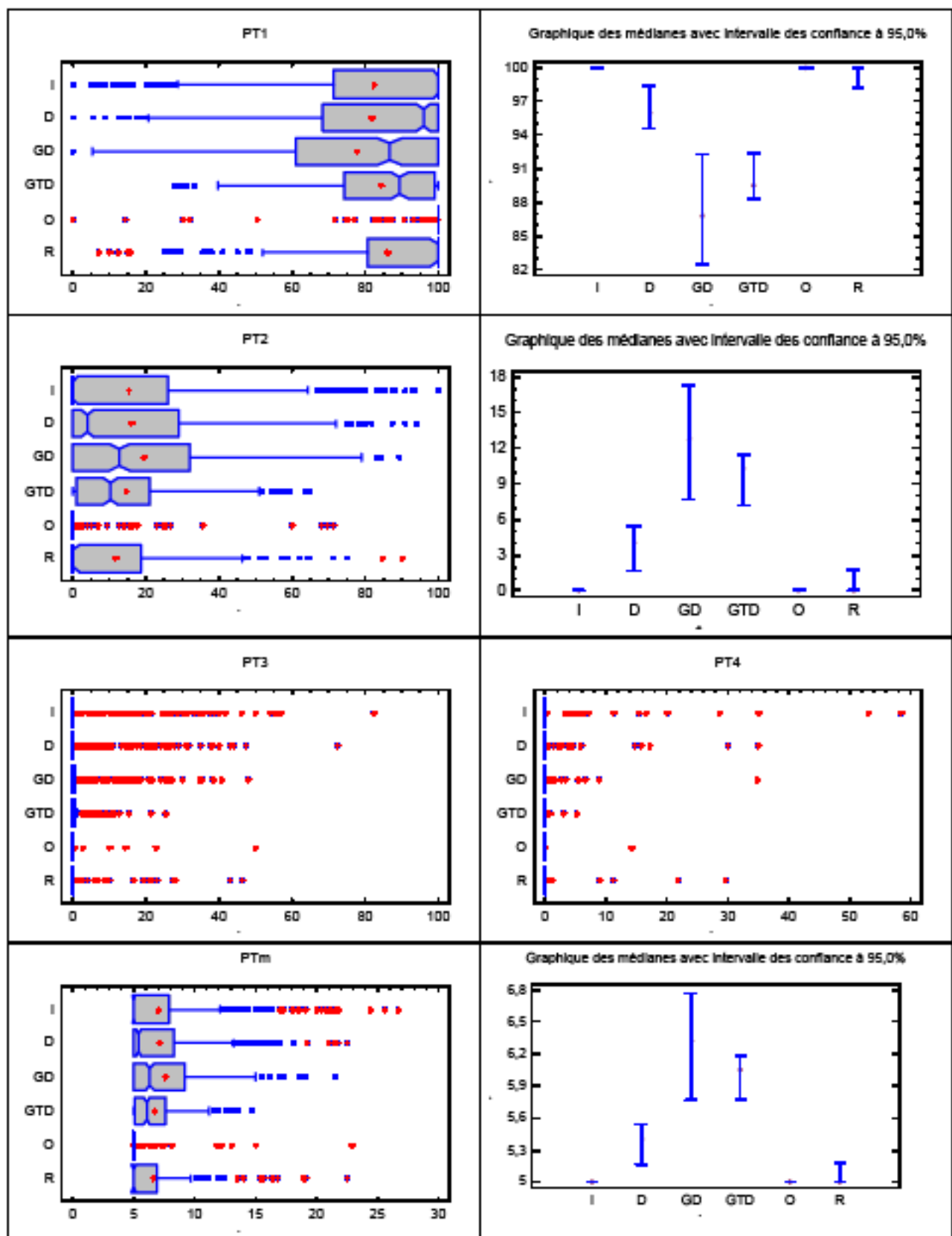


Figure 5 Boîtes à moustaches des variables PT1, PT2, PT3, PT4 et PTm

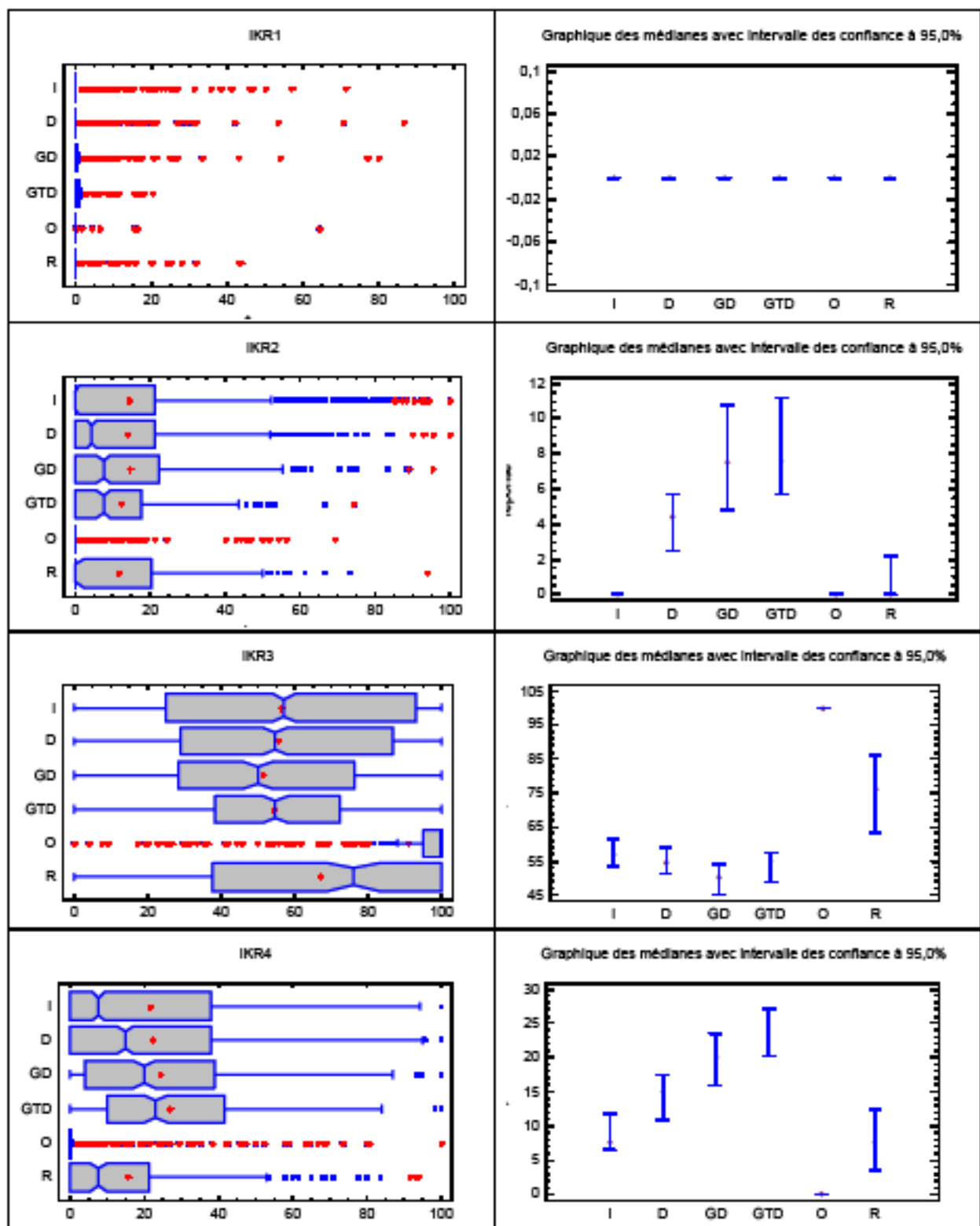


Figure 6 Boîtes à moustaches des variables *IKR1*, *IKR2*, *IKR3* et *IKR4*

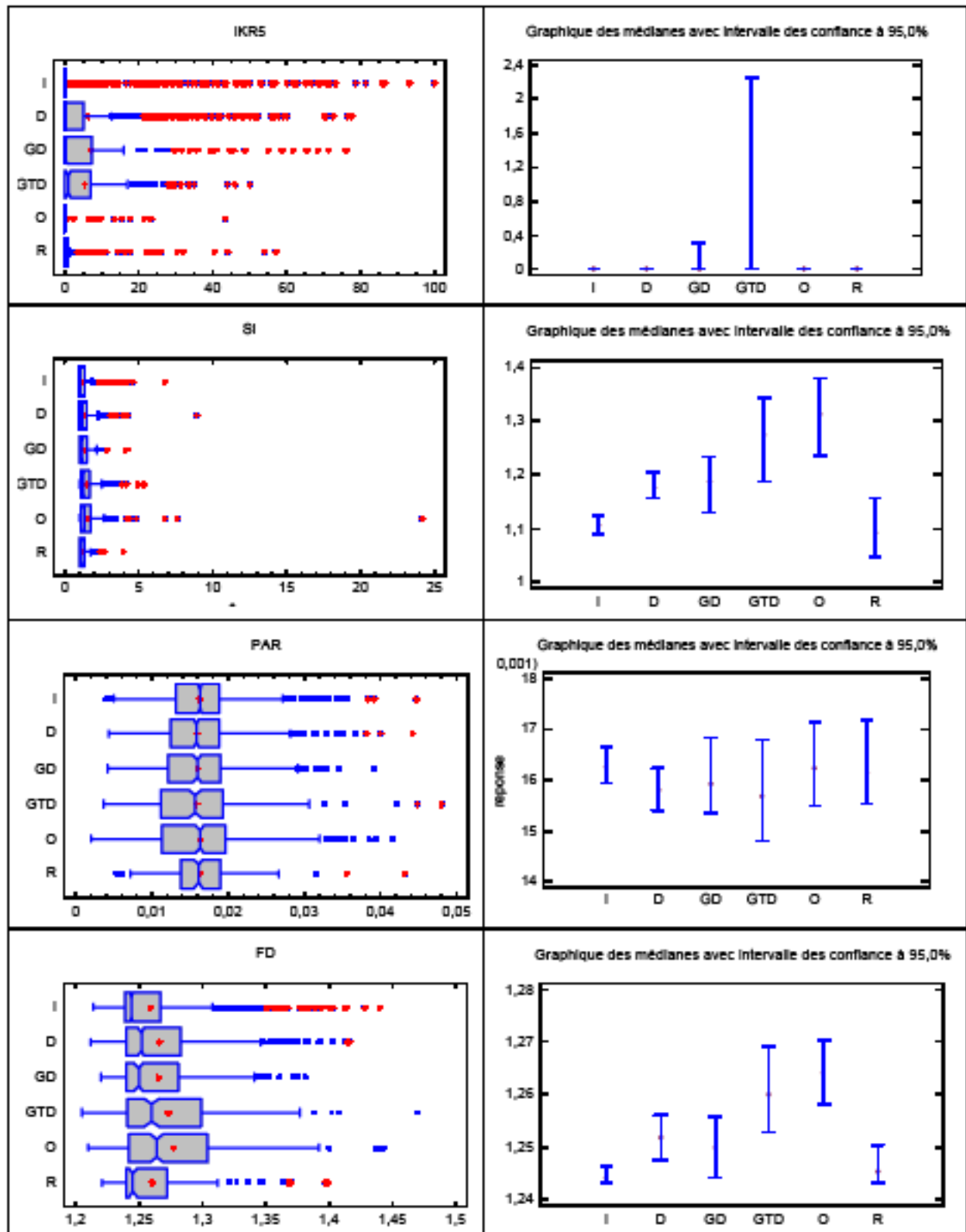


Figure 7 Boîtes à moustaches des variables *IKRS*, *SI*, *PAR* et *FD*

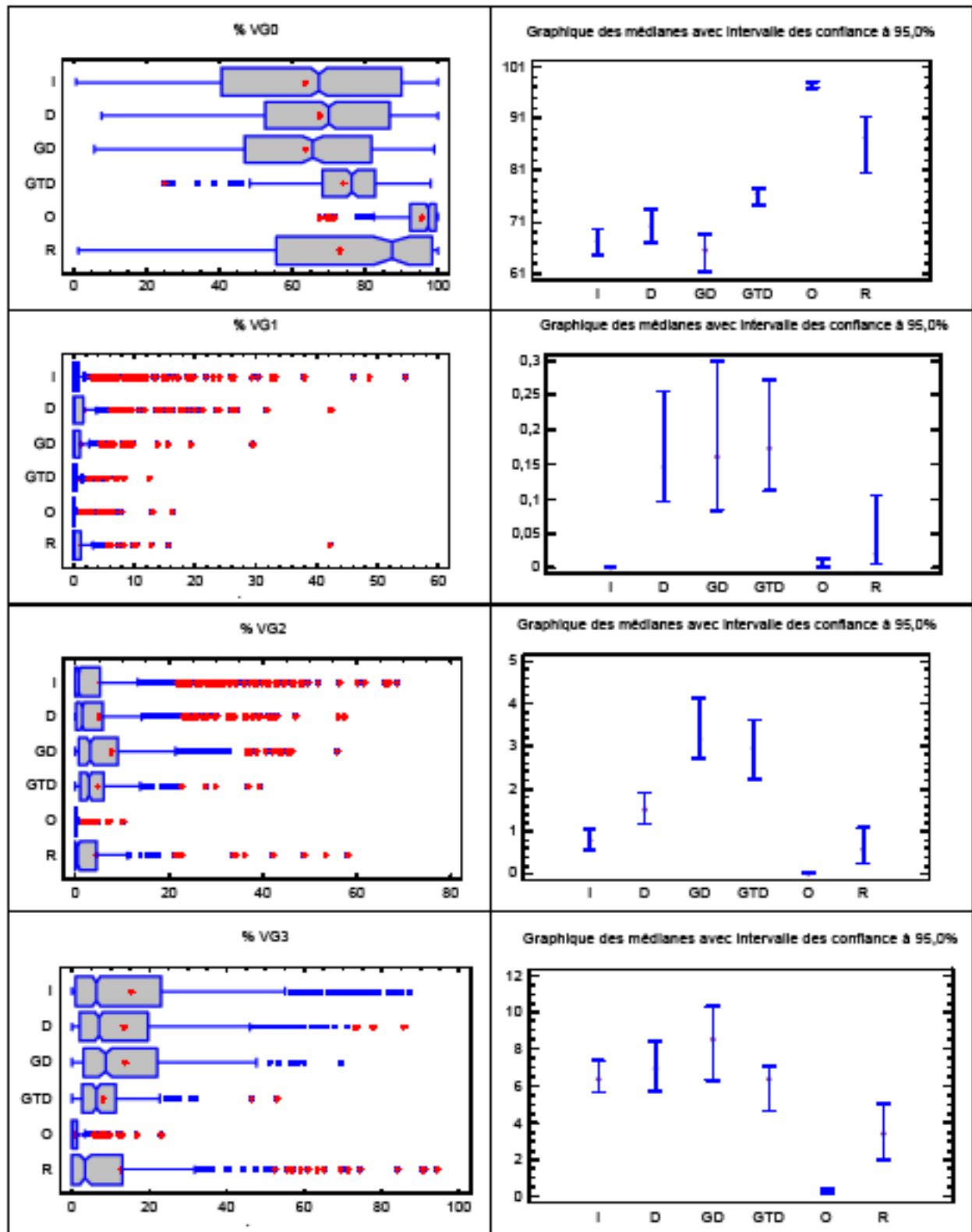


Figure 8 Boîtes à moustaches des variables VG0, VG1, VG2 et VG3

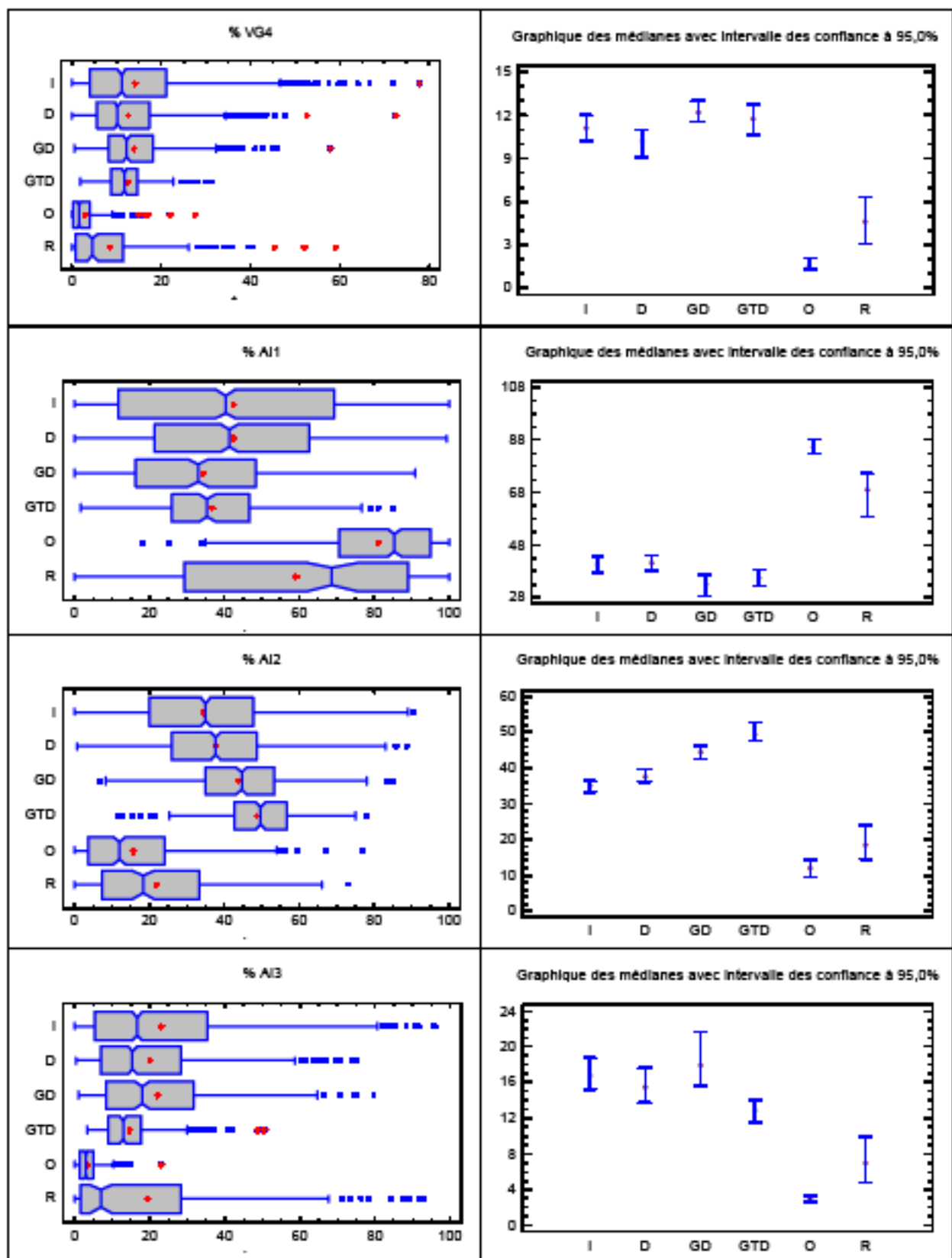


Figure 9 Boîtes à moustaches des variables VG4, AI1, AI2 et AI3

G. Mesures pour réduire la vulnérabilité dans les interfaces habitat-forêt

1. Des mesures collectives à l'échelle du territoire

a) Agir collectivement sur la biomasse combustible.

Des recommandations dans les interfaces sont formulées en termes de réduction du combustible (Conard et al., 2001). En France, l'enlèvement de la végétation est rendu obligatoire pour les collectivités à travers la loi d'orientation forestière du 11 juillet 2001 qui impose l'obligation de débroussailler autour des bâtiments dans un rayon de 50 m (parfois 100 m) et 10 m de part et d'autre des routes (parfois 20 m) situés à moins de 200 m d'un massif boisé et garrigues.

Mais une approche remise au goût du jour est de réintroduire la culture du feu, la pratique du feu dans la prévention (Martinez et Leonard, 2002 ; Rego et al., 2007; Rigolot, 2008; Alexandrian et Rigolot, 2005). Ainsi le **brûlage dirigé** « qui consiste à conduire un feu de façon planifiée et contrôlée, sur tout ou partie d'une surface prédéfinie et en toute