

Chapitre 14. Modéliser les effets spatio-temporels du changement climatique sur les espèces sentinelles du climat en intégrant la mosaïque paysagère

Auteurs : Emmeline Lobry, Contributeurs : Laurent Couderchet, Fanny Mallard

Résumé : La compréhension des effets du changement climatique sur la biodiversité au niveau local est nécessaire pour la mise en place d'actions de conservation des espèces. Les modèles corrélatifs visant à étudier le lien entre l'occurrence d'une espèce et des variables environnementales et climatiques, doivent prendre en compte la mosaïque paysagère. Or, l'intégration de variables paysagères dans ce type de modèle impose des contraintes techniques : elles doivent être spatialisées, selon une projection et une emprise géographique similaires à celles des autres variables explicatives utilisées dans le modèle. La conformité des résolutions spatiales et temporelles pose des questions à la fois théoriques et méthodologiques. En effet, les données paysagères sont fréquemment créées avec des bases de données d'occupation du sol, à des résolutions spatiales bien plus fines que celle des données climatiques. Ce chapitre discute ce paradoxe en montrant l'effet de la résolution spatiale sur la caractérisation du paysage, en comparant les résultats obtenus avec deux bases de données construites à des résolutions différentes, CORINE Land Cover et le Référentiel aquitain d'occupation du sol à grande échelle. L'inadéquation de la résolution spatiale des données climatiques pour cet objectif est démontrée. Toutefois, une articulation des résolutions est possible, en créant des indices, plus complexes, capables de transcrire les données d'occupation du sol, et donc du paysage, incluses dans une maille plus large. La méthode testée permettra d'intégrer des variables paysagères dans le SDM.

Mots-clés : données, *Hyla arborea*, *Hyla meridionalis*, *Hyla molleri*, modèle basé sur la niche *Niche-Based Model (NBM)*, modèle d'habitat adapté *Habitat Suitability Model (HSM)*, modèle de niche écologique *Ecological Niche Model (ENM)*, modèle de répartition d'espèces *Species Distribution Model (SDM)*, occupation du sol, paysage, présence, résolution.

14.1 Introduction

La compréhension des effets du changement climatique sur la biodiversité au niveau local est nécessaire pour la mise en place d'actions de conservation des espèces. Pour étudier l'impact du changement climatique sur les espèces faunistiques et floristiques, la modélisation informatique est fréquemment utilisée (MALLARD, 2017a). Ces modèles visent à étudier la corrélation entre l'occurrence d'une ou plusieurs espèces (variable dite réponse) et des variables environnementales (dites explicatives ou prédictives), notamment climatiques. Nommés *Species Distribution Models* (SDM), *Ecological Niche Models* (ENM) ou *Habitat Suitability Models* (HSM), ils visent à projeter cartographiquement la répartition des espèces. En y intégrant les données climatiques futures, issues des scénarios proposés par le GIEC, ces modèles permettent de confronter les répartitions actuelles et possibles à l'avenir, pour comprendre les dynamiques d'évolution de l'espèce (ELITH & LEATHWICK, 2009).

Ainsi, les modèles se focalisent généralement sur la corrélation entre le climat et la présence de l'espèce. Si ce choix apparaît pertinent pour la compréhension à des échelons continentaux ou mondiaux, d'autres variables explicatives sont indispensables à l'étude de la répartition des espèces à des échelons plus fins. En effet, il est alors nécessaire d'intégrer des variables qualifiant l'habitat, le paysage, la végétation ou les interactions biotiques (FRANCESCO FICETOLA *et al.*, 2014). En négligeant ces variables, notamment la connectivité paysagère, la plupart des projections basées sur des modèles de niche écologique sont limitées (MESTRE *et al.*, 2017) et ne permettent pas de lier la théorie de l'écologie et les recherches en modélisation. Bien qu'ils apparaissent fondamentaux et devraient donc être explicitement inclus dans les modèles de répartition d'espèce visant à prédire la réponse des espèces face aux changements environnementaux (VALLECILLO *et al.*, 2009), la prise en compte des processus écologiques liés à la connectivité et la dispersion est assez récente dans ces recherches (BARVE *et al.*, 2011).

Pourtant, ces processus sont étudiés, notamment en écologie du paysage. La composition et la structure du paysage peuvent être caractérisées par des indices mathématiques, les métriques paysagères, qui sont mises en lien avec les processus écologiques à l'œuvre dans cet espace. Les indices calculés permettent d'exprimer certaines dynamiques, par exemple en renseignant sur la connectivité entre différents patchs d'habitat, ou sur leur fragmentation (MCGARIGAL & MARKS, 1995). Ces données sont importantes pour comprendre la capacité des espèces à se déplacer et à survivre, en lien avec le déplacement possible de leur aire de répartition sous l'effet du changement climatique (VALLECILLO *et al.*, 2009 ; MESTRE *et al.*, 2017). Ce type de modélisation ne vise pas la projection cartographique de la niche de l'espèce étudiée, mais en fournit toutefois elle aussi une caractérisation.

Ces deux approches peuvent être réunies : la caractérisation des habitats, souvent utilisée comme un indicateur de biodiversité, peut être utilisée comme variable(s) explicative(s) dans un SDM (BRADLEY & FLEISHMAN, 2008 ; VALLECILLO *et al.*, 2009 ; TATTONI *et al.*, 2012 ; WILSON *et al.*, 2013). Tenir compte de ces facteurs permettrait d'approcher les interrelations entre nature et société, et ainsi de dissocier les effets liés à l'anthropisation, de ceux liés au changement climatique. Cette hypothèse de recherche a été initiée en 2016 par F. Mallard (Cistude Nature) dans la mise en place de la démarche de recherche du programme les sentinelles du climat (MALLARD, 2016a). Une méthode alors proposée est de s'appuyer sur des indices paysagers permettant de replacer les milieux étudiés dans l'espace en étudiant leur taux de dégradation et les échanges entre les systèmes voisins dans le paysage (MALLARD & COUDERCHET, 2019). Ensuite, la rencontre en 2017 entre Cistude Nature et l'UMR PASSAGES – CNRS (L. Couderchet) a permis de développer un projet de travaux de recherche exploratoire sur la prise en compte des éléments paysagers dans la modélisation des répartitions des espèces sentinelles du

climat mené par E. Lobry (LOBRY *et al.*, 2018). Puis ses travaux ont amené en 2018 au projet de thèse intitulé « Modéliser les effets spatio-temporels du changement climatique sur la biodiversité en Nouvelle-Aquitaine : pistes et enjeux méthodologiques » (co-encadrement : L. Couderchet UMR PASSAGES-CNRS et F. Mallard, Cistude Nature/UMR PASSAGES-CNRS).

Dans ce chapitre, l'intérêt et les enjeux méthodologiques inhérents à l'utilisation des métriques paysagères, calculées avec les méthodes de l'écologie du paysage, en tant que variables explicatives dans un SDM seront explicités. Les métriques paysagères sont fréquemment calculées à partir de cartes d'occupation du sol. Or, ces cartes sont souvent produites pour répondre à plusieurs enjeux en matière d'aménagement du territoire. Ainsi, elles ne sont souvent pas assez précises et négligent les caractéristiques écologiques, qui sont fondamentales pour la faune et la flore (TATTONI *et al.*, 2012 ; FRANCESCO FICETOLA *et al.*, 2014). Elles sont généralement réalisées au format vectoriel et proposent dès lors une visualisation discrète : les espaces sont délimités et définis par des catégories, par opposition à des cartes au format raster, réalisées par télédétection, où la donnée peut être continue, la seule limite visible étant le périmètre de la cellule (COUDERCHET, 2008). Cette discrétisation en types d'occupation du sol peut sembler inadaptée à l'objectif poursuivi. Cependant, cette problématique peut être nuancée dans le cas où l'étude porte sur une espèce spécialiste d'un habitat ainsi catégorisé (FRANCESCO FICETOLA *et al.*, 2014). De plus, ces bases de données sont généralement disponibles en France, ce qui permet une certaine reproductibilité de la méthode proposée, et la compréhension des changements d'occupation du sol semble primordiale dans la mesure où ils agissent sur l'état de la biodiversité et *a fortiori* dans le contexte du changement climatique (VALLECILLO *et al.*, 2009).

La prise en compte de la connectivité paysagère, en lien avec les capacités de dispersion des espèces étudiées, permettrait d'affiner les prédictions des SDM sur le déplacement de l'aire de répartition d'une espèce sous les effets combinés du changement climatique et du paysage. Cependant, l'intégration de ces facteurs nécessite une compréhension, pas encore établie dans la littérature, des liens entre les processus opérant à l'échelle du paysage et ceux constituant l'aire de répartition à des échelles plus larges (MESTRE *et al.*, 2017).

A cette question s'ajoutent les problèmes, théoriques et méthodologiques, de l'utilisation des métriques paysagères ou de l'occupation du sol en tant que variables explicatives dans un SDM. En effet, la programmation du SDM, avec le package BIOMOD2 développé en langage R, impose l'emploi d'un lot de variables explicatives spatialisées, construites au format raster selon une projection, une emprise géographique et des résolutions spatiale et temporelle similaires (GEORGES & THULLER, 2013). Cette contrainte interroge la pertinence d'utiliser, pour construire les données paysagères, les résolutions spatiale et temporelle des données climatiques, alors que les phénomènes ne se déroulent pas nécessairement dans les mêmes échelles d'espace et de temps. Ainsi, pour correspondre à la résolution spatiale des variables climatiques, les métriques paysagères doivent être dégradées ou reconfigurées. D'une certaine façon, des résolutions spatiales différentes peuvent ainsi être mobilisées, toutefois leur concordance et leur articulation doivent être explicitées.

Souvent, les données paysagères, dérivées de cartes d'occupation du sol, sont retravaillées soit en calculant la classe dominante au sein d'une maille, soit en mesurant la part de chaque type d'occupation du sol au sein de cette maille (FRANCESCO FICETOLA *et al.*, 2014). Pour calculer des indices paysagers, différents logiciels ont été développés, le plus utilisé étant FRAGSTATS (MCGARIGAL & MARKS, 1995). Il permet de mesurer des indices α -spatiaux, qui définissent le paysage, ou une classe d'occupation du sol, dans son ensemble, mais il peut aussi, par le principe d'une fenêtre coulissante, calculer des indices spatialisés : à chaque maille de l'espace étudié correspondent ainsi des valeurs

caractérisant la taille, la forme, la connectivité, etc. des mailles qui l'environnent et qui sont contenues dans la fenêtre d'étude. Avec un principe similaire, le logiciel GuidosToolBox mobilise la morphologie mathématique pour catégoriser l'espace : espace-cœur, lisière, corridor, etc. (VOGT & RIITERS, 2017).

Des variables de structure et de composition de la végétation peuvent aussi être obtenues par le traitement d'images, notamment la télédétection : images satellite multi-capteurs, LiDAR, drone, apportent des données sur la présence de la végétation (par exemple, indice de végétation par différence normalisé NDVI) ou sa structure verticale (hauteurs de végétation) et plusieurs auteurs ont ainsi testé l'utilisation de ces données dans des SDM (BRADLEY & FLEISHMAN, 2008 ; VALLECILLO *et al.*, 2009 ; WILSON *et al.*, 2013 ; FRANCESCO FICETOLA *et al.*, 2014).

Ainsi, des variables paysagères peuvent être créées de multiples façons. Toutefois, la pertinence du modèle de répartition d'espèce et des prédictions qu'il permet dépend de la qualité des données utilisées pour le construire (TATTONI *et al.*, 2012). De plus, la quantité de variables-prédicteurs doit être limitée et dépend du nombre d'observations de l'espèce étudiée (GUISAN & ZIMMERMANN, 2000 ; FRANCESCO FICETOLA *et al.*, 2014). L'identification des variables appropriées et leur nombre doit constituer un préalable à la modélisation. Un grand nombre de variables peut améliorer la précision du modèle mais en réduire la force prédictive (FRANCESCO FICETOLA *et al.*, 2014). Enfin, la performance du modèle est améliorée lorsque les variables sont de nature différente : ainsi, il apparaît pertinent de choisir des données décrivant les structures horizontales et verticales du paysage et les caractéristiques du terrain (WILSON *et al.*, 2013).

