

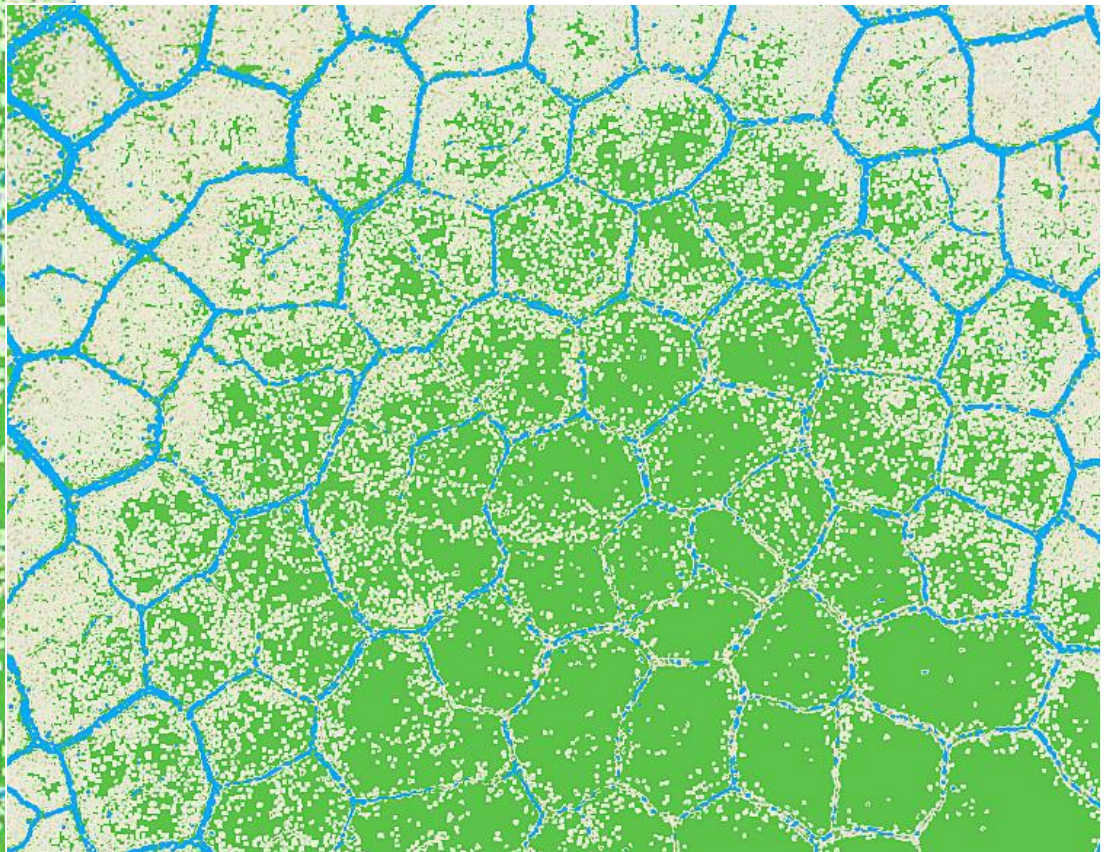


**Muséum  
national  
d'Histoire  
naturelle**

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

**Service du Patrimoine Naturel**

Romain Sordello, Katia Herard, Sophie Coste,  
Géraldine Conruyt-Rogeon & Julien Touroult



## **Le changement climatique et les réseaux écologiques**

*Point sur la connaissance et pistes de  
développement*



Rapport produit dans le cadre de la mission du SPN-MNHN au sein du Centre de ressources Trame verte et bleue (CONVENTION MNHN/MEDDE)

Premier auteur et coordination :

**Romain Sordello**, Chef de projet Trame verte et bleue (TVB)

Contributeurs :

**Julien Touroult**, Directeur adjoint en charge des programmes de conservation N2000 et TVB

**Katia Hérard**, Chef du pôle Espaces

**Sophie Coste**, Chef de projet Stratégie de création des aires protégées (SCAP)

**Géraldine Rogeon**, Chargée de mission TVB Grand Est

Relecteurs :

**Paul Rouveyrol**, Chef de projets Espaces naturels

**Isabelle Witté**, Chargée de mission Analyse de données et appui à la valorisation scientifique

Avec l'association :

- du **Conseil scientifique du SPN-MNHN** qui a effectué des propositions de consolidation sur une première version  
- des partenaires du SPN au sein du **Centre de ressources TVB** qui ont effectué une relecture avant publication, notamment l'Office national de l'eau et des milieux aquatiques (**ONEMA, Isabelle Vial**) et l'Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture (**Irstea, Sylvie Vanpeene**, Aix-en-Provence)

Relecteurs extérieurs :

**Céline Bellard**, Université Paris-Sud, Orsay

**Maurice Imbard**, Chargé de mission Changement Climatique, Ministère en charge de l'écologie

**Mathieu Vrac**, Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (IPSL/CNRS), Gif-sur-Yvettes

**Citation recommandée :** SORDELLO R., HERARD K., COSTE S., CONRUYT-ROGEON G. & TOUROULT J. (2014). *Le changement climatique et les réseaux écologiques. Point sur la connaissance et pistes de développement*. Rapport MNHN-SPN. 178 pages.

## 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

### TRAME VERTE ET BLEUE (TVB)

**Julien Touroult**, Directeur adjoint en charge des programmes de conservation N2000 et TVB

**Romain Sordello**, Chef de projet

**Lucille Billon** Chargée de mission

### STRATEGIE DE CREATION DES AIRES PROTEGEES (SCAP)

**Katia Hérard**, Chef du pôle Espaces



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>

# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>9</b>
<b>I. Contexte et objectifs du rapport .....</b>	<b>9</b>
<b>II. Méthodologie .....</b>	<b>9</b>
II.1. Constitution d'un corpus bibliographique .....	10
II.2. Synthèse en cinq grandes parties .....	10
II.2.1. Choix du format.....	10
II.2.2. Choix du plan .....	10
II.3. Relectures et recueil d'avis.....	11
II.4. Traitement de l'iconographie.....	11
<b>LE CORPUS BIBLIOGRAPHIQUE.....</b>	<b>12</b>
<b>I. Démarche.....</b>	<b>12</b>
I.1. Origine des publications.....	12
I.2. Types de publications .....	12
I.3. Référencement et archivage.....	13
<b>II. Résultats .....</b>	<b>15</b>
II.1. Analyse sur l'ensemble des références.....	15
II.1.1. Répartition par catégorie.....	15
II.1.2. Analyse chronologique.....	15
II.2. Détails concernant les articles scientifiques.....	16
II.2.1. Analyse chronologique.....	16
II.2.2. Analyse par thème.....	17
II.2.3. Analyse sur les revues.....	19
<b>III. Éléments utilisés pour le présent rapport .....</b>	<b>19</b>
<b>PARTIE 1 - DE LA METEOROLOGIE AU CLIMAT : QUELLE INFLUENCE SUR LES DEPLACEMENTS ? .....</b>	<b>22</b>
<b>I. Influence de la météorologie .....</b>	<b>24</b>
I.1. Qu'est-ce que la météorologie ?.....	24
I.2. La température et son influence sur les déplacements .....	24
I.2.1. Importance de la température dans le cycle de vie.....	24
I.2.2. Variations naturelles de la température et stratégies développées au cours de l'évolution.....	24
I.2.3. Impacts sur les déplacements .....	25
I.3. La pluviométrie et son influence sur les déplacements .....	27
I.3.1. Dépendance à l'élément eau .....	27

I.3.2. Impacts sur les déplacements .....	28
<b>II. Le climat et les effets de ses variations .....</b>	<b>29</b>
II.1. Qu'est-ce que le climat ?.....	29
II.1.1. Des conditions météorologiques au climat .....	29
II.1.2. Les différents climats en France et la répartition des espèces.....	30
II.1.3. Le climat varie aussi.....	33
II.2. Les variations passées du climat et leurs conséquences sur les flux.....	34
II.2.1. Des zones refuges récurrentes .....	34
II.2.2. Vitesse et voies principales empruntées lors des régressions/transgressions .....	35
II.2.3. Des conséquences en termes de fragmentation pouvant conduire à des différenciations.....	37
<b>Références citées dans la partie 1.....</b>	<b>38</b>

## **PARTIE 2 - L'AJUSTEMENT SPATIAL PROVOQUE PAR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE CONTEMPORAIN : AMPLEUR, HÉTÉROGÉNÉITÉ, INCERTITUDES .....**

<b>I. Pré-requis.....</b>	<b>44</b>
I.1. Résumé des connaissances actualisées sur l'état des lieux et les prévisions du changement climatique contemporain.....	44
I.2. Les trois axes d'ajustement de la faune et de la flore .....	45
I.2.1. Ajustement interne .....	48
I.2.2. Ajustement phénologique .....	48
<b>II. L'ajustement spatial.....</b>	<b>49</b>
II.1. Le schéma simple des mouvements constatés, identiques au passé .....	49
II.1.1. Mouvements latitudinaux et altitudinaux .....	49
II.1.2. Mouvements du littoral vers l'intérieur des terres.....	51
II.2. La vitesse du changement climatique contemporain crée un effet retard.....	52
II.3. Un phénomène très hétérogène en fonction des espèces.....	53
II.3.1. Discrimination par rapport aux traits de vie .....	55
II.3.2. Exigences écologiques, notamment vis-à-vis de l'habitat (spécialisation) .....	56
II.3.3. Point de départ variable : populations fragmentées, naturellement isolées ou fragilisées.....	56
II.3.4. Prépondérance entre changement climatique et autres pressions .....	58
II.3.5. Habitudes comportementales différentes, notamment entre migrants et sédentaires .....	60
II.4. Illustration par groupes biologiques .....	60
II.4.1. Communautés végétales.....	61
II.4.2. Amphibiens et reptiles .....	61
II.4.3. Avifaune .....	61
II.4.4. Poissons.....	62
II.4.5. Mammifères .....	64

II.4.6. Insectes .....	64
II.4.7. Araignées.....	64
<b>III. Les effets de l'ajustement spatial sur les écosystèmes .....</b>	<b>65</b>
III.1. Vers une recomposition des communautés .....	65
III.2. Conséquences à attendre des recompositions de communautés .....	65
III.2.1. Modification des interactions et du fonctionnement écosystémique .....	65
III.2.2. Effets rétroactifs (feedback) .....	66
III.3. Extension des espèces exotiques envahissantes, des vecteurs de pathogènes et des effets indésirables.....	67
<b>IV. Conséquences des évènements extrêmes .....</b>	<b>69</b>
IV.1. Déplacements brutaux d'espèces .....	69
IV.2. Disparition d'espèces et d'écosystèmes fragmentés ou naturellement isolés .....	69
<b>V. Incertitudes sur l'ajustement spatial .....</b>	<b>70</b>
V.1. Incertitudes écologiques .....	70
V.1.1. Part entre météorologie et climat, variabilité ou vrais ajustements.....	70
V.1.2. Phénotype vs génotype et la microévolution.....	71
V.2. Incertitudes liées à la modélisation.....	71
V.2.1. La chaîne analytique déployée par la recherche.....	71
V.2.2. Les étapes avant la modélisation impacts .....	72
V.2.3. L'étape de la modélisation « impacts » .....	74
V.2.4. Au-delà des modèles.....	78
<b>Références citées dans la partie 2 .....</b>	<b>79</b>

## **PARTIE 3 - LES RESEAUX ECOLOGIQUES COMME REPONSE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE CONTEMPORAIN..... 90**

<b>I. Avant propos .....</b>	<b>92</b>
I.1. Agir malgré les incertitudes.....	92
I.2. Mise en avant des réseaux écologiques face au changement climatique .....	92
<b>II. Des corridors écologiques pour quoi ? .....</b>	<b>93</b>
II.1. Favoriser l'adaptation de la biodiversité.....	93
II.1.1. Un support pour l'ajustement spatial.....	93
II.1.2. Un facteur de résistance et de résilience face aux effets du changement climatique .....	96
II.2. Un levier pour réduire le phénomène du changement climatique et atténuer ses effets sur la société humaine .....	98
II.2.1. Réduction du changement climatique lui-même .....	98
II.2.2. Atténuation des effets du changement climatiques sur la société humaine .....	99
II.3. Quand les corridors ne suffisent plus : la migration assistée .....	99

<b>III. Le rôle des aires protégées .....</b>	<b>102</b>
III.1. Le débat sur l'efficacité des aires protégées face au changement climatique .....	102
III.1.1. Conserver la biodiversité.....	103
III.1.2. Participer à l'ajustement spatial en complément avec les corridors.....	105
III.1.3. Des zones tampons, facteurs de résilience et d'atténuation.....	105
III.2. Les aires protégées sont des laboratoires pour la connaissance.....	106
<b>IV. Mise en avant des réseaux écologiques par les institutions européennes et françaises .....</b>	<b>107</b>
IV.1. Comment l'Union européenne fait-elle un lien entre réseaux écologiques et changement climatique ? .....	109
IV.1.1. Évolution du côté du changement climatique .....	109
IV.1.2. Évolution du côté de la biodiversité et de l'infrastructure verte .....	111
IV.1.3. Rapports techniques émanant des organes européens.....	113
IV.1.4. Autres éléments .....	114
IV.2. En France.....	115
IV.2.1. Le Plan national d'action sur le changement climatique 2011-2015 .....	115
IV.2.2. Les rapports de l'ONERC .....	116
IV.2.3. L'avis du Conseil économique, social et environnemental (CESE) de mai 2014 .....	116
IV.3. Exemple à l'échelle d'une collectivité : la Ville de Paris .....	117
<b>Références citées dans la partie 3 .....</b>	<b>119</b>

## **PARTIE 4 - INTEGRER LE CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS UNE DEMARCHE DE RESEAU ECOLOGIQUE .....126**

<b>I. Identifier un réseau adapté à la problématique .....</b>	<b>128</b>
I.1. Recommandations générales .....	129
I.2. Méthodologies « précises » d'identification de corridors ou de continuités .....	132
I.2.1. S'inspirer des voies de colonisation passées .....	132
I.2.2. Se baser sur les déplacements prévus des enveloppes climatiques .....	132
I.3. Identification d'aires protégées nouvelles.....	140
<b>II. En France .....</b>	<b>143</b>
II.1. Retour sur les orientations nationales du projet Trame verte et bleue en France .....	143
II.1.1. Rappels des objectifs du projet Trame verte et bleue.....	144
II.1.2. Les enjeux nationaux pour assurer une cohérence écologique de la TVB .....	144
II.2. Retour sur la prise en compte du changement climatique dans la Stratégie de création des aires protégées .....	146
II.3. Peu de retours d'expériences locaux.....	147
<b>Références citées dans la partie 4 .....</b>	<b>149</b>

## **PARTIE 5 - PREPARER L'AVENIR POUR MIEUX PRENDRE EN COMPTE LE CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LES RESEAUX ECOLOGIQUES.....154**

<b>I. Trajectoires à infléchir, Connaissances lacunaires à combler et développement à engager .....</b>	<b>157</b>
I.1. Trajectoires à infléchir .....	157
I.2. Lacunes identifiées dans la connaissance fondamentale .....	158
I.2.1. Parties méconnues au sein de la biodiversité et des milieux naturels .....	158
I.2.2. Thématiques et domaines sous-investis par la recherche .....	159
I.3. Études analytiques à mener à partir de la littérature disponible .....	162
I.4. Propositions pour améliorer l'usage de la modélisation .....	163
<b>II. Pistes d'amélioration concernant une prochaine version des critères de cohérence nationale du projet TVB.....</b>	<b>166</b>
II.1. Pour le critère de cohérence « Cartes nationales ».....	166
II.2. Pour le critère de cohérence « Espèces » .....	167
II.3. Pour le critère de cohérence « Habitats naturels ».....	167
<b>III. Améliorer la prise en compte du changement climatique dans le projet SCAP.....</b>	<b>168</b>
<b>IV. Démarches locales à encourager .....</b>	<b>169</b>
<b>Références citées dans la partie 5 .....</b>	<b>170</b>

## **CONCLUSION.....174**

## **TABLES DES MATIERES .....176**

Figures .....	176
Tableaux .....	177
Encadrés.....	177



# INTRODUCTION

## I. CONTEXTE ET OBJECTIFS DU RAPPORT

Le service du patrimoine naturel (SPN) du Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN) apporte depuis plusieurs années un **appui scientifique et technique à destination du Ministère en charge de l'écologie** (MEDDE) sur les deux politiques publiques Trame verte et bleue (TVB) et Stratégie de création des aires protégées (SCAP).

Rappelons que :

- la TVB a vocation à lutter contre la fragmentation des milieux naturels par l'identification, la préservation et la restauration d'un réseau écologique à l'échelle nationale,
- la SCAP vise à donner une cohérence à l'identification de nouvelles aires protégées en France en portant par ailleurs la surface du territoire national sous protection forte à 2 % d'ici à 2019.

L'implication du SPN sur ces deux projets s'est traduite de 2010 à 2012, par des travaux visant à préciser leur cadrage national (Coste *et al.*, 2010 ; Sordello *et al.*, 2012a ; Sordello *et al.*, 2012b ; Sordello *et al.*, 2012c).

Cette expertise repose également sur des productions répondant à des demandes du MEDDE afin de **consolider la doctrine scientifique** sur des problématiques complexes que soulèvent ces projets et qui nécessitent un approfondissement par des experts. Par exemple, une note a ainsi été diffusée en 2014 sur la fonctionnalité des continuités écologiques (Sordello *et al.*, 2014).

C'est dans ce contexte que le MEDDE a confié au SPN un nouveau travail bibliographique de ce type sur le thème du **changement climatique en lien avec les projets TVB et SCAP**.

Le changement climatique que connaît actuellement la Terre du fait des activités humaines est en effet devenu un enjeu majeur pour nos sociétés et par la même un facteur incontournable dans les politiques de conservation de la nature.

La demande visait ainsi à faire un **point sur la connaissance** disponible sur le sujet (impacts du changement climatique sur les flux, rôle des réseaux écologiques et des aires protégées dans cette problématique, ...) et à identifier des **pistes de développement** pour les années à venir concernant cette thématique, notamment pour perfectionner sa prise en compte lors des éventuelles révisions des cadrages de la TVB et de la SCAP.

## II. METHODOLOGIE

La commande de ce travail étant très large et la littérature extrêmement abondante sur le sujet, nous avons fait le choix d'une réponse sous deux formes :

- de constituer tout d'abord un corpus bibliographique sur le thème étudié,
- d'exploiter une partie de ce corpus pour élaborer une synthèse permettant d'apporter des premiers éléments de réponses aux questions posées par le Ministère.

## II.1. Constitution d'un corpus bibliographique

La constitution du corpus bibliographique constitue une partie du livrable en tant que telle. Il permet de situer l'état de la littérature aussi bien scientifique que grise sur le sujet étudié. De cette façon, il forme une base qui, au-delà d'avoir servi pour la rédaction de ce rapport, pourra être utilisée aussi dans d'autres démarches ultérieures. La méthode de constitution de ce corpus et sa description sont présentées dans une partie dédiée qui suit cette introduction.

## II.2. Synthèse en cinq grandes parties

### II.2.1. Choix du format

Le travail présenté ici est un travail analytique à partir des documents lus issus du corpus pour essayer de répondre aux questions soulevées par la problématique.

Plusieurs terminologies sont employées pour désigner ce type d'exercice consistant à synthétiser de la littérature en réponse à une question « politique » ou technique : synthèse bibliographique, état de l'art, synthèse des faits avérés, point sur la connaissance. Ces termes ne sont pas strictement synonymes et recouvrent chacun des méthodologies bien précises.

Dans le présent exercice, nous n'avons pas été jusqu'à suivre le protocole détaillé proposé par la Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité pour la constitution de « synthèses de faits avérés ». Néanmoins, nous avons essayé de mener cette étude avec la plus grande rigueur scientifique possible dans les délais donnés.

### II.2.2. Choix du plan

Plusieurs fois remanié au fil des recherches et de la rédaction, le plan final retenu s'articule en cinq grandes parties qui suivent une progression :

I - La première partie présente ce que sont **la météorologie et le climat** et la manière dont ils **influent sur les déplacements des espèces**. L'objectif n'est pas d'être exhaustif ; il s'agit d'étudier les principaux effets, en s'appuyant notamment sur les **variations passées du climat**,

II - La deuxième partie se focalise sur le **changement climatique contemporain** et dresse un état des lieux de la connaissance scientifique concernant **l'ajustement spatial** qu'il provoque avec toute son **hétérogénéité, ses conséquences et ses incertitudes**.

III - La troisième partie **revient sur le rôle des réseaux écologiques vis-à-vis de la problématique** comme facteur d'adaptation pour la biodiversité (permettre aux espèces d'ajuster leur aire de répartition, de résister et d'être résilientes) et de réduction (amoindrir le phénomène de changement climatique lui-même et ses conséquences sur nos sociétés). Elle revient sur la place des aires protégées puis examine comment les institutions préconisent le recours aux réseaux écologiques pour lutter contre le changement climatique,

IV - La quatrième partie fait le point sur les méthodes d'identification de réseaux écologiques prenant en compte le changement climatique, sur la base de la littérature scientifique et **d'expériences concrètes à des échelles distinctes**. Concernant la France, cette partie revient donc notamment sur la prise en compte de ces enjeux dans les orientations nationales du projet TVB et du projet SCAP,

V - La cinquième partie récapitule les lacunes de la connaissance, par rapport à l'ensemble des problématiques appliquées examinées dans le rapport. Elle formule des **propositions de recherches et de**

**développement** à engager dans les années à venir, notamment pour améliorer la prise en compte du changement climatique dans les projets TVB et SCAP.

Pour l'ensemble du rapport :

- un résumé de chaque partie est présenté en introduction, permettant aux lecteurs de prendre rapidement connaissance des points les plus importants,
- les références citées sont listées à la fin de chaque partie.

### **II.3. Relectures et recueil d'avis**

La réalisation de ce rapport s'est faite dans la mesure du possible par collaborations et échanges, en interne au sein du Muséum et avec les partenaires extérieurs.

Au sein du MNHN, le **Conseil scientifique du SPN** a été sollicité pour relire et donner son avis sur ce travail. Le Conseil scientifique du SPN est un comité de personnalités scientifiques destiné à assurer l'information réciproque et l'enrichissement mutuel des travaux du SPN et des équipes de recherche du Muséum qui interviennent dans des domaines proches.

Le contexte et la commande de ce travail ont ainsi été présentés à ses membres en septembre 2013 puis le rapport en cours d'élaboration a été transmis dans une première version en octobre 2013 avant d'être discuté à la séance suivante de novembre 2013. Cette association a permis d'enrichir le contenu, de gagner en structuration et en équilibre dans le plan et d'échanger sur les priorités d'actions à définir concernant le sujet.

Des experts extérieurs au Muséum ont aussi été sollicités pour relire le rapport : Céline Bellard, post-doctorante à l'Université Paris SUD, Maurice Imbard chargé de mission changement climatique au Ministère en charge de l'écologie et Mathieu Vrac de l'Institut Pierre Simon Laplace.

Enfin, une réunion de présentation et d'échanges sur ce travail avec les équipes du MEDDE et du Centre de ressources TVB a eu lieu en mai 2014 puis une relecture a été effectuée pendant l'été 2014.

### **II.4. Traitement de l'iconographie**

Nous avons pris les précautions requises pour l'inclusion d'illustrations dans ce rapport :

- en demandant la permission directement aux auteurs de ces illustrations lorsque ceux-ci étaient connus et contactables,
- en produisant manuellement de nouvelles figures qui s'inspirent des illustrations originelles lorsque celles-ci étaient simples (tableaux, graphiques, schémas, ...),
- en vérifiant les possibilités d'exploitation permises par les licences des revues (licence creative commons par exemple).

Les figures sont toujours accompagnées de la mention du copyright et/ou de la source d'où elles sont extraites. Dans le cas contraire, c'est qu'elles sont éditées par le MNHN-SPN (analyse du corpus bibliographique par exemple).

# LE CORPUS BIBLIOGRAPHIQUE

## I. DEMARCHE

### I.1. Origine des publications

La formation du corpus s'est appuyée à la fois sur le rassemblement des publications accumulées à l'opportunité depuis que le SPN travaille sur le sujet TVB et SCAP et sur une démarche idoine de recherche par internet.

La recherche par internet, visant essentiellement la littérature scientifique, s'est faite à partir du moteur de recherche Google scholar (<http://scholar.google.fr/>) qui renvoie lui-même aux bases de revues en ligne du type JSTOR, Science Direct, Wiley ou encore Springer Link. La recherche a été effectuée sur les mots clefs « ecological network », « protected areas », « climate change », « biodiversity », « global warming » en associant ces mots de manières variées.

Une recherche a également été menée sur le moteur ISI Web of Knowledge (WOK). L'équation suivante a été saisie : “((((global warming OR climate change) OR global change) OR climate variability) AND (((((((ecological network OR greenway) OR corridor) OR landscape ecology) OR protected areas) OR dispersal) OR green infrastructure) OR fragmentation) OR connectivity))”.

Cette équation a abouti à 198 citations. Un export au format txt depuis WOK puis un import dans le tableur Excel ont permis de traiter ces résultats. A la lecture des titres, 30 publications se sont avérées être sans intérêt pour notre problématique et 7 publications se sont trouvées être des doublons par rapport aux articles déjà stockés. Au final, la recherche par WOK a donc apporté au corpus 161 articles supplémentaires.

### I.2. Types de publications

Toutes les références ont été regroupées par type de publications selon 8 catégories :

- 1- les articles scientifiques,
- 2- les thèses,
- 3- la littérature grise (synthèses scientifiques, ouvrages),
- 4- les rapports techniques et d'expertise,
- 5- les documents cadres, de planification de politiques publiques ou législatifs,
- 6- les actes de colloques,
- 7- les supports de vulgarisation/communication (plaquettes, power point, ...),
- 8- les autres références (site internet, ...).

Une classification en 16 thèmes a par ailleurs été mise en place pour les articles scientifiques, selon un découpage sommaire devant faciliter ensuite la synthèse bibliographique (cf. Tableau 1).

N°	Titres des 16 thèmes et des groupes de thèmes
	<b>Influence météo et climat</b>
1	Météorologie, Climat
2	Phylogéographie/Phylogénie
	<b>Impacts du Changement climatique contemporain(CCC)</b>
3	Impacts généraux du CCC
4	Évènements extrêmes
5	Niveau de la mer
6	Déplacement des aires de répartition
7	Phénologie
8	Variabilité des réponses, Recomposition
9	Modélisation, Incertitudes
	<b>Rôle des réseaux</b>
10	Rôle de la connectivité
11	Rôle des aires protégées
12	Atténuation par les réseaux
	<b>Action</b>
13	Stratégie & Planification
14	Identification de réseaux
15	Migration assistée
16	Autres

Tableau 1 : Thèmes retenus pour le classement des articles scientifiques du corpus.

### I.3. Référencement et archivage

Toutes les publications téléchargées ont été étiquetées de la manière suivante :

- « Auteur, année » pour les publications à un seul auteur,
- « Auteur & Auteur 2, année » pour les publications à deux auteurs,
- « Auteur *et al.*, année » pour les publications à plus de deux auteurs.

Une fois téléchargés tous les documents ont été archivés dans 7 dossiers représentant les différents types de publications retenus (excepté celui qui regroupe des références contenant exclusivement des sites internet), sauvegardés en ligne par l'outil dropbox (cf. Figure 1). Toutes les publications ont aussi été référencées dans un tableur Excel.

Les formats de citation suivants ont été retenus :

- pour les articles scientifiques (cat. 1) : « AUTEUR 1, AUTEUR 2 & AUTEUR 3 (année). Titre de l'article. *Nom de la revue*. Volume W. Numéro X. Pages Y-Z. »

- pour les autres publications (cat. 2 à 7) : « AUTEUR 1, AUTEUR 2 & AUTEUR 3 (année). *Titre de la référence*. Edition. X pages. »

- pour les sites internet (cat. 8) :

EDITEUR. *Éventuellement titre de la page*. Disponible sur : <http://www.adresse.fr> (Consulté en XXX)

Anderson et al 2012.pdf	Cianfrani et al 2011.pdf	Habel et al 2010a.pdf	Julliard et al 2003.pdf	McLachlan et al 2005.pdf
Araujo & New 2006.pdf	Cleland et al soumis.pdf	Habel et al 2010b.pdf	Julliard et al 2004.pdf	McLachlan et al 2007.pdf
Araujo & Rahbek 2006.pdf	Conlisk et al 2012.pdf	Hannah 2008.pdf	Jump et al 2009.pdf	McRae et al 2008.pdf
Araujo et al 2004.pdf	Cormont et al 2011.pdf	Hannah 2011.pdf	Kattge et al 2011.pdf	Melles et al 2011.pdf
Araujo et al 2005.pdf	Cornille et al 2013.pdf	Hannah et al 2002a.pdf	Kharouba & Kerr 2010.pdf	Mellows et al 2012.pdf
Araujo et al 2006.pdf	Cowling et al 1999.pdf	Hannah et al 2002b.pdf	Kiers et al 2010.pdf	Metzger et al 2005.pdf
Araujo et al 2011.pdf	Cowling et al 2003.pdf	Hannah et al 2005.pdf	King & Ferris 1998.pdf	Meyer et al 2013.pdf
Bailey 1991.pdf	Crossman et al 2011.pdf	Hannah et al 2007.pdf	Klausmeyer & Shaw 2009.pdf	Miller et al 2006.pdf
Baker et al 2008.pdf	D'Amen et al 2011.pdf	Hardy et al 2010.pdf	Klein et al 2009.pdf	Monzoni et al 2011.pdf
Barbet-Massin et al 2010.pdf	Daufresne & Boet 2007.pdf	Hargrove & Hoffman 2005.pdf	Knowlton et al 2010.pdf	Mooney et al 2009.pdf
Barbet-Massin et al 2012.pdf	Daufresne et al 2003.pdf	Harrison et al 2006.pdf	Kostyack et al 2011.pdf	Morin & Chuine 2005.pdf
Barlow & Martin 2004.pdf	Davi et al 2005.pdf	Heikkinen et al 2010.pdf	Koumoundouros et al 2009.pdf	Morin & Thuiller 2009.pdf
Bateman et al 2013.pdf	Davies et al 2006.pdf	Heller & Zavaleta 2009.pdf	Krosby et al 2010.pdf	Morin et al 2007.pdf
Beale et al 2008.pdf	Davison et al 2012.pdf	Henry et al 2012.pdf	Kubisch et al 2013.pdf	Moser et al 2011.pdf
Beale et al 2013.pdf	De Fonton 1971.pdf	Heuertz et al 2004.pdf	Kurosawa et al 2003.pdf	Nunez et al 2013.pdf
Beaumont & Duursma 2012.pdf	Déqué et al 2012.pdf	Hewitt 1999.pdf	Laaksonen et al 2006.pdf	Olson et al 2009.pdf
Beaumont et al 2002.pdf	Devictor et al 2008.pdf	Hewitt 2004a.pdf	Lascoux et al 2004.pdf	Opdam & Wascher 2004.pdf
Beaumont et al 2007.pdf	Devictor et al 2012.pdf	Hewitt 2004b.pdf	Lassalle & Rochard 2009.pdf	Opdam et al 2009.pdf
Beaumont et al 2008.pdf	Doerr et al 2011.pdf	Hickling et al 2006.pdf	Lassalle et al 2008.pdf	Pakeman et al 2008.pdf
Beaumont et al 2009.pdf	Dormann et al 2008.pdf	Higgins & Harte 2006.pdf	Lassalle et al 2010.pdf	Pardini et al 2010.pdf
Bedia et al 2013.pdf	Duckett & Stow 2013.pdf	Hill et al 2011.pdf	Laurance & Williamson 2001.pdf	Parisod 2008.pdf
Bell 2007.pdf	Duckett et al 2013.pdf	Hodgson et al 2009.pdf	Lawson et al 2014.pdf	Parmesan & Yohe 2003.pdf
Bellard et al 2012.pdf	Dufrene et al 2005.pdf	Hoegh-Guldberg et al 2008.pdf	Leach et al 2013.pdf	Parmesan 2006.pdf
Bellard et al 2013a.pdf	Dullinger et al 2004.pdf	Hof et al 2011.pdf	Leimu et al 2010.pdf	Patterson & Guerin 2013a.pdf
Bellard et al 2013b.pdf	Dyer 1994.pdf	Hof et al 2012.pdf	Lemes et al 2014.pdf	Pauli et al 2012.pdf
Bellard et al 2014.pdf	Dyrce & Halupka 2009.pdf	Hoffmann 2010.pdf	Lemieux & Scott 2011.pdf	Pauli et al 2013.pdf
Berkes & Jolly 2001.pdf	Eklof et al 2012.pdf	Hoffmann et al 2011.pdf	Lemoine & Bohning-Gaese 2003.pdf	Pearson & Dawson 2003.pdf
Bertrand et al 2011.pdf	Engler & Guisan 2009.pdf	Hole et al 2009.pdf	Lenoir et al 2008.pdf	Pearson & Dawson 2005.pdf
Best et al 2007.pdf	Engler et al 2009.pdf	Hole et al 2011.pdf	Lenoir et al 2010a.pdf	Pearson 2006.pdf
Betts et al 2004.pdf	Fatoric et al 2013.pdf	Honnay et al 2002.pdf	Lenoir et al 2010b.pdf	Pearson et al 2013.pdf
Blackmore 2007.pdf	Feeley et al 2012.pdf	Hortal & Lobo 2006.pdf	Lenoir et al 2014.pdf	Penuelas & Boada 2003.pdf
Bodin et al 2013.pdf	Fischer et al 2011.pdf	Howard et al 2013.pdf	Leroy et al 2014.pdf	Penuelas et al 2013.pdf
Boeye et al 2013.pdf	Fobert et al 2013.pdf	Hulme 2005.pdf	Levinsky et al 2007.pdf	Petit et al 2002a.pdf
Brewer et al 2002.pdf	Foden et al 2007.pdf	Hunter 2007.pdf	Liu et al 2010.pdf	Petit et al 2002b.pdf
Brook et al 2008.pdf	Foden et al 2013.pdf	Huntingford et al 2008.pdf	Lopez-Hoffman et al 2013.pdf	Petrosillo et al 2013.pdf
Brooker et al 2007.pdf	Franks et al 2007.pdf	Huntley et al 2006.pdf	Loyola et al 2014.pdf	Pettorelli et al 2012.pdf
Buisson et al 2008.pdf	Frederiksen et al 2008.pdf	Imbach et al 2013.pdf	Magri et al 2006.pdf	Piedallu et al 2009.pdf
Buisson et al 2008b.pdf	Gaffin et al 2012.pdf	Iverson et al 2011.pdf	Magris et al 2014.pdf	Plard et al 2014.pdf
Buisson et al 2010a.pdf	Garcia-Fernandez et al 2013.pdf	Iwamura 2013.pdf	Malatinszky et al 2013.pdf	Poff et al 1996.pdf
Buisson et al 2010b.pdf	Gerber et al 2014.pdf	Jaeschke et al 2013.pdf	Malcolm et al 2002.pdf	Popescu et al 2013.pdf
Burger et al 2013.pdf	Gilman et al 2010.pdf	Jantz et al 2014.pdf	Margules & Pressey 2000.pdf	Prato 2012.pdf
Canadell et al 2007.pdf	Grashof-Bokdam et al 2009.pdf	Jeltsch et al 2011.pdf	Marini et al 2009.pdf	Pyke & Fischer 2005.pdf
Carroll et al 2009.pdf	Grenouillet & Lecomte 2014.pdf	Jiguet et al 2007.pdf	Martinez et al 2012.pdf	Pyke et al 2005.pdf
Carty 2001.pdf	Gritti et al 2013.pdf	Jiguet et al 2010.pdf	Martinez Pastur et al 2012.pdf	Rafferty & Ives 2010.pdf
Cheaib et al 2012.pdf	Groom 2013.pdf	Johnston et al 2013.pdf	Martinez-Freiria et al 2013.pdf	Randin et al 2009.pdf
Chen et al 2011.pdf	Grytnes et al 2014.pdf	Joly et al 2010.pdf	Mazaris et al 2013.pdf	Ray 2013.pdf
Chuine & Beaubien 2001.pdf	Guisan et al 2005.pdf	Jones et al 2012.pdf	McCauley & Mabry 2011.pdf	Reside et al 2012.pdf
Chust et al 2013.pdf	Gutschick 2007.pdf	Joubert & Bijlsma 2010.pdf	McKelvey et al 2011.pdf	Reyjol et al 2007.pdf

Figure 1 : Aperçu des références stockées sur dropbox.

## II. RESULTATS

L'ensemble du corpus bibliographique est joint au rapport comme livrable à part entière.

Par ailleurs, une analyse bibliométrique a permis d'extraire plusieurs informations de l'ensemble des publications qui peuvent participer de la description de l'état des connaissances sur le sujet traité.

### **II.1. Analyse sur l'ensemble des références**

#### II.1.1. Répartition par catégorie

Au total, 524 références ont été recensées. La grande majorité (71 %) concerne des articles scientifiques (catégorie 1), puis viennent les rapports techniques et d'expertise (catégorie 4, 10 %). Les autres types de publications (catégories 2, 3, 5, 6, 7, 8) se retrouvent chacun entre 1 à 5 % (cf. Figure 2).

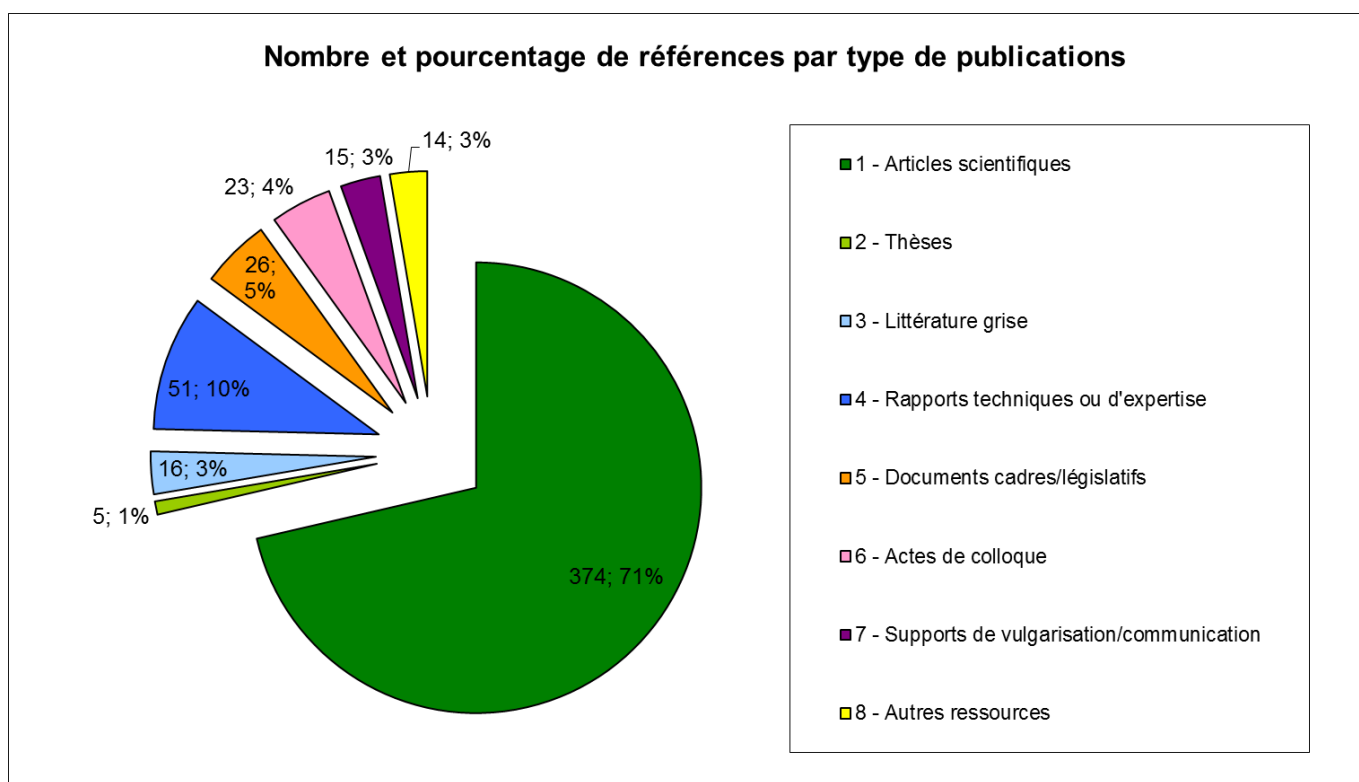


Figure 2 : Répartition des références du corpus par type de publication.

Sur l'ensemble des références, seuls certains articles scientifiques n'ont pas pu être téléchargés (fichier non trouvé ou abonnement non souscrit à la revue par le MNHN). Cela représente 38 articles sur les 374, soit environ 10 %. Le corpus total exploitable pour ce rapport a donc été de 472 références, auxquelles s'ajoutent 14 sites internet.

#### II.1.2. Analyse chronologique

Sur toutes les références rassemblées hors mis les sites internet (catégorie 8), allant de 1971 à 2014, le nombre de publications connaît une forte progression depuis les années 2000 (cf. Figure 3). Cela témoigne d'un intérêt grandissant depuis le début du XXI<sup>ème</sup> siècle pour les sujets du changement climatique, des réseaux écologiques, des aires protégées et des problématiques qu'ils soulèvent conjointement. Ce constat reste le même si l'on exclut les articles scientifiques qui représentent le plus grand nombre de références.

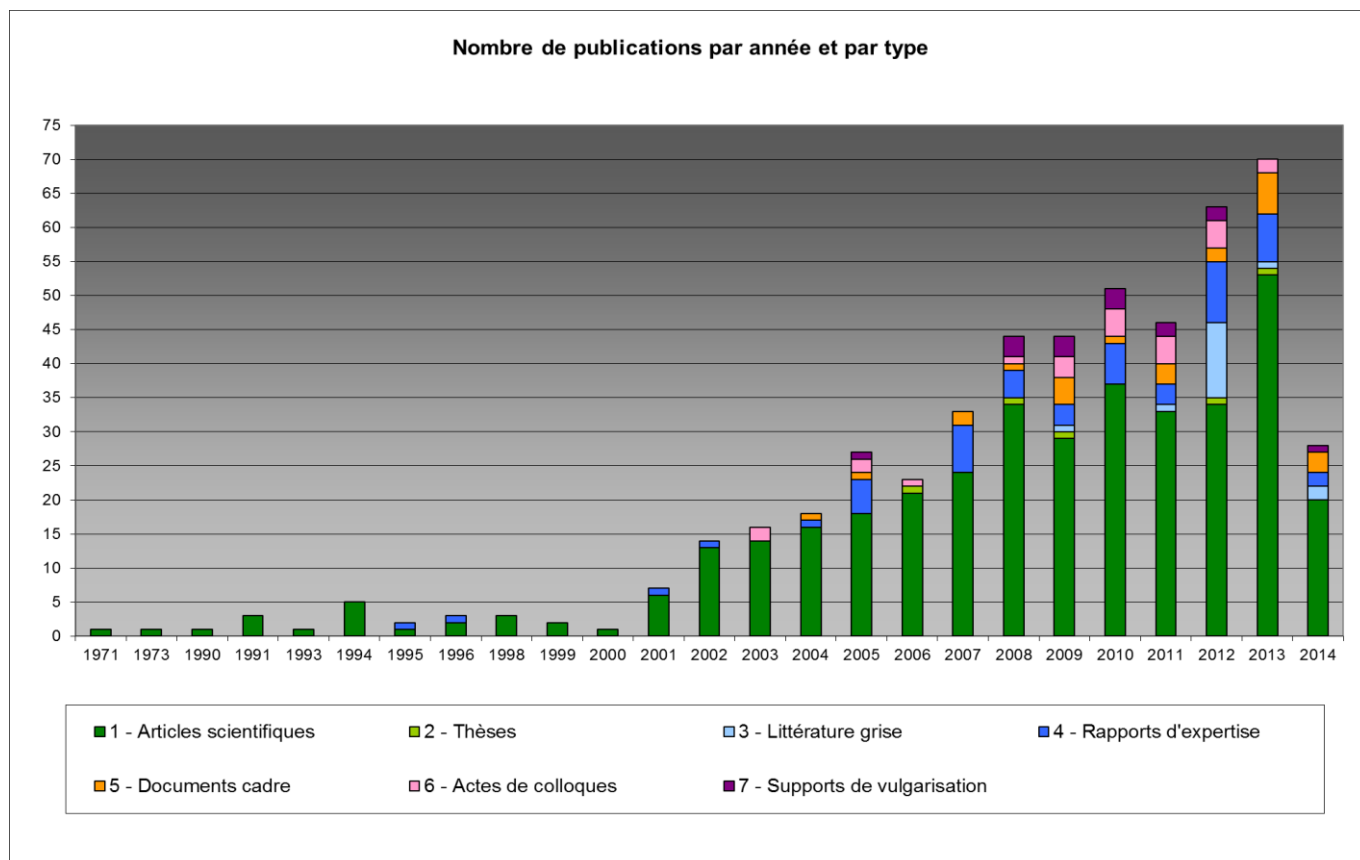


Figure 3 : Répartition des références du corpus par année et par type de publication.

## II.2. Détails concernant les articles scientifiques

### II.2.1. Analyse chronologique

La publication des articles scientifiques recensés au sein du corpus montre une progression très nette au fil des années, quasi exponentielle (cf. Figure 4). Sur la période 1971-2014 (année en cours), le nombre d'articles a augmenté chaque année d'environ 20 %.

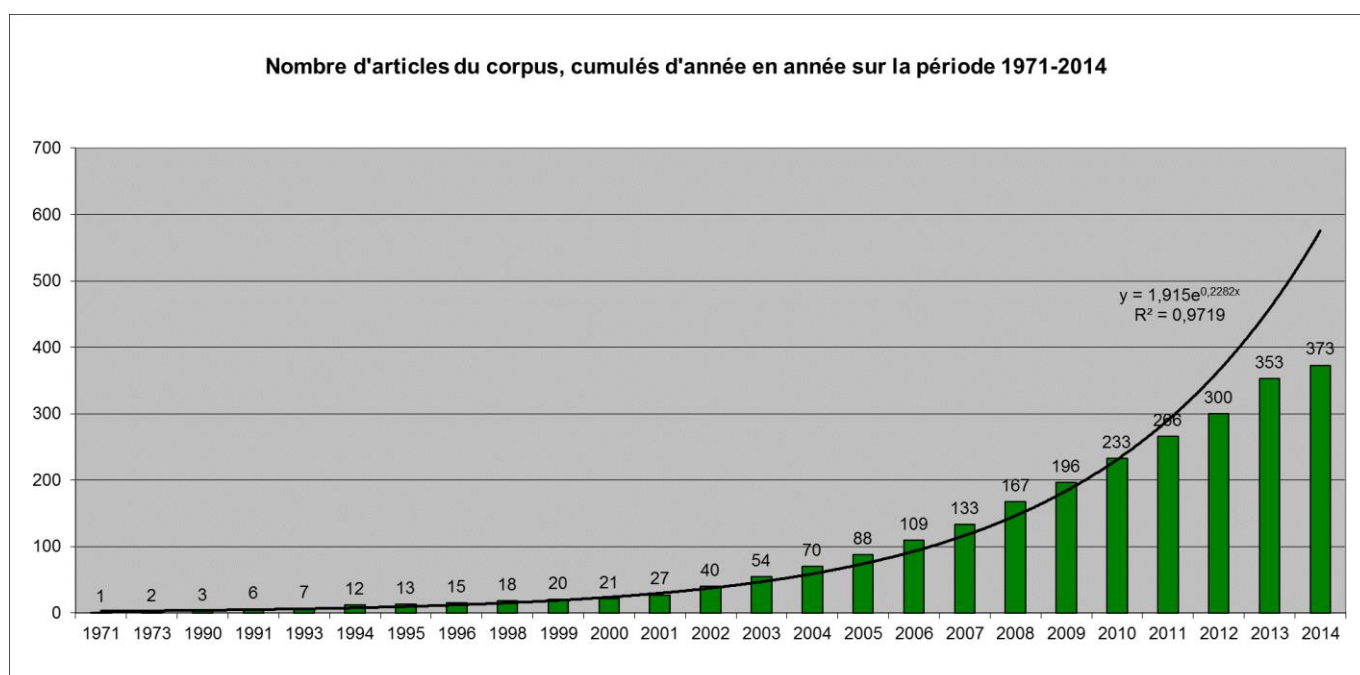


Figure 4 : Cumul des articles scientifiques du corpus de 1971 à 2014.



A titre de comparaison, on peut également citer l'étude de Philippe Boudes (2010)<sup>1</sup> qui a lui aussi mené une analyse bibliométrique sur la littérature scientifique, en utilisant les termes de « trames vertes » et « climat ». Son objectif était de comprendre dans quelle mesure le climat et les trames vertes étaient ou non effectivement liés, à la fois dans le domaine des sciences humaines et dans le domaine de l'écologie. En résultat, les bases de données en sciences humaines n'ont pas fait ressortir beaucoup de publications, à cause de la faible occurrence des descripteurs « Trame Verte » (GreenWay GW) et « Climat » (Climate Cl) pour ces disciplines. Le recours aux bases de données des autres sciences a permis des résultats plus poussés et montre que l'association changement climatique et trame verte suscite un intérêt croissant (cf. Figure 5). On retrouve une évolution semblable au fil des années dans l'analyse bibliométrique menée pour le présent rapport.

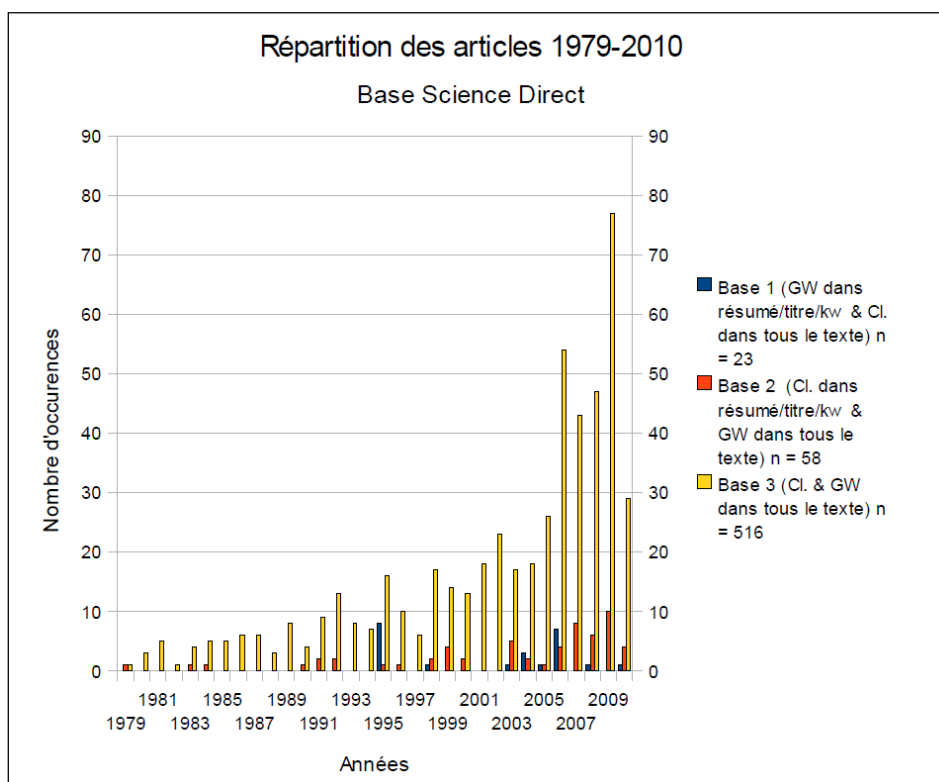


Figure 5 : Analyse bibliométrique dans les bases de données de sciences humaines sur les mots clefs greenway et climat.  
Source : Boudes, 2010

On peut également citer la revue de Heller et Zavaleta (2009)<sup>2</sup>, qui centralise 113 publications issues de 57 périodiques et livres traitant des solutions à apporter au problème du changement climatique. Celle-ci montre une répartition assez similaire de son corpus, avec une croissance des publications depuis 1996 (cf. Figure 6).

## II.2.2. Analyse par thème

Le nombre de parutions au sein de chaque thème varie fortement (cf. Figure 7). Cependant, le choix même des thèmes, destiné à faire ressortir certains sujets précisément supposés comme lacunaires (événements

<sup>1</sup> BOUDES P. (2010). *Changements Climatiques & Trames Vertes Urbaines. Rapport final de la phase d'incubation (oct. 2009 – oct. 2010)*. GIS Climat Environnement Société - ANR Trames Vertes Urbaines - UMR Dynamiques Sociales et Recompositions des Espaces LADYSS / PARIS 7. 97 pages.

<sup>2</sup> HELLER N.E. & ZAVALA E.S. (2009). Biodiversity management in the face of climate change: A review of 22 years of recommendations. *Biological Conservation*. Numéro 142. Pages 14-32.

climatiques extrêmes, niveau de la mer) et l'hétérogénéité de leur périmètre, expliquent le graphique obtenu.

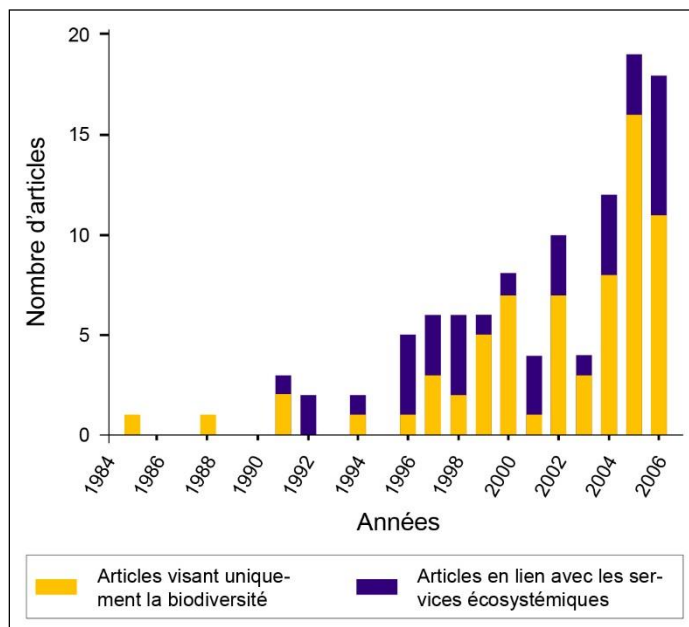


Figure 6 : Répartition des articles rassemblés par la revue de Heller & Zavaleta (2009).  
Source : D'après Heller & Zavaleta, 2009

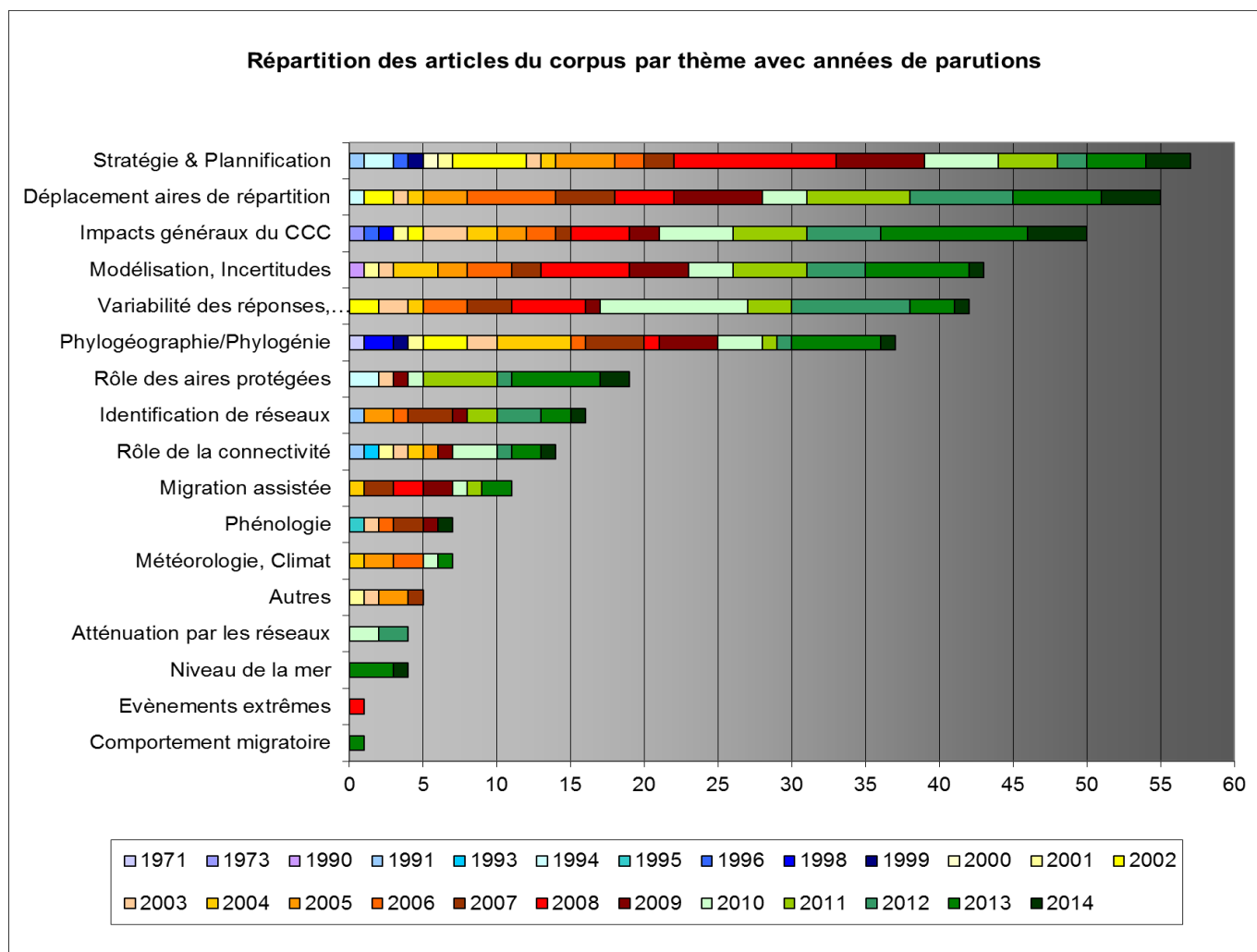


Figure 7 : Répartition des articles scientifiques recensés par thème avec distinction par année.  
En violet/bleu : de 1971 à 1999 ; en jaune/rouge : années 2000 ; tons de vert : années 2010 à 2014.

### II.2.3. Analyse sur les revues

Les articles sont tirés d'un très grand nombre de revues (137), ce qui souligne la transversalité de la problématique traitée ici et du champ large qu'elle couvre dans la recherche tout en restant pourtant à l'intérieur du domaine de l'écologie. La revue *Global change biology* se dégage fortement en nombre de publications par rapport au total des références collectées ici (29 sur les 137 soit environ 21 %) ce qui n'est pas surprenant compte tenu de l'objet de publication de cette revue. Quatre autres revues, plus généralistes en écologie et conservation, se détachent également dans une moindre mesure, avec un nombre d'articles recensés supérieur ou égal à 10 : *Biological conservation* (20), *Conservation biology* (19), *PLoS ONE* (12), *Ecology Letters* (12), *Ecography* (11) et *Trends in Ecology and Evolution* (11), *Nature* (10). Un très grand nombre de revues (80) ne fournissent qu'un seul article à ce corpus (cf. Figure 8).

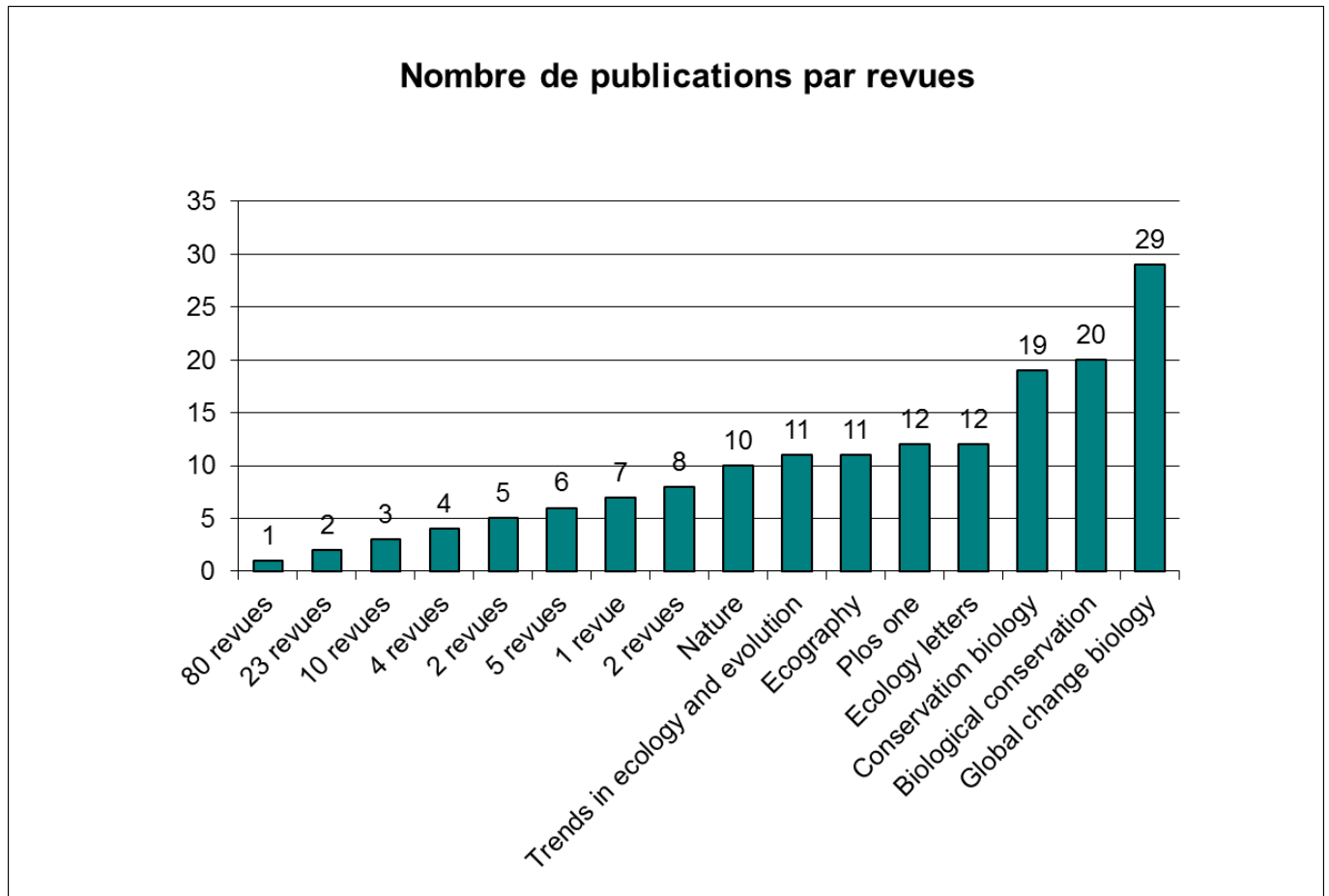


Figure 8 : Contribution des revues au corpus en nombre de publications.

*Les revues atteignant des scores (nombre d'articles) supérieurs ou égal à 10 sont nommées individuellement. Les autres revues sont regroupées en fonction du nombre d'articles qu'elles apportent au corpus, sous la mention « X revues ».*

## III. ÉLÉMENTS UTILISÉS POUR LE PRESENT RAPPORT

Le corpus étant très fourni, il n'était pas envisageable de l'exploiter dans sa totalité, par manque de temps. Sur l'ensemble des références ayant pu être téléchargées et hors mis les sites internet (catégorie 8), 307 références ont été utilisées, soit 65 % de ce sous-corpus de 472 références.

Compte tenu du nombre élevé d'articles scientifiques au sein du corpus, c'est ce type de publication qui a été le plus utilisé (207 articles) (cf. Figure 9). Par ailleurs, les articles scientifiques représentent 62 % de

toutes les références utilisées. Dans le même temps, cette catégorie laisse aussi le potentiel le plus important de références (129) à exploiter éventuellement ultérieurement.

La partie II, qui couvre un champ large (impacts du changement climatique contemporain) et ressort comme la partie la plus longue du rapport, est assez logiquement celle aussi qui mobilise le plus de références (cf. Figure 10).

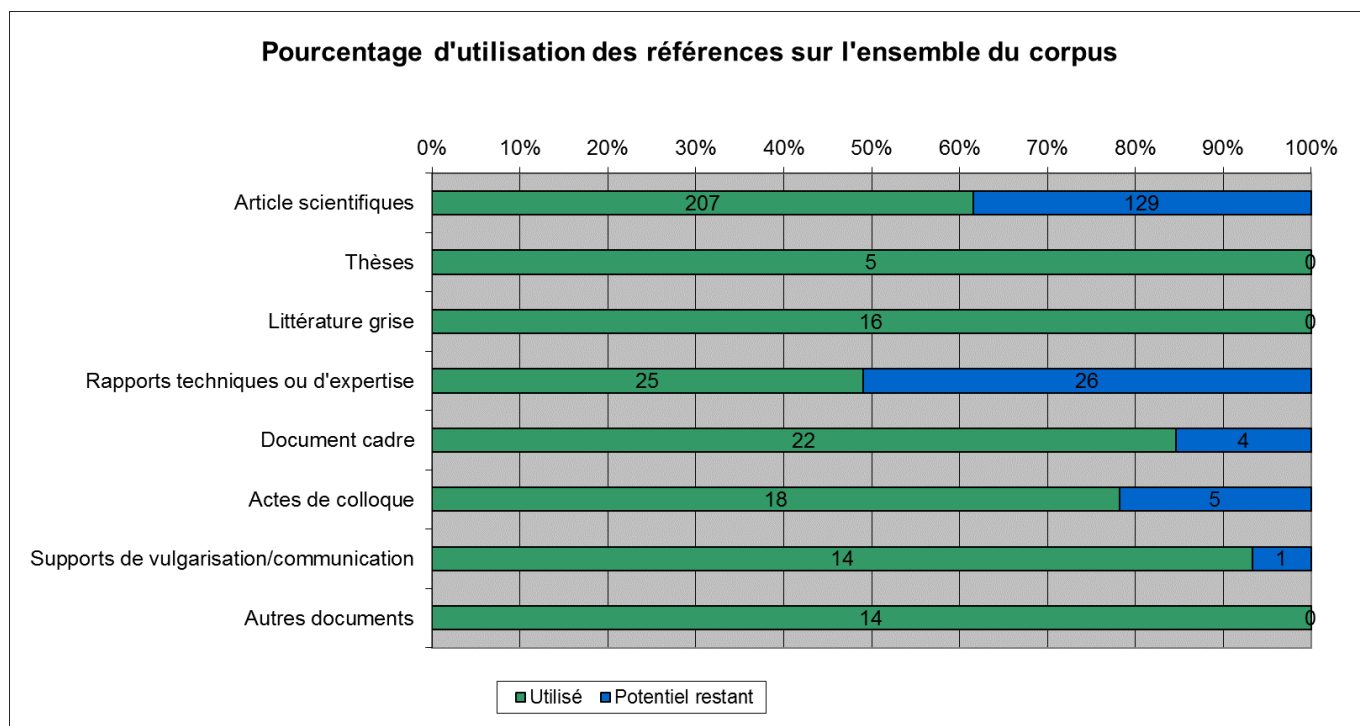


Figure 9 : Pourcentage d'utilisation des références téléchargées pour chaque catégorie du corpus.