sécurité pour les espaces limitrophes » pour réduire la masse combustible (Rigolot, 1997) est une solution adaptée mais elle requiert non seulement un effort d'information et d'éducation pour expliquer auprès des populations, ce qui est fait et quelles sont les conséquences écologiques, mais aussi un effort pour coordonner toutes les ressources mises en œuvre pour la lutte. Il s'agit alors de planifier, d'organiser les opérations de coopération et de coordination nécessairement prioritaires pour la mise à feu, ce qui exige un effort souvent plus important que celui de la réalisation proprement dite du brûlage (Miller et Wade, 2003). Les occasions d'utiliser le brûlage dirigé pourraient être grandement multipliées dans les interfaces habitat-forêt si l'inflammabilité des bâtis était réduite (Cohen, 1999).

Une autre façon d'aborder la réduction du risque d'incendie dans les interfaces serait d'éviter au mieux que la biomasse ne s'accumule. Les recherches pour une gestion adaptée du combustible (comme des éclaircies ou des coupes) sont reconnues comme des plus prometteuses pour maîtriser les feux de forêts et les dommages occasionnés dans les interfaces (Kalabokidis et Omi, 1998). Des techniques de gestion spécifique du combustible sont alors nécessaires de façon à éviter l'accumulation de combustibles tout en maintenant l'équilibre des écosystèmes (Keller, 2005). Des commissions peuvent aussi être déployées comme Prescott Area Wildland Urban Interface Commission (PAWUIC) aux USA et être impliquées dans des programmes de réduction de combustible, de prise