L'objectif de ce chapitre est donc d'interroger la possibilité d'intégrer des variables paysagères dans le modèle de répartition de trois espèces de rainettes suivies dans le cadre du programme : *Hyla arborea*, *Hyla molleri* et *Hyla meridionalis*. Il s'agira d'étudier la pertinence d'utiliser des variables construites avec les méthodes d'écologie du paysage et des données d'occupation du sol disponibles dans la région en tant que prédicteurs pour le modèle de répartition régional. Cela semblerait intéressant puisque, par leur correspondance avec les échelons d'action politique, les modèles créés à l'échelon du paysage sont les plus pertinents pour jouer leur rôle d'aide à la décision en matière d'environnement (FRANCESCO FICETOLA *et al.*, 2014).

14.2 Matériel et Méthodes

14.2.1 Données utilisées

Les données d'occurrence des trois espèces étudiées sont issues de la base de données répertoriées par l'association Cistude Nature depuis 2004 dans le cadre notamment des Atlas des Amphibiens d'Aquitaine. Ainsi, l'aire de cette étude est l'ancienne région Aquitaine et sera étendue à l'ensemble de la Nouvelle-Aquitaine lors de l'acquisition des données pour les anciennes régions Limousin et Poitou-Charentes. Ces données prennent la forme d'un fichier vectoriel de points utilisable dans un logiciel SIG. Elles ont été exportées vers un tableur afin de correspondre au format attendu par le package BIOMOD2 (GEORGES & THUILLER, 2013).

Les données d'occupation du sol sont issues du référentiel aquitain d'occupation du sol à grande échelle (OCS-GE). Fabriquées par photo-interprétation, elles sont disponibles au format vectoriel, pour les années 2000, 2009 et 2015 pour les départements de l'ancienne région Aquitaine (en 2020, des cartes seront disponibles pour la région Nouvelle-Aquitaine pour les années 2009 et 2015). L'unité minimale cartographiée est de 10 000 m² (soit une maille de 100 m de côté) pour les territoires agricoles, forêts et milieux semi-naturels, zones humides et surfaces en eau et de 1 000 m² pour les territoires artificialisés. La résolution thématique disponible correspond au niveau 4 de la base de données CORINE Land Cover, et dont les classes sont adaptées aux types d'occupation du sol présents dans la région.

Les résultats obtenus avec cette base de données seront confrontés à ceux construits avec les données CORINE Land Cover, d'une résolution spatiale moindre (unité minimale cartographiée 25 000 m², soit une maille de 500 m de côté).

Afin d'être utilisables par la suite avec le package BIOMOD2, qui impose une même projection cartographique pour toutes les variables explicatives, toutes les données utilisées sont reprojétées selon le système Lambert II étendu (EPSG : 27572) afin de correspondre à celui des données climatiques qu'il s'agit de ne pas transformer spatialement.

14.2.2 Méthode de préparation des variables paysagères

Les variables paysagères explorées dans ce chapitre correspondent au type d'occupation du sol présent dans des mailles de tailles diverses. Les mailles de 8 kilomètres de côté, qui correspondent au maillage des données Météo France, ont été subdivisées selon la résolution spatiale de création des données d'occupation du sol : des mailles de 500 mètres de côté pour CORINE Land Cover (CLC) et des mailles de 100 mètres de côté pour le Référentiel aquitain d'occupation du sol à grande échelle (OCS-GE). Le schéma suivant présente une comparaison des résolutions spatiales des différents jeux de données (Fig. 231).

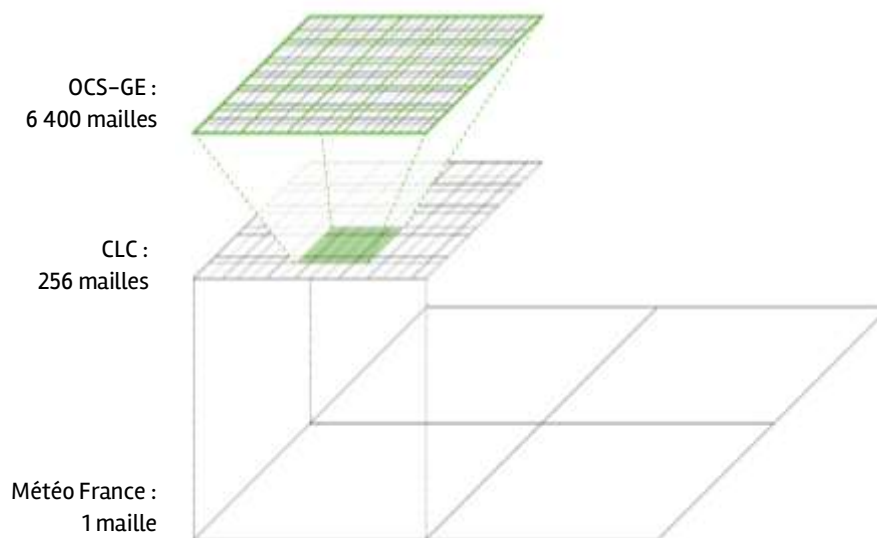


Fig. 231. L'enjeu de l'articulation des mailles de différentes résolutions spatiales : une maille Météo France contient 256 mailles de CORINE Land Cover et 6 400 mailles du Référentiel aquitain

L'objectif étant de constituer un jeu de données paysagères et de tester les possibilités d'articuler des données de plusieurs résolutions, un même protocole de préparation et d'analyses a été effectué sur les deux sources de données (CLC et OCS-GE). Il est décrit dans la figure suivante (Fig. 232). Par un principe de jointure spatiale, les informations sur les types d'occupation du sol sont associées aux mailles. Cela permet d'obtenir d'une part l'information du type dominant, c'est-à-dire celui dont la surface est majoritaire au sein de chaque maille ; d'autre part la composition de chaque maille, c'est-à-dire le détail de la surface de chaque type d'occupation du sol présent. Ces informations peuvent être projetées cartographiquement, permettant une première analyse visuelle, et leurs tables attributaires analysées statistiquement. Pour que les jeux de données soient comparables, la même résolution thématique est utilisée : le niveau 3 de la nomenclature CLC.

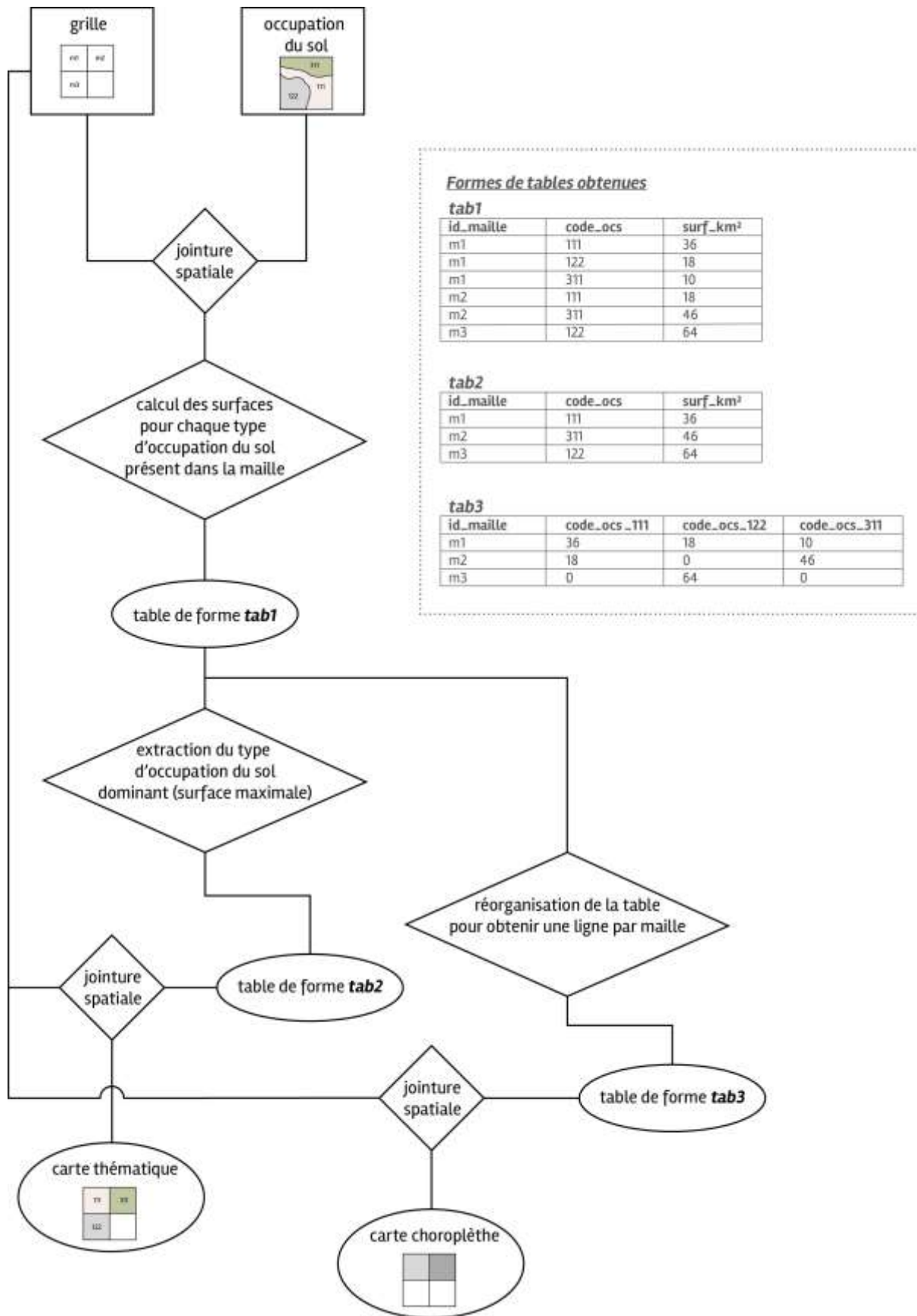


Fig. 232. Protocole de préparation et d'analyse des données

Les jointures spatiales et calculs permettant d'obtenir les tables de forme 1 et 2 et les cartes thématiques ont été effectués avec les couches d'occupation du sol au format vectoriel par des requêtes SQL (Fig. 233).

```

-- Pour avoir une table avec pour chaque case de la grille la surface de chacun
des postes d'occupation du sol
create table jointure_24_ocsge_grille8000 as
select g.id_maille, o.code15niv3, sum(st_area(st_intersection(o.geom,
g.geom)))/1000000 as surf_km2
from mailles_meteofrance_nouvelleaquitaine as g, pigma_ocs_15_d24 as o
where st_intersects(o.geom, g.geom)
group by g.id_maille, o.code15niv3
order by g.id_maille;

-- pour calculer à partir de la couche créée précédemment pour chaque case de la
grille le poste majoritaire et sa surface
create table jointure_24_ocsge_grille8000max as
select j.id_maille, j.code15niv3, j.surf_km2
from (
  select id_maille, max(surf_km2) as max_surf_km2
  from jointure_mf_ocs24
  group by id_maille
) s join jointure_24_ocsge_grille8000 as j
on s.id_maille = j.id_maille and s.max_surf_km2 = surf_km2
order by j.id_maille;

-- avec la géométrie
create table jointure_24_ocsge_grille8000max_geom as
select j.id_maille, j.code15niv3, j.surf_km2, g.geom
from jointure_24_ocsge_grille8000max as j, mailles_meteofrance_nouvelleaquitaine
as g
where j.id_maille = g.id_maille;
  
```

Fig. 233. Script modèle de requête SQL pour l'extraction des données d'occupation du sol au sein des mailles

Le tableau suivant présente les différentes requêtes lancées selon ce modèle, en fonction des données utilisées (Tab. XC).

