



Muséum
national
d'Histoire
naturelle

Service du Patrimoine Naturel

Direction de la Recherche, de l'Expertise et de la Valorisation
Direction Déléguée au Développement Durable, à la Conservation de la Nature et à l'Expertise

Isabelle Witté
Julien Touroult
Laurent Poncet



Distribution spatiale et complémentarité
des « hotspots » de biodiversité en
France métropolitaine
Valorisation des données des Atlas

Le Service du Patrimoine Naturel (SPN)

Inventorier - Gérer - Analyser - Diffuser

Au sein de la direction de la recherche, de l'expertise et de la valorisation (DIREV), le Service du Patrimoine Naturel développe la mission d'expertise confiée au Muséum national d'Histoire naturelle pour la connaissance et la conservation de la nature. Il a vocation à couvrir l'ensemble de la thématique biodiversité (faune/flore/habitat) et géodiversité au niveau français (terrestre, marine, métropolitaine et ultra-marine). Il est chargé de la mutualisation et de l'optimisation de la collecte, de la synthèse et la diffusion d'informations sur le patrimoine naturel.

Placé à l'interface entre la recherche scientifique et les décideurs, il travaille de façon partenariale avec l'ensemble des acteurs de la biodiversité afin de pouvoir répondre à sa mission de coordination scientifique de l'Inventaire national du Patrimoine naturel (code de l'environnement : L411-5).

Un objectif : contribuer à la conservation de la Nature en mettant les meilleures connaissances à disposition et en développant l'expertise.

En savoir plus : <http://www.mnhn.fr/spn/>

Directeur : Jean-Philippe SIBLET

Adjoint au directeur en charge des programmes de connaissance : Laurent PONCET

Adjoint au directeur en charge des programmes de conservation : Julien TOUROULT

INPN

 Inventaire National
du Patrimoine Naturel



Porté par le SPN, cet inventaire est l'aboutissement d'une démarche qui associe scientifiques, collectivités territoriales, naturalistes et associations de protection de la nature en vue d'établir une synthèse sur le patrimoine naturel en France. Les données fournies par les partenaires sont organisées, gérées, validées et diffusées par le MNHN. Ce système est un dispositif clé du SINP et de l'Observatoire National de la Biodiversité.

Afin de gérer cette importante source d'informations, le Muséum a construit une base de données permettant d'unifier les données à l'aide de référentiels taxonomiques, géographiques et administratifs. Il est ainsi possible d'accéder à des listes d'espèces par commune, par espace protégé ou par maille de 10x10 km. Grâce à ces systèmes de référence, il est possible de produire des synthèses quelle que soit la source d'information.

Ce système d'information permet de mutualiser au niveau national ce qui était jusqu'à présent éparpillé à la fois en métropole comme en outre-mer et aussi bien pour la partie terrestre que pour la partie marine. C'est une contribution majeure pour la connaissance, l'expertise et l'élaboration de stratégies de conservation efficaces du patrimoine naturel.

En savoir plus : <http://inpn.mnhn.fr>

Le travail présenté dans ce rapport a été réalisé dans le cadre d'une auto-saisine du comité scientifique ainsi que grâce à un budget de la Direction Déléguée au Développement Durable, à la Conservation de la Nature et à l'Expertise (DDCNE)

Comité de pilotage :

Graffin Vincent

Haffner Patrick

Julliard Romain

Le Viol Isabelle

Loïs Grégoire

Poncet Laurent

Touroult Julien

Résumé

Les atlas de distribution des espèces notamment ceux disponibles dans l'INPN constituent une base de données importante et d'une excellente fiabilité pour les points de présence d'espèces grâce au travail de validation des données réalisé par les experts des différents taxons. Ces données ont jusqu'à présent été utilisées pour la description de la répartition spatiale de chaque espèce individuellement, mais ont rarement été synthétisées et rassemblées dans une étude intergroupe pour représenter et « comprendre » la biodiversité française dans son ensemble. Le travail présenté dans ce rapport a pour objectif d'amorcer un travail de valorisation des données d'Atlas à l'échelle de la France métropolitaine et en exploitant autant de groupes taxonomiques que possible.

3 objectifs principaux sont visés par ce travail :

- 1) Mieux comprendre la distribution spatiale de la biodiversité en France métropolitaine et évaluer les effets de congruence de biodiversité entre taxons,
- 2) Evaluer la complémentarité des assemblages d'espèces entre mailles et évaluer la « substitutivité » des taxons entre eux
- 3) Evaluer la congruence entre les zonages d'aires protégées existants et les patrons de distributions de la biodiversité observés dans les précédents chapitres.

Le travail effectué est basé sur une approche descriptive des patrons de distribution et des congruences entre groupes taxonomiques. La distribution de la biodiversité est représentée par des cartes synthétiques. Les patrons de distribution des grands groupes biogéographiques ont été définis par des méthodes d'ordination (CAH, NMDS). La complémentarité des assemblages entre « hotspots » de biodiversité a été évaluée grâce à un logiciel d'optimisation spatial permettant de déterminer l'irremplaçabilité des sites en fonction de leur composition spécifique (Marxan).

Ce travail constitue une approche préliminaire de la valorisation des données d'Atlas et est proposé comme un point de départ méthodologique pour la valorisation des patrons de biodiversité. Nous ne proposons pas d'interprétation écologique de nos observations, mais nous encourageons fortement les lecteurs possédant une expertise des différents taxons utilisés, des différentes aires protégées ou des techniques d'analyse spatiale à nous transmettre leurs interprétations et commentaires.

Table des matières

1	Introduction	7
2	Matériel et Méthode	8
2.1	Logiciel.....	8
2.2	Origine et préparation des bases de données	8
2.2.1	Données issues des Atlas de biodiversité.....	8
2.2.1.1	Passage du maillage 10 x 10 km au maillage IGN50	9
2.2.1.2	Espèces menacées et Responsabilité patrimoniale	9
2.2.2	Aires protégées et d'intérêt existantes	10
3	Distribution spatiale de la biodiversité en France métropolitaine	12
3.1	Introduction	12
3.2	Méthodologie.....	12
3.2.1	Mesure de la richesse spécifique, diversité bêta et matrices de distances	12
3.2.1.1	Richesse spécifique.....	12
3.2.1.2	Diversité bêta	12
3.2.1.3	Matrices de distances, indicateur de dissimilarité	12
3.2.2	Corrélations de richesse et de composition entre groupes taxonomiques.....	14
3.2.3	Classifications des mailles selon leurs composition	14
3.2.3.1	Non-Metric Multidimensional Scaling (NMDS- cadrage non métrique).....	14
3.2.3.2	Classification Ascendante Hiérarchique.....	15
3.2.3.2.1	Indicator Value	15
3.2.3.2.2	Choix du nombre de groupe	15
3.3	Résultats	16
3.3.1	Distribution spatiale de la biodiversité.....	16
3.3.1.1	Richesse spécifique.....	16
3.3.1.2	Diversité Bêta : Mesure de la variation des compositions.....	21
3.3.1.3	Tests de corrélation entre taxons pour la richesse spécifique.....	23
3.3.1.4	Tests de corrélation entre taxons pour la composition	23
3.3.2	Classifications biogéographique	23
3.3.2.1	Organisation des résultats	23
3.3.2.2	Choix du nombre de groupes pour les classifications par CAH.....	24
3.3.2.3	Tous Taxons.....	26
3.3.2.4	Orchidées	30
3.3.2.5	Animaux	34
3.3.2.6	Invertébrées (Orthoptères et Coléoptères)	38
3.3.2.7	Vertébrés (amphibiens, mammifères, oiseaux, poissons, reptiles).....	42
3.3.2.8	Mammifères-Oiseaux-Reptiles	46
3.3.2.9	Amphibiens-Poissons	49
3.3.2.10	Récapitulatif des classifications pour les différents groupements.....	52
4	Complémentarité des assemblages d'espèces, irremplaçabilité des mailles et « substitutivité » des taxons indicateurs	54

4.1	Introduction	54
4.2	Méthodologie.....	54
4.2.1	Le logiciel Marxan	54
4.2.2	Paramétrage de Marxan pour les mesures d'irremplaçabilité	55
4.2.3	Paramétrage de Marxan pour la responsabilité patrimoniale.....	56
4.2.4	« Substitutivité », taxons indicateurs	56
4.3	Résultats	58
4.3.1	Organisation des résultats	58
4.3.2	Amphibiens	60
4.3.3	Coléoptères.....	61
4.3.4	Mammifères	62
4.3.5	Oiseaux.....	63
4.3.6	Orchidées.....	64
4.3.7	Orthoptères	65
4.3.8	Poissons.....	66
4.3.9	Reptiles.....	67
4.3.10	Tous taxons	68
4.3.11	Espèces menacées	70
4.3.12	« Substitutivité », espèces indicatrices « parapluie ».....	73
4.3.12.1	Organisation des résultats	73
5	Confrontation entre les données d'Atlas et les aires protégées existantes	80
5.1	Introduction	80
5.2	Matériel et méthode.....	80
5.2.1	Corrélations entre la distribution des aires protégées et les hotspots de biodiversité.....	80
5.2.2	Congruence entre classification biogéographique et distribution des aires protégées	80
5.3	Résultats	80
5.3.1	Corrélations entre la distribution des aires protégées et les hotspots de biodiversité.....	83
5.3.2	Congruence entre classification biogéographique et distribution des aires protégées	86
6	Perspectives	87
7	Références	89

Abréviations

- AP : Aires protégées. AP1 surfaces des aires protégées de type 1, AP3 surfaces des aires protégées de type 3, APTot surfaces des aires protégées de tous types confondus (voir Table 2)
- CAH : Classification Ascendante Hiérarchique
- IGN50 : Maillage au 1/50 000 (environ 20 x 21 km) de l'Institut National de l'Information Géographique et forestière
- IndVal : Indicator Value : Valeur d'indicateur d'une espèce pour un groupe biogéographique donné (Dufrêne & Legendre 1997)
- INPN : Inventaire National du Patrimoine Naturel
- NMDS : Non-metric Multidimensional Scaling – Cadrage non métrique
- SAI : Species Accumulation Index (Ferrier 2002)
- SPN : Service du Patrimoine Naturel
- TaxRef : Référentiel taxonomique national (<http://inpn.mnhn.fr/programme/referentiel-taxonomique-taxref>) (Gargominy, Terceirie *et al.* 2012)
- UICN : Union Internationale pour la Conservation de la Nature
- ZNIEFF : Zone Naturelle d'Intérêt Ecologique Faunistique et Floristique

1 Introduction

Alors qu'il existe de nombreux travaux à l'échelle mondiale ou européenne (Medail & Quezel 1999, Heikinheimo, Fortelius *et al.* 2007, Svenning, Flojgaard *et al.* 2011) et à l'échelle de pays (Harrison, Ross *et al.* 1992), nous disposons de peu d'études globales (c'est-à-dire multi-taxa) sur les grands patrons de biodiversité à l'échelle française (secteurs les plus riches, avec le plus d'endémiques, secteurs les plus complémentaires etc.) ni sur le lien entre ces patrons et les politiques de conservation (Keith 2000, Deharveng, Stoch *et al.* 2009).

Nous proposons de développer ces approches sur les données des inventaires nationaux disponibles, c'est-à-dire des données de terrain relativement exhaustives, recueillies par des naturalistes et validées par des experts (Touroult & Jolivet 2012). A partir de ces données relativement homogènes couvrant l'ensemble d'un groupe taxonomique nous chercherons à tester un lien global avec le positionnement des aires protégées et des ZNIEFF.

L'objectif général de ce travail consiste d'une part à synthétiser les données issues des différents Atlas de distribution, de mettre en relation des données issues de différents taxons, et par là même, de décrire les relations spatiales entre ces taxons. D'autre part, les assemblages d'espèces au sein de chaque maille sont utilisés pour évaluer l'importance de chaque maille pour la conservation de la biodiversité. Ces résultats nous amènent par la suite à considérer l'adéquation du réseau d'aires protégées existant avec les résultats tirés de l'observation de la distribution spatiale de la biodiversité et des études de complémentarité entre assemblages d'espèces.

Ces différents objectifs sont traités dans ce rapport en 3 chapitres distincts :

- 1) Mieux comprendre la distribution spatiale de la biodiversité en France métropolitaine et évaluer les effets de congruence de biodiversité entre taxons,
- 2) Evaluer la complémentarité des assemblages d'espèces entre mailles et évaluer la « substitutivité » des taxons entre eux, et enfin
- 3) Evaluer la congruence entre les zonages d'aires protégées existants et les patrons de distributions de la biodiversité observés dans les précédents chapitres.

L'approche choisie pour ce travail de synthèse des données est principalement descriptive et mathématique. Nous nous basons sur l'observation des patrons de distribution et des corrélations directes. Des simulations de réseaux d'aires protégées sont également utilisées pour évaluer la complémentarité des compositions. Ce travail étant une approche préliminaire de la valorisation des données d'Atlas proposé comme une base méthodologique pour l'interprétation des patrons de biodiversité, nous ne proposerons pas d'interprétation écologique de nos observations. En revanche, nous encourageons les experts des différents groupes taxonomiques à commenter ces travaux et à nous faire part de leurs observations et commentaires afin d'améliorer notre approche méthodologique.

Les analyses développées dans ce rapport peuvent servir à enrichir les futurs projets d'inventaires et Atlas et aussi être valorisés comme une contribution à d'autres programmes comme la stratégie de création d'aires protégées (SCAP).

2 Matériel et Méthode

2.1 Logiciel

La gestion des bases de données, le traitement des données et les analyses statistiques sont réalisées grâce au logiciel R (R Development Core Team 2010) et notamment aux packages *ade4* (Dray & Dufour 2007), *vegan* (Oksanen, Blanchet *et al.* 2011), *spatstat* (Baddeley & Turner 2005), *reshape* (Wickham 2012), *groupe* (Maechle, Rousseeuw *et al.* 2012).

2.2 Origine et préparation des bases de données

2.2.1 Données issues des Atlas de biodiversité

Les bases de données utilisées pour ce travail de synthèse sont celles à l'origine des Atlas publiés, dont les données sont diffusées dans l'INPN (<http://inpn.mnhn.fr/espece/inventaire/liste>). Les sept bases de données sélectionnées (résumées dans la Table 1) sont choisies sur la base de leur complétude (nombre de données disponibles).

Table 1 : Origine des bases de données des Atlas
Les nombres de taxons et les maillages indiqués sont ceux des bases de données originales avant traitement. Le maillage « IGN 50 » correspond au maillage de référence utilisé jusque dans les années 2000.

Ouvrage	Année de publication	Coordinateurs	Nb de taxons	Maillage
Mammifères de France métropolitaine	1984	Fayard A.	124	IGN50
Insectes coléoptères scarabéidés laparosticti de France métropolitaine	1990	Lumaret J.-P.	192	IGN50
Insectes orthoptères de France métropolitaine	2003	Voisin J.-F.	243	IGN50
Oiseaux nicheurs de France métropolitaine	1994	Yaetman-Berthelot D. & Jarry G.	292	IGN50
Poissons d'eau douce de France métropolitaine	2011	Keith P., Persat H., Feunteun E. & Allardi J.	98	10x10km
Orchidées de France métropolitaine	2010	Dusak F. & Prat D.	165	10x10km
Amphibiens et reptiles de France métropolitaine	2013	Lescure J. & de Massary J.-C.	81	IGN50

La base de données issue de l'Atlas *Amphibiens et reptiles de France métropolitaine* est scindée en deux bases de données de manière à représenter séparément ces deux groupes qui ont des patrons biogéographiques bien distincts.

Huit bases de données sont ainsi étudiées dans ce rapport.

D'autre part, les espèces marines (cétacées, pinnipèdes, tortues de mer...) ainsi que les données de présence dans les mailles marines sont retirées de toutes les bases de données, de même que les espèces classées comme introduites, envahissantes, douteuses ou occasionnelles dans le référentiel TaxRef V5.0. (statuts pour la France métropolitaine : B : Occasionnel, I :

Introduit, dont établi, J : Introduit envahissant, M : Introduit non établi, dont domestique, D : Douteux) (Gargominy *et al.* 2012).

2.2.1.1 Passage du maillage 10 x 10 km au maillage IGN50

Les *Atlas des orchidées de France métropolitaine* et des *poissons d'eau douce de France métropolitaine* qui sont restitués suivant un maillage 10 x 10 km sont préalablement converti dans un maillage plus large, le maillage IGN50 (environ 20 x 22 km) de manière à être comparables avec les autres Atlas restitués à cette résolution.

Pour réaliser cette conversion en corrigeant partiellement les artefacts liés aux déformations des deux maillages, la composition de chaque maille 10 x 10 km est appliquée à toutes les mailles IGN50 contenant au minimum 25% de la surface de la maille 10 x 10 km originale. Les doublons d'espèces qui peuvent apparaître dans les mailles IGN50 suite à cette manipulation sont ensuite nettoyés de la base de données.

Cette méthode de conversion peut faire apparaître des « faux positifs » (en attribuant une présence d'espèce dans une maille où elle est en fait absente). Cependant, une méthode plus conservatrice (n'attribuant les espèces qu'à une seule maille IGN50 contenant la plus grande partie de la maille 10 x 10 km originale par exemple) ferait apparaître des discontinuités potentiellement irréalistes dans la distribution des espèces (mailles vides d'une espèce alors que cette espèce est présente dans les mailles contiguës). Notre approche nous apparaît donc comme plus appropriée pour le respect des données originales.

Les bases de données finales en maillage IGN50 contiennent 1126 mailles couvrant l'ensemble du territoire continental et corse (contre 5875 en maillage 10°x°10°km).

Il est à noter que les mailles en bordure de la carte (frontières et côtes) peuvent représenter des surfaces terrestres plus petites que les mailles situées à l'intérieur du territoire. Certains artefacts peuvent donc apparaître puisque les données de présence des espèces sont rapportées à la maille. Par exemple, les mailles en bordures sont souvent moins riches puisqu'elles sont en réalité moins étendues en surfaces. Ce point n'a pas fait l'objet de correction.

2.2.1.2 Espèces menacées et Responsabilité patrimoniale

En reprenant les critères de hiérarchisation des priorités de conservation proposés par (Schmeller, Maier *et al.* 2012) nous utilisons ici un sous-ensemble d'espèces menacées, c'est-à-dire classées Vulnérables (VU), En danger (En) ou Critiques (Cr) dans les listes rouges des espèces menacées en France métropolitaine (UICN, MNHN *et al.* 2009a, 2009b, 2010a, 2010b, 2011) et dont les effectifs ou la répartition traduisent une forte responsabilité patrimoniale de la France. Les espèces concernées sont toutes issues des bases de données des vertébrés (amphibiens, mammifères, oiseaux nicheurs, poissons et reptiles) soit seulement 129 espèces.

Ces scores de responsabilité patrimoniale sont calculés à partir du ratio de la surface de l'aire de répartition de l'espèce située en France métropolitaine par rapport à la surface totale de l'aire de répartition mondiale de l'espèce (Schmeller, Gruber *et al.* 2008, Saviouré-Soubelet en prep.). Ces ratios de responsabilité patrimoniale vont donc de 0 à 100 selon que l'espèce est absente du sol français de métropole ou que son aire de répartition est entièrement incluse sur le territoire.

Nous nous basons sur ce ratio pour pondérer les effets des limites d'aire de répartition (cf. Moilanen, Anderson *et al.* 2013) pour le développement des réseaux de mailles complémentaires pour la conservation des espèces menacées définies selon les critères de l'UICN.

2.2.2 Aires protégées et d'intérêt existantes

Les données de distribution spatiales des aires protégées et d'intérêt sont issues du système d'information de l'INPN qui gère les couches de références (INPN 2012). Les aires protégées et d'intérêt sont d'abord fusionnées en trois catégories selon leurs niveaux de protection (voir Table 2 et Figure 1).

Les shapefiles des 3 types d'aires protégées ou d'intérêt sont d'abord découpés en utilisant la carte des frontières de France métropolitaine afin d'éliminer les aires protégées en milieu marin. Les cartes d'aires protégées terrestres ainsi obtenues sont ensuite découpées selon les grilles du maillage IGN50 afin d'obtenir les surfaces d'aire protégées ou d'intérêt par maille. En procédant de cette manière, fusion des couches puis découpage, on s'assure que les surfaces mesurées correspondent à la surface des terrains d'aires protégées et non pas à la somme des surfaces protégées de différentes manières, ce qui pourrait mener à décompter plusieurs fois la même surface.

Les surfaces d'aires protégées de tous types confondus ($APT_{Tot} = AP1 \cup \text{Natura 2000} \cup AP3$) sont également calculées de la même manière.

Table 2 : Regroupement des aires protégées et d'intérêt

Aires protégées 1 (AP1)	Arrêtés de protection biotope Parcs nationaux (cœur) Réserves biologiques Réserves naturelles nationales Réserves naturelles régionales Réserves naturelles de Corse
Natura 2000 (Natura)	Sites d'importance communautaire (SIC) Zones de protection spéciale (ZPS)
Aires protégées 3 (AP3)	Parcs nationaux (Périphérie) Parcs naturels régionaux Réserves de la biosphère Réserves nationales de chasse et faune sauvage Sites Ramsar Terrains des Conservatoires d'Espaces Naturels Terrains du Conservatoire du Littoral
ZNIEFF	ZNIEFF type 1 ZNIEFF type 2

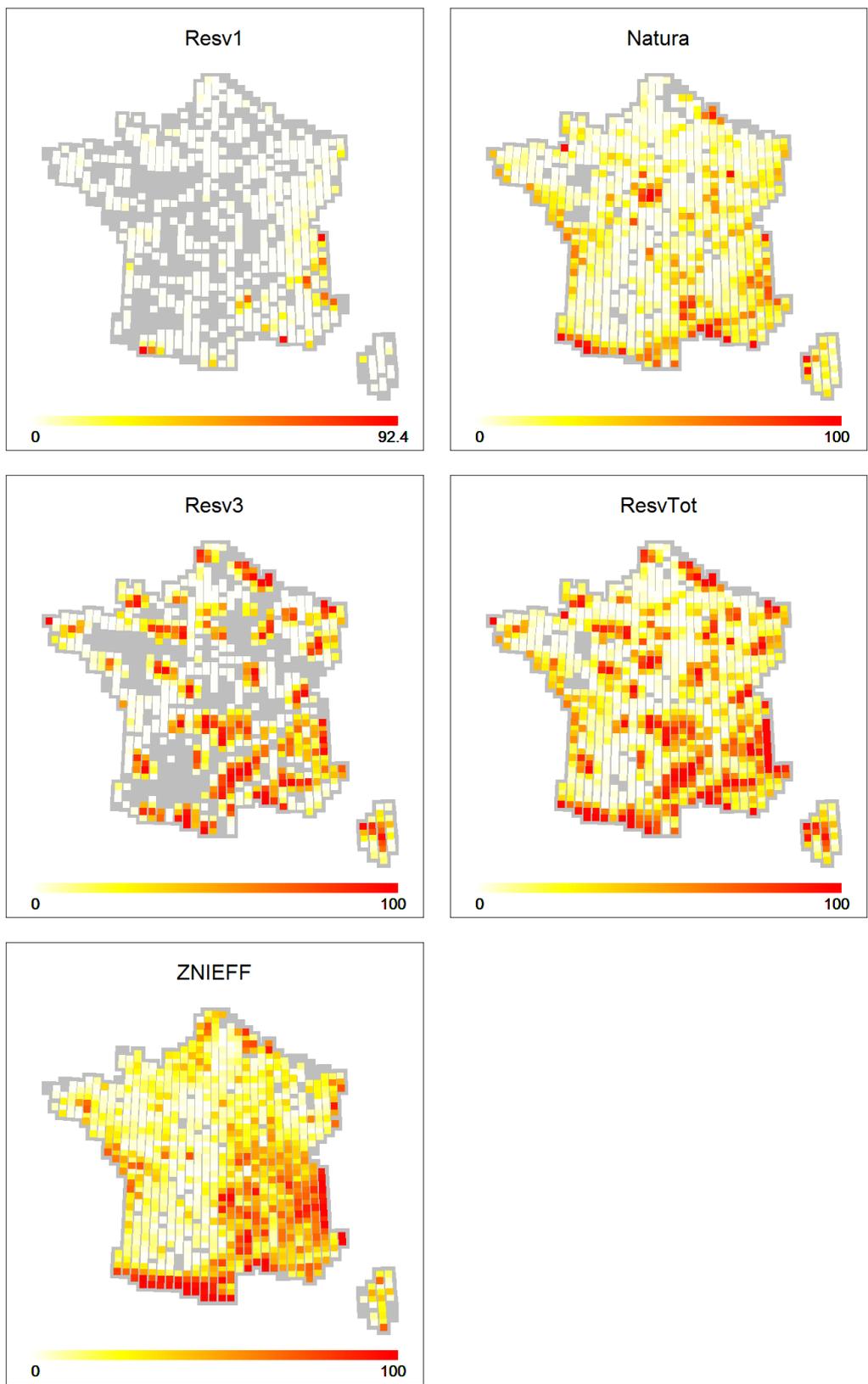


Figure 1 : Distribution spatiale de la proportion de surfaces des mailles couvertes par des aires protégées pour chaque regroupement d'aire protégée ou d'intérêt
 Voir Table 2 pour les catégories d'aires protégées de chaque groupement

3 Distribution spatiale de la biodiversité en France métropolitaine

3.1 Introduction

L'observation de la distribution spatiale de la biodiversité est une étape préliminaire à la compréhension de ses déterminants. Dans le contexte de données basées comme ici sur un maillage, les données peuvent être observées du point de vue du taxon (distribution spatiale, congruence entre taxons...) ou du point de vue de la maille et de l'assemblage qu'elle contient. Dans le cas des Atlas diffusés par l'INPN et dont sont issues nos données, l'observation est majoritairement centrée sur les espèces ; dont les observations sont donc représentés en les séparant les unes des autres comme si leurs distributions spatiales étaient indépendantes. Dans ce chapitre, nous mettons en parallèle les données issues des huit taxons pour essayer de mettre en évidence les relations entre leurs distributions spatiales. D'autre part, les assemblages d'espèces à l'échelle des mailles sont également utilisés pour faire émerger les grands ensembles biogéographiques.

Ce chapitre décrit une approche de la biodiversité basée sur l'étude des patrons de distribution tels qu'ils sont décrits dans les Atlas, sans prise en compte directe de l'écologie des espèces ou de leurs particularités d'habitat. Ce travail est donc basé sur une approche descriptive, mathématique et statistique, des données, notre objectif étant de fournir de nouveaux axes de réflexions sur la distribution de la biodiversité et une base méthodologique pour une future interprétation. Nous ne proposerons donc pas d'interprétation de la distribution des espèces et des groupes biogéographiques et préférons laisser ce travail aux experts des différents taxons.

3.2 Méthodologie

3.2.1 Mesure de la richesse spécifique, diversité bêta et matrices de distances

3.2.1.1 Richesse spécifique

La richesse spécifique des mailles est mesurée comme le nombre d'espèces observées dans chaque maille.

3.2.1.2 Diversité bêta

La diversité bêta est mesurée pour chaque maille comme la différence de composition entre cette maille et les mailles voisines (McKnight, White *et al.* 2007). Toute maille dont le centroïde se situe à une distance inférieure ou égale à 30 km du centroïde de la maille cible est considérée comme une maille voisine. Une distance de 30 km entre les centroïdes permet d'intégrer les 4 mailles ayant une frontière commune avec chaque maille cible.

3.2.1.3 Matrices de distances, indicateur de dissimilarité

L'indice bêta-2 (Harrison *et al.* 1992, Koleff, Gaston *et al.* 2003, Cardoso, Borges *et al.* 2009) est utilisé pour mesurer la différence de composition entre les différentes mailles :

$$\beta_{-2} = \frac{\min(b, c)}{\max(b, c) + a}$$

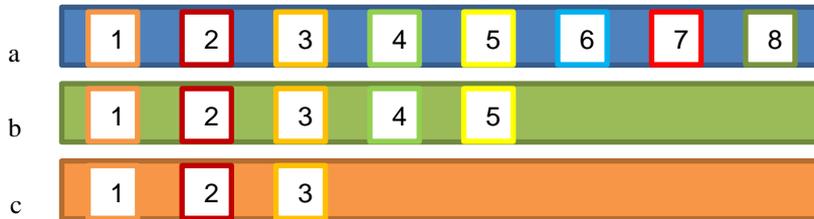
β_{-2} est l'indice de bêta diversité entre les mailles (1) et (2), (a) le nombre d'espèces en commun dans les deux mailles, (b) le nombre d'espèces présentes uniquement dans la maille (1) et (c) le nombre d'espèces présentes uniquement dans la maille (2).

L'indice bêta-2 est également utilisé pour calculer toutes les matrices de distances de composition spécifique entre les différentes mailles.

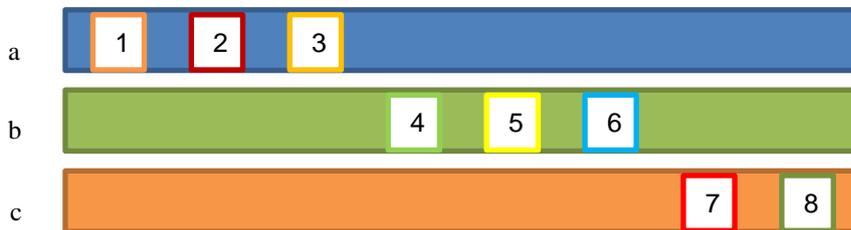
Cet indice permet notamment de distinguer les différences liées à des compositions d'espèces différentes (remplacement, « turnover ») des différences liées à des richesses spécifiques

différentes (emboîtement, « nestedness »), permettant ainsi de ne pas considérer des mailles ayant des compositions emboîtées (« nestedness ») comme étant différentes (voir Figure 2). Cette propriété permet au bêta-2 d'être relativement robuste aux problèmes de sous-échantillonnages (Harrison *et al.* 1992, Koleff *et al.* 2003, Cardoso *et al.* 2009)

Compositions emboîtées (« Nestedness »), les sites les moins riches sont un échantillon des sites les plus riches, l'indice bêta-2 entre ces sites sera faible, puisque les compositions sont semblables et seule la richesse varie



Remplacement complet (« Turnover »), l'indice bêta-2 est maximum, toutes les espèces sont remplacées d'un site à l'autre



Remplacement partiel (« Partial Turnover »), l'indice bêta-2 est élevé, la richesse spécifique est identique dans chaque site



Remplacement et emboîtement (« Nestedness & Turnover »), l'indice bêta-2 est élevé entre les sites (b) et (c) mais est faible entre (a) et (b) et (a) et (c) puisque que (c) et (b) sont des échantillons de (a)



Figure 2 : Illustration de l'emboîtement (« nestedness ») et du remplacement (« turnover ») des compositions spécifiques
Chaque ligne (a), (b) et (c) représentent des sites et les carrés (de 1 à 8) représentent les espèces

3.2.2 Corrélations de richesse et de composition entre groupes taxonomiques

La distribution de la richesse spécifique est comparée entre les huit groupes taxonomiques pour évaluer leur congruence en termes de richesse et de composition.

Un test de corrélation de Spearman est réalisé pour comparer les richesses spécifiques des différents taxons dans chaque maille. Ce test permet de vérifier si les mailles sont ordonnées de la même manière considérant leur richesse spécifique pour chaque taxon. Autrement dit, si les mailles les plus riches pour un taxon sont également les plus riches pour un autre taxon.

Le test de Mantel permet d'évaluer si les compositions spécifiques évoluent dans la même direction, c'est-à-dire si lorsque la composition d'une maille pour un taxon est différente de celle des autres mailles, la composition de la même maille pour un deuxième taxon est également différente.

Le test de Mantel est appliqué à des matrices de dissimilarité entre mailles calculée avec l'indice bêta-2 (Harrison *et al.* 1992, Koleff *et al.* 2003, Cardoso *et al.* 2009).

Pour les deux tests de corrélation (Spearman sur les richesses spécifiques et Mantel sur les compositions) les regroupements d'espèces (Multitaxa et espèces menacées) sont recomposés sans le groupe taxonomique cible de manière à éviter l'autocorrélation due aux espèces en commun entre les deux groupes. Pour cette raison, il n'existe pas de coefficients de corrélation entre les regroupements Multitaxa et Menacées.

3.2.3 Classifications des mailles selon leurs composition

Les données d'Atlas sont également utilisées pour déterminer les grandes zones biogéographiques dans la répartition des espèces en France métropolitaine.

Les zones biogéographiques sont d'abord observées sur le regroupement de tous les groupes taxonomiques, puis en séparant les végétaux (ici seulement les orchidées) des animaux (amphibiens, coléoptères, mammifères, oiseaux, orthoptères, poissons reptiles), en séparant les invertébrés (coléoptères et orthoptères) des vertébrés (amphibiens, mammifères, oiseaux, poissons, reptiles) puis enfin en séparant les taxons majoritairement terrestres (mammifères, oiseaux, reptiles) des taxons majoritairement liés au milieu aquatiques (amphibiens, poissons). Ces sept regroupements de taxons sont analysés à l'aide de Classification Ascendantes Hiérarchiques.

3.2.3.1 Non-Metric Multidimensional Scaling (NMDS- cadrage non métrique)

Le regroupement de tous les taxons et les groupes des animaux et des vertébrés sont également analysés en utilisant une autre approche d'ordination permettant d'observer la distribution des mailles en fonction de leur composition sans a priori sur la normalité ou la linéarité des données (Kreft & Jetz 2010). Le Non-Metric Multidimensional scaling (NMDS) (Minchin 1987) est appliqué sur la même matrice de dissimilarité basée sur l'indice bêta-2 (Harrison *et al.* 1992, Koleff *et al.* 2003, Cardoso *et al.* 2009) que pour la CAH. Les dissimilarités entre mailles sont ensuite ramenées à deux dimensions permettant de représenter la similarité des compositions spécifiques entre les mailles par leur distance euclidienne sur le plan. Plus deux mailles sont proches dans ce plan, plus leurs compositions sont similaires. La position de chaque maille dans ce plan en deux dimensions est ensuite associée à un gradient de couleurs qui sert également à une représentation graphique sur la carte de France métropolitaine.

La qualité des NMDS est représentée par le stress qui est calculé comme la somme du carré des différences entre les distances évaluées par le NMDS et les distances originales (dans notre cas, les distances bêta-2). Le stress varie entre 0 et 1, les plus petites valeurs indiquant les meilleures correspondances (Legendre & Legendre 1998).