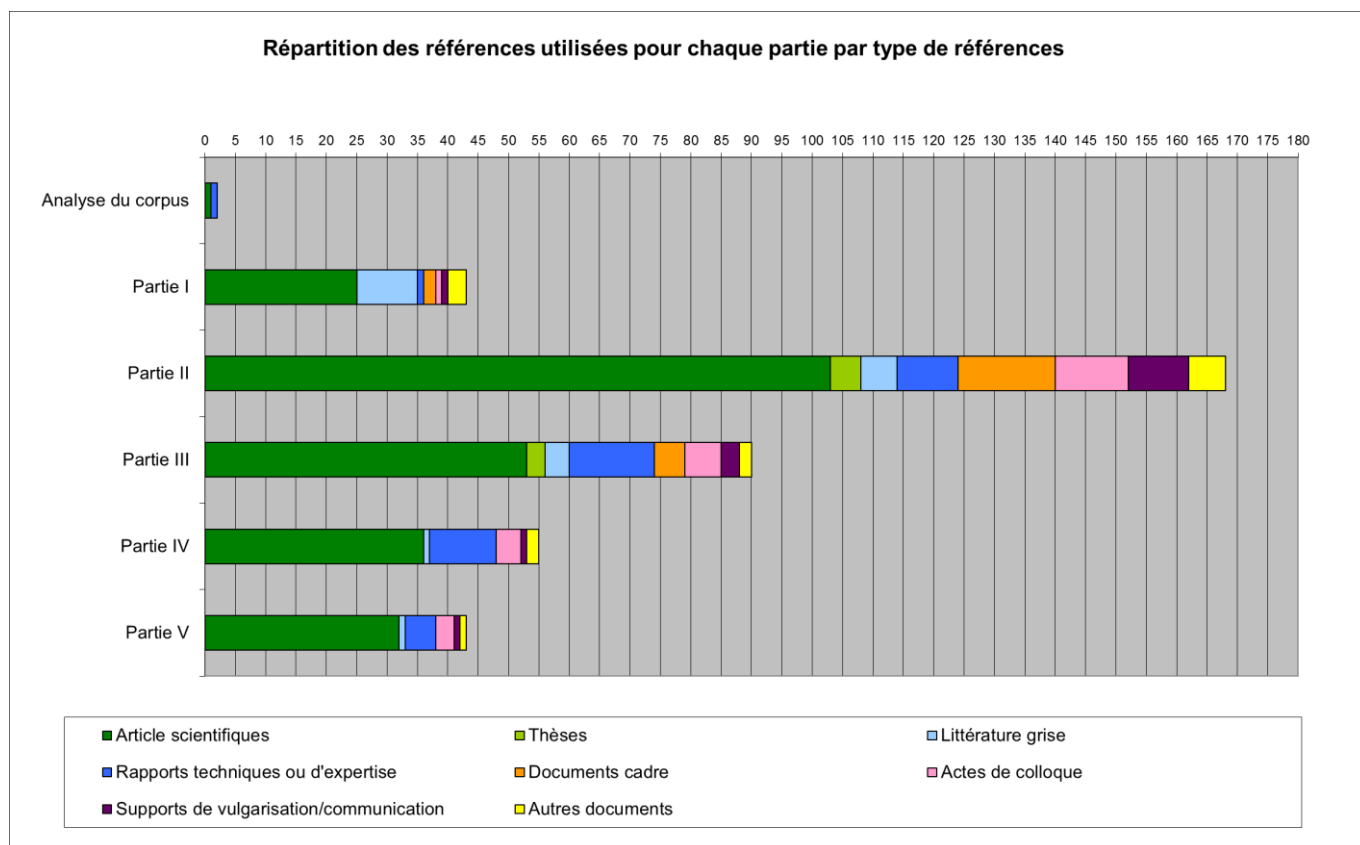


Figure 10 : Pourcentage d'utilisation des références téléchargées pour chaque partie du rapport. *Le contenu de chaque partie est décrit au §II.2.2.*

Au sein de la catégorie des articles scientifiques, le choix des articles à utiliser pour chaque thème s'est fait de manière :

- à exploiter en priorité les thèmes directement en lien avec le sujet,
- à mobiliser en priorité les articles récents ou qui s'avèrent uniques dans leur objet d'étude,
- à avoir une multiplicité d'auteurs sur tous les articles utilisés,
- à ne laisser aucun thème inexploité (le minimum est de 37 % d'exploitation).

Au final, le niveau d'exploitation des articles au sein de chaque thème est en moyenne de 67 %.

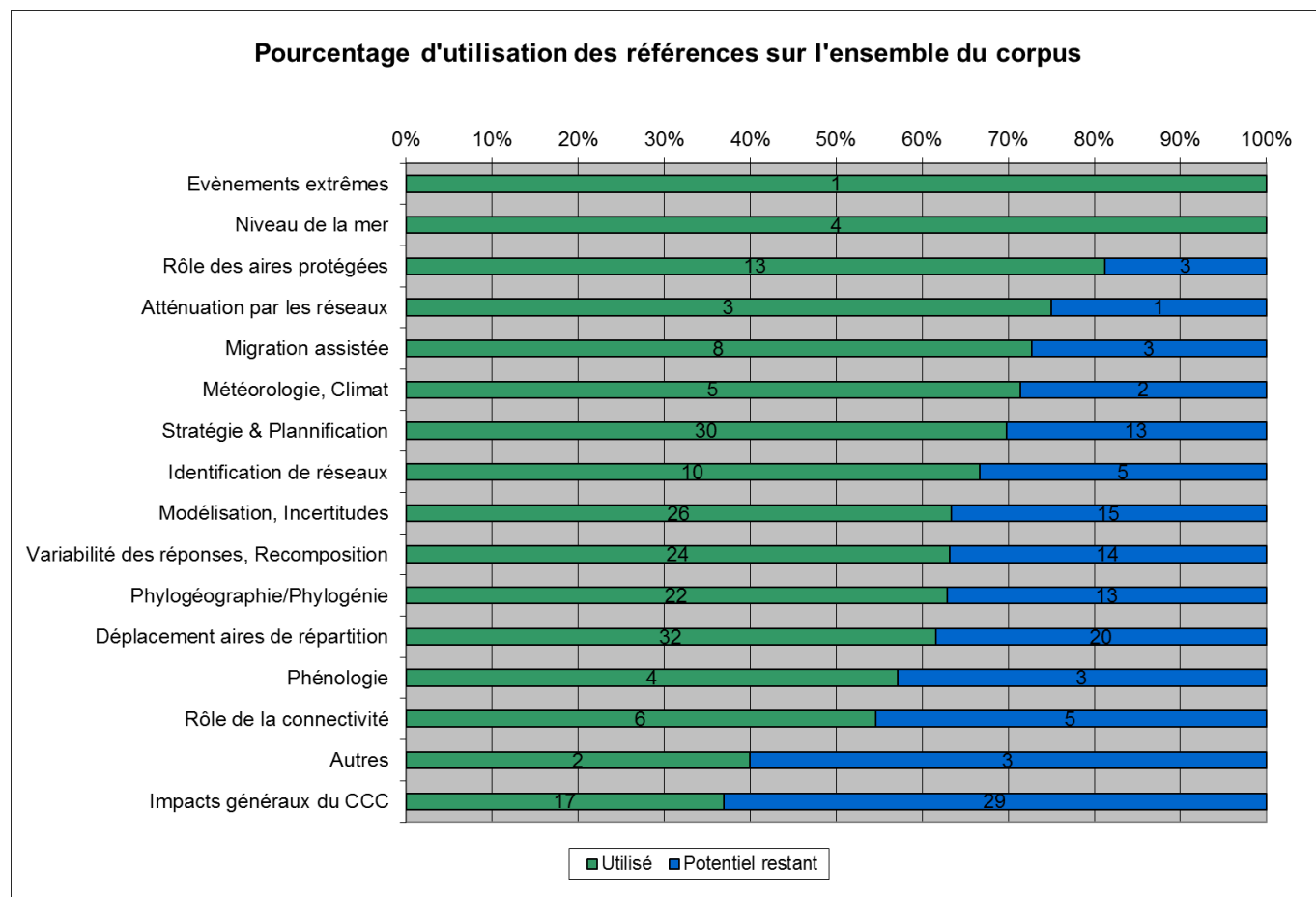


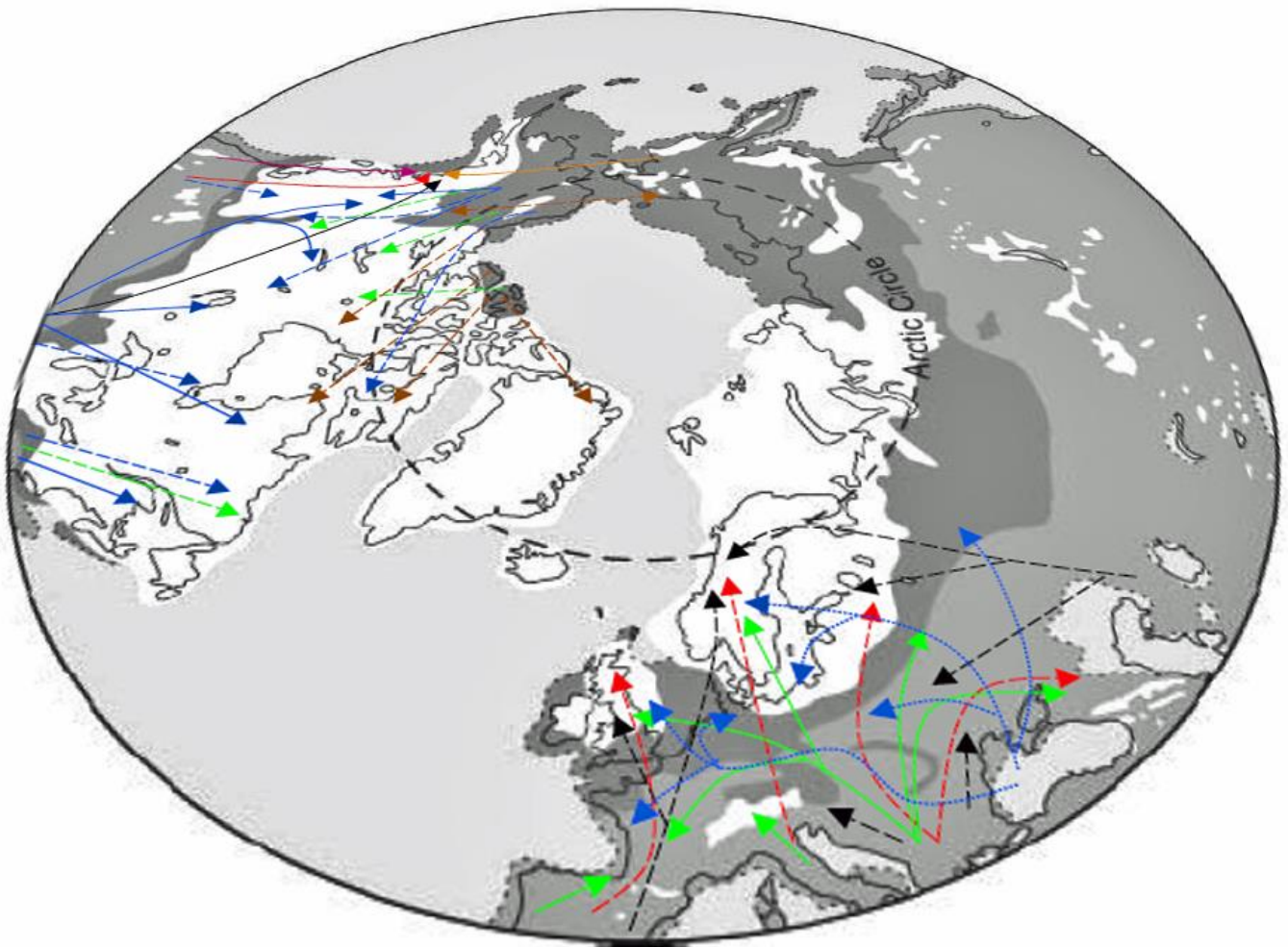
Figure 11 : Pourcentages d'utilisation des références téléchargées au sein des articles scientifiques, répartis par thème.

**- PARTIE 1 -**

**DE LA METEOROLOGIE AU CLIMAT :**

**QUELLE INFLUENCE SUR LES**

**DEPLACEMENTS ?**



## RESUME DE LA PARTIE 1

**L**a météorologie et le climat s'étudient sur la base de paramètres semblables (température, précipitation, humidité, ...) mais ils diffèrent concernant les échelles de temps et d'espace auxquelles ils opèrent.

La météorologie conditionne les déplacements routiniers ou saisonniers des espèces. La faune comme la flore sont touchées par les variations de températures et de précipitations mais une multitude de stratégies cohabitent, par exemple pour le passage de la saison hivernale.

Le climat se constate à l'échelle du temps long et sur des espaces larges et il détermine ainsi en grande partie les aires de répartition de la faune et de la flore. En France, on recense cinq grands types de climat sur lesquels se superposent peu ou prou des enveloppes biogéographiques.

En un point donné, le climat varie entre autres sous l'effet de paramètres astronomiques cycliques (inclinaison de la Terre, ...) qui font alterner des périodes glaciaires et interglaciaires. Dans le passé ces variations naturelles ont été à l'origine de mouvements importants d'aires de répartition (étudiés par la phylogéographie). Se rétractant dans des zones refuges en périodes glaciaires, les espèces qui survivent recolonisent ensuite l'espace en période interglaciaire et on constate que ces déplacements se sont faits en suivant des routes relativement bien définies. Ces régressions/transgressions sont un moteur de la spéciation que l'outil génétique permet aujourd'hui de mettre en évidence (phylogénie).

# I. INFLUENCE DE LA METEOROLOGIE

## I.1. Qu'est-ce que la météorologie ?

Au sens courant, la météorologie représente essentiellement la science appliquée qui étudie la moyenne atmosphère et surtout la basse atmosphère terrestres ainsi que les phénomènes qui s'y produisent. La météorologie s'intéresse ainsi à des variables quantifiées au sol, parmi lesquelles la direction et la vitesse du vent, la pression atmosphérique, la température, l'humidité de l'air, les précipitations (Source : Météofrance).

Nous aborderons ici uniquement la température et les précipitations qui constituent les deux principaux facteurs pouvant influencer les flux d'espèces.

## I.2. La température et son influence sur les déplacements

### I.2.1. Importance de la température dans le cycle de vie

Chez la faune, la température est un paramètre majeur pour le métabolisme des individus. Elle conditionne les fonctions essentielles de survie (respiration, alimentation) et la reproduction.

La température représente également un facteur limitant de toute première importance pour la flore. Elle contrôle là-aussi l'ensemble des phénomènes métaboliques. Sans chaleur, le développement des plantes est impossible. A très basse température, les échanges entre le sol et les plantes sont compromis et les fonctions physiologiques principales sont bloquées ou fortement ralenties. L'assimilation chlorophyllienne (photosynthèse) et la respiration sont très réduites ou annulées.

### I.2.2. Variations naturelles de la température et stratégies développées au cours de l'évolution

La température, dictée essentiellement par l'ensoleillement, varie naturellement au cours d'une journée (rythme circadien : alternance jour/nuit) et au cours d'une année (rythme circanien : alternance des saisons) en un lieu donné, sous l'effet de plusieurs facteurs (atmosphériques comme astronomiques). Face à ces variations naturelles, différentes stratégies ont été mises en place au cours de l'évolution.

> Pour la faune

On distingue principalement :

- les organismes **homéothermes** : leur température corporelle est constante. On différencie alors :

- les endothermes chez qui la régulation de cette température corporelle se fait par le métabolisme interne,

- les ectothermes chez qui la régulation se fait par une source de chaleur extérieure au corps (par exemple les héliothermes se réchauffent par le soleil). Généralement, ces animaux vont entrer en léthargie, cachés, lorsque les températures extérieures ne permettent plus cette régulation (cas des amphibiens par exemple),

- les organismes **hétéothermes** : ils peuvent cesser volontairement de réguler leur température dans un souci coût/bénéfice lors de la mauvaise saison. C'est le cas des espèces hibernantes (ex : Marmotte des



Alpes *Marmota marmota*) et des espèces hivernantes (ex : Ours brun *Ursus arctos*). La différence entre hivernants et hibernants tient au degré d'activité et de vigilance maintenu pendant cet état, allant de la somnolence pour les premiers au sommeil profond pour les seconds,

- les organismes **poikilothermes** : pas de régulation ni intérieure ni extérieure, les individus sont donc plongés en léthargie dès que leur environnement descend en dessous d'une certaine température et se remettent en activité dès que la température extérieure le leur permet. Exemple : les chiroptères et tous les invertébrés.

Il faut noter que cette classification est difficile à établir et peut être organisée autrement selon les auteurs. Dans tous les cas, l'existence de stratégies différentes va :

- tout d'abord influencer sur le choix des milieux occupés par les espèces. Par exemple, les espèces ectothermes héliothermes auront une affinité pour les milieux plutôt chauds et secs, dits thermophiles,

- également **engendrer des comportements variés sur les déplacements** des individus et des populations.

> Pour la flore

La flore ne régule pas sa température. Chaque espèce végétale possède une température optimale qui convient à son développement et à sa croissance en un moment donné et cette température idéale se trouve à l'intérieur d'un intervalle de tolérance plus ou moins grand. Les plantes qui supportent un large écart de température sont dites eurythermes, celles qui ne supportent pas de fortes variations de température sont dites des sténothermes.

De plus, la flore est majoritairement fixe. Pour passer la saison des basses températures (hiver), les végétaux vont donc utiliser des ajustements morphologiques et physiologiques. Les espèces réduisent leur métabolisme, entrent en dormance ou encore passent la mauvaise saison à l'état de graines. Ces différentes stratégies de survie pendant la saison défavorable ont été répertoriées pour les angiospermes par Raunkier, qui a distingué :

- les **phanérophytes** : le végétal passe l'hiver avec des bourgeons écailleux situés à plus de 25 cm du sol (tous les arbres à feuillage caduc ou persistant),

- les **chaméphytes** : le végétal passe l'hiver avec des bourgeons situés entre 0 et 25 cm du sol et donc protégés par la couche de neige isolante lorsqu'elle existe (tous les buissons),

- les **hémicryptophytes** : le végétal passe l'hiver avec des bourgeons situés au niveau du sol, protégés par la neige ou le sol lui-même (végétaux acaules),

- les **cryptophytes** qui regroupent les géophytes (végétal dans le sol : tous les bulbes, rhizomes, tubercules), les hydrophytes (bourgeons sous l'eau avec feuilles immergés) et les hélrophytes (bourgeons sous l'eau mais feuilles émergées),

- les **thérophytes** : pas de bourgeons car le végétal passe l'hiver à l'état de graine (tous les ans pour les végétaux annuels et la deuxième année pour les végétaux bisannuels).

### 1.2.3. Impacts sur les déplacements

Malgré ces différentes stratégies, les individus peuvent être impactés par les variations, habituelles ou inhabituelles, des températures. Ces variations peuvent avoir une influence forte sur les déplacements des individus, qui constituent le sujet central des réseaux écologiques.

Une liste exhaustive de ces conséquences est difficile à dresser mais quelques grands phénomènes sont répertoriés dans cette partie.

## > Pour la faune

Les synthèses bibliographiques rédigées par le SPN et l'Opie en 2012-2013 sur 39 espèces de cohérence nationale de la TVB ont permis de disposer de plusieurs exemples parlant sur ce sujet. On peut notamment citer :

- **une altération des facultés mêmes de locomotion** : l'enneigement (durée, hauteur) représente par exemple un réel frein au déplacement du Cerf élaphe (*Cervus elaphus*) (Sweeney & Sweeney, 1984 in Sordello, 2012a). On considère ainsi que les sites avec plus de 70 cm de neige sont rarement utilisés et s'ils le sont, cette épaisseur constitue un sérieux handicap pour le Cerf car les individus ne peuvent se déplacer que par bonds. Une épaisseur de 40 cm ne constitue pas un handicap physique pour le Cerf élaphe dans ses déplacements mais provoque une mise en mouvement vers des zones moins enneigées,

- **un accès limité à la nourriture, ce qui peut forcer les individus à se déplacer pour aller chercher d'autres sites** : chez la Loutre d'Europe (*Lutra lutra*) par exemple, en cas de cours d'eau gelés, les individus effectuent des déplacements de plusieurs kilomètres pour se rabattre sur des proies terrestres (oiseaux et mammifères) ou sur les milieux aquatiques restés hors gel ce qui peut amener à des concentrations d'individus en certains lieux (Étienne, 2005 in Sordello, 2012f),

- **une influence sur le développement des juvéniles et donc sur l'âge et le déroulement de la dispersion** : chez le Lézard vivipare (*Zootoca vivipara*), la dispersion des juvéniles est influencée par les conditions de température et d'humidité vécue par la mère pendant la gestation (Massot *et al.*, 2002 in Sordello, 2012e),

- **une influence sur la température corporelle des espèces hétérothermes les obligeant à thermoréguler plus ou moins et donc jouant sur leur temps disponible pour la quête de nourriture ou de partenaire** : chez le Lézard ocellé (*Timon lepidus*) par exemple, en mai-juin, les besoins de régulation thermique devenant accessoires, les individus ont plus de temps pour se déplacer et vont donc plus loin (Cheylan & Grillet, 2004 in Rogeon & Sordello, 2012),

- **une influence sur les mouvements saisonniers ou migratoires** : par exemple, le Pic cendré (*Picus canus*) est susceptible d'effectuer des déplacements de la montagne vers la plaine en période hivernale (Sordello, 2012h). De la même façon, dans les régions montagneuses, des mouvements de transhumance sont observés chez le Cincle plongeur (*Cinclus cinclus*) lors des périodes de gel hivernal, avec reflux dans les parties basses des vallées et en bordure de lacs aux eaux restées libres ((Anonyme 1, à paraître ; Géroutet, 2010 ; Yeatman-Berthelot & Jarry, 1991) in Sordello, 2012c),

- **des déplacements spontanés** : par exemple, le déplacement de Grands rhinolophes (*Rhinolophus ferrumequinum*) est possible en pleine hibernation sous l'effet de perturbations météorologiques importantes ou répétées, qui amènent les individus à entreprendre brutalement des mouvements de masse ((Arthur & Lemaire, 2009a ; Arthur & Lemaire, 2009b) in Sordello, 2012d),

- **des déplacements pour le choix du gîte** : chez le Grand rhinolophe, le choix du site d'hibernation est fonction de l'hygrométrie et de la température (optimum entre 7 °C et 9 °C) ((Arthur & Lemaire, 2009 ; Stebbings, 1988 in Sierro *et al.*, 2009) in Sordello, 2012d). Selon la douceur de l'hiver, les individus peuvent temporairement hiberner sous des charpentes et non en cavités souterraines où l'hibernation a lieu dans le cas général (Arthur & Lemaire, 2009b in Sordello, 2012d). Ce phénomène est constaté en Bretagne par

exemple. Le choix du type de gîtes de mise bas par les femelles rencontre également des contraintes climatiques car les femelles ont besoin d'une température maintenue au-dessus de 25 °C et les gîtes adéquats sont donc différents selon la situation géographique. Dans le Sud, on retrouve ainsi surtout des sites hypogés de type grottes, mines ou caves de château. Dans le Nord, la thermorégulation est apportée par le groupe serré en essaim mais cette thermorégulation devient parfois difficile à assurer compte tenu du faible nombre d'individus que comportent aujourd'hui certaines colonies ayant régressé ; dans ces cas, les individus sont contraints à l'exode vers des lieux plus chauds.

Il est intéressant de constater que tous les types de stratégies de régulation thermique évoqués plus haut peuvent être impactés.

Enfin, il faut citer les espèces migratrices qui, elles, utilisent systématiquement le déplacement pour résoudre les problèmes liés à la saison défavorable : elles migrent vers des régions où le climat est plus clément pendant l'hiver (oiseaux, certains mammifères, ...) afin de disposer tout au long de l'année d'un accès aux ressources (notamment alimentaires).

> Pour la flore :

Comme dit précédemment la flore est majoritairement fixe. Ainsi, les variations de température au cours du jour et de l'année ne vont pas provoquer de déplacements des individus. Les adaptations seront essentiellement physiologiques et morphologiques.

En revanche, les flux chez la flore se font principalement par transport de propagules émis par les individus fixes : gamètes, grains de pollens, graines. Les variations de température peuvent alors agir sur ces transports.

En effet, ce transport se fait souvent par un vecteur animal, dans le cadre d'une relation mutualiste entre une plante et un insecte par exemple. Les variations de températures peuvent donc indirectement impacter la flore si les déplacements des animaux pollinisateurs ou disperseurs de graines sont eux-mêmes altérés (Kiers *et al.*, 2010).

### **I.3. La pluviométrie et son influence sur les déplacements**

#### **I.3.1. Dépendance à l'élément eau**

> Pour la faune

Pour la faune, l'eau est un élément vital, qui compose majoritairement le corps des individus et qui est indispensable au métabolisme. Au-delà de cette nécessité constitutionnelle, d'autres dépendances vis-à-vis de la disponibilité en eau peuvent survenir, de façon différente selon les espèces. Globalement, nous pourrions convenir de la typologie suivante :

- les espèces pour lesquelles l'eau est leur milieu de vie stricto sensu (espèces aquatiques telles que les poissons),

- les espèces pour lesquelles l'eau est un milieu de vie parmi d'autres, intervenant à un moment donné du cycle biologique. C'est le cas par exemple des espèces amphibiens qui nécessitent des milieux aquatiques pour leur reproduction puis des milieux terrestres (restant globalement frais/humides) le reste du temps. On peut aussi citer les Odonates chez qui l'état larvaire est aquatique alors que l'imago est terrestre (aérien). Chez les amphibiens, l'état larvaire est totalement aquatique alors que l'état adulte est amphibie,

- les espèces dépendant d'autres espèces, qui, elles, dépendent de milieux aquatiques ou humides (notamment leurs proies) (exemple : le Balbuzard pêcheur (*Pandion haliaetus*) qui est terrestre (aérien) et se nourrit de poissons),

- les espèces se servant du réseau hydrographique comme d'un repère pour leurs déplacements (oiseaux terrestres pendant leur migration par exemple).

Certaines espèces répondent aussi aux différents items. Par exemple, le Cincle plongeur, peut pénétrer dans l'eau occasionnellement, prélève des proies aquatiques et se sert du réseau hydrographique comme d'un fil conducteur pour ses déplacements.

A l'inverse, certaines espèces de faune sont xérophiles c'est-à-dire qu'elles sont capables de vivre dans des milieux particulièrement secs, grâce à des adaptations anatomiques et physiologiques.

> Pour la flore

Pour la flore, l'eau constitue également un élément fondamental pour le métabolisme des individus. L'eau est l'une des matières premières indispensables à la photosynthèse des végétaux chlorophylliens. Par ailleurs, la transpiration des végétaux par les parties aériennes est le moteur de la circulation de la sève brute (eau + minéraux) puisée depuis le sol par les racines. Les végétaux sont constitués en grande majorité d'eau notamment emmagasinée au niveau cellulaire dans les vacuoles. C'est la pression de l'eau dans ces vacuoles sur le squelette des cellules qui permet aux végétaux la turgescence de leurs tissus et donc leur port dressé, notamment pour les premiers stades tissulaires avant que les composés rigides (lignine) se forment. L'eau est donc une ressource fondamentale.

Or l'eau utilisée par les végétaux est principalement issue des précipitations, soit directement (ruissellement, partie superficielle du sol, ...) soit accumulée sur le long terme (nappe phréatique).

Comme pour la faune, au-delà de cette nécessité constitutionnelle, la dépendance à l'eau sera également variable chez la flore en fonction du caractère terrestre, aquatique (végétaux hydrophiles) ou intermédiaire des végétaux. Parmi les végétaux les plus étroitement liés à l'eau, on distingue généralement :

- les végétaux amphibies qui affectionnent les milieux semi-aquatiques,
- les végétaux hygrophiles qui affectionnent les milieux humides,
- les végétaux ombrophiles qui préfèrent les stations de pluviosité les plus fortes.

Les végétaux xérophiles, eux, sont au contraire capables de vivre dans des environnements très secs.

### **1.3.2. Impacts sur les déplacements**

Il existe tout d'abord un lien évident entre température et eau. Cela a pu être vu par les illustrations précédentes, par exemple concernant l'influence du phénomène neigeux qui est à la rencontre des paramètres température/précipitation. Cependant, l'enjeu eau/précipitation peut être isolé de celui des températures dans certains aspects.

Au regard des besoins énoncés ci-dessus, la pluviométrie engendre des conséquences sur la survie de nombreux taxons, et par là même est un facteur à prendre en compte pour un réseau écologique. Voici ci-dessous quelques cas d'illustration.

> Pour la faune :

- **Cas du Pélodyte ponctué (*Pelodytes punctatus*)** : Le Pélodyte ponctué est un amphibien se reproduisant dans les points d'eau temporaires. De ce fait, le début de la période de reproduction chez ce crapaud est fortement influencé par les conditions météorologiques (ACEMAV, 2003 *in* Sordello, 2012g). Comme pour tout amphibien, le développement des œufs et la durée de la phase larvaire dépendent grandement de la température de l'eau (Jourdan, 2010 *in* Sordello, 2012g). En revanche, le caractère temporaire recherché des points d'eau fait que cette espèce est fortement dépendante des précipitations. Les études montrent en effet que les populations sont dépendantes de fortes pluies pour la ponte (Salvidio *et al.*, 2004 *in* Sordello, 2012g). Dans la région méditerranéenne par exemple, c'est l'arrivée de fortes précipitations qui déclenche la reproduction ((ACEMAV, 2003 ; Jourdan, 2010) *in* Sordello, 2012g). Par ailleurs, la menace principale qui pèse sur le succès reproducteur du Pélodyte ponctué après la ponte est l'assèchement possible des points d'eau qui, bien que temporaires, doivent rester en eau assez longtemps pour que le développement des têtards puisse arriver à terme (Morand & Joly, 1995 *in* Sordello, 2012g).

- **Cas du Cincle plongeur (*Cinclus cinclus*)** : Le Cincle plongeur, oiseau lié au milieu aquatique, peut être amené à effectuer des déplacements spontanés selon le niveau des eaux (sécheresse ou crue). Par exemple, dans les régions au relief peu marqué, en période d'étiage, la recherche d'eau courante conduit le Cincle plongeur à se regrouper sur les rivières plus importantes ; au contraire, lors des crues prolongées, il remonte les petits affluents ((Anonyme 1, à paraître ; Yeatman-Berthelot & Jarry, 1991) *in* Sordello, 2012c).

> Pour la flore

Pour la flore, l'impact de la pluviométrie sur les déplacements est moins intuitif et moins abordé dans la littérature. Néanmoins, on peut évoquer les conséquences de la pluviométrie sur la dispersion du pollen et la dissémination des graines lorsque celles-ci se font par vecteur aquatique (respectivement hydrogamie et hydrochorie). La météorologie pluvieuse limite également les déplacements des insectes (Cormont *et al.*, 2011) et ce faisant doit réduire la pollinisation par entomogamie.

## **II. LE CLIMAT ET LES EFFETS DE SES VARIATIONS**

### **II.1. Qu'est-ce que le climat ?**

#### **II.1.1. Des conditions météorologiques au climat**

Le climat se définit à travers des moyennes, des régularités (Joly *et al.*, 2010). Il correspond donc en quelque sorte à des **conditions météorologiques moyennes**. Par conséquent, un climat se décrit à l'aide des mêmes facteurs que la météorologie (la température, les précipitations, la pression atmosphérique, l'ensoleillement et la vitesse du vent) mais la climatologie se distingue de la météorologie par l'échelle temporelle prise en compte. Le climat est un facteur global et stable sur une période plus large que la météorologie alors que cette dernière porte, comme vu jusqu'ici, sur le court terme avec des variabilités journalières ou saisonnières. La notion de variabilité (et donc d'écart à la moyenne) reste néanmoins importante aussi pour le climat, à travers notamment les événements climatiques extrêmes.

Le climat se définit dans le temps (enchaînements caractéristiques de rythmes et de cycles) mais aussi dans l'espace (Joly *et al.*, 2010), sur une région donnée.

De fait, un lien entre espace et temps semble ainsi se dégager, y compris sur le plan des déplacements. A mesure que du recul est pris en terme d'échelle d'espace, la plage temporelle à considérer s'élargit également (cf. Tableau 2).

Échelle de temps	Échelle d'espace	Type de déplacement	Pour quoi ou pourquoi	Dicté par
Circadien (24h)	Domaine vital (en tout ou partie)	Routiniers	Se nourrir, Se reposer, ...	Météorologie et ses variations journalières, cycle jour/nuit
Circannuel (1 an)	Aire de reproduction/Aire d'hivernage	Migration, mouvements saisonniers	Suivre les conditions optimales sur 1 an	Météorologie et ses variations saisonnières
Long terme	Aire de répartition	Extinction/Colonisation	Adaptation, Spéciation	<b>Le climat et ses variations</b>

Tableau 2 : Lien espace-temps entre météorologie/climat d'un côté et déplacements d'espèces de l'autre.

Les facteurs temps et espace sont ainsi corrélés : à large échelle d'espace, par exemple la répartition des espèces et le déplacement de ces aires de répartition, ce sont donc des facteurs à large échelle de temps qui œuvrent. L'échelle individu, voire même population, est donc davantage concernée par les variations météorologiques alors que les échelles écosystème/aire de répartition sont plutôt concernées par les variations climatiques.

Les travaux de Piedallu *et al.* (2009) illustrent bien le fait que paramètres climatiques peuvent ainsi conditionner directement la répartition des flores. Les auteurs ont étudié la distribution de 4 essences communes de forêt : l'Épicéa (*Picea abies*), le Sapin (*Abies alba*), le Hêtre (*Fagus sylvatica*), et le Chêne sessile (*Quercus petraea*). Leur distribution pour la période 1961-1990 a été modélisée et cartographiée à l'échelle du territoire français. Les modèles réalisés montrent un effet à la fois des températures et de la ressource en eau et de l'engorgement des sols comme déterminants dans la répartition de ces 4 espèces.

### II.1.2. Les différents climats en France et la répartition des espèces

> Cinq grands types de climat

Essentiellement balayée par des vents chargés d'humidité venus de l'Atlantique et à l'abri des invasions d'air froid en provenance de l'Arctique, la France bénéficie d'un climat dit « tempéré » (cf. Figure 12). Toutefois, les trois façades maritimes (Manche, Atlantique et Méditerranée) et les trois importants massifs montagneux (Pyrénées, Massif central, Alpes) confèrent à notre pays une grande diversité de climats régionaux.

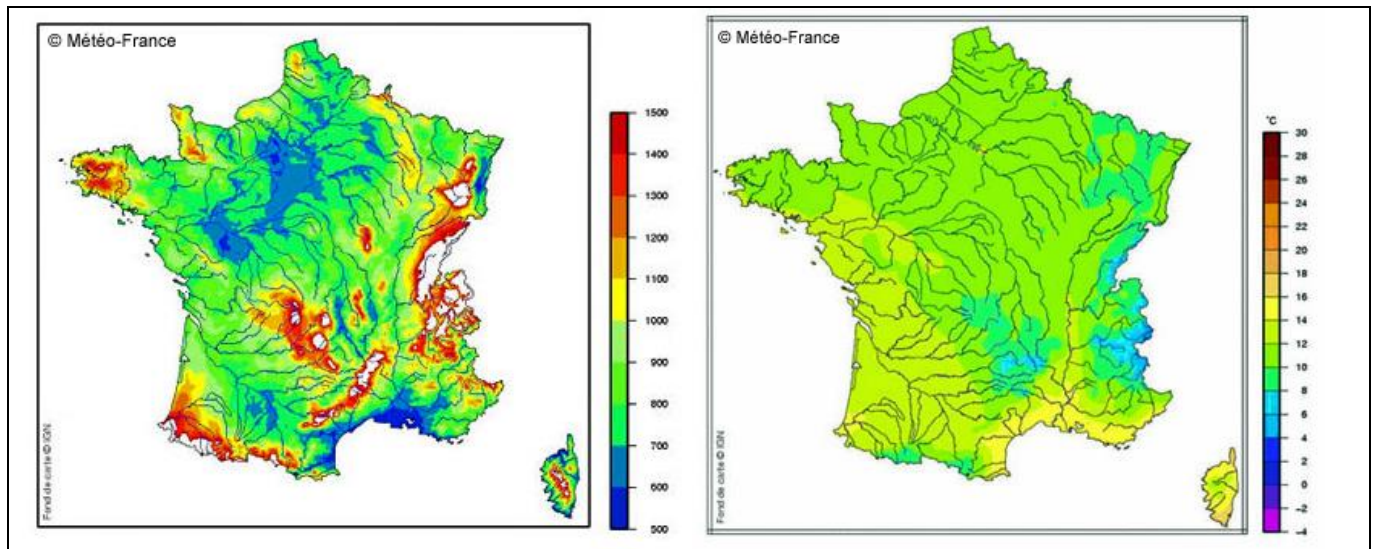


Figure 12 : Pluviométrie (à gauche : Précipitations cumulées sur l'année en mm (normale 1981 - 2010)) et températures (à droite : Température moyenne annuelle (normale 1981 - 2010)) en France.  
Source : Météofrance.

En première approche, on distingue ainsi cinq grands types de climats en France métropolitaine (Source Météofrance) (cf. Figure 13) :

- **climat océanique** : températures douces ; pluviométrie relativement abondante et bien répartie toute l'année. On retrouve ces caractéristiques tout le long des côtes atlantiques avec des températures qui croissent du Nord au Sud,

- **climat océanique plus ou moins altéré** : il s'agit d'un climat océanique en transition vers un climat continental du fait de l'éloignement de la mer (bassin parisien, champagne, ...) ou vers un climat montagnard du fait de la proximité aux reliefs (contreforts du Massif central),

- **climat d'influences continentales sensibles** : températures chaudes l'été et hivers rudes avec un nombre de jours d'enneigement ou de gel important. Pluviométrie annuelle relativement élevée avec précipitations souvent importantes l'été sous forme d'épisodes orageux. Concerne globalement le quart nord-est de la France,

- **climat de montagne** : variations thermiques très importantes au cours de l'année et même au cours d'une journée. Les vents et les précipitations sont directement soumis à des effets locaux. Se retrouve dans les grands massifs de France (Vosges, Jura, Alpes, Pyrénées, Massif central, montagnes corses),

- **climat méditerranéen** : propre au pourtour méditerranéen et au littoral corse. Région sous influence de la mer méditerranée, chaude et protégée des masses d'airs venues de l'atlantique ou du Nord par le relief. Ensoleillement important ; hivers doux et été chauds. Globalement étés très secs et automnes pluvieux mais pluviométrie irrégulièrement répartie sur l'année sous forme de précipitations orageuses.

D'autres classifications plus fines du climat existent pour la France (Joly *et al.*, 2010) et l'Europe (Metzger *et al.*, 2005).

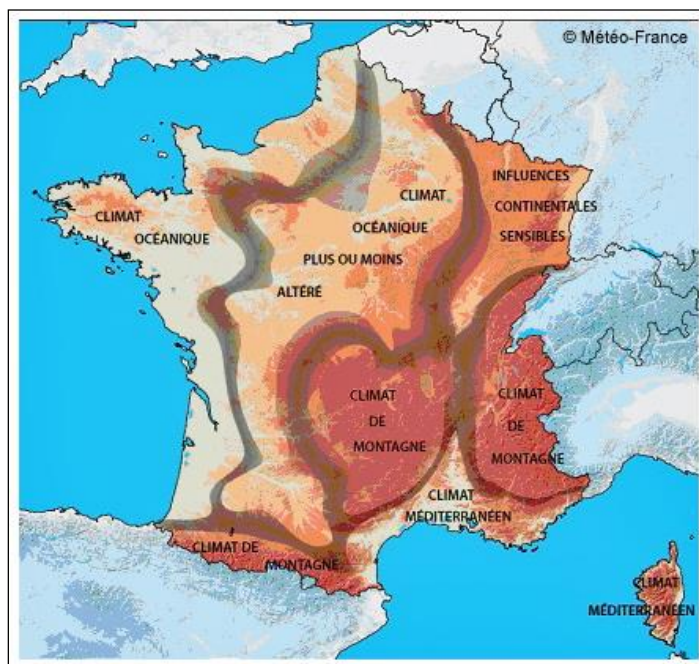


Figure 13 : Les cinq grands climats en France.

Les zones ombrées correspondent à des aires de transition car une délimitation stricte des climats est impossible.

Source : Météofrance.

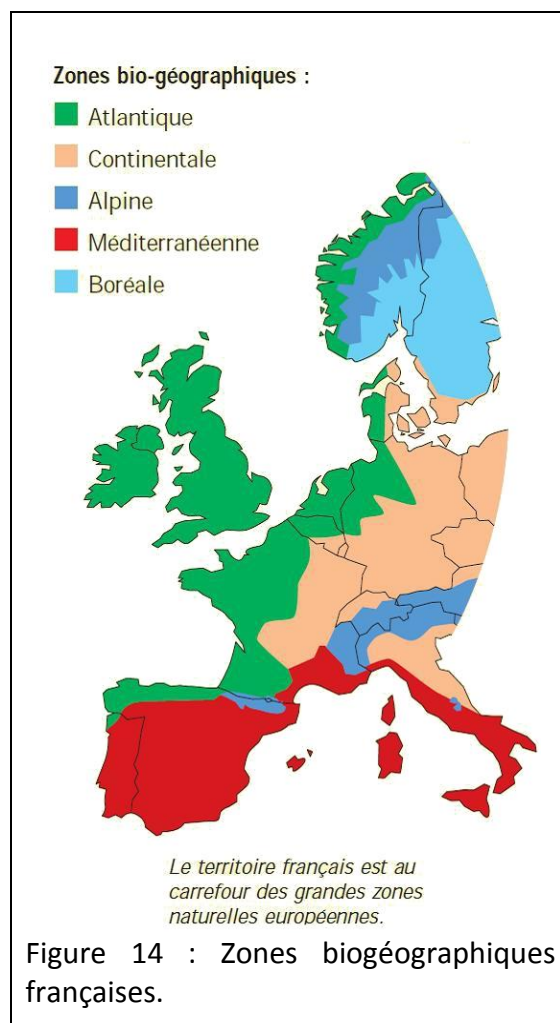
### > Des zones climatiques aux zones biogéographiques

De ces enveloppes climatiques et de leur rôle clef sur la faune et la flore découlent des enveloppes biogéographiques qui s'y superposent peu ou prou. La France est concernée par quatre zones biogéographiques : atlantique, continentale, méditerranéenne, alpine (Source : INPN) (cf. Figure 14).

La **zone atlantique** concerne une grande partie Ouest de la France. C'est le domaine de la plaine et des collines basses, où l'on trouve notamment des forêts de type Chênaies-Charmaies, sur sols riches, à Jacinthe des bois (*Hyacinthoides non-scripta*), des landes plus ou moins humides, sur sols pauvres, à bruyères (*Erica cinerea*, *E. tetralix*, *E. ciliaris*), des grandes cultures, sur limons fertiles, dont la flore compagne s'est malheureusement appauvrie.

La **zone continentale** concerne le quart nord-est et jusqu'au Massif central. C'est le domaine des collines et des moyennes montagnes, où l'on trouve des forêts de type Hêtraies ou Chênaies-Hêtraies, avec des espèces sub-montagnardes, des vallons humides à Carex élevé (*Carex pendula*), des forêts alluviales à Orme lisse (*Ulmus laevis*), des « savarts » sur sols calcaires, des prairies pacagées et de vastes étangs ou lacs artificiels.

La **zone méditerranéenne** sur tout le pourtour de la mer Méditerranée. C'est le domaine de l'Olivier (*Olea europea*),





des Chênes vert et liège (*Quercus ilex*, *Q. suber*), des landes, sur sols acides, à lavande et à Cistes, des garrigues, sur sols neutres ou basiques, à Romarin (*Rosmarinus officinalis*).

La **zone montagnarde** (appelée aussi alpine) concerne les massifs des Alpes et des Pyrénées. C'est le domaine des forêts de Hêtre (*Fagus sylvatica*) ou de conifères (*Picea abies*, *Abies alba*, *Larix decidua*), des pelouses acidiphiles à Carex courbé (*Carex curvula*) et à Fétuques (*Festuca varia*, *F. eskia*, *F. supina*), des brousses à Rhododendron (*Rhododendron ferrugineum*) ou Aulne vert (*Alnus viridis*), des combes à neige et des éboulis à Arabettes (*Arabis alpina*, *A. caerulea*) et Tabouret (*Thlaspi rotundifolium*).

Ces zones biogéographiques sont notamment utilisées par la Directive Habitats-Faune-Flore (réseau Natura 2000 et évaluation d'état de conservation).

### > Microclimats et cortèges d'espèces

Un milieu donné s'inscrit donc dans une enveloppe climatique qui régit de façon moyenne les paramètres météorologiques. Néanmoins, les conditions locales influent également et peuvent aboutir à des mésoclimats et microclimats, créant des disparités à l'intérieur même des zones biogéographiques.

La topographie par exemple est un facteur important qui peut moduler fortement les conditions climatiques d'une station, entre le versant ensoleillé (adret) et le versant ombragé (ubac). L'exposition au vent peut également jouer. Enfin, les conditions édaphiques, c'est-à-dire liées au sol (sol argileux, tourbeux, sableux, ...) sont aussi déterminantes car elles vont entraîner une humidité plus ou moins forte.

De ce fait, il peut donc y avoir des disjonctions assez nettes entre la nature globale d'une enveloppe bioclimatique et certains cortèges d'espèces trouvés localement dans cette enveloppe. On distingue deux grands types de cortèges d'espèces :

- les cortèges d'affinité plutôt **thermophile** qui sont associés à un climat chaud et/ou à des conditions édaphiques sèches,

- les cortèges d'affinité plutôt **cryophile** (aussi dits psychrophiles) qui sont associés à des climats froids et/ou à des conditions édaphiques fraîches.

Par exemple, il est possible de trouver en altitude des crêtes ventées avec des végétations plutôt thermophiles alors que le contexte climatique est globalement froid.

Cette distinction thermophile/cryophile est particulièrement nette, bien qu'avec des exceptions, pour les milieux ouverts. On peut en effet distinguer d'un côté les milieux ouverts thermophiles tels que les pelouses et les landes sèches et de l'autre les milieux ouverts frais/froids tels que les mégaphorbiaies et les prairies mésophiles (Sordello *et al.*, 2011a).

### II.1.3. Le climat varie aussi

Bien que son assiette soit large, le climat varie. Ses variations sont simplement celles du temps long contrairement aux variations météorologiques qui sont celles du temps court à moyen. A l'échelle des temps géologiques, sous l'influence de nombreux facteurs et notamment astronomiques (par exemple l'obliquité de la Terre ou l'excentricité de l'orbite terrestre), le climat a toujours montré des variations dans ses différents paramètres. A notre époque contemporaine, le climat varie aussi sous l'effet des activités humaines (rejets de gaz à effet de serre, utilisation des sols, densité urbaine).

## II.2. Les variations passées du climat et leurs conséquences sur les flux

L'outil moléculaire et les travaux bibliographiques et archéologiques ont permis de reconstituer pour de nombreuses espèces l'histoire de leur répartition mondiale. La science cherchant à reconstituer l'histoire des répartitions est la **phylogéographie**. Ainsi, il apparaît que la répartition des espèces au cours des temps géologiques est directement influencée par les variations cycliques du climat oscillant entre périodes glaciaires et périodes interglaciaires (Schmitt, 2007).

Pour rappel, nous nous situons actuellement dans une période interglaciaire, l'Holocène, débutée il y a 10 000 ans. La fin de la période glaciaire précédente, où le climat s'est donc réchauffé, est appelée le Tardiglaciaire.

### II.2.1. Des zones refuges récurrentes

Au fil des glaciations et des réchauffements, les espèces se sont déplacées pour suivre le climat qui leur convient et leurs aires de répartition se sont remodelées en conséquence, les confinant souvent à des zones refuges.

Pour de nombreuses espèces présentes aujourd'hui en France, on peut ainsi distinguer trois zones européennes ayant joué le rôle majeur de refuge lors des glaciations (Stewart *et al.*, 2010) :

- la **péninsule ibérique**, par exemple pour le Léopard ocellé (*Timon lepidus*) (*in* Rogeon & Sordello, 2012) ou le Pélodyte ponctué (*in* Sordello, 2012g),
- la **péninsule balkanique**, par exemple pour le Léopard vivipare (*Zootoca vivipara*) (*in* Sordello, 2012e),
- la **péninsule italique**, par exemple pour le Cincle plongeur (Hourlay, 2011 *in* Sordello, 2012c).

Ces péninsules, connues comme refuges pour la faune, l'ont également été pour la flore (Cornille *et al.*, 2013 ; Le Gaillard, 2012). Les espèces de forêts tempérées, notamment les chênes, ont en effet été restreintes pendant la dernière glaciation à ces zones favorables du Sud de l'Europe (Brewer *et al.*, 2002). Au Tardiglaciaire, les *Quercus* ont ensuite recolonisé l'Europe d'abord vers le Centre puis vers le Nord (Brewer *et al.*, 2002).

Au final, Hewitt (1999) montre par l'outil génétique que ces péninsules du Sud de l'Europe ont joué un rôle de refuge essentiel pendant la dernière glaciation pour de nombreux taxons, tous groupes biologiques confondus (ex : grillons, tritons, hêtre, aulne, hérisson, rongeurs, ...).

Tout un chapelet de refuges glaciaires pour la flore a également été identifié dans le bassin méditerranéen, et dont quelques zones se situent ainsi dans le sud français des Alpes (Médaille & Diadema, 2009).

Cornille *et al.* (2013) suggèrent également un autre refuge glaciaire, situé autour des Carpates en ce qui concerne le Pommier sauvage (*Malus sylvestris*). Cette hypothèse est également avancée pour d'autres espèces végétales telles que *Alnus glutinosa* (King & Feris, 1998), *Fagus sylvatica* (Magri *et al.*, 2006), *Fraxinus excelsior* (Heuertz *et al.*, 2004).

La localisation de ces refuges est un facteur explicatif de la situation actuelle de bon nombre d'espèces. Wilner *et al.* (2009) ont essayé de reconstituer l'histoire de la répartition du Hêtre (*Fagus sylvatica*) en se basant sur la répartition de 110 espèces végétales associées aux hêtraies. Le maximum d'espèces est présent dans les Alpes du Sud et leur nombre décroît ensuite à mesure que l'on s'éloigne de cette zone. L'Espagne, les Carpates, la Grèce, le Sud des Apennins ressortent comme les zones abritant le plus

d'espèces et certaines se retrouvent même uniquement dans ces secteurs. La distance à ces zones refuges apparaît comme le facteur qui explique le mieux la répartition actuelle de ces espèces associées aux hêtraies, avant même les conditions édaphiques (sol) et l'altitude. Ces résultats mettent en évidence l'importance de la dispersion postglaciaire dans la répartition actuelle des espèces : des espèces peuvent s'avérer aujourd'hui absentes de certaines zones dont les conditions leur sont pourtant favorables.

Par ailleurs, les zones refuges méditerranéennes ont aujourd'hui une diversité et un endémisme élevé. Ceci serait lié à une géomorphologie variée et un étagement du relief ayant permis à la fois de tamponner les effets du climat et un ajustement local rapide des faunes et flores. Des projections du changement climatique montrent que ces zones devraient également subir une hausse plus modérée des températures dans le changement climatique actuel (Iwamura *et al.*, 2013 ; Jansson, 2003).

## II.2.2. Vitesse et voies principales empruntées lors des régressions/transgressions

Après chaque glaciation, les espèces se sont redéployées à partir de leurs refuges glaciaires, en suivant des routes pour la plupart similaires (Hewitt, 2004b ; Taberlet *et al.*, 1998) (cf. Figure 15). Des espèces ont ainsi recolonisé la France depuis leurs refuges « étrangers », en particulier :

- par les bordures atlantique et méditerranéenne des Pyrénées depuis le refuge ibérique,
- par la bordure méditerranéenne des Alpes depuis le refuge italien,
- par le nord-est de la France en contournant les Alpes depuis les Balkans. C'est le cas du Sonneur à ventre jaune (*Bombina variegata*) par exemple qui est une espèce continentale d'Europe centrale et qui, comme d'autres amphibiens, s'est répandue d'Est en Ouest au Tardiglaciaire en contournant les Alpes par leur façade Nord pour atteindre sa limite occidentale de répartition en France.

Les pollens sont une source importante d'informations sur le passé (Blackmore, 2007). La datation de pollen a notamment permis d'estimer la vitesse de déplacement de plusieurs espèces pendant le Tardiglaciaire. Pour la plupart des espèces étudiées, cette vitesse a été comprise entre 50 m et 500 m par an ((Huntley & Birks, 1983; Bennett, 1986) in Hewitt, 1999). A travers les forêts de plaines, certaines espèces ont atteint des vitesses bien supérieures : de 1,5 km par an pour les pins et le noisetier et 2 km par an pour l'aulne (Hewitt, 1999).

A l'intérieur du pays, le couloir rhodanien a joué un rôle prépondérant au Tardiglaciaire. Pour la flore, il a constitué une voie pour la recolonisation des Alpes (Parisod, 2008). Il a également servi de voie de recolonisation pour des papillons comme *Polyomatus coridon* qui ont étendu leur aire de répartition depuis le Sud vers le Nord de l'Europe (Schmitt & Krauss, 2004).

On constate ainsi que la topographie a conditionné fortement les voies empruntées pour ces ajustements d'aires, qu'il s'agisse des cours d'eau comme des chaînes montagneuses, jouant pour les uns un rôle de « canal support » et pour les autres un rôle de barrières à contourner. Néanmoins, à l'intérieur même des chaînes montagneuses, certaines « routes » ressortent comme certaines voies transalpines qui ont servi au déploiement d'espèces par le sud des Alpes (Parisod, 2008).

Toutes ces voies matérialisent essentiellement des chemins d'extensions pour des espèces qui se sont redéployées depuis leur refuge. Mais, à l'inverse, certaines espèces d'affinité cryophile ont reculé au moment du Tardiglaciaire.

La Chouette de Tengmalm (*Aegolius funereus*) par exemple possède des origines nordiques (Baudvin *et al.*, 1995 in Sordello, 2012b) et est considérée comme une relique glaciaire dans les forêts d'Europe qu'elle occupe aujourd'hui et où elle s'était vraisemblablement réfugiée pendant la dernière période glaciaire

((Mebs & Scherzinger, 2006 ; Ravussin *et al.*, 2001) *in* Sordello, 2012b). En Europe, sa distribution coïncide à quelques nuances près avec celle de l'Épicéa (Anonyme 2, à paraître *in* Sordello, 2012b). En France plus précisément, elle occupe les régions montagneuses (Vosges, Jura, Massif central, Préalpes, Alpes, Pyrénées) et les principaux plateaux de l'Est (Ardennes, plateaux lorrain, champenois et bourguignon, Morvan) ((Anonyme 2, à paraître ; Baudvin *et al.*, 1995) *in* Sordello, 2012b).

Il en est de même pour le Cuivré de la bistorte (*Lycaena helle*), un papillon de milieux froids (espèce dite boréo-montagnarde). En France, ce papillon est lui aussi considéré comme une relique glaciaire. Sa distribution très morcelée, est limitée aux zones montagneuses, avec des populations localisées et souvent peu abondantes. Il est en effet observé dans l'est des Pyrénées, le Massif-Central, le Jura, les Vosges et les Ardennes (*in* Merlet & Houard, 2012). Pendant la dernière période glaciaire le Cuivré de la bistorte possédait une répartition quasi continue à travers l'Europe puis, au Tardiglaciaire, cette répartition s'est décalée vers le Nord (Scandinavie, ...). En Europe centrale, l'espèce a pu essentiellement migrer altitudinalement, expliquant ainsi sa répartition contemporaine restreinte aux massifs montagneux (*in* Merlet & Houard, 2012).

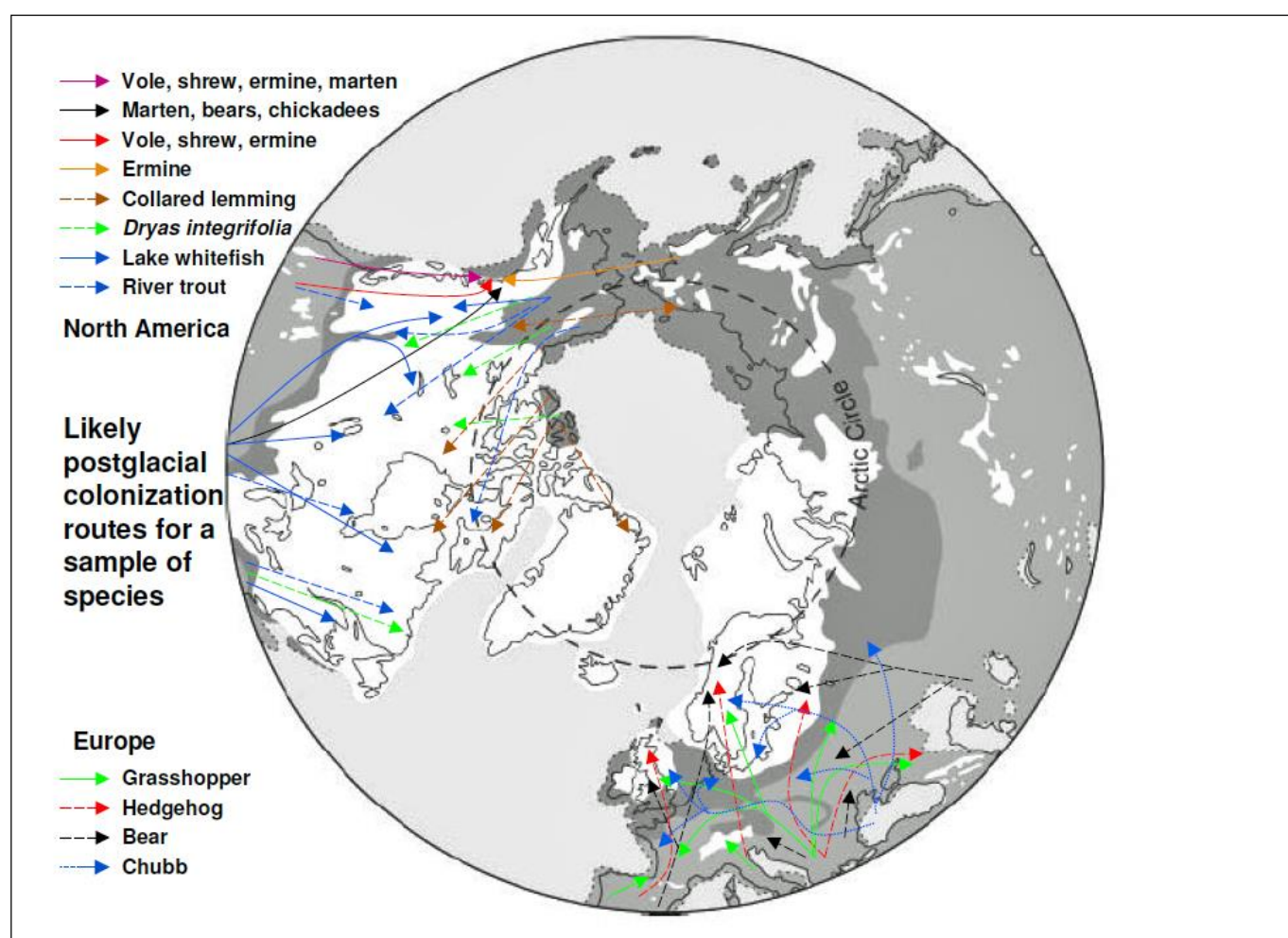


Figure 15 : Voies de colonisation post-glaciaires européennes et nord-américaines déduites à partir de la génétique.

Pour l'Europe, 4 espèces étudiées : Criquet des pâtures *Chorthippus parallelus* (en vert), Hérisson *Erinaceus europaeus/concolor* (en rouge), Ours brun *Ursus arctos* (en noir), Chevaine *Squalius cephalus* (en bleu).

Source : Hewitt, 2004b (licensee BioMed Central Ltd.), Creative Commons Attribution License

### II.2.3. Des conséquences en termes de fragmentation pouvant conduire à des différenciations

Les variations du climat au cours des temps géologiques ont ainsi totalement conditionné la répartition des espèces telles que les humains les ont connues avant que leurs propres pressions (réduction et fragmentation des habitats, pollutions, ...) ne les modifient à leur tour.

Les populations les plus menacées de Lézard vivipare par exemple sont situées en marge méridionale de l'aire de répartition et à basse altitude (Vacher & Geniez, 2010 *in* Sordello, 2012e). Dans ces régions, les biotopes humides favorables ont sans doute été fragmentés naturellement au cours du dernier réchauffement post-glaciaire puis se sont ajoutées ensuite des modifications anthropiques récentes (assèchements des zones humides, ...) (Vacher & Geniez, 2010 *in* Sordello, 2012e).

Parfois, ces isolats ont pu évoluer différemment et une différenciation génétique s'est imprimée au fil des générations. Au final, ces régressions/transgressions dues aux variations du climat ont donc déterminé la diversité génétique des populations que l'on peut mesurer aujourd'hui, via les connexions/déconnexions qu'elles ont entraînées à chaque changement, jouant ainsi sur les brassages (Hewitt, 2004 ; Lascoux *et al.*, 2004). La science qui s'intéresse à l'histoire de l'apparition des lignées évolutives est la phylogénie, souvent mise en regard de la **phylogéographie**.

Pour le Cuivré de la bistorte par exemple, les populations reliques évoquées précédemment, qui sont isolées géographiquement, s'avèrent également génétiquement différenciées (Habel *et al.*, 2010 ; Merlet & Houard, 2012).

En revanche, des exceptions existent. Pour la Chouette de Tengmalm, ses populations reliques de l'aire glaciaire, isolées elles aussi géographiquement, présentent peu de variations génétiques. Ce constat s'explique sans doute par les mouvements fréquents et longues distances dont témoigne cette espèce et qui minimisent les processus de différenciation entre populations (Koopman *et al.*, 2005 *in* Sordello, 2012b).

Pour la flore, une étude montre aussi que la diversité génétique actuelle n'est pas nécessairement située à proximité des refuges glaciaires car des brassages importants ont pu survenir post-glaciation pour certaines espèces (Petit *et al.*, 2003).

Ces isolements créés par ces régressions/transgressions ont pu devenir un moteur de spéciation (Hewitt, 1999). Sans aller jusqu'à l'apparition de nouvelles espèces, ils ont aussi pu conduire à de nouvelles « formes » pour une même espèce. Pour le Lézard vivipare par exemple, les variations passées du climat expliquent l'existence aujourd'hui de deux types de populations, ovipares et vivipares. Durant les glaciations du Quaternaire, deux zones de l'Europe, le sud-est (Péninsule ibérique/Pyrénées) et le sud-ouest (régions des Balkans et sud de la Russie), ont servi de zones refuges aux populations originelles de *Zootoca vivipara*, probablement encore ovipares ((Heulin *et al.*, 1993 ; Surget-Groba *et al.*, 2001) *in* Sordello, 2012e). A cette période, la viviparité serait alors apparue dans les populations balkaniques et aurait été rapidement sélectionnée par l'évolution en raison des avantages qu'elle procure sur la forme ovipare dans la résistance au froid ((Heulin *et al.*, 1993 ; Surget-Groba *et al.*, 2001) *in* Sordello, 2012e). Au radoucissement du climat, les populations vivipares ont alors progressivement (re)colonisé les pays du nord-est et du nord-ouest de l'Europe alors que les populations ovipares sont restées cantonnées dans le Sud-Ouest ((Heulin *et al.*, 1993 ; Surget-Groba *et al.*, 2001) *in* Sordello, 2012e). Ainsi, la forme vivipare s'est massivement installée à travers l'Europe sans établir de contact avec les populations résiduelles ovipares (Heulin *et al.*, 1993 *in* Sordello, 2012e). L'outil génétique a permis de confirmer ce scénario (Surget-Groba *et al.*, 2001 *in* Sordello, 2012e) en démontrant que la viviparité chez *Zootoca vivipara* est intervenue dans le sud-est de l'Europe, pendant le Pléistocène (période des cycles glaciaires du Quaternaire) (Surget-Groba *et al.*, 2001 *in* Sordello, 2012e).

# REFERENCES CITEES DANS LA PARTIE 1

## Articles scientifiques

- BLACKMORE (2007). Pollen and spores: Microscopic keys to understanding the earth's biodiversity. *Plant systematics and evolution*. Numéro 263. Pages 3-12.
- BREWER S., CHEDDADI R., DE BEAULIEU J.-L., REILLE M., Data contributors (2002). The spread of deciduous Quercus through Europe since the last glacial period. *Forest ecology and management*. Numéro 156. Pages 27-48.
- CORMONT A., MALINOWSKA A.H., KOSTENKO O., RADCHUK V., HEMERIK L., WALLIS DE VRIES M.F. & VERBOOM J. (2011). Effect of local weather on butterfly flight behaviour, movement, and colonization: significance for dispersal under climate change. *Biodiversity and conservation*. Volume 20. Numéro 3. Pages 483-503.
- CORNILLE A., GIRAUD T., BELLARD C., TELLIER A., LE CAM B., SMULDERS M.J.M., KLEINSCHMIT J., ROLDAN-RUIZ I. & GLADIEUX P. (2013). Postglacial recolonization history of the European crabapple (*Malus sylvestris* Mill.), a wild contributor to the domesticated apple. *Molecular ecology*. Numéro 22. Pages 2249-2263.
- HABEL J.-C., SCHMITT T., MEYER M., FINGER A., RODDER D., ASSMANN T. & ZACHOS F.-E. (2010). Biogeography meets species conservation: The genetic structure of the endangered lycaenid butterfly *Lycaena helle* (Denis & Schiffermüller, 1775). *Biological Journal of the Linnean Society*. Numéro 101. Pages 155-168.
- HEUERTZ M., HAUSMAN J.-F., HARDY O.J. ET AL. (2004). Nuclear microsatellites reveal contrasting patterns of genetic structure between Western and Southeastern European populations of the common ash (*Fraxinus excelsior* L.). *Evolution*. Numéro 58. Pages 976-988.
- HEWITT G.M. (2004a). Genetic consequences of climatic oscillations in the Quaternary. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*. Numéro 359. Pages 183-195.
- HEWITT G.M. (2004b). The structure of biodiversity – insights from molecular phylogeography. *Frontiers in Zoology*. Volume 1. Numéro 4. Pages 1-16.
- HEWITT G.M. (1999). Post-glacial re-colonization of European biota. *Biological Journal of the Linnean Society*. Numéro 68. Pages 87-112.
- IWAMURA T., GUISAN A., WILSON K.A. & POSSINGHAM H.P. (2013). How robust are global conservation priorities to climate change?. *Global Environmental Change*. Numéro 23. Pages 1277-1284.
- JANSSON R. (2003). Global patterns in endemism explained by past climatic change. *Proceedings of the royal society b-biological sciences*. Numéro 270. Pages 583-590.
- JOLY D., BROSSARD T., CARDOT H., CAVAILHES J., HILAL M. & WAVRESKY P. (2010). Les types de climats en France, une construction spatiale. *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne].
- KIERS E.T., PALMER T.M., IVES A.R., BRUNO J.F. & BRONSTEIN J.L. (2010). Mutualisms in a changing world: an evolutionary perspective. *Ecology Letters*. Numéro 13. Pages 1459-1474.
- KING A.R. & FERIS C. (1998). Chloroplast DNA phylogeography of *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn. *Molecular Ecology*. Numéro 7. Pages 1151-1161.
- LASCOUX M., PALME A.E., CHEDDADI R. & LATTA R.G. (2004). Impact of Ice Ages on the genetic structure of trees and shrubs. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*. Numéro 359. Pages 197-207.