Tab. XC. Lancements des requêtes

Requête	Fichier grille	Fichier occupation du sol	Résolution recherchée
1	mailles_meteofrance	CLC_Aquitaine	8 000 mètres
2	mailles_meteofrance	OCS-GE_24	8 000 mètres
3	mailles_meteofrance	OCS-GE_33	8 000 mètres
4	mailles_meteofrance	OCS-GE_40	8 000 mètres
5	mailles_meteofrance	OCS-GE_47	8 000 mètres
6	mailles_meteofrance	OCS-GE_64	8 000 mètres
7	mailles_meteofrance	OCS-GE_limit	8 000 mètres
8	grille_500m	CLC_Aquitaine	500 mètres
9	grille_100m	OCS-GE_33	100 mètres

Les données CLC étant disponibles pour l'ensemble de la région, le calcul est réalisé directement à cet échelon. En revanche, les données OCS-GE sont disponibles à l'échelon départemental. Une fusion des fichiers aurait abouti à un fichier lourd et des temps de traitements suivants plus longs, les calculs ont donc été effectués à l'échelon des départements et assemblés *a posteriori*. Les mailles correspondant aux limites des départements ont en revanche nécessité au préalable une fusion des

données OCS-GE afin de prendre en compte l'ensemble de la maille et pas uniquement la partie située dans un département en particulier. Ainsi, pour ces mailles en limites de département, les résultats de la couche fusionnée viennent remplacer ceux des calculs par département.

Pour l'occupation du sol renseignée avec le Référentiel aquitain, certaines mailles de 8 km de côté ont une information incomplète : ainsi, lorsque les superficies des différents types d'occupation du sol au sein des mailles sont additionnées, 160 mailles ont des superficies inférieures à 63 km². Elles correspondent aux mailles en limites régionales : c'est l'effet de bord lié à la construction de la base de données. Ce nombre pourrait être réduit, pour les mailles situées à l'Ouest et correspondant à l'Océan Atlantique, en augmentant la taille des entités correspondant au type « Mers et océans » de telle sorte que la maille soit pleinement renseignée. Cela concerne une trentaine de mailles. En utilisant la base de données CORINE Land Cover, il suffit d'aller rechercher l'information avec les données concernant les régions limitrophes.

Enfin, la couche du Référentiel aquitain pour l'année 2015 possède quelques entités dont le type d'occupation du sol est inconnu et noté 99. Pour ces mailles, un travail peut être effectué en récupérant le type d'occupation du sol de l'année 2009, à condition d'observer une régularité de la présence de ce type dans les millésimes précédents. Ces mailles sont principalement situées en zone montagneuse où l'occupation du sol est plutôt stable dans le temps.

Les tables de forme 3 et les cartes choroplèthes sont issues d'un traitement « Pivot table » effectué dans le logiciel SIG (le champ « pivot » étant le code d'occupation du sol et le champ « valeur » étant la surface). Ce traitement permet d'obtenir l'information de composition interne, en regroupant les informations en une ligne par maille. Ces tables ont fait l'objet de quelques analyses statistiques, permettant d'une part d'explorer et de qualifier le jeu de données. D'autre part, elles seront reprises pour la création d'indices paysagers renseignant la composition des mailles.

14.2.3 Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été menées sur les tables de forme tab3 (Fig. 232), pour les mailles de 8 km de côté avec les bases de données CLC et OCS-GE, et pour les mailles de 500 m de côté avec la base de données CLC. Les analyses pour les mailles de 100 m de côté avec la base de données OCS-GE portent sur des jeux de données de taille plus conséquente et sont donc encore en cours.

L'objectif des analyses statistiques est dans un premier temps de caractériser les jeux de données, et plus particulièrement de renseigner la manière dont la composition interne des mailles est retranscrite par chaque jeu de données.

Tout d'abord, le nombre de types d'occupation du sol différents au sein d'une maille est calculé. Cela permet de rechercher ensuite le nombre, et la fréquence, des mailles en fonction de cette composition. Il faut rappeler que pour pouvoir comparer les jeux de données, la nomenclature de niveau 3 est utilisée. Le nombre possible de types d'occupation du sol au sein d'une maille varie de 1 à 30 pour les mailles de 8 km de côté. Un histogramme de fréquence est réalisé afin de déterminer la méthode de discrétisation adaptée à la distribution des données. L'amplitude étant relativement importante, le nombre de types d'occupation du sol est regroupé de 5 en 5.

Tab. XCI. Matrice permettant de calculer la fréquence des mailles en fonction de leur composition pour la réalisation de l'histogramme de fréquence

Nombre de types d'occupation du sol différents présents dans une maille	Nombre de mailles concernées	Fréquence (en %)
De 0 à 5		
De 6 à 10		
De 11 à 15		
De 16 à 20		
De 21 à 25		
Plus de 25		
<i>Total</i>		

Les histogrammes de fréquence montrent des distributions dissymétriques (Fig. 234). Il y a 761 mailles de 8 km de résolution. D'après la méthode de Huntsberger, 10 classes sont donc nécessaires et d'après le coefficient de Brooks-Carruthers, le nombre de classes ne doit pas dépasser 14. Pour la discrétisation, la méthode des moyennes emboîtées sera donc utilisée. Les bornes correspondront à la moyenne et aux moyennes de second et de troisième ordre, puisqu'un quatrième ordre aboutirait à un nombre trop élevé de classes (16).

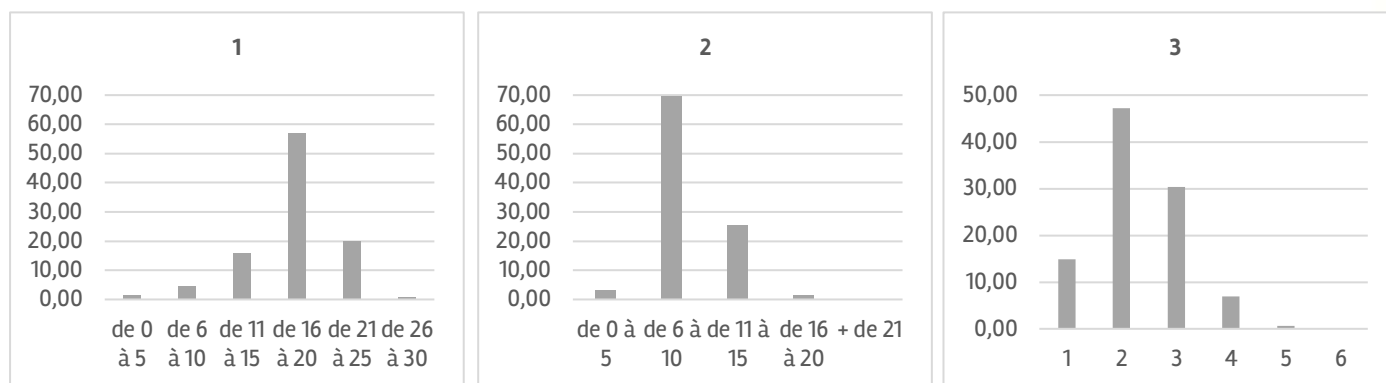


Fig. 234. Histogrammes de fréquence du nombre de types d'occupation du sol différents présents dans une maille. 1- Référentiel aquitain (maille 8 km) ; 2- CORINE Land Cover (maille 8 km) ; 3- CORINE Land Cover (maille 500 m)

Ces calculs sont répétés en prenant en compte le type d'occupation du sol dominant de la maille. Celui-ci est rapporté à son appartenance au niveau 1 de la nomenclature (1 : territoires artificialisés, 2 : territoires agricoles, 3 : forêts et milieux semi-naturels, 4 : zones humides, 5 : surfaces en eau). Ainsi, plusieurs colonnes sont ajoutées au modèle du tableau des fréquences décrit précédemment (Tab. XCII). L'objectif est d'observer si les mailles les plus hétérogènes sont liées à un type d'occupation du sol dominant.

Tab. XCII. Exemple du tableau permettant de calculer la fréquence des mailles en fonction de leur composition et du type d'occupation dominant

Nombre de types d'occupation du sol différents présents dans une maille	Nombre de mailles concernées dont la surface dominante est de type 1	Fréquence (en %)	Nombre de mailles concernées dont la surface dominante est de type 2	Fréquence (en %)	..	Fréquence (en %)	Nombre de mailles concernées dont la surface dominante est de type 5	Fréquence (en %)
De 0 à 5								
De 6 à 10								
De 11 à 15								
De 16 à 20								
De 21 à 25								
Plus de 25								
<i>Total</i>								

Enfin, la proportion occupée par le poste dominant au sein de la maille est calculée. L'histogramme de fréquence montre une distribution dissymétrique avec deux modes pour les mailles OCS-GE et une simple distribution dissymétrique pour les mailles CLC (Fig. 235). Afin de correspondre au premier cas, et pour permettre la comparaison des deux sources de données, cette variable est discrétisée selon la méthode des déciles.

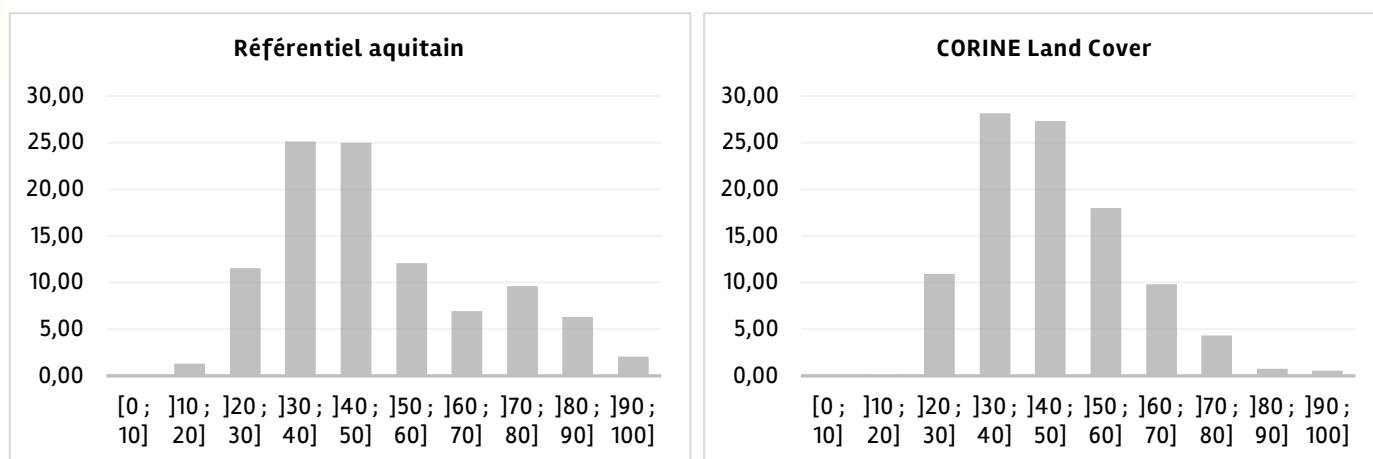


Fig. 235. Histogrammes de fréquence de la proportion occupée par le poste dominant au sein de la maille

Les résultats de ces analyses statistiques servent ensuite à une projection cartographique, qui permet d'autres analyses et notamment une mise en relation avec les points de présence des espèces étudiées.

14.2.4 Analyses cartographiques

Plusieurs séries de cartes ont été réalisées : des cartes thématiques, qui décrivent le type d'occupation du sol dominant, et des cartes choroplèthes, qui décrivent la composition interne de la maille (Fig. 232). Ces cartes permettent la visualisation et la spatialisation des informations analysées statistiquement.

- *Cartes thématiques*

Les cartes thématiques renseignent sur le type d'occupation dominant, c'est-à-dire celui dont la superficie est la plus élevée. Pour la résolution spatiale de 8 km, les deux bases de données, CLC et OCS-GE, sont comparées. La résolution spatiale correspondant à la construction des bases de données (500 m pour CLC, 100 m pour OCS-GE) permet d'affiner la visualisation et d'observer immédiatement les « manques » de la résolution 8 km pour renseigner sur le paysage.

Pour être facilement comparables, le niveau 3 de la nomenclature est utilisé pour tous les jeux de données et les couleurs utilisées sont les mêmes (codes définis par CLC).