3.2.3.2 Classification Ascendante Hiérarchique

Les mailles IGN50 sont classées en fonction de leur composition grâce à une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) (Kaufman & Rousseeuw 1990, Kreft & Jetz 2010) basée sur la mesure de dissimilarité bêta-2 (Harrison *et al.* 1992, Koleff *et al.* 2003, Cardoso *et al.* 2009) entre les compositions des mailles et en utilisant la méthode de Ward comme règle d'agrégation des groupes.

La CAH est ensuite coupée de manière à obtenir des classifications de deux à dix groupes.

3.2.3.2.1 *Indicator Value*

La « valeur indicatrice » *Indicator Value* (IndVal) (Dufrêne & Legendre 1997) est calculé pour chaque espèce i dans chaque groupe j et indique la spécificité de cette espèce au groupe prédéfini :

$$A_{ij} = \frac{N_{sites_{ij}}}{N_{sites_i}} \quad \Bigg| \quad B_{ij} = \frac{N_{sites_{ij}}}{N_{sites_j}}$$

$$IndVal_{ij} = A \times B \times 100$$

IndVal_{ij} étant la « valeur indicatrice » de l'espèce i pour le groupe j ; $N_{sites_{ij}}$ le nombre de sites du groupe j où l'espèce i est présente, N_{sites_i} le nombre total de mailles où l'espèce i est présente et N_{sites_j} le nombre total de mailles dans le groupe j .

IndVal_{ij} est maximum lorsqu'une espèce i est présente dans toutes les mailles du groupe j et dans aucun autre groupe.

La significativité des IndVal est évaluée avec un test par permutation attribuant les mailles aléatoirement aux groupes. La mesure d'IndVal pour la classification réelle est considérée comme significative si elle est supérieure à 95% des valeurs d'Indval issues des permutations.

Cet indice est calculé pour chaque combinaison ij , puis l'espèce est attribuée au groupe pour lequel elle a obtenu l'IndVal significatif le plus élevé.

Chaque groupe est donc associé à une liste de ses espèces les plus indicatrices.

3.2.3.2.2 *Choix du nombre de groupe*

Le nombre de groupes le plus pertinent pour la représentation des zones biogéographiques est déterminé en utilisant la somme de tous les IndVal significatifs pour chacune des 9 classifications de 2 à 10 groupes.

On obtient ainsi une indication de la spécificité globale des espèces à leurs groupes d'attribution. On considère que plus cette valeur est élevée, plus les groupes choisis sont pertinents (discriminants) pour révéler les différences d'assemblages (Dufrêne & Legendre 1997). On choisira donc le nombre de groupes permettant d'atteindre la somme d'IndVal la plus élevée.

Note méthodologique

Une approche de la classification des mailles en fonction de leurs compositions spécifique basée sur la construction parcimonieuse d'arbres de classification telle qu'elle est utilisée en phylogénie aurait également pu être envisagée (Moreno Saiz, Donato *et al.* 2013). Cette approche permet de garantir que les mailles regroupées dans un même groupe aient toutes un assemblage d'espèces en commun et que les sous-groupes se distinguent lorsqu'ils contiennent des espèces absentes du groupe « parent » dans lequel ils sont emboîtés.

3.3 Résultats

3.3.1 Distribution spatiale de la biodiversité

3.3.1.1 Richesse spécifique

Les résultats de richesse spécifique sont compilés dans des cartes représentant la distribution spatiale de la richesse spécifiques en France métropolitaine.

Les valeurs de richesse spécifique sont représentées en couleurs chaudes, du jaune (faible richesse spécifique) au rouge (richesse spécifique la plus importante) (Figure 3 à Figure 11).

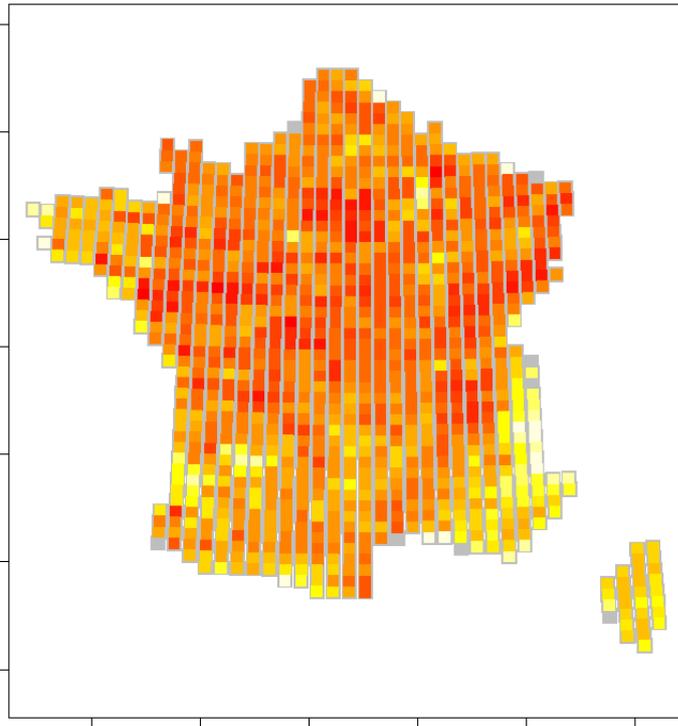


Figure 3 : Distribution de la richesse spécifique pour le groupe des amphibiens
Richesse totale : 35 espèces ; minimum : 1 espèces ; maximum : 17 espèces

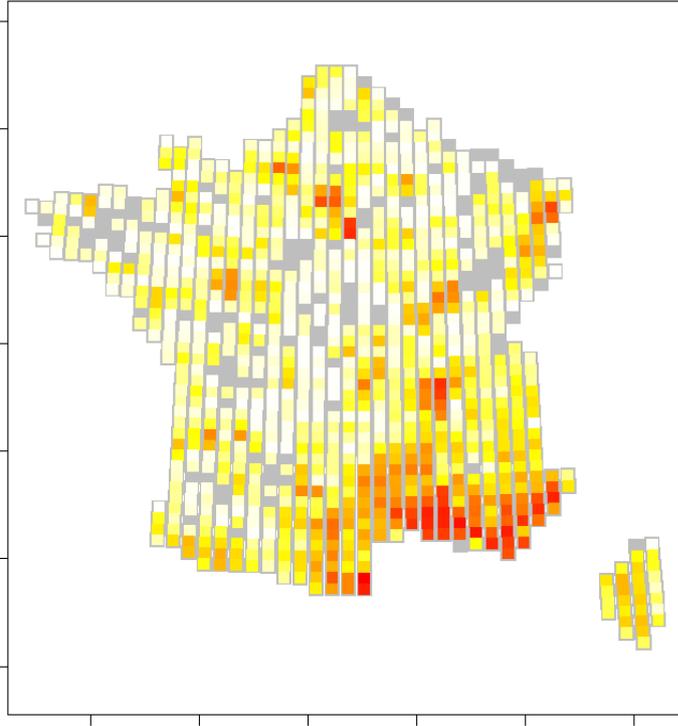


Figure 4 : Distribution de la richesse spécifique pour le groupe des coléoptères Scarabéidés laparosticti (« bousiers »)
 Richesse totale : 188 espèces ; minimum : 1 espèces ; maximum : 99 espèces

La distribution de la richesse spécifique des coléoptères Scarabaeidae Laparosticti laisse apparaitre quelques zones (grises) non échantillonnées, principalement réparties dans la moitié nord-ouest.

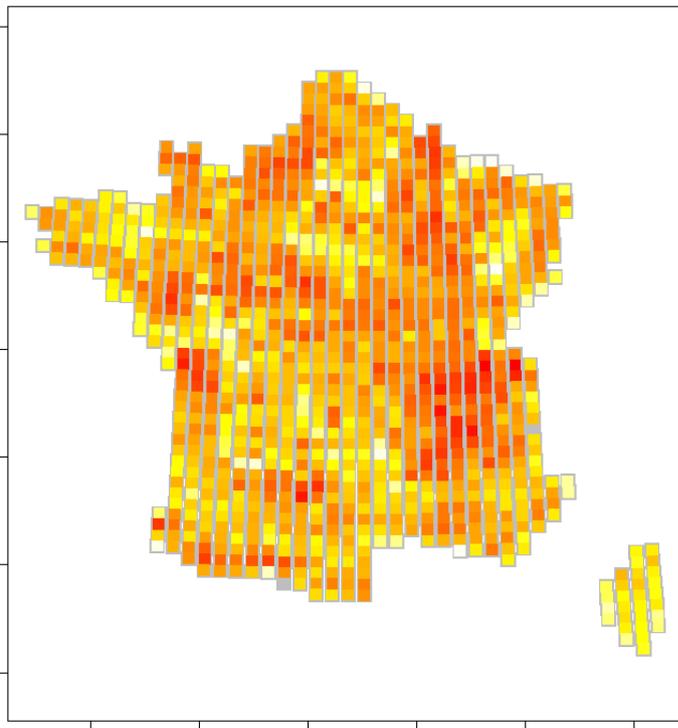


Figure 5 : Distribution de la richesse spécifique pour le groupe des mammifères
 Richesse totale : 89 espèces ; minimum : 1 espèces ; maximum : 56 espèces

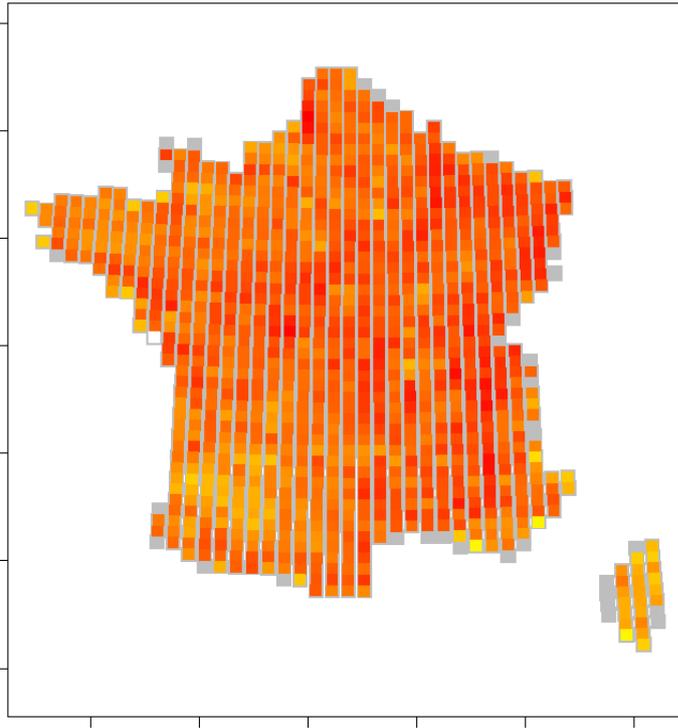


Figure 6 : Distribution de la richesse spécifique pour le groupe des oiseaux nicheurs
 Richesse totale : 282 espèces ; minimum : 1 espèces ; maximum : 158 espèces

La distribution spatiale de la richesse spécifique pour le groupe des oiseaux est très homogène. Cette distribution reflète à la fois une pression d'échantillonnage importante et des espèces ayant de bonnes capacités de dispersion.

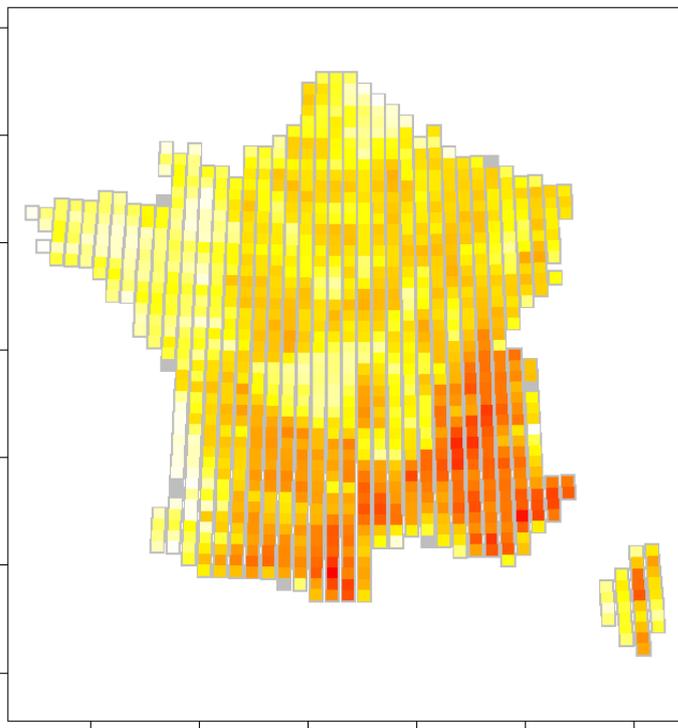


Figure 7 : Distribution de la richesse spécifique pour le groupe des orchidées
 Richesse totale : 165 espèces ; minimum : 1 espèces ; maximum : 82 espèces

On observe pour les orchidées un effet de « hotspot » dans la zone méridionale.

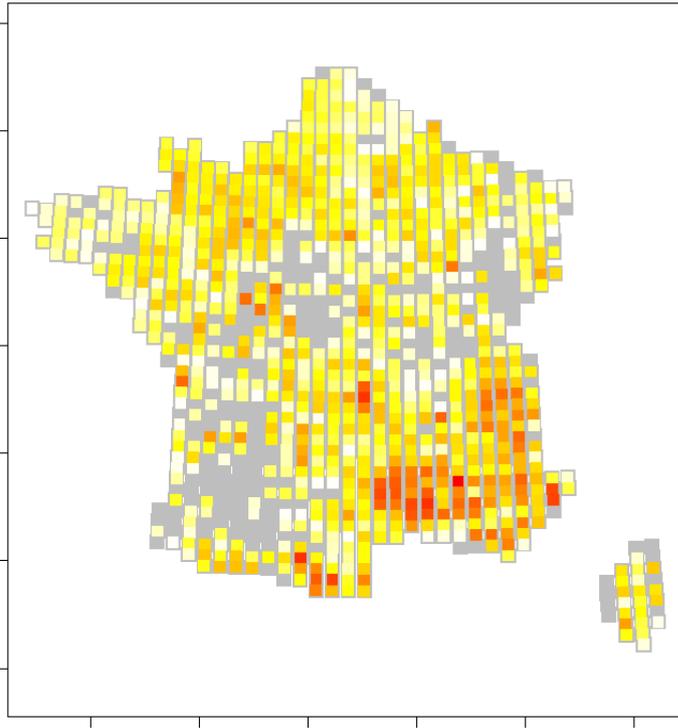


Figure 8 : Distribution de la richesse spécifique pour le groupe des orthoptères
 Richesse totale : 237 espèces ; minimum : 1 espèces ; maximum : 72 espèces

La distribution de la richesse spécifique des orthoptères laisse apparaître des zones (grises) non échantillonnées assez étendues notamment dans le Sud-Ouest, bien que ce groupe soit vraisemblablement présent sur l'ensemble du territoire.

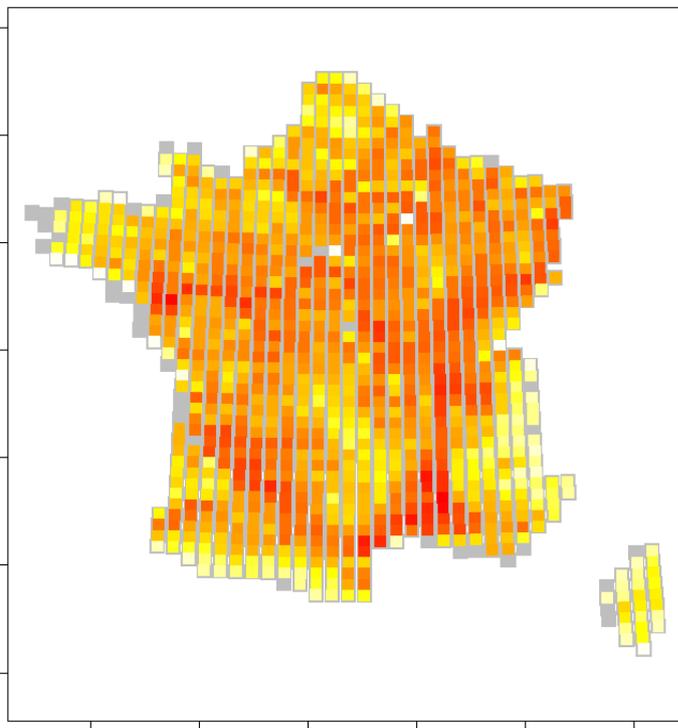


Figure 9 : Distribution de la richesse spécifique pour le groupe des poissons d'eau douce
 Richesse totale : 67 espèces ; minimum : 1 espèces ; maximum : 36 espèces

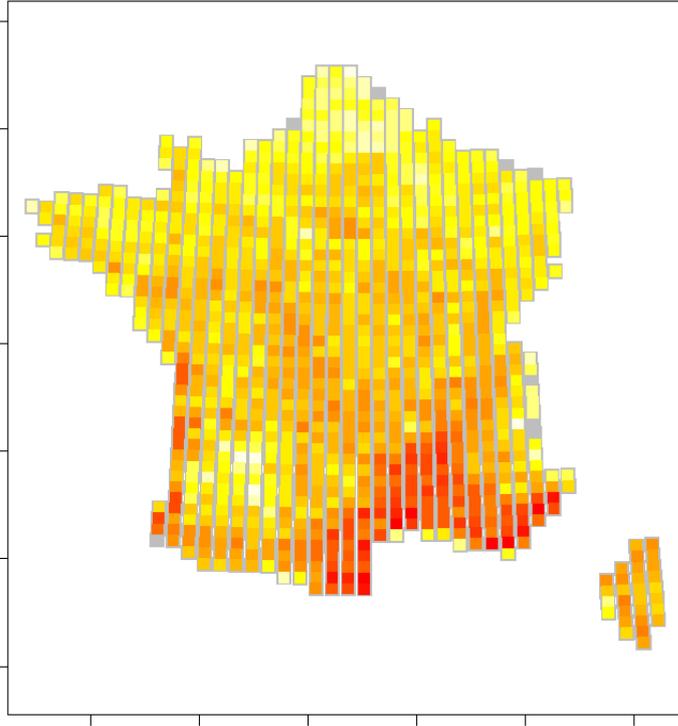


Figure 10 : Distribution de la richesse spécifique pour le groupe des reptiles
 Richesse totale : 34 espèces ; minimum : 1 espèces ; maximum : 19 espèces

On observe pour les reptiles le même effet de « hotspot » méridional lié à l'affinité thermophile du groupe.

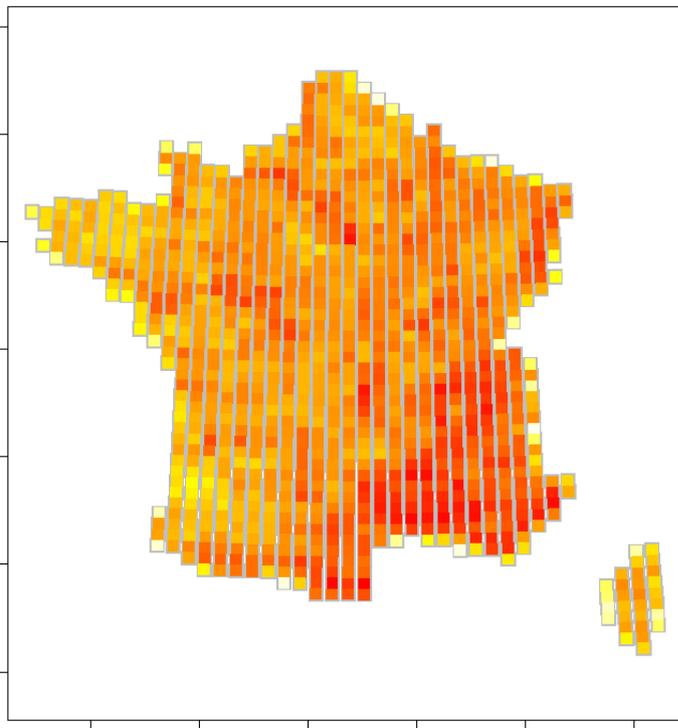


Figure 11 : Distribution de la richesse spécifique tous taxons confondus
 Richesse totale : 1097 espèces ; minimum : 1 espèces ; maximum : 401 espèces

3.3.1.2 Diversité Bêta : Mesure de la variation des compositions

Les résultats de diversité bêta ont été compilés dans des cartes représentant la distribution spatiale de la diversité bêta en France métropolitaine.

Les cartes de distribution de la diversité bêta démontrent globalement peu de variations, ce qui laisse penser que les transitions de composition sont peu marquées à l'échelle de la France métropolitaine.

Les cartes de diversité bêta pour les orthoptères et des coléoptères scarabéidés laparosticti sont plus hétérogènes. Cependant, cette hétérogénéité est certainement liée plus directement aux carences d'échantillonnage déjà observées pour la richesse spécifique qu'à de réelles variations de composition.

Note méthodologique

Dans le cadre de ce rapport, nous avons uniquement observé la diversité bêta pour les mailles originales (environ 20 x 21 km) et pour un voisinage incluant les mailles dans un rayon de 30 km. Une approche complémentaire à cette observation préliminaire de la diversité bêta consisterait à faire varier la résolution des données en agrégeant des mailles entre elles et en faisant varier la taille du voisinage.

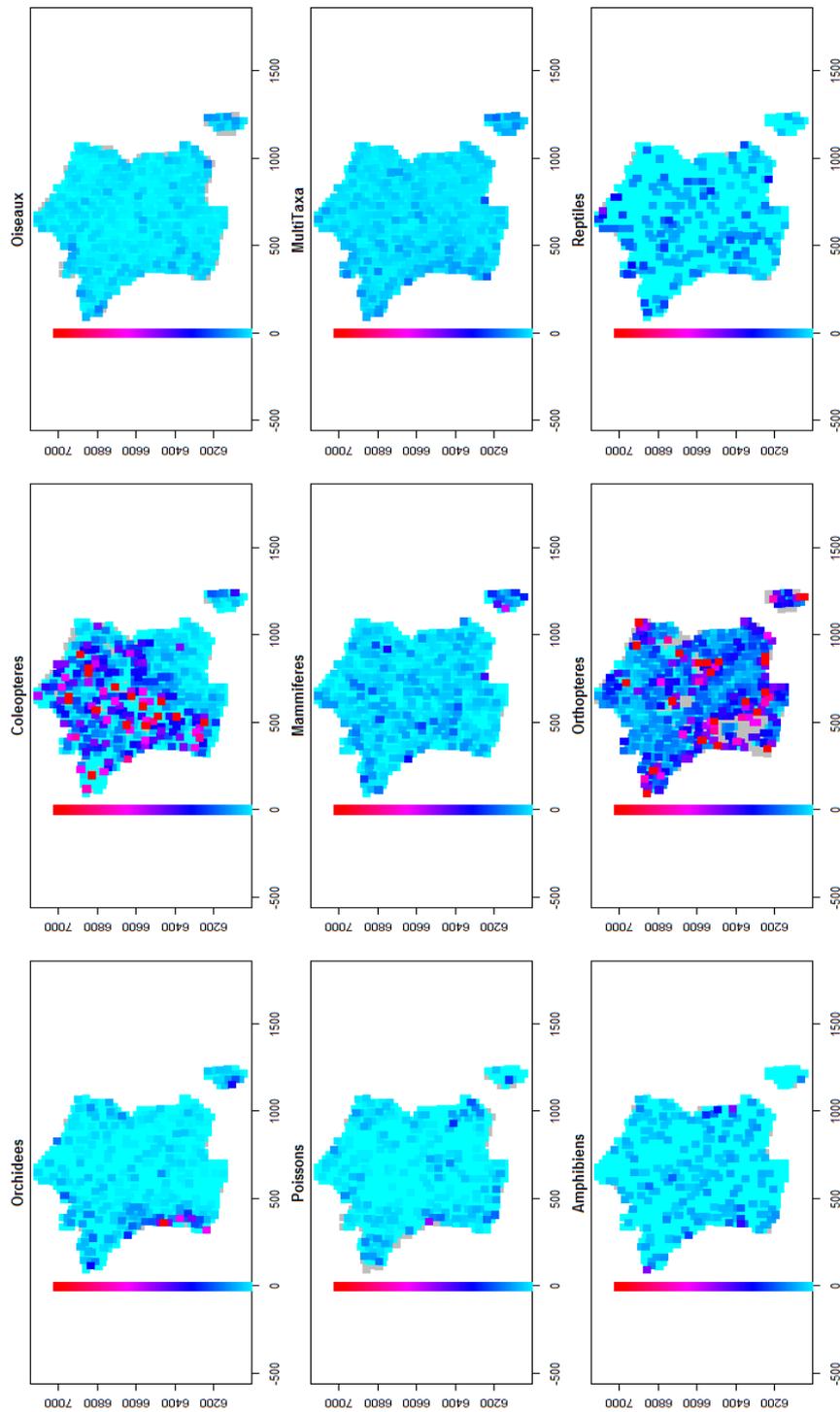


Figure 12 : Cartes de distribution de la diversité bêta.
 Les valeurs de diversité bêta sont représentées en couleurs, du turquoise (faible diversité bêta) au rouge (diversité bêta la plus importante, et donc remplacement d'espèces important).

3.3.1.3 Tests de corrélation entre taxons pour la richesse spécifique

Table 3 : Résultats des corrélations de Spearman entre les richesses spécifiques des différents taxons
Les valeurs indiquées en gris représentent les rho de Spearman non significatifs (p-value>0.05)

Spearman's Rho									
	Coleoptères	Mammifères	Oiseaux	Orchidées	Orthoptères	Poissons	Reptiles	MultiTaxa	Menacées
Amphibiens	-0.10	0.34	0.46	0.00	0.03	0.51	0.12	0.27	0.41
Coleoptères		0.16	0.13	0.38	0.38	0.00	0.41	0.38	0.22
Mammifères			0.44	0.26	0.20	0.31	0.18	0.44	0.36
Oiseaux				0.27	0.25	0.41	0.26	0.44	0.29
Orchidées					0.29	0.19	0.47	0.49	0.36
Orthoptères						-0.02	0.31	0.40	0.21
Poissons							0.12	0.30	0.39
Reptiles								0.52	0.30
Spearman's p-value									
	Coleoptères	Mammifères	Oiseaux	Orchidées	Orthoptères	Poissons	Reptiles	MultiTaxa	Menacées
Amphibiens	0.00	0.00	0.00	1.00	0.34	0.00	0.00	0.00	0.00
Coleoptères		0.00	0.00	0.00	0.00	0.99	0.00	0.00	0.00
Mammifères			0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Oiseaux				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Orchidées					0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Orthoptères						0.42	0.00	0.00	0.00
Poissons							0.00	0.00	0.00
Reptiles								0.00	0.00

3.3.1.4 Tests de corrélation entre taxons pour la composition

Table 4 : Corrélation de Mantel entre les matrices de diversités bêta-2 (Harrison *et al.* 1992) des différents taxons
Les valeurs indiquées en gris représentent les statistiques de Mantel non significatives (p-value>0.05)

Mantel statistic									
	Coleoptères	Mammifères	Oiseaux	Orchidées	Orthoptères	Poissons	Reptiles	MultiTaxa	Menacées
Amphibiens	-0.02	0.19	0.30	0.24	0.10	0.21	0.36	0.30	0.31
Coleoptères		-0.05	-0.09	0.03	0.00	-0.05	0.04	-0.04	-0.05
Mammifères			0.30	0.11	0.08	0.14	0.13	0.28	0.25
Oiseaux				0.17	0.14	0.19	0.13	0.29	0.15
Orchidées					0.08	0.04	0.29	0.28	0.18
Orthoptères						0.06	0.08	0.17	0.12
Poissons							0.04	0.15	0.15
Reptiles								0.31	0.15

Mantel significance									
	Coleoptères	Mammifères	Oiseaux	Orchidées	Orthoptères	Poissons	Reptiles	MultiTaxa	Menacées
Amphibiens	1.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Coleoptères		1.00	1.00	0.01	0.23	1.00	0.01	1.00	1.00
Mammifères			0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Oiseaux				0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Orchidées					0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Orthoptères						0.01	0.01	0.01	0.01
Poissons							0.01	0.01	0.01
Reptiles								0.01	0.01

3.3.2 Classifications biogéographique

3.3.2.1 Organisation des résultats

Pour chaque regroupement de taxon, nous représentons les 9 classifications de 2 à 10 groupes qui nous permettent de choisir le nombre de groupe optimal avec les sommes d'IndVal, la classification correspondant à ce nombre de groupe optimal est ensuite présentée en plus grand, associée au dendrogramme de la classification et avec la liste des 10 espèces les plus indicatrices de chaque groupe. Lorsqu'un groupe ne permet pas de présenter 10 espèces indicatrices (espèces indicatrices avec des IndVal non-significatifs ou peu d'espèces dans le groupe) nous présentons la liste complète des espèces significatives pour le groupe.

En addition, pour les regroupements de tous les taxons, des animaux et des vertébrés les NMDS et la carte de distribution correspondante sont présentées. L'approche de la classification des mailles par NMDS est orientée plus vers l'observation des gradients que vers la ségrégation de groupes biogéographiques. Nous nous servons donc de ces représentations plus pour pondérer les conclusions issues des CAH que comme un résultat final.

3.3.2.2 Choix du nombre de groupes pour les classifications par CAH

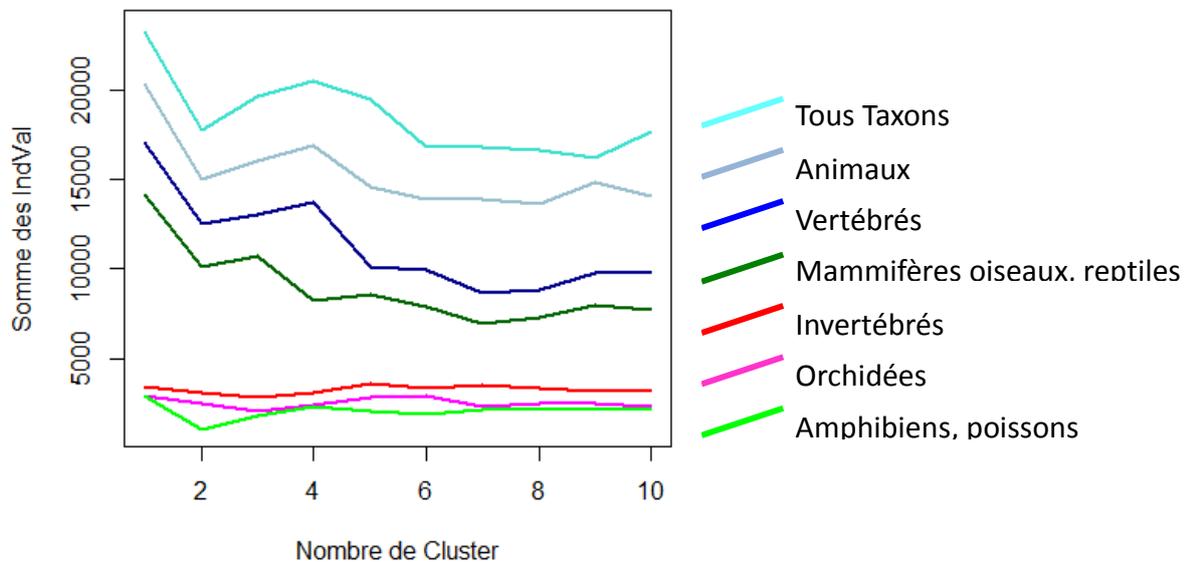


Figure 13 : Evolution de la somme des IndVal pour chaque regroupement de taxons en fonction du nombre de groupes défini suite à la CAH
Le nombre de groupe optimal pour chaque regroupement de taxon est défini comme celui pour lequel la somme des IndVal est la plus élevée

Les sommes d'IndVal sont dépendantes du nombre d'espèces dans chaque regroupement de taxons et sont donc naturellement plus élevées pour les groupes les plus riches (tous taxons, vertébrés...) que pour les taxons uniques (orchidées) ou pour les petits regroupements (invertébrés). On observe globalement un maximum des sommes de IndVal pour 4 groupes, mis à part pour les orchidées (courbe rose, 6 groupes), les invertébrés (courbe rouge, 5 groupes) et le groupe des mammifères, oiseaux reptiles (courbe verte foncée, 3 groupes).