MAGRI D., VENDRAMIN G.G., COMPS B. ET AL. (2006). A new scenario for the Quaternary history of European beech populations: palaeobotanical evidence and genetic consequences. *New Phytologist*. Numéro 171. Pages 199-221.

MEDAILLE F. & DIADEMA K. (2009). Glacial refugia influence plant diversity patterns in the Mediterranean Basin. *Journal of Biogeography*. Numéro 36. Pages 1333-1345.

METZGER M.-J., BUNCE R.-G.-H., JONGMAN R.-H.-G., MUCHER C.-A. & WATKINS J.-W. (2005). A climatic stratification of the environment of Europe. *Global ecology and biogeography*. Numéro 14. Pages 549-563.

PARISOD C. (2008). Postglacial recolonisation of plants in the western Alps of Switzerland. *Botanica Helvetica*. Numéro 118. Pages 1-12.

PIEDALLU C., PEREZ V., GEGOUT J.-C., LEBOURGEOIS F. & BERTRAND R. (2009). Impact potentiel du changement climatique sur la distribution de l'Epicéa, du Sapin, du Hêtre et du Chêne sessile en France. *Revue Forestière Française*. Volume LXI. Numéro 6. Pages 567-593.

SCHMITT T. (2007). Molecular biogeography of Europe: Pleistocene cycles and postglacial trends. *Frontiers in Zoology*. Volume 4. Numéro 11.

SCHMITT T & KRAUSS J. (2004). Reconstruction of the colonization route from glacial refugium to the northern distribution range of the European butterfly *Polyommatus coridon* (Lepidoptera: Lycaenidae). *Diversity and Distributions*. Numéro 10. Pages 271-274.

STEWART J.R., LISTER A.M., BARNES I. & DALEN L. (2010). Refugia revisited: individualistic responses of species in space and time. *Proceedings of the Royal Society B*. Numéro 277. Pages 661-671.

TABERLET P., FUMAGALLI L., WUST-SAUCY A.-G. & COSSON J.-F. (1998). Comparative phylogeography and postglacial colonization routes in Europe. *Molecular ecology*. Numéro 7. Pages 453-464.

WILNER W., DI PIETRO R. & BERGMEIER E. (2009). Phytogeographical evidence for post-glacial dispersal limitation of European beech forest species. *Ecography*. Numéro 32. pages 1011-1018.

## **Littérature grise**

MERLET F. & HOUARD X. (2012). *Synthèse bibliographique sur les traits de vie du Cuivré de la Bistorte (Lycaena helle (Denis & Schiffermüller, 1775)) relatifs à ses déplacements et à ses besoins de continuités écologiques*. Office pour les insectes et leur environnement & Service du patrimoine naturel du Muséum national d'Histoire naturelle. Paris. 6 pages.

ROGEON G. & SORDELLO R. (2012). *Synthèse bibliographique sur les traits de vie du Lézard ocellé (Timon lepidus (Daudin, 1802)) relatifs à ses déplacements et à ses besoins de continuités écologiques*. Service du patrimoine naturel du Muséum national d'Histoire naturelle. Paris. 10 pages.

SORDELLO R. (2012a). *Synthèse bibliographique sur les traits de vie du Cerf élaphe (Cervus elaphus Linnaeus, 1758) relatifs à ses déplacements et à ses besoins de continuités écologiques*. Service du patrimoine naturel du Muséum national d'Histoire naturelle. Paris. 19 pages.

SORDELLO R. (2012b). *Synthèse bibliographique sur les traits de vie de la Chouette de Tengmalm (Aegolius funereus (Linnaeus, 1758)) relatifs à ses déplacements et à ses besoins de continuités écologiques*. Service du patrimoine naturel du Muséum national d'Histoire naturelle. Paris. 18 pages.

SORDELLO R. (2012c). *Synthèse bibliographique sur les traits de vie du Cincle plongeur (Cinclus cinclus (Linnaeus, 1758)) relatifs à ses déplacements et à ses besoins de continuités écologiques*. Service du patrimoine naturel du Muséum national d'Histoire naturelle. Paris. 14 pages.

SORDELLO R. (2012d). *Synthèse bibliographique sur les traits de vie du Grand rhinolophe (Rhinolophus ferrumequinum (Schreber, 1774)) relatifs à ses déplacements et à ses besoins de continuités écologiques*. Service du patrimoine naturel du Muséum national d'Histoire naturelle. Paris. 17 pages.

SORDELLO R. (2012e). *Synthèse bibliographique sur les traits de vie du Lézard vivipare (Zootoca vivipara (Jacquin, 1787)) relatifs à ses déplacements et à ses besoins de continuités écologiques*. Service du patrimoine naturel du Muséum national d'Histoire naturelle. Paris. 10 pages.

SORDELLO R. (2012f). *Synthèse bibliographique sur les traits de vie de la Loutre d'Europe (Lutra lutra (Linnaeus, 1758)) relatifs à ses déplacements et à ses besoins de continuités écologiques*. Service du patrimoine naturel du Muséum national d'Histoire naturelle. Paris. 19 pages.

SORDELLO R. (2012g). *Synthèse bibliographique sur les traits de vie du Pélodyte ponctué (Pelodytes punctatus (Daudin, 1802)) relatifs à ses déplacements et à ses besoins de continuités écologiques*. Service du patrimoine naturel du Muséum national d'Histoire naturelle. Paris. 9 pages.

SORDELLO R. (2012h). *Synthèse bibliographique sur les traits de vie du Pic cendré (Picus canus Gmelin, 1788) relatifs à ses déplacements et à ses besoins de continuités écologiques*. Service du patrimoine naturel du Muséum national d'Histoire naturelle. Paris. 12 pages.

### **Rapports techniques ou d'expertise**

SORDELLO R., COMOLET-TIRMAN J., DA COSTA H., DE MASSARY J-C., GRECH G., DUPONT P., ESCUDER O., HAFFNER P., ROGEON G., SIBLET J-P., TOUROULT J. (2011a). *Trame verte et bleue – Critères nationaux de cohérence – Contribution à la définition du critère pour une cohérence interrégionale et transfrontalière*. Service du patrimoine naturel, Muséum national d'histoire naturelle, Paris. 54 pages.

### **Actes de colloques**

PETIT R.J. ET AL. (2003). Glacial refugia: hotspots but not melting pots of genetic diversity. 12 diapos.

### **Support de vulgarisation/communication**

LE GAILLARD J-F. (2012). Dispersal and range dynamics in changing climate. 40 diapos.

### **Autres références**

INVENTAIRE NATIONAL DU PATRIMOINE NATUREL. *Quelle biodiversité en France ?*. Service du patrimoine naturel du Muséum national d'Histoire naturelle. Disponible sur : <http://inpn.mnhn.fr/informations/biodiversite/france> (consulté en octobre 2013)

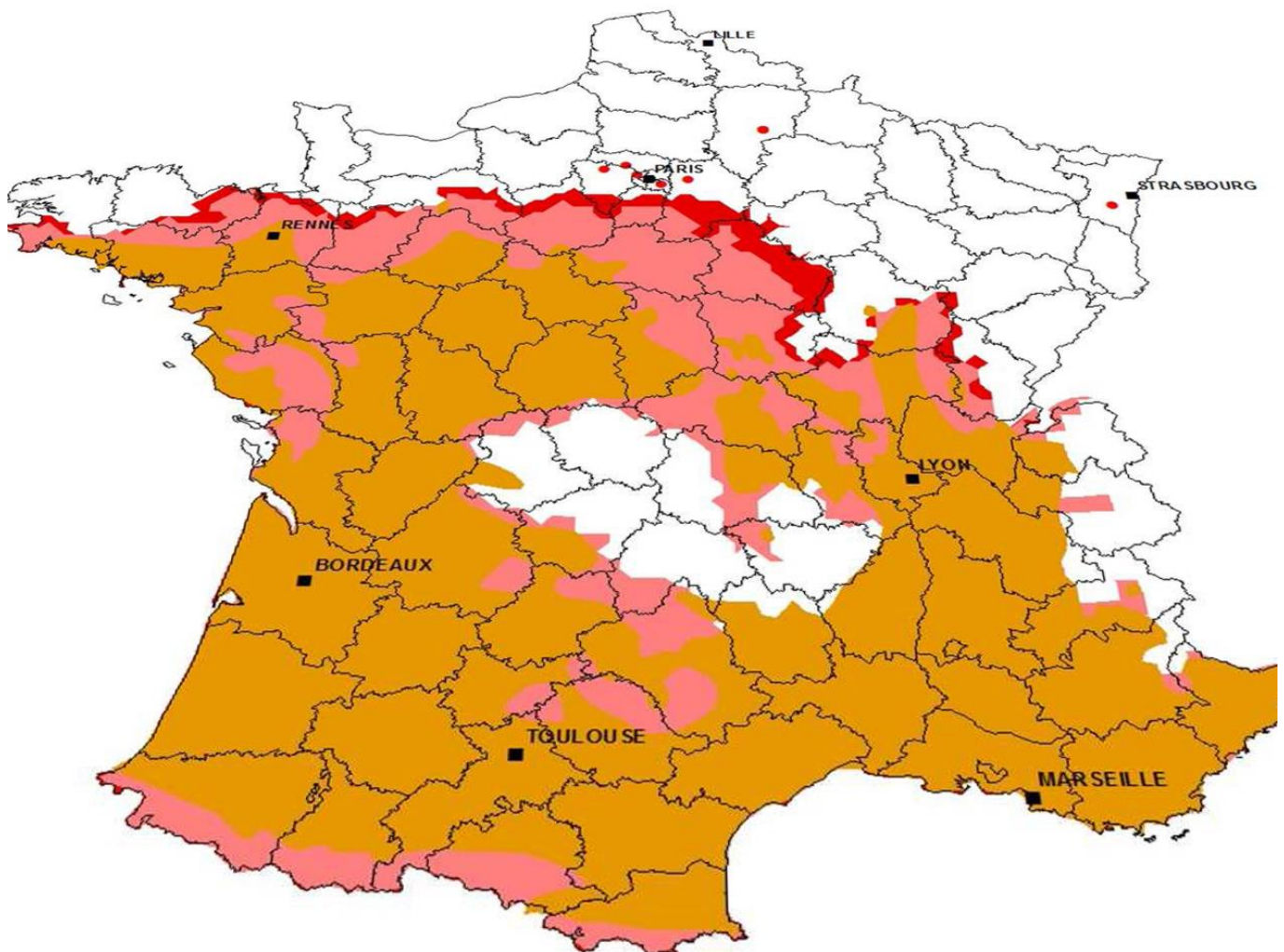
METEOFRANCE. Site internet dédié au climat (Disponible sur : <http://climat.meteofrance.com/>) et aux pluies extrêmes (Disponible sur : <http://pluiesextremes.meteo.fr/>). Consulté en octobre 2013

METEOFRANCE. *Publithèque*. Disponible sur : <http://publitheque.meteo.fr/okapi/accueil/okapiWebPubli/index.jsp>



## - PARTIE 2 -

# L'AJUSTEMENT SPATIAL PROVOQUE PAR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE CONTEMPORAIN : AMPLEUR, HETEROGENEITE, INCERTITUDES



## RESUME DE LA PARTIE 2

**D**e nos jours, en période interglaciaire, nos activités humaines et nos modes de vie font varier le climat de la planète, notamment par les gaz à effet de serre rejetés dans l'atmosphère. Le changement climatique contemporain (CCC) se traduit globalement en France par un climat qui devient plus chaud et plus sec l'été, avec une tendance plus marquée au Sud, même si une forte hétérogénéité existe localement. Ce changement porte également sur les extrêmes climatiques, avec un accroissement de la fréquence et de l'intensité des événements.

Les conséquences du changement climatique sur la biodiversité sont déjà visibles et ses grands traits sont désormais bien étayés par la littérature.

On constate que les types de réponses de la biodiversité au CCC sont comparables à ceux vus par le passé. La biodiversité réagit par des ajustements internes, temporels et spatiaux. Les espèces adaptent leur répartition en latitude et en altitude ainsi que du littoral vers l'intérieur des terres du fait de la montée des eaux. Des changements d'aire de distribution sont déjà notables chez tous les groupes de vertébrés, les insectes et la flore.

La vitesse du CCC est en revanche rapide. Cela provoque un effet retard, particulièrement chez les espèces les moins mobiles, c'est-à-dire que l'adaptation spatiale peut être en dessous de ce qu'il faudrait pour suivre l'évolution du climat. Par ailleurs, les espèces spécialistes sont elles aussi défavorisées. Enfin, les petites populations, fragmentées par l'homme, insulaires ou endémiques sont très exposées aux événements climatiques extrêmes et peuvent disparaître.

Dans le futur, le déplacement des espèces va continuer, majoritairement pour les espèces généralistes et mobiles alors que les espèces spécialistes, sédentaires et de faibles aires de répartition vont probablement être amenées à s'adapter ou disparaître localement. En définitive, il faut donc s'attendre à une recombinaison des communautés d'espèces plus qu'à une translation des écosystèmes que l'on connaît aujourd'hui.

Il reste difficile d'anticiper sur le fonctionnement de ces futurs écosystèmes mais il est probable que cette recomposition, avec des espèces plus généralistes, va accentuer le processus de simplification et induire une diminution des rendements écosystémiques à long terme. Les interactions entre espèces vont elles aussi être remises en cause et des extinctions d'espèces en cascades sont alors prévisibles, en raison de ces désynchronisations et des non analogies entre les espèces qui vont désormais se côtoyer.

La connaissance doit encore progresser sur tous ces aspects. Plusieurs facteurs d'adaptation du vivant sont également encore méconnus, comme la microévolution. Un très grand nombre d'incertitudes persistent aussi, du fait de l'usage des modélisations. Celles-ci peuvent faire varier de manière importante les conclusions, selon les modèles employés ou les données utilisées ou encore l'enchaînement de modèles depuis les projections du climat jusqu'à la modélisation des impacts sur la biodiversité (notamment la prise en compte ou non d'effets du micro-climat). La quantification des biais des résultats d'impacts n'est pas encore systématique, de même que le développement d'approches comparatives entre plusieurs modèles, même si la modélisation s'est fortement perfectionnée ces 10 dernières années et continue à le faire.

# I. PRE-REQUIS

## I.1. Résumé des connaissances actualisées sur l'état des lieux et les prévisions du changement climatique contemporain

Les activités humaines, notamment l'usage des énergies fossiles, ont conduit à une hausse sans précédent depuis plusieurs milliers d'années de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Les émissions anthropiques annuelles de CO<sub>2</sub> sont en effet passées de 15 à 40 milliards de tonnes en 40 ans (Canadell *et al.*, 2007). Cette hausse de la concentration induit un effet de serre additionnel qui modifie le climat de la Terre.

De manière succincte, le changement climatique actuel se caractérise par :

- une **hausse globale de température** à la surface du globe,
- un **changement dans le régime de précipitations**. Le contraste des précipitations entre régions humides et régions sèches ainsi qu'entre saisons humides et saisons sèches augmente, bien qu'il puisse exister des exceptions régionales.

En France, le climat devient effectivement plus chaud et plus sec l'été, avec une tendance plus marquée au Sud. On constate un déplacement des lignes d'isoclimat vers le Nord depuis 1979 (Lelièvre *et al.*, 2011). Dès 2040, les climats méditerranéens (déficit en eau > 400 mm) recouvriront 25-30 % du territoire métropolitain et pourraient arriver à la Loire (ligne Nantes-Orléans-Mulhouse) en fin de siècle.

Il est important d'avoir en tête que ce changement s'opère de différentes manières :

- on prévoit (et on commence à constater) un renforcement des événements climatiques extrêmes (tornades, épisodes de fortes précipitations pluvieuses ou neigeuses, canicules, vagues de froid intense, ...) dans leur intensité et leur fréquence, ce qui signifie une météorologie plus brutale et plus aléatoire en certains endroits (ONERC, 2003) et des catastrophes en conséquences (inondations, feux de forêts, glissements de terrain, retrait/gonflement des argiles, ...) (ONERC, 2005),

- au sein de cet accroissement global de température et de sécheresse, certaines localités vont devenir au contraire plus humides et plus fraîches, par exemple par effet rétroactif de l'évapotranspiration des végétaux dont la croissance est favorisée par l'augmentation des températures (Wallisdevries & Van Swaay, 2006). Dans tous les cas, le climat n'évoluera pas partout de la même manière (Jancovici, 2008)

Par ailleurs, le changement climatique a des conséquences directes fortes. L'une d'entre elles est l'**élévation du niveau des eaux marines**, du fait de la fonte des glaces (continentales plus que de la banquise) et de la dilatation des eaux des océans (sous l'effet de la chaleur, l'eau se dilate). On peut aussi citer l'acidification des océans. Comme la situation est inédite, de nombreuses conséquences sont de fait imprévisibles (Jancovici, 2008).

Des **effets en cascade** peuvent aussi se produire. Par exemple une remise en cause du Gulfstream (déviation, réduction), par modification de la salinité des océans sous l'effet de la fonte des glaces, engendrerait un changement radical du climat dans notre pays.

En 1988, face à ce phénomène, l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) ont créé un organe intergouvernemental, ouvert à tous les pays membres de l'ONU et de l'OMM : le **Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)**. Pour plus d'informations : [http://www.ipcc.ch/home\\_languages\\_main\\_french.shtml](http://www.ipcc.ch/home_languages_main_french.shtml)

L'une des principales activités du GIEC consiste à procéder, à intervalles réguliers, à une évaluation de l'état des connaissances relatives au changement climatique. Après un premier rapport d'évaluation publié en 1990, trois autres ont suivi en 1995 (GIEC, 1995), 2001 (GIEC, 2001) et 2007 (GIEC, 2007). Le GIEC élabore également des rapports spéciaux et des documents techniques sur le climat.

Un cinquième rapport est en cours d'adoption et de diffusion. Celui-ci n'est pas encore disponible en version finalisée mais le volume 1 est disponible en anglais (IPCC, 2013). Un résumé du premier volume de ce 5ème rapport, a aussi été produit, en français, à destination des décideurs par l'ONERC (ONERC, 2013).

Le Réseau Action Climat France (RAC-F), représentant français du Climate Action Network (CAN), a néanmoins déjà ouvert une plateforme internet (<http://leclimatchange.fr/>) exposant l'essentiel à retenir dans ce nouveau rapport d'évaluation du GIEC.

Les points à retenir, par rapport à la situation actuelle et aux prédictions, sont retranscrits dans l'encadré plus loin.

## **I.2. Les trois axes d'ajustement de la faune et de la flore**

Un impact significatif du réchauffement climatique est déjà perceptible sur les populations animales et végétales (Mooney *et al.*, 2009). La littérature scientifique montre que ces effets se manifestent aux différents niveaux de la biodiversité (individu, population, communauté, écosystème, biome jusqu'à la biosphère) (Penuelas *et al.*, 2013) (cf. Figure 16).

Les espèces réagissent selon trois axes de leur niche écologique (Bellard *et al.*, 2012 ; Delzon *in* PNF, 2011a) :

- ajustement interne (physiologie/comportement),
- ajustement temporel (phénologie),
- ajustement spatial (aire de répartition).

Ces trois axes ne sont pas exclusifs. En revanche, si une population ou une espèce ne peut s'adapter sur aucun de ces trois axes, elle est vouée à une extinction locale ou globale (Bellard *et al.*, 2012). Ces trois axes laissent cependant des marges de manœuvres importantes et dans les faits, il semblerait que peu d'extinctions d'espèces uniquement liées au changement climatique contemporain soient recensées pour le moment dans le monde (Botkin *et al.*, 2007 *in* Bellard *et al.*, 2012). De manière générale peu d'extinction sont le résultat d'une seule cause mais d'un faisceau de pressions (changement climatique, perte d'habitat, invasions biologiques).

En lien avec le sujet à traiter, ce rapport se focalise majoritairement sur l'ajustement spatial, qui est l'axe de réponse le plus en lien avec les réseaux écologiques. Une illustration des deux autres axes sera donnée uniquement pour permettre au lecteur de comprendre ce qu'ils sous-tendent. Pour des détails sur ces autres axes, le lecteur pourra se référer à la synthèse Changement climatique et Biodiversité (Massu & Landmann, 2011) réalisée par le GIP-ECOFOR, qui fait un état des lieux poussé des conséquences du changement climatique sur la biodiversité. Les publications utilisées pour cette synthèse sont également référencées en ligne avec un moteur de recherche (<http://ccbio.gip-ecofor.org/>). En 2012, cette base de données regroupait 591 documents pdf et 732 résumés d'articles (Guy Landmann, GIP ECOFOR *in* Vanpeene, 2012). Plusieurs documents de vulgarisation existent aussi pour les lecteurs recherchant un document synthétique sur les effets du changement climatique sur la nature, comme Louchard & Querleu (2005) ou (MEDDE, 2014c).

## CE QU'IL FAUT RETENIR DU 5<sup>EME</sup> RAPPORT DU GIEC

### > Sur l'ampleur du changement climatique déjà constaté :

- Le lien entre les activités humaines et l'accroissement des températures constaté depuis 1950 est désormais jugé extrêmement probable à plus de 95 % (pour rappel, il était jugé très probable lors du rapport de 2007 et seulement probable dans le 3<sup>ème</sup> rapport en 2001). Les simulations climatiques basées sur les éléments naturels (éruptions volcaniques, variations solaires) peuvent expliquer des variations de températures entre l'an 1400 (environ) et 1950 mais depuis 1950, ces variations de températures ne sont explicables que si on intègre les activités humaines, qui apparaissent même comme le principal facteur causant le réchauffement constaté.

- L'augmentation de la température moyenne du globe est confirmée : **depuis trente ans, chaque décennie a été statistiquement significativement plus chaude que la précédente.** La température moyenne mondiale (terre et océans) a augmenté de 0,85 °C entre 1880 et 2012. Les dix années les plus chaudes depuis 1850 ont eu lieu depuis 1998 (2005 et 2010 ont été les deux plus chaudes depuis le début des mesures).

- Le réchauffement des océans représente le plus grand changement dans le contenu énergétique de la Terre : **les océans ont absorbé 90 % de l'énergie accumulée sur Terre entre 1971 et 2010.** Le réchauffement le plus marquant a lieu dans les 75 premiers mètres de profondeur : + 0,11 °C par décennies, entre 1971 et 2010, soit +0,44 °C en moins de 40 ans.

- **La calotte glaciaire a perdu en volume depuis les années 1990 et sa fonte est de plus en plus rapide.** Les observations montrent que l'extension de la banquise en Arctique fin septembre a diminué d'environ 11 % (entre 9 et 13 %) par décennie entre 1979 et 2012.

- **Depuis les années 1960, la couverture neigeuse dans l'hémisphère Nord s'est réduite, jusqu'à 11,7 % par décennie concernant la surface mesurée au mois de juin.**

- **La hausse du niveau des mers est presque deux fois plus rapide depuis 20 ans, par rapport au siècle dernier.** Sur la période 1901-2010, le niveau de la mer a augmenté de 19 cm en moyenne soit 1,7 mm/an de hausse entre 1901 et 2010 et **3,2 mm/an entre 1993 et 2010.**

- Le GIEC note que depuis 1998, la hausse des températures est moins claire que ces trente dernières années (en partie car 1998 a été une année exceptionnellement chaude). En conclusion, les températures **sont toujours en hausse même si elles** augmentent moins vite que prévu.

- Le niveau de confiance quant à l'augmentation des sécheresses lors des dernières décennies est plus faible que lors du 4<sup>ème</sup> rapport, à cause de la **difficulté de comparaison des différents types de sécheresse.**

- Il y a moins de certitudes quant aux causes de l'intensification des cyclones tropicaux constatée depuis 1970, sauf en Atlantique où celle-ci est attribuée en grande partie à la variabilité interne du système, avec pour le futur la possibilité d'une plus grande variété dans leurs trajectoires et intensité.

## > En termes de prévisions :

Le précédent rapport du GIEC proposait uniquement des projections pour le 21<sup>ème</sup> siècle, le 5<sup>ème</sup> rapport a intégré, à la demande des gouvernements, des prévisions décennales, c'est-à-dire des prévisions à plus court terme. Il a également revu totalement les démarches d'élaboration des scénarios qu'il propose, désormais basées sur des concentrations et des émissions de gaz à effet de serre et non plus sur des modèles de société (Pour comprendre de façon simple, cf. GICC, 2011).

Ce 5<sup>ème</sup> rapport du GIEC comporte 4 scénarios (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 et RCP8.5) qui varient selon les objectifs de réduction d'émissions de gaz à effet de serre atteints ou non par la communauté internationale.

Les experts prévoient que :

- **La température va continuer d'augmenter dans tous les scénarios.** Entre 2016 et 2035, il est probable que les températures moyennes de l'air augmentent en moyenne de 0,5 °C.

Seul un scénario de réduction des émissions est en mesure de maintenir la hausse des températures sous le seuil des 2 °C d'ici à 2100 par rapport à 1850 (scénario le plus ambitieux RCP2.6 qui implique une réduction des émissions de gaz à effet de serre de 10 % par décennie).

Dans la trajectoire la plus pessimiste (celle qui se produira si la communauté mondiale ne limite pas ses émissions de gaz à effet de serre), les températures pourraient augmenter jusqu'à 5,5 °C par rapport à 1850. Dans ce scénario, les vagues de chaleur qui arrivent aujourd'hui une fois tous les 20 ans vont doubler ou tripler de fréquence.

- **Les précipitations en moyenne augmenteront à l'échelle planétaire d'ici la fin du 21<sup>ème</sup> siècle.** Les régions humides aujourd'hui deviendront globalement plus humides et les zones sèches deviendront plus sèches.

- **Les événements climatiques extrêmes continueront d'être plus intenses et plus fréquents** notamment les sécheresses et les pluies diluviennes (les prédictions sont encore débattues concernant les ouragans).

- **D'ici 2100 la cryosphère fond dans tous les scénarios.** Une hausse des températures supérieure à 2 °C par rapport à aujourd'hui conduirait à terme à une fonte totale de la banquise en Arctique à la fin de l'été 2100.

La couverture neigeuse va diminuer d'au moins 7 % (scénario le plus optimiste) à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, par rapport à la fin du 20<sup>ème</sup> siècle.

Même dans le meilleur des cas, plus d'un tiers du pergélisol va disparaître à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle par rapport à la période 1986-2005.

- **La hausse du niveau des mers pourrait être plus importante que prévue.** Entre 2046 et 2065, le niveau des mers devrait augmenter de 17 cm dans un scénario optimiste. Le scénario le plus pessimiste donne une hausse de 38 cm en 2065 et de 98 cm en 2100.

Le site internet <http://flood.firetree.net> permet de simuler le planisphère en fonction d'un niveau des mers donné. Pour la France, on peut constater qu'une augmentation de 1m du niveau des mers entraîne la submersion permanente de terres de plusieurs endroits stratégiques pour la biodiversité, comme par exemple la zone du delta du Rhône (Camargue).

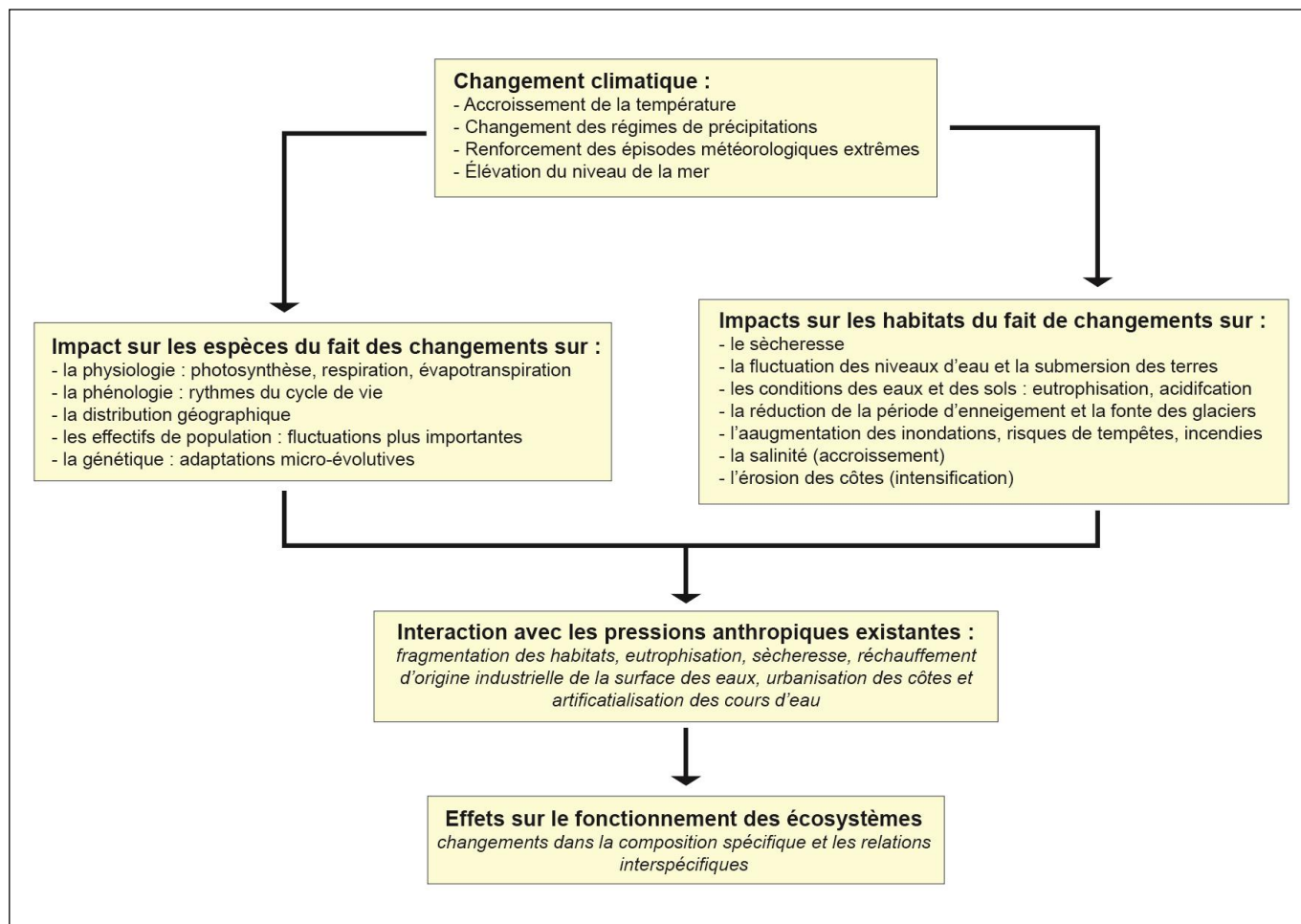


Figure 16 : Les différents impacts du changement climatique sur la biodiversité.

Source : D'après Alterra & Eurosite, 2013

### I.2.1. Ajustement interne

Certaines espèces peuvent par exemple modifier leur régime alimentaire pour s'adapter aux modifications trophiques de leur milieu qui évoluent sous l'effet du changement climatique. C'est ce que l'on peut constater chez la Perche fluviatile (*Perca fluviatilis*) (Gillet & Dubois, 2009) : les perches dans le Lac Léman modifient leur physiologie, ce qui implique un changement de régime. Ces facultés d'adaptation permettent aux perches de survivre sans adaptation spatiale.

### I.2.2. Ajustement phénologique

La phénologie est la répartition temporelle, et notamment saisonnière, des événements (étapes du cycle de la vie, changement de comportement, changement de morphologie, ...) de la vie animale et végétale.

Une étude menée sur la Rousserolle turdoïde (*Acrocephalus arundinaceus*) a montré que cet oiseau peut ajuster ses périodes de pontes, en les avançant, de façon à éviter les périodes de sécheresse et de chaleur survenant plus tôt en saison du fait du changement climatique (Dyrcz & Halupka, 2009). Grâce à cette adaptation, les paramètres des pontes (taille, taux d'échec, nombre de jeunes par couvée, ...) restent stables face aux variations du climat sans ajustement spatial. L'ajustement phénologique est également bien connu pour les oiseaux migrateurs qui peuvent décaler leurs dates de départ et d'arrivée de migration (Bell, 2007 ; Patterson & Guerin, 2013a).



Un autre exemple est le cas du Pélodyte ponctué. On constate chez cet amphibien, qui se reproduit en règle générale au printemps, l'existence d'une deuxième ponte à l'automne quand les pluies automnales sont suffisantes, notamment dans les régions méditerranéennes (Jourdan-Pineau *et al.*, 2012 *in* Sordello, 2012g). Ce comportement est considéré comme une adaptation au climat méditerranéen particulièrement instable et changeant et dont la période estivale est sèche et chaude (Jourdan-Pineau *et al.*, 2012 *in* Sordello, 2012g). La reproduction à l'automne permet en effet de maximiser les chances que les points d'eau temporaires restent en eau suffisamment longtemps pour le développement des larves contrairement au printemps où les risques de sécheresse à l'approche de l'été sont très présents.

La phénologie est également un facteur déterminant chez les plantes qui peuvent ajuster leurs dates de floraison, dispersion, dissémination, débourrement des feuilles ou encore tubérisation (Cleland *et al.*, soumis).

Ces facultés d'adaptation temporelle réduisent *a priori* les besoins d'adaptation spatiale. En revanche, pour que ces ajustements temporels fonctionnent, il est la plupart du temps nécessaire que l'ensemble du complexe (par exemple plantes et pollinisateurs) opère ce changement. Si une espèce végétale seule change sa phénologie mais que son pollinisateur garde la sienne, l'ajustement ne sera pas fonctionnel.

## **OBSERVATOIRE PHENOLOGIQUE**

A noter qu'un observatoire, le Système d'Information Phénologique pour l'Étude et la Gestion des Changements Climatiques (SIP-GECC) a été créé en 2006 pour constituer une base de données des observations phénologiques réalisées en France par divers organismes depuis 1880 jusqu'à nos jours (Chuine & Seguin, 2005).

Les données collectées dans cette base doivent permettre ensuite d'alimenter des programmes de recherche pour accroître la connaissance scientifique sur les impacts et les adaptations (Chuine, 2005 ; Chuine & Seguin, 2012).

Si les adaptations phénologiques ne sont pas des adaptations spatiales, ces informations peuvent néanmoins être spatialisées et alimenter indirectement la réflexion sur les réseaux écologiques (adaptations phénologiques plus importantes aux marges des répartitions ou pas, ...).

Pour en savoir plus : <http://www.gdr2968.cnrs.fr>

## **II. L'AJUSTEMENT SPATIAL**

### **II.1. Le schéma simple des mouvements constatés, identiques au passé**

Selon les mêmes mécanismes que lors des fluctuations « naturelles » passées, décrites dans la partie I, le changement climatique actuel d'origine anthropique aura, et a déjà, de fortes répercussions sur les aires de répartition des espèces (Parmesan & Yohe, 2003). Le *Millenium Ecosystem Assessment* prévoit un mouvement des aires de répartition pour 5 à 20 % des écosystèmes terrestres du globe, en particulier les forêts froides de conifères, les toundras, les milieux buissonnants, les savanes et les forêts boréales (Sala *et al.* 2005 *in* Bellard *et al.*, 2012).

#### **II.1.1. Mouvements latitudinaux et altitudinaux**

Les modifications d'ores et déjà observées d'aire de répartition permettent de dessiner quelques tendances (Root *et al.*, 2003).

De nombreuses études pointent deux mouvements, similaires à ceux des variations passées, qui se font en latitude et en altitude.

Ces mouvements peuvent se traduire soit par une extension soit par un recul des aires de répartition, selon que les espèces sont ou non favorisées par le nouveau climat plus chaud et plus sec. L'aire de répartition peut aussi rester stable en surface absolue, tout en se décalant géographiquement vers d'autres latitudes et altitudes.

Globalement, on constate que :

**- certaines espèces s'étendent sous l'effet du climat plus chaud et plus sec vers le Nord et en altitude.**

Pour ne prendre qu'un exemple, on peut citer le cas, emblématique, de la Chenille processionnaire du pin (Boutte *et al.*, 2013), qui en est venue à devenir une espèce modèle pour étudier le processus de colonisation Sud/Nord (Anonyme, 2012) (cf. Figure 17). Chaque année, les correspondants-observateurs notent l'évolution du front « Nord » et « Est » ainsi que le front situé « autour du Massif central » de cette espèce méditerranéenne.

**- certaines espèces suivent le retrait des climats froids et des glaciers vers les sommets et vers les pôles et réduisent au final leur aire de répartition.** Par exemple, Penuelas *et al.* (2003) montrent une migration verticale du Hêtre dans des montagnes d'Espagne, celui-ci s'étant étendu d'environ 70 m en altitude depuis 1945. La marge basse de l'aire de répartition, elle, régresse car les écosystèmes froids/tempérés (Hêtre, Callune) situés entre 800 m et 1400 m d'altitude sont remplacés par des écosystèmes méditerranéens (Chêne vert). C'est donc une diminution nette de répartition pour le Hêtre.

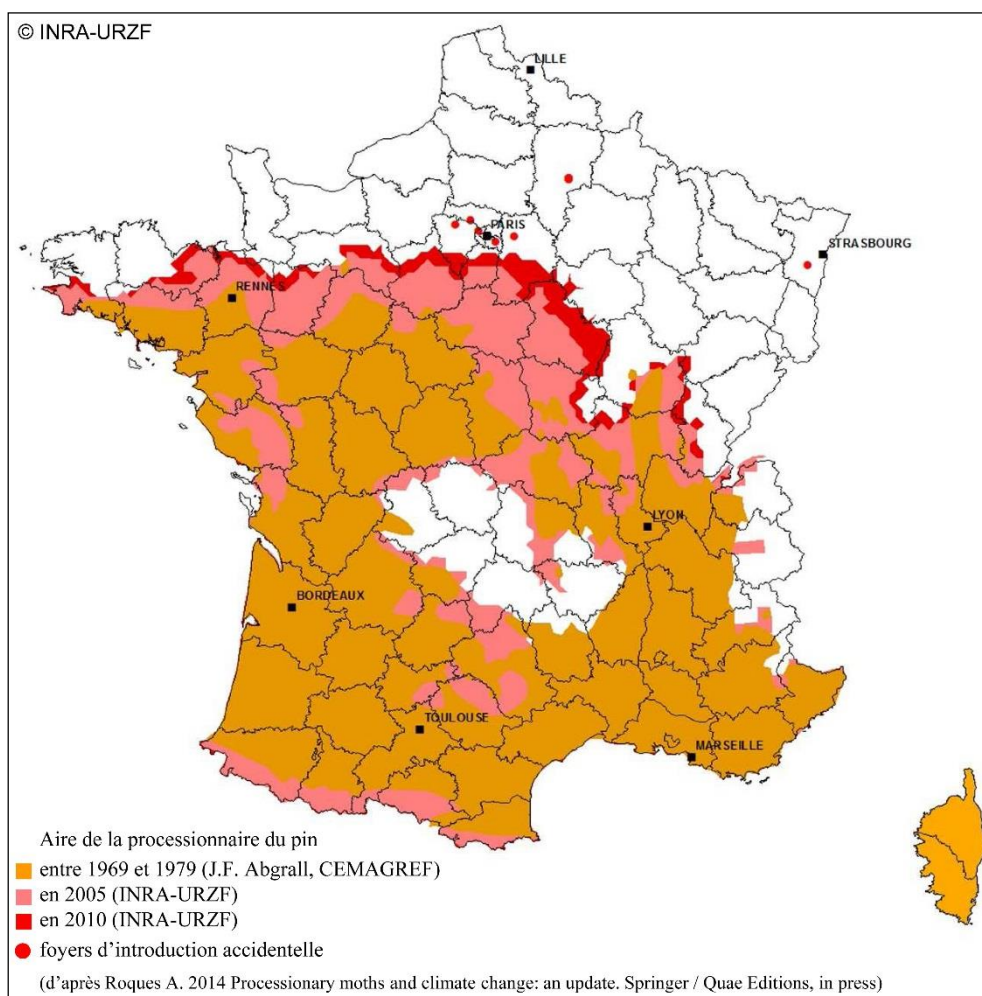


Figure 17 : Progression de la Processionnaire du pin en France.

Il a été montré pour la flore qu'un réchauffement de 1°C correspondrait à un déplacement climatique du Sud vers le Nord d'environ 180 km pour la majeure partie de la France et d'une élévation de l'ordre de 150 m en région montagneuse (Bertrand *et al.*, 2011). Il existerait en effet un facteur 1000 environ entre retrait altitudinal et retrait longitudinal : un retrait de 10 m en altitude correspondrait à un retrait d'environ 10 km en latitude (Jump *et al.*, 2009).

Néanmoins, en parallèle de ces deux grandes tendances générales de déplacement d'aires, qui suivent ainsi l'augmentation des températures, une petite partie d'espèces - non négligeable pour autant - semblent étendre leur aire de répartition dans la direction opposée. Lenoir *et al.* (2010b) constatent en effet que, sur 9 publications parues ces dernières années étudiant au total 884 espèces : environ 65 % d'espèces ont déplacé leur aire moyenne vers le « haut » (Nord ou augmentation d'altitude), 10 % environ n'ont pas bougé et 25 % ont déplacé leur aire moyenne vers le « bas » (Sud ou diminution d'altitude). Cette constatation pourrait être due à de la variabilité individuelle ou tout simplement à des biais dans la récolte des données, mais peu d'études tentent actuellement de l'expliquer. Réduire le déplacement des aires de répartition à un trajet unidirectionnel vers le Nord paraît en tous cas sous-estimer toutes les interactions complexes qui existent entre température, précipitations et facteurs biotiques (VanDerWal *et al.*, 2012).

### II.1.2. Mouvements du littoral vers l'intérieur des terres

Un troisième type de déplacement d'aire de répartition et d'habitats est également engendré par le changement climatique, **depuis le littoral vers l'intérieur des terres**. Plusieurs facteurs s'entremêlent.

D'une part la montée des eaux provoque naturellement un retrait des côtes. Sur les plages et zones à faible déclivité on estime un recul moyen du linéaire côtier d'environ 1 m pour chaque centimètre d'élévation du niveau de la mer (PNF, 2009).

D'autres part, le changement climatique sur le littoral s'accompagne de tempêtes plus fortes et plus fréquentes modifie la marée, la houle, les vagues ou encore le dénivelé imputable aux vents ou aux différences de pressions atmosphériques entre la terre et la mer (qui provoquent des élévations exceptionnelles du niveau de la mer pendant quelques heures, appelées surcotes) (Clus-Auby *et al.*, 2005 ; Landrieu, 2010). Aujourd'hui, en Camargue, une surcote de 1 m a une chance de se produire une fois tous les dix ans.

Les phénomènes extrêmes jouent donc un rôle moteur dans ce recul des terres. Une tempête même faible se rajoutant à une forte marée et à une surélévation du niveau de la mer importante peut avoir des effets catastrophiques (Landrieu, 2010).

Au-delà d'une submersion *stricto sensu* des terres, ces événements ont de nombreux autres effets susceptibles d'entraîner des modifications de répartition des habitats et des espèces comme l'érosion des terres, la disparition des dunes ou la salinisation des eaux côtières (nappes phréatiques proches des côtes, lagunes, ...) (Clus-Auby *et al.*, 2005 ; Fatoric *et al.*, 2013 ; PNF, 2009).

Les zones de deltas et estuaires sont les plus exposées et on constate déjà des effets nets en France (Clus-Auby *et al.*, 2005). En Camargue par exemple, la comparaison des photos aériennes anciennes (1905) et actuelles de l'Espiguette met en évidence un changement très net du trait de côte et du complexe dunaire côtier qui sépare la Méditerranée des lagunes salées (Landrieu, 2010). Sur 12 km de plages soit 3000 ha dont 1500 ha en espaces naturels, on constate la formation de zones d'accrétion à l'Ouest (formation d'un désert plat sans dune) et la formation à l'Est de zones d'érosion avec recul des plages.

Pour les eaux intérieures aussi, les milieux aquatiques temporaires formant un réseau peuvent être touchés avec des régressions à l'échelle de l'ensemble des points d'eau sous l'effet du changement de régime des précipitations et de sécheresse (Tuytens *et al.*, 2014).

Le Conservatoire du littoral (CL) a mené une étude pour modéliser l'évolution de ses sites d'ici à 2100 sous l'effet du changement climatique (Clus-Auby *et al.*, 2005). Les résultats montrent :

- que le phénomène d'érosion est généralisé (sans être nécessairement imputable en totalité au changement climatique) : 80 % environ des sites actuels ou futurs du CL sont concernés d'ici à 2100. Sur l'ensemble des sites du CL, l'impact à attendre du recul du trait de côte par érosion est néanmoins faible en moyenne (1% sur l'ensemble). Par contre, certains sites sont particulièrement exposés et pourraient être réduits de 50 %, comme les Garennes de Lornel (Nord-Picardie) le Marais de Réthoville (Normandie) ou encore la Dune du Pyla (Aquitaine),

- que le phénomène de submersion est considérable si l'on additionne les sites endigués et les sites non endigués : 10% des surfaces actuelles vont se retrouver sous les eaux d'ici à 2100 de manière permanente et 21% de manière épisodique.

En Outre-mer, l'augmentation du niveau de la mer porte atteinte aux sites de ponte des tortues marines qui viennent se reproduire sur les plages (ONERC, 2005).

## II.2. La vitesse du changement climatique contemporain crée un effet retard

Dans le principe, le processus de réponse des espèces face au changement climatique contemporain est donc tout à fait comparable aux remodelages des répartitions successivement intervenus au cours des temps géologiques lors des réchauffements interglaciaires (Tardiglaciaire notamment). En revanche, le rythme de changement est différent et laisse apparaître un « **effet retard** ».

L'une des différences importantes avec les réchauffements passés lors des passages aux périodes interglaciaires, tient en effet à la vitesse du changement climatique contemporain, ce dernier étant nettement plus rapide.

Certains parlent même de « choc » pour qualifier la rapidité du changement actuel (Nicolas Berriot, ONERC *in* Vanpeene, 2012). Nous faisons en effet connaître à notre planète une variation de température en 100 ans et non pas en 5000 ou 10 000 ans comme cela a pu être déjà le cas au cours de son histoire. En ce qui concerne l'acidification des océans, le rythme est entre 30 et 50 fois plus rapide que lors des variations cycliques passées.

Cette vitesse plus importante peut ainsi compromettre les possibilités de remodelage dans un laps de temps suffisant avant le déclin voire l'extinction des populations et des espèces (Schloss *et al.*, 2012). En d'autres termes, cela veut dire que potentiellement **moins d'espèces seront capables de s'adapter à ce changement que lors des fluctuations climatiques passées.**

Toutefois, des auteurs sont critiques par rapport à cet argument, en se référant à la période du Pléistocène supérieur où le climat a pu évoluer plus rapidement encore qu'actuellement avec finalement peu d'extinctions visibles, à part pour les mammifères et les arbres européens (Hof *et al.*, 2011). Il faut néanmoins considérer que les données fossiles ne conservent que certains types de familles et à certains endroits et que ces conclusions concernant le Pléistocène supérieur sont donc limitées ; par ailleurs les preuves de ce changement climatique abrupte au Pléistocène supérieur ne sont qu'à l'échelle régionale ou continentale (com. pers. Bellard, 2014).

De plus, outre la rapidité du changement lui-même, le déplacement réel des espèces est inférieur au déplacement théorique en raison de freins et de l'effet des autres facteurs (gestion forestière, dépôt atmosphérique d'azote...) qui n'existaient pas lors des fluctuations passées du climat (Guy Landmann, GIP ECOFOR *in* Vanpeene, 2012).

Le suivi de communautés d'oiseaux communs (STOC) et des communautés de papillons (STERF) a permis de caractériser un index thermique (IT) des différentes populations, c'est-à-dire une déduction des préférences thermiques à partir des aires de répartition (Jiguet *in* ONERC, 2011).

En France, sur les quarante dernières années, l'IT des communautés d'oiseaux a nettement augmenté, confirmant premièrement que les communautés suivent le réchauffement du climat (Devictor *et al.*, 2008). Par contre, on constate un déplacement d'environ 91 km au Nord alors que les enveloppes thermiques se sont déplacées d'environ 273 km au Nord. Le remodelage des aires de répartition des oiseaux communs reste donc insuffisant par rapport au remodelage du climat, d'un déficit d'environ 182 km.

En 2012, Devictor *et al.* publient une autre étude, européenne, visant des oiseaux et des papillons, en utilisant également des données de sciences participatives. Les auteurs montrent que l'évolution de l'IT moyen est équivalente à 37 km pour les oiseaux et 114 km pour les papillons. Cette évolution reste là encore moins rapide que celle qui serait nécessaire pour compenser la hausse des températures, générant un « retard climatique » d'environ 212 km et 135 km respectivement pour les oiseaux et les papillons. Les papillons se déplacent 3 fois moins vite que les isothermes et les oiseaux (1,6 km/an) 3 fois moins vite que les papillons.

Par ailleurs, la Processionnaire du pin montre que le phénomène qui met en évidence des désynchronisations entre espèces est plus marqué au Nord qu'au Sud. Les travaux récents sur cet insecte ont en effet établi que la progression de la limite Nord de sa distribution n'est aujourd'hui plus limitée par les conditions climatiques défavorables de nutrition des larves en hiver, mais qu'elle est à présent pilotée par les capacités de dispersion de l'insecte et la distribution de ses hôtes, les pins (Démolin *et al.*, 1996 *in* Massu & Landmann, 2011). Aujourd'hui, le climat n'est donc plus le facteur qui limite le déplacement du front de colonisation, qui reste par conséquent bien en deçà de la limite thermique supportable par l'espèce.

L'étude des communautés de plantes forestières (Bertrand *et al.*, 2011) en France sur la période 1965-2008 montre aussi un retard d'adaptation des flores par rapport à la hausse des températures. Ce retard est surtout marqué en plaine, les communautés végétales de montagne ayant mieux suivi l'évolution du climat. Ceci viendrait de plusieurs caractéristiques des forêts de plaine : des espèces plus résistantes, moins de possibilité d'ajustement à courte distance et des milieux plus fragmentés. Dans sa thèse, Bertrand (2007) montre également que ce sont surtout les espèces avec une durée de génération longue et des capacités de migration importantes qui répondent au changement climatique alors que les autres espèces « restent » sur place.

En montagne la migration des espèces forestières est de l'ordre de 5 à 30 m en 10 ans (Guy Landmann, GIP ECOFOR *in* Vanpeene, 2012).

### **II.3. Un phénomène très hétérogène en fonction des espèces**

Au-delà du schéma « simple » qui vient d'être décrit les effets du changement climatique sont et seront complexes et propres à chaque espèce.

Lenoir *et al.* (2014) mettent en avant la multiplicité des cas de figure dans l'évolution des aires de répartition des espèces sous changement climatique, et proposent ainsi une typologie en 6 classes, distinguant par exemple expansion, glissement, contraction ou encore extinction.

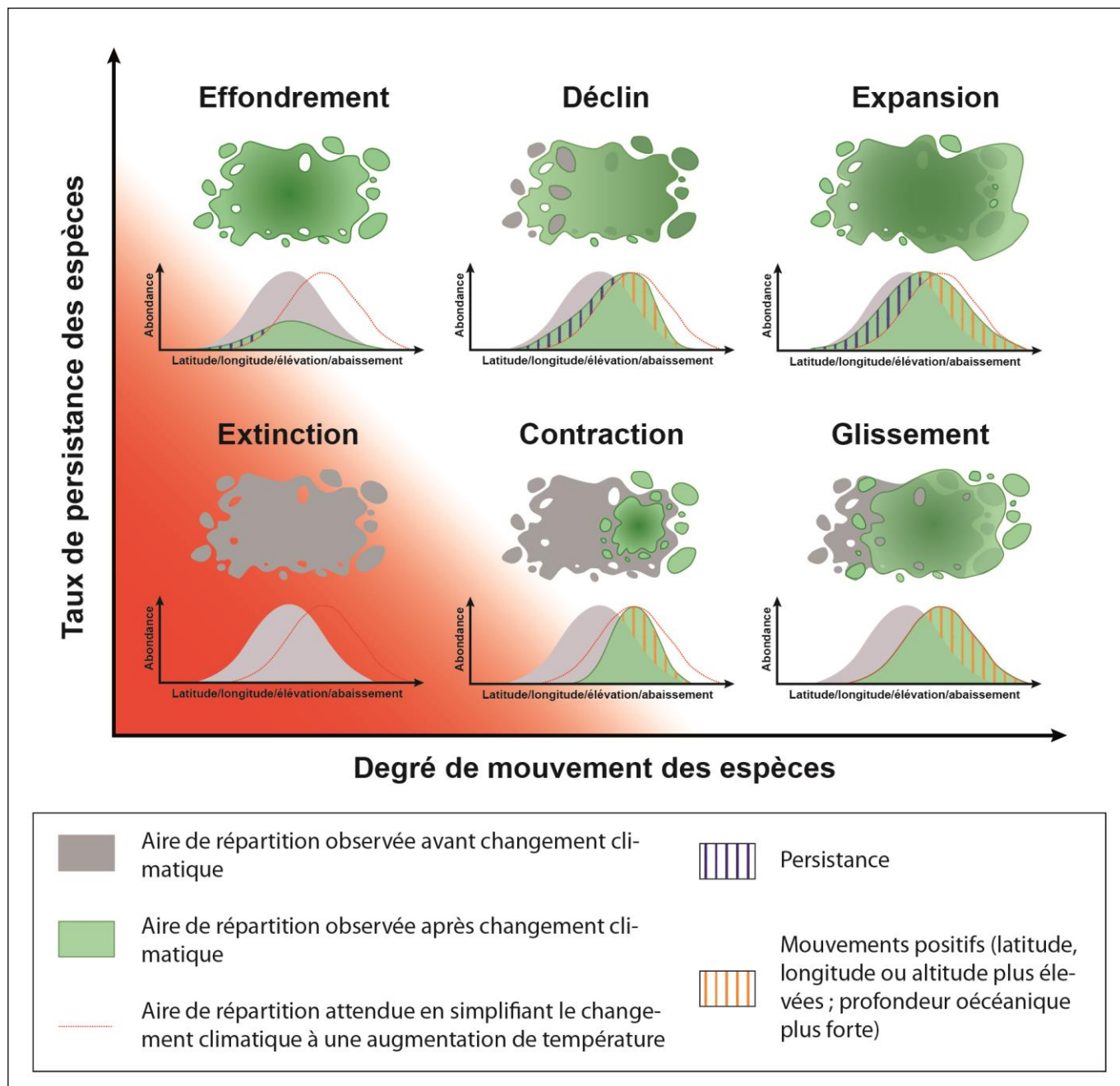


Figure 18 : Différents cas de figures concernant le comportement d'une aire de répartition sous changement climatique.

*L'aire de répartition peut aller de l'extension à la disparition en passant par la contraction, le morcellement ou encore le glissement.*

Source : D'après Lenoir *et al.*, 2014

Un certain nombre de postulat et caractères biologiques vont déterminer le type de réponse de chaque espèce ou groupe d'espèces :

- les traits de vie, notamment ceux liés à la mobilité,
- la spécialisation à l'habitat,
- une vulnérabilité supérieure à d'autres pressions que le climat

Globalement, les espèces « gagnantes » seront des espèces généralistes et les espèces « perdantes » seront celles à faible mobilité, longévives, se reproduisant peu, très spécialisées et sans aires d'extension potentielle (ex : la flore des sommets).

### II.3.1. Discrimination par rapport aux traits de vie

Le changement climatique exerce une pression évolutive sur les espèces, en favorisant certains traits ou phénotypes. Par exemple, il a été démontré sur des drosophiles, taxon présentant de nombreuses générations annuelles, que des souches plus précoces avaient été sélectionnées sous pression climatique (Rodriguez-Trelles & Rodriguez, 2010).

En particulier, les traits de vie liés à la mobilité apparaissent comme déterminants pour l'adaptation des répartitions face au changement climatique et ce dernier agit donc comme un filtre qui pénalise les espèces les moins mobiles (Schloss *et al.*, 2012 ; Urban *et al.*, 2013 ; Urban *et al.*, 2012). D'autres traits de vie peuvent influencer fortement sur les capacités d'adaptation spatiale comme le nombre de générations annuelles qui dicte le rythme des épisodes de dispersion et donc de colonisation d'espaces au climat favorable.

Au final, toutes les espèces ne vont pas migrer à la même vitesse ni de la même façon et certaines ne pourront sans doute pas ou très peu ajuster leur répartition spatiale, du moins dans un laps de temps suffisant (Heller & Zavaleta, 2009).

Une équipe britannique a mené une étude en compilant l'ensemble des données de répartition disponibles pour 16 groupes taxonomiques entre 1960 et 2000 (Hickling *et al.*, 2006).

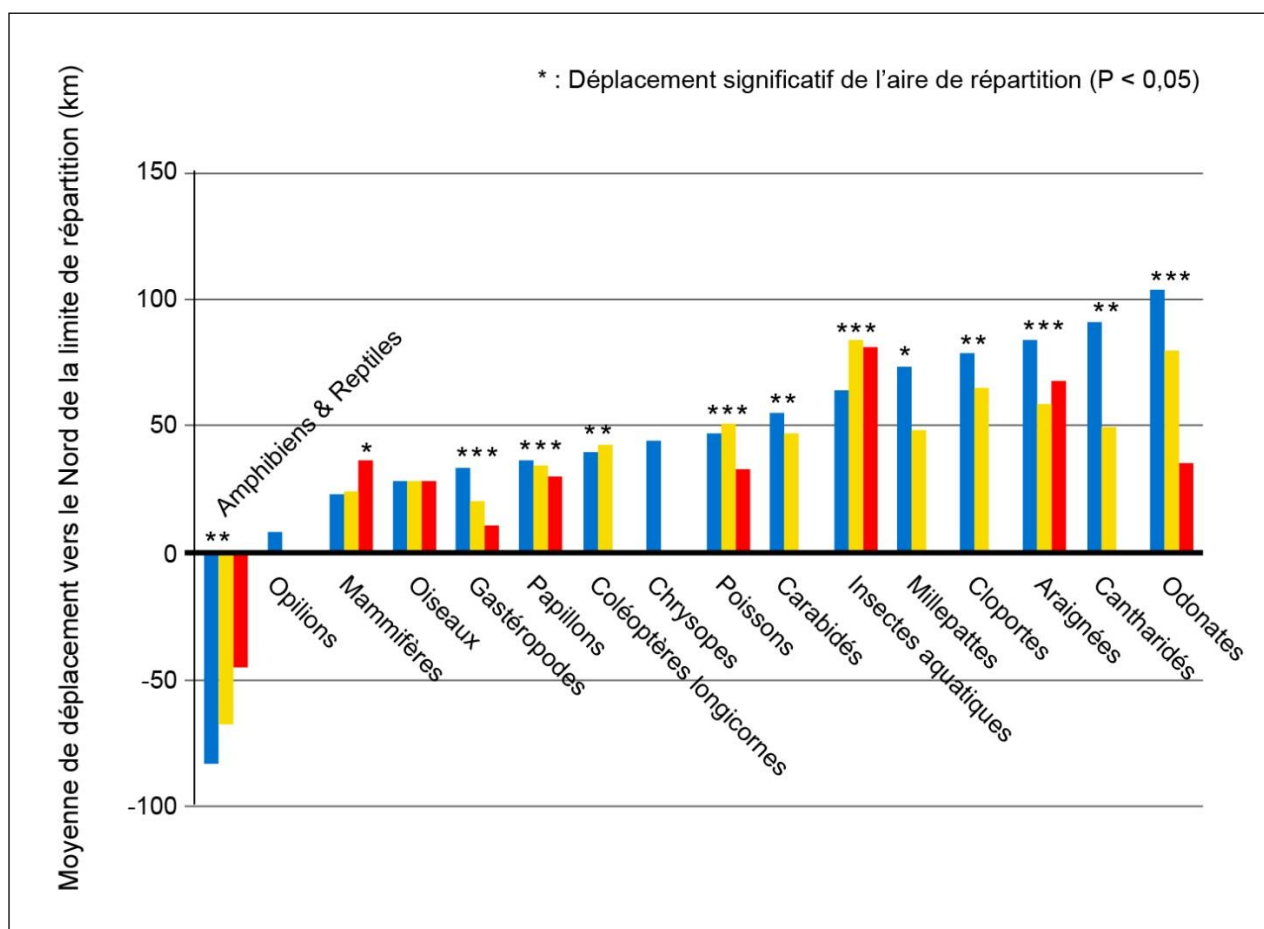


Figure 19 : Décalage de répartition pour 16 groupes biologiques.

Pour tenir compte des changements dans l'effort de prospection au cours de la période considérée, les auteurs ont produit 3 résultats avec des degrés différents de précision (bleu : moyen ; jaune : bon ; rouge : très bon).

Source : Hickling *et al.*, 2006

Les auteurs ont ensuite comparé le décalage moyen de la limite Nord de l'aire de distribution entre deux périodes de 14 ans séparées d'environ 25 ans. Les résultats montrent de fortes disparités entre les groupes (cf. Figure 18). Dans l'ordre décroissant des distances parcourues, on retrouve : les Odonates et les Araignées (environ 75 km), les Rhopalocères (environ 50 km), les Oiseaux et les Mammifères (environ 25 km). Pour les Amphibiens, la diminution est tellement forte que la limite Nord de leur aire de distribution est retrouvée plus au Sud 25 ans après sous la forme de populations reliques.

### II.3.2. Exigences écologiques, notamment vis-à-vis de l'habitat (spécialisation)

Toutes les espèces n'ont pas les mêmes exigences écologiques ni ne présentent le même degré de spécialisation par rapport à l'habitat ce qui va engendrer des différences de réponses et d'impacts (Conlisk *et al.*, 2012 ; Virkkala & Rajasärkkä, 2012).

Par exemple, les zones humides sont directement concernées par les effets du changement climatique d'élévation des températures et surtout de raréfaction de la ressource en eau. Les espèces strictement inféodées aux milieux humides auront donc moins de marge de manœuvre et peuvent donc décliner plus fortement sous l'effet du changement climatique (Virkkala & Rajasärkkä, 2012).

De plus, le changement climatique peut se cumuler à d'autres menaces liées à l'occupation du sol et à la qualité des milieux, en fonction du niveau d'exigence des espèces. La synergie de l'élévation rapide de la température, combinée à la destruction des habitats, pourrait donc facilement perturber les mouvements des espèces, conduire à une refonte des communautés et à de nombreuses extinctions d'espèces (Anderson *et al.*, 2012 ; Root *et al.*, 2003).

### II.3.3. Point de départ variable : populations fragmentées, naturellement isolées ou fragilisées

De nombreuses espèces, dont les populations sont déjà localisées ou fragmentées aujourd'hui et pour lesquelles les métapopulations sont déjà fragiles, ont un potentiel adaptatif beaucoup plus faible (diversité génétique limitée pour résilier, nombre d'individus limité pour disperser, ...) (Bellard *et al.*, 2012). La fragmentation agit alors comme un filtre sélectif dans les ajustements d'aires, renforçant la menace constituée par le changement climatique sur les espèces moins mobiles (Anderson *et al.*, 2012 ; Leimu *et al.*, 2010 ; Opdam & Wascher 2004).

Hof *et al.* (2011) représentent ainsi plusieurs cas d'évolution de répartitions d'espèces sous l'influence du changement climatique, dans un contexte sans fragmentation et en contexte fragmenté (cf. Figure 20). On peut ainsi visualiser l'impact de discontinuité sur la capacité des espèces à surmonter le changement climatique.

Cette influence de la fragmentation est d'autant plus à considérer que les habitats naturels sont précisément soumis à de fortes pressions susceptibles d'être source de fragmentation. Dans la région floristique du Cap, Rouget *et al.* (2003) calculent que 30 % des habitats restants seront transformés d'ici à 20 ans par l'urbanisation et l'agriculture intensive, laissant des milieux naturels encore plus relictuels et isolés.

Pour certains écosystèmes naturellement isolés (endémiques et/ou insulaires), l'adaptation spatiale peut être tout simplement impossible. Certaines îles peuvent disparaître sous l'effet de l'élévation du niveau de la mer et avec elles leurs écosystèmes. Bellard *et al.* (2014, 2013a) montrent qu'environ 6 % des îles françaises sont amenées à être complètement submergées avec une hausse du niveau des mers d'1 m et 12 % en cas de hausse de 3 m. La Nouvelle Calédonie et la Polynésie française sont les régions les plus concernées avec plus de 30 % des terres qui seraient submergées, puis la Méditerranée (avec 10 % de terres submergées).