- *Cartes choroplèthes*

Les cartes choroplèthes permettent de décrire la composition interne des mailles de 8 km de côté. Ainsi, elles complètent et apportent un contrepoint aux cartes précédentes en précisant notamment la part de la superficie occupée par le type d'occupation dominant, ou le nombre de types d'occupation du sol différents présents dans les mailles.

- *Mise en lien avec les données d'occurrence des espèces étudiées*

Pour une première approche de la corrélation entre la présence des espèces étudiées et les informations analysées statistiquement et cartographiquement, une jointure spatiale est réalisée entre le fichier de points de présence et les cartes précédentes. Il s'agit de mettre en regard la présence des espèces avec les caractéristiques de leur habitat telles qu'elles ont été définies par les analyses précédentes.

14.3 Résultats

Les résultats présentés dans ce chapitre sont organisés en deux parties. D'abord, les effets de la résolution spatiale sur la caractérisation de l'occupation du sol et son lien avec la présence des espèces étudiées sont exposés (1). Ensuite, la composition des mailles et la configuration des patrons paysagers sont décrites et mises en relation avec la présence des espèces étudiées (2).

14.3.1 Comparaison des deux bases de données

Les cartes thématiques présentées dans la figure suivante rendent compte du type d'occupation du sol dominant, au sein de mailles de différentes résolutions spatiales (Fig. 236). Ainsi, en Dordogne, l'habitat de type forêt de feuillus, reconnu par le Référentiel aquitain, apparaît comme systèmes culturels et parcellaires complexes dans CORINE Land Cover. En Gironde et dans les Landes, l'hétérogénéité au sein de la forêt de conifères, reconnue par le Référentiel aquitain, est classée comme des espaces forestiers et de végétation arbustive en mutation selon CORINE Land Cover.

Sur la carte construite avec le Référentiel aquitain, de grandes unités se dessinent : forêt de conifères du triangle landais, territoires agricoles dans le Lot-et-Garonne et dans la zone limitrophe des Landes et des Pyrénées-Atlantiques, forêt de feuillus en Dordogne et en Pyrénées-Atlantiques, vignobles principalement dans l'Entre-Deux-Mers girondin. Dans la carte de CORINE Land Cover, ces unités semblent « dérangées » par une hétérogénéité interne.

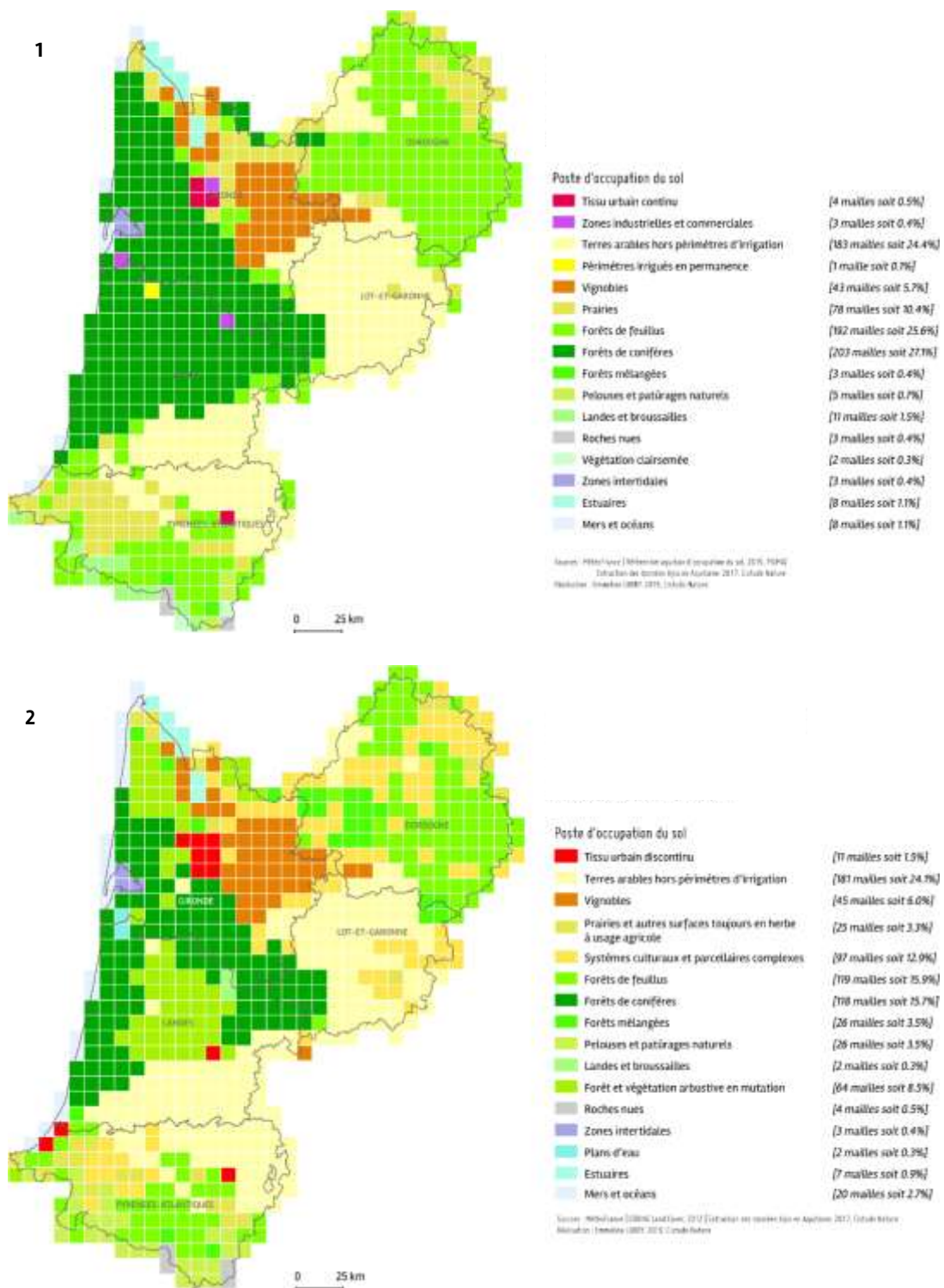


Fig. 236. L'occupation du sol dominante en Aquitaine au sein des mailles de 8 km de résolution selon le Référentiel aquitain (1) et CORINE Land Cover (2)

Par une jointure spatiale, l'information sur le type d'occupation du sol dominant dans la maille est attribuée aux points de présence des rainettes qui se trouvent dans la maille. Les cartes suivantes montrent le résultat de cette opération en fonction des bases de données utilisées (Fig. 237).

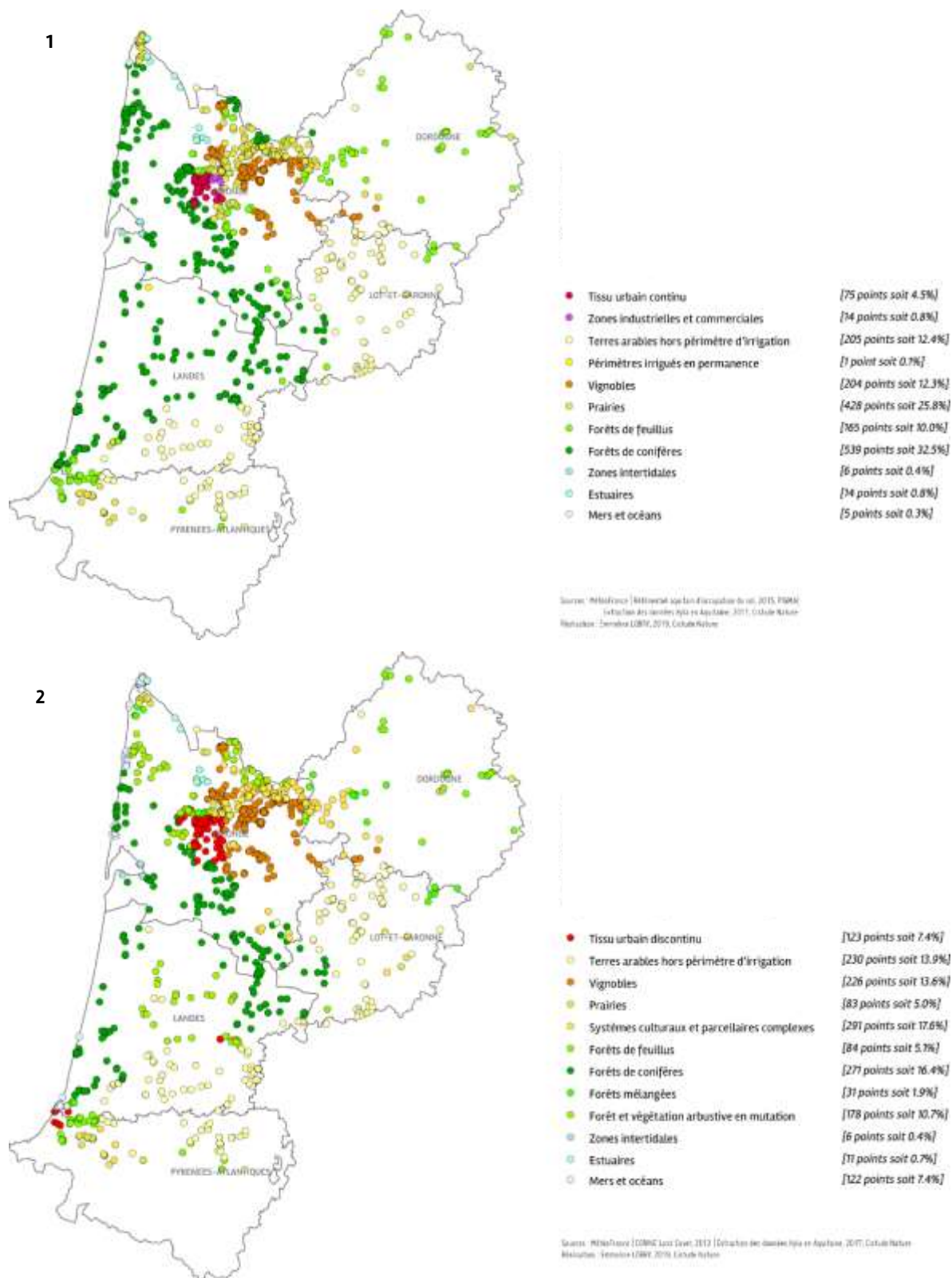


Fig. 237. Correspondance entre présence des espèces et types d'occupation du sol dominants selon le Référentiel aquitain (1) et CORINE Land Cover (2)

Le tableau suivant compare le rattachement des points de présence aux postes dominants des mailles de 8 km de résolution (Tab. XCIII). En effet, avec le Référentiel aquitain, la présence de ces espèces se trouve dans les forêts de conifères, dans les prairies et dans le tissu urbain continu, alors qu'elle est située dans la forêt de conifères dans une moindre mesure, dans les systèmes cultureux, dans les espaces forestiers en cours de mutation et dans le tissu urbain discontinu avec CORINE Land Cover.

Tab. XCIII. Comparaison de la part des points de présence d'au moins une espèce *Hyla* rattaché à un type d'occupation du sol dominant, selon le Référentiel aquitain et CORINE Land Cover

	<i>Référentiel aquitain</i>	<i>CORINE Land Cover</i>
Forêts de conifères	32.5 %	16.4 %
Prairies	25.8 %	5.0 %
Systèmes cultureux et parcellaires complexes	-	17.6 %
Terres arables hors périmètre d'irrigation	12.4 %	13.9 %
Vignobles	12.3 %	13.6 %
Forêt et végétation arbustive en cours de mutation	-	10.7 %
Forêts de feuillus	10.0 %	5.1 %
Tissu urbain discontinu	-	7.4 %
Mers et océans	0.3 %	7.4 %
Tissu urbain continu	4.5 %	-
Forêts mélangées	0.0 %	1.9 %
Estuaires	0.8 %	0.7 %
Zones industrielles et commerciales	0.8 %	-
Zones intertidales	0.4 %	0.4 %
Périmètres irrigués en permanence	0.1 %	-
Pelouses et pâturages naturels	0.0 %	0.0 %
Landes et broussailles	0.0 %	0.0 %
Roches nues	0.0 %	0.0 %
Végétation clairsemée	0.0 %	-
Plans d'eau	-	0.0 %

NB. 0.0% : pas de présence de *Hyla* mais poste présent sur le territoire / - : poste absent du territoire

Des cartes montrant le type d'occupation dominant au sein des mailles dont la résolution spatiale de rendu correspond à celle de sa construction ont été réalisées pour le département de la Gironde (sur la Fig. 238, avec (1) la donnée CORINE Land Cover à 500 m de résolution et (2) le Référentiel aquitain à 100 m de résolution). La quantité d'information contenue dans ces cartes est bien plus importante : alors qu'il est constitué de 203 mailles de 8 km de résolution, le département girondin est caractérisé par 1 299 200 mailles de 100 m de résolution.