Table 5 : Sommes des IndVal pour chaque groupe et nombre de groupes
 La somme des IndVal pour 1 groupe est donnée comme indication du maximum possible

Nombre de clusters	Tous Taxons	Orchidées	Animaux	Invertébrés	Vertébrés	Mammifères Oiseaux Reptiles	Amphibiens Poissons
1	23191.02	2864.81	20346.51	3441.49	17033.22	14117.49	2936.17
2	17728.72	2488.59	14997.33	3038.30	12535.95	10073.11	1046.79
3	19622.95	2014.96	16028.77	2787.94	13049.54	10692.62	1750.87
4	20466.82	2391.74	16921.21	3082.40	13723.16	8259.97	2274.13
5	19440.81	2831.12	14530.82	3582.34	10070.39	8593.52	2064.04
6	16822.37	2893.12	13853.13	3370.65	9975.74	7893.86	1901.75
7	16808.25	2344.87	13853.60	3482.62	8668.44	6969.69	2146.31
8	16624.68	2454.41	13614.66	3305.50	8839.94	7312.03	2123.08
9	16205.07	2482.47	14783.18	3191.49	9797.28	7989.72	2168.09
10	17630.66	2332.48	14055.70	3130.58	9869.31	7684.37	2189.22
Nb Espèces	1097	165	932	260	507	405	102

3.3.2.3 Tous Taxons

1097 espèces

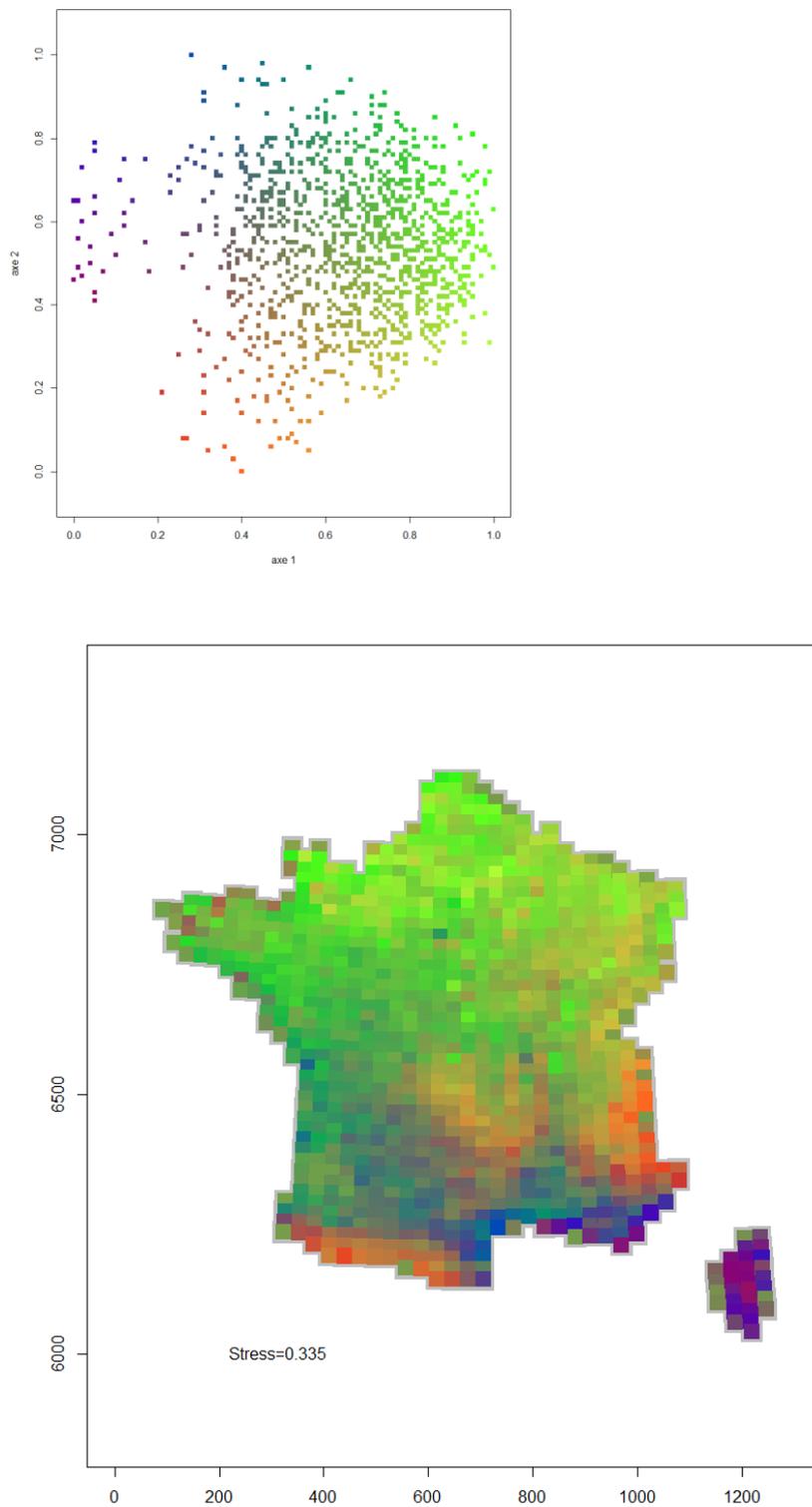


Figure 14 : Gauche : NMDS basé sur tous les taxons, stress = 0.335 ; Droite : Carte de distribution des distances de composition entre mailles tel que définies par le NMDS. Les couleurs représentent la position de chaque maille dans la classification (à gauche) et par extension sa distance de composition spécifique avec ses voisins

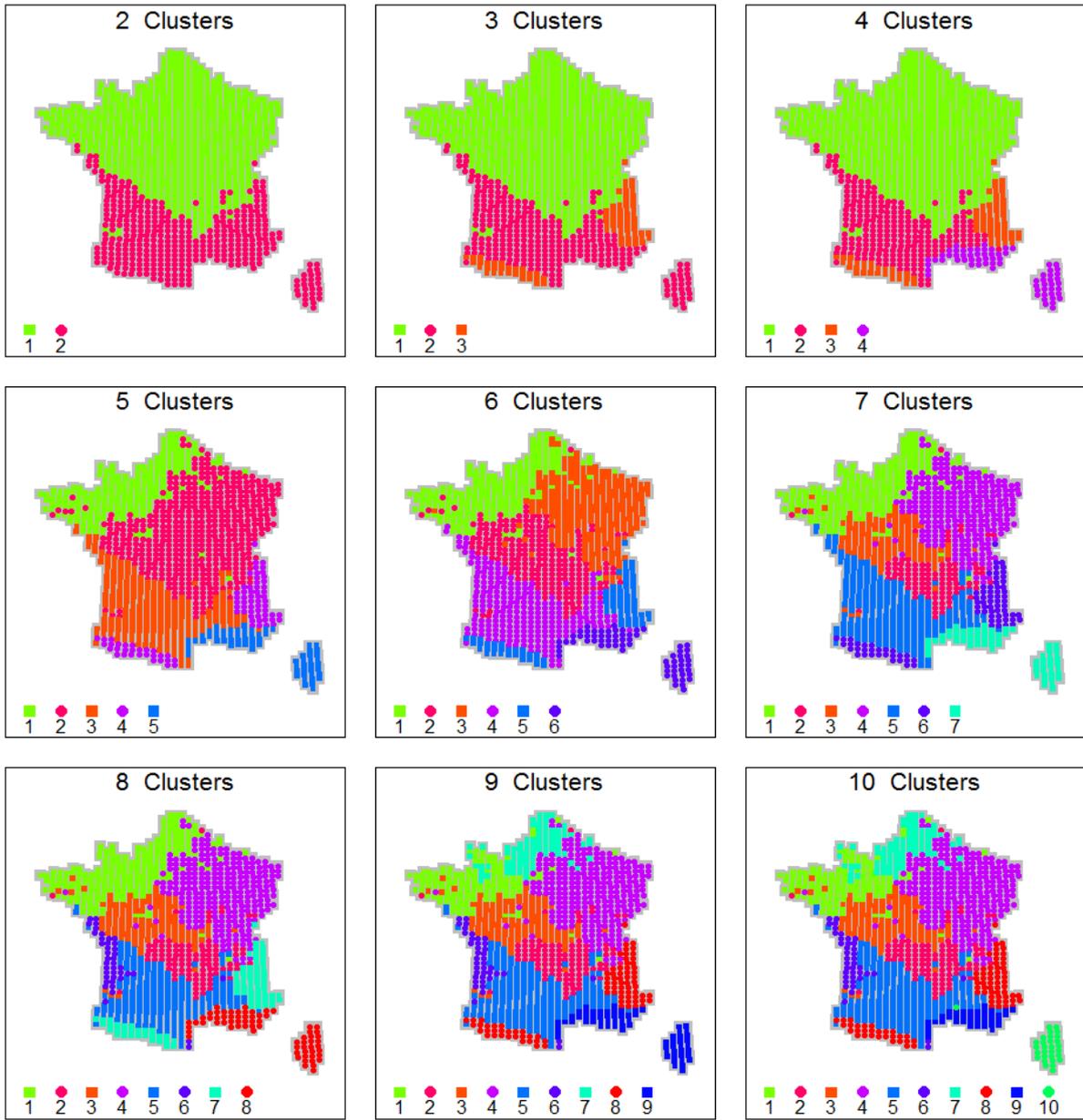


Figure 15 : Evolution de la classification des mailles en fonction du nombre de groupes pour tous les groupes taxonomiques confondus

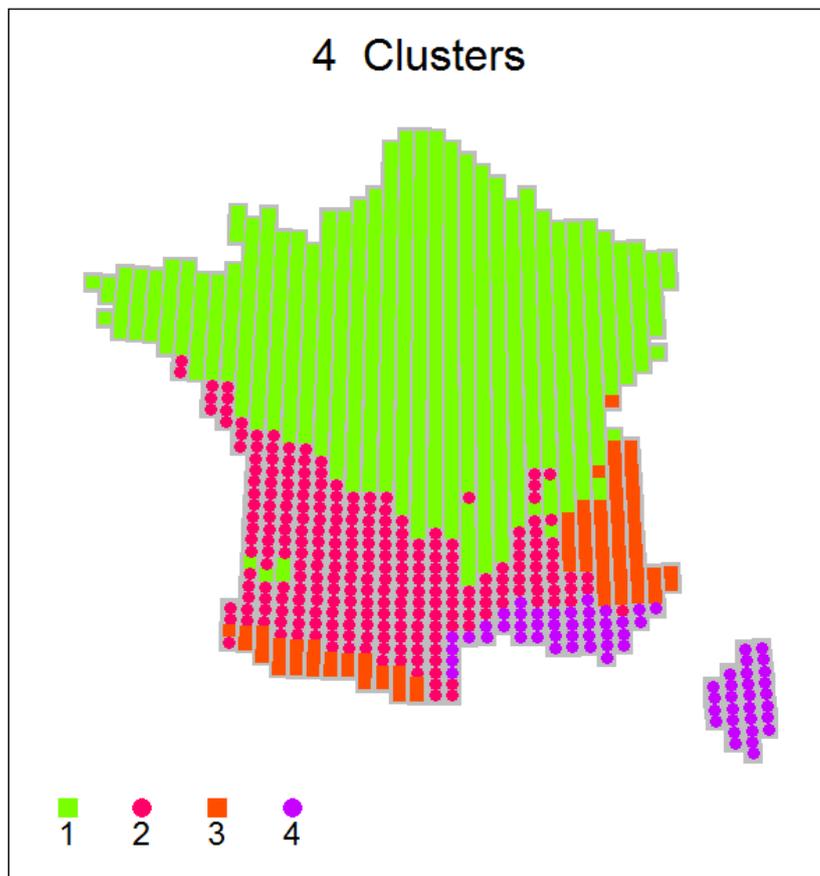
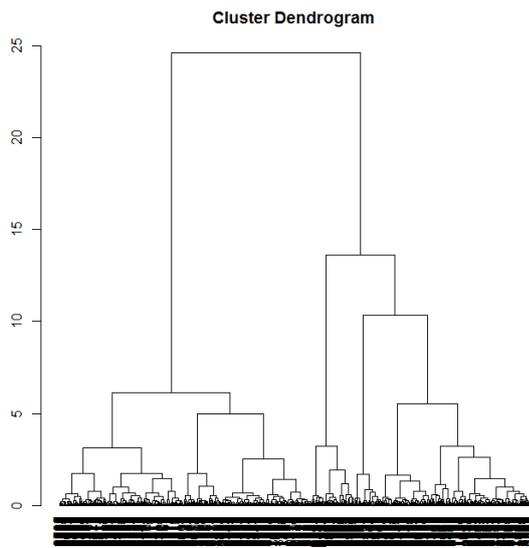


Figure 16 : En haut : dendrogramme de la Classification Ascendante Hiérarchique des mailles tous groupes taxonomiques confondus ; En bas : Carte de la distribution des 4 groupes optimaux de composition

Table 6 : Listes des 10 espèces les plus indicatrices de chaque groupe tous taxons confondus

Groupe 1	Nom Latin	Taxon	IndVal
	<i>Phylloscopus trochilus</i>	Oiseaux	84.88
	<i>Emberiza schoeniclus</i>	Oiseaux	75.27
	<i>Perdix perdix</i>	Oiseaux	74.55
	<i>Phylloscopus sibilatrix</i>	Oiseaux	74.18
	<i>Vanellus vanellus</i>	Oiseaux	73.34
	<i>Corvus frugilegus</i>	Oiseaux	72.92
	<i>Locustella naevia</i>	Oiseaux	71.46
	<i>Emberiza citrinella</i>	Oiseaux	71.22
	<i>Pyrrhula pyrrhula</i>	Oiseaux	70.71
	<i>Sylvia borin</i>	Oiseaux	70.30
Groupe 2	Nom Latin	Taxon	IndVal
	<i>Hyla meridionalis</i>	Amphibiens	59.98
	<i>Gobio occitaniae</i>	Poissons	52.52
	Complexe <i>Ophrys scolopax</i>	Orchidées	52.20
	Groupe 100000096*	Orchidées	50.50
	<i>Serapias lingua</i>	Orchidées	45.22
	Complexe <i>Ophrys fusca</i>	Orchidées	42.69
	<i>Serapias vomeracea</i>	Orchidées	40.13
	<i>Ophrys sulcata</i>	Orchidées	39.85
	<i>Ophrys lutea</i>	Orchidées	38.88
	<i>Parachondrostoma toxostoma</i>	Poissons	35.34
Groupe 3	Nom Latin	Taxon	IndVal
	<i>Pyrrhocorax graculus</i>	Oiseaux	63.68
	<i>Lagopus mutus</i>	Oiseaux	62.38
	<i>Dactylorhiza alpestris</i>	Orchidées	56.27
	<i>Prunella collaris</i>	Oiseaux	55.89
	<i>Aphodius (Amidorus) obscurus</i>	Coléoptères	53.52
	<i>Marmota marmota</i>	Mammifères	52.01
	<i>Montifringilla nivalis</i>	Oiseaux	50.57
	<i>Anthus spinoletta</i>	Oiseaux	48.09
	<i>Rupicapra rupicapra</i>	Mammifères	47.47
	<i>Aquila chrysaetos</i>	Oiseaux	46.56
Groupe 4	Nom Latin	Taxon	IndVal
	<i>Bubas bison</i>	Coléoptères	62.14
	<i>Thorectes intermedius</i>	Coléoptères	57.02
	<i>Liza aurata</i>	Poissons	54.39
	<i>Copris hispanus</i>	Coléoptères	52.51
	<i>Testudo hermanni</i>	Reptiles	52.17
	<i>Tarentola mauritanica</i>	Reptiles	51.32
	<i>Euleptes europaea</i>	Reptiles	46.42
	<i>Serapias neglecta</i>	Orchidées	44.97
	<i>Platytomus tibialis</i>	Coléoptères	42.40
	<i>Podarcis tiliguerta</i>	Reptiles	42.03

* Les groupes correspondent à des taxons d'orchidées complexes, regroupé pour les besoins de l'Atlas.

3.3.2.4 Orchidées

165 espèces

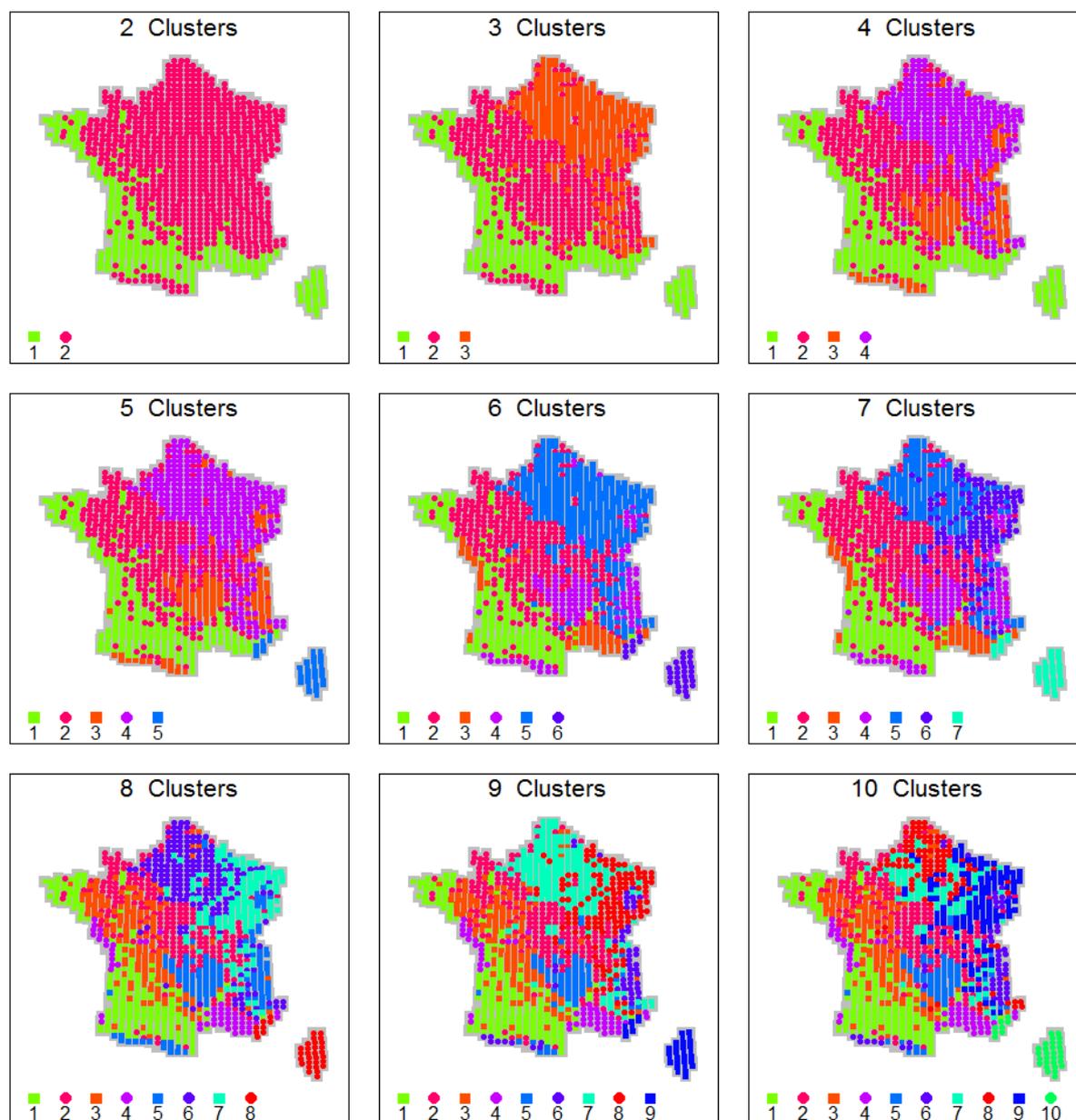


Figure 17 : Evolution de la classification des mailles en fonction du nombre de groupes pour les orchidées

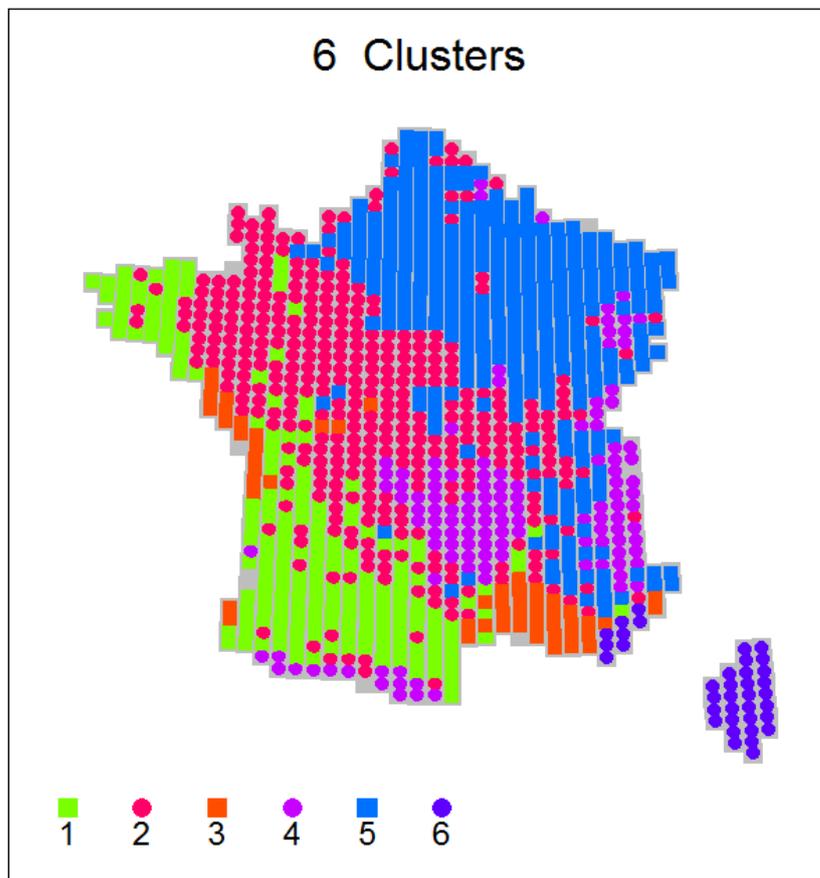
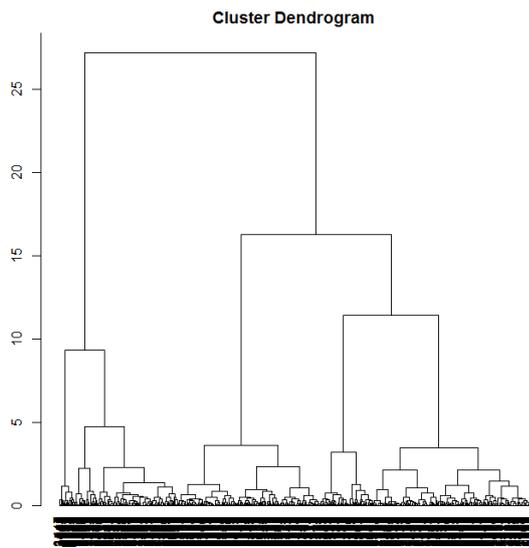


Figure 18 : En haut : dendrogramme de la Classification Ascendante Hiérarchique des mailles pour le groupe des orchidées ; En bas : Carte de la distribution des 6 groupes optimaux de composition

Table 7 : Listes des 10 espèces les plus indicatrices de chaque groupe pour les orchidées

Groupe 1	Nom Latin	Taxon	IndVal
	<i>Serapias lingua</i>	Orchidées	29.39
	Complexe <i>Ophrys scolopax</i>	Orchidées	25.29
	<i>Serapias vomeracea</i>	Orchidées	24.63
	Groupe 100000096*	Orchidées	23.39
	<i>Ophrys sulcata</i>	Orchidées	21.99
	Complexe <i>Ophrys fusca</i>	Orchidées	21.31
	<i>Ophrys lutea</i>	Orchidées	18.66
	Complexe <i>Ophrys arachnitiformis</i>	Orchidées	17.21
	Groupe 100000092*	Orchidées	16.27
	Groupe 100000087*	Orchidées	11.63
Groupe 2	Nom Latin	Taxon	IndVal
	<i>Anacamptis laxiflora</i>	Orchidées	42.99
	<i>Orchis mascula</i>	Orchidées	36.93
	<i>Dactylorhiza maculata</i>	Orchidées	35.85
	<i>Anacamptis morio</i> subsp. <i>morio</i>	Orchidées	34.51
	<i>Neotinea ustulata</i>	Orchidées	32.11
	<i>Spiranthes spiralis</i>	Orchidées	29.56
	Complexe <i>Ophrys sphegodes</i>	Orchidées	25.46
	Groupe 100000089*	Orchidées	24.95
	<i>Coeloglossum viride</i>	Orchidées	21.59
	<i>Ophrys araneola</i> et <i>Ophrys virescens</i>	Orchidées	14.70
Groupe 3	Nom Latin	Taxon	IndVal
	<i>Ophrys splendida</i>	Orchidées	28.91
	<i>Epipactis phyllanthes</i>	Orchidées	25.93
	<i>Ophrys provincialis</i>	Orchidées	24.81
	<i>Ophrys delforgei</i>	Orchidées	24.51
	<i>Ophrys aurelia</i>	Orchidées	16.10
	<i>Himantoglossum robertianum</i>	Orchidées	15.63
	<i>Ophrys passionis</i>	Orchidées	14.72
	Groupe 100000193*	Orchidées	13.61
	<i>Ophrys lupercalis</i>	Orchidées	11.38
	<i>Ophrys incubacea</i>	Orchidées	10.93

* Les groupes correspondent à des taxons d'orchidées complexes, regroupé pour les besoins de l'Atlas.

Groupe 4	Nom Latin	Taxon	IndVal
	<i>Dactylorhiza sambucina</i>	Orchidées	36.83
	<i>Pseudorchis albida</i>	Orchidées	34.97
	<i>Neottia cordata</i>	Orchidées	29.62
	<i>Corallorhiza trifida</i>	Orchidées	25.19
	<i>Dactylorhiza alpestris</i>	Orchidées	23.30
	<i>Traunsteinera globosa</i>	Orchidées	17.54
	<i>Epipogium aphyllum</i>	Orchidées	17.28
	<i>Gymnadenia austriaca</i>	Orchidées	16.08
	<i>Dactylorhiza cruenta</i>	Orchidées	14.03
	<i>Gymnadenia rhellicani</i>	Orchidées	13.91
Groupe 5	Nom Latin	Taxon	IndVal
	Groupe 100000097*	Orchidées	53.71
	<i>Complexe Ophrys fuciflora</i>	Orchidées	49.48
	<i>Epipactis atrorubens</i>	Orchidées	47.34
	<i>Cephalanthera damasonium</i>	Orchidées	43.78
	<i>Orchis militaris</i>	Orchidées	41.75
	<i>Neottia nidus-avis</i>	Orchidées	39.57
	<i>Orchis purpurea</i>	Orchidées	38.94
	<i>Epipactis purpurata</i>	Orchidées	37.67
	<i>Ophrys insectifera</i>	Orchidées	37.54
	<i>Epipactis helleborine</i>	Orchidées	35.99
Groupe 6	Nom Latin	Taxon	IndVal
	<i>Serapias neglecta</i>	Orchidées	59.71
	<i>Dactylorhiza insularis</i>	Orchidées	47.00
	<i>Anacamptis papilionacea</i>	Orchidées	46.72
	<i>Serapias cordigera</i>	Orchidées	44.91
	<i>Dactylorhiza saccifera</i>	Orchidées	43.24
	<i>Serapias parviflora</i>	Orchidées	37.26
	<i>Neotinea lactea</i>	Orchidées	34.87
	<i>Orchis pauciflora</i>	Orchidées	32.43
	<i>Serapias olbia</i>	Orchidées	31.16
	<i>Ophrys morisii</i>	Orchidées	29.73

* Les groupes correspondent à des taxons d'orchidées complexes, regroupé pour les besoins de l'Atlas.

3.3.2.5 Animaux

932 espèces

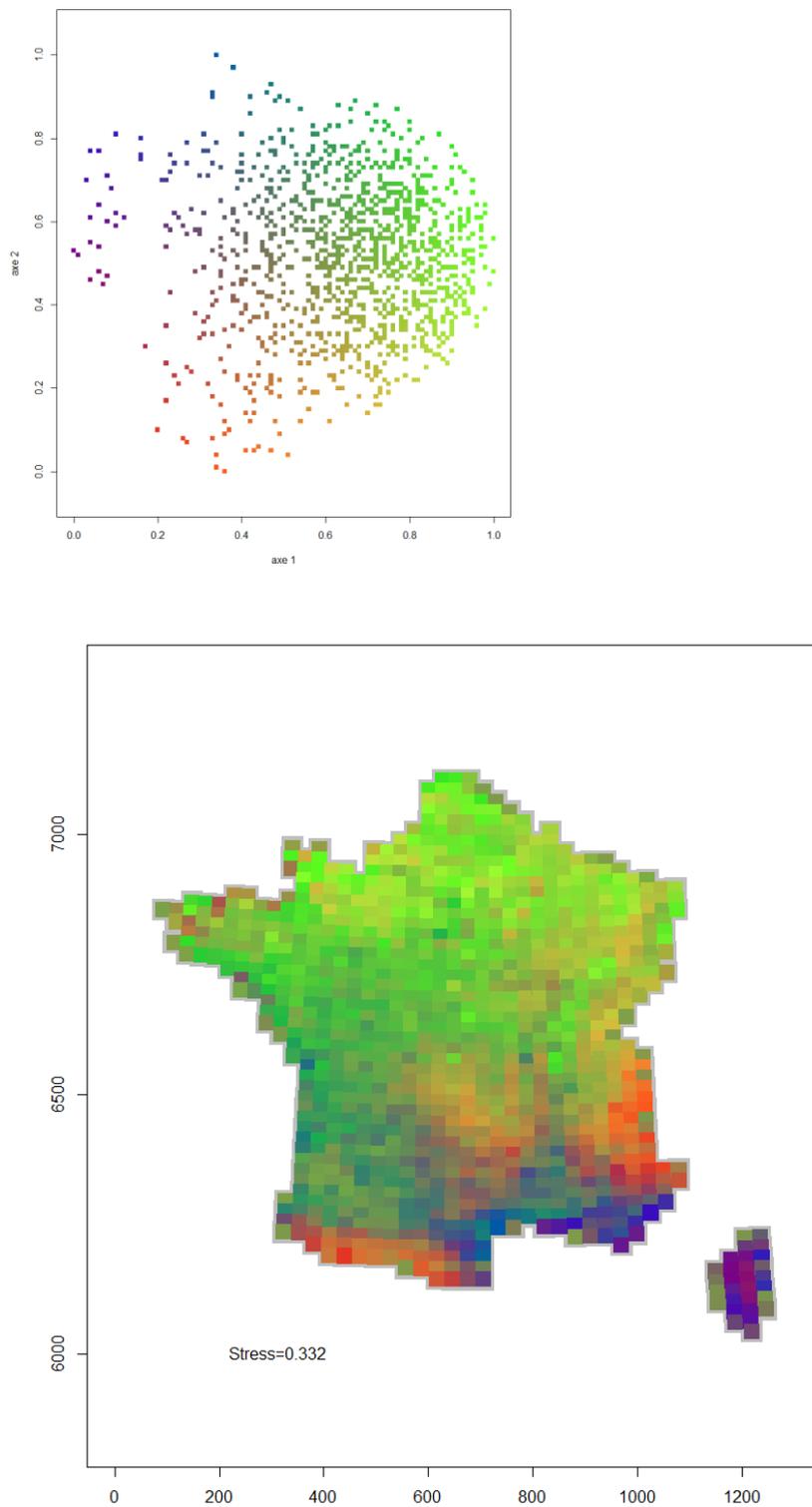


Figure 19 : Gauche : NMDS basé sur les animaux, stress = 0.332 ; Droite : Carte de distribution des distances de composition entre mailles tel que définies par le NMDS. Les couleurs représentent la position de chaque maille dans la classification (à gauche) et par extension sa distance de composition spécifique avec ses voisins

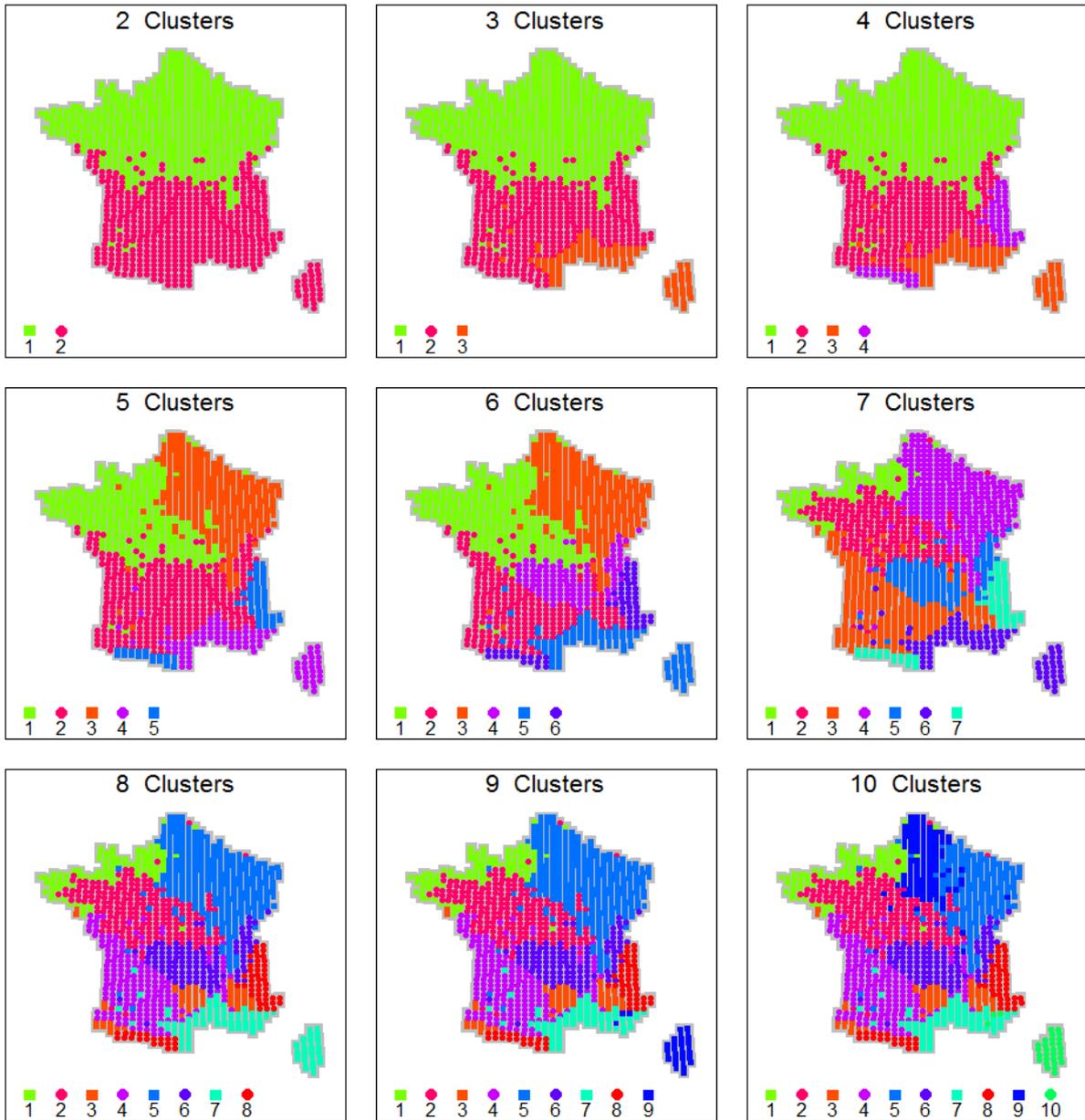


Figure 20 : Evolution de la classification des mailles en fonction du nombre de groupes pour les animaux