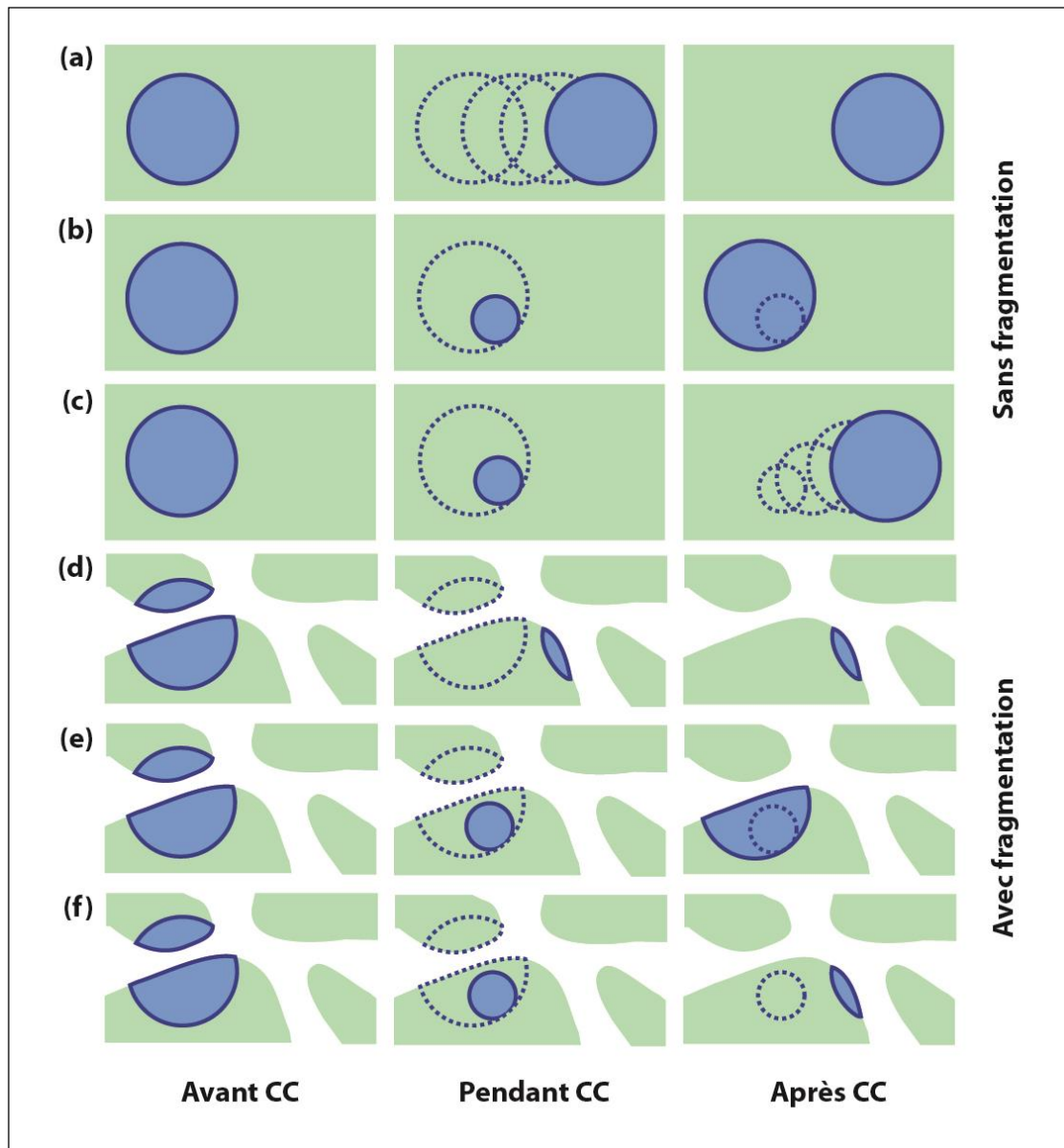


Figure 20 : Évolutions possibles de répartition d'espèces en réponse à un changement climatique, en contexte fragmenté ou pas.

*En contexte non fragmenté, on constate que les aires de répartition ont globalement tendance à se contracter puis à reprendre leur ampleur initiale, même si leur localisation a pu varier. En contexte fragmenté, les répartitions ont majoritairement tendances à se retrouver moins bien représentée après changement climatique du fait des coupures initiales.*

*Cas A : l'aire s'est déplacée sous l'effet du changement climatique mais n'a pas varié en importance,*

*Cas B : l'aire s'est rétractée puis a retrouvé sa place et son ampleur initiale,*

*Cas C : l'aire s'est rétracté puis a retrouvé petit à petit son ampleur initiale en colonisant d'autres espaces,*

*Cas D : l'aire, fragmentée, s'est contractée tout en se délocalisant ; les deux fragments initiaux ont totalement disparu,*

*Cas E : l'aire, fragmentée, a disparu au niveau du premier fragment ; le deuxième fragment s'est contracté puis a retrouvé son ampleur initiale,*

*Cas F : la situation est la même que dans le cas E mais la contraction du deuxième fragment est plus importante et délocalisée.*

Source : D'après Hof et al., 2011

Les bassins versants peuvent eux aussi être considérés comme des « îles biogéographiques » au sein desquelles les organismes aquatiques sont cantonnés (notamment les poissons ; les invertébrés, eux, ont la plupart du temps une phase aérienne qui leur permet de s'affranchir des limites de bassins).

Les mécanismes de spéciation et d'extinction pour ces espèces aquatiques se font donc à l'intérieur même de ces périmètres ainsi que tous les ajustements d'aires de répartition (Reyjol *et al.*, 2007). Les connexions inter-bassins ne peuvent se faire qu'en cas de régressions marines ou de mouvements tectoniques, ou de nos jours aussi par des introductions volontaires ou accidentelles.

Face au changement climatique contemporain, les marges de manœuvre pour l'ajustement spatial peuvent donc se révéler très réduites pour ces espèces. Lors des changements climatiques passés on constate d'ailleurs que les organismes aquatiques ont subi de forts taux d'extinction.

De nos jours, les canaux peuvent établir artificiellement des connexions inter-bassins et offrir ainsi des possibilités de migration plus étendues aux espèces aquatiques. Dans le même temps, ces structures artificielles sont justement partiellement responsables des invasions biologiques (gobies d'eau douces, dreissène, gammare "tueur"...).

Scheller & Mladenoff (2008) montrent que pour 22 espèces d'arbres dont l'évolution de la répartition aux États-Unis a été modélisée, les extensions d'aires de répartition et le degré de fragmentation sont négativement corrélés. Ces extensions sont aussi dépendantes de l'abondance des espèces dans leurs populations initiales et du taux de compétition qui s'exerce avec les autres espèces.

Dans certains cas, une partie des populations devrait pouvoir migrer mais le changement climatique va en laisser d'autres localisées et relictuelles qui seront tôt ou tard vouées à s'éteindre même si à l'échelle de la métapopulation (Europe par exemple) l'espèce pourrait se maintenir (Mazaris *et al.*, 2012).

D'autres facteurs liés à la dynamique locale influent sur les capacités des individus à étendre l'aire de répartition de ces populations. Il s'agit notamment de la croissance démographique, de la compétition intraspécifique et de la densité car la dispersion dépend fortement de ces paramètres pour certaines espèces (Best *et al.*, 2007).

#### **II.3.4. Prépondérance entre changement climatique et autres pressions**

Comme mentionné auparavant, le climat agit majoritairement à large échelle. Il est donc un des principaux facteurs qui déterminent, depuis des millions d'années, la répartition des espèces à l'échelle du globe. Dans le futur, on peut ainsi s'attendre à ce que le climat supervise les autres facteurs, notamment les pressions anthropiques, dans la détermination des répartitions des espèces (cf. Figure 21).

Toutefois, il existe des cas où la hiérarchisation s'inverse comme le montre la situation du Lézard ocellé en France. Le climat est devenu un facteur secondaire pour la répartition française de ce reptile et le changement climatique ne va donc pas être le facteur premier qui dictera sa répartition future. En effet, le réchauffement climatique devrait en toute logique entraîner une extension de l'aire de répartition de ce Lézard thermophile au-delà de sa distribution actuelle, et c'est ce que suggèrent les modèles climatiques. Pourtant, l'évolution récente des populations situées aux marges Nord de la distribution montre que c'est l'inverse qui est observé sur les 50 dernières années (Grillet *et al.*, 2006 *in* Rogeon & Sordello, 2012). Cela tient essentiellement à l'évolution des habitats fréquentés par l'espèce (milieux ouverts) qui se réduisent sous l'effet de la déprise rurale et de ses conséquences (reforestation, extension des parcelles cultivées, ...). Dans le cas présent, les effets anthropiques, et notamment l'occupation du sol, apparaissent dominants sur les effets climatiques (Cheylan & Grillet, 2005 *in* Rogeon & Sordello, 2012).

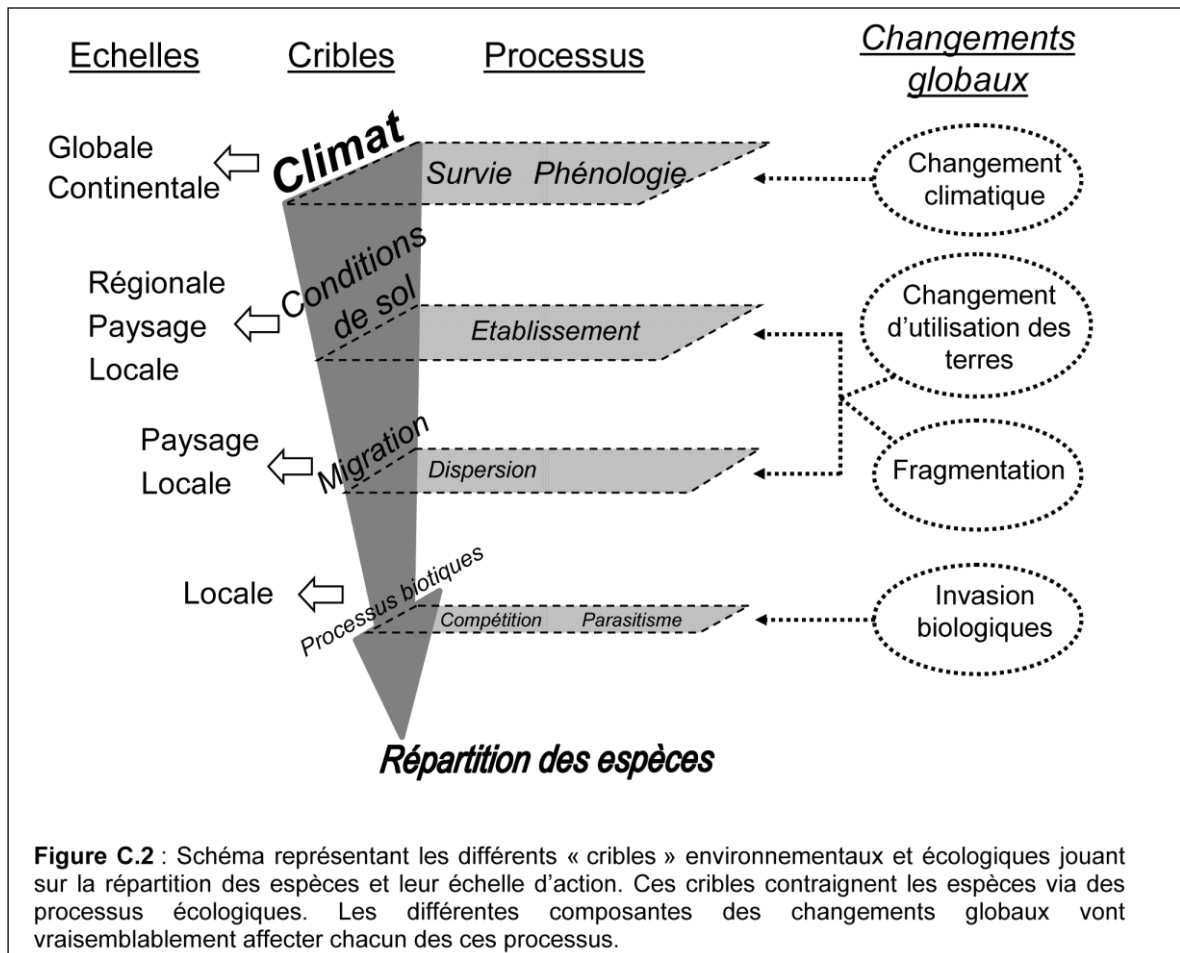


Figure 21 : Échelle d'action du changement climatique par rapport à l'ensemble des changements globaux.

Source : Morin, 2006

Ce phénomène est connu pour d'autres espèces. Par exemple, pour les hyménoptères pollinisateurs ou certaines plantes. Il s'agit là encore de cas où la qualité du milieu liée aux pratiques (intensification, traitements phytosanitaires, etc.) apparaît plus importante que le climat en lui-même.

Dans leur étude, Tedesco *et al.* (2013) concluent aussi que les pressions anthropiques comme la fragmentation des cours d'eau restent prépondérantes à moyen terme par rapport aux effets du changement climatique, parce qu'elle entrave directement le cycle de vie des espèces aquatiques (barrages par exemple) alors que le changement climatique n'agit qu'à long terme.

Wisz *et al.* (2013) montrent aussi que les interactions biotiques et leur dynamique influencent les relations climat/espèces et ont donc des implications dans la prédiction des aires de répartition.

D'une manière générale, le changement climatique est une menace de long terme et, dans le temps présent, d'autres pressions peuvent être plus néfastes et menacer directement certaines espèces. De même les conséquences indirectes des changements climatiques, liées à l'homme (changements de pratiques forestières ou agricoles, déplacements humains) peuvent avoir des impacts sur la biodiversité à court ou moyen terme et restent un sujet sous étudié par la recherche (Chapman *et al.*, 2014).

Ce point montre toute l'importance de disposer de prédictions fiables quant aux réponses potentielles de la biodiversité avec différents scénarios possibles qui conjuguent à la fois changement climatique et autres pressions, notamment le changement d'utilisation des terres, la qualité des milieux et leur niveau de fragmentation. Il souligne également la nécessité d'approches multifactorielles afin de ne pas faire du changement climatique l'entrée unique dans les programmes de conservation.

### II.3.5. Habitudes comportementales différentes, notamment entre migrateurs et sédentaires

Certaines espèces ont en réalité plusieurs aires de répartition selon que l'on s'intéresse à leur aire d'hivernage ou de reproduction. C'est notamment le cas de l'avifaune migratrice. Rappelons que la migration chez les oiseaux n'est pas motivée par la température mais par la nécessité d'un accès constant à la nourriture. Les oiseaux ne migrent pas vers les pays chauds parce qu'ils ne tolèrent pas le froid hivernal de leur zone de reproduction, ils migrent parce que les conditions hivernales ne leur permettent plus de s'alimenter (gel et couvert neigeux qui privent d'accès à la nourriture, raréfaction des proies et des graines en mauvaise saison, ...). Néanmoins, sans qu'il y ait de lien direct entre migration et température, c'est donc bien quand même la rigueur de l'hiver qui influe sur le comportement migratoire en ceci qu'elle joue sur l'accès à la nourriture. Le changement climatique est donc à même de remettre en cause le statut migrateur de certaines espèces ou de modifier à minima les aires de répartition hivernales (Patterson & Guerin, 2013a). Plusieurs cas sont déjà constatés en France. À titre d'exemple, 28 342 oies cendrées ont hiverné en France en 2011 contre 10 en 1968 (MEDDE, 2014c). Certaines espèces ne migrent plus jusqu'en Afrique (Cigogne, Grue cendrée) et hivernent dans le sud de la France voire même plus au Nord (région Centre).

### **II.4. Illustration par groupes biologiques**

Harrison *et al.* (2006) ont effectué une analyse multi-groupes taxonomiques. Les auteurs ont considéré la répartition de 47 espèces choisies parmi plusieurs groupes biologiques (plantes, insectes, oiseaux et mammifères), reflétant 10 types d'habitats différents et témoignant de dynamiques positives comme déclinantes. La répartition actuelle de ces espèces a d'abord été modélisée (le résultat est fidèle à la réalité pour 45 des 47 espèces) puis 3 scénarios de changement climatique ont été testés. Les résultats montrent que la distribution d'un grand nombre d'espèces en Europe est altérée par le changement climatique. La réponse générale est un glissement Sud-Ouest vers Nord-Est des répartitions. Cependant, les effets diffèrent entre les espèces, notamment selon leurs capacités de dispersion : la répartition des espèces les plus mobiles peut ainsi se déplacer suffisamment rapidement pour suivre l'évolution du climat.

À l'échelle mondiale, Foden *et al.* (2013) ont également fait ce constat que la plupart des modèles prédictifs dans les études sur l'adaptation des communautés face au changement climatique se basent sur les seuls paramètres climatiques et oublient les facteurs biologiques et écologiques des espèces. Les chercheurs ont alors mis au point un indice basé sur trois paramètres pour prédire la vulnérabilité d'une espèce face au changement climatique : sa sensibilité (degré du risque d'extinction, probabilité de persistance *in situ*), son exposition au phénomène climatique (amplitude du changement climatique), ses capacités d'adaptation (traits de vie permettant de s'adapter et notamment spécialisation et mobilité). Puis cette grille a été appliquée à 16 857 espèces d'oiseaux, amphibiens et coraux du monde. Une espèce est considérée fortement vulnérable face au changement climatique si elle présente à la fois une forte sensibilité, une forte exposition et de faibles capacités d'adaptation. Les auteurs montrent ainsi que les espèces situées dans les zones les plus exposées au changement climatique ne sont pas nécessairement les espèces les plus sensibles ni avec les moins bonnes capacités d'adaptation. Établir des priorités de conservation en se basant uniquement sur l'exposition d'une espèce au changement climatique est donc insuffisant. La « sensibilité » (menace d'extinction) seule est également insuffisante. Les auteurs constatent que 6-9% des oiseaux, 11-15% des amphibiens et 6-9% des coraux parmi les espèces étudiées sont à la fois fortement exposés au changement climatique et menacés d'extinction actuellement. Il faut cependant noter que cette étude modélise la dimension CC d'une manière assez simplifiée : les espèces exposées au changement climatique ici sont uniquement celles dont les 5 variables climatiques vont être les plus extrêmes (75 %).

Or, une espèce peut être très dépendante à une seule variable climatique, donc son exposition peut être très forte mais cela ne sera pas considéré ici avec ce type de mesures (com. pers. Bellard, 2014).

#### II.4.1. Communautés végétales

Plusieurs études diachroniques existent pour la flore européenne (Bertand *et al.*, 2011 ; Lenoir *et al.*, 2010a ; Lenoir *et al.*, 2008). Lenoir *et al.* (2008) par exemple ont comparé la distribution altitudinale de 171 végétaux de forêt entre 1905 et 1985 et entre 1986 et 2005 le long du gradient d'altitude de 0 à 2600 m en Europe de l'ouest. Les résultats montrent bien un glissement vers le nord des aires de répartition de ces espèces, avec une moyenne de 29 m tous les 10 ans. Mais dans le détail, ce déplacement est plus prononcé pour les espèces déjà inféodées aux milieux montagnards et pour les espèces de prairies qui sont caractérisées par des cycles de vie rapides.

#### II.4.2. Amphibiens et reptiles

Araujo *et al.* (2006) ont étudié la répartition potentielle de la majorité des espèces d'amphibiens et de reptiles d'Europe d'ici à 2050 sur la base de plusieurs modèles climatiques. Les projections montrent que les aires de répartition des amphibiens et des reptiles gagneraient en surface vers le Nord mais dans des proportions différentes selon les capacités de dispersion des taxons. Ces possibilités sont de plus à contrebalancer avec la raréfaction de la disponibilité en eau que va provoquer le changement climatique, néfaste à la survie des amphibiens notamment. Le cas échéant, des extinctions de populations seraient constatées dans le sud-ouest de l'Europe car l'augmentation des températures et de l'aridité amènerait à des climats comparables à ceux d'Afrique du Nord défavorables aux amphibiens.

#### II.4.3. Avifaune

Dans le Nord de l'Amérique, des analyses montrent qu'en 40 ans, 58 % des 305 espèces d'oiseaux observées pendant les premières semaines d'hiver ont très nettement étendu leur répartition vers le Nord (en moyenne 56 km vers le Nord et plus de 161 km pour plus de 60 espèces) (Audubon, 2009).

Huntley *et al.* (2006) ont considéré les modifications de répartition d'espèces se reproduisant à la fois en Europe et en Afrique. La répartition actuelle des oiseaux a d'abord été modélisée, avec un résultat considéré comme fidèle à la réalité. Les variables climatiques du modèle ont ensuite été modifiées pour tester l'impact du changement climatique sur la répartition. Les résultats montrent des implications substantielles, certaines espèces pouvant voir leur marge de répartition varier de 1000 km. Mais surtout, les résultats montrent un déclin général de la richesse spécifique dans les communautés d'avifaune. Les espèces d'oiseaux ayant déjà actuellement une répartition localisée ou étant spécialisées dans leur habitat semblent être celles qui accusent les plus gros impacts. Pour les espèces migratrices, les conséquences sont d'autant plus grandes que le changement climatique est fort dans les deux quartiers (hivernage et reproduction) voire aussi dans leurs aires de repos, augmentant ainsi les distances qu'elles ont à parcourir saisonnièrement.

Julliard *et al.* (2003) ont montré chez les oiseaux que la distribution latitudinale d'une espèce et sa spécialisation à l'habitat expliquaient, ensemble, les tendances de populations en réponse au changement climatique pour 77 espèces d'oiseaux communs. Plus les espèces sont distribuées au Nord et plus elles sont spécialisées, plus le déclin est fort sous l'effet du changement du climat.

Jiguet *et al.* (2007) se sont eux aussi intéressés à la réponse de 71 espèces d'oiseaux face au changement climatique en faisant varier plusieurs variables/paramètres climatiques et d'habitat. Les résultats montrent que les espèces spécialistes déclinent plus fortement que les généralistes, mettant en avant une

dégradation générale de la qualité des habitats par le changement climatique. En outre, le nombre de reproduction par an est un paramètre déterminant ; les espèces qui ne possèdent qu'une reproduction par an sont les plus impactées. La durée de vie et le taux de fécondité sont également corrélés à la réponse au changement climatique (les espèces à faible fécondité et à durée de vie courte s'adaptent mal). Enfin, les capacités de dispersion natale jouent un rôle déterminant pour la recherche d'habitat favorable (qualité, climat).

Barbet-Massin *et al.* (2012) - en cumulant données d'habitats et données climatiques - observent que pour 409 des espèces d'oiseaux étudiées en Europe, 71 % d'entre elles risquent de subir une diminution de leur répartition d'ici à 2050, avec un glissement moyen de leur aire de répartition de 335 km. Par conséquent, la richesse spécifique décroît dans les régions du sud de l'Europe et augmente dans certaines localités nordiques (Scandinavie et nord de la Russie). En faisant varier des scénarios de dispersion pour analyser les capacités de mobilité différentes des espèces, les résultats peuvent varier de plus de 10 % en ce qui concerne la richesse spécifique.

#### II.4.4. Poissons

Concernant les poissons, la température de l'eau étant un facteur déterminant de répartition des espèces aquatiques, les conséquences d'un réchauffement global pourraient être sévères, notamment dans le cas des espèces d'eau froide (comme le Saumon atlantique, l'Omble chevalier, l'Ombre commun...).

Tedesco *et al.* (2013) ont comparé le taux d'extinction « naturel » des espèces avec le taux prédit sous changement climatique actuel. Ce dernier est à peu près 7 fois supérieur. Toutefois, de fortes disparités ressortent entre les zones biogéographiques ; les cours d'eau des régions semi-arides de Méditerranée sont les plus concernés.

Les modifications d'aires de répartition de plusieurs espèces piscicoles ont fait l'objet d'une étude prédictive à large échelle dans le cadre du programme GICC (Pont *et al.*, 2006 *in* ONEMA, 2010). L'évolution des probabilités de présence de différentes espèces sur l'ensemble du réseau hydrologique français a été simulée, au moyen de modèles bioclimatiques corrélatifs. Les résultats montrent pour la Truite (*Salmo trutta*) par exemple des pertes potentielles d'habitat de 16 à 33 % pour deux scénarios d'augmentation des températures (Scénario 1 : +0,54 °C en hiver et +1,06 °C en été ; Scénario 2 : +1,07 °C en hiver et +2,12 °C en été) (cf. Figure 22).

Pour les poissons migrateurs amphihalins, une étude basée sur des modèles prédictifs de distribution en fonction des caractéristiques des bassins versants, à partir des répartitions connues, et pour différents scénarios climatiques, prévoit de nettes contractions des aires de répartition à l'horizon 2100 pour 14 espèces sur 22 espèces européennes considérées avec seulement quelques rares gains (Lassalle, 2008) (cf. Figure 23). Dans les faits, c'est déjà ce qui est constaté. Par exemple, l'Éperlan (espèce d'eaux fraîches) a déjà réduit la limite Sud de son aire de répartition vers le Nord (disparu de la Garonne) alors que la Grande alose (espèce d'eaux chaudes) décale vers le Nord sa limite Nord de répartition (colonisation régulière des bassins normands) (Rochard & Lasalle, 2010).

Enfin, Daufresne & Boet (2007) ont réalisé une méta-analyse pour étudier les recompositions des communautés de poissons de rivières face au changement climatique durant ces 15 à 25 dernières années. Cette étude apporte de nouvelles preuves des impacts du changement climatique sur les assemblages piscicoles, celui-ci devançant désormais les autres pressions anthropiques. La proportion d'espèces d'eau chaude augmente, ce qui se traduit par un bouleversement des biocénoses, même si la richesse spécifique s'accroît.

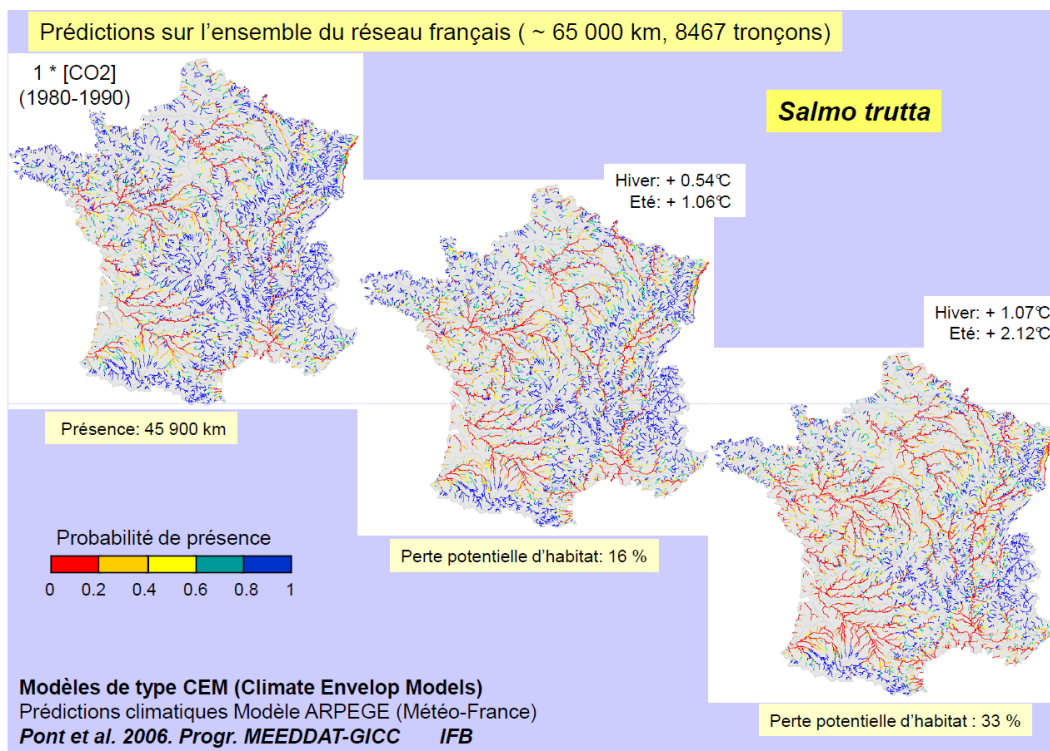


Figure 22 : Prédiction de l'aire de répartition de *Salmo trutta* sur le réseau hydrographique français.  
Source : Pont et al., 2006 in Basilico et al., 2010

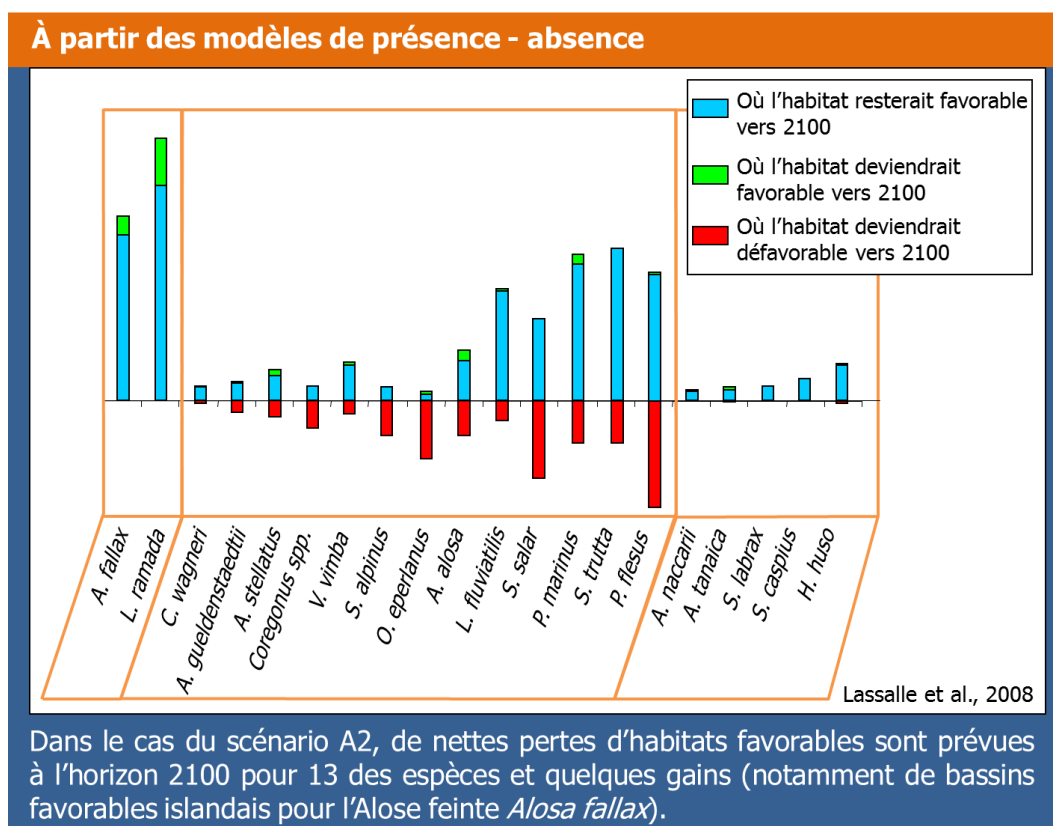


Figure 23 : Prédiction des habitats favorables des migrateurs amphihalins européens à l'horizon 2100 selon des modèles d'aire de distribution (scénarios d'émission de gaz à effets de serre A2 et modèle climatique global HadCM3).  
Source : Lassalle et al., 2008

Des éléments de connaissance supplémentaires ont été produits récemment, issus du projet Explore 2070 (qui ne concerne pas que les poissons). Grenouillet & Lecomte (2014) ont étudié les modifications d'aire de répartition de 32 espèces de poissons entre une période initiale (1980-1992) et une période contemporaine (2003-2009). Les résultats mettent en avant l'hétérogénéité des réponses en fonction des espèces. Ces réponses dépendent notamment de la taille initiale de l'aire de répartition et de certains traits de vie, comme la longévité.

Un nouveau « Comprendre pour agir » sur les effets du changement climatique sur les poissons est en cours d'élaboration par l'ONEMA.

#### **II.4.5. Mammifères**

Pour les Mammifères, Levinsky *et al.* (2007) ont montré par modélisation que jusqu'à 9 % des mammifères européens pourraient s'éteindre sous l'effet du changement climatique, tandis que jusqu'à 78 % risquent une diminution de plus de 30 % de leur aire de répartition. Les espèces endémiques non migratrices sont les plus concernées alors que les mammifères à large répartition montrent des d'adaptation. Au final, la richesse spécifique des Mammifères pourrait sensiblement diminuer dans le pourtour méditerranéen, riche en endémiques, alors que plus d'espèces fréquenteront les pays du Nord. Il faut noter que les modèles utilisés ici par les auteurs n'intègrent que le climat et la répartition et ils restent donc une approximation par rapport à la réalité, au regard de l'effet d'autres paramètres (occupation du sol notamment).

#### **II.4.6. Insectes**

Concernant les insectes, Heikkinen *et al.* (2006) ont étudié la vulnérabilité de 100 espèces de papillons européens face au changement climatique, en utilisant la répartition des espèces, le climat, l'occupation du sol, la topographie et des critères biologiques (capacités de dispersion, spécialisation à l'habitat, localisation géographique). Les résultats montrent que les espèces du nord de l'Europe sont les plus vulnérables parmi tous les papillons d'Europe. Il existe cependant beaucoup de variations entre espèces et c'est avant tout une combinaison de facteurs qui joue : notamment les traits de vie, la topographie et l'occupation du sol permettent d'expliquer significativement la susceptibilité des espèces face au changement climatique.

#### **II.4.7. Araignées**

Ce groupe est fortement sous-étudié. Néanmoins, une publication récente (Leroy *et al.*, 2014) a étudié l'évolution de la répartition de 10 espèces d'araignées en modélisant l'évolution de l'occupation du sol et du climat d'ici à 2050. Tout en étant conscient des incertitudes liées à la modélisation, les résultats montrent que ce groupe n'est pas épargné par les changements climatiques et d'occupation des sols, avec des modifications importantes dans la répartition des espèces étudiées. L'étude de Hickling *et al.* (2006) présentée plus haut (cf. Figure 18) montre par ailleurs un décalage effectif important des aires de répartition vers le Nord pour le groupe des araignées.



# **III. LES EFFETS DE L'AJUSTEMENT SPATIAL SUR LES ECOSYSTEMES**

## **III.1. Vers une recomposition des communautés**

Rappelons qu'un écosystème est l'assemblage d'une composante physique (biotope) et d'une composante vivante (biocénose) incluant l'ensemble des interactions que cette association entraîne.

Certains paramètres du biotope ne devraient pas radicalement changer sous l'effet du changement climatique (roche mère, nature du sol, géomorphologie). Par contre, sous l'effet des ajustements spatiaux décrits précédemment, il faut s'attendre à ce que les biocénoses changent.

Thuiller (2004) a estimé la répartition de 1350 espèces végétales européennes d'ici à 2050 en comparant 4 modèles de projection différents (modèles de niche) et 5 scénarios de changement climatique. L'étude monte un « turnover » (c'est-à-dire un changement de répartition sans zone de chevauchement) de plus de 70 % des espèces étudiées à travers l'Europe illustrant donc bien la recomposition des communautés à laquelle il faut s'attendre.

Ces changements peuvent se traduire à la fois par des appauvrissements mais aussi par une augmentation de la richesse spécifique pour certains écosystèmes. Ces deux effets sont prévus par Rosset et al. (2010) pour les milieux aquatiques d'altitude et de petite taille.

Par ailleurs, compte tenu de l'hétérogénéité des réponses entre espèces vue précédemment, le résultat sera vraisemblablement une recomposition des communautés et un changement des écosystèmes, plus qu'une simple transposition des écosystèmes actuels. Certains écosystèmes vont sans doute également disparaître tout simplement (Williams *et al.*, 2007).

Williams *et al.* (2007) montrent qu'à l'échelle mondiale, il existe une correspondance forte entre les régions où le climat va changer d'ici à 2100 (apparition de nouveaux climats/disparition de climats actuels) et la richesse biologique/taux d'endémisme (hotspots de biodiversité).

## **III.2. Conséquences à attendre des recompositions de communautés**

### **III.2.1. Modification des interactions et du fonctionnement écosystémique**

La recomposition des communautés au sein des écosystèmes remaniera de fait les interactions entre les espèces qui les composent (Brooker *et al.*, 2007 ; Gilman *et al.*, 2010 ; Walther, 2010).

C'est la partie sans doute la moins connue des impacts du changement climatique sur la biodiversité. Nous savons néanmoins qu'il faut ainsi s'attendre à des remaniements concernant les rapports trophiques (proies/prédateurs), les liens hôtes/parasites et les relations mutualistes (Bellard *et al.*, 2012 ; Gilman *et al.*, 2010). Plusieurs cas montrent déjà que des relations, par exemple mutualistes, de très long terme, s'altèrent, voire cessent, sous l'effet du changement climatique (Mooney *et al.*, 2009).

Parmi elles, les relations plantes/insectes (pollinisation) peuvent être touchées rapidement si l'une des deux espèces ajuste sa répartition et pas l'autre (Bellard et al., 2012). Kiers et al. (2010) ont mis en évidence trois phénomènes possibles :

- une transformation de l'interaction mutualiste en une interaction antagoniste,
- un changement de partenaire pour une nouvelle relation mutualiste,
- l'abandon du mutualisme si les transformations engendrées par le changement climatique font que désormais les contraintes du mutualisme deviennent trop grandes par rapport aux bénéfices de cette interaction. Dans ce cas, il n'est pas exclu que cet abandon conduise les deux protagonistes peu à peu à l'extinction.

A noter que les modifications d'interactions au sein des biocénoses seront également provoquées par l'ajustement interne et phénologique, et pas uniquement l'ajustement spatial. L'analyse de 50 ans de données pour 4 espèces de *Prunus* et un papillon pollinisateur a révélé que les plantes fleurissent plus tôt alors que la phénologie du papillon n'a pas changé (Kiers *et al.*, 2010). Dans de tels cas, les papillons peuvent être impactés rapidement car - même si cette relation n'était pas indispensable (différence avec une symbiose) - les insectes perdent une source de nourriture et il n'est pas garanti qu'ils parviennent à trouver une alternative.

Rafferty & Ives (2010) ont néanmoins montré que les plantes qui sont capables d'avancer leur floraison sont aussi celles qui sont pollinisées par des insectes précoces, ce qui minimise le risque de désassortiments plante/pollinisateurs.

Il est également possible que des espèces ayant ajusté leur répartition pour chercher un climat favorable se retrouvent confrontées à d'autres facteurs qui ne leur sont plus favorables dans ce nouvel écosystème sur le plan du biotope comme de la biocénose (compétition avec certaines espèces, ...). Il est effectivement possible que l'on puisse assister à un « forçage » d'espèces non analogues à se côtoyer (Urban *et al.*, 2012 ; Walther, 2010). Le fait qu'une espèce réussisse à s'ajuster spatialement ne signifie donc pas qu'elle a validé sa survie.

Compte tenu de tout ce qui est évoqué ici, les changements dans les répartitions d'espèces et les réorganisations de communautés qui en résultent ont et auront des impacts forts sur le fonctionnement des écosystèmes et les services que les êtres humains en tirent (Gilman *et al.*, 2010 ; Walther, 2010).

De plus, les recompositions d'écosystèmes pourront se traduire par la formation sur une nouvelle zone d'une communauté déjà identifiée ailleurs, dont le fonctionnement pourrait être plus ou moins prédit, mais aussi par la formation de nouvelles communautés « inédites » dont le fonctionnement nous est totalement inconnu (Urban *et al.*, 2012 ; Walther, 2010).

Par exemple, la composition des communautés d'altitude dans l'île de Marion en Sub-Antarctique n'est pas simplement une communauté analogue à celle native des altitudes plus basses qui se serait déplacée ; c'est réellement une nouvelle combinaison d'espèces formant une communauté à découvrir (Le Roux & McGeoch, 2008 *in* Walther, 2010).

### **III.2.2. Effets rétroactifs (feedback)**

Les effets peuvent ensuite s'enchaîner, notamment au travers des réseaux trophiques. Dans une zone soumise à réchauffement climatique, les changements dans les communautés d'herbivores ont occasionné des changements dans les communautés de plantes alors qu'elles n'étaient pas impactées par le climat à la base. En l'absence d'herbivores, les communautés initialement dominées par les graminées ont en effet muté vers des communautés dominées par le Bouleau nain (Post & Pedersen, 2008 *in* Walther, 2010).

A l'inverse, la modification de la végétation peut avoir un effet rétroactif sur la faune. Par exemple, si la proportion d'espèces sempervirentes augmente dans une forêt, les cycles du carbone et de l'eau peuvent s'en retrouver modifiés avec des implications sur l'écosystème forestier global. Ces changements de proportion entre végétation sempervirente et végétation caduque peuvent résulter de la combinaison

entre changement climatique et invasions biologiques par exemple ou de changement dans la phénologie des plantes sous l'effet du climat (Walther *et al.*, 2009 *in* Walther, 2010). Pearson *et al.* (2013) montrent également qu'à l'échelle de l'Arctique, la modification des répartitions des végétations sous l'effet du changement climatique, est susceptible d'influencer en retour le changement climatique lui-même, en l'occurrence en l'amplifiant, par le biais de l'évapotranspiration ou de l'albédo.

Au final, la façon dont les espèces vont ajuster leur aire de répartition aura, par la recomposition des écosystèmes que cela va engendrer, un effet sur les paramètres biophysique et biogéochimique de ces futurs écosystèmes. Par effet rétroactif, la manière dont ces écosystèmes vont eux-mêmes contribuer à l'atténuation du changement climatique en dépend (Higgins & Harte, 2008).

### **III.3. Extension des espèces exotiques envahissantes, des vecteurs de pathogènes et des effets indésirables**

Parmi les espèces dont l'aire de répartition fluctue ou va fluctuer sous l'effet du changement climatique, on retrouve aussi bien des espèces autochtones qu'allochtones. Les ajustements spatiaux des espèces allochtones sont donc d'autant plus à même d'entraîner des conséquences inconnues et non maîtrisées.

Bellard *et al.* (2013b) ont étudié l'évolution des aires de répartition des 100 espèces considérées comme les plus invasives dans le Monde (liste définie par l'UICN) d'ici à 2100. Les résultats montrent que le changement climatique et les changements d'occupation du sol, ensemble, sont à même d'altérer la répartition des espèces invasives de façon importante. Notamment, une augmentation potentielle du nombre d'espèces invasives est prédite dans le nord ouest de l'Europe car les biomes les plus impactés sont les forêts tempérées mixtes et décidues. Les espèces les plus concernées par ces invasions sont des invertébrés terrestres et aquatiques. Dans le même temps, chez les amphibiens et les oiseaux invasifs, les aires de répartition potentielles des espèces invasives pourrait au contraire décroître.

Concernant les milieux aquatiques par exemple, en parallèle de la régression de plusieurs poissons autochtones vue précédemment, les arrivées d'espèces dites exotiques connaissent une forte accélération : au nombre d'une dizaine d'espèces de poissons allochtones naturalisées en 1950, elles sont aujourd'hui 23 dans les eaux douces françaises, pour 46 autochtones (Lévêque, Séminaire Paris 2009 *in* ONEMA, 2010). Cette accélération peut constituer un facteur supplémentaire de déséquilibre pour les milieux aquatiques, certaines espèces pouvant pulluler. L'auteur nuance en revanche en rappelant qu'après les glaciations (-20 000 ans), le repeuplement des eaux d'Europe de l'Ouest s'est effectué de proche en proche à partir du refuge ponto-caspien. Les arrivées récentes dans nos eaux de poissons comme le Sandre, le Silure ou l'Aspe peuvent donc être vues comme le prolongement de ce mécanisme naturel.

Les arguments selon lesquels les colonisations de certaines espèces ne sont que la suite logique de la recolonisation suite aux extinctions dues aux glaciations du quaternaire restent néanmoins discutables : en effet, l'échelle de temps n'est pas la même entre une recolonisation profitant des phénomènes hydrogéologiques et météorologiques (capture de bassin, fonte de glacier, etc.) et la colonisation par des connexions artificielles ou des introductions volontaires.

Le réchauffement climatique facilite aussi l'implantation et l'extension d'espèces susceptibles d'affecter la santé humaine (insectes vecteurs, production de pollens) (Fischer *et al.*, 2011 ; MEDDTL, 2008). Cette extension se fera vers le Nord comme en altitude à l'instar de ce qui est observé chez la faune et la flore autochtones.

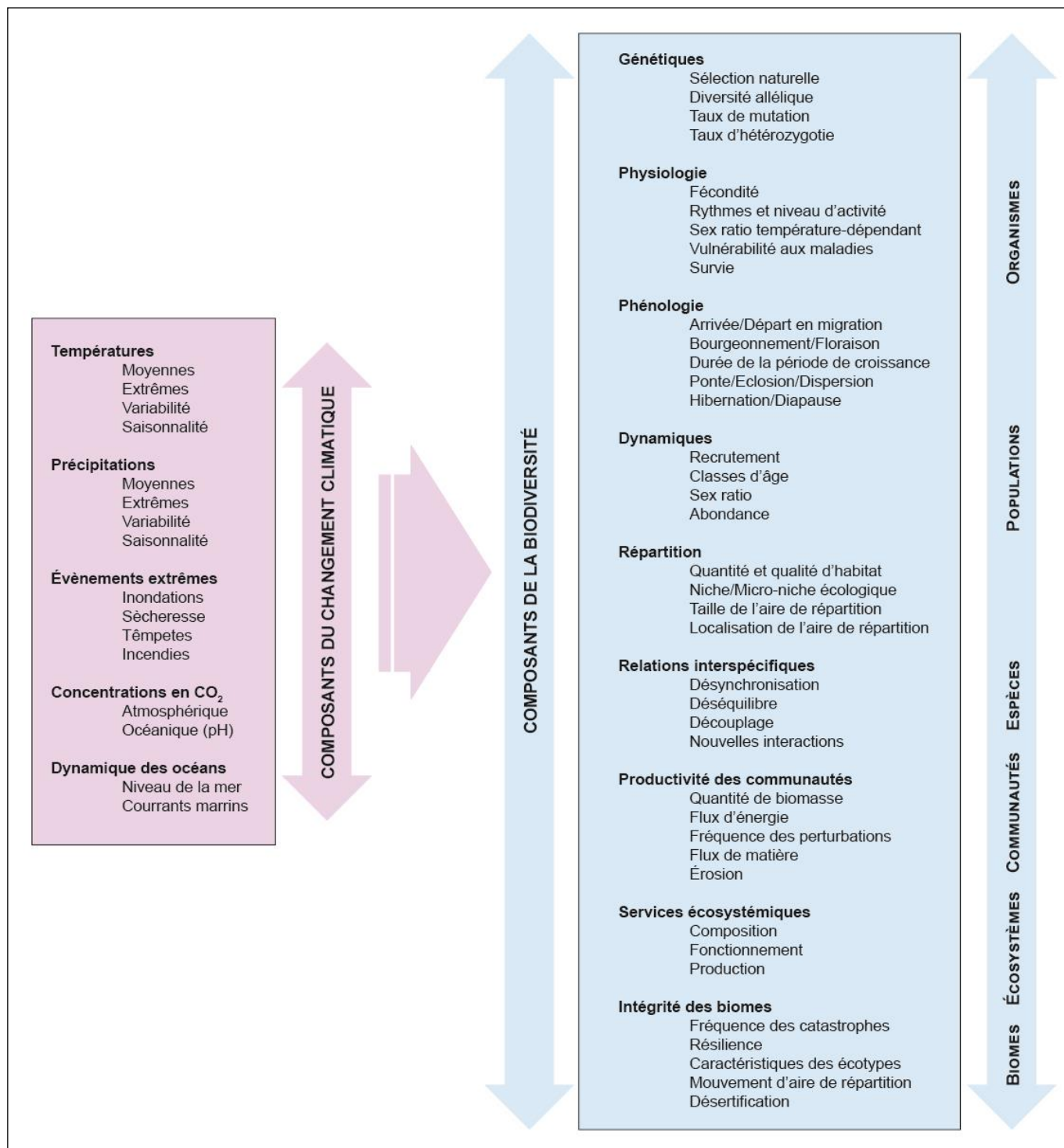


Figure 24 : Effets attendus du changement climatique aux différentes échelles de la biodiversité.

Source : D'après Bellard *et al.*, 2012

Les pays du Nord sont ainsi touchés par des maladies émergentes liées aux déplacements de vecteurs (arthropodes piqueurs) sensibles aux changements de température et de pluviométrie (MORAND *in* ONERC, 2011).

Par exemple, l'augmentation de la température des milieux aquatiques est favorable à une plus forte densité et une plus large répartition des moustiques, vecteurs potentiels de trois pathologies : les virus du chikungunya et de la dengue (via les moustiques tigres) et le paludisme (via les moustiques anophèles) (MEDDTL, 2008). La maladie de Lyme, véhiculée par les tiques, est également favorisée (Simon *et al.*, 2014).

Une étude relate également que les modifications provoquées par le changement climatique dans le comportement migratoire (changement des voies de migration, modification des dates, changement des répartitions hivernales, ...) sont à même d'avoir des conséquences sur la dissémination des pathogènes de l'avifaune (Patterson & Guerin, 2013a).

Au final, des conséquences en chaîne à toutes les échelles de la biodiversité, de la génétique jusqu'au biome, sont donc à prévoir sous l'effet du changement climatique (Bellard *et al.*, 2012) (cf. Figure 24).

## **IV. CONSEQUENCES DES EVENEMENTS EXTREMES**

Comme nous l'avons vu, le changement climatique n'est pas à considérer comme un chemin linéaire de réchauffement et d'assèchement du climat. Il se caractérise aussi par **des évènements brutaux (catastrophes) qui deviennent et vont devenir plus forts et plus récurrents.**

Globalement en écologie, l'hypothèse de la perturbation intermédiaire veut que les écosystèmes atteignent une diversité maximale en espèces lorsqu'ils sont soumis à un régime de perturbations de fréquence et d'intensité moyennes.

Les perturbations extrêmes, elles, sont susceptibles :

- d'être le moteur de **déplacements brutaux d'espèces**,
- d'entraîner dans certains cas la **disparition** tout simplement de certains écosystèmes ou d'espèces.

### **IV.1. Déplacements brutaux d'espèces**

La vitesse de progression des aires de répartition n'est pas linéaire et l'ajustement spatial peut parfois se faire brutalement aux moments des évènements extrêmes.

Par exemple, dans le bassin du Rhône, à hauteur du Bugey, les espèces thermophiles de poissons, comme le Chevesne, ou des invertébrés (par exemple *Athricops*, *Potamopyrgus*) remplacent les espèces d'eau plus froide comme la Vandoise ou des taxons d'invertébrés comme *Chloroperla*, *Protoneumura* (Daufresne *et al.*, 2003). Or, ces changements ne sont pas tous graduels ; certains dépendent d'évènements hydroclimatiques extrêmes comme les crues ou les canicules, qui favorisent le développement d'espèces tolérantes vis-à-vis de la température ou envahissantes.

Également ces évènements extrêmes peuvent changer brutalement la dynamique des populations ce qui doit avoir des conséquences sur les mouvements dispersifs. La canicule de 2003 par exemple a causé une régression brutale des populations d'Alose, qui se sont ensuite restabilisées, mais à seulement quelques milliers d'individus (com. pers. Monnier, 2009 *in* Basilico *et al.*, 2009 et Basilico *et al.*, 2010). L'été 2003 a aussi marqué un point de rupture dans les populations de certaines espèces de mollusques (Massu & Landmann, 2011).

### **IV.2. Disparition d'espèces et d'écosystèmes fragmentés ou naturellement isolés**

En dessous d'un certain nombre d'individus une population devient exposée à une spirale de l'extinction (dit vortex d'extinction) (cf. Figure 25).

Les petites populations sont en effet davantage soumises aux facteurs stochastiques (effets du hasard), notamment à la stochasticité environnementale (par ex : variabilité dans la rigueur des hivers d'une année à l'autre), ainsi qu'aux catastrophes (évènements extrêmes notamment climatiques).

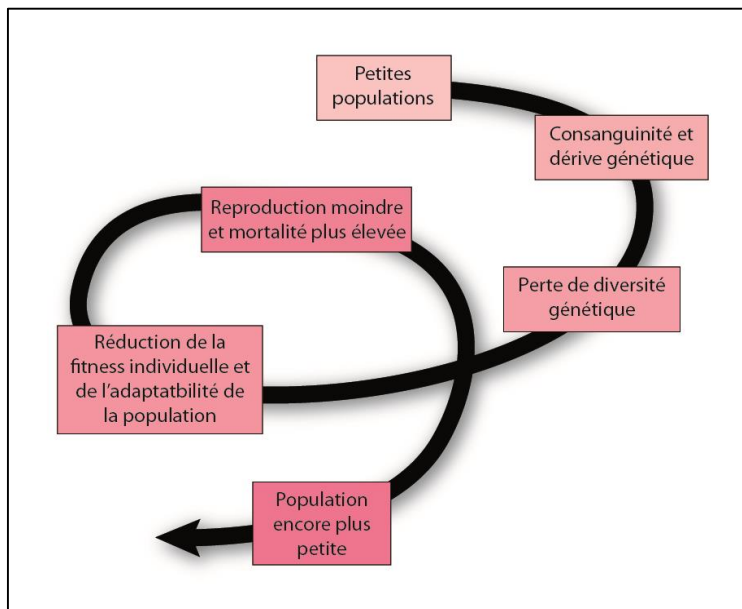


Figure 25 : Spirale de l'extinction en dessous d'un certain effectif de population.

L'augmentation de la fréquence des événements climatiques extrêmes et de leur intensité est donc à même de fragiliser, voire de faire disparaître, les petites populations. En particulier, les populations fragmentées par l'homme au point d'être relictuelles sont très concernées, ce qui renforce la synergie déjà constatée entre changement climatique et fragmentation (Opdam & Wascher 2004).

Les populations naturellement petites, endémiques ou insulaires sont aussi dans ce cas. Une étude montre par exemple pour la flore, des dynamiques totalement opposées dans les communautés de montagne entre la région méditerranéenne et la région boréale-tempérée (Pauli *et al.*, 2012). Entre 2001 et 2008, les premières ont perdu en moyenne 1,4 espèces alors que les

deuxièmes ont gagné en moyenne 3,9 espèces. Dans la mesure où la région méditerranéenne est dans le même temps celle qui abrite le plus d'espèces endémiques, cette tendance pourrait amener à des pertes irremplaçables pour la flore européenne malgré des accroissements locaux dans les régions boréales-tempérées.

Les effets des événements extrêmes restent peu étudiés mais certaines publications montrent qu'ils ont un impact important. Chez le Cormoran huppé (*Phalacrocorax aristotelis*), Frederiksen *et al.* (2008) ont constaté que la survie et la démographie des individus étaient fortement réduites par le changement climatique du fait des événements extrêmes alors qu'un changement moyen régulier a relativement peu d'impact.

## V. INCERTITUDES SUR L'AJUSTEMENT SPATIAL

Les conséquences du changement climatique sur la biodiversité sont réelles et déjà constatées. L'ensemble des impacts observés et attendus font l'objet d'un nombre important de publications scientifiques comme le lecteur aura pu s'en rendre compte dans les paragraphes précédents. Néanmoins, une part importante d'incertitudes existe encore, qui peuvent être liées :

- à la fois à notre niveau de connaissance du fonctionnement de la biodiversité qui n'est que partiel et nous amène donc à sous-estimer ses capacités d'adaptation,

- à la fois aux outils utilisés pour prédire les impacts et l'usage de la modélisation qui s'accompagne de fortes incertitudes.

### **V.1. Incertitudes écologiques**

#### V.1.1. Part entre météorologie et climat, variabilité ou vrais ajustements

De la même manière que météo et climat se distinguent par la durabilité des tendances constatées, le principe est le même dans la lecture des événements écologiques. Il est en effet parfois difficile de conclure

si les modifications constatées sont à attribuer aux effets du climat - et donc à de vraies tendances de long terme - ou à des variations flexibles et oscillantes sur le court terme (dues à la météorologie voire même à d'autres facteurs). Autrement dit, il est difficile de faire la part entre réaction aux variations météorologiques ponctuelles, locales et inhabituelles et réaction pérenne à un changement climatique de long terme (Saether *et al.*, 2006).

Julliard *et al.* (2004) ont comparé les effets à long terme et les effets à court terme concernant la productivité des oiseaux. Avec le printemps particulièrement chaud de l'année 2003, 2/3 des 32 espèces d'oiseaux étudiées ont montré une productivité plus importante, ce qui montre bien une réactivité à des conditions météorologiques particulières. En revanche, ce gain par rapport aux années précédentes n'est significatif que pour les espèces se trouvant dans une dynamique stable ou positive sur le long terme. Les autres espèces, en déclin, ne montrent pas de particularité pendant cette année 2003 car elles sont prises dans une dynamique générale négative sous l'effet du changement climatique de long terme.

### V.1.2. Phénotype vs génotype et la microévolution

L'adaptation des espèces peut passer par le phénotype ou s'inscrire dans le génotype. Dans le premier cas il s'agit d'ajustements comportementaux ou morphologiques (taille des feuilles des végétaux, ...). Ces adaptations sont rapides, alors qu'une modification du génome prend plus de temps. Cependant, des études montrent des cas de microévolution sous l'effet du changement climatique. La micro-évolution se traduit ainsi par un changement rapide des fréquences des allèles pour certains traits d'histoire de vie qui se trouvent favorisés sous l'influence du changement climatique. Ce phénomène se fait dans un laps de temps beaucoup plus court que ce que l'évolution « pratique » habituellement et est restreint à une population.

Par exemple, Franks *et al.* (2007) ont montré qu'en quelques générations seulement une espèce végétale annuelle *Brassica rapa* avait génétiquement évolué pour s'adapter au changement climatique. Face aux sécheresses répétées d'année en année, le génotype de la population étudiée a en effet témoigné d'une microévolution se traduisant par un décalage de la période de floraison afin que celle-ci se déroule dans des périodes favorables.

Ce principe de microévolution est sans doute une capacité d'adaptation de la biodiversité sous-estimée. La micro-évolution pourrait jouer un rôle prépondérant à la fois dans la colonisation aux marges Nord des répartitions (en agissant comme moteur de l'ajustement spatial) et dans le maintien aux marges Sud des répartitions (en permettant une adaptation interne et temporelle sans besoin d'ajustement spatial). Les capacités des espèces à pratiquer la microévolution sont sans doute très inégales, notamment en fonction de leur stratégie de reproduction R ou K.

## **V.2. Incertitudes liées à la modélisation**

### V.2.1. La chaîne analytique déployée par la recherche

Les recherches menant aux publications présentées jusqu'ici se déroulent souvent selon une **chaîne analytique** qui se traduit par une succession de trois modélisations :

1) Les scénarios d'émissions : c'est une première modélisation permet de prévoir l'évolution des émissions de gaz à effet de serre,

2) La modélisation « climat » : cette seconde modélisation prévoit l'évolution du climat au regard de l'évolution des émissions de gaz à effet de serre,

3) La modélisation « impacts » : elle prévoit les conséquences de l'évolution du climat, en l'occurrence sur la biodiversité (déplacements d'aire de répartition, taux d'extinction, ...).

Or, un modèle est une représentation mathématique simplifiée d'un processus (Leriche, 2010). Il comporte donc inévitablement une part d'écart par rapport à la réalité. Des **incertitudes** existent ainsi à chacun des maillons de cette chaîne analytique. D'une part, celles-ci ne sont pas toujours quantifiables, et, d'autre part, elles se répercutent de maillon en maillon au fil de la chaîne (Buisson *et al.*, 2010b). L'incertitude du résultat final (impacts), qui n'est pas la somme des incertitudes de chaque maillon, n'est donc en fin de compte souvent pas connue. Par ailleurs, en fonction des modèles utilisés à chaque maillon, le chercheur peut bâtir des chaînes analytiques différentes aboutissant à des résultats variés pour les mêmes espèces cibles.

## V.2.2. Les étapes avant la modélisation impacts

L'étape de la modélisation « climat » est à elle seule très complexe et plusieurs points peuvent influencer fortement sur l'étape « impacts » qui viendra ensuite. Nous analyserons ici uniquement la question de la résolution et la question des données d'entrée.

### > La résolution des modèles climat

Il existe un très grand nombre de modèles climats, ayant leurs forces et leurs faiblesses (Landrieu, 2011), pouvant différer par leur résolution et leur échelle. Par exemple, on peut distinguer les modèles globaux (General Circulation Models GCM, de résolution entre 450 et 125 km, échelle planisphère) et les modèles régionaux (Regional Climate Models RCM, de résolution entre 50 et 12 km, échelle Europe par exemple) (Déqué *et al.*, 2012 ; Sordello, 2013).

Des progrès nets ont été effectués pour aboutir à des résolutions de plus en plus fines dans les modèles climat mais les écologues recherchent souvent des résolutions vraiment très fines, idéalement de 1 km. Les résolutions des modèles climatiques les plus fins (RCM) restent donc encore trop grossières.

Les chercheurs « impacts » essaient alors généralement d'obtenir la résolution qu'ils recherchent à partir de la résolution existante plus grossière, en faisant ce que l'on appelle du « downscaling » ou « descente d'échelle » (GICC, 2011 ; Sordello, 2013) (cf. Figure 26). Plusieurs méthodes existent comme de refaire tourner un modèle à plus haute résolution sur une aire limitée ou d'étirer la grille grossière pour effectuer une sorte de zoom. Mais ces méthodes sont biaisées car un modèle à échelle fine n'est pas un simple zoom d'un modèle à échelle grossière, il prend en compte de nouveaux processus de calcul et de nouveaux paramètres plus complexes et plus complets (comme l'effet de Foehn par exemple). Il existe aussi de très nombreuses méthodes statistiques pour faire du downscaling qui sont désormais une alternative (ou un complément) efficace aux approches dynamiques (RCMs).

En dernier recours, mais il s'agit finalement de la majorité des cas, les écologues utilisent la base de données WorldClim qui a une résolution fine (1 km) mais qui, par contre, estime le climat à partir de facteurs physiques (topographie notamment) et ne se base pas sur des observations météorologiques, ce qui amène donc d'autres limites (Sordello, 2013).

Plusieurs études mettent en évidence les effets d'utiliser une résolution grossière qui peut de manière divergente surestimer (Trivedi *et al.*, 2008) ou sous-estimer (Randin *et al.*, 2009) les aires de répartitions futures.

Une résolution grossière peut occulter certaines **zones microclimatiques** dans les projections climat car trop petites. Or, ces zones peuvent servir de microrefuges notamment pour des espèces peu mobiles qui ne peuvent adapter leur aire de répartition que « pas à pas ». Ces zones ont joué un rôle majeur pendant les changements de phases glaciaires et interglaciaires permettant à certaines espèces d'être préservées



localement là où les modèles climatiques actuels ne montrent rien. Les résultats des modèles impacts se retrouvent alors erronés, prédisant par exemple à tort une extinction d'espèce.

A l'inverse, plus on descend en finesse dans la résolution plus les facteurs anthropiques autres que le climat (gestion notamment) deviennent prépondérants en termes d'impacts, ce qu'il faut avoir en tête dans l'interprétation des résultats.

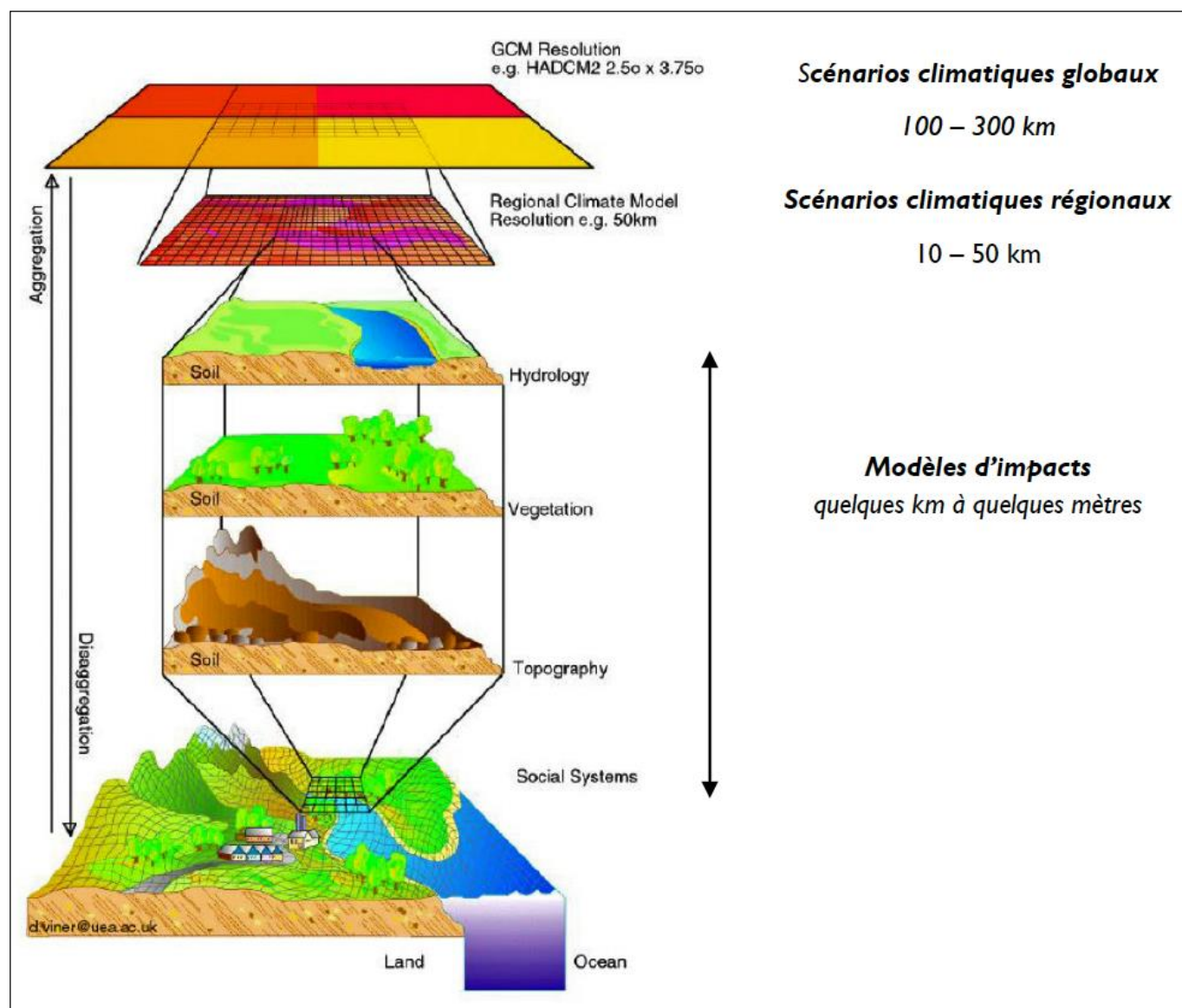


Figure 26 : Descente d'échelle depuis les scénarios climatiques jusqu'aux modèles impacts.

Source : David Viner in GICC, 2011

> Les données d'entrée dans les modèles climat

Un même modèle climat mais alimenté par des entrées différentes amènera à des résultats distincts au bout de la chaîne analytique (impacts).

Le choix du scénario climatique notamment a cette influence. Beaumont *et al.* (2002) ont effectué ce test, en utilisant un même modèle mais alimenté par plusieurs scénarios climatiques, afin de se rendre compte des variations potentielles dans les ajustements d'aires de répartition. L'étude a été menée sur 77 papillons endémiques d'Australie. La plupart de ces espèces ont des enveloppes climatiques larges (8 % ont une répartition de température moyenne annuelle inférieure à 3 °C). Selon le scénario climatique utilisé, les conséquences varient très fortement. Avec le scénario le plus optimiste, 88 % des espèces réduisent leur

répartition dont 54 % le font d'au moins 20 %. Sous un scénario extrême : 92 % des espèces réduisent leur répartition et 83 % le font d'au moins 50 %. Enfin, 63 % des aires de répartitions actuelles se retrouvent dans les aires de répartitions futures sous le scénario optimiste et moins de 20 % sous le scénario pessimiste. L'étendue des données climatiques d'entrée est aussi déterminante (Thuiller *et al.*, 2004a).