Ainsi, l'hétérogénéité qui apparaissait à la résolution 8 km dans les données CORINE Land Cover se retrouve dans la carte à 500 m de résolution : les espaces classés en forêt de conifères et ceux classés en forêt et végétation arbustive en mutation s'entremêlent.

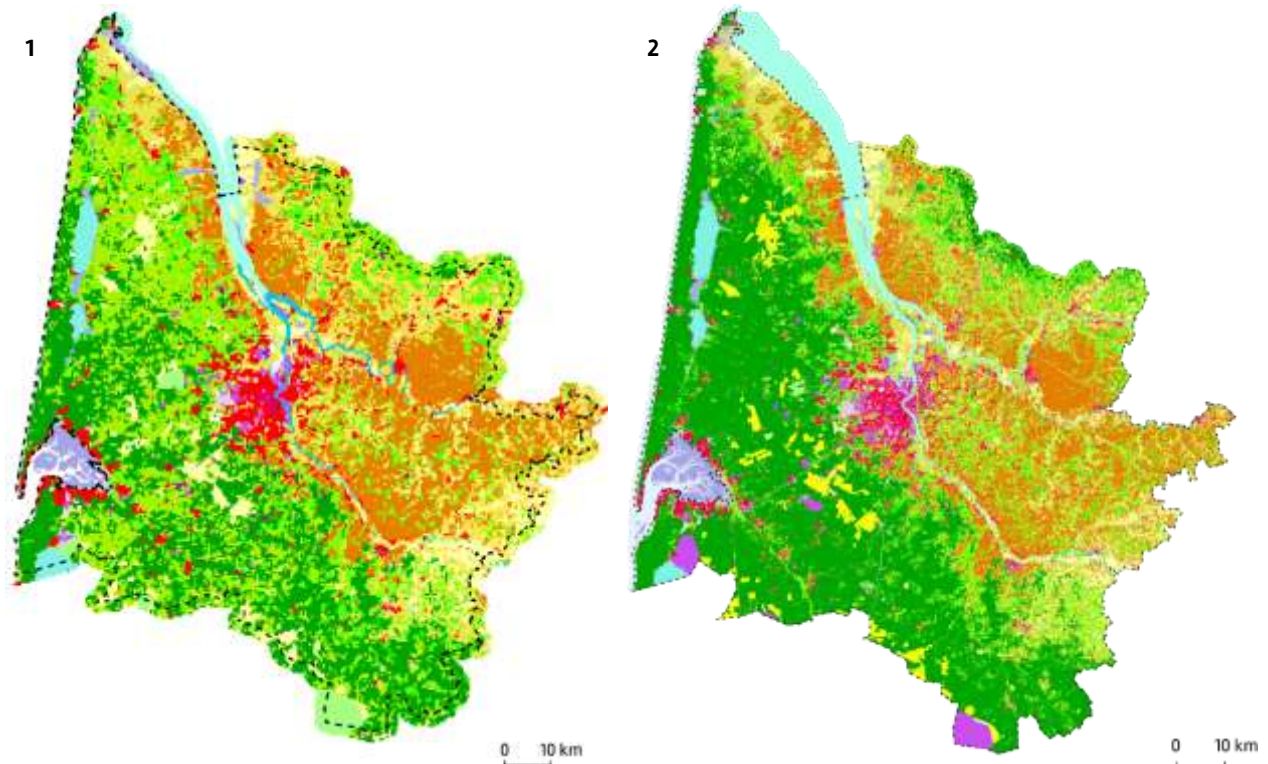


Fig. 238. L'occupation du sol dominante en Gironde au sein des mailles de 500 m de résolution selon CORINE Land Cover 2012 (1) et des mailles de 100 m de résolution selon le Référentiel aquitain 2015 (2)

Les tableaux suivants comparent les résultats de l'attribution du type d'occupation du sol dominant aux points de présence situés dans la maille, en fonction de la base de données et de la résolution utilisée.

Le premier présente les résultats pour les cartes créées avec CORINE Land Cover, aux résolutions 8 km et 500 m (Tab. XCIV). D'après cette base de données, à 8 km de résolution, les points de présence des rainettes seraient situés dans les systèmes culturaux et parcellaires complexes et les vignobles (44.45 % des points de présence), les forêts de conifères et espaces forestiers en mutation (28.68 %) et le tissu urbain discontinu (10.35 %). Lorsque les données sont retravaillées à 500 m de résolution, la part des points de présence dans les territoires agricoles cités diminue (23.85 %), au profit d'un autre type d'occupation du sol agricole : les prairies et surfaces en herbe à usage agricole (15.84 %). La présence des rainettes dans les forêts de conifères et les espaces forestiers en mutation est confirmée (30.89 %) et complétée par une présence dans des forêts de feuillus et des forêts mélangées (8.51 %). Enfin, il faut remarquer l'apparition du poste marais intérieurs (4.30 %).

Tab. XCIV. Comparaison de la part des points de présence d'au moins une espèce *Hyla* rattachés à un type d'occupation du sol dominant, d'après CORINE Land Cover, selon deux résolutions spatiales

	500 m	8 km
Systèmes cultureux et parcellaires complexes	18.77 %	23.65 %
Vignobles	5.08 %	20.80 %
Prairies et autres surfaces toujours en herbe à usage agricole	15.84 %	6.08 %
Forêt et végétation arbustive en mutation	15.05 %	13.68 %
Forêts de conifères	9.09 %	15.00 %
Tissu urbain discontinu	9.19 %	10.35 %
Mers et océans	0.10 %	7.03 %
Forêts de feuillus	4.40 %	0.28 %
Marais intérieurs	4.30 %	-
Forêts mélangées	4.11 %	1.23 %

NB. Seules les valeurs > 3.00% sont représentées dans ce tableau / - : poste absent sur le territoire

Le second tableau présente les résultats pour les cartes créées avec le Référentiel aquitain, aux résolutions 8 km et 100 m (Tab. XCV). D'après cette base de données, les points de présence des rainettes sont situés principalement dans les prairies et autres surfaces toujours en herbe à usage agricole et dans les forêts de conifères (66.31% pour la résolution 8 km, 42.89 % pour la résolution 100 m). La diminution de la proportion des points attribués à ces deux postes d'occupation du sol entre les deux résolutions est notable. La présence des rainettes dans les territoires artificialisés varie : la carte de 8 km de résolution n'identifie que des espaces urbains continus comme poste dominant, alors que celle à 100 m de résolution différencie des espaces urbains continus, discontinus et des zones industrielles et commerciales. Au total, la présence est plus importante dans les espaces artificialisés dans la carte de 100 m de résolution que dans celle de 8 km de résolution (respectivement 18.67 % et 8.62 %).

Tab. XCV. Comparaison de la part des points de présence d'au moins une espèce *Hyla* rattachés à un type d'occupation du sol dominant, d'après le Référentiel aquitain, selon deux résolutions spatiales

	100 m	8 km
Prairies et autres surfaces toujours en herbe à usage agricole	25.89 %	37.66 %
Forêts de conifères	17.00 %	28.65 %
Vignobles	3.16 %	19.07 %
Forêts de feuillus	10.97 %	3.19 %
Tissu urbain discontinu	9.58 %	-
Tissu urbain continu	6.03 %	7.26 %
Marais intérieurs	5.34 %	-
Landes et broussailles	4.94 %	-
Plans d'eau	3.26 %	-
Zones industrielles et commerciales	3.06 %	1.36 %

NB. Seules les valeurs > 3.00% sont représentées dans ce tableau / - : poste absent sur le territoire

Les figures suivantes comparent la proportion des points de présence dans l'habitat (tons foncés) et la proportion de la présence de cet habitat dans le département (tons clairs) dans les cartes réalisées avec le Référentiel aquitain. Le tableau permet de mettre en parallèle les résultats obtenus en fonction des résolutions spatiales utilisées (Tab. XCVI). Le graphique permet de synthétiser ces résultats (Fig. 239).

La proportion des points de présence des rainettes dans un type d'occupation ne correspond pas à celle de la superficie totale de ce type d'occupation du sol dans le département. Les résultats avec la

carte de 100 m de résolution montrent que les prairies, marais intérieurs, landes et broussailles et plans d'eau concentrent près de 40 % des points de présence de rainettes alors que ces types d'occupation du sol représentent 13.5 % du territoire girondin. A l'inverse, les forêts de conifères et vignobles constituent presque la moitié du territoire et rassemblent un cinquième des points de présence. A la résolution de 8 km, le constat pour les prairies et les forêts de conifères restent valables. En revanche, un équilibre est visible entre la proportion de présence des rainettes et la part de la superficie du département classée en vignobles.

Tab. XCVI. Disponibilité des types d'occupation du sol rattachés à la présence des rainettes

	100 m		8 km	
	Part des points de présence Hyla	Part de la superficie du département	Part des points de présence Hyla	Part de la superficie du département
Prairies	25.89 %	10.85 %	37.66 %	10.34 %
Forêts de conifères	17.00 %	34.40 %	28.65 %	47.78 %
Vignobles	3.16 %	12.48 %	19.07 %	20.20 %
Forêts de feuillus	10.97 %	11.76 %	3.19 %	5.91 %
Tissu urbain discontinu	9.58 %	4.03 %	-	-
Tissu urbain continu	6.03 %	2.35 %	7.26 %	1.48 %
Marais intérieurs	5.34 %	0.37 %	-	-
Landes et broussailles	4.94 %	1.09 %	-	-
Plans d'eau	3.26 %	1.25 %	-	-
Zones industrielles et commerciales	3.06 %	2.23 %	1.36 %	1.48 %

NB. Seules les valeurs > 3.00% sont représentées dans ce tableau / - : poste absent sur le territoire

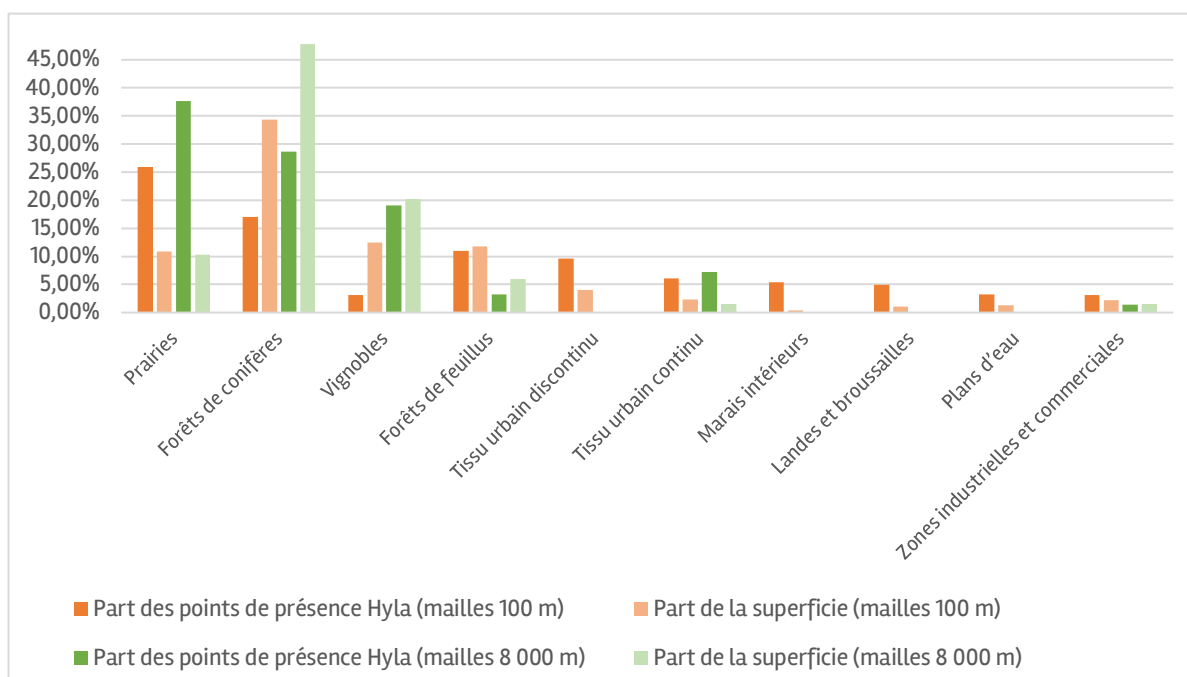


Fig. 239. Proportion des points de présence des rainettes et des types d'occupation du sol associés, en Gironde, d'après le Référentiel aquitain

Après avoir comparé les effets des résolutions spatiales sur l'identification des types d'occupation du sol et sur leur relation avec les points de présence des rainettes, la seconde partie des résultats présente une première approche de l'utilisation d'indices paysagers.