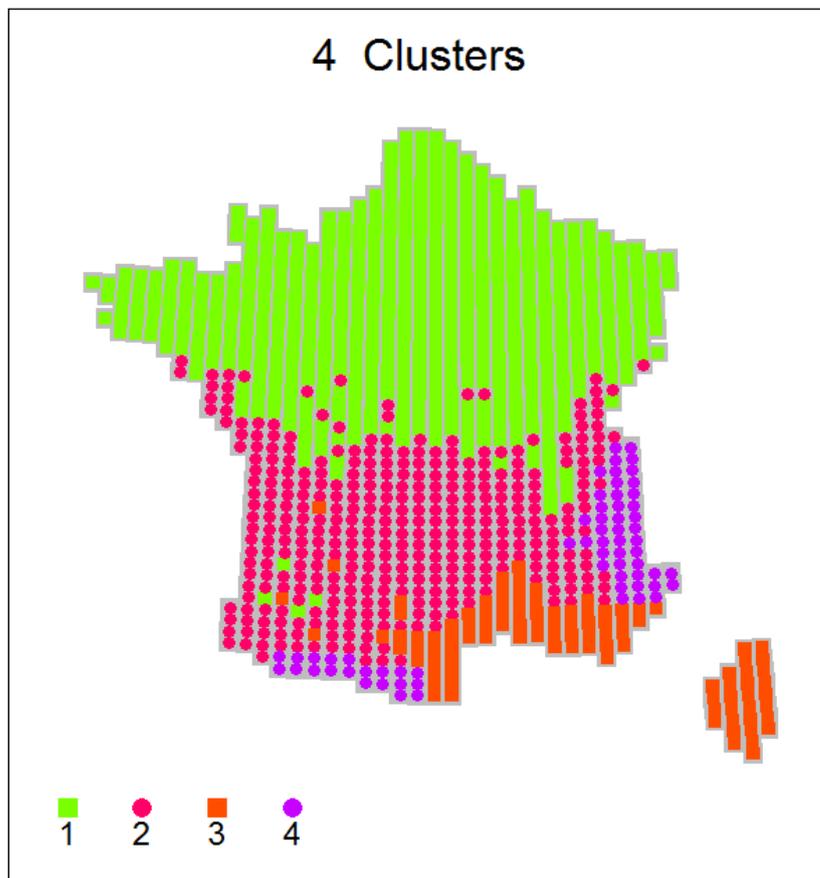
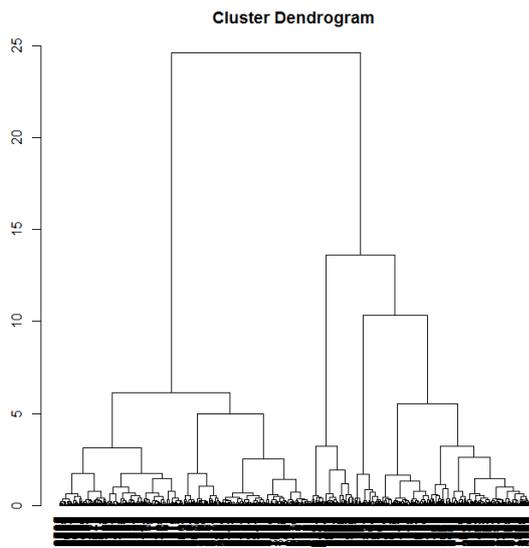


Figure 21 : En haut : dendrogramme de la Classification Ascendante Hiérarchique des mailles pour le groupe des animaux (tous les taxons sauf les orchidées) ; En bas : Carte de la distribution des 4 groupes optimaux de composition

Table 8 : Listes des 10 espèces les plus indicatrices de chaque groupe pour les animaux

Groupe 1	Nom Latin	Taxon	IndVal
	<i>Corvus frugilegus</i>	Oiseaux	73.67
	<i>Phylloscopus trochilus</i>	Oiseaux	72.61
	<i>Emberiza schoeniclus</i>	Oiseaux	69.98
	<i>Perdix perdix</i>	Oiseaux	67.10
	<i>Triturus cristatus</i>	Amphibiens	63.56
	<i>Vanellus vanellus</i>	Oiseaux	63.10
	<i>Locustella naevia</i>	Oiseaux	62.68
	<i>Lissotriton vulgaris</i>	Amphibiens	62.18
	<i>Fulica atra</i>	Oiseaux	62.09
	<i>Phylloscopus sibilatrix</i>	Oiseaux	61.21
Groupe 2	Nom Latin	Taxon	IndVal
	<i>Circaetus gallicus</i>	Oiseaux	43.55
	<i>Natrix maura</i>	Reptiles	42.25
	<i>Hierophis viridiflavus</i>	Reptiles	42.01
	<i>Milvus migrans</i>	Oiseaux	41.98
	<i>Lacerta bilineata</i>	Reptiles	38.92
	<i>Phylloscopus bonelli</i>	Oiseaux	38.22
	<i>Lanius collurio</i>	Oiseaux	37.73
	<i>Jynx torquilla</i>	Oiseaux	37.64
	<i>Vipera aspis</i>	Reptiles	37.32
	<i>Upupa epops</i>	Oiseaux	36.10
Groupe 3	Nom Latin	Taxon	IndVal
	<i>Sylvia melanocephala</i>	Oiseaux	59.18
	<i>Tarentola mauritanica</i>	Reptiles	59.03
	<i>Copris hispanus</i>	Coléoptères	54.09
	<i>Monticola solitarius</i>	Oiseaux	48.78
	<i>Suncus etruscus</i>	Mammifères	45.44
	<i>Bubas bison</i>	Coléoptères	43.34
	<i>Euonthophagus amyntas</i>	Coléoptères	42.56
	<i>Sylvia cantillans</i>	Oiseaux	40.94
	<i>Rhinechis scalaris</i>	Reptiles	40.17
	<i>Malpolon monspessulanus</i>	Reptiles	40.14
Groupe 4	Nom Latin	Taxon	IndVal
	<i>Lagopus mutus</i>	Oiseaux	65.55
	<i>Marmota marmota</i>	Mammifères	59.17
	<i>Montifringilla nivalis</i>	Oiseaux	58.17
	<i>Pyrhocorax graculus</i>	Oiseaux	53.11
	<i>Prunella collaris</i>	Oiseaux	52.52
	<i>Gomphocerus sibiricus</i>	Orthoptères	52.08
	<i>Lepus timidus</i>	Mammifères	52.00
	<i>Aphodius abdominalis</i>	Coléoptères	50.30
	<i>Aphodius (Amidorus) obscurus</i>	Coléoptères	49.90
	<i>Alectoris graeca</i>	Oiseaux	46.05

3.3.2.6 Invertébrées (Orthoptères et Coléoptères)

260 espèces

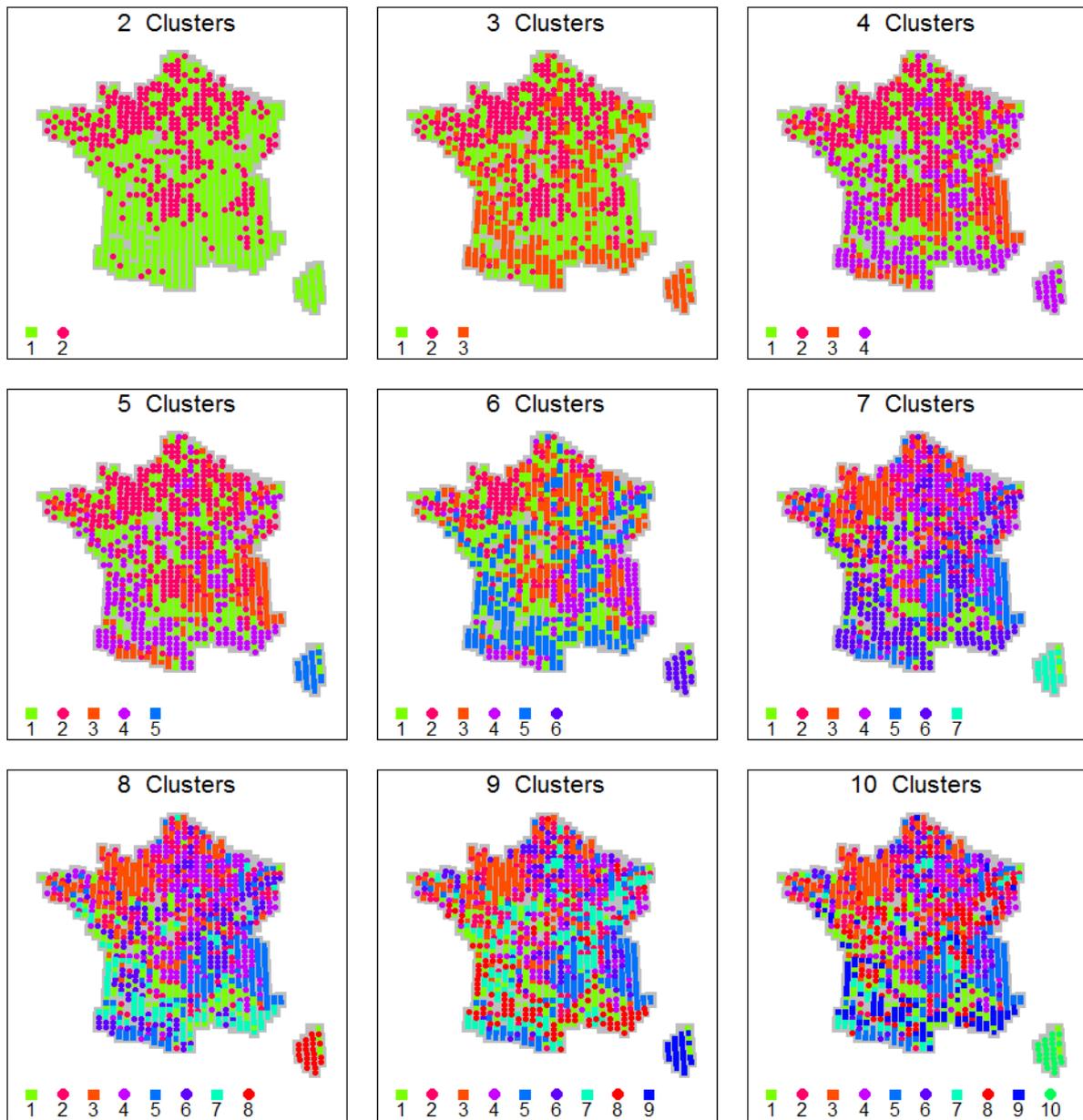


Figure 22 : Evolution de la classification des mailles en fonction du nombre de groupes pour les invertébrées

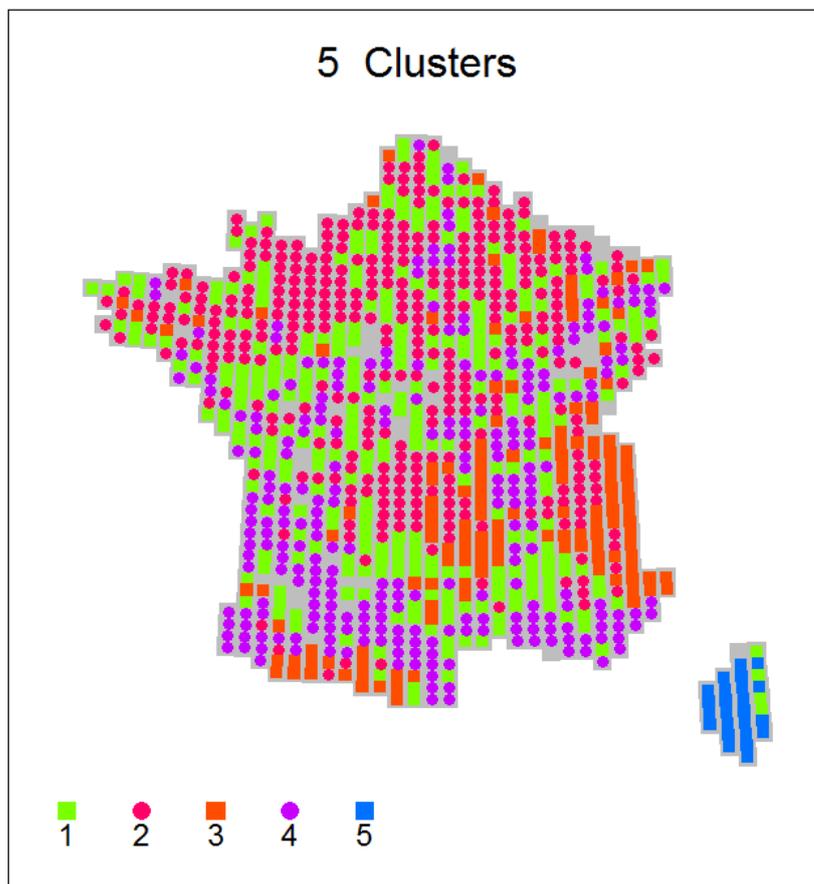
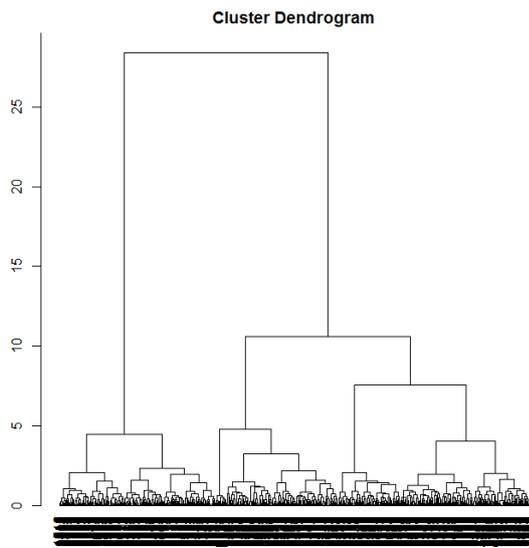


Figure 23 : En haut : dendrogramme de la Classification Ascendante Hiérarchique des mailles pour le groupe des invertébrés (orthoptères et coléoptères scarabéidés laparosticti) ; En bas : Carte de la distribution des 5 groupes optimaux de composition

Table 9 : Listes des 10 espèces les plus indicatrices de chaque groupe pour les invertébrés

Groupe 1	Nom Latin	Taxon	IndVal
	<i>Mantis religiosa</i>	Orthoptères	10.94
	<i>Platycleis tessellata</i>	Orthoptères	10.78
	<i>Pezotettix giornai</i>	Orthoptères	9.05
	<i>Ruspolia nitidula</i>	Orthoptères	8.85
	<i>Euchorthippus pulvinatus gallicus</i>	Orthoptères	8.35
	<i>Calliptamus italicus</i>	Orthoptères	7.98
	<i>Calliptamus barbarus</i>	Orthoptères	6.99
	<i>Sphingonotus caerulans caerulans</i>	Orthoptères	6.70
	<i>Aiolopus thalassinus</i>	Orthoptères	6.26
	<i>Aiolopus strepens</i>	Orthoptères	6.03
Groupe 2	Nom Latin	Taxon	IndVal
	<i>Pholidoptera griseoptera</i>	Orthoptères	44.69
	<i>Chorthippus parallelus parallelus</i>	Orthoptères	44.33
	<i>Conocephalus fuscus</i>	Orthoptères	42.99
	<i>Tettigonia viridissima</i>	Orthoptères	40.83
	<i>Nemobius sylvestris</i>	Orthoptères	39.68
	<i>Chorthippus biguttulus</i>	Orthoptères	39.13
	<i>Chorthippus brunneus</i>	Orthoptères	35.60
	<i>Leptophyes punctatissima</i>	Orthoptères	35.56
	<i>Gryllus campestris</i>	Orthoptères	33.90
	<i>Metrioptera roeseli</i>	Orthoptères	33.85
Groupe 3	Nom Latin	Taxon	IndVal
	<i>Aphodius abdominalis</i>	Coléoptères	26.86
	<i>Chorthippus scalaris</i>	Orthoptères	26.72
	<i>Decticus verrucivorus</i>	Orthoptères	23.09
	<i>Aphodius alpinus</i>	Coléoptères	22.25
	<i>Omocestus (Omocestus) viridulus</i>	Orthoptères	21.68
	<i>Aphodius depressus</i>	Coléoptères	21.68
	<i>Aphodius (Amidorus) obscurus</i>	Coléoptères	21.43
	<i>Chorthippus apricarius</i>	Orthoptères	20.73
	<i>Geotrupes stercorarius</i>	Coléoptères	18.54
	<i>Aphodius rufipes</i>	Coléoptères	18.43
Groupe 4	Nom Latin	Taxon	IndVal
	<i>Copris lunaris</i>	Coléoptères	25.43
	<i>Onthophagus vacca</i>	Coléoptères	24.89
	<i>Onthophagus taurus</i>	Coléoptères	24.47
	<i>Onthophagus coenobita</i>	Coléoptères	21.90
	<i>Onthophagus ovatus</i>	Coléoptères	21.53
	<i>Euoniticellus fulvus</i>	Coléoptères	20.41
	<i>Aphodius subterraneus</i>	Coléoptères	20.01
	<i>Typhoeus typhoeus</i>	Coléoptères	18.93
	<i>Aphodius scybalarius</i>	Coléoptères	18.83
	<i>Onthophagus emarginatus</i>	Coléoptères	18.61

Groupe 5	Nom Latin	Taxon	IndVal
	<i>Chironitis irroratus</i>	Coléoptères	75.21
	<i>Pachypus candidae</i>	Coléoptères	71.05
	<i>Thorectes geminatus</i>	Coléoptères	58.70
	<i>Sphingonotus caerulans corsicus</i>	Orthoptères	37.88
	<i>Scarabaeus sacer</i>	Coléoptères	36.78
	<i>Euoniticellus pallens</i>	Coléoptères	25.00
	<i>Thorectes intermedius</i>	Coléoptères	22.70
	<i>Eupholidoptera schmidti</i>	Orthoptères	22.69
	<i>Copris hispanus</i>	Coléoptères	21.80
	<i>Bubas bison</i>	Coléoptères	21.50

3.3.2.7 Vertébrés (amphibiens, mammifères, oiseaux, poissons, reptiles)

507 espèces

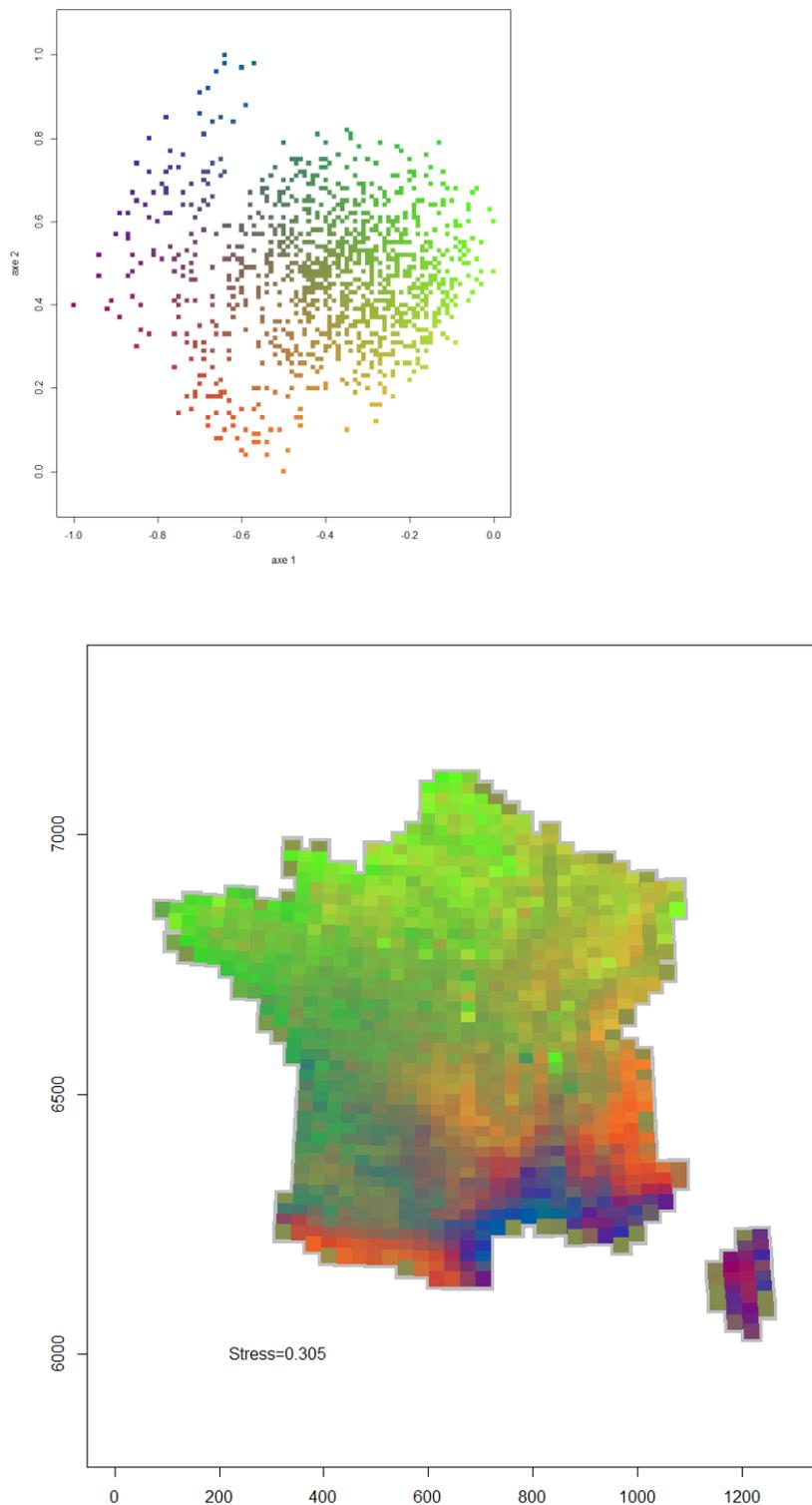


Figure 24 : Gauche : NMDS basé sur les vertébrés, stress = 0.305 ; Droite : Carte de distribution des distances de composition entre mailles tel que définies par le NMDS. Les couleurs représentent la position de chaque maille dans la classification (à gauche) et par extension sa distance de composition spécifique avec ses voisins.

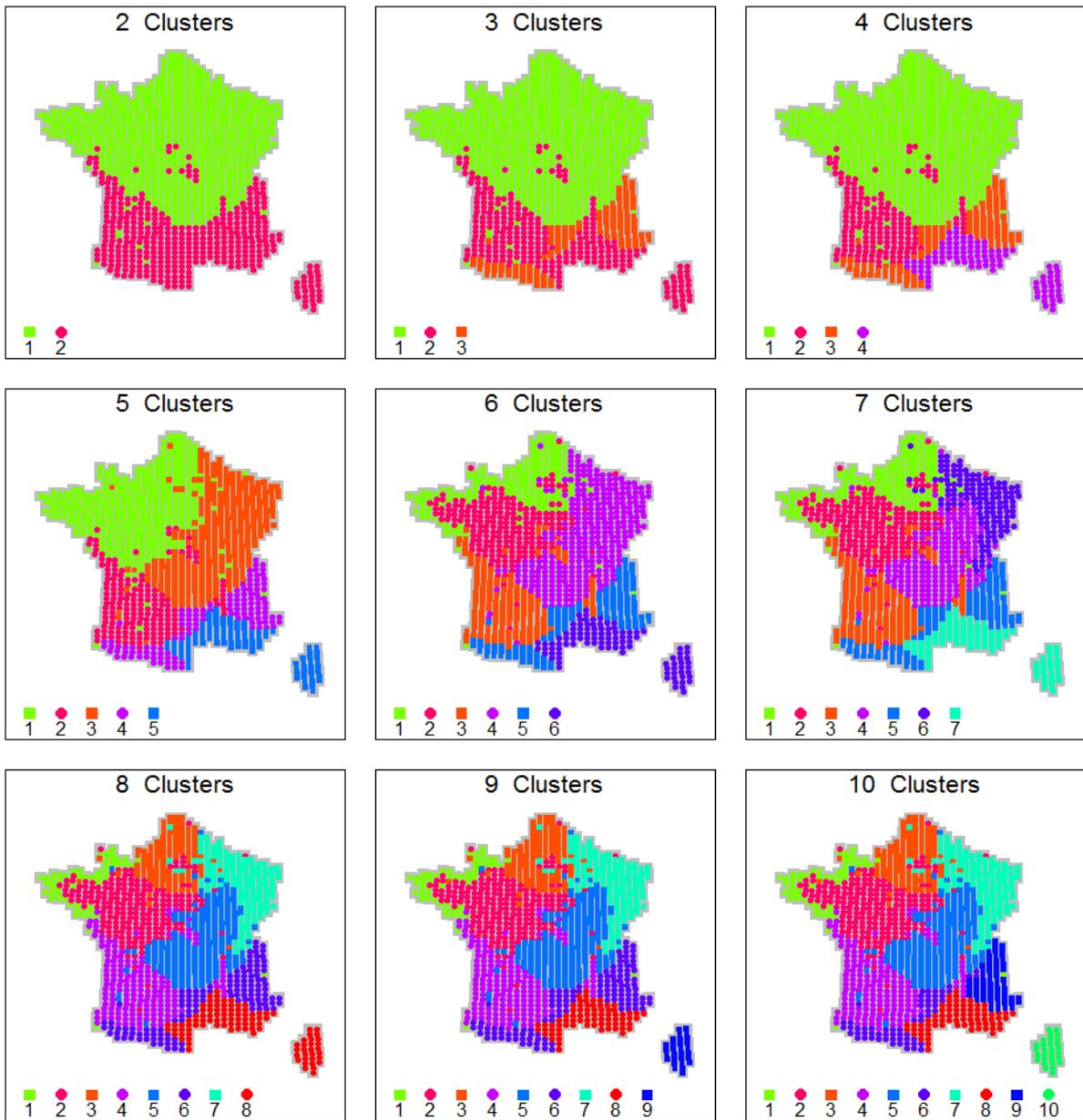


Figure 25 : Evolution de la classification des mailles en fonction du nombre de groupes pour les vertébrés

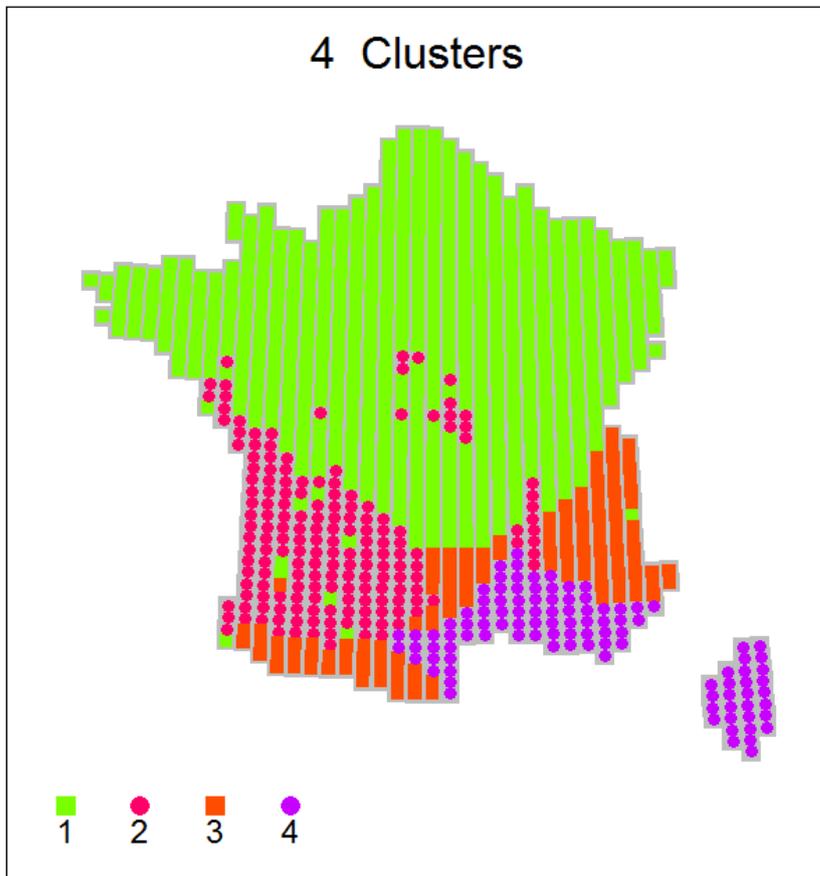
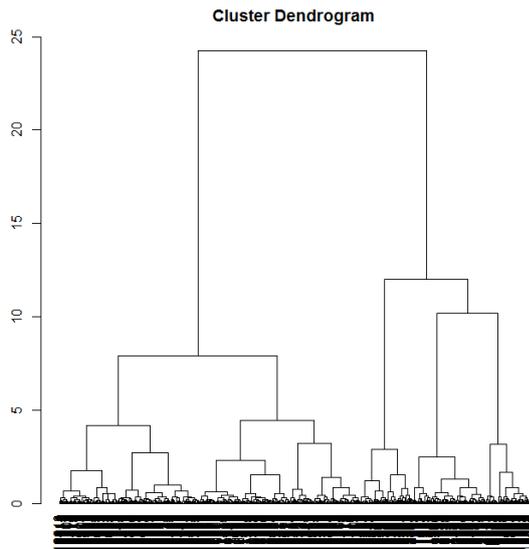


Figure 26 : En haut : dendrogramme de la Classification Ascendante Hiérarchique des mailles pour le groupe des vertébrés (amphibiens, mammifères, oiseaux, poissons, reptiles) ; En bas : Carte de la distribution des 4 groupes optimaux de composition

Table 10 : Listes des 10 espèces les plus indicatrices de chaque groupe pour les vertébrés

Groupe 1	Nom Latin	Taxon	IndVal
	<i>Phylloscopus trochilus</i>	Oiseaux	83.59
	<i>Perdix perdix</i>	Oiseaux	74.50
	<i>Emberiza schoeniclus</i>	Oiseaux	73.37
	<i>Vanellus vanellus</i>	Oiseaux	72.50
	<i>Corvus frugilegus</i>	Oiseaux	72.03
	<i>Phylloscopus sibilatrix</i>	Oiseaux	71.77
	<i>Emberiza citrinella</i>	Oiseaux	70.41
	<i>Pyrhula pyrrhula</i>	Oiseaux	69.69
	<i>Sylvia borin</i>	Oiseaux	69.31
	<i>Triturus cristatus</i>	Amphibiens	68.40
Groupe 2	Nom Latin	Taxon	IndVal
	<i>Hyla meridionalis</i>	Amphibiens	38.25
	<i>Gobio occitaniae</i>	Poissons	30.86
	<i>Leuciscus burdigalensis</i>	Poissons	24.54
	<i>Hierophis viridiflavus</i>	Reptiles	23.76
	<i>Triturus marmoratus</i>	Amphibiens	23.21
	<i>Parachondrostoma toxostoma</i>	Poissons	22.45
	<i>Genetta genetta</i>	Mammifères	21.89
	<i>Emys orbicularis</i>	Reptiles	21.80
	<i>Cisticola juncidis</i>	Oiseaux	18.93
	<i>Natrix maura</i>	Reptiles	18.19
Groupe 3	Nom Latin	Taxon	IndVal
	<i>Aquila chrysaetos</i>	Oiseaux	56.69
	<i>Pyrhacorax graculus</i>	Oiseaux	55.65
	<i>Pyrhacorax pyrhhacorax</i>	Oiseaux	53.33
	<i>Monticola saxatilis</i>	Oiseaux	53.26
	<i>Anthus spinoletta</i>	Oiseaux	52.22
	<i>Lagopus mutus</i>	Oiseaux	49.21
	<i>Marmota marmota</i>	Mammifères	47.66
	<i>Prunella collaris</i>	Oiseaux	45.71
	<i>Rupicapra rupicapra</i>	Mammifères	44.11
	<i>Tichodroma muraria</i>	Oiseaux	42.74
Groupe 4	Nom Latin	Taxon	IndVal
	<i>Sylvia melanocephala</i>	Oiseaux	70.92
	<i>Tarentola mauritanica</i>	Reptiles	60.01
	<i>Monticola solitarius</i>	Oiseaux	57.88
	<i>Rhinechis scalaris</i>	Reptiles	51.11
	<i>Malpolon monspessulanus</i>	Reptiles	50.49
	<i>Sylvia cantillans</i>	Oiseaux	49.17
	<i>Suncus etruscus</i>	Mammifères	48.53
	<i>Psammmodromus hispanicus</i>	Reptiles	47.57
	<i>Chalcides striatus</i>	Reptiles	46.80
	<i>Coracias garrulus</i>	Oiseaux	43.44

3.3.2.8 Mammifères-Oiseaux-Reptiles

405 espèces

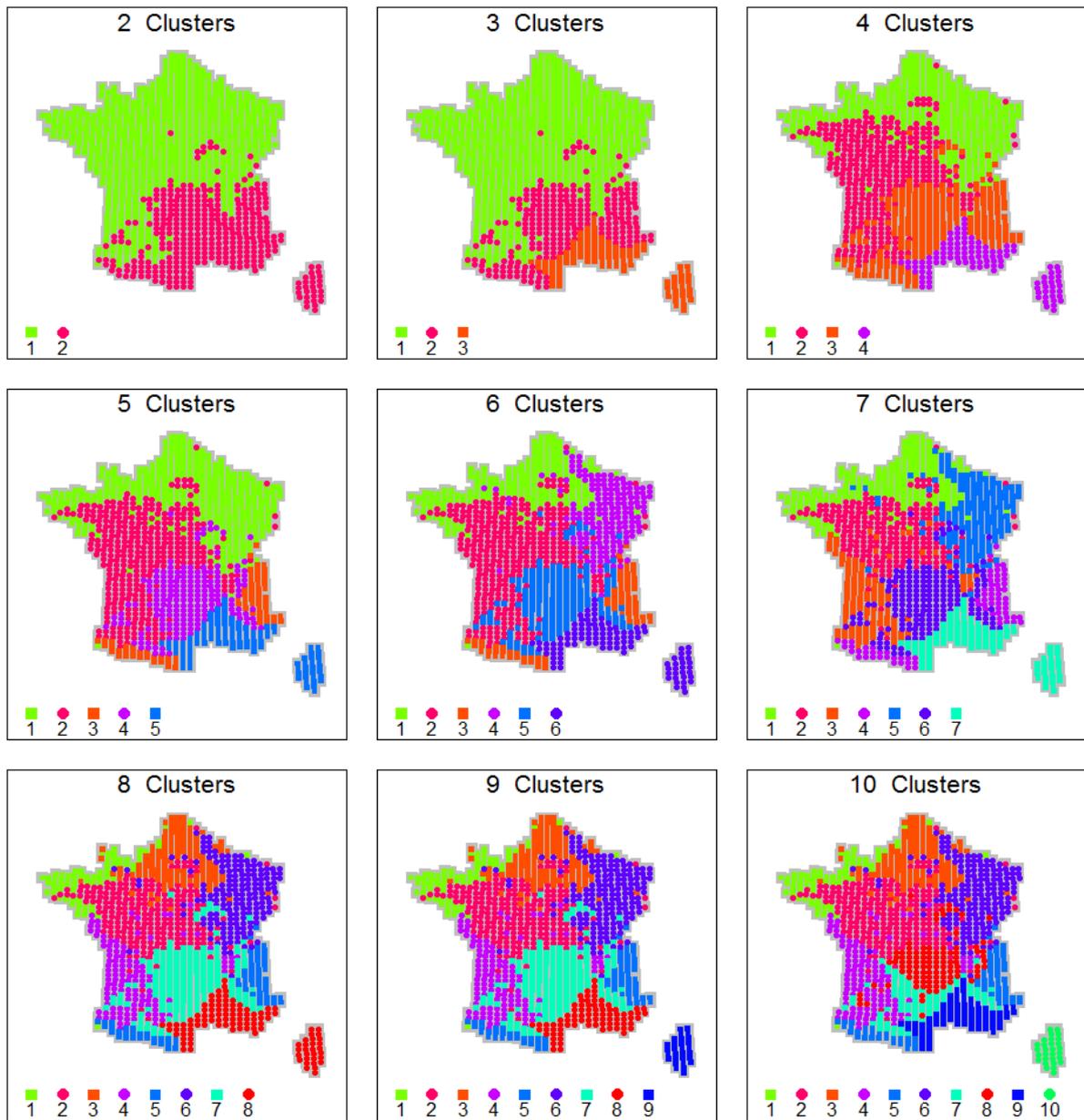


Figure 27 : Evolution de la classification des mailles en fonction du nombre de groupes pour le groupe des mammifères, oiseaux, reptiles