Enfin, il existe également une variabilité intrinsèque à chaque modèle climatique qui implique des différences de résultats lorsque le même modèle est lancé plusieurs fois. Cette variabilité est souvent négligée alors qu'elle engendre des résultats différents ensuite dans les modèles impacts et peut donc donner des projections de déplacements d'aires de répartition très écartés (Beaumont *et al.*, 2007). Ces différences peuvent être substantielles et même plus grandes que celles provoquées par la variabilité intermodèles (Beaumont *et al.*, 2007).

## LE PORTAIL « DRIAS LES FUTURS DU CLIMAT »

Ce portail a pour vocation de mettre à disposition des projections climatiques régionalisées réalisées dans les laboratoires français de modélisation du climat (IPSL, CERFACS, CNRM-GAME). Une authentification est nécessaire mais les **données sont libres et gratuites**. Les informations climatiques sont délivrées sous différentes formes graphiques ou numériques : des scénarios expliqués, des grilles géographiques pour aller chercher des données locales, des jeux d'indicateurs. **Des applications sur mesure et des extractions de données spécifiques sont possibles** (Michel Schneider *in* Vanpeene, 2012). Pour en savoir plus : <http://www.drias-climat.fr/>

### V.2.3. L'étape de la modélisation « impacts »

> Les deux types de modèle

De façon schématique, deux types de modèles existent (cf. Figure 27) :

- **les modèles mécanistes** : ils sont appelés en anglais les « process-based models » parce qu'ils sont précisément basés sur les processus écologiques qu'ils tentent de mettre en équation. Les paramètres d'une espèce tels que la survie, la reproduction, la croissance (Poulet, 2012) ou encore la phénologie (Chuine & Beaubien, 2001) sont ainsi utilisés pour prédire la distribution de cette espèce,

- **les modèles corrélatifs, aussi appelés statistiques, empiriques ou encore « modèles de niche »** : ils cherchent à établir une relation statistique entre la présence d'une espèce et les valeurs des variables environnementales qui caractérisent les zones géographiques abritant ses populations (Poulet, 2012). Cette relation est ensuite utilisée pour prédire l'établissement potentiel de l'espèce dans d'autres zones géographiques ou sous des conditions futures différentes du présent (autre climat par exemple).

La démarche pour prédire les ajustements spatiaux d'espèces sous l'effet du changement climatique via un modèle de niche se fait donc en deux phases (Rochard & Lassalle, 2010) :

1 - une première étape utilise la répartition passée/présente des espèces considérées et les données climatiques sur la même période afin de construire un modèle qui relie la probabilité de présence de l'espèce aux paramètres météorologiques/climatiques,

2 - une deuxième étape utilise le modèle construit en 1- pour prédire une aire de répartition future à partir des prédictions de climat futur.

Par exemple, Badeau *et al.* (2004) se sont intéressés à la répartition future du Hêtre selon le processus suivant (in Landmann *et al.*, 2008) :

- dans un premier temps, les auteurs ont recherché le modèle statistique expliquant au mieux la présence et l'absence, en France, du Hêtre à partir des variables climatiques et édaphiques disponibles,

- le modèle de répartition du Hêtre pour la période actuelle étant établi, les auteurs remplacent les variables climatiques actuelles par leurs valeurs prédites pour le milieu ou la fin du XXI<sup>ème</sup> siècle dans certains scénarios climatiques.

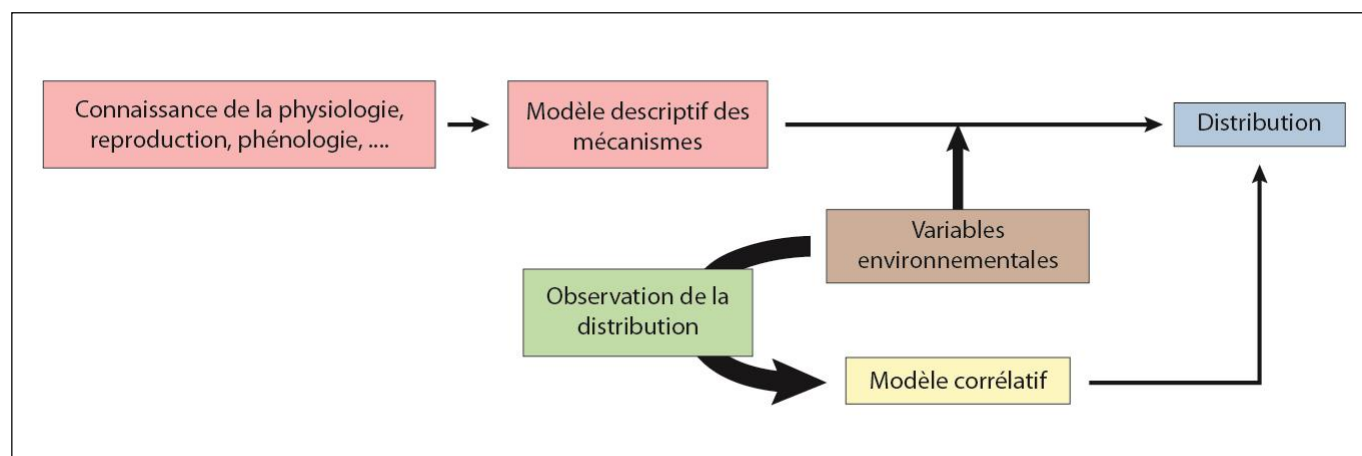


Figure 27 : Modèle mécaniste et modèle corrélatif.

Source : D'après Leriche, 2010

### > Forces et faiblesses des deux types de modèles

Le choix entre un modèle mécaniste et un modèle de niche a une influence sur les projections. Plusieurs publications montrent que les deux types de modèles peuvent amener à des résultats différents pour les mêmes espèces (Cheaib *et al.*, 2012 ; Engler & Guisan, 2009 ; Morin & Thuiller, 2009).

Globalement, les modèles mécanistes sont plus robustes que les modèles de niche purement statistiques. Par contre, les modèles mécanistes requièrent un niveau très élevé de connaissance biologique sur l'espèce en question (Gritti *et al.*, 2013 ; Morin & Thuiller, 2009 ; Poulet, 2012). Par conséquent les modèles mécanistes ne sont applicables qu'à un nombre réduit d'espèces dont les caractéristiques écologiques sont très bien connues.

A noter qu'une base de données nommée TRY a été fondée pour aider à la modélisation végétale. 93 bases de données déjà existantes y ont contribué à travers le monde. TRY rassemble 3 millions de données de trait de vie pour plus de 69 000 espèces de plantes (Kattge *et al.*, 2011). Il s'agit d'éléments de connaissances liés à la croissance, à la dispersion, à l'installation, à la persistance des espèces qui sont une source pour la modélisation.

Les modèles de niches ont été très utilisés ces 10 dernières années pour prédire les changements d'aires de répartition, notamment à large échelle et pour plusieurs espèces (Morin & Thuiller, 2009). Il faut cependant avoir en tête que les changements d'aire de répartition prédits varient beaucoup selon le modèle de niche employé (Thuiller, 2004). Par ailleurs, les modèles de niches comportent des limites, présentées ci-après.

L'idéal est de mener des études mobilisant les deux types de modèles car ils ne mettent pas en avant les mêmes facteurs d'adaptation et leurs résultats sont donc complémentaires (Morin & Thuiller, 2009) (cf. Figure 28). Ces deux types de modèles ne sont pas utilisés pour les mêmes questions ni à la même échelle.

## > Limites des modèles de niches

Les modèles de niches reposent tout d'abord sur le traitement de données de présence/absence et de données environnementales décrivant la zone dans laquelle l'espèce est observée.

Cette étape est donc elle-même sources d'erreurs et d'incertitudes (biais de collecte des données, disparité des données, ..).

Le traitement des données d'absence par exemple est fondamental car celles-ci doivent indiquer des conditions environnementales effectivement défavorables et non pas une mauvaise détection de l'espèce par l'observateur (Leriche, 2010 ; Poulet, 2012).

Les publications consultées montrent que certaines caractéristiques des données d'entrées vont jouer fortement sur la variabilité des résultats, notamment :

- l'étendue de l'aire de répartition pour les données d'espèces utilisées. Barbet-Massin *et al.* (2010) montrent que si l'aire utilisée est restreinte par rapport à l'aire totale (pour des raisons techniques ou de limites administratives), les résultats de projection sont totalement différents (ici une variation de 26 % dans le taux d'extinction local pour les 179 espèces d'oiseaux étudiées),

- la résolution des données d'entrée de présence/absence d'espèces (Martinez *et al.*, 2012),

- le choix des données climatiques et leur qualité. Certains paramètres climatiques peuvent au final se retrouver exacerbés ou au contraire sous-estimés dans la typologie de réponse (Bedia *et al.*, 2013).

Dans le principe, les modèles de niches reposent sur une approche corrélative car il n'existe pas toujours de lien de cause à effet entre les variables environnementales utilisées et la présence (ou l'absence) de l'espèce (Poulet, 2012).

Ils partent par ailleurs de l'idée que l'espèce étudiée ne s'adaptera pas à des conditions environnementales différentes de celles rencontrées dans son aire actuelle (Poulet, 2012) et ils ne prennent donc pas en compte les adaptations locales (Morin & Thuiller, 2009). Or, nous avons vu précédemment que certaines espèces témoignent d'une évolution très rapide (microévolution) sous l'effet du changement climatique. Dans le même temps, ces modèles considèrent que les espèces sont capables de migrer dans n'importe quelle aire de répartition favorable, ce qui a tendance à sous-estimer les pertes de l'autre côté.

Pour les espèces invasives, une difficulté se rajoute aux modèles de niche parce que ces espèces ne peuvent pas être considérées comme à l'équilibre avec leur environnement dans la zone colonisée. Elles n'ont en effet pas encore couvert toute leur aire potentielle actuelle donc les modèles de niches ont tendance à sous-estimer la niche potentielle des espèces exotiques envahissantes (Poulet, 2012).

A l'inverse, utiliser uniquement la répartition native d'une espèce introduite peut sous-estimer ses capacités d'adaptation et donc l'évolution de sa répartition face au changement climatique (Beaumont *et al.*, 2009).

Enfin, les modèles de niche ignorent globalement les processus écologiques tels que les interactions entre espèces et la dispersion (Brooker *et al.*, 2007 ; Urban *et al.*, 2013). Il existe en effet de très nombreux facteurs qui peuvent contraindre la dispersion de l'espèce (barrières géographiques, ...) et sa survie (prédation, pathogènes, ..) et on peut ainsi avoir une niche théorique très différente de la niche réalisée (Poulet, 2012).

Le fait de ne pas intégrer la dispersion peut amener ces modèles à des différences importantes dans les projections (Bateman *et al.*, 2013 ; Fischer *et al.*, 2011 ; Martinez *et al.*, 2012) surtout pour des espèces à faibles capacités de dispersion (Sahlean *et al.*, 2014). Jaeschke *et al.* (2013) montrent chez les Odonates que le fait d'intégrer les capacités de dispersion dans la modélisation peut tout simplement donner des résultats opposés : dans leur étude, *Coenagrion ornatum*, *Coenagrion mercuriale* et *Ophiogomphus cecilia*

perdent environ 68 % de leur aire de distribution si l'on intègre la dispersion comme paramètre dans la modélisation alors qu'ils en gagnent 23 % si on ignore les capacités de dispersion. Engler & Guisan (2009) parlent ainsi d'aire potentiellement colonisable pour l'espèce par opposition à l'aire potentiellement supportable pour l'espèce qui ne tient pas compte des facultés de dispersion.

Dans les publications on peut retrouver plusieurs cas de figure quant au paramètre dispersion : aucune dispersion (*no-dispersal*), dispersion illimitée (*full or unlimited dispersal*), dispersion moyenne (*mean dispersal*), dispersion réelle (*realistic dispersal*) ou encore « dispersion réelle avec quelques événements de dispersion longue distance » ; et toutes ces configurations donnent des résultats différents quant à l'ajustement spatial et au taux d'extinction des espèces considérées (Engler *et al.*, 2009).

Pour essayer de s'approcher encore davantage de la réalité, Urban *et al.* (2013) ont estimé la dispersion par la modélisation du noyau de Kernel.

Duckett *et al.* (2013), quant à eux, ont utilisé l'outil moléculaire pour estimer d'abord les capacités de dispersion précises d'une espèce australienne de Gecko (*Gehyra variegata*) puis ont ensuite incorporé ces connaissances dans un modèle de distribution afin de prédire la répartition de cette espèce en intégrant le processus de dispersion. Les auteurs vont ainsi jusqu'à prédire l'impact du changement climatique sur le plan génétique, celui-ci se traduisant en l'occurrence par une baisse de la richesse allélique et de la diversité phylogénétique dans les populations de Geckos (Duckett & Stow, 2013).

Enfin, pour affiner encore les modèles, il est également possible d'intégrer des paramètres de configuration spatiale de l'habitat (Crossman *et al.*, 2011) et de comportement des espèces vis-à-vis de cette configuration (Knowlton & Graham, 2010).

	Modèle mécaniste	Modèle de niche (empirique)
<i>Besoin en données</i>	Fort	Faible
<i>Temps de calibration et de traitement</i>	Long	Court
<i>Nombre d'espèces traitées</i>	Faible	Élevée
<i>Puissance explicative</i>	Forte	Faible
<i>Projection future</i>	Possible	Erronée
<i>Validation</i>	Indépendante	Croisée
<i>Approximation de la niche</i>	Fondamentale	Réalisée

Figure 28 : Comparaison des forces et faiblesses entre modèles mécanistes et modèles de niche (empirique).

Source : D'après Leriche, 2010

L'attribution d'un pouvoir explicatif faible aux modèles empiriques est discutée car des études montrent l'inverse (ex : Cheaib *et al.*, 2012). Les projections futures des modèles empiriques sont probablement plus incertaines dans des zones de climat non analogue mais elles restent d'une certitude correcte pour identifier l'aire de répartition potentielle dans les zones de climat analogue (com. pers. Bellard, 2014).

Au final, on peut néanmoins dire que compte tenu de tous les biais et incertitudes que peut comporter l'outil modélisation, il **convient de rester toujours prudent dans les conclusions**. Thuiller, en 2004, s'étonne d'ailleurs du fait que la modélisation bioclimatique soit de plus en plus utilisée pour estimer les impacts potentiels du changement climatique, et que dans le même temps peu de travaux aient été menés pour évaluer la variabilité et la fiabilité de toutes ces projections.

Cette question est tout de même en train d'émerger et de plus en plus de publications étudient désormais la variabilité (com. pers. Bellard, 2014). Il arrive aussi que des auteurs publient des critiques sur les travaux

de leurs confrères en désaccord avec la quantification de leurs incertitudes. Par exemple, par modélisation des changements d'aires, Thomas *et al.* (2004) montrent qu'entre 15 et 37 % des 1103 taxons d'animaux et de plantes qu'ils étudient à travers le globe vont vers une extinction d'ici à 2050 mais Thuiller *et al.* (2004a) leur répondent en extrayant plusieurs sources d'incertitudes qui réduisent au final fortement ces prédictions.

#### V.2.4. Au-delà des modèles

Au-delà des limites intrinsèques à toute démarche de modélisation, plusieurs facteurs peuvent apporter des incertitudes, que le colloque organisé par le CNRS de Meudon en octobre 2013 a fait ressortir (Sordello, 2013) :

- dans les publications, les modèles ne sont pas nécessairement décrits en détails. Il est alors difficile, par exemple pour un écologue, de comprendre le modèle climat utilisé dans une publication de climatologue ou le modèle impact dans la publication d'un confrère,
- un très grand nombre de modèles climat existe et chaque modèle a ses avantages et ses inconvénients (certains modèles sont trop « chauds », d'autres trop « humides ») et à chaque question un des modèles sera plus pertinent qu'un autre,
- globalement le manque de dialogue entre climatologues et écologues fait que les écologues utilisent des modèles climat sans réellement connaître leurs limites et leurs biais et que les climatologues élaborent des modèles climat sans réellement avoir en tête les questions des écologues pour lesquelles ces modèles vont ensuite être utilisés.

Enfin, le changement climatique peut difficilement être considéré de manière isolé par rapport aux autres menaces qui pèsent sur la biodiversité car elles interagissent toutes ensemble. Il est donc important de favoriser les modélisations multi-factorielles, tenant compte des changements globaux et pas uniquement climatiques.

# REFERENCES CITEES DANS LA PARTIE 2

## Articles scientifiques

- ANDERSON A.S., RESIDE A.E., VANDERWAL J.J., SHOO L.P., PEARSON R.G. & WILLIAMS S.E. (2012). Immigrants and refugees: the importance of dispersal in mediating biotic attrition under climate change. *Global change biology*. Volume 18. Numéro 7. Pages 2126-2134.
- ARAÚJO M.B., THUILLER W. & PEARSON R.G. (2006). Climate warming and the decline of amphibians and reptiles in Europe. *Journal of Biogeography*. Numéro 33. Pages 1712-1728.
- BARBET-MASSIN M., THUILLER W. & JIGUET F. (2012). The fate of European breeding birds under climate, land-use and dispersal scenarios. *Global Change Biology*. Volume 18. Numéro 3. Pages 881-890.
- BARBET-MASSIN M., THUILLER W. & JIGUET F. (2010). How much do we overestimate future local extinction rates when restricting the range of occurrence data in climate suitability models?. *Ecography*. Volume 33. Numéro 5. Pages 878-886.
- BATEMAN B.L., MURPHY H.T., RESIDE A.E., MOKANY K. & VAN DER WAL J. (2013). Appropriateness of full-, partial- and no-dispersal scenarios in climate change impact modelling. *Diversity and distributions*. Volume 19. Numéro 10. Pages 1224-1234.
- BEAUMONT L.J., GALLAGHER R.V., THUILLER W., DOWNEY P.O., LEISHMAN M.R. & HUGHES L. (2009). Different climatic envelopes among invasive populations may lead to underestimations of current and future biological invasions. *Diversity and distributions*. Numéro 15. Pages 409-420.
- BEAUMONT L.J., PITMAN A.J., POULSEN M. & HUGHES L. (2007). Where will species go? Incorporating new advances in climate modelling into projections of species distributions. *Global change biology*. Numéro 13. Pages 1368-1385.
- BEAUMONT L.J. & HUGHES L. (2002). Potential changes in the distributions of latitudinally restricted Australian butterfly species in response to climate change. *Global change biology*. Numéro 8. pages 954-971.
- BEDIA J., HERRERA S., GUTIERREZ J.M (2013). Dangers of using global bioclimatic datasets for ecological niche modeling. Limitations for future climate projections. *Global and Planetary Change*. Numéro 107. Pages 1-12.
- BELL C.P. (2007). Climate change and spring migration in the Yellow Wagtail *Motacilla flava*: an Afrotropical perspective. *Journal of ornithology*. Numéro 148. Pages 495-499.
- BELLARD C., BERTELSMEIER C., LEADLEY P., THUILLER W., COURCHAMP F. (2012). Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology letters*. Numéro 15. Pages 365-377.
- BELLARD C., LECLERC C. & COURCHAMP F. (2013a). Potential impact of sea level rise on French islands worldwide. *Nature conservation*. Numéro 5. Pages 75-86.
- BELLARD C., LECLERC C. & COURCHAMP F. (2014). Impact of sea level rise on the 10 insular biodiversity hotspots. *Global Ecology and Biogeography*. Numéro 23. Pages 203-212.
- BELLARD C., THUILLER W., LEROY B., GENOVESI P., BAKKENES M. & COURCHAMP F. (2013b). Will climate change promote future invasions ?. *Global change biology*. Volume 19. Numéro 12. Pages 3740-3748.
- BERTRAND R., LENOIR J., PIEDALLU C., RIOFRIO-DILLON G., DE RUFFRAY P., VIDAL C., PIERRAT J.-C. & GEGOUT J.-C. (2011). Changes in plant community composition lag behind climate warming in lowland forests. *Nature*. Volume 489. Pages 517-520.

BEST A.S., JOHST K., MUENKEMUELLER T. & TRAVIS J.M.J. (2007). Which species will successfully track climate change? the influence of intraspecific competition and density dependent dispersal on range shifting dynamics. *Oikos*. Volume 116. Numéro 9. Pages 1531-1539.

BROOKER R.W., TRAVIS J.M.J., CLARK E.J. & DYTHAM C. (2007). Modelling species' range shifts in a changing climate: the impacts of biotic interactions, dispersal distance and the rate of climate change. *Journal of theoretical biology*. Volume 245. Numéro 1. Pages 59-65.

BUISSON L., THUILLER W., CASAJUS N., LEK S. & GRENOUILLET G. (2010b). Uncertainty in ensemble forecasting of species distribution. *Global Change Biology*. Volume 16. Numéro 4. Pages 1145-1157.

CANADELL J.-G., LE QUÉRÉ C., RAUPACH M.-R., FIELD C.-B., BUITENHUIS E.-T., CIAIS P., CONWAY T.-J., GILLETT N.-P., HOUGHTON R.-A. & MARLAND G. (2007). Contributions to accelerating atmospheric CO<sub>2</sub> growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *PNAS*. Volume 104. Numéro 47. Pages 18866-18870.

CHAPMAN S., MUSTIN K., RENWICK A.R., SEGAN D.B., HOLE D.G., PEARSON R.G. & WATSON J.E.M. (2014). Publishing trends on climate change vulnerability in the conservation literature reveal a predominant focus on direct impacts and long time-scales. *Diversity and Distributions*. Numéro 20. Pages 1221-1228.

CHEAIB A., BADEAU V., BOE J., CHUINE I., DELIRE C., DUFRENE E., FRANCOIS C., GRITTI E.S., LEGAY M., PAGE C., THUILLER W., VIOVY N. & LEADLEY P. (2012). Climate change impacts on tree ranges: model intercomparison facilitates understanding and quantification of uncertainty. *Ecology Letters*. Numéro 15. Pages 533-544.

CHUINE I. & BEAUBIEN E.G. (2001), Phenology is a major determinant of tree species range. *Ecology Letters*. Numéro 4. Pages 500-510.

CLELAND E.E., CHUINE I., MENZEL A., MOONEY H. & SCHWARTZ M.D. (Soumis). Changing plant phenology in response to climate change". *Trends in Ecology and Evolution*.

CONLISK E., LAWSON D., SYPHARD A.D., FRANKLIN J., FLINT L., FLINT A. & REGAN H.M. (2012). The roles of dispersal, fecundity, and predation in the population persistence of an oak (*quercus engelmannii*) under global change. *Plos one*. Volume 7. Numéro 5.

CROSSMAN N.D., BRYAN B.A. & COOKE D.A. (2011). An invasive plant and climate change threat index for weed risk management: integrating habitat distribution pattern and dispersal process. *Ecological indicators*. Volume 11. Numéro 1. Pages 183-198.

DAUFRESNE M. & BOËT P. (2007). Climate change impacts on structure and diversity of fish communities in rivers. *Global change biology*. Volume 13. Numéro 12. Pages 2467-2478.

DAUFRESNE M., ROGER M.C., CAPRA H. & LAMOUREUX N. (2003). Long-term changes within the invertebrate and fish communities of the Upper Rhône River: effects of climatic factors. *Global change biology*. Volume 10. Numéro 1. Pages 124-140.

DEQUE M., SOMOT S., SANCHEZ-GOMEZ E., GOODESS C.M., JACOB D., LENDERINK G. & CHRISTENSEN O.B. (2012). The spread amongst ENSEMBLES regional scenarios: regional climate models, driving general circulation models and interannual variability. *Climate Dynamics*. Volume 38. Numéro 5-6. Pages 951-964.

DEVICTOR V., VAN SWAAY C., BRERETON T., BROTONS L., CHAMBERLAIN D., HELIÖLÄ J., HERRANDO S., JULLIARD R., KUUSSAARI M., LINDSTRÖM A., REIF J., ROY D.-B., SCHWEIGER O., SETTELE J., STEFANESCU C., VAN STRIEN A., VAN TURNHOUT C., VERMOUZEK Z., WALLISDEVRIES M., WYNHOFF I. & JIGUET F. (2012). Differences in the climatic debts of birds and butterflies at a continental scale. *Nature climate change*. Numéro 2. Pages 121-124.



- DEVICTOR V., JULLIARD R., COUVET D. & JIGUET F. (2008). Birds are tracking climate warming, but not fast enough. *Proceedings of the Royal Society*. Numéro 275. Pages 2743-2748.
- DUCKETT P.E. & STOW A.J. (2013). Predicting impacts of global climate change on intraspecific genetic diversity benefits from realistic dispersal estimates. *Australian journal of zoology*. Volume 61. Numéro 6. Pages 454-461.
- DUCKETT P.E., WILSON P.D. & STOW A.J. (2013). Keeping up with the neighbours: using a genetic measurement of dispersal and species distribution modelling to assess the impact of climate change on an Australian arid zone gecko (*Gehyra variegata*). *Diversity and distributions*. Volume 19. Numéro 8. Pages 964-976.
- DYRCZ A. & HALUPKA L. (2009). The response of the Great Reed Warbler *Acrocephalus arundinaceus* to climate change. *Journal of ornithology*. Numéro 150. Pages 39-44.
- ENGLER R. & GUIBAN A. (2009). Migclim: predicting plant distribution and dispersal in a changing climate. *Diversity and distributions*. Volume 15. Numéro 4. Pages 590-601.
- ENGLER R., RANDIN C.F., VITTOZ P., CZAKA T., BENISTON M., ZIMMERMANN N.E. & GUIBAN A. (2009). Predicting future distributions of mountain plants under climate change: does dispersal capacity matter?. *Ecography*. Volume 32. Numéro 1. Pages 34-45.
- FATORIC S. & MOREN-ALEGRET R. (2013). Integrating local knowledge and perception for assessing vulnerability to climate change in economically dynamic coastal areas: the case of natural protected area Aiguamolls de l'Empordà, Spain. *Ocean & coastal management*. Volume 85. Pages 90-102.
- FISCHER D., MOELLER P., THOMAS S.M., NAUCKE T.J. & BEIERKUHNELEIN C. (2011). Combining climatic projections and dispersal ability: a method for estimating the responses of sandfly vector species to climate change. *Plos neglected tropical diseases*. Volume 5. Numéro 11.
- FODEN W.-B., BUTCHART S.-H.-M., STUART S.-N., VIE J.-C., AKCAKAYA H.-R., et al. (2013) Identifying the World's Most Climate Change Vulnerable Species: A Systematic Trait-Based Assessment of all Birds, Amphibians and Corals. *PLoS ONE*. Volume 8. Numéro 6.
- FRANKS S.-J., SIM S. & WEIS A.-E. (2007). Rapid evolution of flowering time by an annual plant in response to a climate fluctuation. *PNAS*. Volume 104. Numéro 4. Pages 1278-1282.
- FREDERIKSEN M., DAUNT F., HARRIS M.P. & WANLESS S. (2008). The demographic impact of extreme events: stochastic weather drives survival and population dynamics in a long-lived seabird. *Journal of animal ecology*. Numéro 77. Pages 1020-1029.
- GILMAN S.-E., URBAN M.-C., TEWKSBURY J., GILCHRIST G.-W. & HOLT R.-D. (2010). A framework for community interactions under climate change. *Trends in Ecology and Evolution*. Volume 25. Numéro 6. Pages 325-331.
- GRITTI E.S., DUPUTIE A., MASSOL F. & CHUINE I. (2013). Estimating consensus and associated uncertainty between inherently different species distribution models. *Methods in Ecology and Evolution*. Numéro 4. Pages 442-452.
- GRENOUILLET G. & LECOMTE L. (2014). Illuminating geographical patterns in species' range shifts. *Global change biology*. Early view online.
- HARRISON P.-A., BERRY P.-M., BUTT N. & NEW M. (2006). Modelling climate change impacts on species' distributions at the European scale: implications for conservation policy. *Environmental science and policy*. Numéro 9. Pages 116-128.

HEIKKINEN R.-K., LUOTO M., LEIKOLA N., POYRY J., SETTELE J., KUDRNA O., MARMION M., FRONZEK S., THUILLER W. (2010). Assessing the vulnerability of European butterflies to climate change using multiple criteria. *Biodiversity Conservation*. Numéro 19. Pages 695-723.

HELLER N.E. & ZAVALA E.S. (2009). Biodiversity management in the face of climate change: A review of 22 years of recommendations. *Biological Conservation*. Numéro 142. Pages 14-32.

HICKLING R., ROY D.-B., HILL J.-K., FOX R. & THOMAS C.-D. (2006). The distributions of a wide range of taxonomic groups are expanding polewards. *Global change biology*. Numéro 12. Pages 450-455.

HIGGINS P.A.T. & HARTE J. (2006). Biophysical and biogeochemical responses to climate change depend on dispersal and migration. *Bioscience*. Volume 56. Numéro 5. Pages 407-417.

HOF C., LEVINSKY I., ARAÚJO M.B. & RAHBK C. (2011). Rethinking species' ability to cope with rapid climate change. *Global Change Biology*. Volume 17. Numéro 9. Pages 2987-2990.

HUNTLEY B., COLLINGHAM Y.-C., GREEN R.-E., HILTON G.-M., RAHBK C. & WILLIS S.-G. (2006). Potential impacts of climatic change upon geographical distributions of birds. *Ibis*. Numéro 148. Pages 8-28.

JAESCHKE A., BITTNER T., REINEKING B. & BEIERKUHNLEIN C. (2013). Can they keep up with climate change? - integrating specific dispersal abilities of protected odonata in species distribution modelling. *Insect conservation and diversity*. Volume 6. Numéro 1. Pages 93-103.

JIGUET F., GADOT A.-S., JULLIARD R., NEWSON S.-E. & COUVET D. (2007). Climate envelope, life history traits and the resilience of birds facing global change. *Global Change Biology*. Numéro 13. Pages 1672-1684.

JULLIARD R., JIGUET F. & COUVET D. (2004). Evidence for the impact of global warming on the longterm population dynamics of common birds. *Proceedings of the Royal Society of London B (Suppl.)*. Numéro 271. Pages S490-S492.

JULLIARD R., JIGUET F. & COUVET D. (2003). Common birds facing global changes: what makes a species at risk?. *Global Change Biology*. Numéro 10. Pages 148-154.

JUMP A.S., MATYAS C. & PEÑUELAS J. (2009). The altitude-for-latitude disparity in the range retractions of woody species. *Trends in Ecology and Evolution*. Numéro 24. Pages 694-701.

KATTGE, J., DÍAZ, S., LAVOREL, S., PRENTICE, I. C., LEADLEY, P., BÖNISCH, G., GARNIER, E., WESTOBY, M., REICH, P. B., WRIGHT, I. J., CORNELISSEN, J. H. C., VIOLLE, C., HARRISON, S. P., Van BODEGOM, P. M., REICHSTEIN, M., ENQUIST, B. J., ET AL. (2011). TRY – a global database of plant traits. *Global Change Biology*. Numéro 7. Pages 2905-2935.

KIERS E.T., PALMER T.M., IVES A.R., BRUNO J.F. & BRONSTEIN J.L. (2010). Mutualisms in a changing world: an evolutionary perspective. *Ecology Letters*. Numéro 13. Pages 1459-1474.

KNOWLTON J.L. & GRAHAM C.H. (2010). Using behavioral landscape ecology to predict species' responses to land-use and climate change. *Biological conservation*. Volume 143. Numéro 6. Pages 1342-1354.

LEIMU R., VERGEER P., ANGELONI F. & OUBORG N.J. (2010). Habitat fragmentation, climate change, and inbreeding in plants. *Annals of the New York Academy of Sciences*. Volume 1195. Pages 84-98.

LENOIR J. & SVENNING J.C. (2014). Climate-related range shifts - a global multidimensional synthesis and new research directions. *Ecography*. Numéro 37. Pages 1-14.

LENOIR J., GEGOUT J.-C., DUPOUEY J.-L., BERT D. & SVENNING J.-C. (2010a). Forest plant community changes during 1989-2007 in response to climate warming in the Jura Mountains (France and Switzerland). *Journal of Vegetation Science*. Numéro 21. Pages 949-964.

LENOIR J., GEGOUT J.C., GUISAN A., VITTOZ P., WOHLGEMUTH T., ZIMMERMANN N.E., DULLINGER S., PAULI H., WILLNER W. & SVENNING J.C. (2010b). Going against the flow: potential mechanisms for unexpected downslope range shifts in a warming climate. *Ecography*. Numéro 33. Pages 295-303.

LENOIR J., GEGOUT J.-C., MARQUET P.-A., DE RUFFRAY P. & BRISSE H. (2008). A Significant Upward Shift in Plant Species Optimum Elevation During the 20th Century. *Science*. Volume 320. Pages 1768-1771.

LEROY B., BELLARD C., DUBOS N., COLLIOT A., VASSEUR M., COURTIAL C., BAKKENES M., CANARD A. & YSNEL F. (2014). Forecasted climate and land use changes, and protected areas: the contrasting case of spiders. *Diversity and distributions*. Volume 20. Numéro 6. Pages 686-697.

LEVINSKY I., SKOV F. & SVENNING J.-C. & RAHBEK C. (2007). Potential impacts of climate change on the distributions and diversity patterns of European mammals. *Biodiversity Conservation*. Numéro 16. Pages 3803-3816.

MARTINEZ I., GONZALEZ-TABOADA F., WIEGAND T., JULIO CAMARERO J. & GUTIERREZ E. (2012). Dispersal limitation and spatial scale affect model based projections of pinus uncinata response to climate change in the pyrenees. *Global change biology*. Volume 18. Numéro 5. Pages 1714-1724.

MAZARIS A.D., PAPANIKOLAOU A.D., BARBET-MASSIN M., KALLIMANIS A.S., JIGUET F., SCHMELLER D.S. & PANTIS J.D. (2013). Evaluating the connectivity of a protected areas' network under the prism of global change: the efficiency of the european natura 2000 network for four birds of prey. *Plos one*. Volume 8. Numéro 3.

MOONEY H., LARIGAUDERIE A., CESARIO M., ELMQUIST T., HOEGH-GULDBERG O., LAVOREL S., MACE G.-M., PALMER M., SCHOLLES R. & YAHARA T. (2009). Biodiversity, climate change and ecosystem services. *Current Opinion in Environmental Sustainability*. Numéro 1. Pages 46-54.

MORIN X. & THUILLER W. (2009). Comparing niche- and process-based models to reduce prediction uncertainty in species range shifts under climate change. *Ecology*. Numéro 90. Pages 1301-1313.

PARMESAN C. & YOHE G. (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*. Volume 421. Pages 37-42.

PATTERSON C.D. & GUERIN M.T. (2013A). The effects of climate change on avian migratory patterns and the dispersal of commercial poultry diseases in canada - part i. *Worlds poultry science journal*. Volume 69. Numéro 1. Pages 17-25.

PAULI H., GOTTFRIED M., DULLINGER S., ABDALADZE O., AKHALKATSI M., ALONSO J.LB., COLDEA G., DICK J., ERSCHBAMER B., CALZADO R.F., GHOSH D., HOLTEN J.I., KANKA R., KAZAKIS G., KOLLÁR J., LARSSON P., MOISEEV P., MOISEEV D., MOLAU U., MESA J.M., NAGY L., PELINO G., PUŞÇAŞ M., ROSSI G., STANISCI A., SYVERHUSET A.O., THEURILLAT J.P., TOMASELLI M., UNTERLUGGAUER P., VILLAR L., VITTOZ P. & GRABHERR G. (2012). Recent Plant Diversity Changes on Europe's Mountain Summits. *Science*. Volume 336. Pages 353-355.

PEARSON R.G., PHILLIPS S.J., LORANTY M.M., BECK P.S.A., DAMOULAS T., KNIGHT S.J. & GOETZ S.J. (2013). Shifts in Arctic vegetation and associated feedbacks under climate change. *Nature*. Volume 3. Pages 673-677.

PEÑUELAS J. & BOADA M. (2003). A global change-induced biome shift in the Montseny mountains (NE Spain). *Global Change Biology*. Numéro 9. Pages 131-140.

PEÑUELAS J., SARDANS J., ESTIARTE M., OGAYA R., CARNICER J., COLL M., BARBETA A., RIVAS-UBACH A., LLUSIÀ J., GARBULSKY M., FILELLA I., JUMP A.S. (2013). Evidence of current impact of climate change on life: a walk from genes to the biosphere. Accepted article.

RAFFERTY N.E. & IVES A.R. (2010). Effects of experimental shifts in flowering phenology on plant-pollinator interactions. *Ecology letters*. Numéro 14. Pages 69-74.

RANDIN C.F., ENGLER R., NORMAND S., ZAPPA M., ZIMMERMANN N.E., PEARMAN P.B., VITTOZ P., THUILLER W. & GUISSAN A. (2009). Climate change and plant distribution: local models predict high-elevation persistence. *Global Change Biology*. Volume 15. Numéro 6. Pages 1557-1569.

REYJOL Y., HUGUENY B., PONT D., BIANCO P.G., BEIER U., CAIOLA N., CASALS F., COWX I., ECONOMOU A., FERREIRA T., HAIDVOGL G., NOBLE R., DE SOSTOA A., VIGNERON T. & VIRBICKAS T. (2007). Patterns in species richness and endemism of European freshwater fish. *Global ecology and biogeography*. Numéro 16. Pages 65-75.

RODRIGUEZ-TRELLES F. & RODRIGUEZ M.-A. (2010). Measuring evolutionary responses to global warming: cautionary lessons from *Drosophila*. *Insect Conservation and Diversity*. Volume 3. Numéro 1. Pages 44-50.

ROOT T.L., PRICE J.T., HALL K.R., SCHNEIDER S.H., ROSENZWEIG C. & POUNDS J.A. (2003). Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*. Volume 421. Pages 57-60.

ROSSET V., LEHMANN A. & OERTLI B. (2010). Warmer and richer? Predicting the impact of climate warming on species richness in small temperate waterbodies. *Global change biology*. Volume 16. Numéro 8. Pages 2376–2387.

ROUGET M., RICHARDSON D.-M., COWLING R.-M., LLOYD J.-W., LOMBARD A.-T. (2003). Current patterns of habitat transformation and future threats to biodiversity in terrestrial ecosystems of the Cape Floristic Region, South Africa. *Biological conservation*. Numéro 112. Pages 63-85.

SAETHER E., GROTTAN V., TRYJANOWSKI P., BARBRAUD C., ENGEN S. & FULIN M. (2006). Climate and spatio-temporal variation in the population dynamics of a long distance migrant, the white stork. *Journal of Animal Ecology*. Numéro 75. Pages 80-90.

SAHLEAN T.C., GHERGHEL I., PAPES M., STRUGARIU A. & ZAMFIRESCU S.R. (2014). Refining climate change projections for organisms with low dispersal abilities: a case study of the caspian whip snake. *Plos one*. Volume 9. Numéro 3.

SHELLER R.M. & MLADENOFF D.J. (2008). Simulated effects of climate change, fragmentation, and inter-specific competition on tree species migration in northern wisconsin, usa. *Climate research*. Volume 36. Numéro 3. Pages 191-202.

SCHLOSS C.A., NUNEZ T.A. & LAWLER J.J. (2012). Dispersal will limit ability of mammals to track climate change in the western hemisphere. *Proceedings of the national academy of sciences of the united states of america*. Volume 109. Numéro 22. Pages 8606-8611.

SIMON J.A., MARROTTE R.R., DESROSIERS N., FISET J., GAITAN J., GONZALEZ A., KOFFI J.K., LAPOINTE F.J., LEIGHTON P.A., LINDSAY L.R., LOGAN T., MILORD F., OGDEN N.H., ROGIC A., ROY-DUFRESNE E., SUTER D., TESSIER N. & MILLIEN V. (2014). Climate change and habitat fragmentation drive the occurrence of *Borrelia burgdorferi*, the agent of Lyme disease, at the northeastern limit of its distribution. *Evolutionary Applications*. doi: 10.1111/eva.12165

TEDESCO P.-A., OBERDORFF T., CORNU J.-F., BEAUCHARD O., BROUSSE S., DÜRR H.-H., GRENOUILLET G., LEPRIEUR F., TISSEUIL C., ZAISS R. & HUGUENY B. (2013). A scenario for impacts of water availability loss due to climate change on riverine fish extinction rates. *Journal of Applied Ecology*. Numéro 50. pages 1105-1115.

THOMAS C.D., CAMERON A., GREEN R.E., BAKKENES M., BEAUMONT L.J., COLLINGHAM Y.C., ERASMUS B.F.N., FERREIRA DE SIQUEIRA M., GRAINGER A., HANNAH L., HUGHES L., HUNTLEY B., VAN JAARSVELD A.S., MIDGLEY G.F., MILES L., ORTEGA-HUERTA M.A., PETERSON A.T., PHILLIPS O.L. & WILLIAMS S.E. (2004). Extinction risk from climate change. *Nature*. Numéro 427. pages.

THUILLER W. (2004), Patterns and uncertainties of species' range shifts under climate change. *Global Change Biology*. Numéro 10. Pages 2020-2027.

THUILLER W., ARAUJO M.B., PEARSON R.G., WHITTAKER R.J., BROTONS L. & LAVOREL S. (2004a). Biodiversity conservation: Uncertainty in predictions of extinction risk. *Nature*. Numéro 430.

THUILLER W., BROTONS L., ARAUJO M.B. & LAVOREL S. (2004b). Effects of restricting environmental range of data to project current and future species distributions. *Ecography*. Volume 27. Numéro 2. Pages 165-172.

TRIVEDI M.R., BERRY P.M., MORECROFT M.D. & DAWSON T.P. (2008). Spatial scale affects bioclimate model projections of climate change impacts on mountain plants. *Global Change Biology*. Volume 14. Numéro 5. Pages 1089-1103.

TUYTENS K., VANSCHOENWINKEL B., WATERKEYN A. & BRENDONCK L. (2014). Predictions of climate change infer increased environmental harshness and altered connectivity in a cluster of temporary pools. *Freshwater biology*. Volume 59. Numéro 5. Pages 955-968.

URBAN M.C., TEWKSBURY J.J. & SHELDON K.S. (2012). On a collision course: competition and dispersal differences create no-analogue communities and cause extinctions during climate change. *Proceedings of the royal society b-biological sciences*. Volume 279. Numéro 1735. Pages 2072-2080.

URBAN M.C., ZARNETSKE P.L. & SKELLY D.K. (2013). Moving forward: dispersal and species interactions determine biotic responses to climate change. *Climate change and species interactions: ways forward*. Volume 1297. Pages 44-60.

VANDERWAL J., MURPHY H.T., KUTT A.S., PERKINS G.C., BATEMAN B.L., PERRY J.J. & RESIDE A.E. (2012). Focus on poleward shifts in species' distribution underestimates the fingerprint of climate change. *Nature Climate Change*. Numéro 3. Pages 239-243.

VIRKKALA R. & RAJASÄRKÄ A. (2012). Preserving species populations in the boreal zone in a changing climate: contrasting trends of bird species groups in a protected area network. *Nature conservation*. Numéro 3. Pages 1-20.

WALLISDEVRIES M. & VAN SWAAY C.A.M. (2006). Global warming and excess nitrogen may induce butterfly decline by microclimatic cooling. *Global Change Biology*. Numéro 12. Pages 1620-1626.

WALTERS R.J., HASSALL M., TELFER M.G., HEWITT G.M. & PALUTIKOF J.P. (2006). Modelling dispersal of a temperate insect in a changing climate. *Proceedings of the royal society b-biological sciences*. Volume 273. Numéro 1597. Pages 2017-2023.

WALTHER G. (2010). Community and ecosystem responses to recent climate change. *Philosophical transactions of the royal society B*. Numéro 365. Pages 2019-2024.

WILLIAMS J.W., JACKSON S.T. & KUTZBACH J.E. (2007). Projected distributions of novel and disappearing climates by 2100 AD. *PNAS*. Volume 104. Numéro 14. Pages 5738-5742.

WISZ M.S., POTTIER J., KISSLING W.D., PELLISSIER L., LENOIR J., DAMGAARD C.F., DORMANN C.F., FORCHHAMMER M.C., GRYTNES J.A., GUISAN A., HEIKKINEN R.K., HOYE T.T., KÜHN I., LUOTO M., MAIORANO L., NILSSON M.C., NORMAND S., ÖCKINGER E., SCHMIDT N.M., TERMANSEN M., TIMMERMANN A., WARDLE D.A., AASTRUP P. & SVENNING J.C. (2013). The role of biotic interactions in shaping distributions and realised assemblages of species: implications for species distribution modelling. *Biological Reviews*. Volume 88. Numéro 1. Pages 15-30.

## Thèses

BELLARD C. (2013). *Effets des changements climatiques sur la biodiversité*. Thèse pour le grade de Docteur en écologie et biologie de la conservation. Laboratoire d'Écologie, Systématique et Évolution. Université Paris Sud. 338 pages.

BERTRAND (2012). Réponse spatio-temporelle de la végétation forestière au réchauffement climatique. Évaluation du remaniement de la végétation et caractérisation de l'effet des facteurs écologiques et géographiques le modulant à l'échelle de l'espèce et des communautés. Thèse pour obtenir le grade de docteur. Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement. 309 pages.

BUISSON L. (2009). Poissons des rivières françaises et changement climatique : impacts sur la distribution des espèces et incertitudes des projections. Thèse en vue de l'obtention du Doctorat de l'Université de Toulouse. 140 pages + publications.

LASSALLE G. (2008). Impacts des changements globaux sur la distribution des poissons migrateurs amphihalins. Une approche par modélisation à l'échelle continentale. Thèse pour l'obtention du grade de Docteur en Écologie Aquatique présentée à L'Université de Bordeaux I. 244 pages.

MORIN X. (2006). Biogéographie des espèces d'arbres européens et nord américains : déterminisme et évolution sous l'effet du changement climatique. Thèse de doctorat en Écologie et Biologie de l'Évolution. Université Montpellier II. Centre d'Écologie Fonctionnelle et Évolutive. 460 pages.

### **Littérature grise**

ANONYME (2012). Réponses des organismes, des écosystèmes et des sociétés aux changements globaux : quelles conséquences possibles pour les devenirs de la biodiversité et de ses services ?. Fédération pour la recherche sur la biodiversité. 64 pages.

AUDUBON (2009). Birds and Climate Change Ecological Disruption in Motion. 16 pages.

MASSU N. & LANDMANN G. (coord.) (2011). *Connaissance des impacts du changement climatique sur la biodiversité en France métropolitaine*. Synthèse de la bibliographie. GIP ECOFOR & MEDDTL. 180 pages.

ROGEON G. & SORDELLO R. (2012). Synthèse bibliographique sur les traits de vie du Lézard ocellé (*Timon lepidus* (Daudin, 1802)) relatifs à ses déplacements et à ses besoins de continuités écologiques. Service du patrimoine naturel du Muséum national d'Histoire naturelle. Paris. 10 pages.

SORDELLO R. (2012e). Synthèse bibliographique sur les traits de vie du Lézard vivipare (*Zootoca vivipara* (Jacquin, 1787)) relatifs à ses déplacements et à ses besoins de continuités écologiques. Service du patrimoine naturel du Muséum national d'Histoire naturelle. Paris. 10 pages.

SORDELLO R. (2012g). Synthèse bibliographique sur les traits de vie du Pélodyte ponctué (*Pelodytes punctatus* (Daudin, 1802)) relatifs à ses déplacements et à ses besoins de continuités écologiques. Service du patrimoine naturel du Muséum national d'Histoire naturelle. Paris. 9 pages.

### **Rapports techniques ou d'expertise**

BOUTTE B., FLOT J.-L. & CAROULLE F. (2013). *Bilan de la surveillance de la chenille processionnaire du pin en forêt. Cycle biologique 2012 - 2013*. Ministère de l'Agriculture, de l'AgroAlimentaire et de la Forêt - Département de la santé des forêts. Bulletin de Novembre 2013. 12 pages.

CHUINE I. & SEGUIN B. (2005). *Proposition de création d'un Groupe de recherche (GDR) « Système d'Information Phénologique pour l'Étude et la Gestion des Changements Climatiques » (SIP-GECC) 2006-2009*. 25 pages.

CHUINE I. & SEGUIN B. (2012). *Rapport d'activité 2012 du Groupement De Recherche 2968 "Système d'Information Phénologique pour l'Étude et la Gestion des Changements Climatiques (SIP-GECC)"*. 34 pages.

CLUS-AUBY C., PASKOFF R. & VERGER F. (2005). Impact du changement climatique sur le patrimoine du Conservatoire du littoral - Scénarios d'érosion et de submersion à l'horizon 2100. Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique & Conservatoire du littoral. Note technique n°2. 39 pages.

GILLET C. & DUBOIS J.-P. (2009). *Étude de la croissance et de la dynamique des populations de perche (Perca fluviatilis) suite aux changements trophiques du lac Léman*. Programme PEP aquacole 2008 - Action n°2006 02. Rapport technique. 29 pages.

GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT (2007). *Bilan 2007 des changements climatiques : Rapport de synthèse*. Quatrième Rapport d'évaluation du GIEC. 112 pages.

GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT (2001). *Bilan 2001 des changements climatiques : Rapport de synthèse*. Troisième Rapport d'évaluation du GIEC. 37 pages.

GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT (1995). *Changement de climat 1995*. Deuxième Rapport d'évaluation du GIEC. 74 pages.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2013). *Climate change 2013 - The Physical Science Basis*. Working group I contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental panel on climate change. 64 pages.

OBSERVATOIRE NATIONAL SUR LES EFFETS DU RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE EN FRANCE ET DANS LES DOM-TOM (2013). *Résumé à l'attention des décideurs du volume 1 du 5e rapport d'évaluation du GIEC*. 36 pages.

### **Documents cadre ou législatifs**

ALTERRA & EUROSITE (2013). Guidelines on Climate Change and Natura 2000. European Commission. Technical Report - 2013 - 068. 104 pages.

MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DES TRANSPORTS ET DU LOGEMENT (2008). *Plan national d'adaptation de la France aux effets du changement climatique 2011 - 2015 (PNACC)*. 188 pages.

### **Actes de colloques**

BASILICO L., MASSU N. & SEON-MASSIN N. (2010). *Changement climatique impacts sur les milieux aquatiques et conséquences pour la gestion*. Synthèse du séminaire des 29 et 30 juin 2009, Paris. 48 pages.

BASILICO L., MASSU N. & SEON-MASSIN N. (2009). *Changement climatique, impacts sur les milieux aquatiques et conséquences pour la gestion*. Résumé du séminaire des 29 et 30 juin 2009, Paris. 8 pages.

CHUINE I. (2005). *Un réseau d'observation phénologiques pour la gestion du changement climatique*. Actes du colloque « De l'observation des écosystèmes forestiers à l'information sur la forêt des 2 et 3 février 2005, Paris. 10 pages.

GICC (2011). Les nouveaux scénarios utilisés par le GIEC : quelques clés pour comprendre. Synthèse du séminaire du 23 Novembre 2011, Paris. 10 pages.

LANDRIEU G. (2011). Mieux comprendre les nouveaux scénarios du GIEC. Colloque du 23/11/2011, Paris. Programme de recherche du MEDDTL « Gestion et Impact du Changement Climatique ».

LANDRIEU G. (2010). Compte rendu du séminaire « Impact du changement climatique sur le littoral - Conséquences pour la gestion ». 18-19 octobre 2010, Fréjus. 5 pages.

OBSERVATOIRE NATIONAL SUR LES EFFETS DU RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE EN FRANCE (2011). *Compte rendu du séminaire « Indicateurs de changement climatique 2011 »*. 31 janvier 2011, Paris. 8 pages.

OBSERVATOIRE NATIONAL SUR LES EFFETS DU RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE EN FRANCE (2005). *Collectivités locales et changements climatiques : quelles stratégies d'adaptation ?*. Actes du colloque du 30 septembre 2004 organisé par l'ONERC, Paris. 64 pages.

OBSERVATOIRE NATIONAL SUR LES EFFETS DU RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE EN FRANCE (2003). Conséquences du réchauffement climatique sur les risques liés aux événements météorologiques extrêmes : sur la base des dernières connaissances scientifiques, quelle action locale ? Actes du colloque de juin 2003 organisé par l'ONERC, Chapitre I « État des connaissances scientifiques actuelles », Paris. 70 pages.

PARCS NATIONAUX DE FRANCE (2011a). Compte rendu du 3ème atelier du « Réseau Mixte Technologique sur l'Adaptation des Forêts au Changement Climatique » (RMT AFORCE). La génétique un élément clé pour l'adaptation des forêts au changement climatique. 12 mai 2011, Paris. 5 pages.

SORDELLO R. (2013). *Climat et Écologie, retour à l'équipe du Centre de ressources Trame verte et bleue par le MNHN-SPN*. Colloque organisé par le GIS Climat les 12 et 13 novembre 2013, Meudon. 4 pages.

VANPEENE S. (2012). Compte rendu du séminaire "Biodiversité et adaptation au changement climatique" 3 octobre 2012, Paris.

### **Supports de vulgarisation/communication**

Jancovici J.M. (2008). Éléments de base sur l'énergie au 21<sup>è</sup> siècle - Partie 4 : Quel climat pour demain (bis) ? Présentation pour l'ENSMP. 45 diapos.

Landmann G., Dupouey J.-L., Badeau V., Lefevre Y., Bréda N., Nageleisen L.-M., Chuine I., Lebourgeois F. (2008). *Le hêtre face aux changements climatiques*. Forêt-entreprise. Numéro 180.

LELIEVRE F., SALA S., RUGET F. & VOLAIRE F. (2011). *Évolution du climat du Sud de la France 1950-2009*. Projet CLIMFOUREL PSDR-3, Régions L-R, M-P, R-A. Série Les Focus PSDR3.

LERICHE A. (2010). Introduction à la modélisation de la distribution des espèces. Europôle méditerranéen de l'Arbois, Aix en provence. 48 diapos.

LOUCHARD O. & QUERLEU C. (2005). *Changement climatique : la nature menacée en France ? En savoir plus et agir*. Ouvrage collectif réalisé par le RAC-FNE-WWF-LPO-Greenpeace. 24 pages.

MEDDE (2014c). Les impacts du réchauffement climatique. Infographie. 1 page.

ONEMA (2010). Changement climatique, impacts sur les milieux aquatiques et conséquences pour la gestion. *Les rencontres de l'ONEMA*. Numéro 2, Janvier 2010. 6 pages.

PARCS NATIONAUX DE FRANCE (2009). Les parcs nationaux français et le changement climatique. 11 pages.

POULET N. (2012). Utilisation des modèles de niche pour l'évaluation des risques d'établissement des espèces exotiques. *Sciences eaux & territoires*. Numéro 6. Pages 96-99.

ROCHARD & LASSALLE (2010). Conservation de la biodiversité et changement climatique, un nécessaire changement de paradigme. Le cas des poissons migrateurs amphihalins. *Sciences, eaux et territoires*. Numéro 3. Pages 104-109.



## Autres références

DRIAS CLIMAT. *Les futurs du climat, projections climatiques pour l'adaptation de nos sociétés*. Disponible sur : <http://www.drias-climat.fr/>

FLOOD MAP. Disponible sur : <http://flood.firetree.net>

GDR 2968 SIP-GECC. *Systèmes d'Information Phénologique pour la Gestion et l'Etude des Changements Climatiques*. Disponible sur : <http://www.gdr2968.cnrs.fr/>

GIP ECOFOR. *Base de données en ligne CCBiodiv*. Disponible sur : <http://ccbio.gip-ecofor.org/>

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Portail de présentation et d'accès aux documents du GIEC*. Disponible sur : [http://www.ipcc.ch/home\\_languages\\_main\\_french.shtml](http://www.ipcc.ch/home_languages_main_french.shtml)

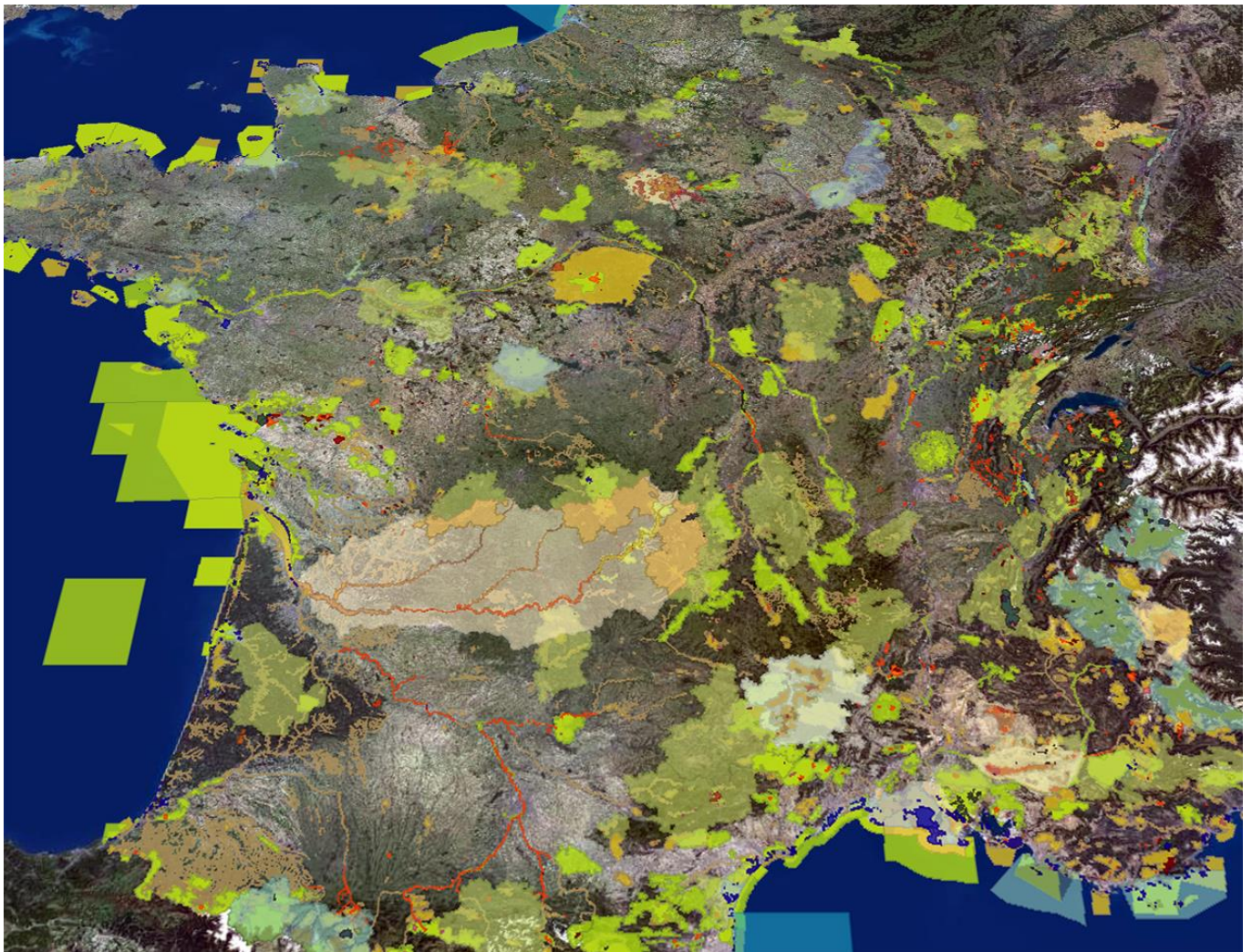
RESEAU ACTION CLIMAT FRANCE (RAC-F). *Le climat change*. Disponible sur : <http://leclimatchange.fr/>

**- PARTIE 3 -**

**LES RESEAUX ECOLOGIQUES COMME**

**REPONSE AU CHANGEMENT**

**CLIMATIQUE CONTEMPORAIN**



## RESUME DE LA PARTIE 3

**L**es réseaux écologiques, corridors et aires protégées, ressortent nettement comme la mesure la plus mise en avant par la littérature scientifique, pour répondre au changement climatique dans le domaine de l'écologie de la conservation.

Les corridors favorisent l'ajustement spatial des espèces et assurent aussi un fonctionnement métapopulationnel qui offre à la biodiversité des possibilités de résistance et de résilience. Les réseaux écologiques ne résoudreont cependant pas tous les problèmes et, dans certains cas, la translocation (migration assistée) peut ainsi être un recours pour les populations condamnées, avec toutes les considérations éthiques nécessaires.

Malgré ces changements dans les répartitions, les aires protégées prises à l'échelle de leur réseau, en limitant les pressions, continuent de conserver efficacement les espèces qu'elles abritent, même si leur représentativité peut nécessiter d'être complétée au regard de ce contexte nouveau. Elles restent en outre, grâce au statut de protection, des zones stratégiques pour la biodiversité et sont aussi des lieux privilégiés pour étudier les effets du changement climatique et accroître la connaissance.

En parallèle de ces apports essentiels pour l'adaptation de la biodiversité, les éléments constituant les réseaux écologiques participent aussi de fait à la réduction du changement climatique, par le stockage du carbone par exemple. Par ailleurs, les infrastructures vertes peuvent jouer un rôle dans l'atténuation des effets sur les sociétés humaines, de façon plus efficace et moins coûteuse que les infrastructures grises.

Du fait de ces fonctions à la fois d'adaptation et de mitigation, les institutions, qu'elles soient européennes ou françaises, préconisent de plus en plus les réseaux écologiques non plus uniquement du côté des politiques dédiées à la nature mais aussi depuis le champ du changement climatique lui-même.

# **I. AVANT PROPOS**

## **I.1. Agir malgré les incertitudes**

Comme nous l'avons vu précédemment, un certain nombre d'incertitudes persistent concernant l'ampleur et les contours des conséquences du changement climatique sur la biodiversité. Néanmoins, des conséquences sont déjà visibles et la nécessité d'agir rapidement est essentielle.

Même si l'humain réussit à atténuer le changement climatique contemporain, par exemple en maintenant l'augmentation de température du globe en dessous de 2°C, nous savons d'ores et déjà que les conséquences ne seront pas toutes évitées (Bonduelle & Jouzelle, 2014).

Une mise en mouvement des politiques et de la société est donc cruciale, dès maintenant, à la fois pour atténuer le phénomène et, s'agissant de la biodiversité, lui permettre de s'adapter.

Ces démarches de réduction et d'atténuation doivent mobiliser tous les leviers dans le domaine de la biodiversité. L'objet de ce rapport explique que nous nous intéresserons uniquement aux réseaux écologiques (corridors et aires protégées). Cependant, il ressort que les réseaux écologiques sont de toute façon massivement mis en avant par la bibliographie dans la lutte contre le changement climatique.

## **I.2. Mise en avant des réseaux écologiques face au changement climatique**

Les réseaux écologiques, corridors et aires protégées, sont extrêmement mis en avant par la littérature comme réponse adéquate vis-à-vis du changement climatique dans le domaine de la conservation de la biodiversité.

Heller & Zavaleta (2009) ont listé 524 recommandations à partir de 113 publications issues de 57 périodiques et livres traitant des solutions à apporter au problème du changement climatique. Travailler sur la connectivité des paysages et les réseaux écologiques ressort comme la recommandation la plus fréquemment citée dans toutes les publications consultées.

Watson *et al.* (2007) ont mené une étude à l'échelle mondiale en croisant le degré d'exposition au changement climatique et le degré de préservation des milieux naturels actuels (proportion de végétation naturelle intacte). L'association des deux paramètres aboutit à une carte de vulnérabilité des surfaces du globe. L'Europe centrale et de l'Ouest ressort comme particulièrement vulnérable car à la fois fortement exposée au changement climatique et disposant de peu d'espaces naturels préservés.

Les conseils formulés par les auteurs pour ces zones cumulant les deux facteurs négatifs sont notamment de restaurer des habitats pour améliorer la connectivité et d'identifier et protéger des zones refuges (cf. Figure 29).

La mise en exergue des réseaux écologiques s'explique par le fait qu'ils permettent de travailler à la fois sur l'adaptation et sur l'atténuation et qu'ils offrent donc une solution à la fois pour la biodiversité et pour la société humaine.

Degree of ecoregional intactness and relative climate stability	Future of ecoregional biodiversity if present land use and non-climate change threats are abated	Example of appropriate ecoregional level science-based strategies, incorporating active adaptative management
Low levels of vegetation intactness, low relative climate stability	<ul style="list-style-type: none"> <li>- High numbers of threatened and declining species</li> <li>- High turnover of species within and beyond ecoregion as species track their climate niche</li> <li>- Reduction in the number of functioning ecological processes, which will severely impact the adaptative capacity of species that may already be exceeded owing to degree of climate change</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Monitor extant viable species against present threatening processes</li> <li>- Manage present direct threats to intact vegetation to maintain populations of species and their dispersal pathways, as they track their climate niche and adapt to changing climate</li> <li>- Habitat restoration activities aimed at connectivity to increase population size and dispersal capacity of extant viable species</li> <li>- Emphasize the identification and protection of climate refugia</li> <li>- Manage present direct threats to ensure vegetation is intact to allow emigrating populations of species to establish themselves</li> <li>- Identify the species most vulnerable to climate change assess translocation options</li> <li>- Monitor potentially climate-sensitive species and feed this into translocation plans</li> </ul>

Figure 29 : Préconisation pour les régions du globe, comme l'Europe, qui cumulent une forte exposition au changement climatique et peu d'espaces naturels préservés.

Source : D'après Watson *et al.*, 2007

## **II. DES CORRIDORS ECOLOGIQUES POUR QUOI ?**

### **II.1. Favoriser l'adaptation de la biodiversité**

#### **II.1.1. Un support pour l'ajustement spatial**

Tout ce qui a été vu jusqu'ici dans ce rapport permet déjà de comprendre l'importance des réseaux écologiques pour l'adaptation des espèces face au changement climatique et plus particulièrement des corridors qu'ils offrent pour l'ajustement spatial des espèces.

En partie 1, nous avons vu que d'une manière générale, les recolonisations des espèces post-glaciations à partir de zones refuges se sont faites en suivant des routes bien identifiées (Taberlet *et al.*, 1998), comparables à des corridors. La phylogénie permet de mettre en évidence cette utilisation de routes bien précises. Pour le Cincle plongeur par exemple, les études génétiques montrent qu'il a utilisé intimement le réseau hydrographique pour ses ajustements d'aires lors des variations climatiques passées (Hourlay, 2011 *in* Sordello, 2012c).

Ce constat montre l'importance de préserver des espaces de grandes continuités écologiques pour d'éventuelles transgression/régression à venir. C'est l'objectif des cartes nationales du critère de cohérence (Sordello *et al.*, 2011a).

Nous avons vu par ailleurs en partie 2 qu'un grand nombre d'espèces ne pourront pas suivre le déplacement de leurs enveloppes climatiques favorables compte tenu de leur sensibilité à la fragmentation des habitats et créant ainsi un effet retard. Pour pallier ce phénomène, les corridors apparaissent alors comme une solution pour accompagner ces déplacements (Dyer, 1994). L'existence d'un réseau constitue en effet mécaniquement comme la garantie d'une mobilité plus aisée des espèces en réponse à tout type de facteurs, y compris donc une variation du climat (Krosby *et al.*, 2010). Il existe de nombreuses publications sur ce sujet. Watson *et al.* (2007) préconisent ainsi d'améliorer la connectivité pour accroître la viabilité des populations et faciliter leur dispersion. Hannah (2011) met lui aussi en avant la connectivité et les corridors comme réponse à donner face au changement climatique en vue de l'ajustement spatial. Selon lui, les corridors peuvent notamment permettre aux espèces d'être préservées entre aires protégées pendant leur ajustement spatial qui peut se faire sur un laps de temps long et donc nécessiter des espaces relais intermédiaires.