14.3.2 Composition et configuration internes des mailles de 8 km de résolution

Les résultats présentés ici constituent une première approche pour le développement d'une méthode visant à intégrer les informations internes aux mailles de 8 km de résolution. Ces informations sont disponibles lorsque les données sont travaillées à une résolution plus fine. L'étude est effectuée à l'échelon régional et mobilise en parallèle les deux bases de données d'occupation du sol.

Le tableau suivant présente la fréquence du nombre de types d'occupation du sol différents au sein des mailles de 8 km de résolution (Tab. XCVII). La donnée « nombre de postes différents » a été discrétisée selon la méthode des moyennes emboîtées (cf. 14.2.3, Fig. 234). Les mailles construites avec le Référentiel aquitain (OCS-GE) apparaissent plus hétérogènes que celles construites avec CORINE Land Cover (CLC) : l'amplitude du nombre de types d'occupation du sol est plus élevée (respectivement 29 et 20) et la moyenne est bien supérieure (respectivement 17.6 et 9.3). La valeur la plus proche de la moyenne du nombre de types d'occupation du sol présents dans une maille CLC est la borne de la première classe, soit la moyenne de troisième ordre inférieur, pour OCS-GE (9.3 types).

Tab. XCVII. Un indice de composition : les multiples types d'occupation du sol présents dans les mailles de 8 km de résolution

Référentiel aquitain			CORINE Land Cover		
<i>Nombre de types d'occupation du sol différents présents dans une maille</i>	Nombre de mailles concernées	Fréquence (en %)	<i>Nombre de types d'occupation du sol différents présents dans une maille</i>	Nombre de mailles concernées	Fréquence (en %)
[1.0 ; 9.9[	34	4.47 %	[2.0 ; 6.3[	77	10.12 %
[9.9 ; 13.7[	66	8.67 %	[6.3 ; 7.7[	85	11.17 %
[13.7 ; 15.8[	69	9.07 %	[7.7 ; 8.5[	126	16.56 %
[15.8 ; 17.6[	121	15.90 %	[8.5 ; 9.3[	146	19.19 %
[17.6 ; 18.5[	105	13.80 %	[9.3 ; 10.4[	122	16.03 %
[18.5 ; 20.0[	208	27.33 %	[10.4 ; 11.4[	94	12.35 %
[20.0 ; 21.3[	71	9.33 %	[11.4 ; 13.2[	81	10.64 %
[21.3 ; 30.0]	87	11.43 %	[13.2 ; 22.0]	30	3.94 %
<i>Total</i>	761	100.00 %	<i>Total</i>	761	100.00 %

Les figures suivantes présentent une analyse complémentaire en tenant compte du lien avec le grand type d'occupation du sol dominant dans la maille (Tab. XCVIII et Fig. 240). Pour rappel, ce qui est nommé « grand type » correspond à l'appartenance au niveau 1 de la nomenclature (1 : territoires artificialisés, 2 : territoires agricoles, 3 : forêts et milieux semi-naturels, 4 : zones humides, 5 : surfaces en eau).

Les mailles dont la surface dominante est classée en territoires artificialisés apparaissent très hétérogènes : près de 9 dixièmes de ces mailles appartiennent aux trois classes les plus élevées pour les deux bases de données, c'est-à-dire entre 19 et 30 types d'occupation différents pour les mailles construites avec le Référentiel aquitain, et entre 11 et 22 postes pour les mailles CORINE Land Cover. Les mailles dont les zones humides constituent le poste dominant sont également très hétérogènes : entre 20 et 30 types d'occupation du sol pour les mailles OCS-GE et entre 10 et 13 types d'occupation du sol pour les mailles CLC. Les mailles dont les types dominants sont des territoires agricoles, des forêts et milieux semi-naturels ou des surfaces en eau apparaissent hétérogènes mais les tendances sont moins prononcées que pour les deux grands types cités précédemment.

Tab. XCVIII. Un indice de configuration : homogénéité ou hétérogénéité mise en lien avec le type d'occupation du sol dominant dans les mailles de 8 km de résolution

Référentiel aquitain						CORINE Land Cover					
Nombre de types d'occupation du sol différents présents dans une maille	Territoires artificialisés dominants	Territoires agricoles dominants	Forêts et milieux semi-naturels dominants	Zones humides dominantes	Surfaces en eau dominantes	Nombre de types d'occupation du sol différents présents dans une maille	Territoires artificialisés dominants	Territoires agricoles dominants	Forêts et milieux semi-naturels dominants	Zones humides dominantes	Surfaces en eau dominantes
[1.0 ; 9.9[	0.00	2.26	4.27	0.00	45.00	[2.0 ; 6.3[	0.00	5.65	13.77	0.00	23.33
[9.9 ; 13.7[	16.67	2.90	13.03	0.00	5.00	[6.3 ; 7.7[	0.00	8.76	13.22	0.00	20.00
[13.7 ; 15.8[	0.00	4.19	12.80	0.00	10.00	[7.7 ; 8.5[	9.09	15.82	18.18	0.00	10.00
[15.8 ; 17.6[	0.00	9.35	21.80	0.00	0.00	[8.5 ; 9.3[	0.00	19.49	20.39	0.00	10.00
[17.6 ; 18.5[	0.00	14.84	13.74	0.00	5.00	[9.3 ; 10.4[	0.00	17.23	15.15	33.33	16.67
[18.5 ; 20.0[	50.00	34.52	22.75	0.00	10.00	[10.4 ; 11.4[	9.09	14.97	10.47	0.00	6.67
[20.0 ; 21.3[	16.67	13.23	6.16	33.33	10.00	[11.4 ; 13.2[	36.36	12.15	8.54	66.67	3.33
[21.3 ; 30.0]	16.67	18.71	5.45	66.67	15.00	[13.2 ; 22.0]	45.45	5.93	0.28	0.00	10.00

La figure suivante représente graphiquement ces résultats (Fig. 240). Les fréquences sont compilées et la ligne rouge représente la borne de classe correspondant à la moyenne. Ce graphique permet de visualiser rapidement le résultat énoncé précédemment : les mailles dont la surface dominante est occupée par un grand type d'occupation du sol « territoires artificialisés » ou « zones humides » sont les plus hétérogènes, avec un nombre de types d'occupation du sol différents supérieur à la moyenne. En reliant visuellement les classes, une différence apparaît principalement, entre les deux bases de données, pour les mailles dont le grand type dominant est constitué de territoires agricoles. En effet, alors que la majorité des mailles OCS-GE apparaissent plus hétérogènes que la moyenne, il y a autant de mailles CLC dont l'hétérogénéité est supérieure à la moyenne que de mailles dont elle lui est inférieure.

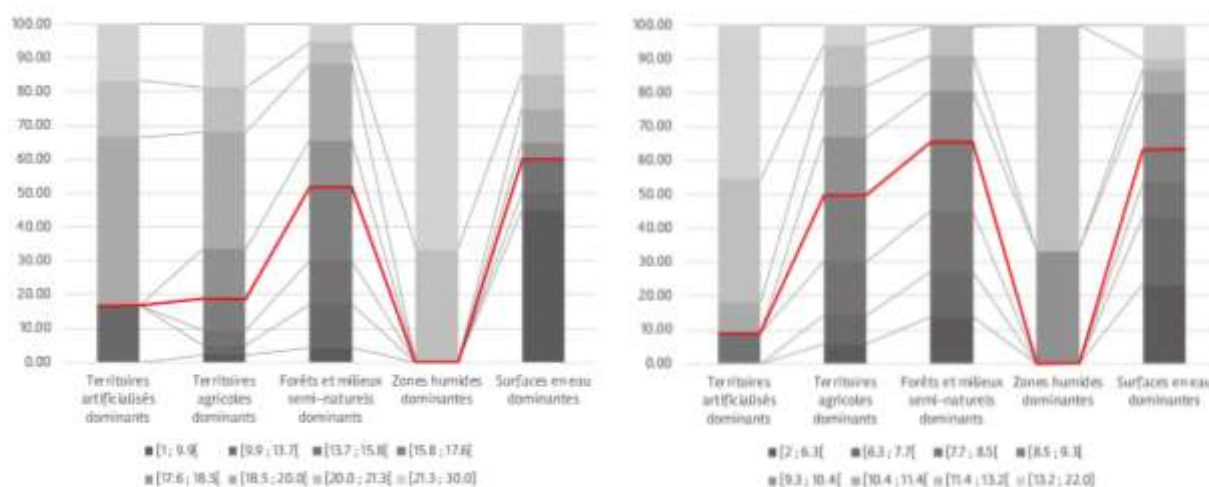


Fig. 240. Configuration des mailles : nombre de postes d'occupation du sol différents au sein de la maille en fonction du grand type dominant.

Les informations présentées statistiquement ont été projetées sous forme de cartes choroplèthes. Les cartes suivantes (Fig. 241 et Fig. 242) visent à exprimer respectivement la composition et la configuration de l'occupation du sol au sein des mailles de 8 km de résolution.

La carte du Référentiel aquitain montre un effet de bord lié au manque de données pour l'ensemble des mailles en limites de région (Fig. 241-1). Les mailles composées du plus petit nombre de types d'occupation du sol différents sont situés dans les unités relativement homogènes : le triangle landais et les Pyrénées.



Fig. 241. Le nombre de types d'occupation présents par maille comme indice de composition (1- Référentiel aquitain ; 2- CORINE Land Cover)

Ces cartes permettent de constater que les mailles les plus homogènes se trouvent globalement dans les mêmes espaces, proportion gardée du nombre différent entre les deux bases de données. La carte du Référentiel aquitain (Fig. 242-1) tend à montrer les espaces de transition, plus hétérogènes, entre les unités homogènes. Ce contraste est moins visible sur la carte de CORINE Land Cover (Fig. 242-2).