de conscience de la sécurité au feu, de développement de bioénergies locales et de marché du bois pour utiliser la biomasse issue des interfaces. Elles développent l'idée que le maintien d'une forêt en bon état sanitaire soutiendra la sécurité de la collectivité et l'économie locale (Iversen et VanDemark, 2006), idées qui se développent également dans le Sud de la France.

b) Agir sur les éléments anthropiques

Le fruit de l'analyse des retours d'expérience après incendie est riche en enseignement et invite à adopter une conduite de bon sens en particulier en matière de développement des zones d'habitation.

L'habitat groupé est à promouvoir de façon préférentielle. La lutte contre l'incendie est d'autant plus difficile que les habitations sont dispersées, les dégâts qu'elles subissent s'en ressentent.

Eviter certaines situations topographiques ou ajuster la profondeur préconisée du débroussaillage. Certaines conditions topographiques particulières (vallons, cols, hauts de pente, ...) peuvent s'avérer plus à risque (Photo1). Si un débroussaillage d'une profondeur de 50 m est suffisant pour réduire l'intensité du feu et le transformer en feu courant en conditions topographiques favorables dans la plupart des formations forestières, il ne l'est plus lorsque le vent et la pente se combinent. L'intensité du feu s'accroît dans les vallons exposés au vent. Les habitations exposées à de fortes puissances de front de feu sont plus touchées que celles qui sont abritées. Par ailleurs, les feux peuvent devenir explosifs sur les flancs ou en bordure de vallons.