Il faut néanmoins distinguer :

- l'effet retard résultant de capacités intrinsèques limitées chez certaines espèces (liées effectivement aux traits de vie : nombre de génération, distances de dispersion, ...),
- l'effet retard résultant de l'habitat qui ne permet pas un déplacement rapide/facile (présences de barrières, milieux dégradés, ...).

Les deux phénomènes s'entremêlent mais la portée des réseaux écologiques n'est pas la même dans les deux cas. Dans le second cas, elle est claire car c'est en levant les barrières et en restaurant les milieux que l'effet retard pourrait éventuellement être effacé. Dans le premier cas, le réseau écologique reste une condition nécessaire mais il est probable que l'effet retard se maintienne car ces espèces conserveront des déplacements lents et effectués de proche en proche.

Le recours aux corridors est préconisé pour l'ajustement altitudinal comme longitudinal ainsi que pour l'ajustement spatial au niveau du littoral, afin de permettre aux espèces de se déplacer face à l'augmentation du niveau des eaux et ainsi de « fuir » les zones inondées (Bellard, 2013).

Plusieurs exemples illustrent concrètement la plus-value du maintien et de la préservation de zones dites « corridors » pour l'ajustement spatial.

Hardy *et al.* (2010) ont montré que des réseaux de prairies pouvaient permettre à l'Aurore (papillon) de suivre les effets du changement climatique en « déplaçant » sa répartition altitudinalement.

L'expérience concrète menée dans le Limbourg par le projet BRANCH a confirmé que des réseaux écologiques constitués de grandes zones hébergeant des habitats de bonne qualité et bien reliés entre eux contribuent à la survie de la faune et de la flore dans le contexte du changement climatique (Rooij *et al.*, 2007).

## > Débats dans la communauté scientifique sur l'importance de la fragmentation des habitats par rapport à la qualité des habitats

Pour être complet et objectif, il est important de mentionner que certains auteurs estiment que l'impact de la fragmentation d'habitats est secondaire par rapport à l'impact de la disparition d'habitats (cf. Sordello *et al.*, 2014). Indépendamment du changement climatique tout d'abord, il existerait pour certains auteurs un seuil de présence d'habitat dans le paysage au-dessus duquel la fonctionnalité est assurée (Pardini *et al.*, 2010 ; INRA, 2008).

Cette conception se retrouve ensuite précisément dans certaines publications vis-à-vis du changement climatique. Jeltsch *et al.* (2011) par exemple concluent que pour faire face au changement climatique, il est plus efficace d'améliorer la qualité des habitats déjà existants que d'implanter de nouveaux habitats pour obtenir un réseau « climatiquement adapté ». Les auteurs ont testé les effets de différentes variations du climat et du paysage sur quatre types d'assemblages fonctionnels représentant un panel complet de traits de vie (capacité de dispersion, ...). Les résultats montrent que l'ajout de modifications du paysage aux variations du climat peut accélérer (si dégradation d'habitat) ou ralentir (si ajout ou amélioration d'habitat) l'extinction locale d'espèces. Le groupe fonctionnel le plus sensible s'avère être celui composé d'espèces à faible capacité paysagère (dispersion) et à fort turnover (taux de croissance élevés et densités régulées).

Par ailleurs, certaines études mettent en avant le fait que l'augmentation de température générée par le changement climatique pourrait diminuer les contraintes liées à la fragmentation, et donc faire reculer encore son importance dans la hiérarchie des besoins entre qualité/connectivité. C'est ce que constatent Cormont *et al.* (2011) pour 4 espèces de papillons (deux généralistes et deux spécialistes). Pour ces espèces, les capacités de vol sont améliorées par beau temps et les individus parviennent à disperser plus loin que par temps humide et frais. Walters *et al.* (2006) montrent également que la distance de dispersion chez le Criquet marginé (*Chorthippus albomarginatus*) augmente exponentiellement avec le maximum de température observé dans une journée ; les auteurs prédisent alors que la proportion d'individus capables de pratiquer une dispersion longue distance (normalement 0,1 % de la population) pourrait augmenter de plus de 70 % au niveau des marges chaudes de l'aire de répartition. Hill *et al.* (2011) mettent aussi en avant un effet « feedback » du réchauffement climatique qui provoque une évolution des capacités de dispersion de certains insectes, notamment aux marges chaudes.

Ces positions et résultats semblent toutefois minoritaires et plusieurs chercheurs ayant pris part au débat ont une vision plus nuancée.

Hodgson *et al.* (2009) estiment qu'effectivement la fragmentation est trop mise en avant par rapport au besoin prépondérant d'augmenter la surface d'habitats mais ils insistent dans le même temps sur le besoin de préserver des zones à forte hétérogénéité environnementale. Verboom *et al.* (2010) rejoignent cette approche en conseillant de privilégier plutôt une hétérogénéité globale d'habitat, afin de dépasser les divergences entre « pro-composition » et « pro-connexions ».

La position de Dyer (1994) pourrait apparaître comme un compromis objectif, en reconnaissant que les corridors sont efficaces mais ne doivent pas être considérés pour autant comme une solution miracle. Les impacts du changement climatique ne seront pas résolus pour toutes les espèces uniquement en travaillant sur la connectivité mais dans tous les cas, le faire permettra de faciliter l'adaptation d'une grande partie de la biodiversité et a très peu de probabilité d'avoir des impacts négatifs (Krosby *et al.*, 2010). La question de l'échelle temporelle est également importante dans la lecture de ce débat scientifique : pour conserver face aux menaces actuelles, il y a surtout besoin de plus d'habitats de bonne qualité, si on ajoute la menace future du changement climatique, la connectivité prend plus d'importance.

Plusieurs cas montrent également clairement la prépondérance du facteur fragmentation, notamment pour les espèces aquatiques.

Pour les poissons surtout, dont nous avons vu qu'ils sont naturellement cantonnés aux périmètres de leurs bassins versants et dont les marges d'ajustement spatial peuvent ainsi être limitées, la fragmentation peut bien apparaître comme un facteur prépondérant sur la qualité de l'habitat. L'existence d'obstacles à la continuité aquatique à l'intérieur d'un bassin versant est en effet susceptible d'être d'autant plus impactante dans ces écosystèmes que les possibilités de migration sont déjà réduites.

Lassalle (2008), dans sa thèse, a montré pour la première fois à l'échelle continentale que le climat, actuel (conditions thermiques et hydrauliques de l'habitat continental) et passé (histoire biogéographique) et la fragmentation (due aux grands barrages et à la densité de population humaine) étaient déterminants pour expliquer la distribution actuelle des poissons migrateurs amphihalins.

La thèse de Laetitia Buisson (2009) conclut elle aussi sur le fait que, pour lutter contre les effets du changement climatique sur les poissons de rivières, il est nécessaire « *de veiller à ce que la fragmentation des cours d'eau soit réduite afin de respecter et/ou de restaurer la continuité amont-aval qui permettra les mouvements des espèces vers les zones favorables des réseaux hydrographiques, et limitera par ailleurs l'isolement génétique des populations* ».

### **II.1.2. Un facteur de résistance et de résilience face aux effets du changement climatique**

Dans la partie précédente, nous nous sommes intéressés au terme « adaptation » pris dans le sens de « permettre aux espèces de se déplacer » (ajustement spatial des aires de répartition). Cependant, l'adaptation de la biodiversité s'entend également dans le sens de « permettre une résilience des écosystèmes » face au changement du climat.

La résilience d'un écosystème est sa capacité à se régénérer après avoir subi des modifications. Face au changement climatique, cette résilience s'exprimera par exemple par la faculté des populations et des écosystèmes à se rétablir après un événement climatique extrême. Globalement, la résilience est une forme d'adaptation qui pourrait éviter aux espèces d'avoir à se déplacer en mobilisant plutôt des ajustements de types phénologiques ou internes, à la fois phénotypiques et génétiques (microévolution).

Les réseaux écologiques, denses et fonctionnels, sont là aussi présentés dans la littérature comme une réponse pour accroître la résilience des écosystèmes vis-à-vis du changement climatique.

Doerr *et al.* (2010) mettent clairement en avant le fait que de travailler sur la connectivité n'a pas simplement pour but d'aider les espèces à « déplacer » leur aire de répartition face au changement climatique mais également à augmenter la résilience des populations face à la diversité des menaces causées ou amplifiées par le changement climatique : « *Connectivity conservation is more than just conserving connectivity* ». La connectivité permet en effet un fonctionnement global, notamment en maintenant possible la dispersion entre populations, nécessaire à la résilience des écosystèmes (Doerr *et al.*, 2010).

D'une manière générale, il existe de fortes synergies entre fragmentation et changement climatique, qui vont au-delà du fait que la fragmentation limite l'ajustement spatial des espèces par les barrières qu'elle représente (Leimu *et al.*, 2010 ; Opdam & Washer, 2004).

Notamment, la fragmentation favorise la consanguinité et réduit ainsi la diversité génétique des populations, ce qui diminue à la base leurs possibilités de résilience face aux changements globaux y compris donc au changement climatique (Leimu *et al.*, 2010).



Pour le Lézard vivipare par exemple, le réchauffement climatique actuel risque de fragiliser encore davantage tous les biotopes humides et donc les populations relictuelles de plaine (Vacher & Geniez, 2010 *in* Sordello, 2012e).

Dans les populations estuariennes (macroinvertébrés, végétaux, ...), la résilience des métapopulations peut être améliorée en facilitant la connectivité entre populations locales, notamment des espèces les plus sédentaires (Chust, 2013). La connectivité permet ainsi de prévenir les effets stochastiques (hasard) et la consanguinité.

Pour le milieu aquatique, la fragmentation (dans le sens d'une rupture de l'écoulement de l'eau) agit en synergie avec le changement climatique dans le réchauffement des cours d'eau et donc accentue le besoin de migrer pour s'adapter (Monnier, 2009 *in* Basilio *et al.*, 2009)). Les barrages, et surtout les plans d'eau qu'ils occasionnent en retenues, provoquent en effet un réchauffement de l'eau dans les plans d'eau qui se répercute aussi en aval du barrage (cf. Figure 30). Un taux d'étagement (= quotient de la somme des chutes artificielles par la dénivellation naturelle) de 30 à 40 % à ne pas dépasser sur les cours d'eau à migrateurs et les cours d'eau intermédiaires est préconisé.

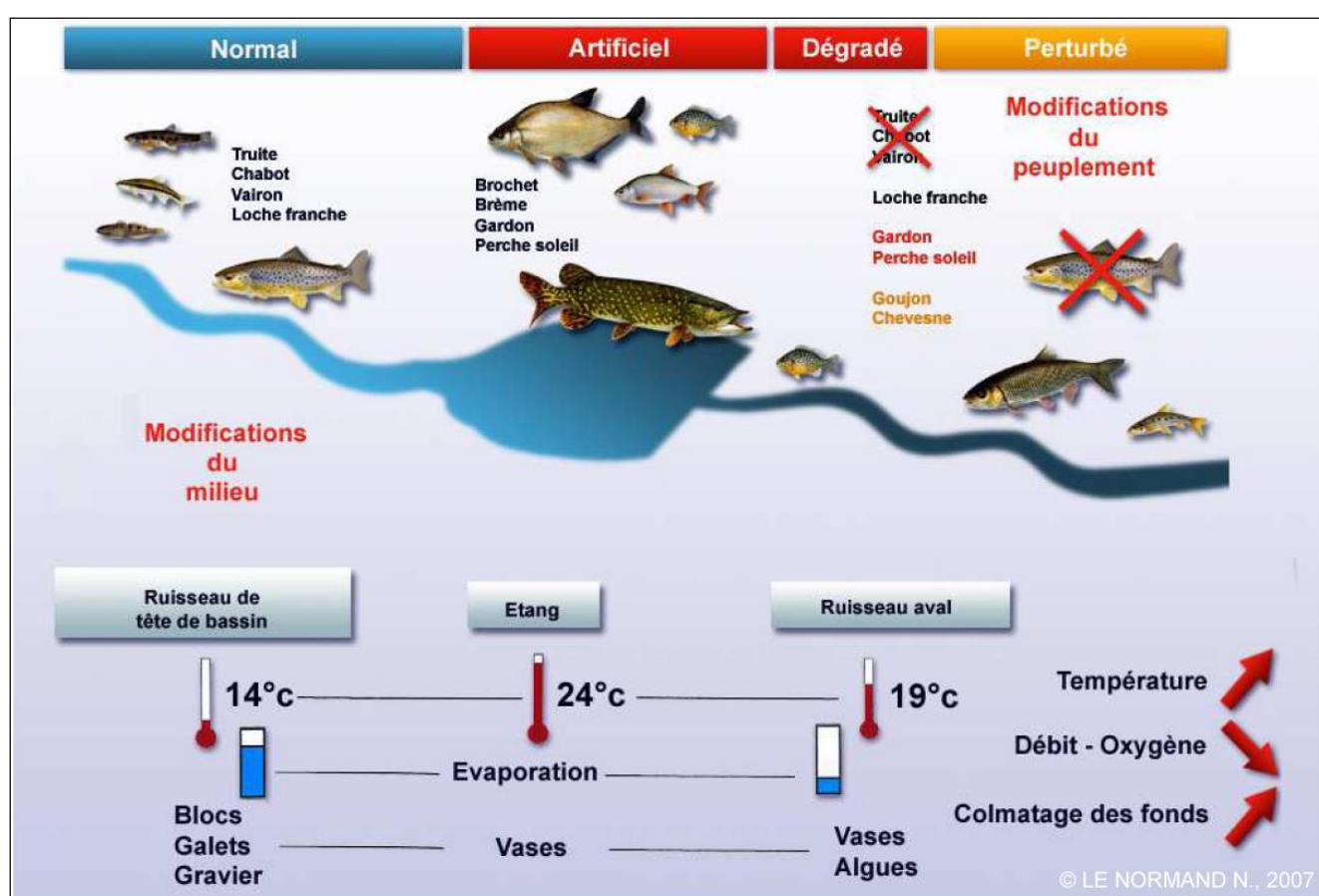


Figure 30 : La fragmentation du milieu aquatique contribue au réchauffement des eaux, en synergie avec le réchauffement climatique.

Source : Le Normand N. (2007) via D. Monnier (ONEMA)

Concernant le phénomène incendie, la fragmentation joue aussi en association avec le changement climatique (ONERC, 2003). La fragmentation de certains milieux - forestiers notamment - peut en effet augmenter le risque d'éclosion de feu (multiplication de l'effet lisière, accès, ...) (Soares-Filho *et al.*, 2012).

Compte tenu de ces liens entre fragmentation et changement climatique, le fait de maintenir un niveau suffisant de connectivité par les réseaux écologiques est à l'évidence une solution pour améliorer la résilience des écosystèmes (Leimu *et al.*, 2010). De façon plus générale, toute protection ou restauration

de la fonctionnalité d'un milieu devrait permettre aux espèces d'être moins vulnérables au changement climatique, de s'adapter ou de migrer.

Certains rôles positifs de la fragmentation dans la limitation des conséquences du changement climatique sont cependant à noter.

Concernant le phénomène incendie, la fragmentation joue comme un frein à la propagation du feu par la coupure que crée la zone déforestée.

Dans le cas des milieux aquatiques, les substances toxiques, présentes dans les sédiments en amont des obstacles aux continuités, sont de véritables « bombes à retardement » tant écologiques que sanitaires, problème qui ne fait que s'aggraver dans un contexte de réchauffement climatique et d'augmentation de la température de l'eau. Dans ce contexte, enlever un ouvrage pour rétablir la continuité peut se traduire par une dispersion de sédiments contaminés, sur des dizaines voire des centaines de kilomètres, et donc au final fragiliser les écosystèmes aquatiques au lieu de les renforcer. La levée d'obstacles à la continuité aquatique est également susceptible de favoriser les invasions biologiques. Néanmoins, dans ce deuxième cas, et contrairement aux sédiments, les espèces exotiques envahissantes peuvent parvenir à se disperser malgré la présence d'obstacles.

## **II.2. Un levier pour réduire le phénomène du changement climatique et atténuer ses effets sur la société humaine**

Les corridors et plus généralement les réseaux écologiques sont aussi présentés comme un levier pour atténuer le changement climatique. Cette fonction-là leur est cependant moins (re)connue que leur rôle dans l'adaptation, et elle est moins étayée par la bibliographie scientifique.

Le terme d'atténuation peut être considéré vis-à-vis de :

- la réduction du changement climatique lui-même,
- la réduction des effets du changement climatique.

### **II.2.1. Réduction du changement climatique lui-même**

Les éléments constituant les continuités écologiques (forêts, sols, milieux aquatiques, ...), par le stockage du carbone notamment, participent de fait à la réduction du changement climatique.

Parfois, si le rôle de ces éléments de continuités écologiques se révèle infime dans le stockage du carbone, le maintien de ces milieux grâce à leur identification en continuité écologique peut permettre d'éviter des rejets qui seraient émis si d'autres occupations du sol les remplaçaient. L'exemple des bois de Vincennes et de Boulogne à Paris est significatif en ce sens. Les deux bois cumulés possèdent en effet un rôle faible dans le captage du CO<sub>2</sub> : 3 000 tonnes équivalent carbone (TeqC) par an sur un bilan global pour la ville de Paris de 6 550 000 TeqC. Par contre, 1,3 millions de TeqC par an seraient rejetés si ces deux bois étaient remplacés par du bâti (Marie Gantois, Mairie de Paris *in* Vanpeene, 2012).

La connaissance scientifique est en revanche lacunaire pour dire quelle est la plus-value de la TVB dans la réalisation de ces fonctions d'atténuation.

Intuitivement, il apparaît qu'*a minima*, des écosystèmes reliés sont quelque part plus durables du fait qu'une diversité génétique par brassage assure leur pérennité, même si leur fonctionnement n'est pas nécessairement d'intensité plus forte qu'en l'absence de connexion.

Une seule publication traite spécifiquement de la plus-value conjointe que peuvent apporter les corridors dans l'adaptation (connectivité) et l'atténuation (stockage du carbone). Les auteurs montrent que des corridors identifiés à la fois sur la base de critères de connectivité entre aires protégées et de critères de densité de carbone stocké permettent ainsi de remplir les deux objectifs (Jantz *et al.*, 2014).

## II.2.2. Atténuation des effets du changement climatiques sur la société humaine

La fonctionnalité des écosystèmes est mise en avant comme un moyen efficace pour atténuer les effets du changement climatique.

Par exemple, pour le cycle de l'eau, les milieux naturels jouent un effet tampon vis-à-vis des inondations ou des sécheresses en limitant l'érosion, par rétention des eaux en cas de précipitations fortes, par régénération des nappes phréatiques, en soutenant l'étiage en cas de sécheresse ou encore comme rempart contre l'élévation du niveau de la mer (habitats dunaires).

Ces effets d'atténuation assurés par les milieux naturels - parfois considérés comme des services que la nature fournirait - sont assurés du fait même de l'existence et du fonctionnement de ces milieux naturels. En réalité la notion de fonction est associée à la simple existence, et celle de service intervient si des gens peuvent en bénéficier.

Ces fonctions naturelles peuvent donc permettre « gratuitement » aux sociétés humaines d'atténuer les effets du changement climatique. Alors que dans le même temps, investir dans les technologies et dans des infrastructures dites « grises » (bassins de rétention, digues artificielles, *etc.*) donne un bénéfice bien moindre pour des coûts très élevés (Gaffin *et al.*, 2012 ; Jones *et al.*, 2012).

Enfin, le maintien voire la restauration des milieux naturels sous la forme de réseau écologique (« infrastructure verte ») contribue à cette fonctionnalité (Sordello *et al.*, 2014) et ce faisant à la fourniture de ces « services écologiques » (Bourdil & Vanpeene-Bruhier, 2014).

## **II.3. Quand les corridors ne suffisent plus : la migration assistée**

Parmi les recommandations listées par Heller & Zavaleta (2009) concernant la prise en compte du changement climatique, quelques travaux préconisent dans des cas extrêmes la translocation, encore appelée migration assistée, pour des espèces dont on sait qu'elles n'auront pas de capacités suffisantes pour migrer même en présence d'une bonne connectivité (espèces à très faibles capacités de dispersion notamment).

Ce sujet fait débat au sein des publications analysées pour de nombreuses raisons (pratiques, scientifiques, éthiques) (Heller & Zavaleta, 2009).

Plusieurs auteurs mettent en avant la « migration assistée », ou translocation, comme solution pour certaines espèces (Hunter, 2007 ; Mc Lachlan *et al.*, 2007). Concrètement, la translocation consiste à déplacer intentionnellement des organismes vivants d'une zone à une autre, en l'occurrence pour dépasser les contraintes de dispersion naturelle face au changement climatique (Seddon, 2010).

Thomas (2011) présente la translocation comme l'unique moyen de pérenniser certaines espèces dans le contexte de changement climatique, notamment celles pour lesquelles aucune adaptation - et encore moins spatiale - n'est possible en raison de leur incapacité/impossibilité à franchir les barrières naturelles (espèces inféodées aux sommets des montagnes, populations isolées par du relief ou par de l'eau, ...) ou anthropiques. Par exemple, des espèces inféodées aux climats froids des sommets vont rapidement être vouées à disparaître si les surfaces offrant ces conditions climatiques s'amenuisent vers les sommets ; les espèces ne pourront pas rejoindre un autre sommet en franchissant des zones dont le climat est totalement incompatible avec leurs exigences.

L'auteur conseille cependant de réserver l'option de la translocation aux espèces les plus menacées par le changement climatique et de la considérer en dernier, lorsqu'il est admis que les solutions « traditionnelles », notamment l'amélioration de la connectivité, ne sont pas envisageables et/ou n'auront pas d'effets.

Deux types d'arguments allant contre la translocation sont avancés par Thomas (2011) :

- le caractère artificiel de la démarche. Toutefois, les écosystèmes sont de toutes façons déjà (quasiment) tous artificiels, il n'existe (presque) plus d'écosystèmes naturels au sens originels. Même dans les zones strictement protégées, la biodiversité d'aujourd'hui n'est pas celle du passé et continuera d'évoluer,

- les risques liés à l'introduction d'une nouvelle espèce dans un écosystème et notamment aux conséquences génétiques et aux possibilités d'invasions.

Afin de réduire une partie des risques, Thomas (2011) préconise que les espèces soient transloquées dans des zones :

- géographiquement cohérentes (pas de transport entre continent par exemple), notamment pour éviter les propagations de pathogènes qui peuvent être collatérales à l'introduction de l'espèce transloquée,

- comprenant peu d'espèces endémiques car cela minimise le risque de causer des extinctions par l'introduction d'une nouvelle espèce.

Enfin, un argument économique est également avancé contre la translocation car il peut être plus coûteux de déplacer des espèces manuellement que de créer des corridors pour amener naturellement ces espèces, notamment si le milieu à franchir est très pauvre (agriculture intensive) ou s'il y a des incompatibilités géologiques par exemple. La translocation risquerait pas ailleurs de ne concerner que quelques espèces bien connues, et donc de ne pas apporter de solution pour la majeure partie des espèces (invertébrés).

Hoegh-Guldberg *et al.* (2008) ont mis au point un outil d'aide à la décision passant par un questionnaire sur les risques d'extinction, les capacités de dispersion et la faisabilité de translocation (cf. Figure 31). En fonction des cas, le cheminement aboutit à privilégier une amélioration de la connectivité, à envisager effectivement la translocation voire, si aucune de ces deux options n'est possible, à se tourner carrément vers une conservation *ex-situ* de l'espèce.

D'autres auteurs sont beaucoup plus réservés sur la translocation. Pour Ricciardi & Simberloff (2009), la translocation possède une multitude de conséquences à la fois incomprises et surtout imprévisibles. Trois facteurs sont invoqués :

- le fait que l'introduction d'une espèce forme toujours un cas unique car les impacts de cette implantation sont fonction des conditions locales et donc par nature impossibles à anticiper,

- les relations interspécifiques qui vont être bousculées par l'introduction d'une nouvelle espèce sans que l'on puisse prédire le résultat à l'avance,

- l'évolution du vivant (sans doute ici de micro-évolution) qui empêche de prédire ce que va devenir la population implantée à moyen et long terme.

Pour les auteurs, il est clair que le sujet doit être davantage étudié scientifiquement avant d'être mis en pratique car il n'est pas maîtrisé en l'état alors même que ses conséquences peuvent être irrévocables (par exemple si une espèce native dans la zone de destination disparaît suite à la translocation).

Des expériences sont cependant déjà menées ou sur le point de l'être (Barlow & Martin, 2004). Un projet est à l'étude en Amérique du Nord pour transloquer un conifère, *Torreya taxifolia*, vers les forêts du Sud des Appalaches et le plateau de Cumberland, 500 km au nord de son aire native, où il n'a donc plus été présent depuis 65 millions d'années. Pour le moment l'espèce est en effet répartie sur 35 km le long de la rivière Apalachicola mais on ne compte pas plus de 1 000 arbres qui ne se reproduisent plus. L'arbre recherche les climats frais des forêts de ravins. Or, avec le changement climatique, son biotope se raréfie et il n'a aucune possibilité de migrer spontanément vers un autre biotope favorable. La translocation apparaît alors ici comme la seule solution pour pérenniser cette espèce endémique. Les porteurs du projet avancent ici son caractère facile, légal et peu couteux ; il « suffirait » en effet de planter quelques graines dans une zone de destination bien choisie.

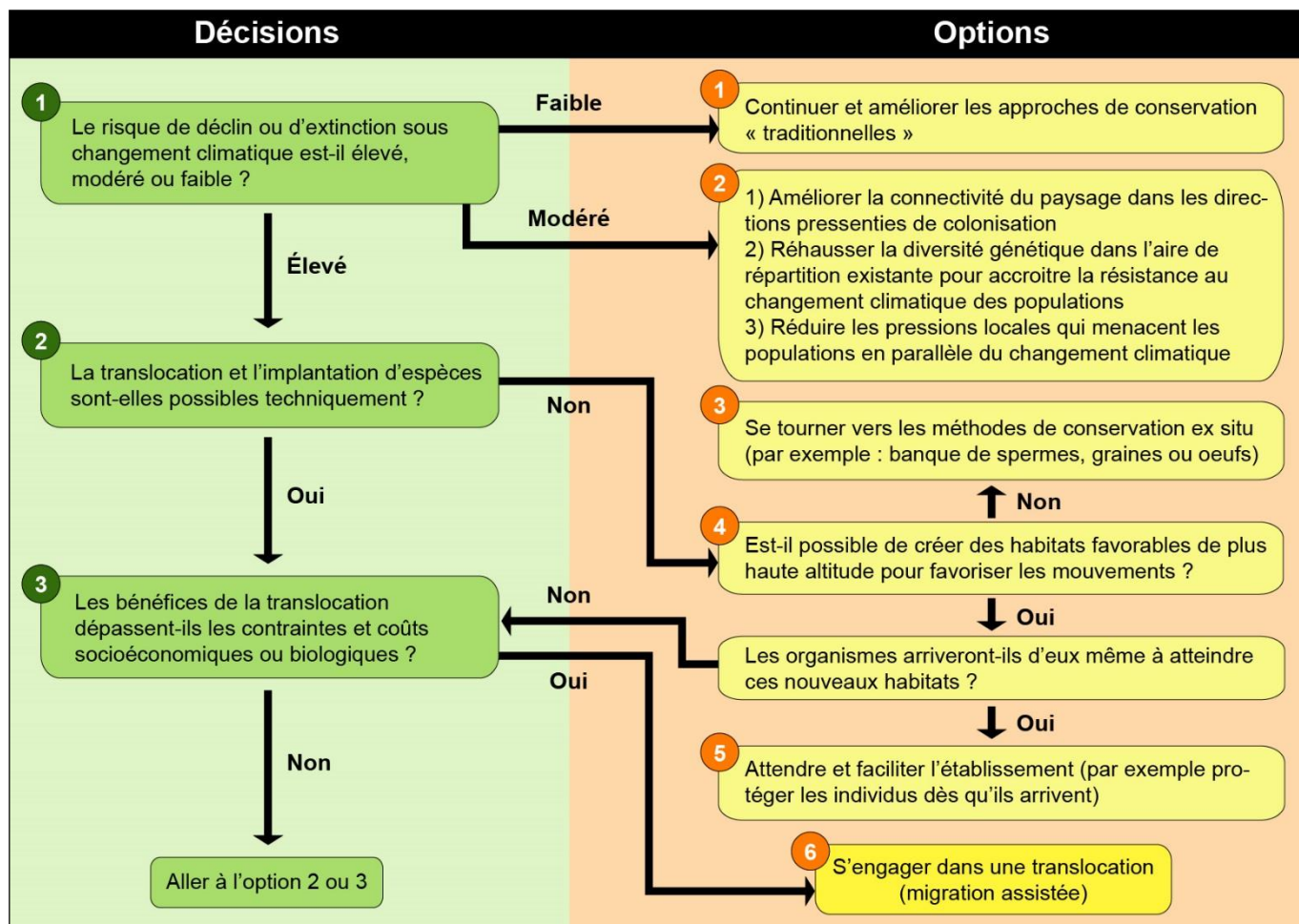


Figure 31 : Processus d'aide à la décision afin d'opter ou non pour la migration assistée.  
Source : D'après Hoegh-Guldberg *et al.*, 2008

En Nouvelle Zélande, la translocation/migration assistée est aussi utilisée, malgré un lourd passé d'invasions biologiques, et globalement les résultats sont concluants (Bellard, 2013). Cet exemple peut montrer que les pays les plus frileux pour ce type d'approches sont ceux qui sont les moins expérimentés, alors que les pays qui ont l'habitude d'utiliser ces méthodes connaissent les précautions à prendre et sont donc beaucoup plus enclins à faire de la translocation.

Carroll *et al.* (2009) montrent que la colonisation assistée peut en fait être couplée avec des démarches de réintroduction. Les auteurs prennent l'exemple de deux papillons encore présents en Europe mais éteints de Grande-Bretagne, *Aporia crataegi* et *Polyommatus semiargus*. Par simulation, ils montrent que le caractère favorable du climat de Grande Bretagne pour ces deux espèces sera renforcé avec le changement climatique alors que le reste de l'Europe de l'Ouest va devenir plus hostile. La Grande Bretagne compte

donc parmi les terres d'accueil qui permettrait de pérenniser l'espèce alors que paradoxalement elle n'y est plus présente. Une réintroduction de ces deux espèces en Grande Bretagne participerait donc d'un programme de conservation tout en pouvant être considéré comme de la migration assistée. Se baser sur l'histoire de la répartition des espèces peut ainsi être un moyen de « justifier » la translocation en la transformant finalement en un acte de restauration.

### **III. LE ROLE DES AIRES PROTEGEES**

#### **III.1. Le débat sur l'efficacité des aires protégées face au changement climatique**

Margules & Pressey (2000) mettent en avant deux rôles essentiels des aires protégées :

- assurer la représentation de la biodiversité via des échantillons de chaque « région » (au sens biogéographique),
- isoler cette biodiversité des menaces qui pèsent sur elle.

Dans le contexte du changement climatique, le caractère fixe des aires protégées a alors soulevé la question au sein de la communauté scientifique de la pertinence de cet outil pour continuer d'assurer ces deux rôles, au regard de la mobilité des répartitions d'espèces à laquelle on se prépare.

Les aires protégées deviendraient caduques car les espèces pour lesquelles elles ont été identifiées les désertent. Les travaux de modélisation d'Araujo *et al.* (2011) par exemple montrent que vers 2080, de l'ordre de 60 % des espèces devraient avoir perdu un climat favorable dans les aires protégées qui les abritent actuellement.

La littérature est très abondante sur ce sujet qui a agité fortement la communauté des chercheurs. Plusieurs publications pointent effectivement une neutralité voire une inefficacité des aires protégées dans le cadre du changement climatique. Kharouba & Kerr (2010) montrent par exemple qu'il n'y a pas de différence dans les changements de composition et de richesse dans les cortèges de papillons du Canada entre les espaces protégés et ceux qui ne le sont pas. Vieilledent *et al.* (2013) constatent que l'efficacité des aires protégées est très limitée à Madagascar pour trois espèces de Baobab dont la répartition future ne sera que très peu couverte par le réseau actuel, qui est probablement peu représentatif des conditions environnementales de Madagascar.

Néanmoins, en premier abord, il paraît important pour être rigoureux lors ces comparaisons de tenir compte de l'état initial avant de vérifier l'évolution dans/hors aire protégée : si l'aire protégée est plus riche et plus spécialisée au départ, et qu'un même taux de changement climatique s'applique dans et en dehors de l'aire protégée, alors l'aire protégée conserve logiquement un intérêt.

Certains auteurs présentent quant à eux les aires protégées comme la mesure de conservation dont l'efficacité reste la mieux démontrée pour réduire les menaces faites à la biodiversité (Taylor *et al.*, 2011), notamment quand il est fait en amont (donc en prévision et non en réaction) du processus de changement climatique (Hannah, 2008). En Californie, Wiens *et al.* (2011) constatent quant à eux que la majorité des changements d'enveloppes climatiques (climats voués à disparaître ou au contraire les climats nouveaux devant apparaître), vont intervenir au sein du réseau d'aires protégées. Pour les auteurs, cette disproportion étonnante peut se révéler être une chance car l'outil « aire protégée » sera un levier pour canaliser ces changements extrêmes de disparition/apparition du climat, qui auraient été plus difficiles à endiguer dans les espaces ordinaires.

Dans les recommandations listées par Heller & Zavaleta (2009) pour la lutte contre les effets du changement climatique, les aires protégées ressortent bien comme une méthode efficace pour préserver à la fois des individus, des espèces, des communautés et des écosystèmes. Après la connectivité, c'est la recommandation la plus citée dans toutes les publications consultées par les auteurs.

Sur la globalité, et si ces aires protégées sont de qualité et bien sélectionnées, elles restent un outil important pour :

- conserver la biodiversité en place (zones de réservoirs),
- participer à l'ajustement spatial en complément des corridors (zones relais pour les espèces en transition),
- assurer un potentiel global de résilience et d'adaptation.

D'une manière générale, les aires protégées semblent permettre de garantir effectivement la persistance des espèces et les protéger de la menace de changement climatique. Et surtout cette persistance est effectivement liée à ce statut de protection. Dans le même temps, des biais dans la représentativité des réseaux existent et doivent être comblés.

### **III.1.1. Conserver la biodiversité**

A lecture des publications rassemblées sur le sujet, il se dégage que trois paramètres sont à intégrer pour évaluer objectivement l'efficacité des aires protégées face au changement climatique :

- 1) Effectuer les analyses à l'échelle de l'ensemble du réseau considérée,
- 2) Différencier les résultats par milieux ou espèces car les sensibilités sont différentes,
- 3) Faire la part des choses entre une inefficacité de l'outil « aire protégée » lui-même et la représentativité du réseau qui peut effectivement nécessiter d'être améliorée pour prendre en compte le critère nouveau du changement climatique.

#### **1) Effectuer les analyses à l'échelle de l'ensemble du réseau considérée**

Souvent, les projections corrélatives donnent en effet des résultats variables entre aires protégées d'un même réseau. Leach *et al.* (2013) par exemple, en Égypte, trouvent que pour certaines aires protégées la richesse spécifique va augmenter, alors que pour d'autres elle va décroître significativement.

En revanche, sur l'ensemble du réseau, l'objectif de conservation peut être maintenu même s'il y a des changements à l'échelle de chaque zone et les analyses doivent donc être faites à ce niveau global.

Par exemple, Hole *et al.* (2009) ont modélisé les modifications d'aires de répartition, attendues dans les années à venir, pour l'avifaune nicheuse en Afrique Sub-saharienne. Des changements importants sont effectivement à prévoir : d'ici à 2085, plusieurs espèces prioritaires en terme de conservation auront modifié la moitié de leur répartition pour 42 % des aires protégées du réseau étudié. Cependant, la persistance des espèces sur la globalité du réseau reste à un niveau élevé : environ 90 % des espèces conservent au moins une aire protégée où elles sont présentes actuellement et où le climat restera compatible pour elles. Pour 7-8 espèces prioritaires « seulement », le climat qui leur est favorable ne sera plus représenté sur l'ensemble du réseau.

Johnston *et al.* (2013) ont modélisé l'évolution de population d'oiseaux d'Europe de l'ouest dans les années à venir et ont comparé ces nouvelles aires de répartition avec le réseau britannique d'aires protégées. Un déclin de 25 % est attendu dans les populations étudiées. Cependant, les auteurs montrent que le réseau permettra de conserver en abondance suffisante les espèces étudiées dans leur répartition future.

## **2) Différencier les résultats par milieux ou espèces car les sensibilités sont différentes**

L'efficacité des aires protégées par rapport au changement climatique dépend sans doute beaucoup des types de milieux c'est-à-dire à la fois de la probabilité des milieux à être concentrés surtout dans des aires protégées (zones vierges, habitats rares, ...) et de leur sensibilité intrinsèque aux changements climatiques (habitats humides par exemple).

Virkkala *et al.* (2013) montrent que le déclin des populations d'oiseaux qu'ils étudient en Finlande est plus important en dehors des aires protégées qu'à l'intérieur de ces zonages, pour les espèces de milieux forestiers, de tourbières et de montagnes.

Klausmeyer & Shaw 2009 ont modélisé l'évolution des habitats de climat méditerranéen à travers le monde (habitats présents sur 5 continents et dont 5 % de la surface mondiale est sous protection). Les auteurs montrent que, selon les scénarios climatiques utilisés, 50 à 60 % seulement de ces surfaces protégées vont rester en climat méditerranéen dans le futur. Par ailleurs, les marges de manœuvre pour créer de nouvelles aires protégées sont faibles pour ces habitats car 30 % de leurs futures surfaces sont des surfaces déjà artificialisées. Les habitats de types méditerranéen, de par leur configuration littorale sont en effet à la fois riches en biodiversité et attractifs pour les sociétés humaines.

Enfin, il faut être vigilant dans le choix des espèces utilisées pour comparer l'efficacité des aires protégées avec les espaces extérieurs : si ce sont des espèces sensibles qui sont utilisées, cela augmente la probabilité de constater une diminution y compris dans les aires protégées, sans que cela ne soit représentatif de la réponse « moyenne » de la biodiversité.

## **3) Faire la part des choses entre une inefficacité de l'outil « aire protégée » lui-même et la représentativité du réseau qui nécessite d'être améliorée pour prendre en compte le critère nouveau du changement climatique**

La littérature s'entend en fin de compte sur le fait que l'outil « aire protégée » en lui-même n'est pas obsolète et que c'est avant tout la représentativité des réseaux qui, de nos jours, n'est plus tout à fait valable dans la mesure où le paramètre changement climatique n'était pas intégré à l'époque de l'identification des premières réserves.

D'Amen *et al.* (2011) ont modélisé l'évolution des aires de répartition des amphibiens d'Italie face au changement climatique contemporain, en tenant compte de leurs capacités de dispersion. Les résultats montrent que le réseau de réserves italien (national et Natura 2000) ne représente que partiellement la diversité des amphibiens et leurs traits géographiques. Les objectifs de conservation sont atteints pour seulement 40 % des espèces dans la perspective d'une évolution d'aires de répartition et plusieurs zones « irremplaçables » actuelles n'apparaissent pas en espaces protégés. La conclusion des auteurs n'est en revanche pas de remettre en cause l'outil « aire protégée », mais de recommander de créer de nouvelles zones de protection pour combler ces lacunes.

Les études de représentativité concernent souvent seulement quelques groupes taxonomiques et les invertébrés par exemple sont très peu appréhendés. On peut citer toutefois le travail effectué en France par Leroy *et al.* (2014). Les auteurs montrent pour 10 espèces d'araignées étudiées que, malgré les changements très forts de répartition prédits, au moins une maille reste à chaque fois favorable au sein du réseau d'aires protégées considéré. Cela conforte l'idée que, pour ce groupe biologique aussi, les aires protégées sont pertinentes dans une logique de réseau.

Par ailleurs, la représentativité des aires protégées est généralement abordée dans les études sous l'angle de la diversité spécifique et en ne se préoccupant pas ou peu de la diversité génétique ou écosystémique (la question écosystémique est prise en compte par les habitats Natura 2000). On peut néanmoins là encore citer en exemple le travail effectué au Canada (Québec), où un important effort a été fait pour augmenter la surface d'aires protégées tout en se préoccupant de la représentativité du réseau, de façon à protéger au moins un échantillon de chacun des types d'écosystème qui caractérisent le territoire à une échelle donnée (Brassard *et al.*, 2010).



### III.1.2. Participer à l'ajustement spatial en complément avec les corridors

Pour Olson *et al.* (2009), l'outil « aire protégée » reste le meilleur pour permettre une adaptation spatiale des espèces au changement climatique, y compris celles à faible mobilité. Il est bien plus avantageux que la migration assistée qui serait plus coûteuse, moins efficace et pose des questions éthiques.

Lawson *et al.* (2014) montrent par ailleurs que pour des papillons, la probabilité de colonisation est trois fois supérieure dans les aires protégées par rapport aux espaces non protégés, à milieux équivalents. Ce constat empirique s'explique par les démarches pro-actives de conservation et de gestion qui améliorent la survie des espèces et la qualité des milieux. Ces actions favorisent ainsi l'expansion des aires de répartition, c'est-à-dire l'adaptation au changement climatique, alors qu'elles n'ont pas à la base été spécifiquement mises en œuvre pour cela mais simplement du fait du statut de protection.

Au final, les corridors et les aires protégées apparaissent comme deux mesures complémentaires en formant les réseaux écologiques.

Imbach *et al.* (2013) montrent, en Amérique centrale, que les corridors constituent effectivement une aide pour les aires protégées en atténuant les impacts dus au changement climatique. Les auteurs ont testé les impacts du changement climatique sur les aires protégées sans corridor puis ont testé les bénéfices des corridors dans l'atténuation de ces impacts.

Les résultats montrent que, sans corridor, ce sont les aires protégées situées en climat chaud, sec ou les plus au Nord qui sont les plus impactées ou encore celles pour lesquelles le climat futur est le plus différent du climat actuel. La taille des aires protégées n'a étonnement pas d'influence.

Avec corridors, les aires protégées qui ont une faible amplitude altitudinale et qui sont situées en zones froides voient leurs impacts les mieux atténués. Néanmoins, le corridor le plus efficace s'avère être celui qui relie les aires protégées les plus grandes et qui présente un gradient altitudinal fort.

Dans leur modélisation, avec et sans corridor, les auteurs ont regroupé les espèces par traits de vie fonctionnels (notamment la vitesse de dispersion) : les espèces à dispersion rapide sont logiquement celles qui résistent le mieux au changement climatique en empruntant les corridors pour diffuser entre aires protégées.

Beaumont & Duursma (2012) montrent par ailleurs que l'efficacité des aires protégées n'est pas liée uniquement à ce qui se passe en leur sein mais dépend aussi de la matrice environnante. Les auteurs ont modélisé l'évolution de l'occupation du sol dans un tampon de 50 km autour des aires protégées d'ici à 2100 selon plusieurs scénarios possibles. L'efficacité des aires protégées en termes de conservation est influencée par la qualité et les caractéristiques de la matrice paysagère autour de ces aires. La fragmentation des paysages adjacents peut interrompre les flux écologiques à travers les aires protégées et faire décroître la capacité des espèces à ajuster leur aire de répartition face au changement climatique (Beaumont & Duursma, 2012).

### III.1.3. Des zones tampons, facteurs de résilience et d'atténuation

Des aires protégées avec des milieux de qualité constituent une ressource indispensable pour l'adaptation des espèces aux changements (Hopkins *et al.*, 2007), adaptation qui ne se limite pas à l'ajustement de leur aire de répartition (Bellard *et al.*, 2012). Les aires protégées terrestres constituent des zones tampons pour faire face aux changements (Araujo, 2009).

Ainsi, la remise en cause de l'outil « aire protégée » au regard du déplacement des aires de répartition est à nuancer fortement car les aires protégées sont des zones importantes pour la biodiversité, notamment en raison de leurs caractéristiques physiques (géomorphologie etc.) souvent rares. Elles devraient donc continuer à être des zones remarquables même sous changement climatique, du fait d'une pression

d'occupation du sol en principe réduite (Hopkins *et al.*, 2007). Johnston *et al.* (2013) montrent que malgré le changement quasi-complet des répartitions d'espèces, les aires protégées restent situées à des endroits stratégiques sur le plan de la conservation.

Même si certaines espèces pour lesquelles elles ont été désignées les désertent, elles resteront des espaces accueillant une fraction de la biodiversité (Pyke *et al.* 2005). D'autres espèces peuvent arriver dans ces espaces. Par ailleurs, Hortal & Lobo (2006) indiquent ainsi que les secteurs biogéographiques de forte richesse ou de fort endémisme sont probablement relativement stables dans le temps, même si les espèces elles-mêmes changent.

Enfin, les aires protégées, à l'instar des corridors, ont un rôle dans la rétention et la séquestration du carbone et donc dans la réduction du changement climatique (Hoffmann *et al.*, 2011). Au Brésil par exemple, les aires protégées couvrent 54 % des forêts restantes sur le territoire ce qui représente 56 % du stock de carbone forestier du pays (Soares-Filho *et al.*, 2010). L'ensemble de ces surfaces protégées vont faire éviter  $8,0 \pm 2,8 \text{ Pg}$  ( $10^{15}$  grammes) d'émission de carbone d'ici à 2050.

### **III.2. Les aires protégées sont des laboratoires pour la connaissance**

Au-delà de leur fonction de conservation propre, les aires protégées constituent des lieux privilégiés pour étudier les effets du réchauffement climatique. Elles présentent des possibilités en matière de recherche pour tester l'efficacité de mesures évolutives permettant de faire face aux changements climatiques (Martinez, 2007).

Les parcs nationaux (PN) notamment constituent des outils précieux pour la compréhension et le suivi des processus liés aux changements climatiques (PNF, 2009). Ils sont implantés sur le terrain et bénéficient de suivis scientifiques, pour les plus anciens depuis un demi-siècle.

Tous les parcs nationaux, chacun dans leur zone biogéographique, collectent des données :

- dans des domaines complémentaires (glaciers, écologie forestière, récifs coralliens...),
- en réseau (participation de plusieurs parcs à des programmes et réseaux nationaux),
- en jouant leur rôle de territoires d'expérimentation et d'innovation (territoire d'accueil de la recherche),
- en valorisant l'interdisciplinarité, particulièrement indispensable pour étudier l'impact des changements climatiques et des changements d'usage des milieux.

D'après PNF (2009), des modifications écologiques occasionnées par le changement climatique dans les parcs nationaux en France sont déjà visibles.

En contexte montagnard, le Parc national des Pyrénées par exemple observe déjà une fonte des glaciers plus rapide que dans les Alpes et, sur une période de 35 ans, un déplacement en altitude de 200 m vers le haut des communautés d'orthoptères.

En contexte littoral, des observations faites ces dernières années confirment les effets prévus par la littérature en métropole comme en outre-mer : érosion de 70 % des plages des Caraïbes entre 1985 et 1995, épisodes successifs de blanchissement de coraux en Guadeloupe, développement fréquent d'algues filamenteuses et arrivée à Port-Cros d'espèces venant de la partie orientale de la Méditerranée (plus chaude que la partie occidentale) : girelle paon et barracuda.

Parcs nationaux de France a résumé les engagements des différents parcs nationaux français dans un document synthétique (PNF, 2009). Parmi ces actions menées, certaines semblent pouvoir alimenter les réflexions vis-à-vis des continuités écologiques :

- **Pour le PN des Pyrénées** : Il effectue un suivi depuis 8 ans, avec l'association Moraine, de 6 glaciers aujourd'hui en limite d'existence, et suit avec l'Université de Nantes le déplacement de certains marqueurs morphologiques des sols qui caractérisent la limite de l'étage périglaciaire. Avec l'Université de Toulouse, le PN des Pyrénées travaille aussi à reconstituer l'histoire climatique des Pyrénées depuis les dernières glaciations, à l'aide d'analyses palynologiques (étude des pollens piégés dans les tourbières et dépôts lacustres). Ce travail donne un éclairage précieux sur la réponse fonctionnelle des écosystèmes aux changements environnementaux passés et permet de tester des modèles prédictifs. Une réflexion est en cours pour identifier les espèces ou milieux particulièrement sensibles qui pourraient constituer de bons indicateurs de suivi des changements climatiques (lagopèdes, amphibiens, reptiles, tourbières, mares...).

- **Pour le PN des Écrins** : Il est inclus dans la « Zone Atelier Alpes » (label CNRS/CEMAGREF) permettant au Laboratoire d'Écologie Alpine de développer plusieurs programmes de suivi et de modélisation du changement climatique comme par exemple le programme Diversitalp qui vise à mieux comprendre la réponses des espèces végétales aux variations du milieu (aire de répartition, niche utilisée...).

- **Pour le PN de la Vanoise** : Il est impliqué dans le suivi annuel du glacier de Gébroulaz (bilans de masse, vitesses d'écoulement de surface, position des fronts,...) apportant ainsi sa contribution au Service d'Observation Glacioclim du Ministère chargé de la Recherche.

- **Pour le Parc national des Cévennes** : Il utilise le réseau de réserves biologiques et d'îlots de sénescence, mis en place depuis 15 ans dans le cadre d'un partenariat avec l'ONF et couvrant environ 2000 ha, pour recueillir des données dendrologiques pouvant être mises en relation avec l'évolution du climat.

- **Pour le PN de Guadeloupe** : Il collabore avec l'ONF et l'Université Antilles-Guyane sur un réseau de placettes forestières pour suivre la dynamique naturelle des écosystèmes forestiers d'altitude et mesurer les impacts à long terme des changements globaux.

- **Pour le PN de la Réunion** : Il prévoit de mettre en place un réseau de suivi de la flore et des habitats des différents étages de végétation, qui permettra d'étudier les conséquences du changement global selon un gradient altitudinal. Dans ce cadre, les sommets de l'île de La Réunion, pour l'étage altimontain (parties les plus élevées), seront intégrés au programme international GLORIA de suivi à long terme de l'évolution de la végétation des montagnes du monde.

Enfin, les aires protégées sont également des laboratoires pour mener des études de perception et de connaissances à partir des populations locales et visiteuses. Une enquête sur la perception des impacts du changement climatique sur le littoral a été menée en Espagne dans le parc naturel des Aiguamolls de l'Empordà (Fatoric *et al.*, 2013)

## **IV. MISE EN AVANT DES RESEAUX ECOLOGIQUES PAR LES INSTITUTIONS EUROPEENNES ET FRANÇAISES**

Au niveau international, le lien avec les réseaux écologiques et les aires protégées semble peu fait dans les traités et textes relevant du changement climatique. Pour un rappel du contexte international sur le

changement climatique, se référer à l'encadré plus loin. Ici, nous nous focaliserons sur l'échelle européenne et sur la France.

## **RAPPEL DU CONTEXTE INTERNATIONAL**

### **La Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC)**

En 1979 une Première conférence mondiale a lieu sur le climat, organisée à Genève par l'OMM : elle lance un programme mondial de recherche, le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) et l'International Council of Scientific Unions (ISCU).

En 1989 une Seconde conférence mondiale sur le climat réunit 137 états plus la communauté européenne. Sa déclaration finale préconise l'instauration d'une convention internationale sur les changements climatiques.

La Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) est alors adoptée au cours du Sommet de la Terre de Rio de Janeiro en 1992 par 154 États auxquels il faut ajouter la totalité des membres de la Communauté européenne. Elle est entrée en vigueur le 21 mars 1994. Plus d'infos : [http://unfccc.int/portal\\_francoophone/essential\\_background/convention/items/3270.php](http://unfccc.int/portal_francoophone/essential_background/convention/items/3270.php)

La CCNUCC constitue la pièce maîtresse de la lutte mondiale contre le changement climatique. Entrée en vigueur en mars 1994, son article 2 précise son objectif : stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique. Les pays développés, les pays en transition et l'Union européenne, inscrits dans l'annexe I de la convention, s'engagent à stabiliser leurs émissions de gaz à effet de serre d'ici l'an 2000 au niveau des émissions de 1990. Dans l'annexe II, les pays développés et l'Union européenne s'engagent à financer les coûts encourus par les pays en développement pour respecter leurs engagements.

Tous les ans se tient une réunion des parties ayant ratifié la CCNUCC. Ces conférences ont pour objectif de faire un point d'étape et de vérifier la bonne application de la convention cadre.

La prochaine conférence des parties, la COP21, en 2015, sera présidée par la France et aura lieu à Paris. Cette 21<sup>ème</sup> conférence doit aboutir à un nouvel accord international sur le climat, applicable à tous les pays, dans l'objectif de maintenir le réchauffement mondial en deçà de 2 °C.

> Le protocole de Kyoto est un traité international visant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, signé le 11 décembre 1997 lors de la 3<sup>ème</sup> Conférence des Parties à la Convention tenue à Kyoto (Japon). Le Protocole de Kyoto complète et renforce la Convention en établissant un cadre pour l'application de mesures destinées à prévenir et corriger les effets néfastes du changement climatique. Fin 2009, plus de 170 parties (y compris la Communauté européenne) avaient ratifié ce Protocole qui est entré en vigueur le 16 février 2005.

### **Le GIEC et ses publications**

Comme vu dans la partie II, un groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a été créé en 1988. Placé sous l'égide du PNUE et de l'OMM, le GIEC est chargé de suivre le dossier du réchauffement climatique. Il a pour mission d'évaluer l'information scientifique sur les changements climatiques, leurs impacts et les mesures de prévention et d'adaptation envisageables. Il produit de nombreuses publications.

## IV.1. Comment l'Union européenne fait-elle un lien entre réseaux écologiques et changement climatique ?

Parmi les documents cadres et stratégiques à l'échelle de l'Union européenne, qui abordent au moins en partie le sujet qui nous préoccupe, on peut principalement noter, par ordre chronologique de parution :

- un livre vert paru en 2007,
- un livre blanc paru en 2009,
- le groupe de réflexion européen sur Green Infrastructure en 2010 et 2011,
- la stratégie biodiversité publiée en 2011,
- la stratégie sur le changement climatique de 2013,
- la communication de la Commission européenne sur l'infrastructure verte de 2013,
- l'avis du CESE de 2013 sur l'infrastructure verte,
- l'avis du comité des régions émis en 2013 sur l'infrastructure verte.

Sur le plan technique, il existe également plusieurs rapports émanant des organes européens sur le changement et/ou sur l'infrastructure verte et les aires protégées.

On constate ainsi un approfondissement des liens entre changement climatique et réseaux écologiques, à la fois du côté du changement climatique, qui fait une place de plus en plus forte à l'infrastructure verte, et du côté de la biodiversité qui développe l'infrastructure verte en affichant de manière de plus en plus concrète l'objectif de répondre aux enjeux du changement climatique.

### IV.1.1. Évolution du côté du changement climatique

> Livre vert de 2007 : Adaptation au changement climatique en Europe : les possibilités d'action de l'Union européenne

**Pré-requis :** En 2007, la Commission européenne a fait paraître un livre vert intitulé « Adaptation au changement climatique en Europe: les possibilités d'action de l'Union européenne »

Le livre vert évoque succinctement les liens entre changement climatique et fragmentation : « *Des écosystèmes en bon état présenteront une meilleure résilience au changement climatique et seront donc mieux en mesure de continuer à fournir les services écosystémiques dont dépendent notre prospérité et notre bien-être. Ils doivent être au cœur de la politique d'adaptation. Par conséquent, les pressions « classiques » provoquant la **fragmentation**, la dégradation, la surexploitation et la pollution des écosystèmes doivent être réduites (amélioration de la résilience des écosystèmes au changement climatique).* ».

Le livre vert ne parle pas *stricto sensu* d'infrastructure verte mais intègre les enjeux liés à la connectivité et à la fragmentation avec « *L'accent doit être mis sur les objectifs suivants: garantir l'intégrité, la cohérence et la connectivité du réseau Natura 2000* ».

> Livre blanc de 2009 : « Adaptation au changement climatique : vers un cadre d'action européen »

**Pré-requis :** En 2009, la Commission européenne a publié un livre blanc intitulé « Adaptation au changement climatique : vers un cadre d'action européen ». Ce livre blanc énonçait un certain nombre de mesures, qui ont en grande partie été mises en œuvre. L'un des éléments essentiels était la plateforme européenne en ligne consacrée à l'adaptation au changement climatique (Climate-ADAPT13), qui a été lancée en mars 2012. Cette plateforme comprend les dernières données relatives à l'action en matière d'adaptation dans l'UE, ainsi que plusieurs outils utiles d'aide à la décision. Par ailleurs, L'UE a commencé à intégrer l'adaptation dans plusieurs de ses propres politiques et programmes financiers.

Le livre blanc rappelle en premier lieu que « *l'une des manières de faire face [aux effets du changement climatique] est d'élaborer des stratégies axées sur la gestion et la conservation de l'eau, des terres et des ressources biologiques, qui visent à maintenir les écosystèmes dans un bon état sanitaire et de fonctionnement, à les rendre résistants au changement climatique et à les remettre en état.* », c'est-à-dire qu' « *utiliser la capacité de la nature d'absorber ou de contrôler les incidences dans les zones urbaines et rurales peut être une méthode d'adaptation plus efficace que de se concentrer sur les infrastructures physiques* ». Le Livre blanc cite notamment « *l'amélioration de la capacité de stockage du carbone et de l'eau au niveau des sols ainsi que la conservation de l'eau dans des systèmes naturels pour atténuer les effets de la sécheresse et prévenir les inondations, l'érosion des sols et la désertification.* ».

En ce sens, le livre blanc ajoute que « *l'infrastructure verte peut être un élément décisif de l'adaptation en ce qu'elle fournit des ressources essentielles à des fins économiques et sociales dans des conditions climatiques extrêmes.* ». C'est la première fois que le concept d'infrastructure verte est introduit et qu'un lien direct est fait avec la lutte contre le changement climatique. Le livre blanc la définit comme un « *réseau interconnecté de zones naturelles comprenant certaines terres agricoles, telles que les voies «vertes», les zones humides, les parcs, les réserves forestières et les communautés végétales indigènes, ainsi que les zones marines qui régulent naturellement les débits d'orage, les températures, les risques d'inondation et la qualité de l'eau, de l'air et des écosystèmes.* »

> Stratégie de l'UE relative à l'adaptation au changement climatique » (Communication du 16/04/2013 COM(2013) 216 de la Commission)

**Pré-requis :** En 2013, l'Union européenne s'est dotée d'une stratégie pour l'adaptation au changement climatique, publiée au travers d'une communication de la Commission. La stratégie comporte 8 actions réparties au sein de 3 objectifs.

L'objectif 1 vise à « *favoriser l'action au niveau des États membres* » et mentionne que « *les approches reposant sur l'infrastructure verte et celles centrées sur les écosystèmes, ainsi que les projets visant à promouvoir des techniques novatrices pour l'adaptation* » seront privilégiées par l'UE dans le cadre des financements au moyen de l'instrument LIFE qui comprend notamment un sous-programme « Action pour le climat ».

L'objectif 3 vise à « *intégrer la résilience au climat dans l'action de l'UE: promouvoir l'adaptation dans les secteurs les plus vulnérables* ». La biodiversité est citée parmi ces secteurs.

Cet objectif comporte plus précisément l'Action 7 destinée à « *améliorer la résilience des infrastructures* ». Cette action aborde pêle-mêle les infrastructures grises (énergies, transport) et vertes (réseau écologique) mais on peut lire que « *sur la base des résultats de sa communication sur l'infrastructure verte, la Commission examinera la nécessité de prévoir des orientations supplémentaires pour les autorités et les*

décideurs, la société civile, les entreprises privées et les professionnels de la conservation de la nature afin de tirer pleinement parti des approches fondées sur les écosystèmes en matière d'adaptation. »

#### **IV.1.2. Évolution du côté de la biodiversité et de l'infrastructure verte**

> Stratégie « La biodiversité, notre assurance-vie et notre capital naturel - stratégie de l'UE à l'horizon 2020 » (Communication du 03/05/2011 COM(2011) 244 de la Commission)

**Pré-requis :** En 2011, l'Union européenne s'est dotée d'une stratégie pour améliorer la préservation de la biodiversité d'ici à 2020, publiée au travers d'une communication de la Commission

Cette stratégie confirme l'émergence du concept d'infrastructure verte en l'inscrivant comme un de ses objectifs propres, l'objectif 2 « *Les écosystèmes et leurs services seront préservés et améliorés grâce à la mise en place d'une infrastructure verte et au rétablissement d'au moins 15 % des écosystèmes dégradés* ». Cet objectif vise à « *la préservation et l'amélioration des services écosystémiques et le rétablissement des écosystèmes dégradés, en intégrant l'infrastructure verte dans l'aménagement du territoire* », et contribuera ainsi lui-même aux « *objectifs de croissance durable de l'UE19 et à l'atténuation du changement climatique et à l'adaptation à celui-ci, tout en encourageant la cohésion économique, territoriale et sociale et en sauvegardant notre héritage culturel.* »

#### **LE POINT DE VUE DU CONSEIL DE L'EUROPE EN 2005**

Dans le cadre de la convention de Berne (Convention relative à la conservation de la vie sauvage et du milieu naturel de l'Europe), le Conseil de l'Europe a publié en 2005 un document intitulé « Conserver la diversité biologique européenne dans le contexte du changement climatique » (Usher, 2005). Ce travail présente les évolutions biologiques prévisibles à l'échelle de l'Europe sous influence du changement climatique et les réponses à y apporter.

Ce rapport se démarque relativement par l'approche qu'il propose concernant les corridors et les aires protégées. Le Conseil de l'Europe préconise en effet de ne pas s'attarder sur les corridors (ici appelés « couloirs »), dont l'efficacité ne serait pas prouvée, et de mettre l'accent sur les zones protégées, en identifiant des aires de grande taille et en réduisant les processus qui conduisent à la fragmentation de l'habitat.

Reprenant le débat présenté précédemment sur l'efficacité des aires protégées en contexte de climat changeant, Usher (2005) propose également une logique dynamique des réseaux d'aires protégées, sur la base de désignations souples et de limites fluctuantes, permettant régulièrement d'ajouter des zones qui sont ou deviennent importantes ou de retrancher des zones qui n'ont plus d'intérêt.

> Groupe de travail sur la Green Infrastructure

**Pré-requis :** Un groupe de travail entre experts de plusieurs États membres, dont la France a été mené en 2010 et 2011 pour élaborer une stratégie « GreenInfrastructure » (GI). Ce groupe de travail a synthétisé ses conclusions sous la forme de 5 recommandations parues en décembre 2011.

Globalement le concept de Green Infrastructure est très associé à la notion de services écosystémiques. La Green Infrastructure est ainsi vue comme un regroupement d'espaces naturels et semi-naturels qui permettent de préserver la biodiversité tout en rendant différents services aux peuples européens.

Les 5 recommandations du groupe de travail attribuent à la GI un rôle important dans la réduction et l'atténuation du changement climatique. Les bénéfices des éléments naturels et semi-naturels qui composeront la GI sont en effet nombreux pour répondre au changement climatique : réduction des émissions de CO<sub>2</sub> par stockage du carbone, filtration de la pollution de l'air et de l'eau, réduction de l'érosion des sols.

> Communication de la Commission du 6 mai 2013 (COM(2013) 249) : « Infrastructure verte – Renforcer le capital naturel de l'Europe »

**Pré-requis :** A l'issue du groupe de réflexion sur la GI, la Commission a fait paraître une communication en mai 2013 qui synthétise ses conclusions concernant les objectifs et le déploiement de l'infrastructure verte européenne.

L'infrastructure verte est présentée comme une solution pour « *aider les populations à s'adapter au changement climatique ou à en atténuer les effets négatifs.* ». La Commission met l'accent sur « *Les initiatives en matière d'infrastructure verte dans les secteurs agricole et forestier ayant un effet positif sur les stocks de carbone et sur le bilan des gaz à effet de serre* ».

La commission parle explicitement de l'infrastructure verte comme un moyen pour « *la mitigation des changements climatiques et l'adaptation à ces changements* ». Un encadré est dédié aux forêts alluviales comme illustration : « *Les forêts atténuent également les effets du changement climatique en stockant le CO<sub>2</sub> et en fournissant des biomatériaux qui peuvent emmagasiner temporairement le carbone (produits forestiers récoltés) ou servir de produits de substitution au carbone en remplaçant les matériaux et les carburants riches en carbone, ou encore agir comme une « soupape de sécurité » qui retient l'eau et réduit le risque d'inondation d'établissements humains. La restauration de forêts alluviales s'avère souvent moins onéreuse du point de vue des coûts ponctuels ou d'entretien que des solutions purement techniques telles que la construction de digues ou de bassins d'orage.* »

L'infrastructure verte est également un moyen pour faire face aux « événements extrêmes » du changement climatique : « *Le changement climatique et le développement d'infrastructures rendent les zones fréquemment sinistrées plus vulnérables aux phénomènes météorologiques extrêmes et aux catastrophes naturelles [...]. Il est possible de diminuer l'impact de ce type d'événements sur la société humaine et sur l'environnement grâce aux solutions fondées sur l'infrastructure verte telles que plaines inondables fonctionnelles, ripisylve, forêts de protection dans les régions montagneuses, cordons littoraux et zones humides côtières, associées, le cas échéant, à des infrastructures de prévention des catastrophes comme des travaux de protection des berges.* ».

> Avis du CESE (Conseil économique et social européen) (NAT/607) en réponse à la communication de l'UE

**Pré-requis :** En réponse à la communication de la Commission sur l'infrastructure verte, le Conseil économique et social européen (CESE) a émis un avis en octobre 2013 (avis NAT/607).

L'avis fait à son tour un lien entre infrastructure verte et climat. Il met l'accent sur les éléments de GI en milieu habité/urbain : « *des parcs, allées et sentiers de promenade bien conçus ainsi que les toits et murs végétaux améliorent à moindre coût le climat urbain et renforcent d'une manière générale la qualité de vie en ville. En outre, ils contribuent à la biodiversité et à la lutte contre le changement climatique.* ». Par ailleurs, « *l'infrastructure verte fait office de puits de carbone, notamment en protégeant les sols naturels. Au regard de l'objectif général de la politique climatique consistant à convertir l'économie européenne en une*



*économie pauvre en carbone et en bioéconomie, le bon fonctionnement des écosystèmes est d'autant plus important. Les multiples avantages de l'infrastructure verte devraient être pris en compte dans les stratégies des États membres en matière d'adaptation au changement climatique. ».*

> Avis du comité des régions

**Pré-requis :** A son tour, le Comité des régions (CR) a également rendu un avis en réponse à la communication de la commission du 6 mai 2013 (avis ENVE-V-039 de la 103<sup>ème</sup> session plénière des 7,8 et 9 octobre 2013).

Le CR précise dès les premières lignes de son avis qu'il soutient l'infrastructure verte (GI) en l'ancrant dans le contexte d'adaptation et d'atténuation du changement climatique. Il considère par contre que cette efficacité sera conditionnée par la qualité de la mise en œuvre de la GI qui doit passer par des solutions fonctionnelles.