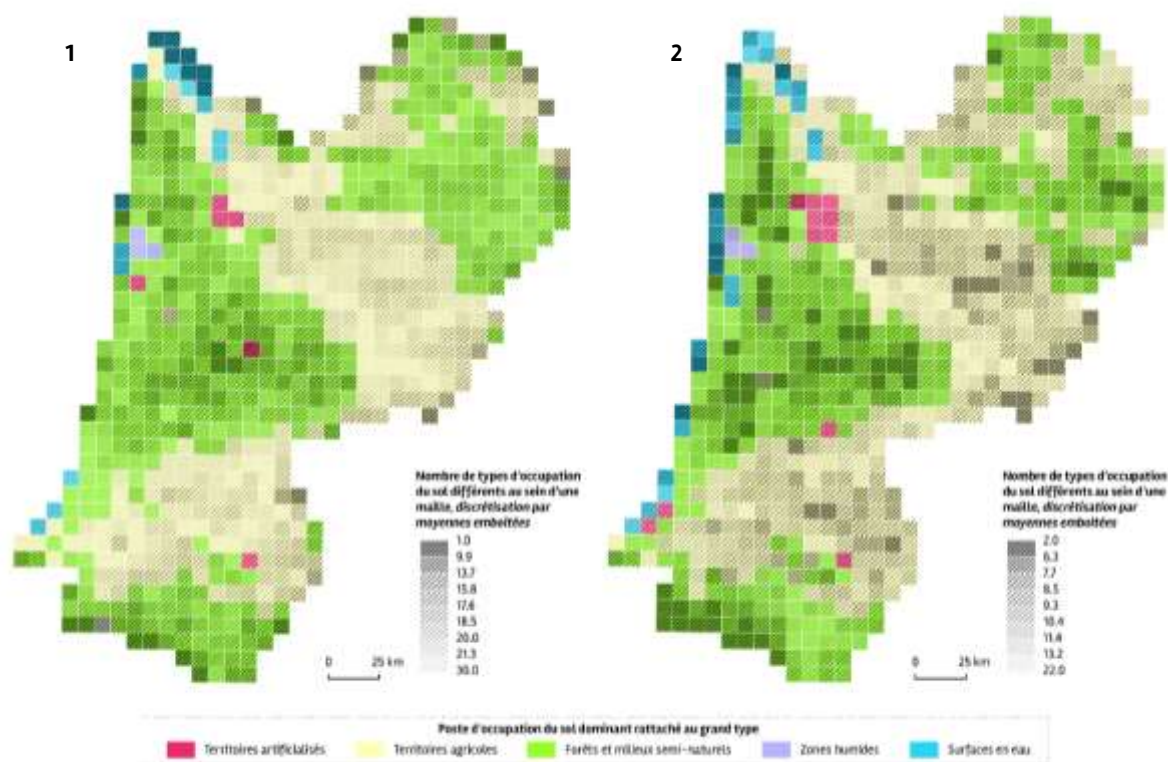


Fig. 242. La composition rattachée au grand type dominant comme indice de configuration
(1- Référentiel aquitain ; 2- CORINE Land Cover)

L'objectif de ces analyses est de caractériser les espaces dans lesquels les rainettes sont présentes. Comme précédemment, les variables créées sont donc mises en lien avec les points de présence des trois espèces par le principe d'une jointure spatiale effectuée avec le logiciel de SIG. Le tableau suivant présente la part des points de présence en fonction de la classe renseignant le nombre de types d'occupation du sol différents présents dans la maille (Tab. XCIX). La majorité des points de présence se situent dans des mailles composées de nombreux types d'occupation du sol : respectivement 86.29% et 73.29% des points de présence sont constitués d'un nombre supérieur à la moyenne (de 18 à 30 pour OCS-GE et de 10 à 22 pour CLC).

Tab. XCIX. Composition des mailles dans lesquelles les rainettes sont présentes

Référentiel aquitain			CORINE Land Cover		
Nombre de types d'occupation du sol différents présents dans une maille	Nombre de points de présence	Fréquence (en %)	Nombre de types d'occupation du sol différents présents dans une maille	Nombre de points de présence	Fréquence (en %)
[1.0 ; 9.9[	22	1.33 %	[2.0 ; 6.3[	66	3.99 %
[9.9 ; 13.7[	49	2.96 %	[6.3 ; 7.7[	93	5.62 %
[13.7 ; 15.8[	52	3.14 %	[7.7 ; 8.5[	90	5.44 %
[15.8 ; 17.6[	104	6.29 %	[8.5 ; 9.3[	193	11.67 %
[17.6 ; 18.5[	209	12.64 %	[9.3 ; 10.4[	320	19.35 %
[18.5 ; 20.0[	256	15.48 %	[10.4 ; 11.4[	235	14.21 %
[20.0 ; 21.3[	469	28.36 %	[11.4 ; 13.2[	425	25.70 %
[21.3 ; 30.0]	493	29.81 %	[13.2 ; 22.0]	232	14.03 %
<i>Total</i>	<i>1654</i>	<i>100.00 %</i>	<i>Total</i>	<i>1654</i>	<i>100.00 %</i>

La configuration peut être exprimée par la proportion de surface occupée par le type d'occupation du sol dominant. Cela permet d'observer si le poste dominant est susceptible de « partager » la maille avec d'autres types d'occupation du sol. Les cartes suivantes (Fig. 243) permettent d'observer la proportion de la surface de la maille occupée par le poste dominant. La carte du Référentiel aquitain (1) montre la présence de structures spatiales, plus que la carte de CORINE Land Cover (2). Cela permet de voir que les mailles classées en forêt de conifères sont homogènes alors que d'autres types comme les vignobles et prairies apparaissent dans des mailles plus hétérogènes.

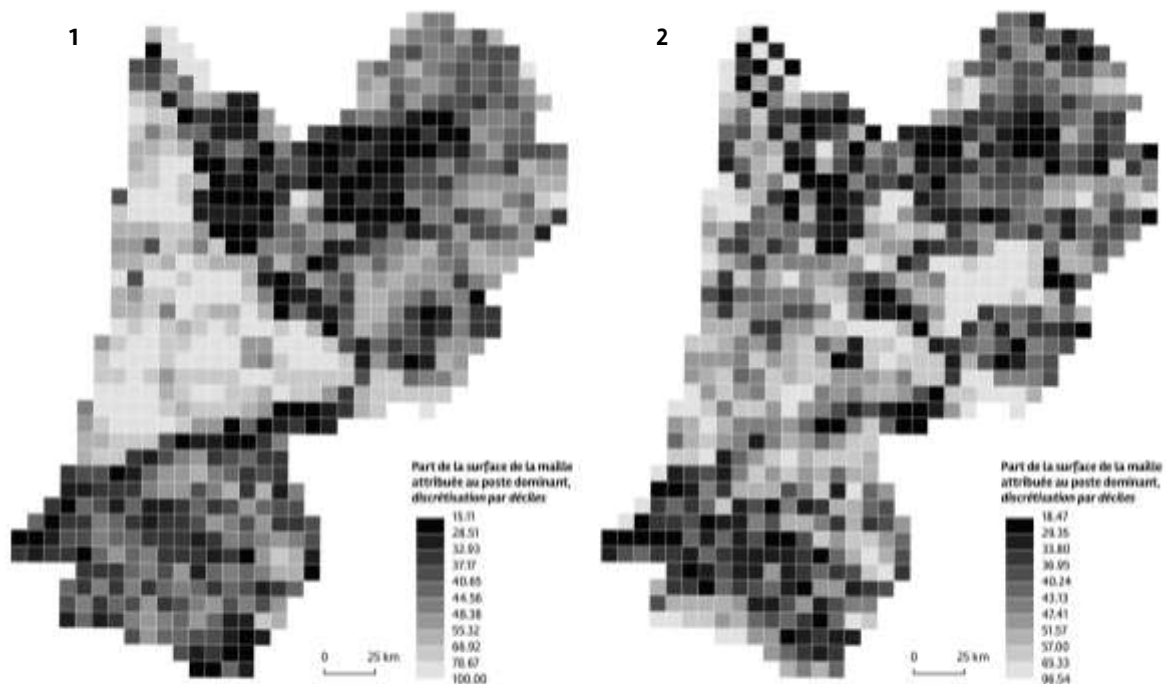


Fig. 243. La proportion occupée par le poste dominant comme indice de l'homogénéité ou de l'hétérogénéité interne de la maille (1- Référentiel aquitain ; 2- CORINE Land Cover)

Le tableau suivant présente la mise en lien de cette variable avec la présence des rainettes (Tab. C). Dans les deux bases de données, la majorité des points de présence se trouve dans les 1^{er} et 2^{ème} déciles, le 4^{ème} décile et les 8 et 9^{ème} déciles. Les 1^{er} et 2^{ème} déciles concentrent un tiers des points de présence.

Tab. C. Importance de la représentativité du poste dominant pour expliquer la présence des rainettes

Référentiel aquitain			CORINE Land Cover		
Part de la superficie de la maille occupée par le poste dominant	Nombre de points de présence	Fréquence (en %)	Part de la superficie de la maille occupée par le poste dominant	Nombre de points de présence	Fréquence (en %)
[15.11 ; 28.51]	308	18.62 %	[18.47 ; 29.35]	293	17.71 %
]28.51 ; 32.93]	249	15.05 %	]29.35 ; 33.80]	203	12.27 %
]32.93 ; 37.17]	134	8.10 %	]33.80 ; 36.95]	117	7.07 %
]37.17 ; 40.65]	324	19.59 %	]36.95 ; 40.24]	160	9.67 %
]40.65 ; 44.56]	103	6.23 %	]40.24 ; 43.13]	253	15.30 %
]44.56 ; 48.38]	69	4.17 %	]43.13 ; 47.41]	158	9.55 %
]48.38 ; 55.32]	61	3.69 %	]47.41 ; 51.57]	78	4.72 %
]55.32 ; 66.92]	172	10.40 %	]51.57 ; 57.00]	109	6.59 %
]66.92 ; 78.67]	142	8.59 %	]57.00 ; 65.33]	187	11.31 %
]78.67 ; 100.00]	92	5.56 %	]65.33 ; 96.54]	96	5.80 %
<i>Total</i>	<i>1654</i>	<i>100.00 %</i>	<i>Total</i>	<i>1654</i>	<i>100.00 %</i>

14.4 Discussion

Les modèles de répartition d'espèces analysent la corrélation entre l'occurrence d'une ou plusieurs espèces et des variables climatiques. Si cette corrélation apparaît pertinente aux échelons globaux ou continentaux, le climat seul ne suffit pas à expliquer la répartition des espèces aux échelons régionaux ou locaux (FRANCESCO FICETOLA *et al.*, 2014). A ces échelons, d'autres variables explicatives sont indispensables : des informations sur l'habitat, le paysage, la végétation ou les interactions biotiques (*ibid.*). L'utilisation et/ou la création de ces variables nécessite au préalable des questions et choix méthodologiques, dans la mesure où l'ensemble des variables explicatives utilisées dans un SDM doivent être spatialisées, au format raster, avec une emprise géographique et des résolutions spatiales et temporelles similaires (GEORGES & THUILLER, 2013).

L'enjeu principal du travail présenté dans ce chapitre réside dans l'exploration des effets des différentes résolutions des données : celle des données d'occupation du sol, qui servent à créer des variables paysagères, avec celle des données climatiques et la possibilité de les articuler. Les premières analyses exposées montrent la possibilité d'exprimer des données paysagères créées à plus fine résolution dans des mailles de 8 km de résolution. Cette inclusion d'une résolution élevée est rendue nécessaire par le choix des espèces étudiées dans le cadre du programme de recherche : avec des capacités de déplacement limitées, leur niche écologique est réduite. Les espèces suivies sont spécialistes de certains types d'habitat, souvent de petite taille (les lagunes au sein des forêts de conifères dans les Landes par exemple).

Une réflexion sur le choix des variables paysagères constitue le second enjeu de ce travail. De nombreuses variables permettant de caractériser le paysage peuvent être calculées, notamment grâce à des méthodes et outils issus de la recherche en écologie du paysage (MCGARIGAL & MARKS, 1995 ; VOGT & RIITERS, 2017). Toutefois, le nombre limité de variables explicatives à implémenter dans le SDM oblige à la parcimonie (GUISAN & ZIMMERMANN, 2000 ; FRANCESCO FICETOLA *et al.*, 2014). Comme toutes les variables explicatives, la corrélation entre la donnée d'occurrence de l'espèce étudiée et les variables

doit être validée statistiquement. Par ailleurs, il est nécessaire d'être prudent dans l'utilisation de données d'occupation du sol actuelles vis-à-vis de l'objectif prédictif de la modélisation (BRADLEY *et al.*, 2012).