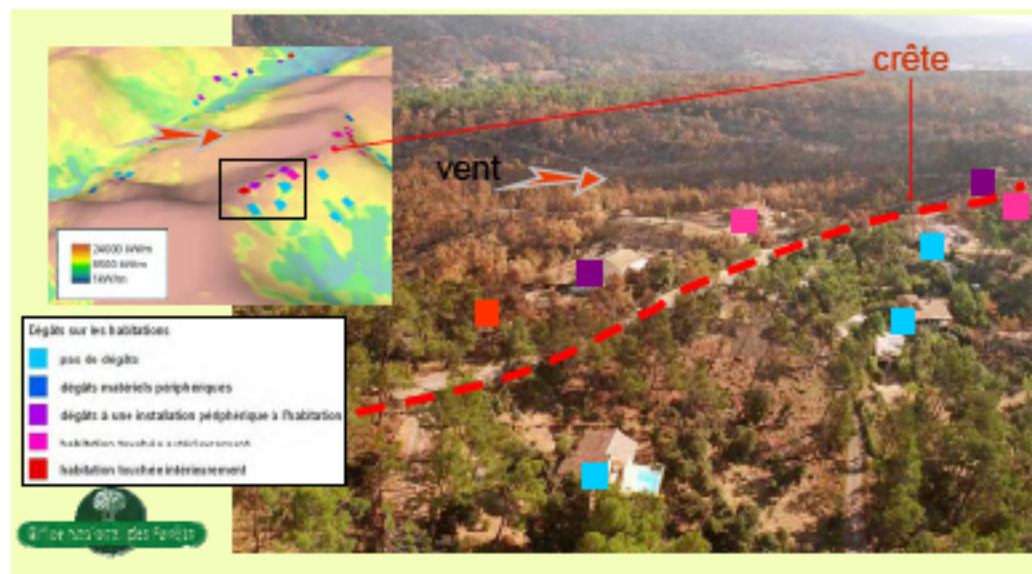


Photo 1 Influence de la situation topographique sur la vulnérabilité des habitations. Crédit photo ONF

Mettre aux normes les infrastructures et équipements pour faciliter la lutte en cas d'incendie. La lutte s'avère risquée ou impossible lorsque les habitations sont peu ou pas accessibles (Photo 2). Il est impératif que les accès soient sécurisés : largeur de voie, débroussaillage latéral, présence d'aires de croisement et de retournement. La lutte nécessite l'emploi de points d'eau normalisés (débit, pression, débroussaillage), accessibles et visibles.



Photo 2 Accès du bâti en cul de sac. Crédit photo ONF

Souligner le rôle de propagation joué par les zones agricoles. Les flammes peuvent se propager par tous les couloirs boisés au sein des zones urbaines ...ou en zone agricole (Photo 3).



Photo 3 Propagation du feu en zone agricole. Source OFME

2. Des mesures individuelles : le rôle de l'habitant

La maison constitue pour l'habitant un rempart de protection contre l'incendie. Celui-ci doit donc réduire au maximum le risque d'endommagement de sa maison en cas de passage d'un incendie. Pour cela des actions de prévention lui sont recommandées, « une structure qui ne s'enflamme pas, ne brûle pas, en dépit de ce qui se passe autour » (Nowicki, 2002).

Pour en percevoir tout l'intérêt, il est important de rappeler comment les feux de forêt peuvent enflammer une maison. Trois manières sont possibles : 1) les flammes peuvent générer une chaleur radiante suffisante pour enflammer la façade de la maison, sans même atteindre directement la maison ; 2) les flammes peuvent atteindre la maison par le biais de la végétation environnante ; 3) enfin les brandons projetés en avant d'un front de flamme peuvent être transportés par le vent et tomber sur, ou à l'intérieur d'une maison.

Ainsi la première de ces menaces peut être efficacement traitée en rompant la continuité de la végétation combustible dans un rayon maximum de 60 mètres autour de la maison, la seconde requiert d'enlever la végétation immédiatement adjacente à la maison et la troisième implique le traitement de la maison elle-même (Nowicki, 2002; Cohen, 2002, 2003; Randall, 2003 ; Caballero et al., 2004) pour qu'elle soit la moins soumise à l'inflammation.

a) Agir sur la végétation combustible autour du bâti.

Aux USA, Canada et Australie, comme en Europe même si les facteurs et les conditions de propagation du feu dans les zones bâties sont différents (utilisation de matériaux de construction plus ou moins inflammables, toits par exemple), les maisons qui sont généralement entourées par de la végétation naturelle, d'ornement, des haies et autres combustibles, sont détruites, partiellement ou totalement, parce que le feu a réussi à se propager jusqu'à la maison et à pénétrer à l'intérieur (Caballero et Beltran, 2003, 2004). L'inflammation d'une maison est provoquée par contact direct des flammes avec une végétation telle que des broussailles, des herbes sèches ou de la litière d'aiguilles, suivi d'une propagation de ces flammes jusqu'à la maison. Ainsi une grande proportion de maisons brûle durant un feu de forêt non pas du fait d'un feu de cime mais du fait d'un feu de surface de faible intensité (Cohen, 2001). Les résultats des recherches de Cohen (2003) issus de

modélisation, de feux expérimentaux et d'analyses de retours d'expérience confirment que les feux de surface détruisent plus de maisons que l'effet direct de feux de cime de forte intensité. Le traitement du combustible apparaît donc comme une action efficace de prévention contre l'incendie (Hesseln, 2001) et en particulier sa réduction (Winter and Fried, 2002). La réduction du combustible n'exige pas l'enlèvement de toute la végétation, certains types de végétation qui ne produisent que de petites flammes, peuvent même en toute sécurité, être situés relativement près d'une maison (Cohen et Butler, 1998). Enfin même, des arbres qui sont espacés de façon judicieuse entre la maison et la végétation forestière environnante peuvent aussi créer un **écran de protection contre la chaleur radiante** du front de flamme. La chaleur radiante n'est alors plus suffisamment forte pour enflammer la façade de la maison durant son temps d'exposition au front de flamme.

Pour réduire ce combustible, une discontinuité minimale dans la végétation (comme une simple ligne autour du périmètre de la maison) peut déjà s'avérer efficace pour prévenir l'ignition directe (Cohen, 2000) empêchant ainsi au feu de se propager de la végétation en flammes à la maison. Mais surtout des recommandations en termes de **débroussaillage** sont préconisées dans le voisinage immédiat des maisons situées dans les interfaces habitat-forêt (Cohen, 2000), rappelant aussi la responsabilité de l'habitant dans la sauvegarde de sa maison située en interface par le maintien d'un espace propre autour d'elle (Kamp et Sampson, 2002).

Ces actions de débroussaillage consistent :

- ☞ à rompre la continuité horizontale de la végétation en fonction de la hauteur de la végétation et de la pente. Plus la végétation est dense et continue, plus la menace de propagation est grande. Exemples de préconisations aux USA sur le site <http://www.calmast.org>:
 - ☞ la mise à distance des arbres (exemple de distances entre arbres : 2 fois la hauteur H de l'arbre, 4 fois H et 6 fois H respectivement sur terrain plat, de pente modérément forte et de pente très forte) ;
 - ☞ la mise à distance des houppiers (exemple de distances entre houppiers : 3 m, 6 m et 9 m respectivement sur terrain plat, de pente modérément forte et de pente très forte) ;
- ☞ à éviter la continuité verticale par un élagage sur trois fois la hauteur du buisson.

Ces actions doivent être réalisées sur une profondeur suffisante. Ainsi une distance de 20 m seulement entre la maison et la végétation permet une baisse significative de l'ignition de la structure bâtie (Davis, 1990). Des études expérimentales et de modélisation ont montré qu'un enlèvement partiel d'arbres dans les 40 m autour de la maison protège cette maison contre l'inflammation par radiation d'un feu total (Cohen and Butler, 1998 ; Cohen, 2000). Effectué dans les 60 m, cet enlèvement procure une marge de sécurité car il prend en compte l'environnement particulier, constitué de pentes particulièrement raides ou de la présence de grands arbres (Davis, 1990). Le dimensionnement de cette zone de protection s'appuie aussi sur l'application de la règle suivante notamment utilisée aux USA, à savoir qu'un arbre d'une hauteur H peut générer une longueur de flamme moyenne de deux fois sa hauteur H et que pour déterminer la distance minimale de protection, il convient de multiplier par quatre la longueur de flamme (Nowicki, 2002). Elle est également préconisée en Europe (Caballero et al, 2004). Ainsi la zone de protection d'un bâti proche d'un peuplement arboré d'une hauteur moyenne de 10 m devrait être de 80 m. En France, c'est une obligation légale (loi d'orientation forestière du 11 juillet 2001) qui impose aux propriétaires de débroussailler dans un rayon de 50 m autour des maisons situées dans les interfaces habitat-forêt (Photos 4 et 5). Cette distance peut être portée à 100 m selon les conditions imposées localement. Des recommandations techniques accompagnent cette réglementation de façon à assurer

l'efficacité de cette opération de débroussaillage. Ainsi aux USA, 95 % des maisons sont épargnées, là où la végétation est maintenue propre à une distance de 10 à 18 m de la maison (Cohen, 1999). En France, l'analyse de retours d'expérience réalisés après incendies montre que 98 % des habitations ayant été débroussaillées dans un rayon de 50 m n'ont pas subi de dégâts intérieurs lors du passage de l'incendie et que seuls quelques dégâts extérieurs ont été signalés dans 18 % des cas. Si le débroussaillage est insuffisant en surface traitée (rayon de moins de 30 m. autour de l'habitation) ou en qualité (pas de mise à distance des houppiers, ..), près de 50 % des habitations concernées par un incendie subissent des dégâts (ONF, 2008).