### **IV.1.3. Rapports techniques émanant des organes européens**

Plusieurs rapports techniques ont été produits par les différents organes européens, sur le changement climatique et/ou l'infrastructure verte et les aires protégées :

- Un rapport sur le coût de l'inaction versus le coût de l'adaptation vis-à-vis du changement climatique (EEA, 2007),
- Un rapport sur les impacts du changement climatique en Europe (EEA 2012a),
- Un rapport sur les aires protégées en Europe (EEA, 2012b)
- Un guide sur le maintien de la connectivité paysagère (Kettunen *et al.*, 2007),
- Un rapport sur la multifonctionnalité de l'infrastructure verte (SFEP, 2012),
- Un rapport sur les bénéfices multiples d'une cohésion des politiques nature/infrastructure verte à l'échelle européenne (IEEP & Milieu, 2013),
- Un rapport de proposition méthodologique pour l'identification de l'infrastructure verte (EEA 2014).

Une lecture rapide de ces différents travaux semble montrer des positions toujours convergentes vers un intérêt de l'infrastructure verte et des aires protégées pour à la fois atténuer et permettre l'adaptation au changement climatique.

Le rapport du Service Environnement de la Commission européenne de 2012 par exemple (SFEP, 2012) rappelle que le changement climatique va exacerber le phénomène de fragmentation en dégradant les écosystèmes qui peuvent justement servir à l'adaptation des impacts du changement climatique. Il souligne que la difficulté tient au fait que la réponse au changement climatique ne peut pas être extrapolée entre toutes les espèces, ce qui ajoute à la complexité et à l'incertitude des modèles disponibles. Néanmoins, les milieux dits « intermédiaires » (comprendre en « pas japonais ») offerts par la GI sont un potentiels pour accompagner les mouvements de migration des espèces que provoque et va provoquer le changement climatique en Europe, surtout pour les espèces qui ne peuvent se déplacer loin et qui vont nécessiter de trouver des habitats nouveaux favorables sous forme de microclimat.

Ce rapport met par ailleurs en évidence des champs de connaissances sont encore lacunaires : par exemple, savoir comment la GI influe sur la température permettrait d'aider à la conception de la GI pour prioriser le choix des éléments de GI les plus à même d'atténuer le changement climatique.

Une lecture plus approfondie de ces différents travaux techniques d'échelle européenne serait intéressante à mener. Le rapport proposant une méthodologie d'identification de l'infrastructure verte qui prenne en compte notamment le changement climatique (EEA, 2014), sera présenté plus en détails en partie IV.

La Commission européenne a également fait paraître divers documents de communication et de sensibilisation. Un fascicule a été produit en 2009 (CE, 2009) intitulé « Le rôle de la nature dans le changement climatique ». Celui-ci met en avant les liens entre changement climatique et réseaux écologiques, notamment à travers le « Fait n°4 : la conservation de la nature contribue à la lutte contre le changement climatique ». Illustrant parfaitement les travaux scientifiques décrits plus haut, on peut lire dans cette plaquette qu'« *il est vital de préserver ces espaces naturels [comprendre le réseau N2000 et autres zonages] même si les espèces pour lesquelles elles étaient destinées à l'origine les ont délaissés. Ces zones fourniront les habitats nécessaires à d'autres espèces essayant de trouver des conditions climatiques appropriées. La sauvegarde de la diversité génétique et celle des espèces est importante pour les écosystèmes, car elle leur permet d'améliorer leurs capacités de résilience en garantissant un nombre d'espèces suffisant au maintien des processus écologiques en cas de perturbations soudaines.* ».

#### IV.1.4. Autres éléments

> Lancement de programmes de recherche : exemple de l'Horizon 2020

**Pré-requis :** L'Union européenne a mis en place un nouveau programme pour la recherche et l'innovation, intitulé Horizon 2020. Le programme HORIZON 2020 regroupe les financements de l'Union européenne en matière de recherche et d'innovation ; il est ainsi doté de 79 milliards d'euros sur la période 2014-2020.

Ce programme est entré en vigueur le 1er janvier 2014 et s'étend jusqu'en 2020. La France l'a lancé dès le 16 décembre 2013 et au total, 16 pays y participent.

Portail français du programme : <http://www.horizon2020.gouv.fr/>

Horizon 2020 s'articule autour de trois grandes priorités : l'excellence scientifique, la primauté industrielle et les défis sociétaux. Cette dernière priorité comprend plusieurs défis dont un défi intitulé « Climat, efficacité des ressources et matières premières ». Celui-ci vise à concilier la croissance démographique mondiale et les limites de la planète en termes de ressources naturelles et d'équilibre des écosystèmes. Il soutient ainsi la production de connaissances nouvelles, le développement d'outils, de méthodes et de politiques, ainsi que le développement d'éco-innovations. Un document de travail détaillant le programme 2014-2015 de ce défi (Anonyme, date inconnue) liste deux items « *SC5-7-2015: More effective ecosystem restoration in the EU* » et « *WASTE-6-2015: Promoting eco-innovative waste management and prevention as part of sustainable urban development* » faisant directement allusion à la Green infrastructure.

> Groupe de travail suite au sommet de Copenhague

Un groupe de travail s'est formé suite au sommet de Copenhague pour réfléchir sur le changement climatique et biodiversité. Un rapport a été produit (Anonyme, 2009). Il comprend deux grandes parties

- l'une fait un état des lieux des liens entre biodiversité et climat et décrit la situation du changement climatique,

- l'autre liste des recommandations pour les politiques d'adaptation et de réduction du changement climatique.

L'une des recommandations vise à faire converger les politiques Nature de l'UE vers des objectifs communs. Par exemple, il est préconisé une extension des réseaux écologiques pour faciliter les possibilités de dispersion des espèces et réduire les risques liés à la fragmentation des habitats, en mobilisant notamment les directives Habitats et Oiseaux. Ce groupe de travail met également en évidence l'accroissement de la résilience des écosystèmes grâce aux réseaux écologiques. Il est préconisé pour cela de protéger les habitats existants, de réduire leurs menaces (pollutions, ...) et d'engager des restaurations.

## IV.2. En France

Trois ressources relatives au changement climatique en France paraissent indispensables à évoquer concernant les liens qui peuvent être faits avec les réseaux écologiques :

- le plan national d'action sur le changement climatique (PNACC) 2011-2015,
- les travaux de l'Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (ONERC),
- le récent rapport du Conseil économique, social et environnemental (CESE).

### IV.2.1. Le Plan national d'action sur le changement climatique 2011-2015

**Pré-requis :** La France s'est engagée en 2011 et jusqu'en 2015 dans un Plan national d'action sur le changement climatique (PNACC-2011-2015) (MEDDTL, 2008 ; MEDDTL, 2011). L'élaboration de ce plan répond à l'obligation fixée par l'article 42 de la loi du 3 août 2009 (dite loi Grenelle 2) qui tire elle-même partie de la Stratégie nationale d'adaptation au changement climatique du 13 novembre 2006. Le PNACC 2011-2015 comporte de nombreuses mesures dans le domaine de la recherche et de l'observation, mais aussi des mesures concrètes qui visent à intégrer l'adaptation dans toutes les politiques sectorielles (agriculture, forêt, tourisme, pêche, aménagement du territoire, bâtiments et infrastructures, protection des populations, etc.). La France est le premier pays d'Europe à présenter un plan de ce type, couvrant tous les domaines et tous les secteurs d'activité.

Le PNACC 2011-2015 comprend une fiche « biodiversité » dont l'action 3 s'intitule « *Action n°3 : Promouvoir une gestion intégrée des territoires prenant en compte les effets du changement climatique sur la biodiversité* ». Cette action 3 comporte trois mesures dont deux sont directement liées respectivement aux continuités écologiques et aires protégées :

1) « *Mettre en œuvre et préserver la Trame verte et bleue (TVB) et Identifier et préserver un réseau écologique d'outre-mer (REDOM - BEST) afin d'améliorer l'adaptation au changement climatique de l'infrastructure écologique prévue par les lois Grenelle* »

Outils de mise en œuvre : Orientations nationales pour la préservation et la remise en bon état des continuités écologiques / Schémas régionaux de cohérence écologique / Documents d'urbanisme – Centre de ressources Trame verte et bleue.

2) « *Prendre en compte le changement climatique dans la stratégie de création d'aires protégées et dans les modalités de gestion des aires protégées existantes et à venir* »

Outils de mise en œuvre : Stratégie de création d'aires protégées terrestres et métropolitaines (SCAP) qui vise à placer 2 % du territoire métropolitain sous protection forte / Formations et guides méthodologiques.

On peut également noter l'action 1 du PNACC : « *Action n°1 : Intervenir pour l'adaptation au changement climatique au niveau des documents d'urbanisme* » de la fiche « *URBANISME et CADRE BATI* » qui indique que « *La préservation de cette continuité écologique facilitera l'adaptation au changement climatique* » ce

qui nécessite de « Faire prendre en compte les risques et les effets liés au changement climatique dans les documents d'urbanisme ».

#### IV.2.2. Les rapports de l'ONERC

**Pré-requis :** L'ONERC est un observatoire consacré au changement climatique, créé par la loi du 19 février 2001. Il possède trois missions principales :

- collecter et diffuser les informations sur les risques liés au réchauffement climatique,
- formuler des recommandations sur les mesures d'adaptation à envisager pour limiter les impacts du changement climatique,
- être le point focal du GIEC en France.

Tous les rapports de l'ONERC n'ont pas pu être passés en revue dans le cadre de ce rapport. Parmi les références lues, plusieurs font des mentions explicites aux réseaux écologiques et aires protégées pour lutter contre le changement climatique, par ordre chronologique :

> Les conclusions du séminaire « *Collectivités locales et changements climatiques : quelles stratégies d'adaptation ?* » organisé par l'ONERC en 2004 préconisaient déjà précisément (ONERC, 2005) :

- la création de « corridors écologiques » pour faciliter la migration en cours d'espèces animales vers des milieux mieux adaptés,
- de modifier la stratégie de mise en place des réserves et de création des parcs naturels.

> Dans sa stratégie nationale de 2007, l'ONERC écrivait en ce sens qu'« *il conviendra en pratique de veiller à ce que les réseaux d'aires protégées existants (et notamment les aires de protection intégrale) soient maintenus, de façon à pouvoir les utiliser comme des laboratoires d'étude sur les impacts et l'adaptation au changement climatique.* » (ONERC, 2007), mettant en avant le rôle des aires protégées que nous mentionnions plus haut pour l'acquisition de connaissance et l'expérimentation.

> En 2009, dans son rapport intitulé « *Changement climatique - Coûts des impacts et pistes d'adaptation* », l'ONERC identifie les réseaux écologiques comme leviers d'adaptation et d'atténuation, en écrivant qu'il convient de « *s'assurer de l'intégration des problématiques liées à la biodiversité dans toutes les politiques, générales et sectorielles, d'atténuation et d'adaptation au changement climatique afin de maximiser les cobénéfices : espèces, espaces protégés (y compris les parcs naturels régionaux), projets de territoire, réseaux écologiques et connectivité.* » (ONERC, 2009).

La littérature scientifique résumée plus haut et ces trois extraits sont ainsi extrêmement cohérents.

#### IV.2.3. L'avis du Conseil économique, social et environnemental (CESE) de mai 2014

**Pré-requis :** En mai 2014, le Conseil économique, social et environnemental (CESE) a fait paraître un avis, rendu après auto-saisine, sur le sujet du changement climatique mondial (Bonduelle & Jouzelle, 2014). Le rapport comprend un ensemble de propositions pour l'adaptation et l'atténuation du changement climatique en France.

Au sein de l'axe « Créer une vision partagée de l'action climatique en régions » et de sa sous-partie « Penser les services futurs d'adaptation, ouvrir le débat dans la société », plusieurs préconisations sont formulées en terme de biodiversité. Le CESE considère que « la priorité est d'assurer les continuités écologiques

identifiées dans les documents de l'État et des collectivités territoriales. Une réflexion devra être initiée sur les politiques des espaces protégés en fonction des évolutions climatiques constatées ou à venir. »

Deux extraits particulièrement parlants sont présentés ici :

- « notre assemblée réaffirme que la priorité est d'assurer les continuités écologiques terrestres et aquatiques identifiées dans les documents de l'État et des collectivités territoriales. Au-delà de la préservation des réservoirs de biodiversité, elle insiste pour que les corridors écologiques, qu'ils soient linéaires, discontinus ou paysagers soient maintenus dans leurs fonctions ou restaurés et clairement inscrits dans les schémas régionaux de cohérence écologique (SRCE) qui doivent être adoptés en totalité d'ici à la fin 2015, puis dans les documents d'urbanisme, conformément à la loi Grenelle 2. Cette solution d'adaptation est efficace et peu coûteuse. **Le dispositif « trame verte et bleue », pensé à l'origine pour lutter contre la fragmentation des milieux naturels, semble être la meilleure réponse pour faciliter l'évolution des milieux et la migration des espèces, parfois vers et hors de France. Un enjeu important est donc de compléter cette cohérence écologique. »**,

- « parmi les mesures du PNACC relatives à la biodiversité, la prise en compte du changement climatique dans la gestion des aires, n'a pas pu être menée à bien en raison d'une réduction des crédits d'intervention. **Le CESE demande que ces mesures soient engagées sans retard et qu'une réflexion soit initiée sur les politiques des espaces protégés en fonction des évolutions climatiques constatées ou à venir. »** »

### **IV.3. Exemple à l'échelle d'une collectivité : la Ville de Paris**

La Ville de Paris a adopté à la fois un Plan Climat en 2007 (Mairie de Paris, 2007) et un Plan Biodiversité en 2011 (Mairie de Paris, 2011). Un premier bilan du Plan Climat a été publié en 2012 (Mairie de Paris, 2012). La Ville de Paris offre donc un cas intéressant où co-existent deux plans et qui peut servir d'illustration pour voir les interactions développées entre les deux.

Du côté du Plan Climat, qui est le plus ancien, le sujet des trames n'est pas du tout abordé et le sujet de la biodiversité est également quasi absent. Une simple recherche par mot clef ne donne aucun résultat sur le sujet « trame », ni même sur le mot « biodiversité », dans le bilan du Plan Climat 2007-2012.

En revanche, du côté du Plan Biodiversité, le lien avec le changement climatique est abondamment développé et y compris précisément vis-à-vis du sujet des continuités écologiques. Le plan insiste à la fois sur :

- la synergie entre fragmentation et changement climatique (« *Les milieux s'appauvrissent également s'ils ne s'inscrivent pas dans une continuité écologique : faute de pouvoir circuler, les plantes sauvages et les animaux s'affaiblissent, résistent mal aux pollutions, au changement climatique, aux espèces invasives, et finissent par disparaître.* »),

- l'intérêt de préserver un réseau écologique dans Paris comme facteur d'adaptation de la biodiversité face au changement climatique (« [...] *offrir des cheminements écologiques et des points de passage permettant aux espèces menacées et aux espèces pionnières de se déplacer à partir des zones sources, riches en biodiversité, pour investir de nouveaux milieux et s'adapter aux modifications de leur environnement (évolution du climat, pression anthropique)* »),

- le rôle de la biodiversité et donc des éléments constituant les réseaux écologiques, dans la lutte contre le changement climatique, notamment en misant fortement sur la végétalisation. On peut citer par exemple deux actions du Plan Biodiversité directement en ce sens :

- renforcer la végétalisation des emprises d'infrastructures linéaires **pour permettre à ces dépendances de jouer un rôle de corridor écologique** sachant que dans le même temps cette végétation

temporise les effets d'îlots de chaleur. Il est intéressant de noter la préconisation pour le choix des essences qui doivent être « *régionales adaptées au microclimat chaud et sec des bords d'autoroutes* »,

- **étudier et encourager la végétalisation au travers de la majoration du COS pour les programmes performants en matière énergétique.** Le PLU autorise une majoration du COS de 20 % pour les programmes performants en matière énergétique. En application du Plan Biodiversité, une étude sera alors lancée pour savoir si cette amélioration des performances énergétiques d'un bâtiment ouvrant la majoration du COS peut être obtenue via une végétalisation. Cette approche serait un levier fort pour renforcer le maillage vert du territoire et la biodiversité s'il s'accompagne d'un travail sur la qualité du végétal comme support aux habitats faunistiques, tout en contribuant aux objectifs du Plan Climat.

# **REFERENCES CITEES DANS LA PARTIE 3**

## **Articles scientifiques**

- ARAUJO M.-B., ALAGADOR D., CABEZA M., NOGUES-BRAVO D. & THUILLER W. (2011). Climate change threatens European conservation areas. *Ecological letters*. Numéro 14. Pages 484-492.
- BARLOW C. & MARTIN P.-S. (2004). Bring *Torreya taxifolia* North—Now. *Wild earth*. Fall/Winter 2004-2005. Pages 52-56.
- BEAUMONT L.J. & DUURSMA D. (2012). Global projections of 21st century land-use changes in regions adjacent to protected areas. *Plos one*. Volume 7. Numéro 8.
- BELLARD C., BERTELSMEIER C., LEADLEY P., THUILLER W., COURCHAMP F. (2012). Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology letters*. Numéro 15. Pages 365-377.
- CARROLL M.J., ANDERSON B.J., BRERETON T.M., KNIGHT S.J., KUDRNA O. & THOMAS C.D. (2009). Climate change and translocations: The potential to re-establish two regionally-extinct butterfly species in Britain. *Biological Conservation*. Numéro 142. Pages 2114-2121.
- CHUST G., ALBAINA A., ARANBURU A. BORJA A., DIEKMANN O.E., ESTONBA A., FRANCO J., GARMENDIA J.M., IRIONDO M., MUXIKA I., RENDO F., GERMAN R.J., RUIZ-LARRANAGA O., SERRAO E.A. & VALLE M. (2013). Connectivity, neutral theories and the assessment of species vulnerability to global change in temperate estuaries. *Estuarine coastal and shelf science*. Volume 131. Pages 52-63.
- CORMONT A., MALINOWSKA A.H., KOSTENKO O., RADCHUK V., HEMERIK L., WALLIS DE VRIES M.F. & VERBOOM J. (2011). Effect of local weather on butterfly flight behaviour, movement, and colonization: significance for dispersal under climate change. *Biodiversity and conservation*. Volume 20. Numéro 3. Pages 483-503.
- D'AMEN M. BOMBI P., PEARMAN P.B., SCHMATZ D.R., ZIMMERMANN N.E. & BOLOGNA M.A. (2011). Will climate change reduce the efficacy of protected areas for amphibian conservation in Italy?. *Biological conservation*. Volume 144. Numéro 3. Pages 989-997.
- DOERR V.-A.-J., BARRETT T. & DOERR E.-D. (2011). Connectivity, dispersal behaviour and conservation under climate change: a response to Hodgson *et al.*. *Journal of Applied Ecology*. Numéro 48. Pages 143-147.
- DYER J.-M. (1994). Land use pattern, forest migration and global warming. *Landscape and Urban Planning*. Volume 29. Numéro 2-3. pages 77-83.
- GAFFIN S.R., ROSENZWEIG C. & KONG A.Y.Y. (2012). Correspondence: adapting to climate change through urban green infrastructure. *Nature climate change*. Volume 2. Numéro 10. Pages 704-704.
- HANNAH L. (2008). Protected Areas and Climate Change. Conservation International, Center for Applied Biodiversity Science. *New York Academy of Sciences*. Pages 201-212.
- HANNAH L. (2011). Climate change, connectivity, and conservation success. *Conservation biology*. Volume 25. Numéro 6. Pages 1139-1142.
- HARDY P.-B., KINDER P.-M., SPARKS T.-H., DENNIS R.-L.-H. (2010). Elevation and habitats: the potential of sites at different altitudes to provide refuges for phytophagous insects during climatic fluctuations. *Journal of Insect Conservation*. Numéro 14. Pages 297-303.

- HELLER N.E. & ZAVALA E.S. (2009). Biodiversity management in the face of climate change: A review of 22 years of recommendations. *Biological Conservation*. Numéro 142. Pages 14-32.
- HILL J.-K., GRIFFITHS H.-M. & THOMAS C.-D. (2011). Climate change and evolutionary adaptations at species' range margins. *Annual review of entomology*. Numéro 56. Pages 143-159.
- HODGSON J.-A., THOMAS C.-D., WINTLE B.-A. & MOILANEN A. (2009). Climate change, connectivity and conservation decision making: back to basics. *Journal of Applied Ecology*. Numéro 46. Pages 964-969.
- HOEGH-GULDBERG O., HUGHES L., MCINTYRE S., LINDENMAYER D.-B., PARMESAN C., POSSINGHAM H.-P. & THOMAS C.-D. (2008). Assisted Colonization and Rapid Climate Change. *Science*. Volume 321. Pages 345-346.
- HOFFMANN D., OETTING I., ARNILLAS C.A. & ULLOA R. (2011). Climate change and protected areas in bolivia. *Economic, social and political elements of climate change*. Pages 355-372.
- HOLE D.G., WILLIS S.G., PAIN D.J., FISHPOOL L.D., BUTCHART S.H.M., COLLINGHAM Y.C., RAHBK C. & HUNTLEY B. (2009). Projected impacts of climate change on a continent-wide protected area network. *Ecology letters*. Numéro 12. Pages 420-431.
- HORTAL J. & LOBO J.-M. (2006). A synecological framework for systematic conservation planning. *Biodiversity Informatics*. Numéro 3. Pages 16-45.
- HUNTER M.-L. (2007). Climate Change and Moving Species: Furthering the Debate on Assisted Colonization. *Conservation biology*. Volume 21. Numéro 5. Pages 1356-1358.
- IMBACH P.-A., LOCATELLI B., MOLINA L.-G., CIAIS P. & LEADLEY P.-W. (2013). Climate change and plant dispersal along corridors in fragmented landscapes of Mesoamerica. *Ecology and Evolution*. Volume 3. Numéro 9. Pages 2917-2932.
- JANTZ P., GOETZ S. & LAPORTE N. (2014). Carbon stock corridors to mitigate climate change and promote biodiversity in the tropics. *Nature climate change*. Volume 4. Numéro 2. Pages 138-142.
- JELTSCH F., MOLONEY K.-A., SCHWAGER M., KÖRNERA K. & BLAUMA N. (2011) Consequences of correlations between habitat modifications and negative impact of climate change for regional species survival. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. Numéro 145. Pages 49-58.
- JOHNSTON A., AUSDEN M., DODD A.M. BRADBURY R.B., CHAMBERLAIN D.E., JIGUET F., THOMAS C.D., COOK A.S.C.P., NEWSON S.E., OCKENDON N., REHFISCH M.M., ROOS S., THAXTER C.B., BROWN A., CRICK H.Q.P., DOUSE A., MCCALL R.A., PONTIER H., STROUD D.A., CADIOU B., CROWE O., DECEUNINCK B., HORNMAN M. & PEARCE-HIGGINS J.W. (2013). Observed and predicted effects of climate change on species abundance in protected areas. *Nature climate change*. Volume 3. Numéro 12. Pages 1055-1061.
- JONES H.P., HOLE D.G. & Zavaleta E.S. (2012). Harnessing nature to help people adapt to climate change. *Nature*. Numéro 2. Pages 504-509.
- KHAROUBA H.M. & KERR J.T. (2010). Just passing through: global change and the conservation of biodiversity in protected areas. *Biological conservation*. Volume 143. Numéro 5. Pages 1094-1101.
- KLAUSMEYER K.R. & SHAW M.R. (2009). Climate change, habitat loss, protected areas and the climate adaptation potential of species in mediterranean ecosystems worldwide. *Plos one*. Volume 4. Numéro 7.
- KROSBY M., TEWKSBURY J., HADDAD N.M. & HOEKSTRA J. (2010). Ecological connectivity for a changing climate. *Conservation biology*. Volume 24. Numéro 6. Pages 1686-1689.



LAWSON C.R., BENNIE J.J., THOMAS C.D., HODGSON J.A. & WILSON R.J. (2014). Active management of protected areas enhances metapopulation expansion under climate change. *Conservation letters*. Volume 7. Numéro 2. Pages 111-118.

LEACH K., ZALAT S. & GILBERT F. (2013). Egypt's protected area network under future climate change. *Biological conservation*. Volume 159. Pages 490-500.

LEIMU R., VERGEER P., ANGELONI F. & OUBORG N.J. (2010). Habitat fragmentation, climate change, and inbreeding in plants. *Annals of the New York Academy of Sciences*. Volume 1195. Pages 84-98.

LEROY B., BELLARD C., DUBOS N., COLLIOT A., VASSEUR M., COURTIAL C., BAKKENES M., CANARD A. & YSNEL F. (2014). Forecasted climate and land use changes, and protected areas: the contrasting case of spiders. *Diversity and distributions*. Volume 20. Numéro 6. Pages 686-697.

MARGULES C.-R. & PRESSEY R.-L. (2000). Systematic conservation planning. *Nature*. Numéro 405. Pages 243-253.

MC LACHLAN J.-S., HELLMANN J.-J. & SCHWARTZ M.-W. (2007). A Framework for Debate of Assisted Migration in an Era of Climate Change. *Conservation biology*. Volume 21. Numéro 2. Pages 297-302.

OLSON D., O'CONNELL M., FANG Y.-C., BURGER J. & RAYBURN R. (2009). Managing for climate change within protected area landscapes. *Natural areas journal*. Volume 29. Numéro 4. Pages 394-399.

OPDAM P. & WASCHER D. (2004). Climate change meets habitat fragmentation: linking landscape and biogeographical scale levels in research and conservation. *Biological Conservation*. Numéro 117. Pages 285-297.

PARDINI R., DE ARRUDA BUENO A., GARDNER T.-A., PRADO P.-I., METZGER J.-P. (2010). Beyond the Fragmentation Threshold Hypothesis: Regime Shifts in Biodiversity Across Fragmented Landscapes. *PlosOne*. Volume 5. Numéro 10. 10 pages.

PYKE C.R., ANDELMAN S.J. & MIDGLEY G. (2005). Identifying priority areas for bioclimatic representation under climate change: a case study for Proteaceae in the Cape Floristic Region, South Africa. *Biological Conservation*. Numéro 125. Pages 1-9.

RICCIARDI A. & SIMBERLOFF D. (2009). Assisted colonization is not a viable conservation strategy. *Trends in Ecology and Evolution*. Volume 24. Numéro 5. Pages 248-253.

SEDDON P.-J. (2010). From Reintroduction to Assisted Colonization: Moving along the Conservation Translocation Spectrum. *Restoration Ecology*. Volume 18. Numéro 6. pages 796-802.

SOARES-FILHO B., MOUTINHO P., NEPSTAD D., ANDERSON A., RODRIGUES H., GARCIA R., DIETZSCH L., MERRY F., BOWMAN M., HISSA L., SILVESTRINI R. & MARETTI C. (2010). Role of brazilian amazon protected areas in climate change mitigation. *Proceedings of the national academy of sciences of the united states of america*. Volume 107. Numéro 24. Pages 10821-10826.

SOARES-FILHO B., SILVESTRINI R., NEPSTAD D., BRANDO P., RODRIGUES H., ALENCAR A., COE M., LOCKS C., LIMA L., HISSA L., STICKLER C. (2012). Forest fragmentation, climate change and understory fire regimes on the amazonian landscapes of the xingu headwaters. *Landscape ecology*. Volume 27. Numéro 4. Pages 585-598.

TABERLET P., FUMAGALLI L., WUST-SAUCY A.-G. & COSSON J.-F. (1998). Comparative phylogeography and postglacial colonization routes in Europe. *Molecular ecology*. Numéro 7. Pages 453-464.

TAYLOR M.-F.-J., SATTLER P.-S., EVANS M., FULLER R.-A., WATSON J.-E.-M., POSSINGHAM H.P. (2011). What works for threatened species recovery? An empirical evaluation for Australia. *Biodiversity Conservation*. Numéro 20. Pages 767-777.

THOMAS C.D. (2011). Translocation of species, climate change, and the end of trying to recreate past ecological communities. *Trends in Ecology and Evolution*. Volume 26. Numéro 5. Pages 216-221.

VERBOOM J. SCHIPPERS P., CORMONT A., STERK M., VOS C.-C. & OPDAM P.-F.-M. (2010). Population dynamics under increasing environmental variability: implications of climate change for ecological network design criteria. *Landscape ecology*. Numéro 25. Pages 1289-1298.

VIEILLEDENT G., CORNU C., SANCHEZ A.C., POCK-TSY J.-M. LEONG & DANTHU P. (2013). Vulnerability of baobab species to climate change and effectiveness of the protected area network in madagascar: towards new conservation priorities. *Biological conservation*. Volume 166. Pages 11-22.

VIRKKALA R., HEIKKINEN R.K., FRONZEK S., KUJALA H. & LEIKOLA N. (2013). Does the protected area network preserve bird species of conservation concern in a rapidly changing climate?. *Biodiversity and conservation*. Volume 22. Numéro 2. Pages 459-482.

WALTERS R.J., HASSALL M., TELFER M.G., HEWITT G.M. & PALUTIKOF J.P. (2006). Modelling dispersal of a temperate insect in a changing climate. *Proceedings of the royal society b-biological sciences*. Volume 273. Numéro 1597. Pages 2017-2023.

WATSON JEM, IWAMURA T. & BUTT N. (2007). Mapping vulnerability and conservation adaptation strategies under climate change. *Nature climate change*. 6 pages.

WIENS J.A., SEAVY N.E. & JONGSOMJIT D. (2011). Protected areas in climate space: What will the future bring?. *Biological conservation*. Pages 2119-2125.

## **Thèses**

BELLARD C. (2013). *Effets des changements climatiques sur la biodiversité*. Thèse pour le grade de Docteur en écologie et biologie de la conservation. Laboratoire d'Écologie, Systématique et Évolution. Université Paris Sud. 338 pages.

BUISSON L. (2009). Poissons des rivières françaises et changement climatique : impacts sur la distribution des espèces et incertitudes des projections. Thèse en vue de l'obtention du Doctorat de l'Université de Toulouse. 140 pages + publications.

LASSALLE G. (2008). Impacts des changements globaux sur la distribution des poissons migrateurs amphihalins. Une approche par modélisation à l'échelle continentale. Thèse pour l'obtention du grade de Docteur en Écologie Aquatique présentée à L'Université de Bordeaux I. 244 pages.

## **Littérature grise**

BOURDIL C. & VANPEENE-BRUHIER S. (2014). Services écosystémiques & Continuités écologiques. Quelle plus-value du maintien de la connectivité pour la fourniture des services écosystémiques ?. Note d'analyse bibliographique. Irstea. 53 pages + annexes.

SORDELLO R. (2012c). Synthèse bibliographique sur les traits de vie du Cincle plongeur (*Cinclus cinclus* (Linnaeus, 1758)) relatifs à ses déplacements et à ses besoins de continuités écologiques. Service du patrimoine naturel du Muséum national d'Histoire naturelle. Paris. 14 pages.

SORDELLO R. (2012e). Synthèse bibliographique sur les traits de vie du Léopard vivipare (*Zootoca vivipara* (Jacquin, 1787)) relatifs à ses déplacements et à ses besoins de continuités écologiques. Service du patrimoine naturel du Muséum national d'Histoire naturelle. Paris. 10 pages.

SORDELLO R., ROGEON G. & TOUROULT T. (2014). *La fonctionnalité des continuités écologiques. Premiers éléments d'illustration et de compréhension*. Service du patrimoine naturel, Muséum national d'histoire naturelle, Paris. 32 pages.

### **Rapports techniques ou d'expertise**

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (2014). *Spatial analysis of green infrastructure in Europe*. 53 pages. ISSN 1725-2237.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (2012a). *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012*. An indicator-based report. 300 pages.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (2012b). *Protected areas in Europe — an overview*. 136 pages.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (2007). *Climate change: the cost of inaction and the cost of adaptation*. EEA Technical report No 13/2007. 67 pages.

GREEN INFRASTRUCTURE WORKING GROUP (2013). *Conclusions du groupe de travail européen sur Green Infrastructure - Task 1 à 4*. [24, 23, 15, 17] pages.

HOPKINS J.-J., ALLISON H.-M., WALMSLEY C.-A., GAYWOOD M. & THURGATE G. (2007). *Conserving biodiversity in a changing climate: guidance on building capacity to adapt*. DEFRA, London. 25 pages.

IEEP & MILIEU (2013). *The guide to multi-benefit cohesion policy investments in nature and green infrastructure*. By Peter Hjerp, Patrick ten Brink, Ketj Medarova-Bergstrom, Leonardo Mazza, and Marianne Kettunen of IEEP, together with Jennifer McGuinn, Paola Banfi and Guillermo Hernández of Milieu. A Report for the European Commission. Brussels. 125 pages.

INRA (2008). *Agriculture et biodiversité - Valoriser les synergies*. Expertise scientifique collective réalisée à la demande du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche et du Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire. 84 pages.

KETTUNEN M. (IEEP), TERRY A. (IUCN), TICKER G. (Ecological Solutions) & JONES A. (IEEP) (2007). *Guidance on the maintenance of landscape connectivity features of major importance for wild flora and fauna*. Guidance on the implementation of Article 3 of the Birds Directive (79/409/EEC) and Article 10 of the Habitats Directive (92/43/EEC). Institute for European Environmental Policy (IEEP), Brussels, 114 pp. & Annexes.

MARTNIEZ C. (coord.) (2007). *Analyse du dispositif français des aires protégées au regard du Programme de travail « Aires protégées » de la Convention sur la diversité biologique - État des lieux et propositions d'actions*. Comité français de l'UICN, Paris, France. 53 pages + annexes.

OBSERVATOIRE NATIONAL SUR LES EFFETS DU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE EN FRANCE (2007). *Stratégie nationale d'adaptation au changement climatique de novembre 2006*. 95 pages.

ROOIJ S. VAN, H. BAVECO, R. BUGTER, M. VAN EUPEN, P. OPDAM & E. STEINGRÖVER (2007). *Adaptation of the landscape for biodiversity to climate change. Terrestrial case studies: Limburg (NL), Kent and Hampshire (UK)*. Alterra report 1543. Alterra, Wageningen-UR, Wageningen, The Netherlands. Report in the framework of the BRANCH project. 27 pages.

SCIENCE FOR ENVIRONMENT POLICY (2012). *The Multifunctionality of Green Infrastructure*. In-depth Reports. 37 pages.

SORDELLO R., COMOLET-TIRMAN J., DA COSTA H., DE MASSARY J.-C., GRECH G., DUPONT P., ESCUDER O., HAFFNER P., ROGEON G., SIBLET J.-P., TOUROULT J. (2011a). *Trame verte et bleue – Critères nationaux de cohérence –*

*Contribution à la définition du critère pour une cohérence interrégionale et transfrontalière.* Service du patrimoine naturel, Muséum national d'histoire naturelle, Paris. 54 pages.

## **Documents cadre ou législatifs**

ANONYME (2009). *Towards a Strategy on Climate Change, Ecosystem Services and Biodiversity.* A discussion paper prepared by the EU Ad Hoc Expert Working Group on Biodiversity and Climate Change. 48 pages.

ANONYME (date inconnue). Draft Horizon 2020 Work Programme 2014-2015 in the area of Climate action, environment, resource efficiency and raw materials. 75 pages.

BONDUELLE A. & JOUZELLE J. (2014). *L'adaptation de la France au changement climatique mondial.* Avis du Conseil économique, social et environnemental. 78 pages.

BRASSARD F., BOUCHARD A.-R., BOISJOLY D., POISSON F., BAZOGE A., BOUCHARD M.-A., LAVOIE G., TARDIF B., BERGERON M., PERRON J., BALEJ R. & BLAIS D. (2010). *Portrait du réseau des aires protégées au Québec – Période 2002-2009.* Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs. Disponible en ligne sur : [http://www.mddep.gouv.qc.ca/biodiversite/aires\\_protegees/portrait02-09/](http://www.mddep.gouv.qc.ca/biodiversite/aires_protegees/portrait02-09/)

COMITE ECONOMIQUE ET SOCIAL EUROPEEN (2013). Avis du CESE sur la communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des régions « Infrastructure verte – Renforcer le capital naturel de l'Europe ». Le 16.10.2013, Bruxelles. Rapporteur : M. Adalbert KIENLE. 15 pages.

COMITÉ DES RÉGIONS DE L'UNION EUROPÉENNE (2013). *Avis ENVE-V-039 sur "Infrastructure verte – Renforcer le capital naturel de l'Europe"*. 103e session plénière des 7, 8 et 9 octobre 2013. 13 pages.

COMMISSION EUROPEENNE (2007). *Adaptation au changement climatique en Europe: les possibilités d'action de l'Union européenne.* Livre vert présenté par la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des régions. COM(2007) 354 du 29.6.2007, Bruxelles. 32 pages.

COMMISSION EUROPEENNE (2009). *Adaptation au changement climatique: vers un cadre d'action européen.* Livre blanc. COM(2009) 147 du 1.4.2009, Bruxelles. 17 pages.

COMMISSION EUROPEENNE (2011). *La biodiversité, notre assurance-vie et notre capital naturel - stratégie de l'UE à l'horizon 2020.* Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des régions. COM(2011) 244 du 3.5.2011, Bruxelles. 17 pages.

COMMISSION EUROPEENNE (2013). *Infrastructure verte – Renforcer le capital naturel de l'Europe.* Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des régions. COM(2013) 249 du 6.5.2013, Bruxelles. 13 pages.

COMMISSION EUROPEENNE (2013). *Stratégie de l'UE relative à l'adaptation au changement climatique.* Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des régions. COM(2013) 216 du 16.4.2013, Bruxelles. 13 pages.

MAIRIE DE PARIS (2007). Plan climat de Paris. Plan de lutte contre le réchauffement climatique. 75 pages.

MAIRIE DE PARIS (2011). Plan biodiversité de Paris. Programme d'actions pour préserver et enrichir la biodiversité à Paris. 32 pages.

MAIRIE DE PARIS (2012). Bilan du plan climat de Paris 2007-2012. 32 pages.

MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DES TRANSPORTS ET DU LOGEMENT (2008). *Plan national d'adaptation de la France aux effets du changement climatique 2011 - 2015*. 188 pages.

OBSERVATOIRE NATIONAL SUR LES EFFETS DU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE (2009). *Changement climatique - Coûts des impacts et pistes d'adaptation*. 195 pages.

USHER M.B. (2005). *Conserver la diversité biologique européenne dans le contexte du changement climatique*. Convention relative à la conservation de la vie sauvage et du milieu naturel de l'Europe. 33 pages.

### **Actes de colloques**

BASILICO L., MASSU N. & SEON-MASSIN N. (2010). *Changement climatique impacts sur les milieux aquatiques et conséquences pour la gestion*. Synthèse du séminaire des 29 et 30 juin 2009, Paris. 48 pages.

BASILICO L., MASSU N. & SEON-MASSIN N. (2009). *Changement climatique impacts sur les milieux aquatiques et conséquences pour la gestion*. Synthèse du séminaire des 29 et 30 juin 2009, Paris. 8 pages.

OBSERVATOIRE NATIONAL SUR LES EFFETS DU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE EN FRANCE (2003). Conséquences du réchauffement climatique sur les risques liés aux événements météorologiques extrêmes : sur la base des dernières connaissances scientifiques, quelle action locale ? Actes du colloque de juin 2003 organisé par l'ONERC, Chapitre I « État des connaissances scientifiques actuelles », Paris. 70 pages.

OBSERVATOIRE NATIONAL SUR LES EFFETS DU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE EN FRANCE (2005). *Collectivités locales et changements climatiques : quelles stratégies d'adaptation ?*. Actes du colloque du 30 septembre 2004 organisé par l'ONERC, Paris. 64 pages.

VANPEENE S. (2012). Compte rendu du séminaire "Biodiversité et adaptation au changement climatique". 3 octobre 2012, Paris.

### **Supports de vulgarisation/communication**

ARAUJO M.B. (2009). *Protected areas and climate change in Europe*. Convention on the conservation of European wildlife and natura habitats – Standing Committee – Bern. 17 diapos

COMMISSION EUROPEENNE (2009). Le rôle de la nature dans le changement climatique. 4 pages.

MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DES TRANSPORTS ET DU LOGEMENT (2011). *Tout savoir sur le PNACC*. 15 pages.

PARCS NATIONAUX DE FRANCE (2009). Les parcs nationaux français et le changement climatique. 11 pages.

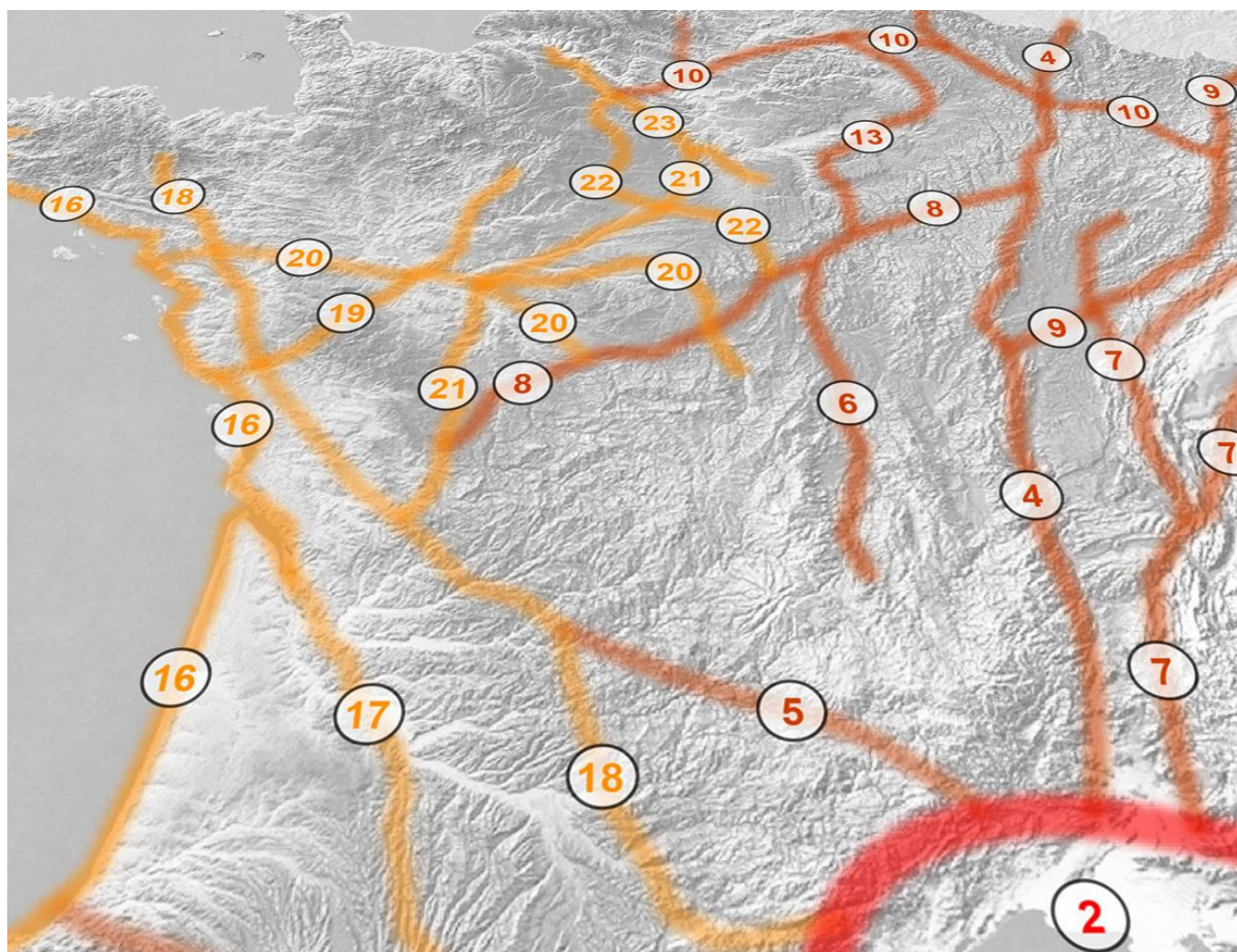
### **Autres références**

CCNUCC : [http://unfccc.int/portal\\_francophone/essential\\_background/convention/items/3270.php](http://unfccc.int/portal_francophone/essential_background/convention/items/3270.php)

HORIZON 2020. *Portail français du programme européen*. Disponible sur : <http://www.horizon2020.gouv.fr/>

## - PARTIE 4 -

# INTEGRER LE CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS UNE DEMARCHE DE RESEAU ECOLOGIQUE



## RESUME DE LA PARTIE 4

**A** lors que les réseaux écologiques sont abondamment préconisés par les scientifiques et les décideurs pour répondre au changement climatique dans le domaine de l'écologie, le nombre d'exemples concrets proposant des méthodologies précises est faible.

Globalement, il ressort des expériences consultées que la définition de corridors prenant en compte le changement climatique nécessite de réviser assez profondément ce qui sous-tendait jusqu'à présent leur identification, en y injectant une dimension temporelle. Les corridors les plus efficaces pour le changement climatique sont à rechercher perpendiculairement aux enveloppes climatiques. Deux types de corridors peuvent alors cohabiter : des corridors « pour le présent », basés sur la liaison de milieux cohérents actuellement, et des corridors « pour le futur », basés sur le déplacement modélisé climats analogues. L'identification des voies de colonisation empruntées par la biodiversité lors des fluctuations passées du climat est une autre approche. C'est celle qui a été choisie pour les cartes nationales du critère de cohérence TVB en France, tout en veillant à une satisfaction de l'occupation du sol contemporaine.

Malgré leur efficacité, les réseaux d'aires protégées doivent être complétés pour conserver une représentativité optimale de la biodiversité dans la perspective du changement climatique. Pour ce faire, les démarches recensées se basent généralement sur une modélisation corrélative des déplacements des distributions afin d'évaluer d'abord la pertinence du réseau existant et d'identifier ensuite les zones prioritaires pour le compléter. Il paraît important dans ces travaux de tenir compte des multiples dimensions de la biodiversité (génétique et écosystémique) et des taxons sous-étudiés actuellement.

Pour les aires protégées comme pour les corridors, des logiciels d'agrégation et de traitement de données, qu'il s'agisse de données naturalistes ou climatiques, sont mobilisés.

Nous avons vu précédemment que les corridors et les aires protégées, formant les réseaux écologiques, étaient fortement préconisés, par les scientifiques comme par les institutions, dans la lutte contre le changement climatique, pour couvrir à la fois les besoins d'adaptation et d'atténuation.

Nous allons désormais aborder le sujet de l'identification de ces éléments, corridors et réserves, de façon à ce qu'ils répondent au mieux à cet objectif de prendre en compte le changement climatique.

Il faut néanmoins rappeler que :

- l'identification d'un réseau n'est pas une fin en soi : après cette première étape, sa préservation, sa gestion, le suivi de son efficacité, la mise en place de mesures de restauration des éléments identifiés comme dégradés sont déterminants,

- la protection de la biodiversité vis-à-vis des autres types de menaces (pollutions, invasions biologiques, perte d'habitat, ...) permettra de manière générale aux espèces de mieux répondre aux effets du changement climatique. Il reste donc important de ne pas considérer le changement climatique de manière isolé ni d'axer désormais l'identification des réseaux écologiques uniquement en réponse à cette menace-là. Des zones qui sont déjà menacées par d'autres pressions sont moins susceptibles de s'adapter au changement climatique, par rapport à des zones où la biodiversité a été préservée.

## **I. IDENTIFIER UN RESEAU ADAPTE A LA PROBLEMATIQUE**

D'emblée, il est étonnant de devoir constater que, si le sujet de la connectivité est très fréquemment mis en avant dans la littérature scientifique comme par les décideurs, c'est également pour cette thématique que les recommandations sont les plus générales et que l'on retrouve le moins d'exemples mettant à l'épreuve des méthodologies concrètes.

Dans toutes les recommandations listées par Heller & Zavaleta (2009), à peu près 70 % restent d'un ordre général et manquent de précisions pour être transposées en action. La plupart de publications présentées comme concrètes ont en réalité des recommandations vagues difficilement transposables pour des décideurs ou des gestionnaires. Et ce constat est vérifié particulièrement pour les recommandations liées aux réseaux écologiques.

Dans le corpus bibliographique constitué pour ce rapport, cette conclusion se vérifie aussi, lorsque l'on compare les thèmes :

- « Stratégie & Planification », rassemblant des recommandations générales sur les réseaux écologiques, qui s'avère être le plus riche de tous les thèmes (51 articles),

- « Identification de réseaux », faisant état des méthodologies précises sur les corridors et les aires protégées, qui n'est constitué que d'une quinzaine d'articles.

Nous ferons part ici des recommandations générales les plus intéressantes puis présenterons quelques exemples concrets trouvés pour identifier des corridors et des aires protégées en intégrant le changement climatique.



## I.1. Recommandations générales

La plupart des auteurs proposent des stratégies semblables consistant, comme celle de Vos *et al.* (2009) ou de Kostyack *et al.* (2011) à travailler sur les aires protégées, sur les connexions entre ces aires et sur la matrice :

1 - Maintenir les aires protégées existantes, voire les agrandir, et dans le même temps compléter les réseaux par des aires nouvelles dont l'identification tiendra compte du changement climatique. Ce travail sur les noyaux a pour but de préserver des populations sources capables de disperser, de constituer des zones refuges en augmentant la capacité d'accueil/hétérogénéité interne de ces noyaux, de diminuer la sensibilité aux variations stochastiques (qui décroît plus les noyaux sont grands),

2 - Relier ces aires protégées entre elles de façon à constituer un réseau dense, à large échelle (Europe par exemple). Des noyaux intermédiaires hors aires protégées doivent aussi être intégrés au réseau, afin de retrouver des distances acceptables pour toutes les espèces. Pour Hannah (2011), il est important d'inclure aussi les populations relictuelles en dehors des aires protégées car leur position peut devenir déterminante sous l'influence du changement climatique.

Certains corridors doivent aussi être restaurés, par exemple par des reimplantations pour des corridors boisés. Les publications insistent sur le fait que l'efficacité de ces corridors doit être vérifiée par des approches empiriques, ce qui nécessite des données de terrain,

3 - Maintenir/restaurer des zones tampons multifonctionnelles autour des « tâches » (aires protégées et noyaux au sens large) pour faciliter les déplacements. Il s'agit d'augmenter la connectivité des paysages d'une manière générale car la surface des réserves et des corridors est dans tous les cas minime par rapport au « reste ». Un travail sur la matrice est donc indispensable pour la rendre la plus perméable possible notamment en ce qui concerne les milieux urbains et agricoles. Par exemple, des boisements « plantés » au sein de la matrice agricole peuvent jouer le rôle de relais pour les espèces forestières (Brockhoff *et al.*, 2008).

> Les lignes directrices proposées par Hopkins *et al.* (2007) (cf. Figure 32) sont également intéressantes pour favoriser l'adaptation de la biodiversité dans un contexte de changement climatique mettant en avant le besoin d'un dispositif de préservation robuste dans le cadre d'un changement prévisible mais d'ampleur incertaine et de probables réactions divergentes des espèces selon leurs exigences écologiques.

1) Conserver la biodiversité aujourd'hui et là où elle est, car la diversité future sera issue de la diversité d'aujourd'hui

1a) Conserver les aires protégées actuelles, car leurs caractéristiques continueront d'en faire des zones favorables à la biodiversité (exemple : zone à sol très pauvre)

1b) Conserver des sites exprimant la variabilité écologique et géographique au sein des aires de répartition actuelles d'espèces et d'habitats (limite le risque d'extinction simultanée dans toutes les localités)

2) Limiter les atteintes à la biodiversité autres que le changement climatique

3) Développer des paysages variés et écologiquement résilients

3a) Conserver et renforcer les variations locales au sein des sites protégés (permettre les mouvements et l'adaptation locale quand certains milieux deviennent inhospitaliers)

- 3b) Donner de la place à l'évolution des cours d'eau et des rivages (processus naturel d'érosion et de sédimentation dont la libre expression favorisera l'adaptation naturelle de la faune sauvage).
- 4) Etablir des connections entre milieux favorables, en favorisant les bonnes pratiques et la restauration dans ces zones de connexion (afin que les espèces puissent se déplacer).
- 5) Adapter les priorités en fonction d'analyses fiables (développer les observatoires permettant de connaître de façon factuelle les évolutions de la biodiversité, en gardant à l'esprit que la biodiversité évolue en permanence)
- 5a) Analyser les causes du changement pour identifier les situations où des actions sont nécessaires
- 5b) Revoir régulièrement les priorités de conservation, afin d'adapter les objectifs aux besoins constatés des habitats et des espèces
- 6) Intégrer dans les plans de gestion des mesures pour réduire l'impact et favoriser l'adaptation au changement climatique. Il convient ainsi de prendre en compte les évolutions prévisibles à moyen terme (fréquence des feux, saison de végétation et pâturage, régimes hydriques, etc.).

**Figure 32 : Lignes directrices pour favoriser l'adaptation de la biodiversité dans un contexte de changement climatique.**

Source : D'après Hopkins *et al.*, 2007

> Les travaux anglo-saxons en Afrique du Sud notamment (Cowling *et al.*, 2003 ; Cowling *et al.*, 1999 ; Rouget *et al.*, 2006) proposent plusieurs fonctionnalités écologiques qui devront se trouver représentées dans les réseaux écologiques afin d'assurer la persistance et la capacité d'évolution à long terme de la biodiversité (cf. Figure 33).

Composante spatiale	Processus écologique(s) concerné(s)
Gradient entre haute et basse altitude Corridor	Migrations saisonnières, spéciation des plantes... Mouvement des espèces et résilience dans le cadre du changement climatique modifiant les habitats (assemblages, répartition, étages de végétation).
Corridor naturel le long des cours d'eau pérennes	Mouvements de faune entre l'intérieur des terres et le littoral.
Littoral : interface terre / mer	Implantation de nouvelles espèces arrivées par voie marine (bois flottants, etc.) Mouvement de faune entre terre et mer (crabes, tortues, oiseaux marins et limicoles, etc.)
Interfaces entre grands types d'habitats naturels (milieux) Exemple : lisière forêt/savane, forêt/fourrés d'altitude... [Grain : niveau 2 ou 3 de la typologie, échelle : 10 ha]	Mécanismes de spéciation. Mouvement des espèces et résilience dans le cadre du changement climatique modifiant le milieu.
Habitats naturellement isolés de l'ensemble de l'aire de répartition de l'habitat.	Mécanisme de spéciation allopatrique Exemple Inselberg de Guyane, forêts des îles satellites de la Guadeloupe (forêts semi-décidues de Marie-Galante)

Continuités entre deux zones d'un même habitat	Maintien des métapopulations, mécanismes d'extinction locale, recolonisation. Modification d'aires en cas de changement global.
Continuité entre zones biogéographiques	Modification des répartitions d'ensemble d'espèces.

Figure 33 : Fonctionnalités écologiques devant se trouver représentées dans les réseaux écologiques afin d'assurer la persistance et la capacité d'évolution à long terme de la biodiversité.

*Certains exemples sont adaptés à l'Outre-mer français.*

Source : D'après Cowling *et al.*, 2003 ; Cowling *et al.*, 1999 ; Rouget *et al.*, 2006

> En s'appuyant sur leur expérience de corridor identifié dans le Limbourg, les auteurs du projet européen BRANCH formulent plusieurs recommandations pour la prise en compte du changement climatique dans l'identification d'un réseau écologique (Rooij *et al.*, 2007) (cf. Figure 34). Pour eux, les aménageurs du territoire doivent faire des choix stratégiques pour aborder le changement climatique et ces choix doivent tenir compte des réponses des différentes espèces. Les auteurs mettent donc l'accent sur la coopération entre territoires en concluant que les stratégies régionales les plus efficaces sont celles qui intégreront les stratégies des régions voisines. Enfin, le rapport BRANCH souligne la nécessité d'évaluer l'efficacité de ces stratégies d'adaptation.

Recommandations
<p><b>Stratégies d'adaptation</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dans des sites stratégiques, améliorer au bénéfice de la faune et de la flore les réseaux d'habitats existants et bien reliés entre eux, et en créer de nouveaux</li> <li>• Effectuer un suivi de l'efficacité des réseaux écologiques existants en aidant les habitats et les espèces à s'adapter au changement climatique. Affiner les réseaux existants</li> <li>• Lier les stratégies d'adaptation pour la biodiversité à celles d'autres occupations des sols affectés par le changement climatique, notamment la prévention des crues</li> <li>• Adapter les techniques de gestion de sites pour améliorer la qualité des habitats. Cela peut contribuer à la survie des espèces dans un climat moins favorable</li> </ul>
<p><b>Politique</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Identifier et accepter le déclin potentiel d'espèces traditionnelles dans certaines zones et l'arrivée de nouvelles. Veiller à la connexion entre les habitats au bénéfice des espèces, tant celles en déclin que celles en expansion</li> <li>• Identifier les zones où des espèces peuvent s'implanter, et créer des « zones d'adaptation » pour faciliter leurs migrations</li> <li>• Veiller à ce que les décisions afférentes aux mesures d'adaptation soient prises au niveau transnational et interrégional</li> <li>• Veiller à ce que la politique dans ce domaine soit flexible, globale et à long terme. Évaluer l'efficacité des stratégies d'adaptation et les affiner si nécessaire</li> </ul>

Figure 34 : Recommandations du projet BRANCH pour la prise en compte du changement climatique dans le domaine des réseaux écologiques.

Source : D'après Rooij *et al.*, 2007

## **I.2. Méthodologies « précises » d'identification de corridors ou de continuités**

Globalement, les notions de représentativité/complémentarité/irremplaçabilité sont mises en avant et pour ce faire on distingue principalement deux approches pratiques (Touroult *in* Vanpeene 2012) :

- l'une s'inspirant des voies empruntées par la faune et la flore lors des régressions/transgressions climatiques du passé que l'on peut identifier par leur répartition actuelle témoignant des recolonisations post-glaciaires,

- l'autre se basant sur les projections des enveloppes climatiques dans le futur.

### **I.2.1. S'inspirer des voies de colonisation passées**

Une première méthodologie consiste à s'inspirer des voies de migrations passées pour identifier des corridors à préserver, en partant du principe que la réponse des communautés d'espèces face au changement climatique contemporain sera spatialement fidèle à ce qui a été observé dans le passé (Parisod, 2008).

C'est cette méthode qui a en grande partie été privilégiée pour le projet TVB français (voir partie 4) compte tenu des incertitudes sur l'évolution du climat qui avaient mises en avant par le groupe d'expert associé au travail (Sordello *et al.*, 2011a).

La réutilisation des voies passées pour les migrations futures reste cependant une hypothèse du fait des changements d'occupation du sol qu'elles ont subis depuis, principalement sous l'effet de l'anthropisation. Pour cette raison, dans le projet TVB français, nous avons croisé ce critère « voies passées » avec l'occupation du sol actuelle afin d'identifier des enveloppes écologiquement cohérentes et physiquement réelles.

Dans certains cas, les voies potentielles de colonisations sont de toute façon peu nombreuses. Par exemple, de nombreuses espèces réfugiées dans la péninsule ibérique ont recolonisé la France par l'Est et l'Ouest pyrénéen. Ces deux extrémités de la chaîne pyrénéenne sont les deux seuls passages de basse altitude pouvant avoir un caractère thermophile et donc permettre le transit d'espèces thermophiles. Ces deux passages constituent un exemple type de « corridors » à préserver afin de maintenir une voie de communication ibéro-française entre les populations d'espèces thermophiles et pour prévenir d'éventuels déplacements d'aires de répartition sous l'effet du changement climatique.

### **I.2.2. Se baser sur les déplacements prévus des enveloppes climatiques**

Ces méthodes se basent sur des prédictions de l'évolution du climat, avec toutes les incertitudes qu'elles comportent, relevées notamment en partie 2 de ce rapport. Malgré ces marges d'erreurs, il semblerait que ce soit ce type de démarches, plutôt que celles mobilisant les déplacements passés, qui se développent le plus de nos jours.

> Intégrer la notion de temps aux corridors

Les publications semblent mettre en avant la nécessité d'intégrer le caractère temporel à l'identification des corridors, en plus du caractère spatial sur lequel leur identification actuelle repose souvent seulement. Rose & Burton (2009) proposent ainsi un nouveau concept de « *corridors temporels* » comparativement au concept de corridor communément évoqué qu'ils qualifient de « *corridors géographiques* ». Les corridors temporels sont destinés à assurer une continuité des enveloppes climatiques dans le temps en tenant compte de l'évolution du climat. Les auteurs ont de cette façon mis en évidence un réseau de corridors à préserver en Colombie Britannique (Canada) par croisement des enveloppes climatiques actuelles et futures afin de détecter les objets écologiques qui persisteront malgré le changement climatique.

> Des corridors perpendiculaires aux enveloppes climatiques

Pour ce faire, l'idée générale, préconisée par exemple par Nunez *et al.* (2013), consiste à identifier les corridors le long du principal gradient climatique influençant la biodiversité, par exemple le gradient de température (cf. Figure 35). Cette méthode peut surprendre au premier abord car elle revient à relier des enveloppes climatiques qui sont actuellement différentes. Néanmoins, en faisant crédit aux prédictions de déplacements de ces enveloppes de températures, les corridors vont ainsi, dans le temps, remplir leur fonction de support pour l'ajustement spatial des espèces.

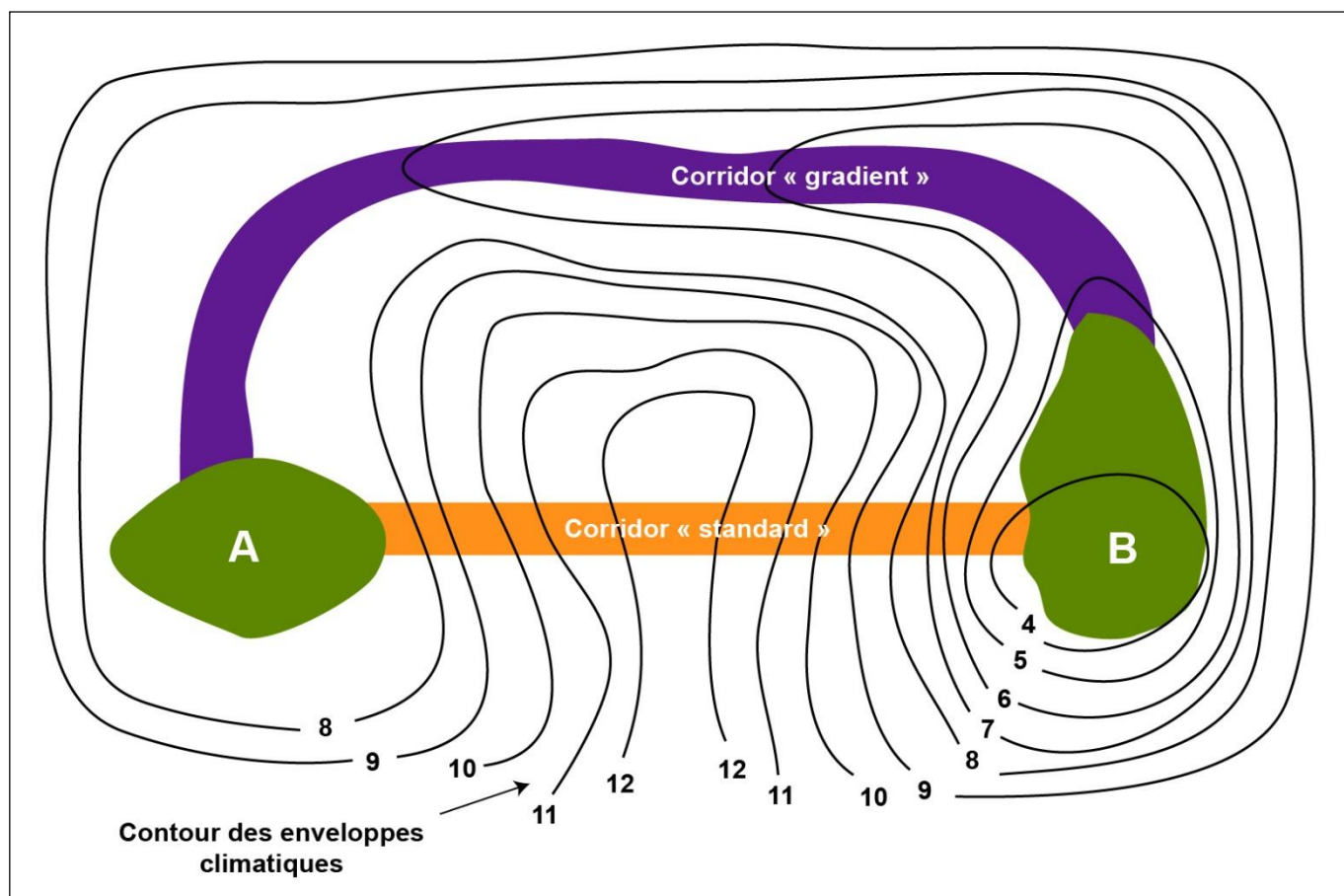


Figure 35 : Concept de corridor tracé en fonction des gradients climatiques.

Les connexions entre les deux réservoirs A et B sont tracés selon deux méthodes : via un modèle standard de distance de moindre coût et via une démarche en fonction du gradient climatique. Les réservoirs A et B sont séparés par un gradient de température croissant numéroté de 4 à 12. La méthode de corridor standard, tout paramètre constant par ailleurs, recherche le corridor le plus court entre les deux réservoirs alors que la méthode de gradient climatique recherche le changement le plus unidirectionnel dans le gradient climatique.

Source : D'après Nunez *et al.*, 2013

Olson *et al.* (2009) ont eux aussi travaillé à l'identification de corridors en Californie en faisant en sorte que ces corridors permettent de relier des zones de gradients à la fois pluviométrique, altitudinal, d'humidité et de diverses conditions météorologiques.

Pour appliquer ce concept, Nunez *et al.* (2013) ont utilisé un modèle « classique » de distance de moindre coût, en l'adaptant afin de conjuguer les impératifs d'occupation du sol et de température. Le corridor retenu n'est pas nécessairement le plus court mais il correspond au gradient de température le plus unidirectionnel.

On peut aussi citer les travaux menés en Amérique du nord (au Québec dans le cadre du projet Ouranos mais aussi au Nevada) afin de proposer un réseau adapté au changement climatique en comparant l'évolution des enveloppes climatiques avec l'évolution des répartitions de plusieurs types d'espèces et de végétations, de manière à identifier des zones refuges (Comer *et al.*, 2012)

Deux points semblent importants à aborder dans ce type de démarche :

- il est nécessaire de conjuguer les exigences vis-à-vis du climat, avec les exigences des autres pressions anthropiques, notamment l'occupation du sol. Lorsque plusieurs corridors sont possibles (processus flexibles), le corridor retenu doit être celui qui **satisfait les différents critères**. Beale *et al.* (2008) remettent quant à eux en cause l'efficacité d'avoir recours aux enveloppes climatiques pour prédire la répartition des espèces car bien d'autres facteurs de nos jours influent sur les distributions. Leurs travaux montrent que l'association enveloppe climatique/répartition d'espèce n'est pas plus efficace que le hasard, pour 68 % des oiseaux européens considérés dans l'étude. Dans tous les cas il semble important de ne pas avoir d'approche trop restrictive qui serait basée uniquement sur le paramètre climatique,

- de manière à ne pas tenir compte uniquement des choses telles qu'elles évolueront mais aussi des choses telles qu'elles sont actuellement, on peut identifier **deux types de corridors** (cf. Figure 36) : pour la persistance dans le présent et pour l'adaptation de la biodiversité. Cela reprend les deux notions de corridors « temporels » et « géographiques » avancées par Rose & Burton (2009).