14.4.1 Sur les enjeux liés à l'articulation des résolutions

La comparaison entre les deux bases de données d'occupation du sol disponibles en Nouvelle-Aquitaine, CORINE Land Cover (CLC) et le Référentiel aquitain d'occupation du sol à grande échelle (OCS-GE), met en exergue les différences de résultats et d'interprétations possibles, qui sont liées à la résolution spatiale de fabrication de ces données (cf. Fig. 236).

Avec CLC, les espaces hétérogènes sont généralement classés dans des postes plus génériques, flous et/ou hétérogènes par définition : « forêt et végétation arbustive en mutation », « systèmes culturaux parcellaires complexes », « forêts mélangées ». Cela s'explique par la taille de l'unité minimale cartographiée (25 hectares). Ainsi, des espaces de petite taille sont agglomérés en une entité nécessairement qualifiée par un titre de thème reflétant l'hétérogénéité interne de l'entité constituée.

Paradoxalement, avec OCS-GE, dont la surface d'unité minimale cartographiée est de 10 hectares, se dessinent sur la carte de grandes unités qui ressemblent notamment aux unités écopaysagères dessinées par l'Union Régionale des Conseils d'Architecture, d'Urbanisme et de l'Environnement de Nouvelle-Aquitaine (URCAUE) dans le cadre de leur dispositif Assistance Continuités Ecologiques (URCAUE NOUVELLE-AQUITAINE, 2018). En effet, l'identification d'entités de plus petite superficie conduit à leur « invisibilisation ». Lors de la création de la carte de 8 km de résolution, les superficies des entités sont additionnées et regroupées par classe afin de ne conserver que la classe dominante, c'est-à-dire ayant la superficie la plus élevée au sein de la maille. Ainsi, les petites entités liées aux espaces de transition disparaissent de la carte.

Le schéma suivant illustre l'effet de la résolution spatiale utilisée pour la création de la donnée « occupation du sol » (Fig. 244). Dans cette maille, trois espaces sont différenciés par OCS-GE : l'un classé en « forêt de conifères », un autre en « landes et broussailles » et un troisième classé « forêt et végétation arbustive en mutation », qui forme la transition entre les deux premiers types identifiés. La superficie des espaces en « landes et broussailles » et en « forêt et végétation arbustive en mutation » étant faible pour eux-mêmes, la base de données CLC dessine une entité de taille plus importante et l'attribue à une classe, hétérogène par définition, « forêt et végétation arbustive en mutation ». Lorsque les superficies sont calculées afin d'attribuer le type dominant à une maille de 8 km, la superficie la plus importante pour OCS-GE est celle de la classe « forêt de conifères », mais pour CLC, c'est la classe « forêt et végétation arbustive en mutation » qui occupe le plus de surface.

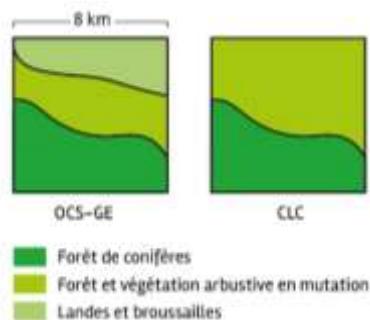


Fig. 244. Effet de la résolution spatiale lors de l'étape de création de la donnée « occupation du sol »

Pour aller plus loin, ces effets ont été explorés à la résolution spatiale en sortie qui correspond à celle utilisée en entrée, lors de la création de la donnée « occupation du sol », plutôt qu'en recherchant immédiatement la résolution de 8 km. Ainsi, les bases de données vectorielles OCS-GE et CLC ont été comme rasterisées selon la résolution correspondant à la taille de l'unité minimale cartographiée : respectivement 100 m ($\sqrt{10}$ ha) et 500 m ($\sqrt{25}$ ha). Les cartes ainsi créées permettent d'observer les informations contenues dans les bases de données et qui « disparaissent » lorsqu'elles sont utilisées à la même résolution spatiale que les données climatiques.

Lorsque les données d'occupation du sol sont mises en lien avec la présence des espèces étudiées, les effets de la résolution spatiale utilisée pour la création de ces données ont des conséquences sur la perception de ce qui sera nommé « habitats » des espèces (cf. Fig. 237). Dans cette première étude, les trois espèces *Hyla arborea*, *Hyla meridionalis* et *Hyla molleri* ont été étudiées indifféremment, tout en sachant qu'elles n'ont pas toutes le même habitat. Les analyses sont restées générales, c'est-à-dire que les points de présence n'ont pas été différenciés en fonction des espèces, pour tester la méthode et seront effectuées pour chaque espèce par la suite.

Les résultats montrent des différences dans la perception des habitats des espèces en fonction de la base de données utilisée : aux forêts de conifères (OCS-GE) s'ajoutent des espaces forestiers en cours de mutation (CLC) ; aux prairies (OCS-GE) se substituent les systèmes cultureux complexes (CLC). Ces changements sont directement liés aux effets décrits précédemment (cf. Fig. 244). L'utilisation des données construites à la résolution d'entrée rendent visibles de nouveaux habitats tels que les « marais intérieurs » et « landes et broussailles », qui correspondent notamment à un habitat attendu pour certaines espèces qui préfèrent les milieux frais de type lagune ou lande humide. Ces types d'occupation du sol, nommés ici secondaires (par opposition au type dit dominant), et reconnus aux résolutions permises par les bases de données étudiées, semblent ainsi plus pertinents pour décrire les habitats des rainettes.

Ces premiers résultats démontrent l'importance de la question de la résolution spatiale comme un préalable. D'une part, parce que la résolution spatiale de création des données d'occupation du sol, et donc du paysage, a des conséquences sur la manière dont sont reconnues les entités qui les composent. Les métadonnées informent sur cette résolution et donc la validité de l'utilisation de la base de données. D'autre part, la résolution de travail permet, ou non, d'obtenir des informations pertinentes pour l'objectif de l'étude. En effet, la résolution spatiale peut constituer un facteur de compréhension : l'étude du degré de corrélation entre les données paysagères de diverses résolutions spatiales et l'occurrence des espèces pourra indiquer la résolution spatiale permettant de reconnaître certains arrangements spatiaux, notamment la connectivité paysagère. Il s'agit de questionner la compatibilité entre la résolution spatiale et la question de recherche : le lien entre l'espèce étudiée et son habitat.

Dans leurs propositions pour l'étude des changements basée sur des données d'occupation du sol, Bousquet *et al.* (2013) mettent en œuvre une étude des transitions des types d'occupation du sol à différentes dates. En l'adaptant à l'étude des changements entre résolutions, une telle matrice de transition pourrait se révéler importante pour la compréhension des mécanismes présidant les variations observées par les analyses menées, et permettrait d'en tirer des conclusions sur les possibilités d'articulation des résolutions spatiales, voire thématiques. En effet, si dans ce chapitre, les variations entre les deux bases ont été explorées en fonction de la résolution spatiale, l'effet de la résolution thématique nécessiterait d'être étudié (un niveau supplémentaire est disponible pour le OCS-GE).

Les résolutions plus fines permettent d'obtenir l'information « perdue » lorsque seul le type d'occupation dominant dans la maille est conservé. Si cette information peut être visible à des résolutions spatiales supérieures, la possibilité d'articuler les résolutions en décrivant la composition interne et en associant cette information aux mailles de 8 km de résolution a donc été explorée.

Ces nouvelles cartes montrent que les points de présence s'expliquent non pas par le poste dominant mais par les autres types d'occupation du sol présents dans ces mailles. La présence des espèces étudiées dans des mailles de 8 km de résolution composées de nombreux types d'occupation du sol. Cela amène à identifier des habitats plutôt de petite taille, qui coexistent avec de nombreux autres habitats. Ce résultat confirme l'importance de tenir compte des informations disponibles à des résolutions spatiales fines, qui apparaissent plus pertinentes pour décrire l'habitat de ces espèces.

14.4.2 Perspectives : l'utilisation des données paysagères dans les SDM

Grâce à une augmentation de la disponibilité des données paysagères, plusieurs études utilisent ce type de données dans les SDM. En général, ces variables caractérisent la structure et la composition de la végétation : l'indice de végétation par différence normalisé NDVI renseigne sur sa structure horizontale, les hauteurs de végétation obtenues par LiDAR sur sa structure verticale (BRADLEY & FLEISHMAN, 2008 ; VALLECILLO *et al.*, 2009 ; WILSON *et al.*, 2013 ; FRANCESCO FICETOLA *et al.*, 2014). L'acquisition par télédétection amène à des données continues, comme peuvent l'être les données climatiques utilisées comme variables explicatives dans les SDM.

La donnée d'occupation du sol, discrète par définition, peut être utilisée pour définir de nouvelles variables continues : un degré d'adaptation de l'habitat à l'espèce étudiée (FOURNIER *et al.*, 2017) ou servir à calculer des graphes paysagers, permettant de décrire la connectivité paysagère, qui seront intégrés comme variables explicatives dans le SDM (FOLTETE *et al.*, 2012).

Toutefois, certains auteurs mettent en garde contre une utilisation excessive des variables paysagères. Par leur tendance à améliorer la précision de la projection de la répartition actuelle de l'espèce étudiée, l'utilisation d'un grand nombre de variables paysagères peut réduire la généralité du modèle et sa reproductibilité. Ainsi, les variables paysagères doivent être utilisées parcimonieusement et surtout, l'objectif de leur intégration dans un SDM doit être explicité, afin de ne pas confondre la modélisation de l'aire de répartition actuelle et l'aire de répartition potentielle (BRADLEY *et al.*, 2012).

Dans le cadre du programme de recherche, il s'agit de proposer non pas une modélisation de l'aire de répartition actuelle mais d'envisager ses possibles variations en fonction du changement climatique. Ainsi, les variables paysagères devront décrire non pas les habitats actuels, mais des processus susceptibles d'influer sur la répartition aujourd'hui et à l'avenir : la connectivité, la fragmentation des milieux. La notion de paysage doit être envisagée plus largement. D'abord, parce que cette notion permet de penser les interrelations entre la société et la nature. Ensuite, parce qu'elle correspond à une échelle qui permet d'envisager une modélisation par écosystème.

14.5 Conclusion

Les analyses présentées dans ce chapitre constituent une première étape vers la constitution d'un jeu de données paysagères intégrables en tant que variables explicatives dans les SDM. L'étude a été focalisée sur les enjeux liés à la résolution spatiale des données et une première exploration des possibilités d'articuler des informations disponibles à différentes résolutions.

Dans un premier temps, il s'agissait de comparer deux bases de données d'occupation du sol construites à des résolutions spatiales différentes et d'observer la manière dont l'interprétation des habitats des espèces étudiées varie en fonction de ces résolutions.

Dans un second temps, les informations contenues dans les bases de données ont été utilisées pour préciser la composition et la configuration interne des mailles de 8 km de résolution. Cette méthode permet d'articuler les différentes résolutions : conserver les données d'occupation du sol tout en les exploitant à la même résolution que les données climatiques.

Dans ce chapitre, les données d'occupation du sol ont été simplement mises en lien avec les données d'occurrence des espèces par une jointure spatiale. Les corrélations statistiques entre la présence de l'espèce et les variables paysagères devront être testées, d'une part, pour identifier la ou les résolutions qui permettent de reconnaître au mieux le lien entre l'espèce et son habitat, et d'autre part, pour vérifier la possibilité de leur utilisation en tant que variable explicative dans le SDM.

Si leur intégration en tant que variables explicatives dans un SDM paraît complexe, les données d'occupation du sol et les indices paysagers doivent permettre d'introduire, d'une part, le rôle joué par l'espace, et d'autre part, les interactions entre la société et la Nature et les dynamiques inhérentes au socio-écosystème.

Enfin, l'enjeu de la résolution spatiale n'est pas lié uniquement à la question des données d'occupation du sol et du paysage. Dans le cadre du programme de recherche, il est également essentiel d'étudier l'articulation des données climatiques fournies par Météo France avec les données météorologiques collectées sur les sites de suivi, qui définissent l'enveloppe climatique du site (sondes à 1.10–1.30 m du sol) mais aussi le microclimat (sondes à 20 cm du sol).