Photo 4 et photo 5 Débroussaillage autour d'une zone bâti. Crédit photo Lampin-Maillet C

Outre les actions de débroussaillage, des **aménagements paysagers** à base de rochers, de cheminements en ciment, de zones d'herbe verte arrosée ou le simple ratissage des aiguilles et des herbes sèches sont aussi autant d'éléments qui peuvent aider à créer de la discontinuité dans la végétation combustible (Photo 6). Enfin les végétaux d'ornements employés dans les jardins sous forme de haies ou de bosquets peuvent créer des flammes conséquentes et les bâtiments à leur proximité peuvent connaître de graves dégâts (ONF, 2008). Le conseil est de choisir des plantes qui soient les plus résistantes au feu (inflammabilité faible, combustion lente, peu calorifique, petites flammes), à teneur en eau la plus élevée (herbacées, fleurs), d'un diamètre de moins de 2 cm (faible biovolume), contenant peu ou pas d'essences avec substances chimiques (huile, cires, résine). La pelouse éventuelle contiguë à la maison devra être arrosée ou tondue ras s'il s'agit d'herbes très sèches.



Photo 6 Retour d'expérience après incendie. Source OFME

Mais si le traitement du combustible est nécessaire (Photo 7) il n'en reste pas moins suffisant (Photo 8).



Photo 7 Retour d'expérience après incendie Source OFME



Photo 8 Débroussaillage insuffisant ? Crédit photo Lampin-Maillet C

En effet la source la plus répandue d'inflammation des maisons et de leur environnement est relative à l'émission de brandons extrêmement dangereux (Cohen et Saveland, 1997; Cohen, 2003). Renoncer à protéger les maisons situées dans les interfaces de la menace des sautes de feu représente un réel danger d'inflammabilité de ces maisons, ceci malgré le traitement de la végétation environnante et malgré la distance qui sépare la maison de la forêt ou de l'espace naturel avoisinants. Mais indépendamment du phénomène d'inflammation par brandons, la propagation de l'incendie au sein des zones bâties est aussi influencée par la densité de ces bâtis. Il s'avère tout aussi important voire plus, d'améliorer la protection des maisons contre le feu en diminuant leur inflammabilité que de réduire la quantité de combustibles (herbes, sous-bois, arbustes...) (Spyratos et al., 2007).

b) Agir sur la structure bâtie

Les brandons sont des particules enflammées générées par l'incendie et projetées généralement en avant du front de flammes. Propulsés dans les colonnes de convection du front de flamme et transportés par le vent, ils sont à l'origine de feux secondaires en tombant sur des zones réceptrices (matériaux combustibles) à des distances du front de flamme qui peuvent atteindre des kilomètres (Colin et al., 2002). La saute de feu moyenne pour les pays méditerranéens européens est de 228 m et 8 % des sautes ont une longueur de plus de 500 m (Collectif Saltus., 2001; Colin et al., 2002). En tombant sur des toits de maisons ou sur toute

surface inflammable, ces brandons peuvent enflammer une maison même si l'incendie est situé à des kilomètres. C'est pourquoi même très efficaces, les moyens de prévention ou de lutte contre l'incendie mis en œuvre loin de zones habitées, ne peuvent à eux seuls assurer la protection des maisons de la menace de sautes de feu.

Le traitement de base de la maison contre les brandons impose l'utilisation de matériaux résistants au feu dans la construction du bâtiment et des structures environnantes, en particulier les toits et les terrasses. Il préconise le recouvrement ou l'enlèvement de matériaux inflammables dans les coins et recoins où les brandons peuvent se nicher et l'enlèvement des branches, feuilles et aiguilles mortes sur les toits (Photos 9 et 10) et gouttières (Nowicki, 2002). L'étanchéité à l'air des toitures est également particulièrement importante pour éviter l'intrusion de brandons à l'intérieur de la construction. L'habitat traditionnel comporte souvent des points facilitant l'entrée des flammes : poutres apparentes, toitures peu étanches, portes de granges absentes ou ajourées ou stockage de matières très inflammables (paille, foin, engrais, ...) (ONF, 2008).



Photo 9 Crédit photo Bouillon C



Photo 10 Crédit photo Lampin-Maillet C

Photos 9 et 10 Aiguilles mortes accumulées sur les toits

Les installations légères (cabanons, annexes, ...), les terrasses en bois présentent souvent une inflammabilité et une combustibilité importantes qui contaminent les habitations voisines.



Photo 11 Crédit photo Lampin-Maillet C



Photo 12 Crédit photo Lampin-Maillet C

Photo 11 Destruction d'une poutre extérieur. Photo 12 Propagation du feu par l'arbre à l'intérieur du bâti



Photo 13 Crédit photo Long M



Photo 14 Crédit photo Long M

Photo 14 Mobilier et pergola en bois sur la terrasse du bâti situé au sein de la végétation (Photo 13)

Les volets doivent également résister à la chaleur : en cas de déformation, combustion ou de rupture, ils permettent au feu d'entrer dans la maison. De même la qualité des gouttières doit leur permettre de résister aux flammes. Les matières plastiques résistent mal à la chaleur dégagée par le feu. Elles se déforment ou s'enflamment, créant des foyers violents. Les métaux subissent également des déformations importantes sous l'effet de la chaleur. Le bois plein offre lui une certaine résistance structurelle, tant qu'il brûle superficiellement ou se consume. L'inflammation de stockages de combustibles à proximité des habitations entraîne des dégâts majeurs : citerne de gaz ou de mazout (Photos 15 et 16), tas de bois (Photos 17 et 18), ...



Photo 15 Crédit photo Lampin-Maillet C



Photo 16 Crédit photo Lampin-Maillet C

Photos 15 et 16 Citerne de gaz aux abords du bâti



Photos 17 et 18 Tas de bois et barbecue aux abords du bâti

Prévoir les éventuelles évacuations

Ainsi des recommandations dans les interfaces sont formulées en termes de plans d'évacuation en cas d'incendie (Church et Cova 2000 cité dans Haight et al. (2004).

Conclusion

Il faut éviter que les incendies ne se produisent. Mais s'ils se produisent, il faut faire en sorte que leur propagation et leur intensité soient moindres en ayant réduit au préalable les masses de combustibles et en ayant fait en sorte que les maisons soient le moins soumises à l'embrassement.

Améliorer la prévention doit porter sur deux axes : d'une part l'aménagement du territoire doit mieux intégrer le risque d'incendie notamment du fait du développement des activités humaines au contact de la forêt (lieu de vie, de loisir...) et d'autre part les habitants qui vivent sur ce territoire doivent être davantage conscients de ce risque et adapter leur comportement face à ce risque en devenant de vrais acteurs de la prévention voire de la lutte grâce à une information voire formation adaptée.

H. Publications et activités de recherche annexées à la thèse

1. Journaux

a) Journaux internationaux

(1) Articles scientifiques

Lampin-Maillet, C., Jappiot, M., Long, M., Bouillon, C., Morge, D., Ferrier, J.P. 2009. Mapping wildland-urban interfaces at large scales integrating housing density and vegetation aggregation for fire prevention in the South of France. Sous presse : *Journal of Environmental Management*. doi:10.1016/j.jenvman.2009.10.001

Lampin-Maillet, C., Jappiot, M., Long, M., Morge, D., Ferrier, J.P. 2009. Characterization and mapping of dwelling types for forest fire prevention. *Computers, Environment and urban systems* 33 (2009), pp. 224-232. DOI information:10.1016/j.compenvurbsys.2008.07.003.

Lampin C., Jappiot M., Borgniet L., Long M., 2006. Cartographie des interfaces habitat-forêt : une approche spatiale pour estimer le risque d'incendie de forêt. *Revue internationale de géomatique. European Journal of GIS and Spatial analysis*. Information géographique et gestion des risques. Vol.16- n°3-4/2006-pp321-340.