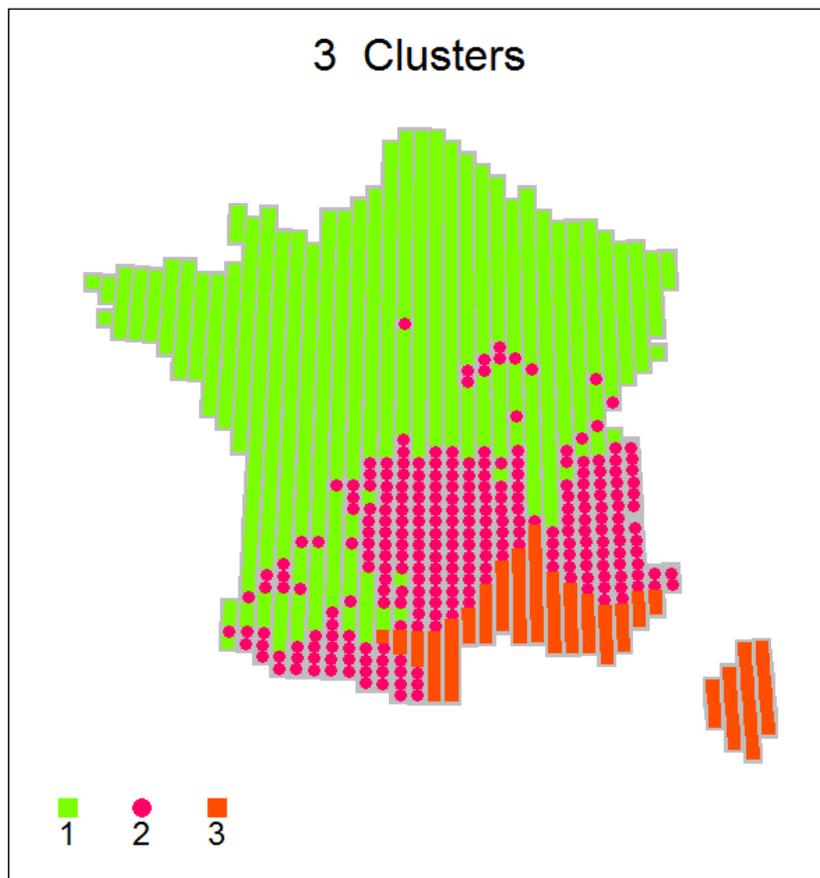
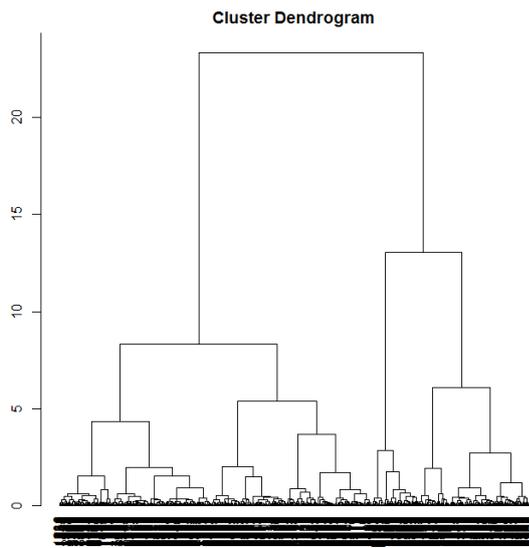


Figure 28 : En haut : dendrogramme de la Classification Ascendante Hiérarchique des mailles pour le groupe mammifères, oiseaux, reptiles ; En bas : Carte de la distribution des 3 groupes optimaux de composition

Table 11 : Listes des 10 espèces les plus indicatrices de chaque groupe pour les mammifères, oiseaux et reptiles

Groupe 1	Nom Latin	Taxon	IndVal
	<i>Emberiza schoeniclus</i>	Oiseaux	77.88
	<i>Anas platyrhynchos</i>	Oiseaux	71.12
	<i>Acrocephalus scirpaceus</i>	Oiseaux	70.18
	<i>Sylvia borin</i>	Oiseaux	70.16
	<i>Perdix perdix</i>	Oiseaux	70.14
	<i>Turdus philomelos</i>	Oiseaux	69.94
	<i>Sylvia communis</i>	Oiseaux	69.86
	<i>Gallinula chloropus</i>	Oiseaux	69.70
	<i>Streptopelia decaocto</i>	Oiseaux	69.54
	<i>Prunella modularis</i>	Oiseaux	69.41
Groupe 2	Nom Latin	Taxon	IndVal
	<i>Emberiza cia</i>	Oiseaux	58.28
	<i>Ptyonoprogne rupestris</i>	Oiseaux	44.95
	<i>Cinclus cinclus</i>	Oiseaux	41.43
	<i>Circaetus gallicus</i>	Oiseaux	41.30
	<i>Corvus corax</i>	Oiseaux	37.34
	<i>Bubo bubo</i>	Oiseaux	36.96
	<i>Falco peregrinus</i>	Oiseaux	36.00
	<i>Anthus spinoletta</i>	Oiseaux	35.51
	<i>Vipera aspis</i>	Reptiles	34.10
	<i>Loxia curvirostra</i>	Oiseaux	31.86
Groupe 3	Nom Latin	Taxon	IndVal
	<i>Sylvia melanocephala</i>	Oiseaux	73.55
	<i>Tarentola mauritanica</i>	Reptiles	64.75
	<i>Monticola solitarius</i>	Oiseaux	63.43
	<i>Malpolon monspessulanus</i>	Reptiles	56.58
	<i>Rhinechis scalaris</i>	Reptiles	56.20
	<i>Sylvia cantillans</i>	Oiseaux	53.31
	<i>Psammmodromus hispanicus</i>	Reptiles	52.11
	<i>Chalcides striatus</i>	Reptiles	51.47
	<i>Suncus etruscus</i>	Mammifères	50.80
	<i>Mus spretus</i>	Mammifères	47.27

3.3.2.9 Amphibiens-Poissons

102 espèces

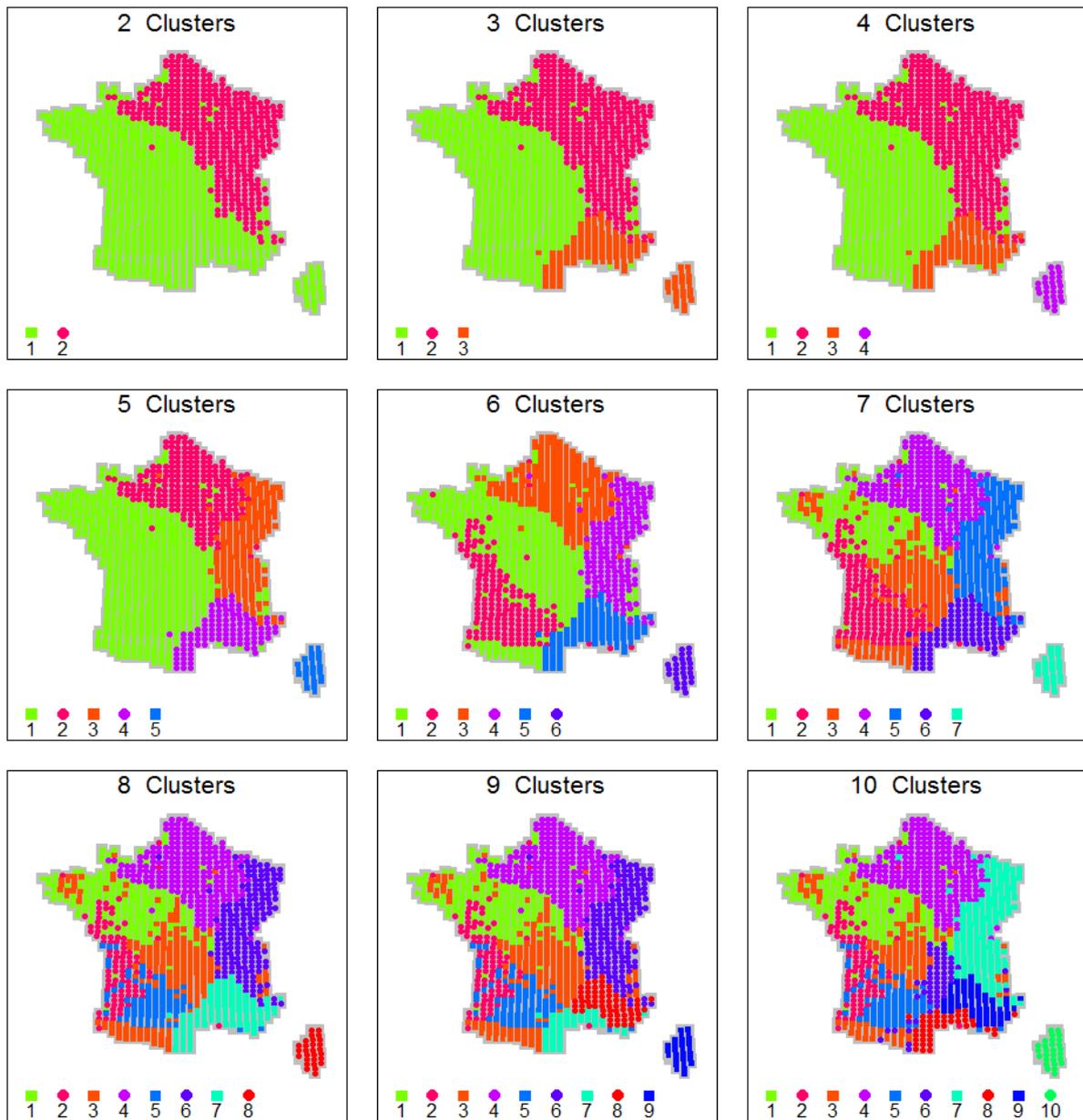


Figure 29 : Evolution de la classification des mailles en fonction du nombre de groupes pour le groupe des amphibiens, poissons

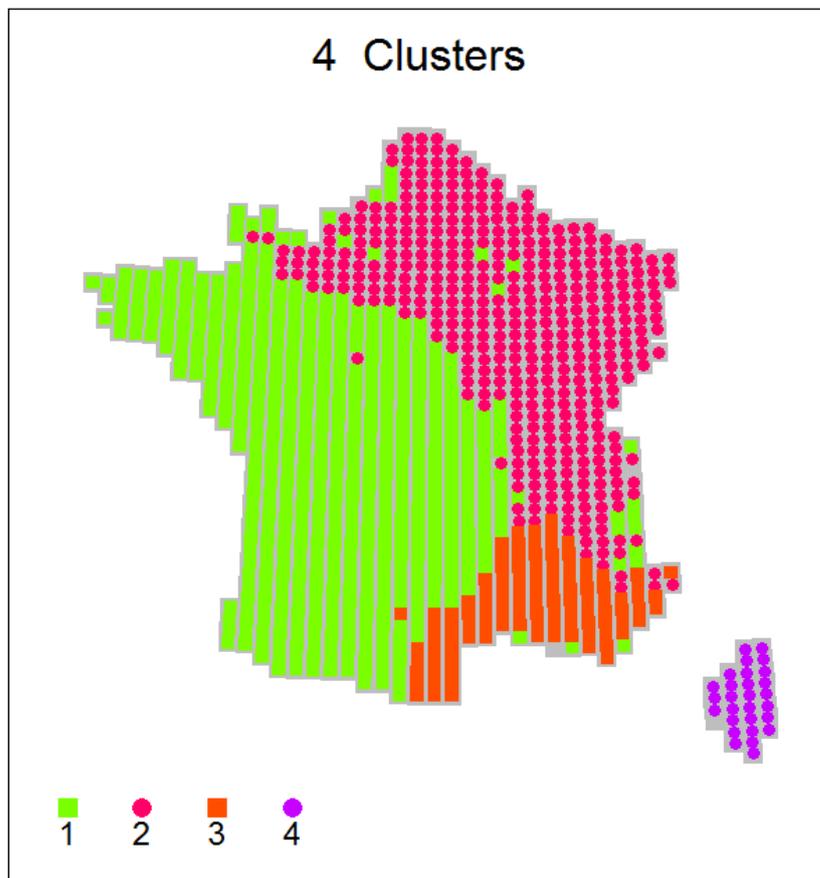
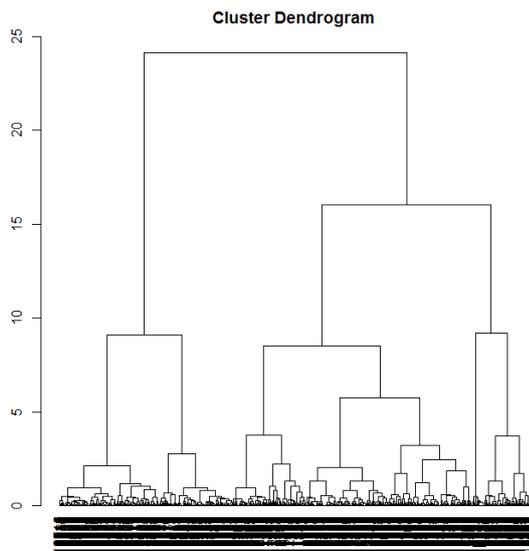


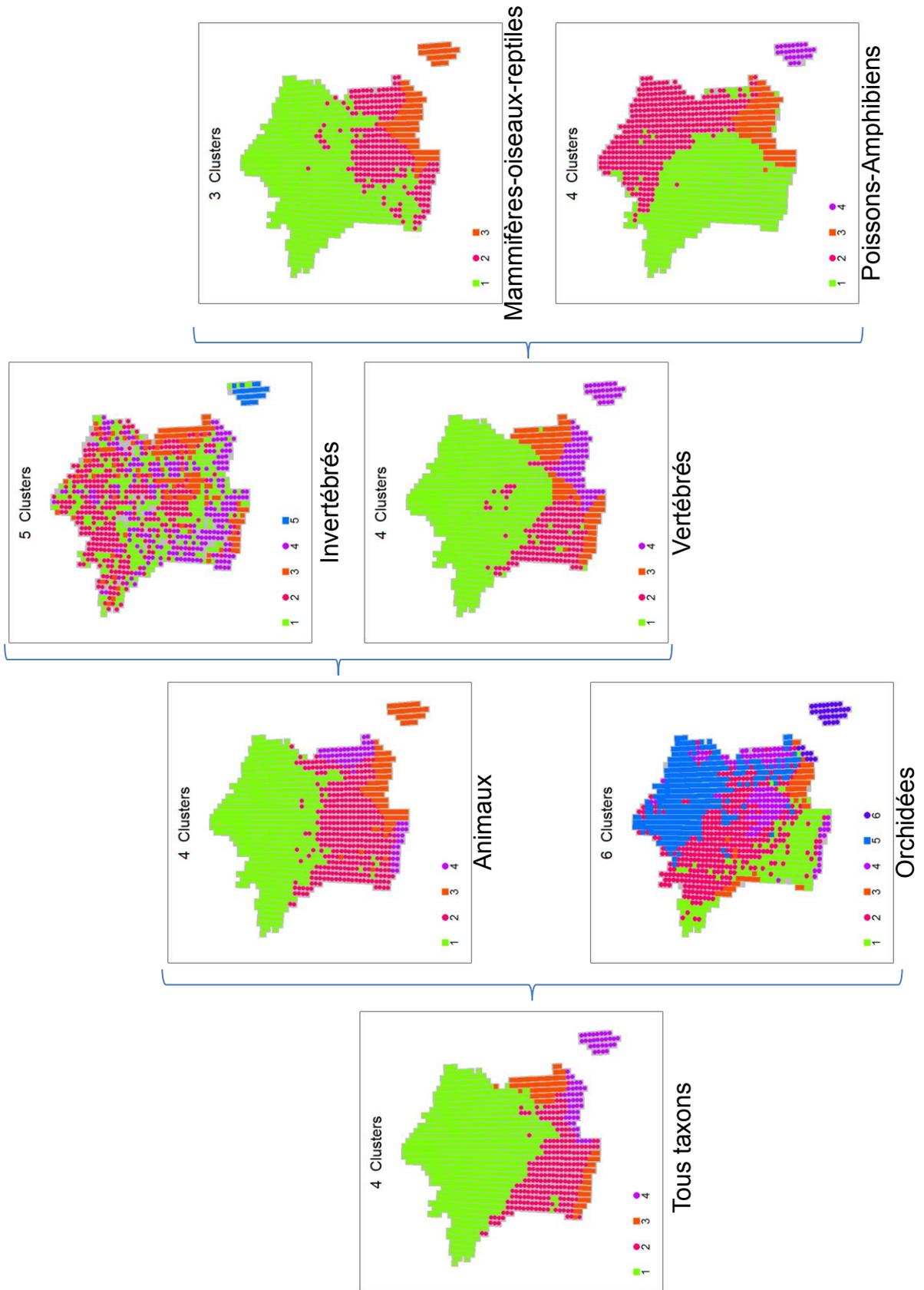
Figure 30 : En haut : dendrogramme de la Classification Ascendante Hiérarchique des mailles pour le groupe amphibiens, poissons ; En bas : Carte de la distribution des 4 groupes optimaux de composition

Table 12 : Listes des 10 espèces les plus indicatrices de chaque groupe pour les amphibiens et poissons

Groupe 1	Nom Latin	Taxon	IndVal
	<i>Leuciscus burdigalensis</i>	Poissons	68.04
	<i>Triturus marmoratus</i>	Amphibiens	61.23
	<i>Rana dalmatina</i>	Amphibiens	49.59
	<i>Lissotriton helveticus</i>	Amphibiens	49.54
	<i>Bufo bufo</i>	Amphibiens	49.28
	<i>Barbatula barbatula</i>	Poissons	45.43
	<i>Alytes obstetricans</i>	Amphibiens	45.18
	<i>Pelophylax</i>	Amphibiens	44.86
	<i>Salamandra salamandra</i>	Amphibiens	44.72
	<i>Rutilus rutilus</i>	Poissons	41.54
Groupe 2	Nom Latin	Taxon	IndVal
	<i>Leuciscus leuciscus</i>	Poissons	71.65
	<i>Ichthyosaura alpestris</i>	Amphibiens	70.09
	<i>Gasterosteus aculeatus</i>	Poissons	48.20
	<i>Lissotriton vulgaris</i>	Amphibiens	47.99
	<i>Rana temporaria</i>	Amphibiens	47.26
	<i>Triturus cristatus</i>	Amphibiens	41.65
	<i>Perca fluviatilis</i>	Poissons	38.03
	<i>Lota lota</i>	Poissons	35.23
	<i>Scardinius erythrophthalmus</i>	Poissons	35.17
	<i>Abramis brama</i>	Poissons	32.56
Groupe 3	Nom Latin	Taxon	IndVal
	<i>Barbus meridionalis</i>	Poissons	62.56
	<i>Hyla meridionalis</i>	Amphibiens	29.92
	<i>Phoxinus phoxinus</i>	Poissons	29.21
	<i>Pelobates cultripipes</i>	Amphibiens	26.13
	<i>Telestes souffia</i>	Poissons	26.08
	<i>Salarias fluviatilis</i>	Poissons	15.88
	<i>Mugil cephalus</i>	Poissons	15.60
	<i>Zingel asper</i>	Poissons	15.58
	<i>Alosa fallax rhodanensis</i>	Poissons	14.02
	<i>Parachondrostoma toxostoma</i>	Poissons	13.61
Groupe 4	Nom Latin	Taxon	IndVal
	<i>Hyla sarda</i>	Amphibiens	100.00
	<i>Discoglossus sardus</i>	Amphibiens	86.22
	<i>Euproctus montanus</i>	Amphibiens	82.14
	<i>Salamandra corsica</i>	Amphibiens	67.86
	<i>Bufo viridis</i>	Amphibiens	53.98
	<i>Discoglossus montalentii</i>	Amphibiens	53.57
	<i>Liza aurata</i>	Poissons	43.77
	<i>Aphanius fasciatus</i>	Poissons	25.00
	<i>Pelophylax lessonae</i>	Amphibiens	23.89

3.3.2.10 Récapitulatif des classifications pour les différents groupements

Figure 31 : Synthèse des classifications selon les regroupements de taxons



Les CAH permettent de déterminer des zones biogéographiques caractéristiques pour l'ensemble des regroupements. Les zones de montagnes (Alpes et Pyrénées) et la côte méditerranéenne ressortent ainsi pour tous les regroupements.

Certains groupes révèlent les spécificités de la Corse en l'individualisant du groupe de la côte méditerranéenne (orchidées, invertébrés, poisson-amphibiens).

La distinction entre les zones atlantiques et continentale qui apparaît pour le groupe poisson-amphibiens et qui contraste par rapport à la séparation Nord-sud des autres regroupements de vertébrés est également à noter.

4 Complémentarité des assemblages d'espèces, irremplaçabilité des mailles et « substitutivité » des taxons indicateurs

4.1 Introduction

Dans ce chapitre ont été regroupées plusieurs questions qui sont traitées avec le même outil (le logiciel Marxan) mais qui ont également comme objectif commun l'optimisation des méthodes de sélection des secteurs et des taxons à protéger.

Nous abordons dans ce chapitre la complémentarité entre les mailles et donc des assemblages d'espèces qu'elles contiennent. Cette approche de la complémentarité est traitée dans une optique de conservation des espèces et concerne donc la définition de réseaux de mailles ayant des assemblages d'espèces complémentaires (Williams & Manne 2007). Nous abordons également la « substitutivité » (surrogacy) entre taxons, c'est-à-dire la capacité d'un taxon à servir de « parapluie » pour la conservation des autres espèces (Rodrigues & Brooks 2007). Dans ce contexte, la « substitutivité » entre espèces est très dépendante de la congruence entre les distributions de la richesse des deux taxons concernés mais également de la complémentarité entre les mailles de chacun des taxons.

4.2 Méthodologie

4.2.1 Le logiciel Marxan

Le logiciel Marxan est utilisé afin de définir les scores d'irremplaçabilité. Ce logiciel est développé à l'origine pour la construction des réseaux d'aires protégées et permet d'optimiser le choix des sites à inclure en minimisant les coûts de la surface d'aire protégées tout en maximisant les objectifs de conservation des espèces (Ball, Possingham *et al.* 2009). L'algorithme de choix des mailles fait donc la balance entre le coût des mailles (prix à payer pour intégrer une maille, peut être fonction de la surface de la maille, de la qualité du terrain...) et les pénalités associées aux objectifs non atteints (prix à payer si une espèce est absente du réseau). Ces paramètres (prix de la maille et pénalités des objectifs non atteints) sont à préciser par l'utilisateur en fonction des objectifs de l'étude et des éventuelles contraintes de terrain.

Le processus de Marxan implique un ordre d'intégration aléatoire des placettes, le processus d'optimisation est répliqué plusieurs fois de manière à couvrir le plus de combinaisons possible. La superposition des différentes combinaisons de mailles produites par Marxan conduit à l'établissement d'un score d'irremplaçabilité pour chaque maille en fonction de la fréquence à laquelle elle est sélectionnée. Par exemple, si l'objectif de gestion est de conserver toutes les espèces existantes en France métropolitaine, une maille contenant la seule occurrence d'une espèce sera systématiquement sélectionnée et aura donc un score d'irremplaçabilité de 1.

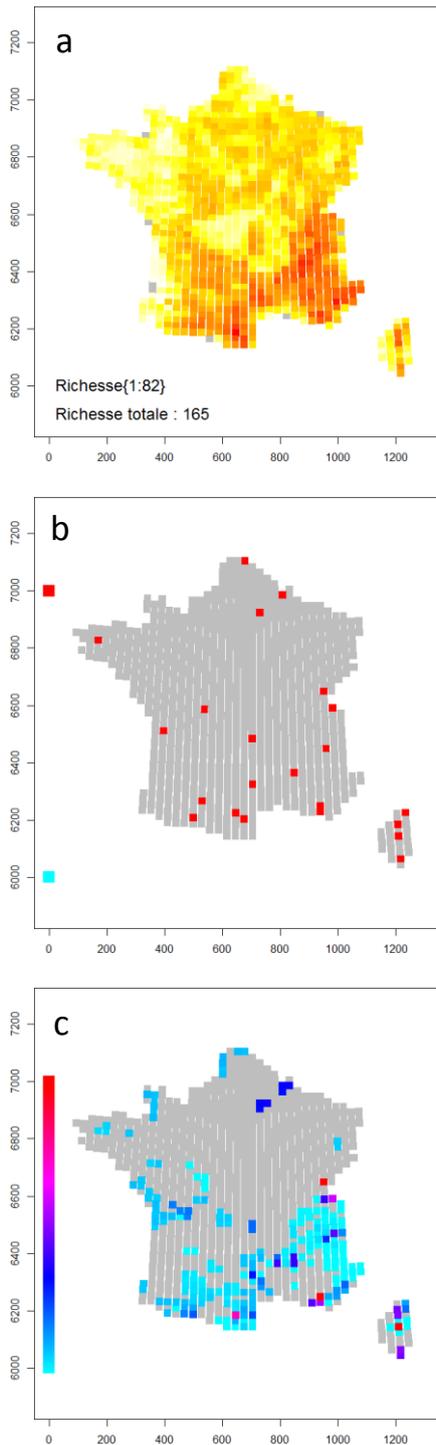


Figure 32 :

Etapes de calcul des scores d'irremplaçabilité avec le logiciel Marxan, exemple des orchidées.

A partir des cartes de richesse spécifique (a) (ici exemple des Orchidées), on développe des réseaux de mailles complémentaires permettant de conserver au minimum 1 occurrence de chaque espèce présente (b). Dans cet exemple, 22 mailles (carrés rouges) sont nécessaires pour conserver au minimum 1 occurrence de chacune des 165 espèces d'orchidées présentes dans l'atlas. Chacun des réseaux de mailles ainsi crée (b) est donc considéré comme un exemple de réseau « optimal » permettant d'atteindre les objectifs de conservation avec le moins de mailles possible. Le processus de création de réseau de mailles « optimal » est répété 100 fois de manière à considérer toutes les combinaisons de mailles possibles permettant de remplir notre objectif de représentation des espèces. On superpose ensuite les 100 combinaisons de réseaux de mailles « optimaux » pour obtenir le score d'irremplaçabilité de chaque maille (c). Les couleurs indiquent la fréquence de sélection des mailles. Plus la couleur est chaude (mauve, rouge), plus les mailles sont sélectionnées souvent (de 1 à 100 sélections). Cela indique que ces mailles sont irremplaçables, soit parce qu'elles contiennent beaucoup d'espèces, et permettent donc d'économiser des mailles, soit parce qu'elles contiennent des espèces rares ou endémiques. Les plages bleu clair représentent plutôt des mailles interchangeables entre elles. Les mailles grises ont une très faible contribution à l'objectif de conservation.

4.2.2 Paramétrage de Marxan pour les mesures d'irremplaçabilité

Pour ce travail, l'objectif « simpliste » de conservation à atteindre par Marxan est de conserver 1 occurrence de chacune des espèces des inventaires. Par conséquent, chaque réseau de mailles obtenu par Marxan représentera une combinaison de mailles contenant toutes les espèces de France métropolitaine.

Chaque maille se voit attribuer un coût de 1 de manière à ne créer aucune hétérogénéité spatiale liée au terrain et donc à s'assurer que le réseau de maille sélectionné est uniquement déterminé en fonction de la composition spécifique.

La pénalité associée à l'absence d'une espèce est elle aussi homogène entre espèces et fixée à 1000.

Nous utilisons 100 itérations de Marxan, les mailles peuvent donc obtenir des scores d'irremplaçabilité entre 0 et 100. Les mailles ayant un score d'irremplaçabilité élevé sont typiquement des mailles contenant des espèces endémiques ou rares, et des mailles exceptionnellement riches et permettant donc de minimiser le nombre de mailles à inclure dans le réseau.

Les scores d'irremplaçabilité sont mesurés pour chacun des huit taxons étudiés et également pour le regroupement de toutes les espèces de France métropolitaine (les huit taxons confondus) pour un total de 1097 espèces et pour le groupe des espèces menacées mentionnées dans les listes rouges de l'UICN et pour lesquelles des scores de responsabilité patrimoniale sont calculés (Savouré-Soubelet en prep.), (129 espèces uniquement parmi les vertébrés : amphibiens, mammifères, oiseaux nicheurs, poissons, reptiles).

Pour le regroupement de tous les taxons confondus et pour le groupe des espèces menacées, nous avons également produit des scores d'irremplaçabilité pour des scénarios impliquant la conservation de 5 et 10 occurrences (donc de 5 à 10 mailles) de chaque espèce. Ces seuils d'occurrences sont choisis d'après les critères et seuils de l'UICN pour la qualification des espèces en danger (EN) (si l'espèce n'existe plus que dans 5 sites) et vulnérables (VU) (si l'espèce n'existe plus que dans 10 sites) (UICN 2001). Dans ces scénarios, les mailles des espèces dont le contingent n'atteint pas 5 ou 10 mailles sont intégralement conservées.

4.2.3 Paramétrage de Marxan pour la responsabilité patrimoniale

Un ensemble de scénario Marxan est également paramétré pour rendre compte de la priorisation de la conservation des espèces menacées en tenant compte de la responsabilité patrimoniale de la France (Savouré-Soubelet en prep.).

On n'inclut dans le scénario Marxan que la conservation d'une occurrence de chaque espèce, mais le prix de la pénalité appliquée à la perte des espèces est indexé sur le score de responsabilité patrimoniale (pénalités de 10 000 à 100 000 pour des responsabilités patrimoniales de 0 à 100%). Le scénario est ensuite contraint pour n'inclure qu'un nombre limité et prédéterminé de mailles dans le réseau (2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 et 20). De cette manière, Marxan est obligé de discriminer les espèces en fonction de leur responsabilité patrimoniale et inclura en priorité les mailles permettant de conserver les espèces ayant une responsabilité patrimoniale élevée ou des mailles permettant de conserver un grand nombre d'espèces moins critiques.

4.2.4 « Substitutivité », taxons indicateurs

La « substitutivité » d'un groupe d'espèces « parapluie » (i) représente la capacité de ce groupe à se substituer à un autre groupe d'espèces cible (j) pour servir de proxy de conservation. Concrètement, si un réseau d'aires protégées est formé pour protéger un groupe d'espèces « parapluie » (i), la « substitutivité » de ce groupe d'espèces (i) pour le groupe d'espèce cible (j) sera définie par la proportion d'espèces du groupe cible (j) que ce réseau d'aires protégées contribuera à conserver (Rodrigues & Brooks 2007).

Marxan est utilisé dans le cadre de la mesure de « substitutivité » pour créer des réseaux d'aires protégées de différentes tailles permettant d'observer l'évolution de la « substitutivité » de chaque taxon ou groupe d'espèces (tous taxons et espèces menacées) en fonction du nombre de mailles incluses dans le réseau.

Les scénarios Marxan sont ainsi paramétrés pour conserver 1 occurrence de chaque espèce, mais contraints à des tailles de réseaux limitées et prédéterminées (5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 mailles).

Ces scénarios sont réalisés pour chaque groupe taxonomique « parapluie » (i), puis le nombre d'espèces du groupe conservés par chacun de ces réseaux est mesuré pour chacun des groupes d'espèces cible (j) de manière à mesurer l'évolution de la « substitutivité » du groupe (i) pour chacun des autres groupes (j) en fonction de la taille des réseaux.

La « substitutivité » de chaque groupe « parapluie » pour chaque groupe cible est comparée d'une part aux résultats obtenus en créant des réseaux de mailles directement ciblées sur le groupe cible, et d'autre part, aux résultats obtenus en formant des réseaux de mailles au hasard sur le même territoire (Rodrigues & Brooks 2007). Nous comparons également ici les résultats de « substitutivité » à des réseaux formés au hasard dans les mailles contenant des aires protégées (voir

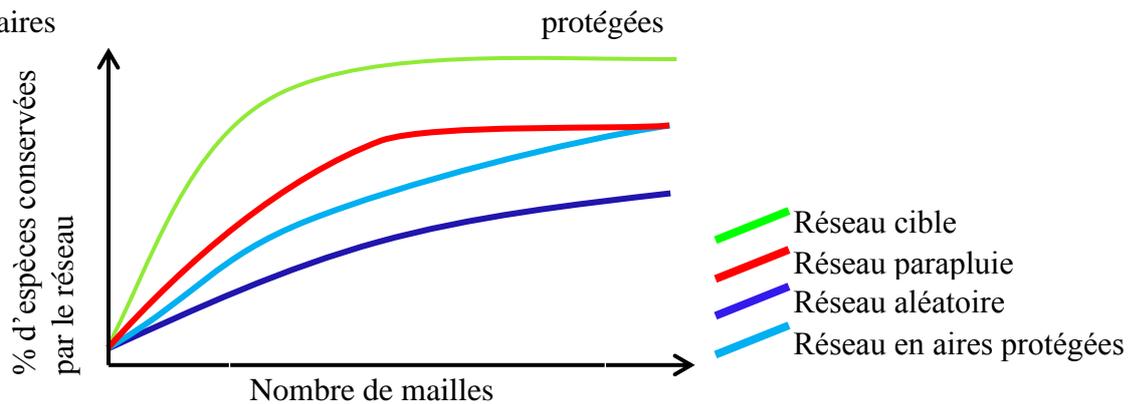


Figure 33). Dans ce cas, la probabilité de tirer une maille contenant des aires protégées est proportionnelle à la surface d'aires protégées de chaque groupement dans la maille :

$$p = \begin{cases} \frac{(2\text{propS}_{AP1} + 0,5\text{propS}_{\text{Natura}} + 0,25\text{propS}_{AP3})}{275} & \text{si } \text{propS}_{AP1} > 0 \text{ et } \text{propS}_{\text{Natura}} > 0,05 \\ \frac{2\text{propS}_{AP1}}{275} & \text{si } \text{propS}_{AP1} > 0 \text{ et } \text{propS}_{\text{Natura}} \leq 0,05 \\ 0 & \text{si } \text{propS}_{AP1} = 0 \end{cases}$$

p : la probabilité qu'une maille soit sélectionnée pour le réseau

propS_{AP1} : Proportion de la surface de la maille couverte par des aires protégées de type 1

propS_{Natura} : Proportion de la surface de la maille couverte par des aires protégées Natura 2000

propS_{AP3} : Proportion de la surface de la maille couverte par des aires protégées de type 3 (cf. paragraphe 2.2.2 et Table 2).