(2) Articles de vulgarisation

Jappiot, M., Gonzalez-Olabarria, J.R., **Lampin-Maillet, C., Borgniet, L. 2009.** Assessing Wildfire Risk in Time and Space. p41-47. Partie de Living with Wildfires : What science can tell us. Yves Birot (ed)European Forest Institute.

b) Journaux nationaux

(1) Articles scientifiques

Groupe de recherches « interfaces » ,2008. Avec Chapelon, L., Allard, P., Christofle, S., Ensellem, K., Ferrier, J.P., Fusco, G., Gay, J.C., Kaddouri, L., **Lampin-Maillet, C.**, Lavaud-Letilleul, V., Perez, S., Rozenblat, C, L'interface : contribution à l'analyse de l'espace géographique. *L'Espace Géographique*, 2008/03, Tome 37, 193-207.

(2) Articles de vulgarisation

Lampin-Maillet, C. 2009. Cartographier les interfaces habitat-forêt. *Forêt entreprise* N°185 Incendies de forêts Connaître pour prévenir. Mars 2009/2.

Lampin-Maillet, C., Long, M., Jappiot, M. 2008. Une méthode pour caractériser et cartographier les interfaces habitat-forêt, un enjeu pour la prévention des incendies de forêt. *Revue Forestière Française*, Mai-juin 2008.n°3 /2008, 363-380.

Lampin-Maillet, C. 2008. 2007, Summer Fires in the European Mediterranean – The Cases of Greece, Italy and Spain. Mediterranean yearbook. *European Institute of the*

Mediterranean. Med.2008, Economy and Territory- Sustainable Development, pp243-247. <http://www.iemed.org/anuari/2008/aarticles/EN243.pdf>.

Lampin-Maillet, C. 2008. Cartographier les interfaces habitat-forêt. *Sécurité civile et industrielle*. La revue des acteurs de la gestion du risque. N°506. 3^{ème} trimestre 2008. p21

Lampin C. 2007. Méthode préventive pour caractériser et cartographier les interfaces habitat-forêt, un enjeu pour la prévention des incendies de forêt. *Info DFCI*, n°59, p.4-5.

2. Conférences

a) Conférences internationales

(1) avec actes

Lampin, C., Long M., Jappiot, M., Morge, D., 2007. Dwellings characterization and mapping for forest fire risk prevention. Urban and Regional data management –Coors, Rumor, Fendel & Zlatanova (eds). pp 427-440 – Taylor & Francis – 2007 Colloque international UDMS 2007 à Stuttgart en Allemagne, 9-12 octobre 2007- **Communication orale**

Lampin, C., Jappiot, M., Long M., Morge, D., Bouillon, C., Galiana, L., Herrero, G., Solana, J., Mantzavilas, A., Loddo, G., Delogu G., 2007. Characterization and mapping of wildland-urban interfaces: a methodology applied in the study case in Sardinia. IV International Wildland Fire conference à Seville en Espagne, 14-17 mai 2007- **Communication orale**

Long, M., **Lampin, C., Jappiot, M., Morge, D., Bouillon, C., 2007.** Automated feature extraction on Quickbird imagery required to map wildland urban interfaces (WUI) in the French Mediterranean region. 6th EARSeL Workshop on Forest Fires Greece from 27 - 29 September 2007.

Long, M., **Lampin, C., Jappiot, M., Morge, D., Bouillon, C 2007.** Automated feature extraction on Quickbird imagery required to map wildland urban interfaces (WUI) in the French Mediterranean region.. 6th international workshop of the EARSeL special interest group on forest fire – Advances in remote sensing and GIS applications in forest fire management – Towards an operational use of remote sensing in forest fire management, 27 – 29 september 2007, Thessaloniki, Greece. Proceedings pp 74 – 77. 2007

Lampin C., Jappiot M, Long M, Mansuy N, Borgniet L., 2006. WUI and road networks/vegetation interfaces characterizing and mapping for forest fire risk assessment. V Conference international on Forest fire research. 27-30 novembre 2006. **Portugal** Forest Ecology and Management Volume 234, Supplement 1 pp. S42. **Communication orale.**

Jappiot M., **Lampin C., Curt T., Borgniet L., Chandieux O., Taton T., Dumas E., Alexandrian D., D’Avezac H., Valette J.C., Moro C.:** Fire risk ignition: The integrated model “AIOLI”. Forest Ecology and Management. V Conference international on Forest fire research. 27-30 novembre 2006. **Portugal.** Forest Ecology and Management Volume 234, Supplement 1 pp. S42. **Poster.**

Jappiot M., Lampin C., Borgniet L., Long M., Dumas E., Pruvost J.C., 2006. Caractérisation des types d'interfaces habitat-forêt : l'apport de la télédétection et des SIG. *Colloque international "Los incendios forestales en el Mediterraneo : nuevas aproximaciones para una problematica antigua"*, Casa de Velazquez / ENS Lyon, 22-24 mars 2006, Madrid (Espagne).

(2) sans actes

Michael Ghil, V. Spyrtos, P. Bourgeron, C. Lampin & M. Jappiot, 2008 The Wildland-Urban Interface (WUI): *From Simple Models to Mitigating Fire Risk*. Université d'été alpine – juin 2008.

Ghil, M. ; Spyrtos, V. ; Bourgeron, P. ; Lampin, C. ; Jappiot, M. 2007. The wildland-urban interface (WUI): from simple models to mitigating fire risk. AGU Full meeting, San Francisco, USA, 12-14 December 2007

Lampin C., Jappiot M., Long M., Morge D., Bouillon C., 2007 Characterization and mapping of wildland urban interfaces Assessing forest fire risk in South of France. 10th AGILE International Conference on Geographic Information Science 8-11 mai 2007, Danemark. - **Poster**

b) *Conférences nationales*

(1) avec actes

Lampin C., Jappiot M., Morge D., Long M., 2006. Caractérisation et cartographie des interfaces habitat-forêt. Pour comprendre le risque global d'incendie de forêt. Colloque Géopoint 2006, 1^{er} et 2 juin 2006, Avignon. Actes du colloque Géopoint 2006 Demain la géographie. pp 395-399. **Communication orale**

(2) sans actes

Lampin, C. ; Jappiot, M. ; Long, M. 2007. Risque incendie et aménagement du territoire : concurrence de l'usage des sols, rurbanisation. OCR INCENDI 2ème Forum Provence-Alpes-Côte d'Azur sur la forêt méditerranéenne du 21ème siècle : un défi écologique, économique et sociétal, Avignon, 4 Octobre 2007. **Communication orale.**

Chapelon, L. ; Ensellem, K. ; Christophle, S. ; Fusco, G. ; Pérez, S. ; Lampin, C. ; Allard, P. ; Lahouri, K. 2007. Le concept d'interface comme instrument d'analyse des espaces frontaliers et d'orientation de leur aménagement. Colloque Frontière et Aménagement, Metz, 5-6 juillet 2007.

Lampin, C., Long, M., Jappiot, M., Morge, D., Borgniet, L., 2006. Cartographie des interfaces forêt et habitat: massif des Maures. Rencontres euroméditerranéennes. Feux de forêt, cartographie: l'apport des outils innovants sur les incendies de forêt, Gardanne, 11-14 décembre 2006. **Communication orale.**

Lampin C., Jappiot M., 2006. Cartographie des enjeux. Réunion PPRIF organisées par le MEED. Février 2006 à Aix en Provence et 5 Octobre 2006 à Bordeaux. **Communication orale.**

Lampin C., Jappiot M., Mansuy N., Long M., 2006. Une cartographie des interfaces réseaux-végétation pour comprendre l'aléa feu de forêt. Colloque GESTER 2006, 7-02-2006, Montpellier. A paraître dans les actes du colloque. **Communication orale.**

Lampin C., Jappiot M., Borgniet L., Long M., Dumas E., 2005. Caractérisation et cartographie des interfaces habitat-forêt soumises au risque d'incendie de forêt. Colloque SURNAT, Systèmes d'Informations pour les Risques Naturels, 10-11 mars 2005, Montpellier (France). **Communication orale.**

Lampin C., Jappiot M., Borgniet L., Long M., Dumas E., 2005. SIG, Analyse spatiale et risque d'incendie dans les interfaces. Colloque international de géomatique SAGEO. Avignon, 21/22/23 juin 2005. **Communication orale.**

3. *Rapports*

Mantzavelas, A. Apostolopoulou, I. Lazaridou, T. Partozis, T. **Lampin-Maillet, C., Long, M., Jappiot.** 2008. Literature review and synopsis of the methodologies to estimate vulnerability. Fire paradox program Project no. FP6-018505. Deliverable D5.2-5. 13 p.