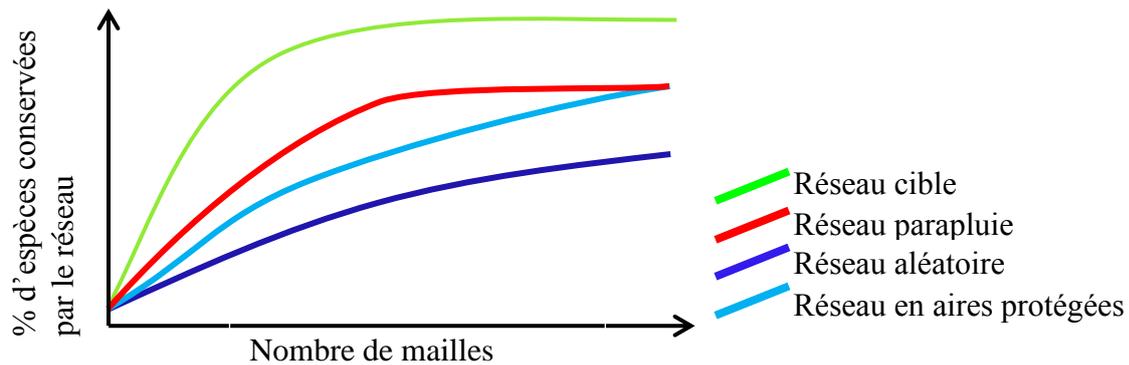


Figure 33 : Exemple de courbes de « substitutivité » en fonction du nombre de mailles incluses dans la solution de Marxan
 En vert, l'évolution du nombre d'espèces conservées dans un groupe taxonomique cible avec le nombre de mailles retenues pour la conservation de ce groupe cible ; En rouge, l'évolution du nombre d'espèces conservées dans un groupe taxonomique cible avec le nombre de mailles retenues pour la conservation d'un autre groupe dit « parapluie » ; En bleu foncé : l'évolution du nombre d'espèces conservées dans un groupe taxonomique cible avec le nombre de mailles retenues au hasard parmi les mailles de France métropolitaine ; En bleu clair : l'évolution du nombre d'espèces conservées dans un groupe taxonomique cible avec le nombre de mailles retenues au hasard parmi les mailles contenant des aires protégées

La qualité relative du groupe « parapluie » est représentée par un indicateur de la position de sa courbe par rapport à la courbe du réseau défini par la cible et par le tirage aléatoire, le *Species Accumulation Index* (SAI) (Ferrier 2002). Dans le cas de ce travail, nous calculons deux indices de qualité du groupe « parapluie », un relatif aux réseaux aléatoires (SAI) et l'autre relatif aux réseaux aléatoires tirés dans les mailles contenant des aires protégées (SAI_r).

$$SAI = \frac{(S - R)}{(O - R)} \quad \left| \quad SAI_r = \frac{(S - R_r)}{(O - R_r)}$$

Avec S l'intégrale de la courbe d'accumulation des espèces conservées par les réseaux de mailles conçus pour le groupe « parapluie », O l'intégrale de la courbe d'accumulation des espèces conservées par les réseaux de mailles conçus pour le groupe cible, R l'intégrale de la courbe d'accumulation des espèces conservées par les réseaux de mailles aléatoires, R_r l'intégrale de la courbe d'accumulation des espèces conservées par les réseaux de mailles tirés au hasard parmi les mailles contenant des aires protégées.

Note méthodologique

La « substitutivité » de chaque taxon pour l'ensemble des taxons aurait dû être testée en retirant de l'ensemble des taxons le taxon « parapluie » afin d'éviter l'autocorrélation des données. Cependant, considérant la durée des simulations Marxan pour plus de milles espèces lorsque tous les taxons sont regroupés, nous avons simplement conservé tous les taxons.

4.3 Résultats

4.3.1 Organisation des résultats

Tous les résultats d'irremplaçabilité de Marxan sont représentés sous forme de cartes représentant les valeurs d'irremplaçabilité par des couleurs du bleu turquoise (faible irremplaçabilité) au rouge (irremplaçabilité maximale).

Les couleurs chaudes indiquent des mailles irremplaçables ce qui révèle typiquement des richesses spécifiques élevées ou la présence d'espèces très localisées ou endémiques, alors que les mailles bleues et les aplats de bleus qui peuvent apparaître révèlent plutôt des mailles importantes pour leur complémentarité avec le réseau mais qui peuvent être interchangeables avec d'autres mailles. Les mailles représentées en gris n'ont jamais été sélectionnées par Marxan, elles sont donc vides ou totalement remplaçables.

Les cartes de richesse spécifiques sont recopiées du chapitre précédent en guise d'aide à l'interprétation. Les valeurs de richesses sont représentées en couleurs chaudes, du jaune (faible richesse spécifique) au rouge (richesse spécifique la plus importante). Les richesses minimales et maximales ainsi que la richesse totale en métropole sont indiqués dans la légende de chaque carte.

4.3.2 Amphibiens

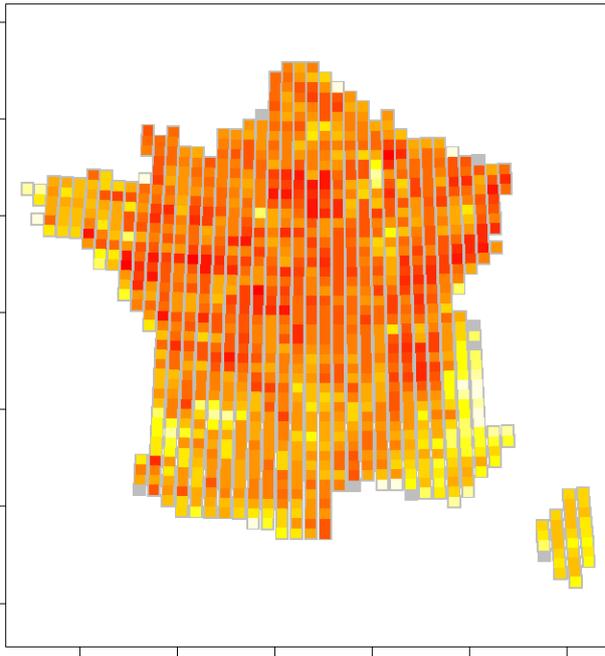


Figure 34 : Distribution de la richesse spécifique pour le groupe des amphibiens
Richesse totale : 35 espèces ; minimum : 1 espèce ; maximum : 17 espèces

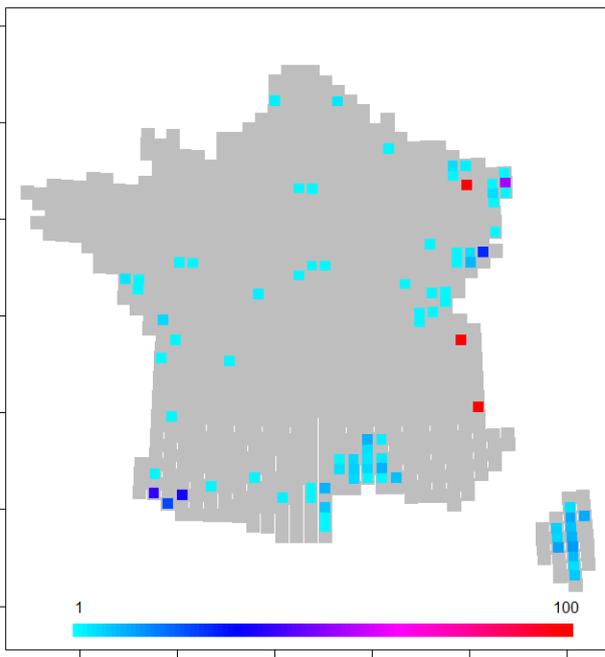


Figure 35 : Distribution spatiale de l'irremplaçabilité pour les amphibiens
Nombre de mailles : 7 à 8

4.3.3 Coléoptères

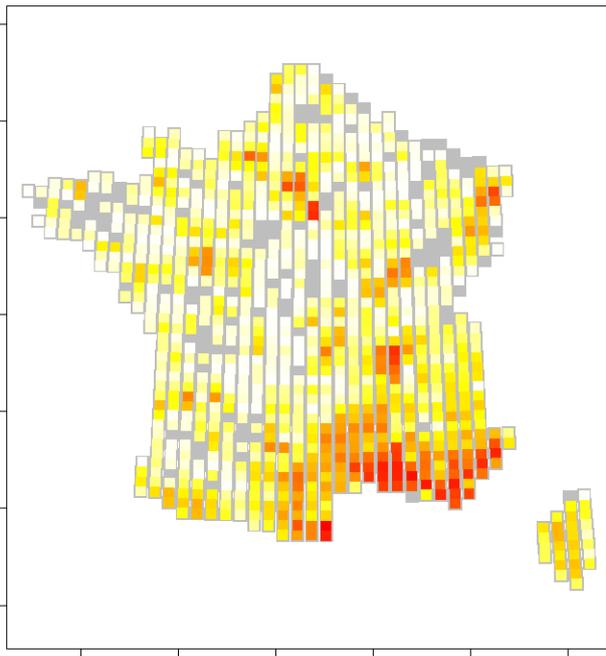


Figure 36 : Distribution de la richesse spécifique pour le groupe des coléoptères scarabéidés laparosticti
Richesse totale : 188 espèces ; minimum : 1 espèce ; maximum : 99 espèces

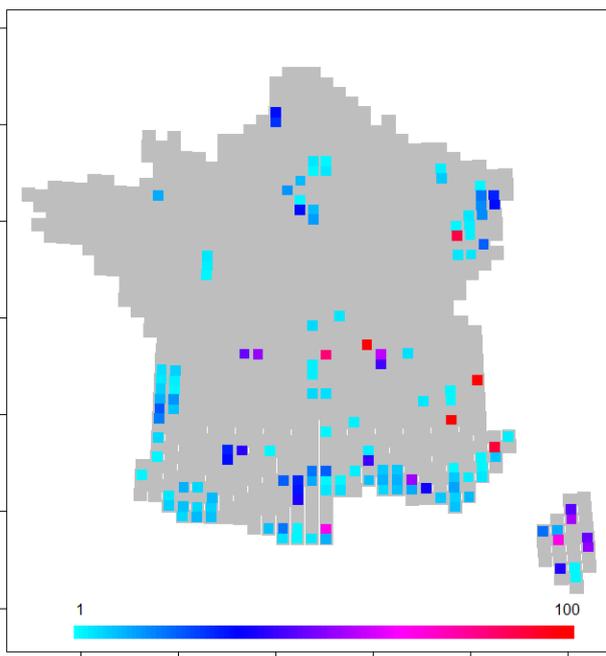


Figure 37 : Distribution spatiale de l'irremplaçabilité pour les coléoptères
Nombre de mailles : 22 à 25

Il est à noter que les apparentes carences d'échantillonnage de la base de données des coléoptères scarabéidés laparosticti affectent peu les résultats d'irremplaçabilité fournis par Marxan. En réalité, le réseau de mailles proposé reste pertinent, il risque seulement de souffrir d'un manque de choix et donc de surévaluer l'importance de certaines mailles qui pourraient en fait être remplaçables par des mailles incomplètement prospectées.

4.3.4 Mammifères

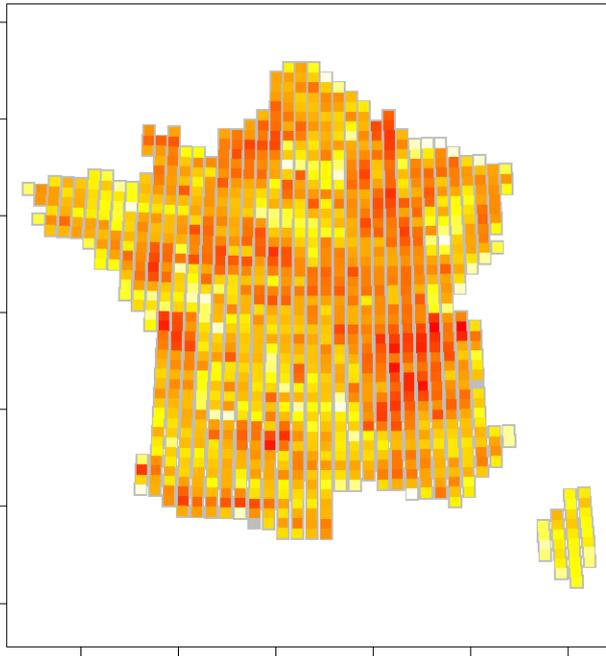


Figure 38 : Distribution de la richesse spécifique pour le groupe des mammifères
Richesse totale : 89 espèces ; minimum : 1 espèce ; maximum : 56 espèces

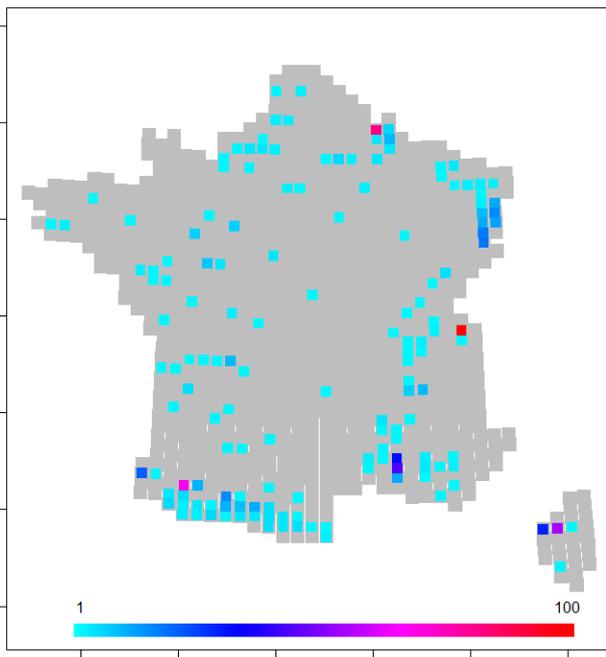


Figure 39 : Distribution spatiale de l'irremplaçabilité pour les mammifères
Nombre de mailles : 8 à 11

4.3.5 Oiseaux

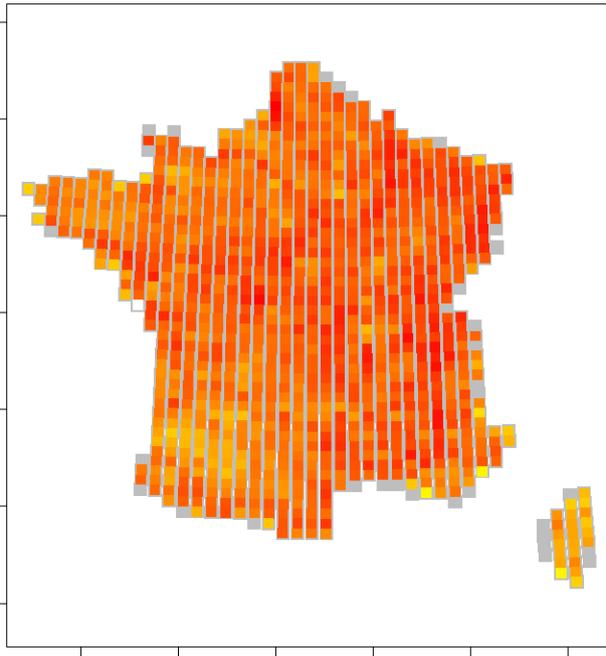


Figure 40 : Distribution de la richesse spécifique pour le groupe des oiseaux
Richesse totale : 282 espèces ; minimum : 1 espèce ; maximum : 158 espèces

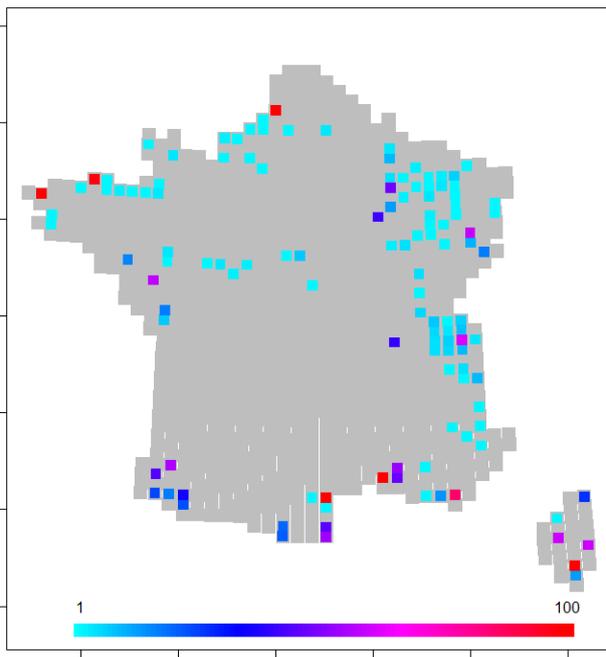


Figure 41 : Distribution spatiale de l'irremplaçabilité pour les oiseaux
Nombre de mailles : 18 à 21

4.3.6 Orchidées

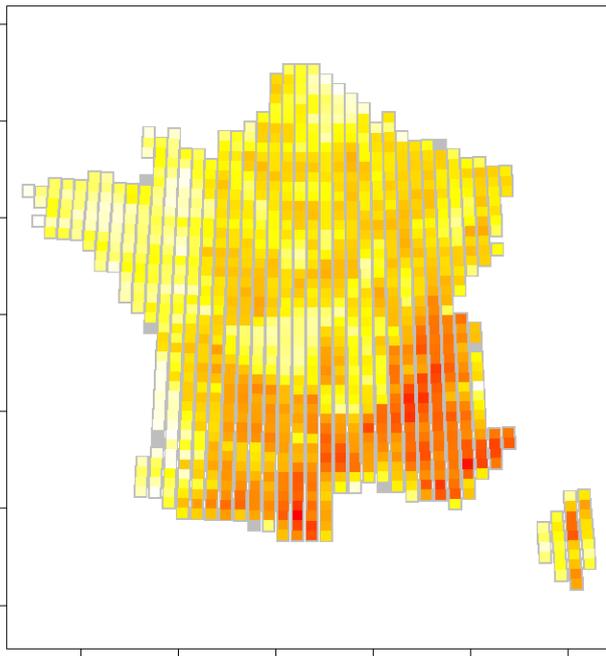


Figure 42 : Distribution de la richesse spécifique pour le groupe des orchidées
Richesse totale : 165 espèces ; minimum : 1 espèce ; maximum : 82 espèces

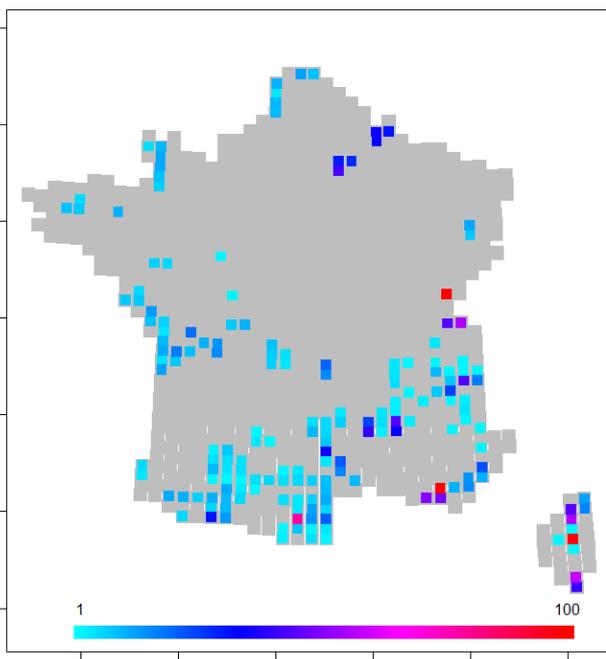


Figure 43 : Distribution spatiale de l'irremplaçabilité pour les orchidées
Nombre de mailles : 22 à 24

4.3.7 Orthoptères

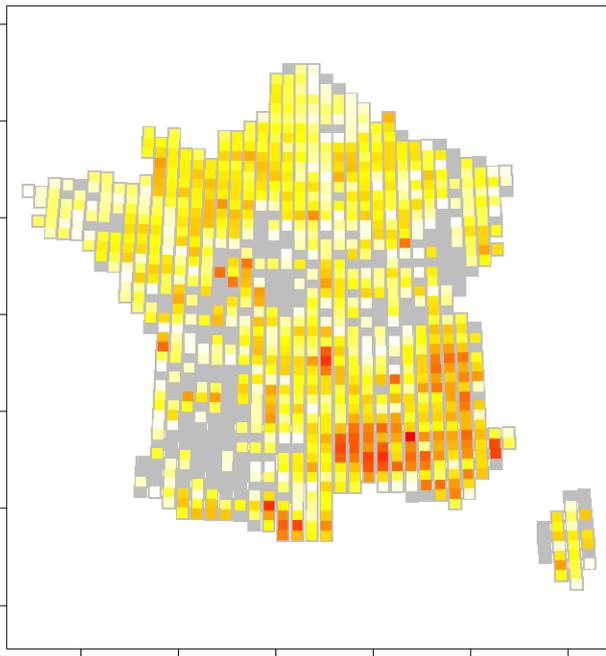


Figure 44 : Distribution de la richesse spécifique pour le groupe des orthoptères
Richesse totale : 237 espèces ; minimum : 1 espèce ; maximum : 72 espèces

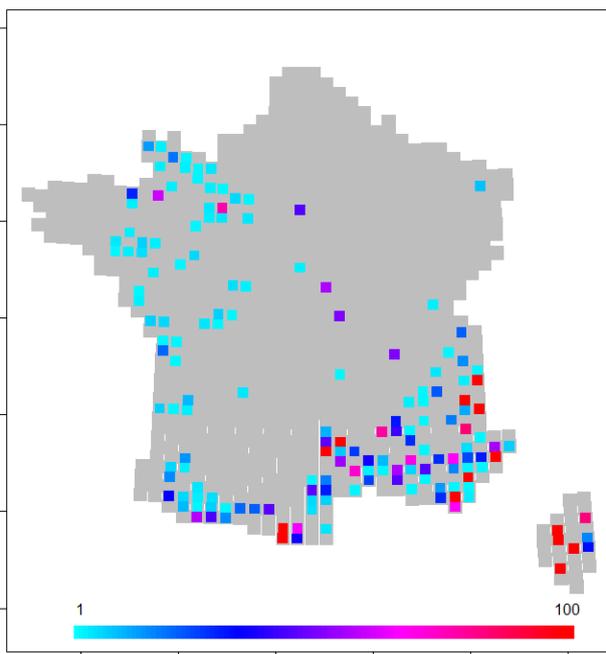


Figure 45 : Distribution spatiale de l'irremplaçabilité pour les orthoptères
Nombre de mailles : 37 à 40

De la même manière que pour les coléoptères scarabéidés laparosticti, les apparentes carences d'échantillonnage de la base de données des orthoptères affectent peu les résultats d'irremplaçabilité fournis par Marxan. Le réseau de mailles proposé reste pertinent, il risque seulement de souffrir d'un manque de choix et donc de surévaluer l'importance de certaines mailles qui pourraient en fait être remplaçables par des mailles incomplètement prospectées.

4.3.8 Poissons

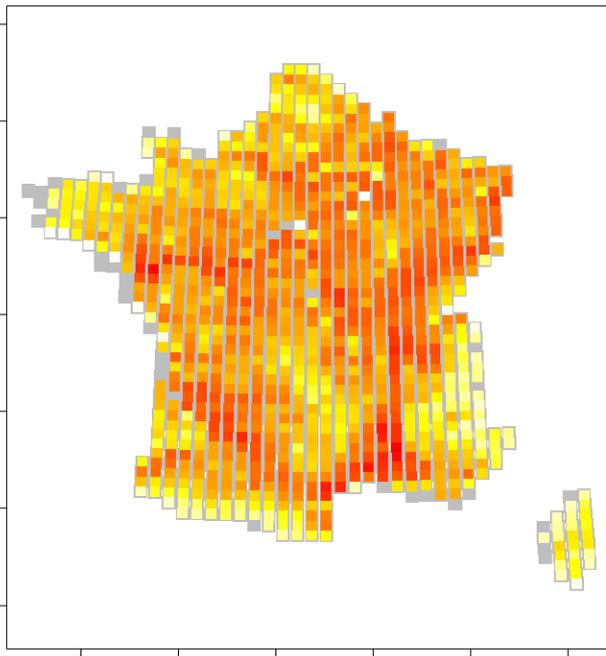


Figure 46 : Distribution de la richesse spécifique pour le groupe des poissons
Richesse totale : 67 espèces ; minimum : 1 espèce ; maximum : 36 espèces

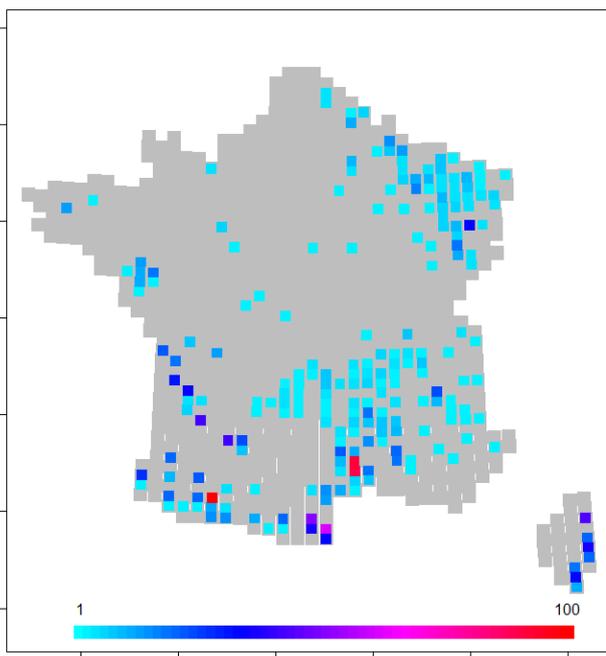


Figure 47 : Distribution spatiale de l'irremplaçabilité pour les poissons
Nombre de mailles : 10 à 13

Dans le cas des poissons, l'approche que nous avons appliquée et qui est basée sur des mailles complètement indépendantes les unes des autres est assez limitée. En effet, et surtout pour le cas des poissons migrateurs un effet de connectivité entre les mailles ou des mailles linéaires suivant les cours d'eau devrait être envisagé pour mieux représenter les zones d'importance pour la conservation des espèces.

4.3.9 Reptiles

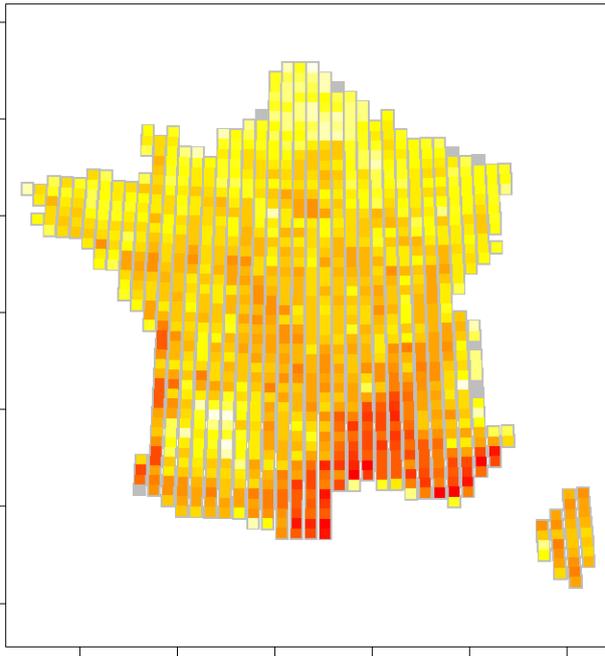


Figure 48 : Distribution de la richesse spécifique pour le groupe des reptiles
Richesse totale : 34 espèces ; minimum : 1 espèce ; maximum : 19 espèces

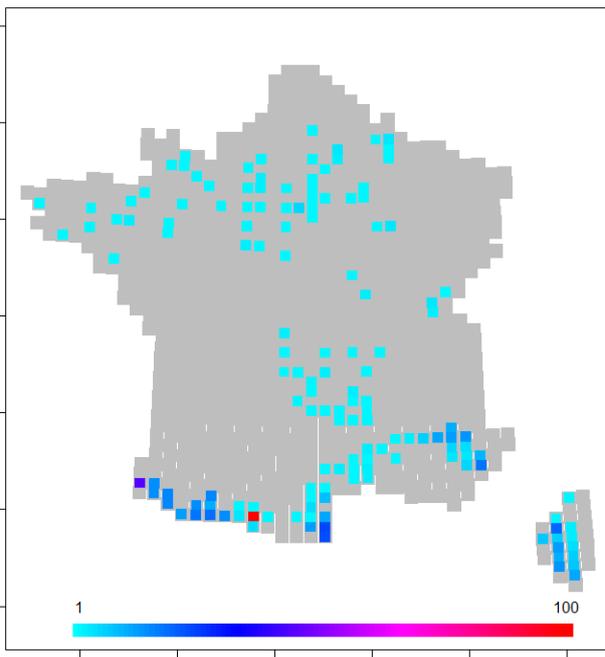


Figure 49 : Distribution spatiale de l'irremplaçabilité pour les reptiles
Nombre de mailles : 7 à 8

4.3.10 Tous taxons

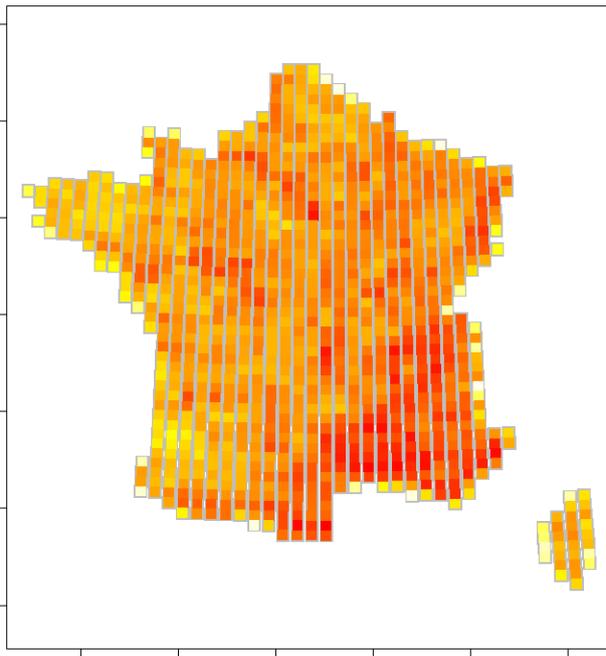


Figure 50 : Distribution de la richesse spécifique tous taxons confondus
Richesse totale : 1097 espèces ; minimum : 1 espèce ; maximum : 401 espèces

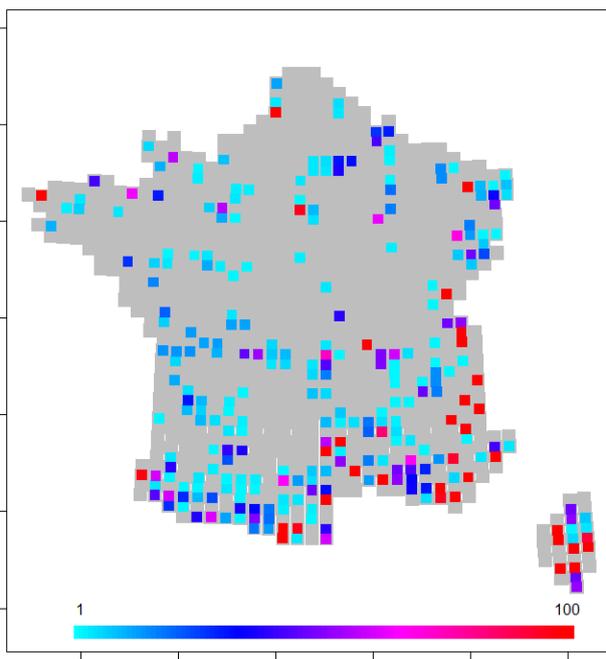


Figure 51 : Distribution spatiale de l'irremplaçabilité tous taxons confondus, objectif de conservation : 1 maille par espèce.
Nombre de mailles : 73 à 79

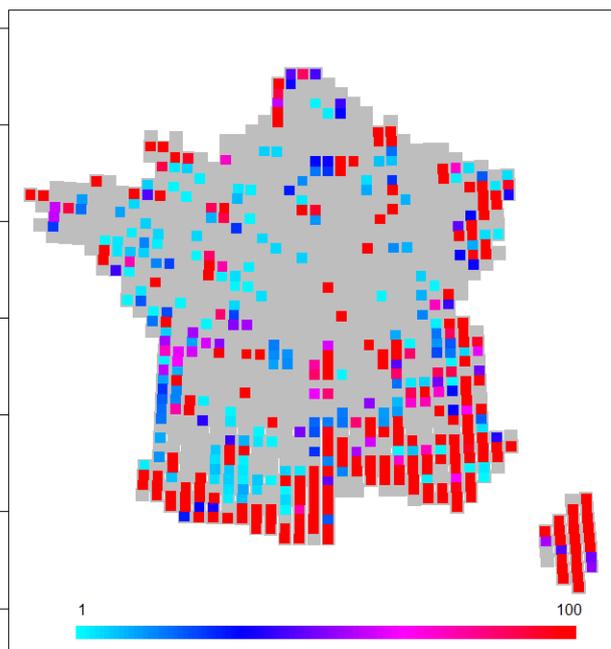


Figure 52 : Distribution spatiale de l'irremplaçabilité tous taxons confondus, objectif de conservation : 5 mailles par espèce.
 Nombre de mailles : 275 à 281