Lampin, C., Long, M., Jappiot, Morge, D., Bouillon, C. 2007 Aide méthodologique à la caractérisation et la cartographie des interfaces habitat-forêt, dans le contexte de prévention aux incendies de forêt. Rapport MEDDAT Convention n°253 -04/08/2006. 45p.

Lampin, C., Long, M., Jappiot, M., Morge, D., Bouillon, C (Cemagref), Mantzavelas, A., Apostolopoulou, I., Lazaridou, T., Partozis, T., Topaloudis, T (OMIKRON Ltd), Galiana, L., Herrero, G., Solana, J L (UCM), 2007. Fire paradox program Project no. FP6-018505. D.5.2-1 Method to characterize and to map wildland urban interface Part1- State of the art on the methods to characterize and to map wildland urban interfaces Deliverable D5.2.1.Part1. 30 p.

Lampin, C., Long, M., Jappiot, M., Morge, D., Bouillon, C (Cemagref), Mantzavelas, A., Apostolopoulou, I., Lazaridou, T., Partozis, T., Topaloudis, T (OMIKRON Ltd), Galiana, L., Herrero, G., Solana, J L (UCM), Loddo,G, Brigaglia, S, Dettori, G, Delogu, G (CFVA), 2007. D.5.2-1 Method to characterize and to map wildland urban interface Part2- Methods developed in France, Spain and Greece. Application of the different methods to characterize and to map wildland urban interfaces in Sardinia. Fire paradox program Project no. FP6-018505 Deliverable D5.2.1.Part1. 60 p.

Jappiot, M. ; **Lampin, C.** ; Curt, T. ; Ganteaume, A. ; Borgniet, L. ; Bouillon, C. ; Chandieux, O. ; Esteve, R. ; Long, M. ; Martin, W. ; Morge, D. ; Alexandrian, D. ; D'avezac, H. ; Tatoni, T. ; Dumas, E. ; Valette J.C. ; Moro, C. 2007. Modélisation et cartographie de l'aléa d'éclosion d'incendie de forêt, programme AIOLI, rapport final

Lampin, C., Long, M., Jappiot, M., Morge, D., Bouillon, C (Cemagref), Mantzavelas, A., Apostolopoulou, I., Lazaridou, T., Partozis, T., Topaloudis, T (OMIKRON Ltd), Galiana, L., Herrero, G., Solana, J L (UCM), Loddo,G, Brigaglia, S, Dettori, G, Delogu, G (CFVA), 2007. Method to characterize wildland-urban interfaces. Fire paradox program Project no. FP6-018505 Deliverable D5.2.2. 15p.

Jappiot M., **Lampin C.**, Ripert C., Long M., Alexandrian D., Borgniet L., Bouillon Ch., Chandieux O., D'avezac H., Estève R., Ganteaume A., Le-Bihan M., Morge D., Piana C.,

Rouch L., 2007. Identification approfondie des causes de départ d'incendie de forêt, en vue de la mise en place d'une base de données géoréférencées. Programme national 2003-2004 de mise en œuvre du règlement (CE) 2152/2003 « Forest Focus ». Convention DGFAR Forest Focus n° FF 2004-06, rapport final, juin 2007, 31 p + annexes.

Alexandrian D., Jappiot M., **Lampin C.**, Long M., Chandioix O., Estève R. 2005. Rapport PPRIF pour DDAF du Var.

Jappiot M., **Lampin C.**, Ripert C., Borgniet L., Long M., Piana C., Chandioix O., Estève R., 2005. Identification approfondie des causes de départ d'incendie de forêt, en vue de la mise en place d'une base de données géoréférencées. Programme national 2003-2004 de mise en œuvre du règlement (CE) 2152/2003 « Forest Focus ». Convention DGFAR Forest Focus n° FF 2004-06, rapport d'état d'avancement, novembre 2005, 19p.

Jappiot M., **Lampin C.**, Borgniet L., Chandioix O., Estève R., Dumas E. Tatoni T., Moro C., Valette J.C., Petriccione M., 2005. Modélisation et cartographie de l'aléa d'éclosion d'incendie de forêt, Programme AIOLI, Rapport intermédiaire, 40 p.

Lampin C., Jappiot M., Morge D., 2005. Emprise de la RD25 et du COSMA dans le massif des Maures, le risque d'incendie et les interfaces habitat-forêt. Mai 2005. 33 pages.

Long M, **Lampin C.**, Jappiot M., Borgniet L., 2005. Caractérisation des interfaces habitat-forêt dans le massif des Maures dans le cadre de l'élaboration des PPRIF. Avril 2005. 20 pages + annexes

4. *Recherches annexes*

a) *Journaux scientifiques internationaux*

Ganteaume A., **Lampin-Maillet C.**, Guijarro M., Hernando C., Jappiot M., Pérez-Gorostiaga P., Vega J.A., 2009. Spot fires. Fuel bed flammability and ignition capability of firebrands. Soumis à *International Journal of Wildland Fire*. *Under press*.

Ganteaume A., Jappiot M., **Lampin-Maillet C.**, Borgniet L., Curt T. Fuel ecological description in calcareous Provence: effects of wildfire recurrence and vegetation types. *Soumis en février 2009* pour publication dans *Forest Ecology and Management*.

Ganteaume A., Guijarro M., Jappiot M., Hernando C., **Lampin-Maillet C.**, Pérez-Gorostiaga P., Vega J.A., 2009. Spot fires. Part I: Firebrand characterization. *Soumis en février 2009* à *Canadian journal of Forest Research*.

Jappiot M., Curt T., **Lampin-Maillet C.**, Borgniet L., Chandioix O., Estève R., Vinet O., Louis S. Valette, J.C. Characteristics and flammability of French Mediterranean dead litter fuels. *Soumis en février 2009* dans *International Journal of Wildland Fire*.

Krivtsov V., Vigy O., Legg C., Curt T., Rigolot E., Lecomte I., Jappiot M., **Lampin-Maillet C.**, Pezzatti G.B. 2009. Fuel modelling in terrestrial ecosystems: an overview in the context of the development of an object-orientated database for wild fire analysis. Soumis à *Ecological Modelling*. *Accepté sous réserve de modification, réenvoyé en février 2009*.

b) *Journaux de vulgarisation français*

Jappiot, M., **Lampin, C.**, Rigolot, E. 2006. Le paradoxe du feu Fireparadox. *Info DFCI*, n° 57, p. 4-5.

Lampin C., Jappiot M., 2005. Mieux connaître les causes de départs de feu. *Info DFCI*, n°54, p.1-2.

c) *Conférences internationales*

Koetz, B., Morsdorf, F., Curt, T., Schiefer, S., Borgniet, L., Odermatt, D., Alleaume, S., **Lampin, C.**, Jappiot, M. Allgower, B., 2007. Fusion of imaging spectrometer and LIDAR data using support vector machine for landcover in the context of forest fire management. 10th Intl. Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing conférence à Davos en Suisse. 12-14 mars 2007. Poster.