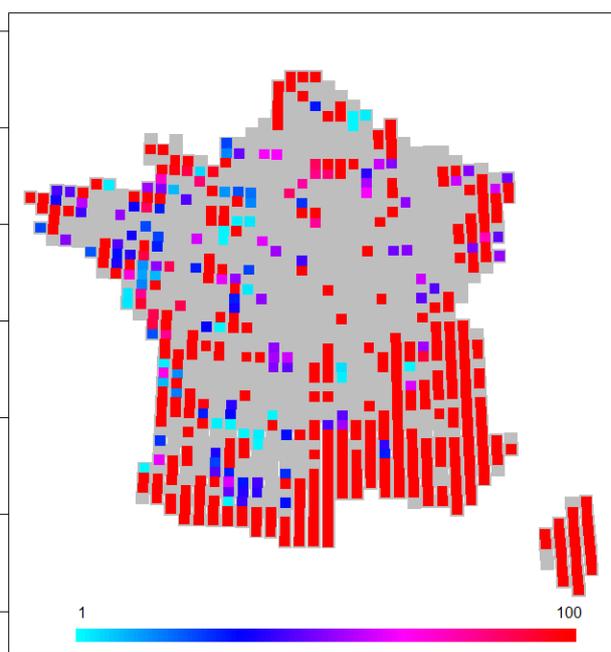


Figure 53 : Distribution spatiale de l'irremplaçabilité tous taxons confondus, objectif de conservation : 10 mailles par espèce.
 Nombre de mailles : 441 à 444

4.3.11 Espèces menacées

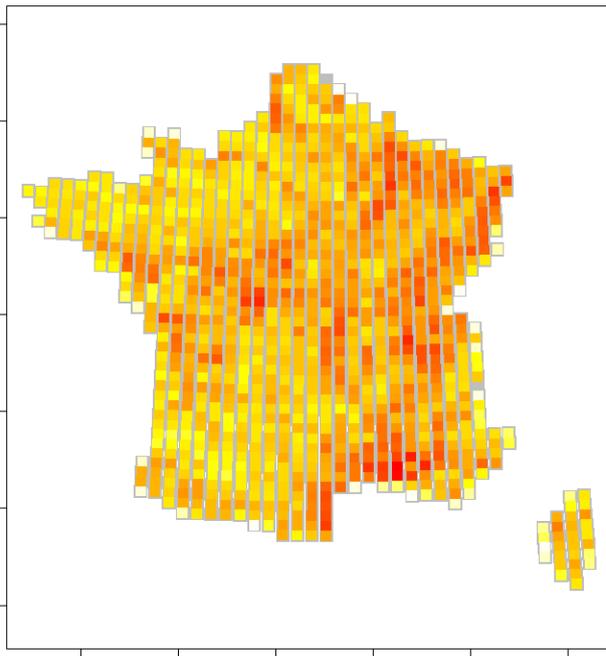


Figure 54 : Distribution de la richesse spécifique des espèces menacées (espèces classées Vu, En, CR dans les listes rouge de l'UICN pour les vertébrés : amphibiens, mammifères, oiseaux, poissons, reptiles)
Richesse totale : 129 espèces ; minimum : 1 espèce ; maximum : 46 espèces

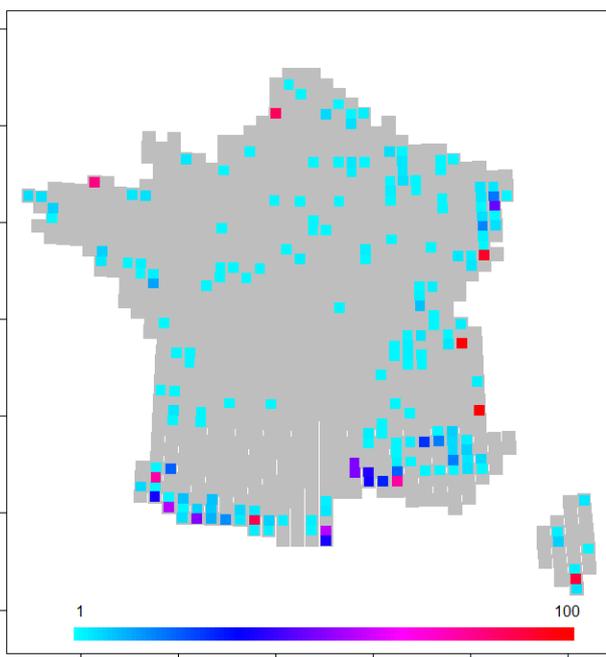


Figure 55 : Distribution spatiale de l'irremplaçabilité pour les espèces menacées, objectif de conservation : 1 maille par espèce.
Nombre de mailles : 16 à 20

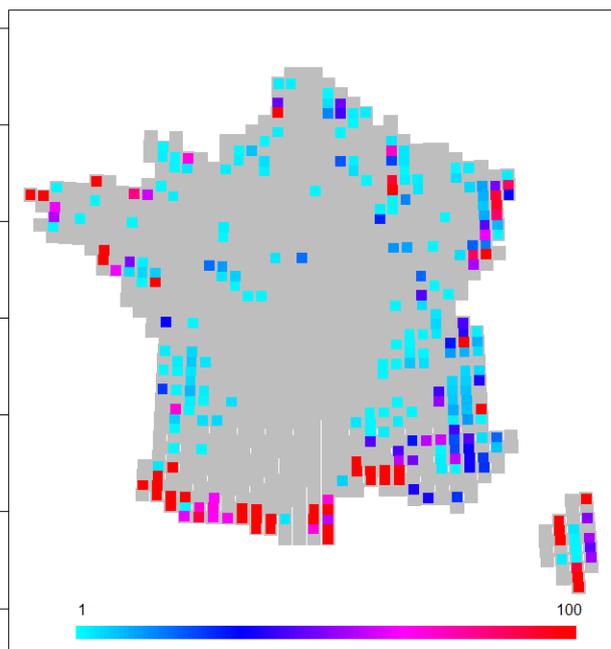


Figure 56 : Distribution spatiale de l'irremplaçabilité pour les espèces menacées, objectif de conservation : 5 mailles par espèce.
 Nombre de mailles : 87 à 92

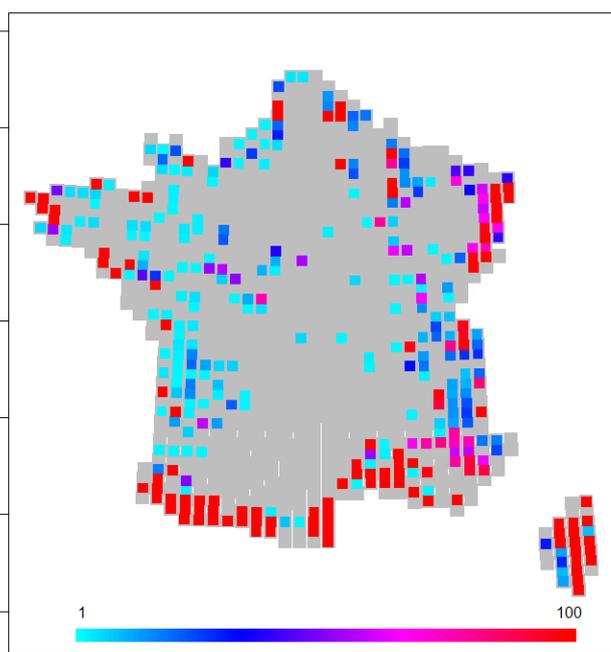


Figure 57 : Distribution spatiale de l'irremplaçabilité pour les espèces menacées, objectif de conservation : 10 mailles par espèce.
 Nombre de mailles : 153 à 159

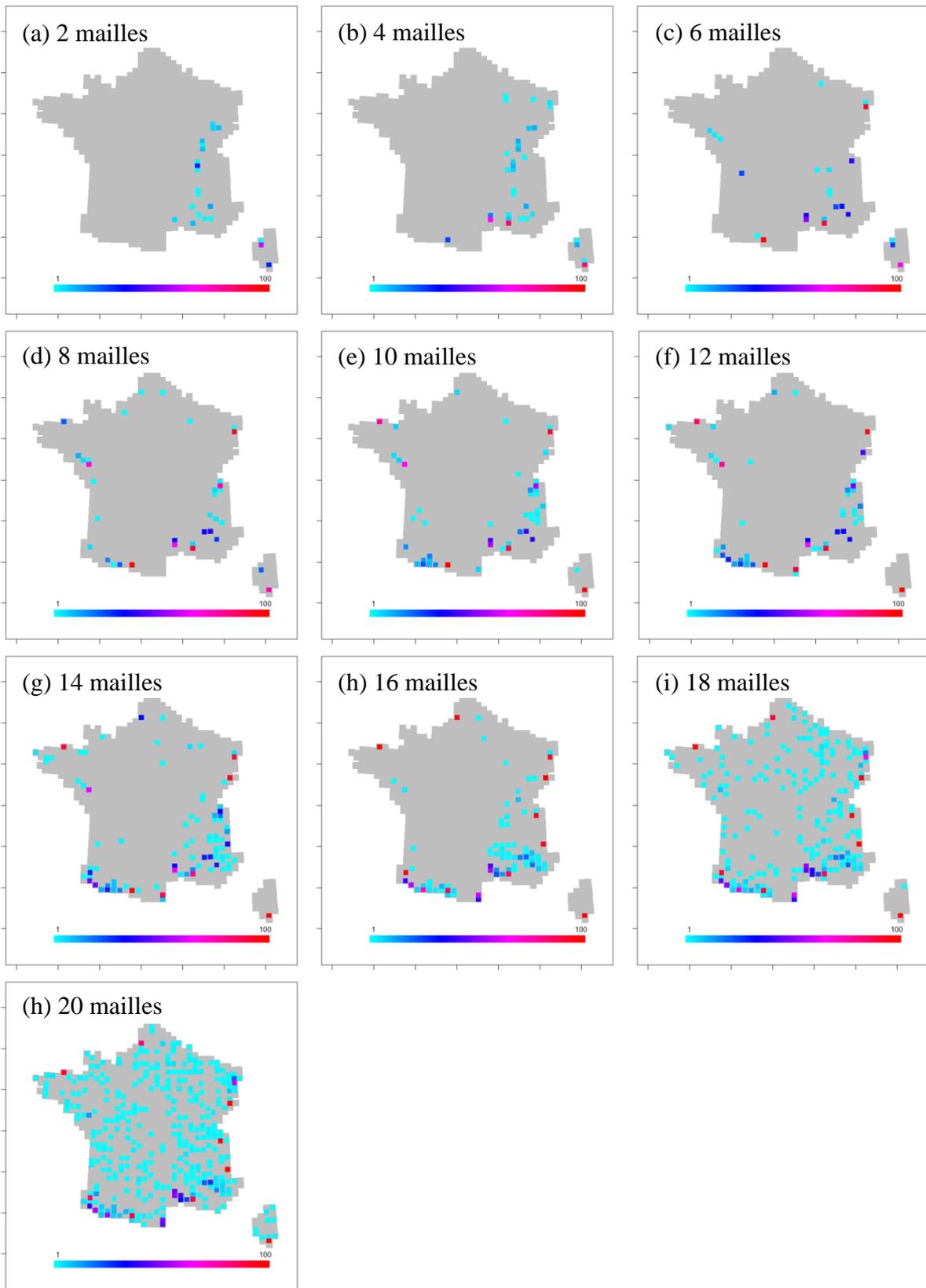


Figure 58 : Réseaux de mailles irremplaçables tenant compte de la responsabilité patrimoniale. Les réseaux des figures (a) à (h) sont de tailles croissantes de 2 à 20 mailles.

4.3.12 « Substitutivité », espèces indicatrices « parapluie »

4.3.12.1 Organisation des résultats

Pour chaque page de graphiques, deux taxons « parapluies » sont représentés par leurs courbes de « substitutivité » pour les 9 autres groupes d'espèces. Les 3 premières colonnes représentent donc un taxon « parapluie » et les 3 dernières colonnes un deuxième taxon « parapluie ». Les titres de chaque graphique sont formatés de la manière suivante : « Cible / parapluie », par exemple : « Poissons / Orchidées » signifie que les Poissons sont le taxon cible et les Orchidées le taxon « parapluie », on observe donc la « substitutivité » des orchidées pour les poissons.

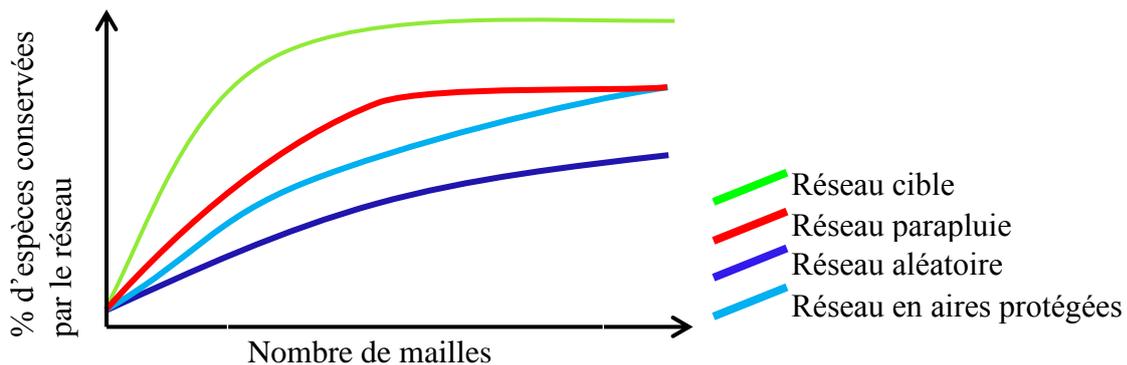
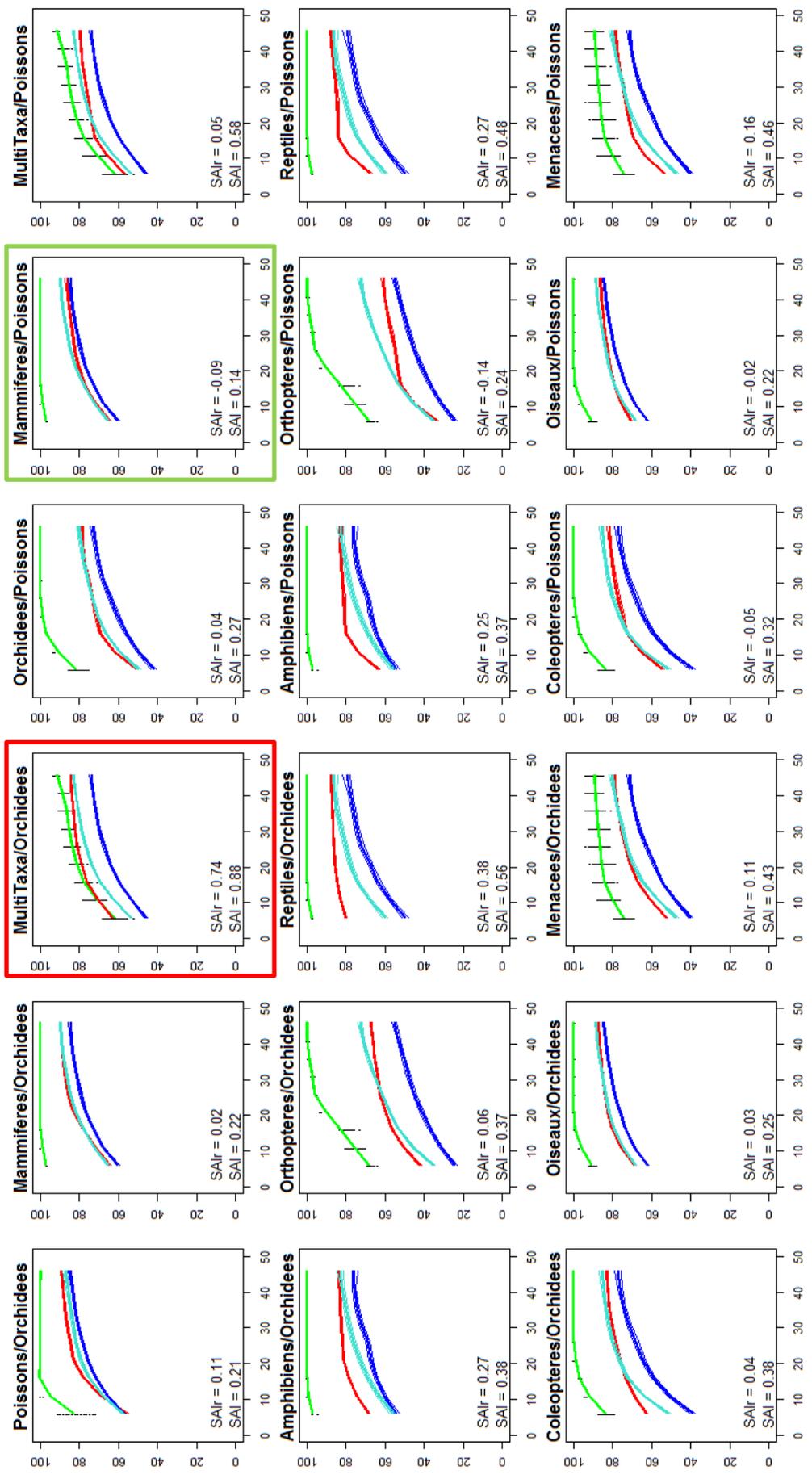
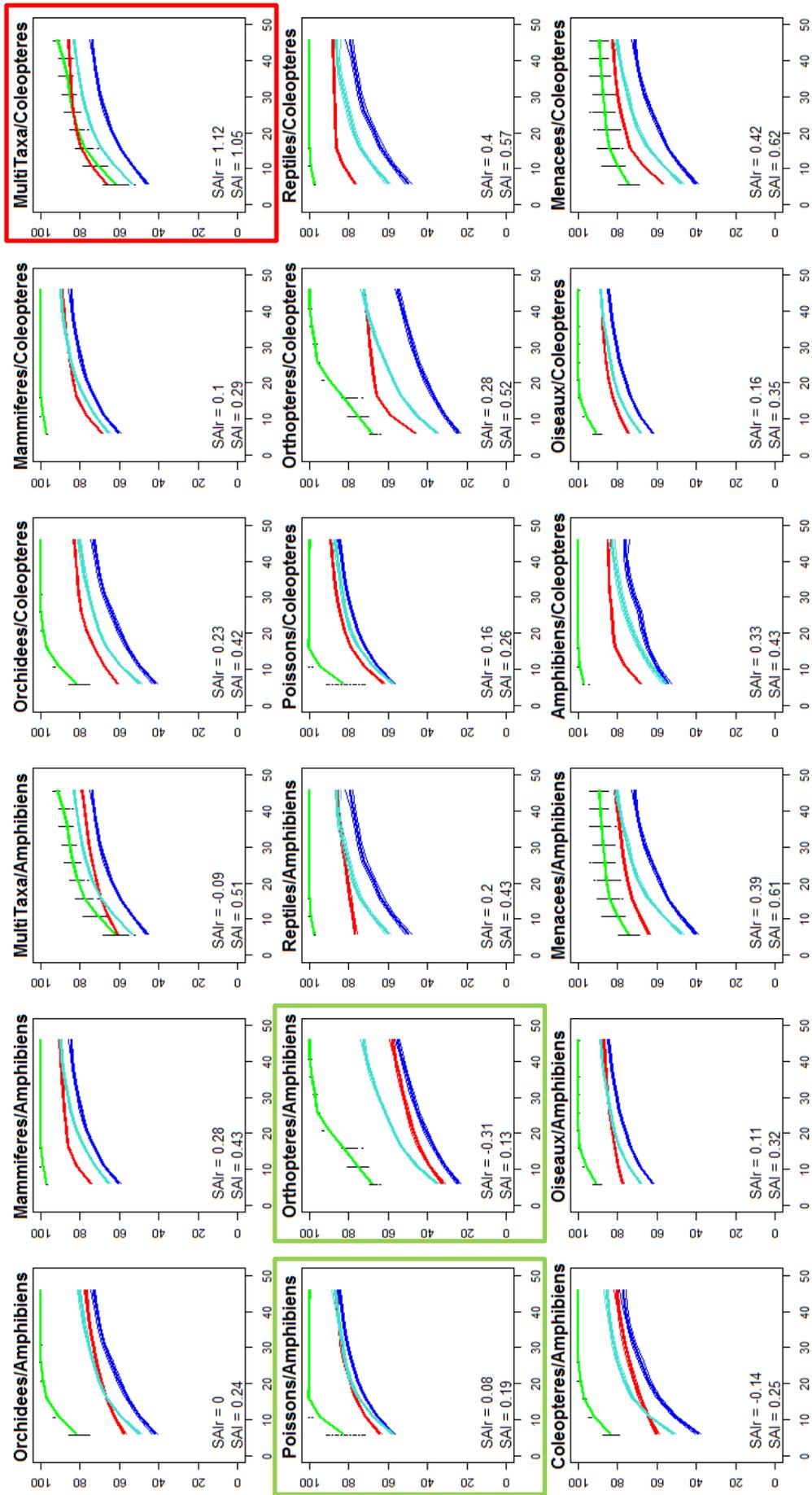


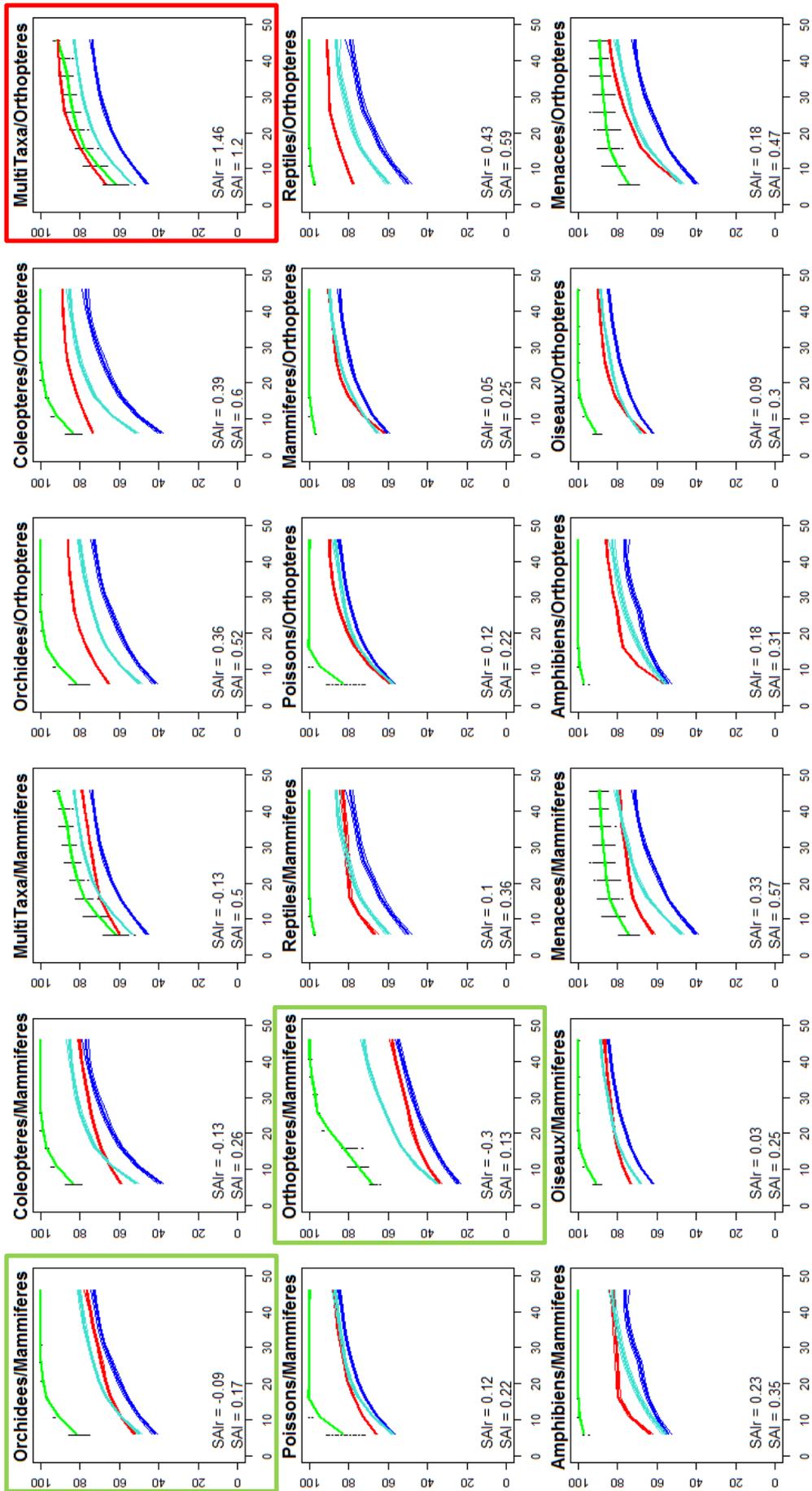
Figure 59 : Pour rappel : Exemple de courbes de « substitutivité » en fonction du nombre de mailles incluses dans la solution de Marxan
En vert, l'évolution du nombre d'espèces conservées dans un groupe taxonomique cible avec le nombre de mailles retenues pour la conservation de ce groupe cible ; En rouge, l'évolution du nombre d'espèces conservées dans un groupe taxonomique cible avec le nombre de mailles retenues pour la conservation d'un autre groupe dit « parapluie » ; En bleu foncé : l'évolution du nombre d'espèces conservées dans un groupe taxonomique cible avec le nombre de mailles retenues au hasard parmi les mailles de France métropolitaine ; En bleu clair : l'évolution du nombre d'espèces conservées dans un groupe taxonomique cible avec le nombre de mailles retenues au hasard parmi les mailles contenant des aires protégées

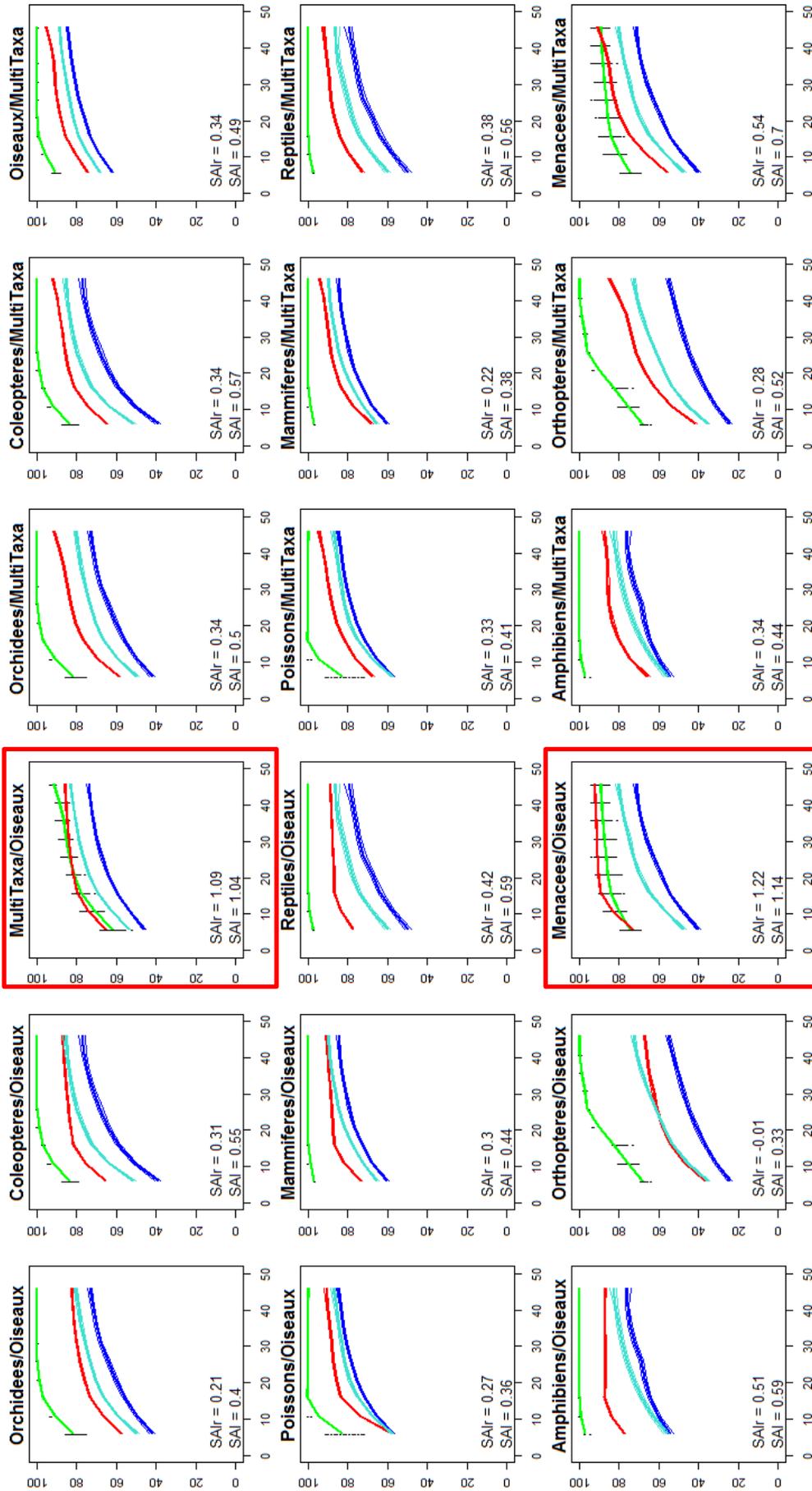
Note méthodologique

Dans les cas des regroupements de toutes les espèces et des espèces menacées, le paramétrage uniforme de Marxan a mené à des combinaisons de mailles suboptimales puisqu'elles ne permettent pas de conserver le maximum d'espèces possible considérant la taille du réseau. Pour corriger cette erreur d'optimisation, il aurait fallu appliquer des pénalités de dépassement de la taille du réseau différentes en fonction du groupe d'espèces et selon la taille de réseau imposé. Nous avons ici choisi d'appliquer les mêmes paramètres à tous les groupes et toutes les tailles de réseau de manière à assurer la comparabilité des réponses. Ce choix d'uniformité apporte en définitive un biais à l'optimisation et devrait être corrigé dans un futur travail.









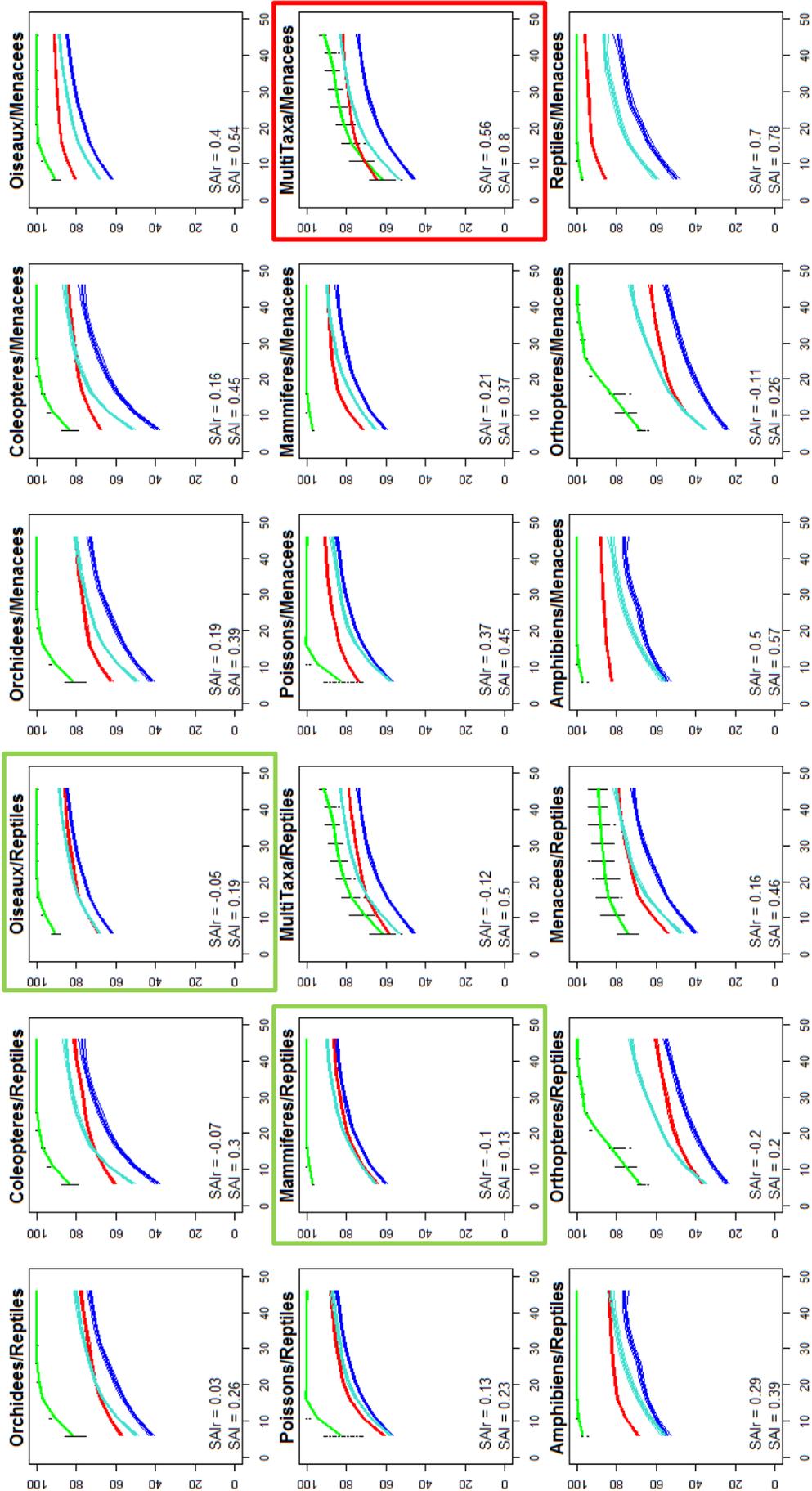


Figure 60 : Pages 74 à 78 : Courbes de « substitutivité » en fonction du nombre de mailles incluses dans la solution de Marxan pour chaque combinaison de taxons et de groupes d'espèces
 SAI : Species accumulation index relatif aux réseaux aléatoires, SAIR : : Species accumulation index relatif aux réseaux aléatoires tirés dans les mailles contenant des aires protégées (Ferrier 2002). Les courbes de « substitutivité » ayant des valeurs de SAI élevées (supérieurs à 0,8) sont encadrées en rouge et les courbes de « substitutivité » ayant des valeurs de SAI faibles (inférieurs à 0,2) sont encadrées en vert

Table 13 : Récapitulatif des valeurs de SAI (Species Accumulation Index) relatif aux réseaux aléatoires de mailles

		Espèces cible									
		Amphibiens	Coleoptères	Mammifères	Oiseaux	Orchidées	Orthoptères	Poissons	Reptiles	MultiTaxa	Menacées
Espèces parapluie	Amphibiens	.	0.24	0.44	0.30	0.25	0.13	0.17	0.41	0.51	0.61
	Coleoptères	0.42	.	0.30	0.34	0.42	0.52	0.24	0.56	1.05	0.63
	Mammifères	0.34	0.25	.	0.24	0.18	0.13	0.21	0.34	0.50	0.57
	Oiseaux	0.58	0.54	0.45	.	0.40	0.33	0.35	0.58	1.04	1.14
	Orchidées	0.37	0.37	0.24	0.24	.	0.38	0.20	0.54	0.88	0.43
	Orthoptères	0.30	0.60	0.26	0.29	0.52	.	0.21	0.58	1.20	0.47
	Poissons	0.36	0.31	0.15	0.20	0.28	0.24	.	0.47	0.58	0.46
	Reptiles	0.39	0.29	0.14	0.17	0.27	0.20	0.22	.	0.50	0.46
	MultiTaxa	0.43	0.56	0.39	0.48	0.51	0.52	0.40	0.55	.	0.71
	Menacées	0.57	0.45	0.39	0.53	0.39	0.26	0.44	0.78	0.81	.