Jappiot M., Curt T., **Lampin C.**, Borgniet L., Vinet O., Louis S., Chandieux O., Estève R. 2007. Characteristics and flammability if French Mediterranean litter fuels. IV International Wildland Fire conference à Seville en Espagne, 14-17 mai 2007-Communication orale. **Co-auteur communication orale**

T. Curt, A. Ganteaume, S. Alleaume, L. Borgniet, M. Jappiot, C. Lampin, O. Chandieux. 2007. Vegetation flammability and ignition potential at road-forest interfaces (Southern France). IV International Wildland Fire conference à Seville en Espagne, 14-17 mai 2007-**Poster.**

Lampin C., Jappiot M, Morge D, Vennetier M., 2006 Statistical and spatial analysis of forest fire ignition points: a study case in South of France. V Conference international on Forest fire research. 27-30 novembre 2006. **Portugal Forest Ecology and Management Volume 234, Supplement 1 pp. S12. Poster.**

Chandieux C., Jappiot M., **Lampin C.**, Curt T., Borgniet L.2006: Towards fuel models in calcareous southern France. Forest Ecology and Management. V Conference international on Forest fire research. 27-30 novembre 2006. **Portugal. For. Ecol. Manage. Volume 234, Supplement 1 pp. S241. Poster.**

d) *Conférences nationales*

Ganteaume, A., **Lampin, C.**, Jappiot, M., Alexandrian, D. 2006. SALTUS: connaissance et modélisation des sautes de feu. Rencontres euroméditerranéennes Feux de forêt, cartographie:l'apport des outils innovants sur les incendies de forêts, Gardanne, 11-14 décembre 2006. **Communication orale**

e) *Rapports*

Mantzavelas, A. Apostolopoulou, I. Lazaridou, T. Partozis, T. **Lampin-Maillet, C.**, Borgniet, L., Jappiot, M. Brewer, S. 2008 Method to assess with good spatial accuracy the meteorological and fuel moisture components of the fire risk. Fire paradox program Project no. FP6-018505. Deliverable D.5.1.1.59 p.

Krivtsov, V., Legg, C., Oana, V., Rigolot, E., Lecomte, I., Curt, T., Jappiot, M., **Lampin-Maillet, C.**, Fernandes, P., Pezzatti, G.B. **2008**. Prototype of biophysical models of fuel accumulation using empirical data. Deliverable D2.3-1 of the Integrated project "Fire Paradox", Project no. FP6-018505, European Commission, 36 p.

Ganteaume, A., **Lampin-Maillet, C.**, Long, M., Jappiot, M., Borgniet, L., Mantzavelas, A., Apostolopoulou, I., Partozis, T. **2008**. Deliverable 5.1-2 Method to produce vegetation and fuel maps using satellite imagery. Fire paradox program Project no. FP6-018505. D.5.1.2

Long, M., Ripert, C., Piana, C., Jappiot, M., **Lampin-Maillet, C.**, Ganteaume, A. **2008**. Guide technique. Amélioration de la connaissance des causes de départ de feu de forêt. Convention DGFAR Forest Focus n° FF 2004-06. 116 p.

Curt T., Ganteaume A., Jappiot M., **Lampin C.**, Borgniet L., Baudel, J., Esteve R., Martin W., N'Diaye Boubacar A., Madrigal J., Díez Galilea C., Marino E., Guijarro M., Hernando C. **2007**. Deliverable 3.1-6 Empirical modelling of fuel flammability and initial fire propagation: First results 2007. Deliverable D2.3-1 of the Integrated project "Fire Paradox", Project no. FP6-018505, European Commission, 22 p

Jappiot, M., Borgniet, L., Curt, T., **Lampin-Maillet, C.**, Morge, D., Marell, A., Rigolot, E., Vigu, O., Kazakis, G., Ghosn, D., Vega, J.A., Gitas, I., Abdelmoula, K., Sesbou, A., Allgower, B., Koetz, B., Morsdorf, F. **2007**. Georeferenced database of representative sites including ecological data. Deliverable D3.4-1 of the Integrated project "Fire Paradox", Project no. FP6-018505, European Commission, 73 p

Marell, A., Abdelmoula, K., Allgöwer, B., Borgniet, L., Curt, T., Ganteaume, A., Ghosn, D., Gitas, I., Jappiot, M., Kazakis, G., Koetz, B., **Lampin, C.**, Machrouh, A., Morsdorf, F., Pimont, F., Rigolot, E., Sesbou, A., Vega, J.-A. and Wellani, W. **2007**. Fuel description: first results. Deliverable D.3.4-3 of the Integrated project "Fire Paradox", Project no. FP6-018505, European Commission, 67 p.

Long M., Ripert C., Piana C., Jappiot M., **Lampin C.**, **2007**. Amélioration de la connaissance des causes de départ de feu et identification des preuves physiques. Convention DGFAR Forest Focus n° FF 2004-06, guide technique.

Molina D., **Lampin C.**, Jappiot M. **2006**. EUFIRELAB: Euro-Mediterranean Wildland Fire Laboratory, a wall-less Laboratory for Wildland Fire Sciences and Technologies in the Euro-Mediterranean Region Deliverable D-05-04 Recommendations for up-dating the relevant European regulations. 17 p.

Camia A., Guglielmet E., Bovio G., Deshayes M., **Lampin C.**, Jappiot M., Salas J., Martinez J., Molina D., Carrega P., Fox D., Berolo W., Sabaté S., Vayreda J., Martin P., Martinez J., Conese C., Bonora L., Karteris M., Mallinis G., Sergiopoulos I., Gitas I., **2006**. Wildland Fire Danger and Hazards: a State of the Art. EUFIRELAB, Final Version. Deliverable D-08-07, 67p.

Rettig, R., Dutartre, P., Mangin, A., Lafaye, M., Legemme, J., Rapin, F., **Lampin, C.**, Jappiot, M., Borgniet, L., Gay, M., Clavaud, E., Vidal, J.J., Kron-Ramirez, C., Blachon-Loriette, J.J., Etchevers, P., Bornuat, P., Hurand, A., Nicolas, J.M. **2006**. L'apport du spatial à la sécurité en montagne. Chapitre 3- Analyse des besoins par types de risques. Rapport du groupe de réflexion présidé par René Retting, I-Space-Prospace. 48 pages

Lampin C, Jappiot M, Morge D, Borgniet L, **2005**. Amélioration de la connaissance de l'origine des feux de forêt dans les 15 départements du sud-est. Rapport DPFM 2003/252. Juin 2005 51 pages..

Martin P, Bonora L, Conese C, **Lampin C**, Martinez J, Molina D, Salas J, **2005**, Towards methods for investigating on wildland fire causes. Deliverable D-05-02 EUFIRELAB. 55 pages.

Molina D, **Lampin C**, Jappiot M, **2005**, Recommendations for up-dating the relevant European regulations. Deliverable D-05-04 EUFIRELAB. 17 pages.

Alexandrian D, **Lampin C**, Mavsar R, Mogas J, Riera P, Tolron JJ, **2005**, Towards for studying the costs-to-benefits ratio of wildland fire prevention. Deliverable D05-03 EUFIRELAB. 48 pages

Long M., Jappiot M., **Lampin C.**, **2005**. Comparer les feux constatés avec les résultats des différentes méthodes d'évaluation de l'aléa incendie. Convention cadre MEDD/DPPR. CV04000132, action 1

f) *Encadrement de stagiaires*

Journet S, **2008**, Caractérisation et cartographie du combustible dans les interfaces habitat-forêt. Mémoire de **Master 2 Evaluation et Gestion de l'environnement et des paysages de montagne**. Encadrement : Lampin-Maillet, C et Rovera, G. Septembre 2008.119 pages

Coic B, **2008**. Mise en place d'une méthodologie pour cartographier les dommages causés par les incendies de forêt. **Ecole d'ingénieur de l'agriculture d'Angers**.

Narbaïs-Jaureguy, **2008**. Contribution à l'élaboration d'une méthodologie de comparaison de cartes d'aléa feux de forêt **Mémoire de Master 2 GERINAT**.Juillet 2008. 51 p.

Journet S, **2007**, Caractérisation et cartographie du combustible dans les interfaces habitat-forêt. Mémoire de **Master 1^{ère} année Risque Majeur-Environnement**. Septembre 2005.40 pages

Mansuy N, **2005**, Caractérisation et cartographie des interfaces réseaux-végétation. Télédétection, analyse spatiale, écologie du paysage. Mémoire de **Master Systèmes d'Information Géographique et télédétection**. Septembre 2005.48 pages

Long M, **2004**, Caractérisation des interfaces habitat-forêt grâce aux outils de télédétection et à l'écologie du paysage. **Mémoire de DESS de télédétection Méthodes- Applications- Environnement**.35 pages

Copyright © Octobre 2009, **Corinne LAMPIN-MAILLET**
Tous droits réservés, reproduction interdite sans l'accord de l'auteur

Sauf mention contraire, l'intégralité de ce document est la propriété exclusive de l'auteur.