Table 14 : Récapitulatif des valeurs de SAIR (Species Accumulation Index réserves) relatif aux réseaux aléatoires tirés dans les mailles contenant des aires protégées

		Espèces cible									
		Amphibiens	Coleoptères	Mammifères	Oiseaux	Orchidées	Orthoptères	Poissons	Reptiles	MultiTaxa	Menacées
Espèces parapluie	Amphibiens	.	-0.14	0.26	0.09	-0.02	-0.33	0.08	0.22	-0.09	0.37
	Coleoptères	0.32	.	0.07	0.15	0.22	0.27	0.16	0.42	1.12	0.40
	Mammifères	0.22	-0.13	.	0.01	-0.11	-0.32	0.12	0.12	-0.12	0.31
	Oiseaux	0.51	0.31	0.28	.	0.19	-0.02	0.27	0.43	1.09	1.22
	Orchidées	0.26	0.05	-0.01	0.01	.	0.05	0.11	0.39	0.74	0.08
	Orthoptères	0.17	0.39	0.02	0.07	0.35	.	0.12	0.44	1.45	0.15
	Poissons	0.24	-0.05	-0.12	-0.04	0.02	-0.16	.	0.29	0.06	0.13
	Reptiles	0.27	-0.07	-0.13	-0.07	0.01	-0.22	0.13	.	-0.11	0.13
	MultiTaxa	0.33	0.34	0.19	0.32	0.33	0.27	0.33	0.40	.	0.53
	Menacées	0.49	0.16	0.19	0.39	0.18	-0.12	0.38	0.71	0.56	.

En conclusion, on observe qu'à cette échelle d'analyse, pratiquement tous les réseaux construits à partir d'un groupe parapluie sont meilleurs que le hasard mais l'effet parapluie est modéré, comme déjà observé dans la synthèse de Rodrigues and Brooks (2007).

Cette approche « espèces parapluie » est également plus performante que les aires protégées actuelles.

Les aires protégées sont quasiment toutes plus efficaces qu'un tirage au hasard des mailles.

La relation observée est dépendante de l'échelle. A notre échelle, elle relève probablement beaucoup des grands patrons biogéographiques, déterminant commun de la répartition de nombreux groupes.

5 Confrontation entre les données d'Atlas et les aires protégées existantes

5.1 Introduction

Une application directe de ce travail de définition des « hotspots » de biodiversité consiste à mettre en relation nos résultats avec la distribution spatiale des aires protégées mises en œuvre en France.

On cherche à vérifier si les aires protégées mises en place en France correspondent à la distribution des zones de forte biodiversité ou des mailles irremplaçables pour leur composition spécifique (rareté, endémisme, complémentarité).

Compte tenu de la construction des dispositifs d'aires protégées françaises (pilotage en grande partie local, choix pragmatiques, choix basés sur peu de taxons) il est communément admis que les aires protégées soient plus adaptées à la conservation de systèmes liés à de forts contrastes environnementaux (milieux de montagne, littoral méditerranéen) qu'à la conservation de la complémentarité des assemblages d'espèces à l'échelle de la France entière.

5.2 Matériel et méthode

5.2.1 Corrélations entre la distribution des aires protégées et les hotspots de biodiversité

Les surfaces d'aires protégées par maille sont confrontées d'une part à la richesse spécifiques et d'autre part à l'irremplaçabilité des mailles pour chaque groupe taxonomique et regroupement d'espèces (tous taxons et espèces menacées telles que définies dans le paragraphe 4.2.2) par des corrélations de Spearman.

Les valeurs des coefficients de Spearman pour la corrélation surface d'aires protégées vs. richesse spécifique sont ensuite comparées aux coefficients de Spearman pour la corrélation surface d'aires protégées vs. irremplaçabilité pour chaque type d'aire protégée ou d'intérêt. Un T-test de Student par paires permet de vérifier si les surfaces d'aires protégées sont mieux corrélées à la richesse qu'à l'irremplaçabilité (H_0 : Aucune différences entre les deux coefficients de corrélation ; H_1 : Les corrélations entre surfaces d'aires protégées et richesses spécifiques sont plus élevées que les corrélations entre surfaces d'aires protégées et irremplaçabilité).

5.2.2 Congruence entre classification biogéographique et distribution des aires protégées

La distribution des aires protégées existantes est confrontée à la classification hiérarchique exécutée sur tous les taxons pour observer comment ces aires protégées sont distribuées entre les différentes zone biogéographiques (groupes). Le pourcentage de la surface terrestre des groupes couverts par des aires protégées de chaque catégorie est simplement mesuré comme le ratio de surface d'aire protégée divisé par la surface terrestre du groupe.

5.3 Résultats

La table de regroupement des différents types d'aires protégées ainsi que la carte de répartition des surfaces d'aires protégées et celle des 4 groupes significatifs pour tous les taxons ont été répétées ici afin de faciliter la lecture et la comparaison des distributions spatiales d'aires protégées et des groupes biogéographiques.

Table 15 : Regroupement des aires protégées et d'intérêt

Aires protégées 1 (AP1)	Arrêtés de protection biotope Parcs nationaux (cœur) Réserves biologiques Réserves naturelles nationales Réserves naturelles régionales Réserves naturelles de Corse
Natura 2000 (Natura)	Sites d'importance communautaire (SIC) Zones de protection spéciale (ZPS)
Aires protégées 3 (AP3)	Parcs nationaux (Périphérie) Parcs naturels régionaux Réserves de la biosphère Réserves nationales de chasse et faune sauvage Sites Ramsar Terrains des Conservatoires d'Espaces Naturels Terrains du Conservatoire du Littoral
Inventaires ZNIEFF (ZNIEFF)	ZNIEFF type 1 ZNIEFF type 2

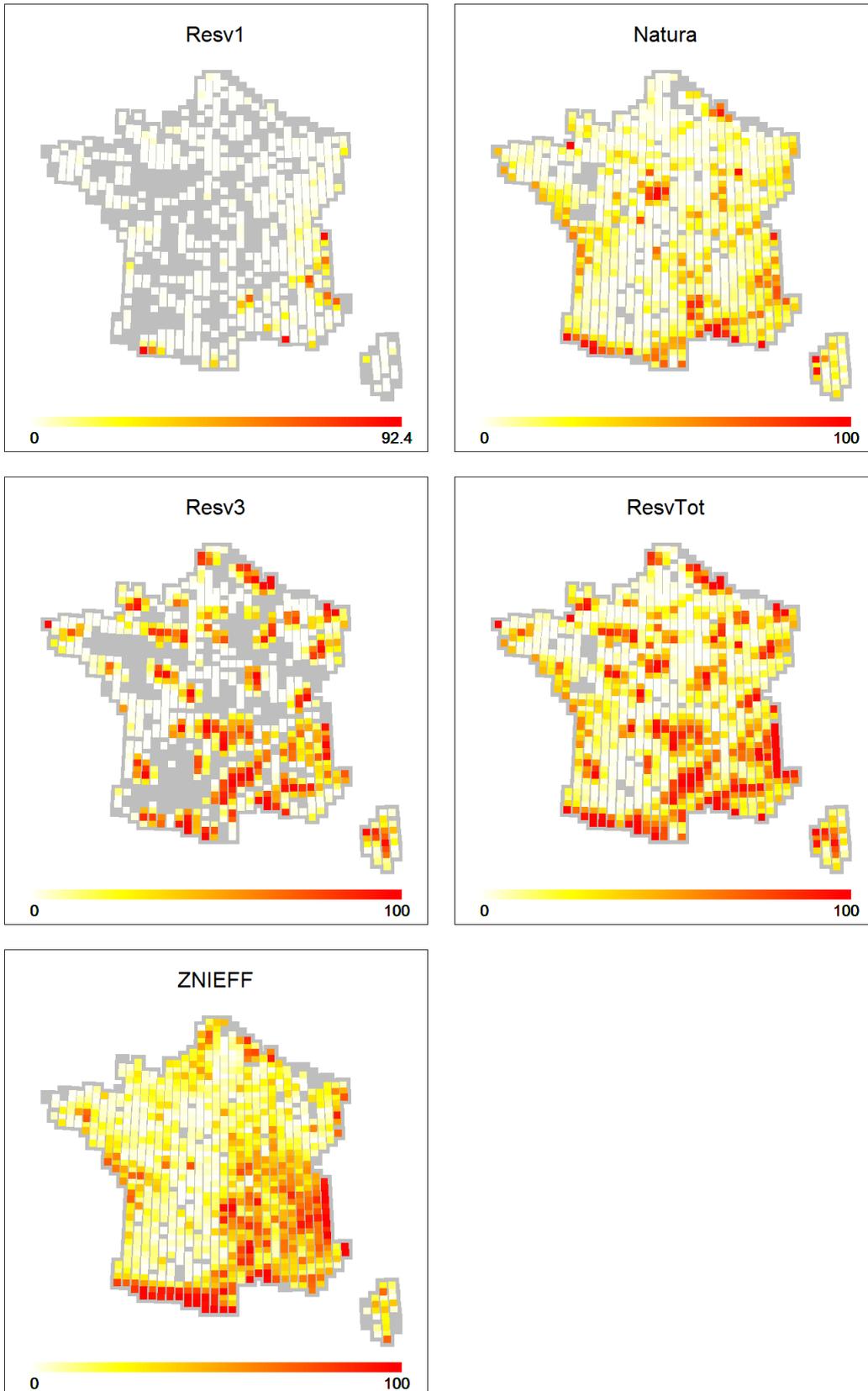


Figure 61 : Distribution spatiale de la proportion de surfaces des mailles couvertes par des aires protégées pour chaque regroupement d'aire protégée
 Voir Table 2 pour les catégories d'aires protégées de chaque regroupement

5.3.1 Corrélations entre la distribution des aires protégées et les hotspots de biodiversité

Table 16 : Corrélations de Spearman entre l'irremplaçabilité des mailles mesurée pour chaque taxon ou groupes d'espèces (menacées et tous taxons) et la surface d'aires protégées (AP) par mailles
Le premier tableau regroupe les valeurs du coefficient de corrélation rho de Spearman, et le deuxième tableau les p-values associées

Spearman's Rho	AP1	Natura	AP3	APTot	ZNIEFF
Amphibiens	0.123	0.161	0.109	0.129	0.089
Coléoptères	0.194	0.166	0.187	0.167	0.109
Mammifères	0.134	0.152	0.090	0.118	0.140
Oiseaux	0.166	0.162	0.101	0.109	0.060
Orchidées	0.132	0.146	0.132	0.127	0.173
Orthoptères	0.198	0.246	0.213	0.238	0.222
Poissons	0.161	0.165	0.132	0.163	0.149
Reptiles	0.069	0.140	0.115	0.153	0.151
MultiTaxa	0.303	0.299	0.334	0.299	0.232
Menacées	0.217	0.241	0.190	0.193	0.151
Spearman's p-value	AP1	Natura	AP3	APTot	ZNIEFF
Amphibiens	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003
Coléoptères	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mammifères	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000
Oiseaux	0.000	0.000	0.001	0.000	0.044
Orchidées	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Orthoptères	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Poissons	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Reptiles	0.020	0.000	0.000	0.000	0.000
MultiTaxa	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Menacées	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Table 17 : Corrélations de Spearman entre la richesse spécifiques des taxons ou groupes d'espèces (tous taxons et menacés) par maille et la surface d'aires protégée (AP) par mailles
 Le premier tableau regroupe les valeurs du coefficient de corrélation rho de Spearman, et le deuxième tableau les p-values associées. Les valeurs grisées de rho de Spearman correspondent à des p-values non significatives (supérieures à 0.05), ces valeurs ne sont pas statistiquement différentes de 0. Dans ces cas, la richesse spécifique n'est donc pas corrélée à la surface d'aires protégées

Spearman's Rho	AP1	Natura	AP3	APTot	ZNIEFF
Amphibiens	0.019	-0.027	-0.050	-0.006	0.021
Coléoptères	0.324	0.309	0.295	0.347	0.350
Mammifères	0.184	0.190	0.060	0.194	0.307
Oiseaux	0.260	0.365	0.193	0.339	0.341
Orchidées	0.294	0.314	0.162	0.310	0.406
Orthoptères	0.266	0.273	0.323	0.338	0.372
Poissons	0.035	0.082	-0.152	0.028	0.053
Reptiles	0.213	0.383	0.211	0.404	0.425
MultiTaxa	0.395	0.452	0.285	0.467	0.536
Menacés	0.277	0.404	0.146	0.335	0.339

Spearman's p-value	AP1	Natura	AP3	APTot	ZNIEFF
Amphibiens	0.535	0.365	0.093	0.841	0.479
Coléoptères	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mammifères	0.000	0.000	0.044	0.000	0.000
Oiseaux	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Orchidées	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Orthoptères	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Poissons	0.237	0.006	0.000	0.347	0.074
Reptiles	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MultiTaxa	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Menacés	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Note méthodologique

Nous observons ici la relation entre les surfaces de réserves et la richesse spécifique et l'irremplaçabilité des mailles de manière relativement « macroscopique ». En effet en comparant les résultats de richesse spécifique et d'irremplaçabilité pour des mailles entières et les surfaces de réserves dans chaque maille, on ne garantit pas que les sites de réserves soient spatialement congruente avec la richesse spécifique et à l'irremplaçabilité dans chaque maille. Par conséquent, certaines espèces contribuant à la richesse et à l'irremplaçabilité mais dont les populations couvrent de petites surfaces pourraient ne pas être comprises dans les aires protégées (Hess, Bartel *et al.* 2006).

Globalement, les corrélations de Spearman sont meilleures entre les richesses spécifiques et les surfaces d'aires protégées par maille qu'entre les scores d'irremplaçabilité (Marxan) et les surfaces d'aires protégées par maille, cependant ces différences ne sont significatives statistiquement que dans les cas des aires protégées totales (APTot) et des ZNIEFF (voir Figure 62 et Table 18)..

Cette observation implique que les aires protégées telles qu'elles ont été choisies sont sensiblement mieux adaptées à la conservation d'un grand nombre d'espèces, que pour conserver les assemblages contenant les espèces rares ou endémiques révélés par les scores d'irremplaçabilité des mailles, ou des assemblages de mailles complémentaires.

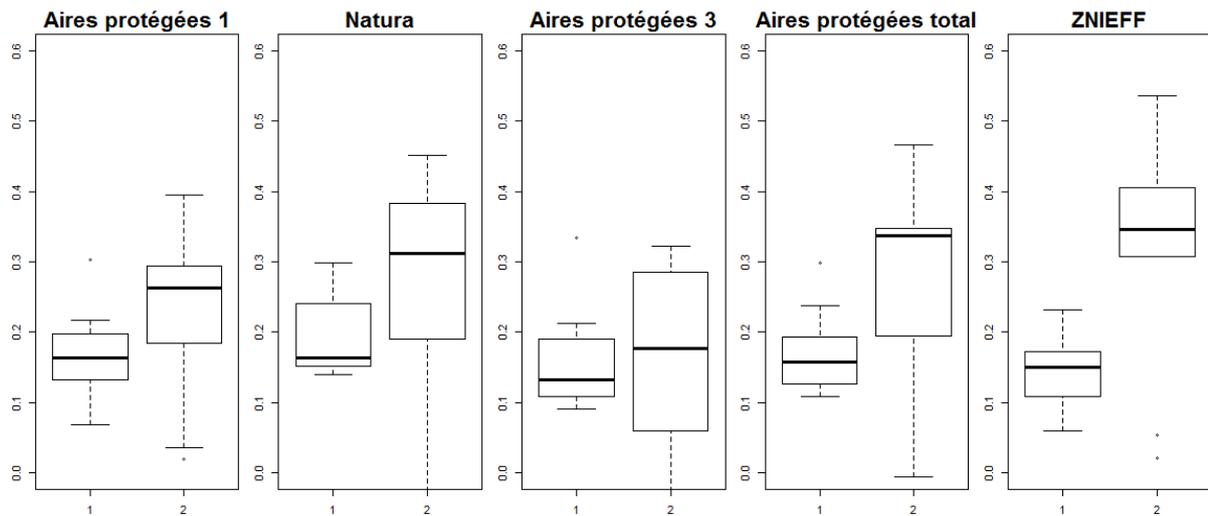


Figure 62 : Boîtes à moustaches des comparaisons entre les coefficients de corrélation pour les relations aires protégées / Irremplaçabilité (1ere position de la boîte à moustache) et aires protégées / Richesse spécifique (2e position de la boîte à moustache)

Table 18 : p-value, degrés de liberté (df) et différences moyennes issues des T-tests entre les relations surfaces d'aires protégées / Irremplaçabilité et surfaces d'aires protégées / Richesse spécifique
Les p-values inférieures à 0,05 indiquent que l'on peut rejeter l'hypothèse H_0 et que la corrélation entre les surfaces aires protégées et la richesse spécifique est meilleure que la corrélation entre les surfaces aires protégées et l'irremplaçabilité (H_1)

	p-value	df	Différence moyenne
Aires protégées 1	0.099	9	-0.06
Natura	0.076	9	-0.09
Aires protégées 3	0.759	9	0.01
Aires protégées total	0.037	9	-0.11
ZNIEFF	0.004	9	-0.17

5.3.2 Congruence entre classification biogéographique et distribution des aires protégées

Table 19 : Pourcentages de surface de chaque groupe de la classification réalisée sur tous les taxons couverts par des aires protégées

Cluster	Surface du Cluster (km ²)	Nombre de Mailles	Aires protégées 1	Natura	Aires protégées 3	Aires protégées Total	ZNIEFF
1	358391.1	726	0.61	10.15	14.76	21.94	20.20
2	129092.02	247	0.66	10.77	13.80	22.32	22.10
3	37022.69	84	9.46	32.33	34.40	55.88	66.10
4	23944.93	69	1.94	28.03	33.23	45.93	35.63

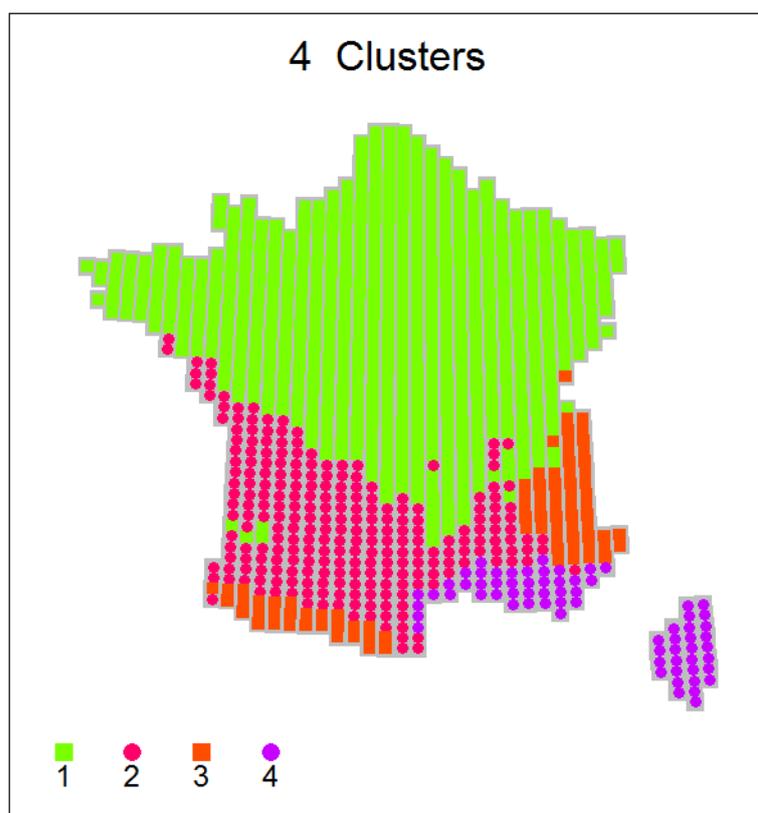


Figure 63 : Pour rappel : Carte de la distribution des 4 groupes de composition pour tous les taxons confondus

On remarque que les deux groupes les plus étendus (groupes 1 et 2) sont également ceux dans lesquels les pourcentages de surface d'aires protégées sont les plus faibles, quelle que soit leur catégorie. Concernant les aires protégées fortes (de type 1), les pourcentages de la surface de ces deux groupes couverts par des AP1 ne dépassent pas 1% (respectivement 0,61 et 0,66%). Le groupe biogéographique 3, qui correspond aux zones montagneuses des Pyrénées et des Alpes, est celui qui présente le plus de surfaces protégées en proportion de sa surface. Les grandes surfaces de réserves dans ce groupe 3 reflète finalement le fait que les zones montagneuses sont effectivement parmi les plus riches en espèces et contrastées en milieux. De même, la zone méditerranéenne, à très fort enjeux de conservation, possède une densité relativement importante d'aires protégées, mais peu dans le type 1.

6 Perspectives et valorisation

6.1 Pistes de développement pour les méthodes

Les différentes méthodes présentées dans ce rapport sont encore en voie d'amélioration et de développement.

Notamment, ces différentes méthodes pourraient être appliquées sur différentes résolutions (grain) de maillage afin d'observer les conséquences de l'échelle d'observation pour la distribution spatiale de la biodiversité. Il est notamment déjà établi que les congruences entre taxons sont dépendantes de cette échelle d'analyse.

D'autre part, certaines approches n'ont toujours pas été testées comme par exemple, la classification des mailles par des méthodes parcimonieuses. Cette autre approche de la classification biogéographique pourrait notamment apporter des pistes intéressantes concernant l'emboîtement des communautés et les hypothèses de constitution des assemblages.

Les analyses d'irremplaçabilité effectuées avec le logiciel MARXAN, pourraient pour leur part être paramétrées encore plus finement, notamment dans le cas des espèces menacées. Le facteur de responsabilité patrimonial pourrait également être mieux intégré aux analyses d'irremplaçabilité pour permettre une représentation plus synthétique des mailles d'intérêt pour la conservation de ces espèces.

6.2 Perspectives d'utilisation dans les inventaires

L'ensemble des travaux présentés dans ce travail constitue une première étape vers la valorisation des données de l'INPN qui sera poursuivie au fur et à mesure de la parution des nouveaux Atlas, en partenariat avec les pilotes d'inventaires, les producteurs de données et les experts. Il sera particulièrement important d'appliquer ces analyses à la flore, élément structurant de la biodiversité, bien étudié en France. Ces analyses pourront ainsi être intégrées dans les futures publications afin d'intégrer un point de vue analytique à la vue d'ensemble de la distribution des taxons.

D'autre part, les méthodes expérimentées ici ont également pour vocation d'être appliquées à d'autres projets pour la compréhension et la gestion de la biodiversité.

Les grandes zones biogéographiques, une fois validées et enrichies par les avis des experts, pourront être intégrées en tant que déterminants de la biodiversité et couplées à d'autres facteurs environnementaux (utilisation du sol, topographie, climat) afin d'estimer la biodiversité potentielle des différentes mailles. Ce travail pourrait ainsi permettre d'identifier les éventuelles mailles sous-prospectées et donc de mieux cibler les efforts d'inventaire à venir.

6.3 Application des méthodes à d'autres projets

L'évaluation de l'irremplaçabilité des mailles en fonction des assemblages d'espèces pourra être appliquée non seulement pour identifier les « hotspots » de biodiversité à différentes échelles (régionale, européenne) mais également pour étudier la complétude des réseaux d'aires protégées existante. Ces résultats pourront donc à terme être utilisés comme supports à la décision pour la gestion des réseaux d'aires protégées. Il pourrait s'agir notamment d'un

complément à la démarche de stratégie de création d'aires protégées (SCAP) ou d'une vérification indépendante de la cohérence des propositions faites au niveau régional.

Enfin, les méthodes utilisées ici pourront être appliquées à différents projets pour la gestion de la biodiversité comme le projet CarNET B (Cartographie Nationale des Enjeux Territorialisés de la Biodiversité remarquable) (Robert, Gourdain *et al.* 2012) qui vise à établir une vue d'ensemble des zones de biodiversité sensibles à l'usage de l'aménagement du territoire (construction d'infrastructures de transport par exemple).

Dans la perspective de changement climatique, les limites de zones biogéographiques robustes fondées sur l'analyse de la répartition d'un grand nombre d'espèces (dont flore) sont des secteurs à surveiller particulièrement. En effet, ils matérialisent les limites d'extension d'un grand nombre d'espèces et devraient donc être l'objet d'avancées et de recul des répartitions. Ils pourraient faire l'objet d'une réflexion spécifique dans le cadre de la trame verte et bleue.

7 Références

- Baddeley A. & Turner R. (2005). Spatstat: An R Package for Analyzing Spatial Point Patterns. *Journal of Statistical Software*, 12, 1-42.
- Ball I.R., Possingham H.P. & Watts M. (2009). Marxan and Relatives: Software for Spatial Conservation Prioritisation. In: *Spatial Conservation Prioritisation: Quantitative Methods and Computational Tools* (eds. Moilanen A, Wilson KA & Possingham HP). Oxford University Press Oxford, UK, 185-195.
- Cardoso P., Borges P.A.V. & Veech J.A. (2009). Testing the Performance of Beta Diversity Measures Based on Incidence Data: The Robustness to Undersampling. *Diversity and Distributions*, 15, 1081-1090.
- Deharveng L., Stoch F., Gibert J., Bedos A., Galassi D., Zagmajster M., Brancelj A., Camacho A., Fiers F., Martin P., Giani N., Magniez G. & Marmonier P. (2009). Groundwater Biodiversity in Europe. *Freshwater Biology*, 54, 709-726.
- Dray S. & Dufour A.B. (2007). The Ade4 Package: Implementing the Duality Diagram for Ecologists. *Journal of Statistical Software*, 22, 1-20.
- Dufrêne M. & Legendre P. (1997). Species Assemblages and Indicator Species: The Need for a Flexible Asymmetrical Approach. *Ecological Monographs*, 67, 345-366.
- Ferrier S. (2002). Mapping Spatial Pattern in Biodiversity for Regional Conservation Planning: Where to from Here? *Systematic Biology*, 51, 331-363.
- Gargominy O., Terceire S., Daszkiewicz P., Régnier C., Ramage T., Dupont P. & Poncet L. (2012). *Taxref V5.0, Référentiel Taxonomique Pour La France : Mise En Oeuvre Et Diffusion*. Service du Patrimoine Naturel, Direction de la Recherche, de l'Expertise et de la Valorisation, Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris, France, 75.
- Harrison S., Ross S.J. & Lawton J.H. (1992). Beta-Diversity on Geographic Gradients in Britain. *Journal of Animal Ecology*, 61, 151-158.
- Heikinheimo H., Fortelius M., Eronen J. & Mannila H. (2007). Biogeography of European Land Mammals Shows Environmentally Distinct and Spatially Coherent Clusters. *Journal of Biogeography*, 34, 1053-1064.
- Hess G.R., Bartel R.A., Leidner A.K., Rosenfeld K.M., Rubino M.J., Snider S.B. & Ricketts T.H. (2006). Effectiveness of Biodiversity Indicators Varies with Extent, Grain, and Region. *Biological Conservation*, 132, 448-457.
- INPN (2012). Inventaire National Du Patrimoine Naturel. <http://inpn.mnhn.fr/accueil/index>
- Kaufman L. & Rousseeuw P.J. (1990). *Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis*. Wiley, New York
- Keith P. (2000). The Part Played by Protected Areas in the Conservation of Threatened French Freshwater Fish. *Biological Conservation*, 92, 265-273.
- Koleff P., Gaston K.J. & Lennon J.J. (2003). Measuring Beta Diversity for Presence-Absence Data. *Journal of Animal Ecology*, 72, 367-382.
- Kreft H. & Jetz W. (2010). A Framework for Delineating Biogeographical Regions Based on Species Distributions. *Journal of Biogeography*, 37, 2029-2053.
- Legendre P. & Legendre L. (1998). *Numerical Ecology*. Elsevier, Amsterdam
- Maechle M., Rousseeuw P., Struyf A., Hubert M. & Hornik K. (2012). The Cluster Package: Cluster Analysis Extended Rousseeuw Et Al., Version 1.14.3. In: R CRAN.
- McKnight M.W., White P.S., McDonald R.I., Lamoreux J.F., Sechrest W., Ridgely R.S. & Stuart S.N. (2007). Putting Beta-Diversity on the Map: Broad-Scale Congruence and Coincidence in the Extremes. *Plos Biology*, 5, 2424-2432.
- Medail F. & Quezel P. (1999). Biodiversity Hotspots in the Mediterranean Basin: Setting Global Conservation Priorities. *Conservation Biology*, 13, 1510-1513.
- Minchin P. (1987). An Evaluation of the Relative Robustness of Techniques for Ecological Ordination. *Vegetatio*, 69, 89-107.
- Moilanen A., Anderson B.J., Arponen A., Pouzols F.M. & Thomas C.D. (2013). Edge Artefacts and Lost Performance in National Versus Continental Conservation Priority Areas. *Diversity and Distributions*, 19, 171-183.

- Moreno Saiz J.C., Donato M., Katinas L., Crisci J.V. & Posadas P. (2013). New Insights into the Biogeography of South-Western Europe: Spatial Patterns from Vascular Plants Using Cluster Analysis and Parsimony. *Journal of Biogeography*, 40, 90-104.
- Oksanen J., Blanchet G., Kindt R., Legendre P., O'Hara B., Simpson G.L., Solymos P., Stevens M.H.H. & Wagner H. (2011). Vegan: Community Ecology Package. In: *R package version 1.17-6*.
- R Development Core Team (2010). R: A Language and Environment for Statistical Computing. In: R Foundation for Statistical Computing Vienna, Austria.
- Robert S., Gourdain P. & Poncet L. (2012). *Méthode Générale Et Mise En Oeuvre Du Programme Carnet B*. Service du Patrimoine Naturel, Direction de la Recherche, de l'Expertise et de la Valorisation, Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris, France, 39.
- Rodrigues A.S.L. & Brooks T.M. (2007). Shortcuts for Biodiversity Conservation Planning: The Effectiveness of Surrogates. In: *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*, 713-737.
- Savouré-Soubelet A. (en prep.). *Scores De Responsabilité Patrimoniale Des Espèces De La Liste Rouge*. Document Interne, Travail En Cours. . Service du Patrimoine Naturel, Direction de la Recherche, de l'Expertise et de la Valorisation, Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris, France.
- Schmeller D., Gruber B., Bauch B., Lanno K., Budrys E., Babij V., Juskaitis R., Sammul M., Varga Z. & Henle K. (2008). Determination of National Conservation Responsibilities for Species Conservation in Regions with Multiple Political Jurisdictions. *Biodiversity and Conservation*, 17, 3607-3622.
- Schmeller D., Maier A., Evans D. & Henle K. (2012). National Responsibilities for Conserving Habitats – A freely Scalable Method. *Nature Conservation*, 3, 21-44.
- Svenning J.C., Flojgaard C. & Baselga A. (2011). Climate, History and Neutrality as Drivers of Mammal Beta Diversity in Europe: Insights from Multiscale Deconstruction. *Journal of Animal Ecology*, 80, 393-402.
- Touroult J. & Jolivet S. (2012). Connaître Pour Préserver: L'atlas De Répartition. *Insectes*, 166, 23-25.
- UICN (2001). Categories & Criteria (Version 3.1). http://www.iucnredlist.org/static/categories_criteria_3_1
- UICN, MNHN, FCBN & SFO (2010a). *Liste Rouge Des Espèces Menacées En France - Chapitre Orchidées De France Métropolitaine* <http://inpn.mnhn.fr>, <http://www.uicn.fr>.
- UICN, MNHN, LPO, SEOF & ONCFS (2011). *Liste Rouge Des Espèces Menacées En France - Chapitre Oiseaux De France Métropolitaine*, Paris, France <http://inpn.mnhn.fr>, <http://www.uicn.fr>.
- UICN, MNHN, SFEPM & ONCFS (2009a). *Liste Rouge Des Espèces Menacées En France - Chapitre Mammifères De France Métropolitaine*, Paris, France <http://inpn.mnhn.fr>, <http://www.uicn.fr>.
- UICN, MNHN, SFI & ONEMA (2010b). *Liste Rouge Des Espèces Menacées En France - Chapitre Poissons D'eau Douce De France Métropolitaine* <http://inpn.mnhn.fr>, <http://www.uicn.fr>.
- UICN, MNHN & SHF (2009b). *Liste Rouge Des Espèces Menacées En France - Chapitre Reptiles Et Amphibiens De France Métropolitaine*, Paris, France <http://inpn.mnhn.fr>, <http://www.uicn.fr>.
- Wickham H. (2012). The Package Reshape: Flexibility Reshape Data Version 0.8.4. In: R CRAN.
- Williams P. & Manne L. (2007). Complementarity. In: *Encyclopedia of Biodiversity. Volume 1: A-C*. Academic Press, 813-829.