Cette déconnexion entre milieux importants « ici et pour le présent » et milieux à préserver « ailleurs pour le futur » peut sans doute faire naître des liens avec les démarches de compensation dans lesquelles les mesures compensatoires d'un projet peuvent être elles-aussi spatialement déconnectées des impacts causés par ce projet (Bourdil & Vanpeene-Bruhier, 2013).

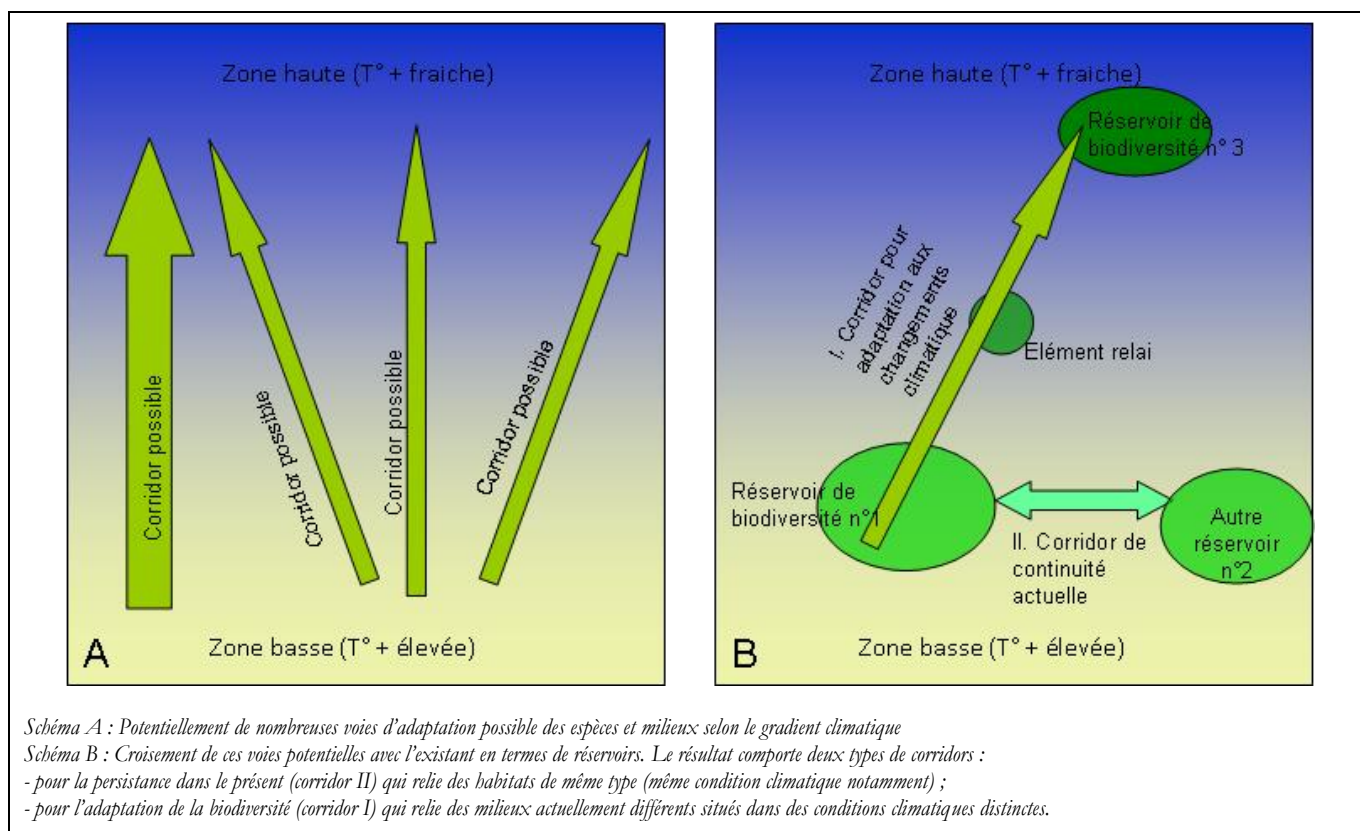


Figure 36 : Identification de corridors pour l'adaptation au changement global.

## > Partir du réseau d'aires protégées

Hole *et al.* (2011) ont travaillé en Afrique à l'identification de corridors en proposant une autre méthode, construite à partir du réseau d'aires protégées existants. Les auteurs ont d'abord élaboré une typologie d'aires protégées selon la proportion d'espèces « émigrantes » (c'est-à-dire les espèces pour lesquelles le site devient climatiquement défavorable dans le futur), colonisatrices (c'est-à-dire les espèces pour lesquelles le site devient climatiquement favorable dans le futur) et persistantes (c'est-à-dire les espèces capables de rester sur le site dans le futur). Les auteurs ont ensuite regardé les zones où l'amélioration de la connectivité permettrait de faciliter la migration des espèces d'une aire à une autre selon leur catégorie dans cette typologie.

## > Le développement des logiciels d'agrégation de données

De nombreuses études se développent en faisant appel à de nouveaux logiciels pour l'identification de réseaux en lien avec les zones biogéographiques et les zones climatiques. Certains logiciels offrent en effet aujourd'hui la possibilité de sélectionner des réseaux de maille optimaux selon des critères prédéfinis, comme le programme Marxan (Klein *et al.*, 2009) ou Zonation. Ces logiciels permettent ainsi, en fonction de la composition de chaque maille et de l'objectif recherché, de retenir les combinaisons les plus cohérentes en terme de représentation des espèces mais aussi en intégrant des contraintes de connectivité.

Le SPN a réalisé un travail en 2012 pour définir des ensembles biogéographiques à l'échelle française sur la base d'une classification ascendante hiérarchique (CAH) (Witté & Touroult, 2014 ; Witté *et al.*, 2013) (cf. Figure 37).

Les zones de transitions entre deux et surtout 3 zones biogéographiques sont des secteurs a priori clé pour l'adaptation des répartitions (Spector, 2002). Cependant ces zones sont souvent des marges de distributions des espèces, donc des zones où les espèces sont possiblement moins dynamiques et viables que dans leur cœur d'aire de répartition (Araujo, 2002). Ce paradoxe, rejoint la différence entre les corridors pour le présent et les corridors pour les ajustements futurs.

D'autres publications utilisent des approches similaires pour définir des ensembles climatiques (Metzger *et al.*, 2005 pour l'Europe ou Joly *et al.*, 2010 pour la France).

Klein *et al.* (2009) ont utilisé Marxan pour fixer des priorités spatiales de conservation dans la perspective du changement climatique tout en intégrant des facteurs économiques. Le logiciel a d'abord été utilisé pour choisir des zones de refuges arides et semi-arides à protéger, par sous-bassin versant, en sélectionnant celles qui maximisaient des critères de biodiversité (par exemple : représentativité de la biodiversité du bassin versant supérieure à 30 %) tout en minimisant le coût d'acquisition foncière. Puis les auteurs ont utilisé le même logiciel pour identifier les zones de connexions à préserver le long des cours d'eau (considérés comme les axes majeurs en Australie pour la dispersion et les déplacements de la faune et de la flore) qui maximisaient des critères de végétalisation tout en minimisant là encore les coûts d'acquisition. Des scénarios différents ont été testés en faisant varier les critères de biodiversité pour le choix des aires à protéger et les seuils de connectivité des bords de cours d'eau. Les résultats obtenus sous Marxan ont ensuite pu être confrontés pour privilégier les compromis les plus optimaux entre objectif de conservation et contraintes économiques.

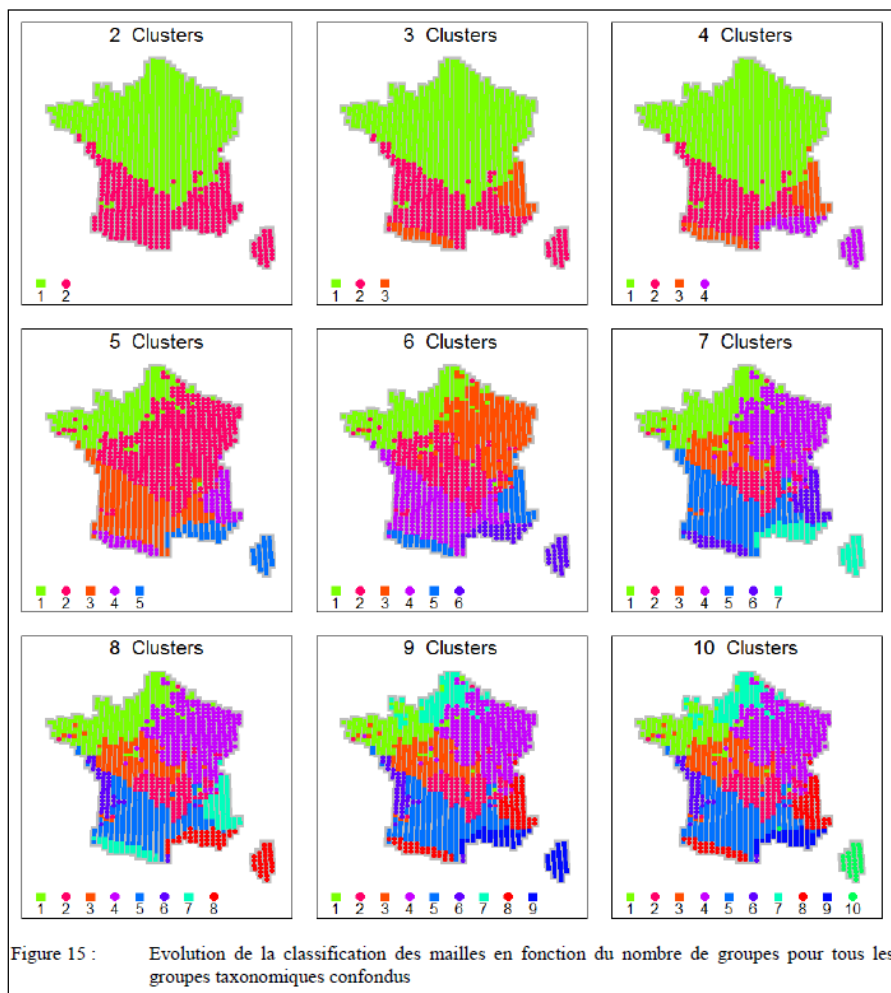


Figure 37 : Tests de classifications biogéographiques pour tous les taxons (1097 espèces) en fonction du nombre défini de classes.  
Source : Witté *et al.*, 2013

#### > Exemple de la Green infrastructure

En 2014, l'Agence européenne pour l'environnement (AEE) a produit un rapport proposant une méthode d'identification de la Green Infrastructure (EEA, 2014). Les auteurs ont pour objectif ici de proposer une méthode "faisable et répliquable" à différentes échelles et testent ainsi leur méthode à l'échelle européenne.

Ce rapport fait suite aux différentes publications sur la Green Infrastructure (GI) déjà produites par l'UE évoquées en partie III. Les auteurs ré-énoncent alors dans un premier temps les différents rôles que la Green infrastructure doit avoir vis-à-vis du changement climatique. Ces rôles visent à la fois la biodiversité, en favorisant son adaptation (ajustement spatial), et les sociétés humaines, via les fonctions des écosystèmes qui engendrent une réduction et une atténuation du changement climatique. Un premier rapport technique avait été diffusé en 2012 par la Direction générale de l'environnement de la Commission européenne (SFEU, 2012) mettant en avant cette nécessaire multifonctionnalité de la Green infrastructure.

La méthode proposée ici par les auteurs pour identifier la GI, répond à cette volonté d'une GI multifonctionnelle, et est ainsi basée sur deux points d'entrée :

**1- Un axe qualité d'habitats clef et connectivité.** Cet axe s'appuie sur des espèces ou groupes fonctionnels d'espèces. Les auteurs ont retenu les grands mammifères qu'ils qualifient de forestiers (Lynx boréal, Loup,



Ours, Cerf élaphe, Glouton, ...) car ils estiment que ces espèces sont assez caractéristiques des besoins de connectivité.

Cette approche est très originale par rapport à toute la littérature évoquée jusqu'ici car elle se base non pas sur les espèces ayant les plus faibles capacités de déplacements mais au contraire sur des espèces à très grands territoires et aptes à des déplacements longues distances. C'est donc ici plutôt une vision « espèce parapluie » qui semble retenue, selon le concept de « landscape species » mis en avant par Coppolillo *et al.* (2004) et Sanderson *et al.* (2002). Par ailleurs, cette approche se focalise de fait sur les milieux terrestres et même à dominante forestière.

Après avoir défini cette liste d'espèces, le modèle appliqué retient ensuite les mailles qui seront des éléments de GI selon plusieurs critères : présence de ces espèces cibles sur la base du rapportage européen, densité de forêt, surface de forêt d'un seul tenant, degré de perméabilité

**2- Une axe services écosystémiques.** Le but est d'identifier les zones où certains services, listés par l'étude, sont les mieux fournis. Neuf services sont choisis, dont une grande partie est en lien direct avec l'enjeu changement climatique, comme : la protection contre l'érosion, la régulation de la ressource en eau, la protection des côtes, ou encore le stockage du carbone.

Pour chacun des services retenus, une méthode précise est appliquée pour retenir les zones les plus fonctionnelles.

S'agissant du stockage du carbone par exemple, les auteurs sont partis des cartographies de végétation disponibles en Europe (forêt, prairies, ...) et ont converti ces surfaces en quantité de carbone stockées (cf. Figure 38).

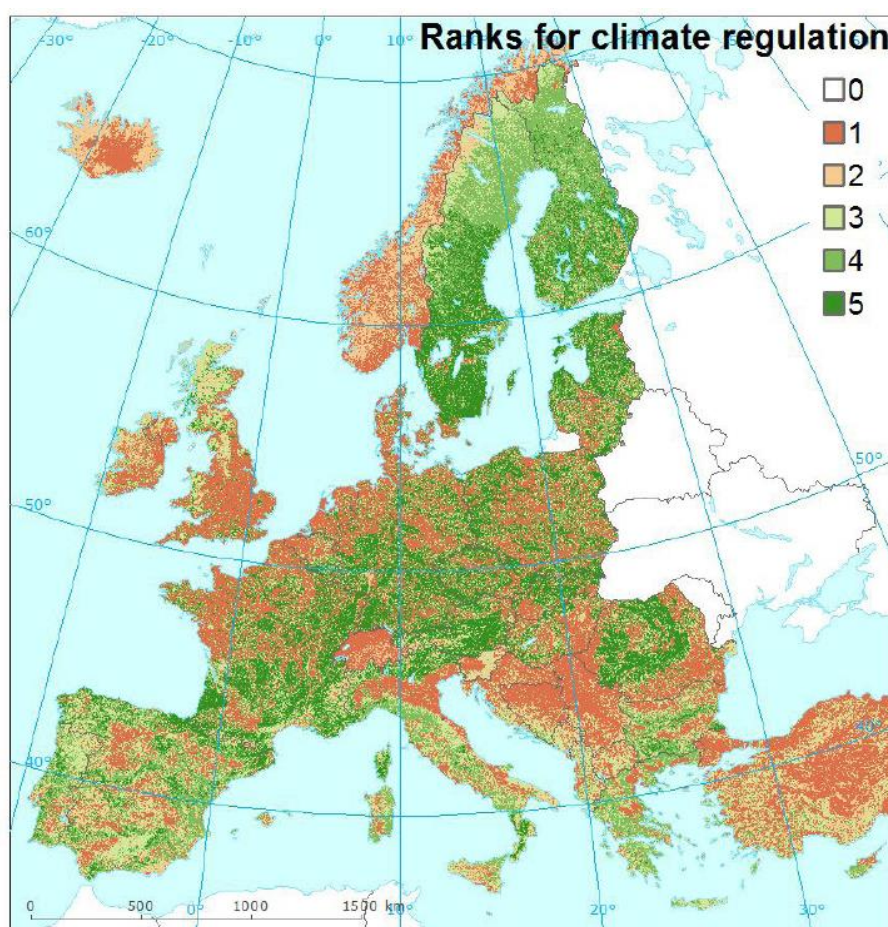


Figure 38 : Résultats obtenus pour le service écosystémique « stockage du carbone ». Les éléments de GI sont répartis en 5 classes selon leur capacité faible (1) ou forte (5) à remplir ce service.

Source : EEA, 2014

Au final, c'est l'addition des éléments de GI identifiés par les deux axes (habitats & services) qui forment la GI complète.

Dans cette méthode, les auteurs définissent ainsi la GI comme un ensemble d'éléments (« éléments de GI ») sans distinction particulière entre des réservoirs et des corridors, contrairement à la vision française de la TVB.

En revanche, 4 catégories d'éléments de GI sont distinguées en fonction de leur valeur (zones clefs ou zones limitées) à la fois pour la fourniture des services et pour la qualité des habitats. Ces quatre catégories impliquent ensuite des mesures de conservation/restauration différentes.

À l'échelle du nord-ouest de l'Europe, Vos *et al.* (2008) ont également mené une étude sans distinguer précisément des corridors et des réservoirs. Pour trois grands types d'écosystèmes (forêt, zones humides, prairies), l'objectif était d'identifier de manière globale la robustesse des espaces naturels face au changement climatique. Pour chacun de ces écosystèmes, trois espèces ont été choisies de façon à couvrir des traits de vie variés. Les auteurs ont ensuite combiné des modélisations d'enveloppes bioclimatiques avec des modélisations de dispersion pour ces espèces afin de déterminer les zones où la cohésion spatiale est insuffisante pour permettre la colonisation sous changement climatique, d'ici à 2050 et 2100. Des préconisations sont ensuite formulées pour combler les lacunes du réseau écologique telles que :

- renforcer les noyaux de populations (notamment qualité de leur habitat) là où le climat reste favorable dans le futur (refuges),
- améliorer la connectivité entre les zones où le climat va devenir favorable (zones potentiellement colonisées) et les noyaux de populations actuelles les plus proches.

> Exemple d'un projet européen, le projet BRANCH

Le projet BRANCH (« *Biodiversity Requires Adaptation in North West Europe under a Changing climate* », ce qui signifie en français « *La biodiversité doit s'adapter au changement climatique au sein de l'Europe du Nord-Ouest* »), déjà évoqué précédemment, est un projet réunissant des planificateurs, des responsables politiques et des scientifiques d'Angleterre, de France et des Pays-Bas (Rooij *et al.*, 2007). L'objectif de ce projet était de montrer comment l'aménagement du territoire pouvait aider la biodiversité à s'adapter au changement climatique, en prenant comme exemple le Nord-Ouest de l'Europe. Les partenaires ont partagé leur expérience et leurs connaissances pour élaborer des recommandations pratiques sur la base d'éléments scientifiques.

En utilisant l'expertise locale, le projet BRANCH a développé une méthode pour coopérer avec les acteurs locaux à la conception de réseaux écologiques pouvant résister au changement climatique.

Trois sites terrestres ont été étudiés :

- dans le Hampshire et les South Downs (Royaume-Uni), les partenaires ont étudié les possibilités de création et de restauration d'habitats pour aider les espèces des pelouses calcaires et des landes à s'adapter au changement climatique,
- dans la Province du Limbourg néerlandais, les partenaires ont testé l'efficacité d'un corridor écologique pour la faune et la flore dans le contexte du changement climatique en tant que partie du réseau écologique national néerlandais (cf. Figure 39). Ils ont évalué la connectivité des paysages (c.-à-d. la facilité pour les espèces à s'y déplacer), avec et sans le corridor écologique,

- dans le Kent (Royaume-Uni), le projet BRANCH a étudié la durabilité des réseaux d'habitats existants et développé une méthode de coopération avec les acteurs locaux pour concevoir des réseaux écologiques à l'avenir.

La démarche menée dans le Limbourg constitue en particulier un retour d'expérience intéressant pour le sujet du présent rapport. Le corridor aménagé relie une chaîne d'habitats sur la rive Est de la Meuse, des deux côtés de la frontière germano-néerlandaise. Une fois terminé, le corridor s'étendra de Schinveld à Reichswald, et comportera plus de 2200 ha de zones de création d'habitats. Il a pour but d'améliorer les liens entre les îlots du réseau écologique national néerlandais et le réseau Natura 2000 des deux côtés de la frontière.

Les partenaires ont étudié la végétation et les oiseaux, et dressé des cartes d'habitats pour la province du Limbourg et la zone voisine en Allemagne. Le modèle SMALLSTEPS a été utilisé pour analyser la liberté de mouvement des espèces entre les habitats. Enfin, les partenaires ont utilisé le modèle LARCH pour dresser des cartes indiquant l'influence positive ou négative du changement climatique sur le réseau d'habitats des espèces concernées, avec et sans le corridor écologique.

La modélisation a porté entre autres sur les espèces suivantes : Lézard des souches, Grand-Mars changeant, Triton crêté, Fauvette pitchou, Bouscarle de Cetti, Alouette lulu et Murin de Bechstein. Ces espèces ont des capacités de dispersion distinctes et devraient donc réagir différemment au changement climatique.

Les résultats des modélisations indiquent que l'efficacité de ce corridor revêt une plus grande importance pour les espèces vivant au sol ainsi que pour les petites espèces volantes. Cette structure est moins importante pour les grands oiseaux car ils n'ont pas de problème pour parcourir ce type de distance. La conception de corridors écologiques doit se concentrer sur les espèces qui « auront besoin d'aide », et les facteurs clés à prendre en compte sont notamment leur capacité à se disperser et leur répartition potentielle dans un climat qui aura changé.

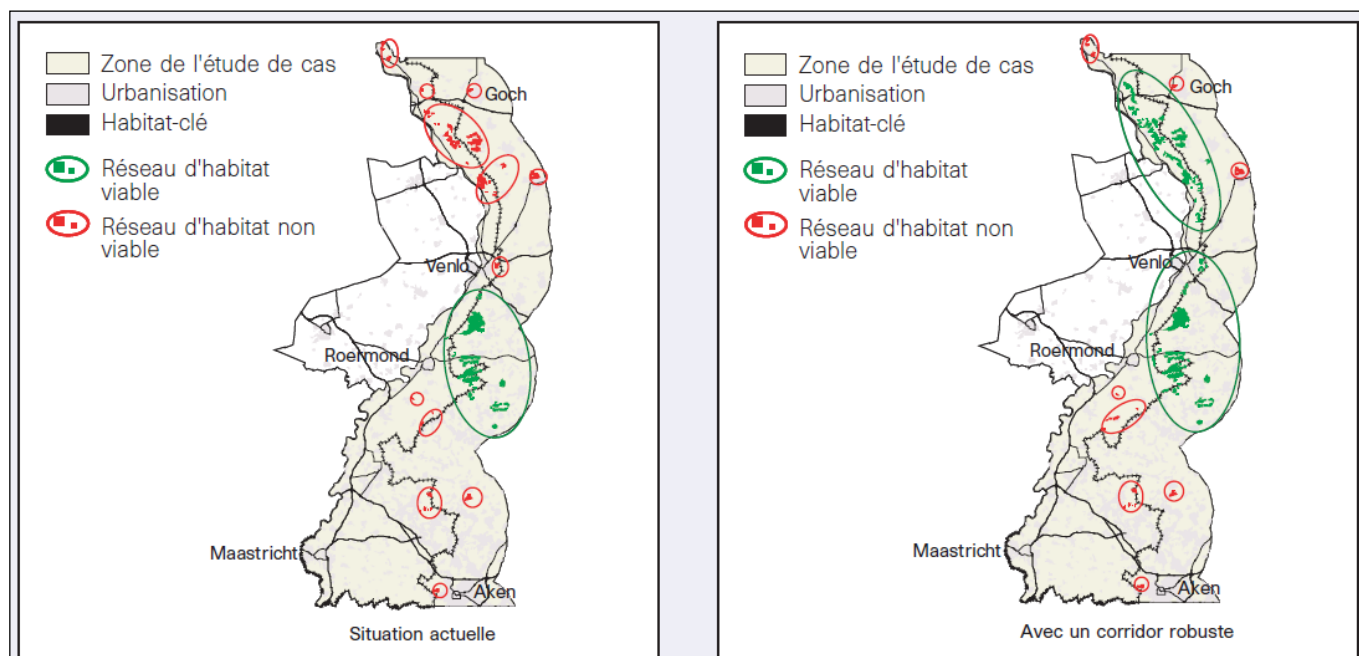


Figure 39 : Réseaux d'habitats durables pour le Lézard des souches dans le Limbourg, modélisés par ALTERRA, sans (à gauche) et avec (à droite) l'existence du corridor écologique.

Source : Rooij *et al.*, 2007

> Intégrer également l'objectif d'atténuation

Une seule publication a été trouvée qui met en avant une méthodologie d'identification de corridor basée sur l'objectif d'atténuation du changement climatique. Jantz *et al.* (2014) proposent ainsi une méthode multicritères pour identifier des corridors qui répondent à la fois au besoin d'adaptation et d'atténuation du changement climatique. Les auteurs basent leur identification sur les densités de carbones stockés dans la végétation puis sélectionnent les trajets permettant de relier de façon optimale les aires protégées. Cette approche rejoint la démarche de l'EEA présentée précédemment mais en distinguant précisément des corridors reliant des aires protégées.

### **I.3. Identification d'aires protégées nouvelles**

Comme nous l'avons vu, même si l'outil « aire protégée » reste efficace et pertinent sous changement climatique, la plupart des réseaux montre un besoin d'amélioration pour garantir une meilleure représentativité de la biodiversité suite aux mouvements des enveloppes climatiques et écologiques.

Hannah *et al.* (2007) estiment que la lutte contre le changement climatique est ainsi une opportunité à saisir pour compléter les réseaux d'aires protégées en associant cet objectif à celui de la représentativité des espèces à conserver. Les auteurs montrent qu'une action rapide sera à la fois plus efficace et moins coûteuse que l'inaction ou même qu'une action tardive.

Comme nous l'avons vu, les biais dans la représentativité des conditions environnementales d'un réseau d'aires protégées pourraient en effet exacerber les impacts des changements climatiques et les pertes d'habitats (Pyke & Fischer, 2005 ; Pyke *et al.*, 2005). La représentativité des réseaux d'aires protégées aux échelles régionale et planétaire est ainsi désignée comme un besoin fondamental pour amoindrir les impacts des changements climatiques sur le milieu naturel (Hannah, 2008 ; Heller & Zavaleta, 2009).

Pour améliorer cette représentativité, là encore, le recours à des logiciels de traitements statistiques de données se développe. Toute la difficulté est ensuite d'avoir une approche elle-même représentative de la diversité des taxons, le choix des espèces utilisée est donc fondamental.

En Afrique du Sud, Williams *et al.* (2005), ont utilisé le logiciel Worldmap pour identifier les zones permettant de représenter toutes les espèces de Protéacées (280 taxons) dans au moins 35 mailles de 2,8 km<sup>2</sup> (soit 100 km<sup>2</sup> environ) restant inchangées pendant toute la période 2000-2050, en tenant compte de l'évolution du climat et en ayant un objectif de minimiser les coûts.

En Europe, Cianfrani *et al.* (2011) ont adopté une approche espèce-centrée, basée sur la Loutre d'Europe (*Lutra lutra*), pour évaluer l'efficacité du réseau écologique actuel par rapport au changement climatique et identifier en conséquence des zones prioritaires complémentaires (cf. Figure 40). Les auteurs montrent que le changement climatique va profondément remodeler les zones favorables à la Loutre à l'horizon 2080 et que les zones devenant prioritaires dans le futur ne sont que partiellement couvertes par le réseau protégé actuel.

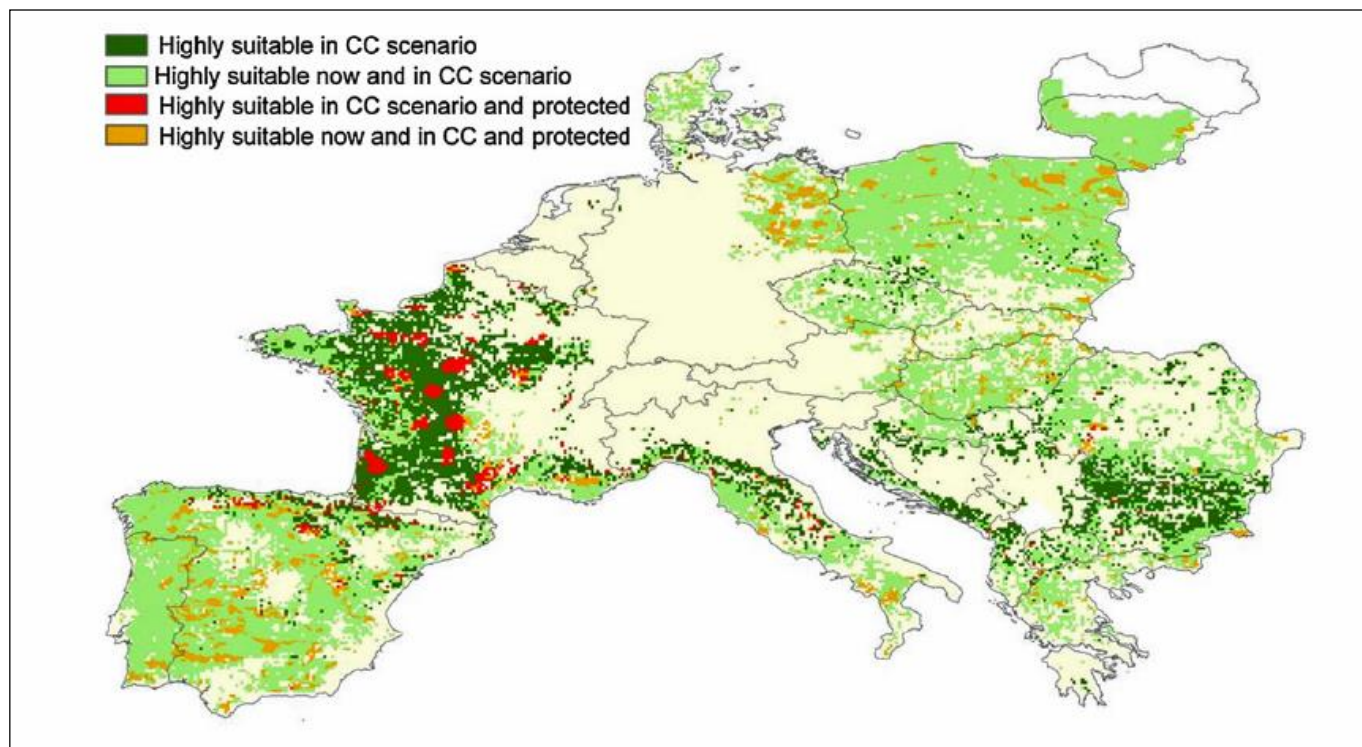


Figure 40 : Carte des zones prioritaires pour la Loutre en Europe à l'horizon 2080 en cas de réalisation du scénario B2 du GIEC et confrontation au réseau d'aires protégées actuel.

Source : Cianfrani *et al.*, 2013

Au Québec, Brassard *et al.* (2010) précisent que l'utilisation et la combinaison de différents modèles de simulation qui permettent de faire des projections sur l'évolution du climat régional, de la répartition des espèces et de l'utilisation du territoire, s'avèrent essentielles pour réussir cette intégration. Cette démarche doit être privilégiée par rapport aux outils plus classiques d'analyse des lacunes des aires protégées. Des analyses intégrées de sensibilité permettent d'examiner les effets des changements climatiques sur les espèces, particulièrement les espèces rares, menacées et sensibles aux variations climatiques et aux processus écologiques (incendies, épidémies d'insectes, etc.). Les habitats sensibles aux changements climatiques (ex. : milieux humides) et les effets d'altitude sont d'autres paramètres à prendre en compte lors des estimations. Les résultats de ces analyses peuvent servir à modifier les estimations de contribution du réseau d'aires protégées à la protection d'espèces ou d'habitats influencés par ces variations climatiques. Par exemple, l'addition d'aires protégées à la limite de distribution des espèces peut aider au maintien de leur représentation future dans le réseau d'aires protégées. La prise en compte de l'impact du changement climatique dans les stratégies de conservation du territoire s'inscrit aussi dans une planification intégrée de la conservation qui considère le rôle des aires protégées dans la matrice aménagée, ainsi que leurs interrelations (Hannah *et al.*, 2002a ; Hannah *et al.*, 2002b).

Margules & Pressey (2000) constatent que l'identification des aires protégées comporte souvent un biais pratique, lié aux besoins économiques et à l'espace disponible. Ils proposent par conséquent une démarche en 6 étapes pour délimiter de nouvelles aires protégées, qu'ils ont testée en Australie. Globalement le processus consiste à comparer le réseau d'aires existant avec des critères considérés comme indispensables pour la conservation afin d'évaluer les éventuels manques fonctionnels à l'échelle du réseau (connectivité, surface, types de milieux, ...) et à optimiser de façon itérative, avec des phases d'expertises des résultats.

Prato (2012) propose une méthode en 5 étapes pour déterminer les mesures compensatoires les plus adaptées pour accroître la résilience des aires protégées face au changement climatique.

Enfin, l'adaptation des réseaux d'aires protégées au changement climatique ne repose pas uniquement sur l'identification de nouveaux périmètres. Les gestionnaires doivent aussi évoluer dans leurs pratiques, via les plans de gestion notamment, qui doivent mieux intégrer le changement du climat. Les aires protégées doivent devenir (ou le devenir davantage) des laboratoires d'expérimentations, pour le lancement de programmes de recherche (Welch, 2008).

### > Exemple du Canada

Le Canada se pose la question de l'adaptation de son réseau d'aires protégées par rapport au changement climatique dans la mesure où ces zones ont été identifiées à une époque où la nécessité de prendre en compte le changement climatique n'était pas apparue. Le réseau d'aires protégées actuel repose en effet sur une représentativité d'espèces comme si leur répartition était figée (Scott et Le mieux, 2005), ce qui est sans doute un cas relativement général.

En pratique, au Québec par exemple, un programme s'est développé, OURANOS, pour « *concevoir des réseaux écologiques robustes dans les basses-terres du Saint-Laurent au sud du Québec, qui maintiennent des écosystèmes durables et résilients face aux changements climatiques attendus et à l'évolution de l'utilisation des terres dans les prochaines décennies.* ». Ouranos est un consortium qui intègre 250 scientifiques et professionnels issus de différentes disciplines. Son action se concentre sur deux grands thèmes : « *Sciences du climat* » et « *Impacts & Adaptation* ». Dans ce projet, « *la structure spatiale des réseaux écologiques sélectionnés sera ensuite associée à des données sur les patrons connus de biodiversité (ex. diversité des arbres, des oiseaux migrateurs) et sur les services écologiques (ex. pollinisation, qualité de l'eau).* Enfin, le projet se penchera sur les effets des changements climatiques sur les réseaux écologiques actuels et sur la dynamique de ces réseaux pour les maintenir résilients dans cette région, selon les scénarios climatiques futurs considérés. ».

Pour ce faire, le programme en test dans deux régions pilotes prévoit de produire des scénarios climatiques afin de fournir un portrait du climat actuel de ces régions et de ses changements projetés pour les horizons 2050 et 2080. « *Ces informations permettront d'évaluer la vulnérabilité des écosystèmes aux changements climatiques puis des analyses étudieront la capacité du réseau actuel d'aires protégées à diminuer cette vulnérabilité.* ». L'ambition affichée est donc l'atténuation du changement climatique autant que l'adaptation. Plus d'informations sur : <http://www.ouranos.ca>

### > Taille et nombre des aires protégées

La nécessité d'améliorer les réseaux d'aires protégées face au changement climatique a fait réémerger au sein de la communauté scientifique un débat sur la taille et le nombre des aires (Heller & Zavaleta, 2009). La question qui anime les biologistes de la conservation depuis fort longtemps est de savoir s'il est plus efficace d'identifier plusieurs petites aires protégées que moins d'aires protégées qui couvrent de grandes surfaces.

La plupart des publications rassemblées par Heller & Zavaleta privilégient l'option « grandes réserves » car les faunes et flores peuvent ainsi migrer tout en ayant plus de chance de rester à l'intérieur d'un périmètre protégé. Par ailleurs, les auteurs mettent en avant le fait que des grandes réserves laissent plus de potentialités à de nombreuses espèces, notamment celles ayant de grands domaines vitaux.

A l'inverse, plusieurs auteurs soulignent la nécessité d'espaces relais même s'ils ne sont pas sous statut de protection, identifiés comme des noyaux à préserver. Grashof-Bokdam *et al.* (2009) ont montré l'importance, pour de nombreuses espèces, d'une synergie entre de larges espaces de nature préservés, mis en cohésion par des petits espaces intermédiaires, constituant des « veines vertes ».

Enfin, Pearson & Dawson (2005) montrent que le débat ne peut pas se résumer à « une grande » versus « plusieurs petites » car la forme des réserves jouent également beaucoup (réserve allongée ou en rond par exemple) (cf. Figure 41).

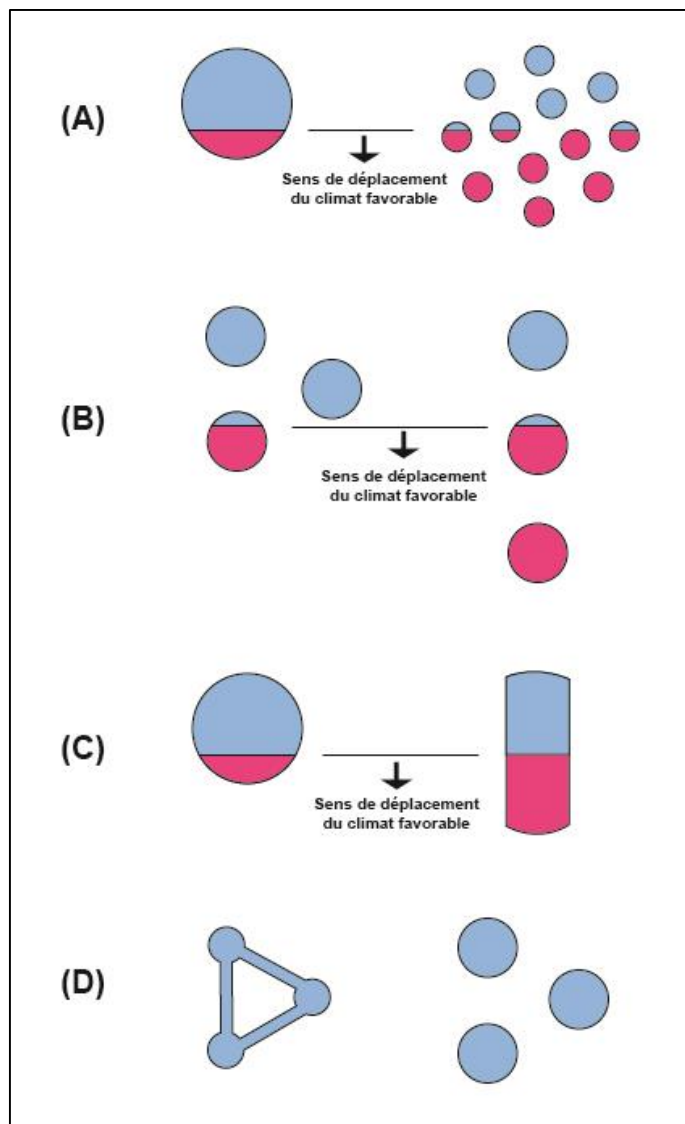


Figure 41 : Géométries possibles pour les aires protégées et proportion qui en résulte entre climat actuellement favorable (gris clair) et climat favorable actuellement et dans le futur (gris foncé).

Dans chaque cas (A-D), les ensembles à gauche et à droite ont la même aire totale et le même statut de protection. Le bleu représente les zones où le climat actuel est favorable et le rose les zones où le climat est favorable actuellement et le restera dans le futur. La surface de réserve conservant un climat favorable sous changement climatique peut ainsi être maximisée :

- en effectuant plusieurs petites réserves plutôt qu'une grande (cas A)
- en positionnant les réserves linéairement (cas B)
- en allongeant le profil de la réserve (cas C)

Dans le même temps, des corridors d'habitat favorable reliant les réserves permet de diminuer les extinctions en augmentant les chances de dispersion (cas D).

Source : D'après Pearson & Dawson, 2005

## II. EN FRANCE

### II.1. Retour sur les orientations nationales du projet Trame verte et bleue en France

**Pré-requis :** Comme prévu par la loi Grenelle II, le projet Trame verte et bleue s'appuie sur un document cadre « Orientations nationales » qui a été approuvé par décret le 20 janvier 2014 (MEDDE, 2014a).

Les Orientations nationales TVB s'articulent autour de deux parties :

- une partie relative aux choix stratégiques précisant les définitions, les objectifs et les grandes lignes directrices pour la mise en œuvre de la Trame verte et bleue ;
- une partie constituant le guide méthodologique précisant notamment les enjeux nationaux et transfrontaliers pour la cohérence écologique de la Trame verte et bleue à l'échelle nationale.

## II.1.1. Rappels des objectifs du projet Trame verte et bleue

Dans les Orientations nationales évoquées ci-dessus, les objectifs de la TVB font référence au changement climatique :

### **2. La Trame verte et bleue : objectifs**

« *La Trame verte et bleue [...] doit également permettre :*

*> d'accompagner les évolutions du climat en permettant à une majorité d'espèces et d'habitats de s'adapter aux variations climatiques :*

*- en garantissant la présence de nouvelles zones d'accueil de qualité permettant d'anticiper le déplacement des aires de répartition de nombreuses espèces et de leurs habitats ainsi que des habitats naturels, du fait du changement climatique, notamment le déplacement vers le Nord ou en altitude ;*

*- en préservant des populations d'une espèce en limite d'aire de répartition et en favorisant notamment les stations récentes où les populations sont en croissance ; »*

### **LE CHANGEMENT ECOLOGIQUE AU SEIN DE LA POLITIQUE DE L'EAU SUR LA CONTINUITÉ AQUATIQUE :**

Les politiques de l'eau concernant la continuité écologique mettent également en avant la nécessaire prise en compte du changement climatique. La restauration de la continuité écologique des cours d'eau est en effet une des conditions pour atteindre le bon état des eaux d'ici à 2015. A ce titre, un Plan de Restauration de la Continuité Écologique (PARCE) a été annoncé en 2009 (MEEDDM, 2006). Les classements de cours et l'application du L214-17 du Code de l'environnement peuvent être aussi considérés comme des mesures d'adaptation au changement climatique. Récemment, les orientations données pour la révision des Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) par le Ministère en charge de l'écologie demandent également explicitement de tenir compte du changement climatique (MEDDE, 2014b). Il est demandé notamment au SDAGE de revenir « sur l'analyse de la vulnérabilité du bassin, la construction d'une stratégie d'adaptation possible et la cohérence du SDAGE vis-à-vis des conséquences attendues du changement climatique ». Des démarches sont déjà engagées en ce sens, notamment par le bassin Rhône-Méditerranée-Corse (RM&C) qui a effectivement publié d'ores et déjà un état des lieux des impacts du changement climatique sur ce bassin et un plan d'action destiné à y faire face (AERMC, 2014).

## II.1.2. Les enjeux nationaux pour assurer une cohérence écologique de la TVB

Compte tenu de cet enjeu, la prise en compte du changement climatique dans les Orientations nationales était une volonté forte du Ministère en charge de l'écologie et un axe que le MNHN-SPN a intégré dans son travail d'expertise sur les critères de cohérence nationale.

Les Orientations nationales précisent, au sujet des enjeux de cohérence nationale, qu'ils « *visent une cohérence écologique au sein d'un territoire régional, entre les territoires régionaux et transfrontaliers et au niveau national, notamment dans une perspective d'adaptation au changement climatique.* »

Pour rappel, en France, les régions (Conseils régionaux/Direction régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement) sont libres de la méthode d'identification des continuités écologiques dans leur Schéma régional de cohérence écologique. Elles doivent néanmoins respecter, dans un rapport d'opposabilité qui est la « prise en compte », certains enjeux de cohérence nationale, identifiés à travers



quatre « critères ». Le MNHN-SPN a été sollicité en 2010 et 2011 pour préciser la définition de trois de ces critères : cartes nationales, espèces et habitats naturels.

> Intégration dans le critère de cohérence « Cartes nationales »

Du fait de la prépondérance du facteur « climat » comme déterminant de la répartition des espèces à l'échelle nationale, celui-ci a été intégré dans le choix même des différentes cartes à produire.

Ainsi, une dichotomie « thermophiles / cryophiles » a été opérée pour les milieux ouverts (Sordello *et al.*, 2011a). Pour ces milieux, une distinction assez nette peut en effet être observée dans les cortèges d'espèces qui les composent. On peut ainsi distinguer grossièrement les milieux ouverts thermophiles telles que les pelouses calcaires ou les landes sèches et les milieux ouverts frais à froids telles que les mégaphorbiaies ou les prairies mésophiles. La méthode de construction finalement retenue, prenant en compte la chorologie actuelle de ces groupes croisée avec l'occupation du sol et la nature du sol, met en évidence des enveloppes de répartition actuelles qui elle-même traduisent un ajustement dû au réchauffement postglaciaire, en estimant que ce continuum pourra servir pour d'autres espèces (cf. Figure 42).

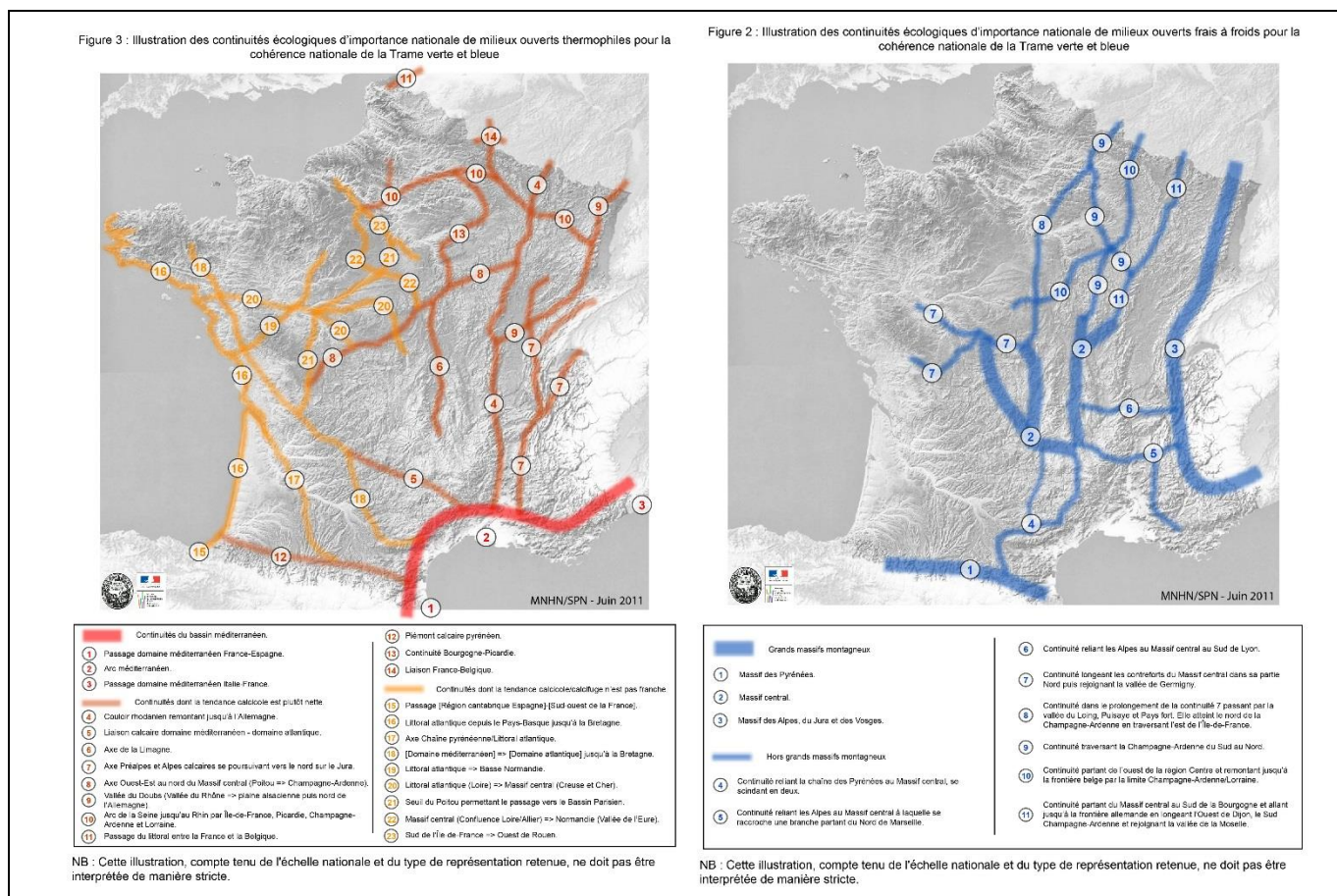


Figure 42 : Illustrations produites pour les orientations nationales TVB.

Source : Sordello *et al.*, 2011a

Pour les milieux forestiers, cette distinction fut moins évidente à mettre en avant. Dans l'identification des continuités nationales boisées, les espèces indicatrices couvrent une amplitude d'espèces cryophiles à thermophiles. Cette distinction est donc indirecte, puisque par exemple les cortèges d'espèces forestières en montagnes sont répartis surtout en fonction de l'altitude et de l'exposition.

En termes de méthodologie, par rapport aux deux approches énoncées précédemment pour identifier des réseaux écologiques prenant en compte le changement climatique (voies de colonisations passées versus déplacement futur des enveloppes climatiques), c'est principalement la première qui a été adoptée (cf. paragraphe I.2.1.).

#### > Intégration dans le critère de cohérence « Espèces »

Dans le choix des espèces de cohérence nationale, les enjeux du réchauffement climatique ont été intégrés : des espèces non retenues par l'algorithme de sélection initialement élaboré et proposées par les CSRPN ont été ajoutées, lorsque les régions en question étaient situées sur la limite « Nord » d'aire de répartition (Sordello *et al.*, 2011b).

Pour une espèce, c'est en effet avant tout le front de colonisation de son aire de répartition qui porte ces enjeux liés au climat. L'idée n'est pas de forcer les espèces à migrer mais de leur en laisser la possibilité selon la pression des changements climatiques.

Ainsi, à titre d'exemple, on peut citer le Lézard vert occidental (*Lacerta bilineata*) proposé par le CSRPN de Champagne-Ardenne, qui a été ajouté dans la liste proposée au Ministère.

#### > Intégration dans le critère de cohérence « Habitats naturels »

En ce qui concerne le critère de cohérence nationale portant sur les habitats naturels, les enjeux de changement climatique ont été assez peu intégrés dans cette première version de liste. Des habitats thermophiles comme cryophiles font partie de cette liste mais la problématique n'a pas été structurante dans le processus de sélection des habitats de cohérence nationale (Sordello *et al.*, 2011c).

Il existe des pistes pour améliorer l'intégration du changement climatique dans les enjeux de cohérence nationale TVB, que nous aborderons dans la partie 5 de ce rapport.

Cependant, les recherches menées pour ce rapport montrent un décalage entre des objectifs largement partagés au niveau mondial d'agir sur le changement climatique via les réseaux écologiques et une mise en pratique opérationnelle qui reste encore faible. La mention du changement climatique est même absente du cadrage des réseaux écologiques de certains pays. Pour prendre un exemple, le Réseau écologique national (REN) Suisse ne fait aucune allusion au changement climatique. Il indique que le climat influe sur certains phénomènes (dispersion par exemple) mais le changement climatique contemporain n'est pas cité (Confédération Suisse, 2004).

Par comparaison, la prise en compte explicite de ces aspects par le projet TVB français paraît donc innovante, même si ce travail doit encore être approfondi.

## **II.2. Retour sur la prise en compte du changement climatique dans la Stratégie de création des aires protégées**

**Pré-requis :** La SCAP constitue un des chantiers prioritaires du Grenelle de l'environnement qui a été repris par la Conférence environnementale de 2012. La loi du 3 août 2009 confirme l'impulsion d'une dynamique ambitieuse de développement du réseau des aires protégées, avec l'objectif de placer dans les 10 ans, 2 % au moins du territoire terrestre métropolitain sous protection forte. Ces 2 % visent les cœurs de parcs nationaux, les réserves naturelles et biologiques, les arrêtés de protection de biotopes.

Comme pour la TVB, le MNHN-SPN a été sollicité par le Ministère en charge de l'écologie pour le cadrage national de la SCAP (Coste *et al.*, 2010). Un diagnostic a été élaboré à partir d'une liste prédéterminée d'espèces et d'habitats à enjeux patrimoniaux forts (y compris des espèces sensibles aux changements

climatiques). L'état du réseau sur le territoire a été analysé pour ces espèces et habitats afin d'identifier les lacunes du réseau actuel et les priorités en terme de compléments (quelles espèces dans quelles régions). L'accent a été mis sur la présence d'aires protégées dans l'ensemble de l'aire de répartition métropolitaine des espèces et habitats.

Ainsi, cette démarche favorise la prise en compte d'un large gradient géographique et bioclimatique pour chaque espèce et type d'habitat naturel. On peut en effet supposer que parmi les différentes populations de cette couverture, certaines seront moins vulnérables que d'autres et pourront constituer les sources pour de nouvelles colonisations.

En termes de liens entre TVB et SCAP actuellement, rappelons que les cœurs de parcs nationaux, les réserves naturelles et les arrêtés de protection de biotope (4 des 5 types d'aires protégées sous statut de protection forte) sont à intégrer d'office par les régions dans leur SRCE comme réservoirs de biodiversité. Ces espaces font donc partie intégrante des continuités écologiques de la TVB. Les autres zonages « biodiversité » (Zone naturelle d'intérêt écologique, faunistique et floristique - ZNIEFF, Natura 2000, ...) sont à étudier au cas par cas par les régions et leur non-intégration dans la TVB régionale doit être justifiée. Le constat à ce jour est qu'une partie importante de ces espaces sont intégrés par les régions. C'est notamment souvent le cas des ZNIEFF de type I, des sites Natura 2000 ou encore des Parcs naturels régionaux (PNR), Espaces naturels sensibles (ENS), sites classés.

### II.3. Peu de retours d'expériences locaux

Dans le cadre du Centre de ressources TVB, une journée de la Fédération des parcs naturels régionaux (FPNR) a été réalisée en juillet 2012 sur « TVB et Changement climatique » (Hamon, 2012a, 2012b et 2012c). Cette rencontre a montré qu'il existait très peu, voire quasiment pas, d'exemples concrets de prise en compte du changement climatique dans les trames régionales et locales.

On peut imaginer éventuellement comme explications le fait que :

- les acteurs « n'en sont pas encore là » et que compte tenu de l'ampleur de la tâche dans l'identification de trames vertes et bleues, ils s'attèlent avant tout à identifier cette trame sans pouvoir se focaliser à ce stade sur des enjeux précis (changement climatique mais aussi cas de la lumière, du bruit, ...). De même concernant la politique des aires protégées, le maintien et la gestion de l'existant sont un tel challenge que les menaces futures telles que le changement climatique peuvent paraître secondaires (si aujourd'hui on ne préserve pas les espèces où elles sont actuellement, il n'y aura aucune chance qu'elles se déplacent),

- le manque de connaissances puisse aussi être responsable de cette absence de retour d'expérience à ce jour. C'est ce qu'a mis en évidence comme facteur principal, la journée FPNR : « *Les changements globaux et notamment le changement climatique comportent de nombreuses incertitudes, ce qui constitue souvent un frein à l'intégration de ces enjeux dans les actions des territoires et notamment dans les actions relatives à la biodiversité. Nous pouvons imaginer que les acteurs ressentent une forte incertitude sur le phénomène lui-même (quelle ampleur, à quel endroit, quelles conséquences, ...) et sur la manière de le résoudre (comment intégrer ces infos dans l'identification même de la trame, quelles actions du plan du SRCE mettre en place dans cette perspective).* » (Hamon, 2012a et 2012b).

Néanmoins, ce tour d'horizon devrait être complété et s'appuyer sur une recherche poussée d'initiatives locales car des expériences doivent exister sans être nécessairement publiées.

Le Centre de ressources TVB suit également l'avancée des SRCE sur le plan technique et la prise en compte du changement climatique dans les SRCE est ainsi un des éléments analysés dans ce suivi. Pour le moment,

le constat effectué lors de la journée des PNR tend à se vérifier également par le suivi des SRCE, avec peu voire pas d'intégration spécifique concrète de cette problématique même si l'enjeu lui-même est identifié. Ces résultats sont cependant très provisoires dans la mesure où une grande partie des SRCE reste en cours d'élaboration.

On peut par ailleurs noter déjà le travail réalisé très récemment en Languedoc-Roussillon dans le cadre d'un stage de Master 2, qui apparaît comme pionnier en la matière (Berton, 2014). Cette étude a notamment porté sur la localisation stratégique de priorités en termes d'actions à mener vis-à-vis du changement climatique. Dans cet objectif, la démarche adoptée a été d'identifier les espaces en transition climatique dans le département de l'Hérault et de confronter ces interfaces aux continuités écologiques et à la qualité globale de la matrice. Cette approche semble donc reprendre les concepts scientifiques développés précédemment qui préconisent de repérer les corridors potentiels dans le sens perpendiculaire aux gradients climatiques, tout en s'assurant que la qualité des habitats et la perméabilité paysagère dans ces zones sont bonnes.

# REFERENCES CITEES DANS LA PARTIE 4

## Articles scientifiques

ARAUJO M.B. (2002). Biodiversity hotspots and zones of ecological transition. *Conservation Biology*. Numéro 16. Pages 1662-1663.

BEALE C.M., LENNON J.J., & GIMONA A. (2008). Opening the climate envelope reveals no macroscale associations with climate in European birds. *PNAS*. Pages 14908-14912.

BROCKERHOFF E.G., JACTEL H., PARROTTA J.A., QUINE C.P. & SAYER J. (2008). Plantation forests and biodiversity: oxymoron or opportunity?. *Biodiversity Conservation*. Numéro 17. Pages 925-951.

CIANFRANI C., LE LAY G., MAIORANO L., SATIZABAL H.F., LOY A. & GUIBAN A. (2011). Adapting global conservation strategies to climate change at the European scale: The otter as a flagship species. *Biological conservation*. Numéro 144. Pages 2068-2080.

COPPOLILLO P., GOMEZ H., MAISELS F. & WALLACE R. (2004). Selection criteria for suites of landscape species as a basis for site-based conservation. *Biological Conservation*. Numéro 115. Pages 419-430.

COWLING R.-M., PRESSEY R.-L., ROUGET M., LOMBARD A.-T. (2003). A conservation plan for a global biodiversity hotspot - the Cape Floristic Region, South Africa. *Biological Conservation*. Numéro 112. Pages 191-216.

COWLING R.-M., PRESSEY R.-L., LOMBARD A.-T., DESMET P.-G. & ELLIS A.-G. (1999). From representation to persistence: requirements for a sustainable system of conservation areas in the species-rich mediterranean-climate desert of southern Africa. *Diversity and Distributions*. Numéro 5. Pages 51-71.

GRASHOF-BOKDAM C.-J. & CHARDON J.-P., VOS C.-C., FOPPEN R.-P.-B., DE VRIES M.-W., VAN DER VEEN M. & MEEUWSEN H.-A.-M. (2009). The synergistic effect of combining woodlands and green veining for biodiversity. *Landscape Ecology*. Numéro 24. Pages 1105-1121.

HANNAH L. (2011). Climate change, connectivity, and conservation success. *Conservation biology*. Volume 25. Numéro 6. Pages 1139-1142.

HANNAH L. (2008). Protected Areas and Climate Change. Conservation International, Center for Applied Biodiversity Science. *New York Academy of Sciences*. Pages 201-212.

HANNAH L., MIDGLEY G., ANDELMAN S., ARAUJO M., HUGHES G., MARTINEZ-MEYER E., PEARSON R. & WILLIAMS P. (2007). Protected area needs in a changing climate. *Frontiers in ecology and the environment*. Volume 5. Numéro 3. Pages 131-138.

HANNAH L., MIDGLEY G. F., LOVEJOY T., BOND W. J., BUSH M., LOVETT J. C., SCOTT D., WOODWARD F. I. (2002a). Conservation of biodiversity in a changing climate. *Conservation Biology*. Volume 16. Numéro 1. Pages 264-268.

HANNAH L., MIDGLEY G.F. & MILLAR D. (2002b). Climate change-integrated conservation strategies. *Global Ecology & Biogeography*. Numéro 11. Pages 485-495.

HELLER N.E. & ZAVALETA E.S. (2009). Biodiversity management in the face of climate change: A review of 22 years of recommendations. *Biological Conservation*. Numéro 142. Pages 14-32.

HOLE D.G., HUNTLEY B., ARINAITWE J., BUTCHART S.H.M., COLLINGHAM Y.C., FISHPOOL L.D.C., PAIN D.J. & WILLIS S.G. (2011). Toward a management framework for networks of protected areas in the face of climate change. *Conservation biology*. Volume 25. Numéro 2. Pages 305-315.

- JANTZ P., GOETZ S. & LAPORTE N. (2014). Carbon stock corridors to mitigate climate change and promote biodiversity in the tropics. *Nature climate change*. Volume 4. Numéro 2. Pages 138-142.
- JOLY D., BROSSARD T., CARDOT H., CAVAILHES J., HILAL M. & WAVRESKY P. (2010). Les types de climats en France, une construction spatiale. *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne].
- KLEIN C., WILSON K., WATTS M., STEIN J., BERRY S., CARWARDINE J., SMITH M.S., MACKEY B. & POSSINGHAM H. (2009). Incorporating Ecological and Evolutionary Processes into Continental-Scale. *Conservation Planning. Ecological Applications*. Volume 19. Numéro 1. Pages 206-217.
- KOSTYACK J., LAWLER J.J., GOBLE D.D., OLDEN J.D. & SCOTT J.M. (2011). Beyond reserves and corridors: policy solutions to facilitate the movement of plants and animals in a changing climate. *Bioscience*. Volume 61. Numéro 9. Pages 713-719.
- MARGULES C.-R. & PRESSEY R.-L. (2000). Systematic conservation planning. *Nature*. Numéro 405. Pages 243-253.
- METZGER M.-J., BUNCE R.-G.-H., JONGMAN R.-H.-G., MUCHER C.-A. & WATKINS J.-W. (2005). A climatic stratification of the environment of Europe. *Global ecology and biogeography*. Numéro 14. Pages 549-563.
- NUNEZ T.A., LAWLER J.J., MCRAE B.H., PIERCE D.J., KROSBY M.B., KAVANAGH D.M., SINGLETON P.H. & TEWKSBURY J.J. (2013). Connectivity planning to address climate change. *Conservation biology*. Volume 27. Numéro 2. Pages 407-416.
- OLSON D., O'CONNELL M., FANG Y.-C., BURGER J. & RAYBURN R. (2009). Managing for climate change within protected area landscapes. *Natural areas journal*. Volume 29. Numéro 4. Pages 394-399.
- PARISOD C. (2008). Postglacial recolonisation of plants in the western Alps of Switzerland. *Botanica Helvetica*. Numéro 118. Pages 1-12.
- PRATO T. (2012). Increasing resilience of natural protected areas to future climate change: a fuzzy adaptive management approach. *Ecological modelling*. Volume 242. Pages 46-53.
- PYKE C.-R. & FISCHER D.-T. (2005). Selection of bioclimatically representative biological reserve systems under climate change. *Biological Conservation*. Numéro 121. Pages 429-441.
- PYKE C.-R., ANDELMAN S.-J. & MIDGLEY G. (2005). Identifying priority areas for bioclimatic representation under climate change: a case study for Proteaceae in the Cape Floristic Region, South Africa. *Biological Conservation*. Numéro 125. Pages 1-9.
- ROSE N.-A. & BURTON P.J. (2009). Using bioclimatic envelopes to identify temporal corridors in support of conservation planning in a changing climate. *Forest ecology and management*. Volume 258. Pages S64-S74.
- ROUGET M., COWLING R.-M., LOMBARD A.-T., KNIGHT A.-T. & KERLEY G.-I.-H. (2006). Designing Large-Scale Conservation Corridors for Pattern and Process. *Conservation biology*. Volume 20. Numéro 2. Pages 549-561.
- SANDERSON E.W., REDFORD K.H., VEDDER A., COPPOLILLO P.B. & WARD S.E. (2002). A conceptual model for conservation planning based on landscape species requirements. *Landscape and Urban Planning*. Numéro 58. Pages 41-56.
- SCOTT D. & LEMIEUX C. (2005). Climate change and protected area policy and planning in Canada. *Forestry chronicle*. Volume 81. Numéro 5. Pages 696-703.
- SPECTOR S. (2002). Biogeographic crossroads as priority areas for biodiversity conservation. *Conservation Biology*. Numéro 16. Pages 1480-1487.

VOS C.C., BERRY P., OPDAM P., BAVECO H., NIJHOF B., O'HANLEY J., BELL C. & KUIPERS H. (2008). Adapting landscapes to climate change: examples of climate-proof ecosystem networks and priority adaptation zones. *Journal of applied ecology*. Numéro 45. Pages 1722-1731.

WELCH D. (2008). What should protected area managers do to preserve biodiversity in the face of climate change?. *Biodiversity (ottawa)*. Volume 9. Numéro 3 avril. Pages 84-88.

WILLIAMS P., HANNAH L., ANDELMAN S., MIDGLEY G., ARAUJO M., HUGHES G., MANNE L., MARTINEZ-MEYER E. & PEARSON R. (2005). Planning for climate change: identifying minimum-dispersal corridors for the cape *proteaceae*. *Conservation biology*. Volume 19. Numéro 4. Pages 1063-1074.

WITTE I. & TOUROULT J. (2014). Répartition de la biodiversité en France métropolitaine : une synthèse des Atlas faunistiques. *Vertigo*. Volume 14. Numéro 1. Pages 1-28.

### **Littérature grise**

BOURDIL C. & VANPEENE-BRUHIER S. (2013). Séquence ERC & Continuités écologiques - Réflexions sur la prise en compte des atteintes portées aux continuités écologiques dans la compensation des projets d'aménagement. Note d'analyse bibliographique. Irstea. 62 pages.

### **Rapports techniques ou d'expertise**

BERTON S. (2014). *L'intégration des changements climatiques dans les processus décisionnels de hiérarchisation des actions visant le maintien de la biodiversité et des continuités écologiques dans le département de l'Hérault*. Maîtrise d'environnement Université de Sherbrooke / Master 2 en gestion de l'environnement, de la biodiversité et des territoires Université Montpellier II. 127 pages.

COMER P., CRIST P., TAGUE J., VARLEY I. & BOW I. (2012). *Climate Change Adaptation Strategies for BLM Resource Management in Southern Nevada*. A Pilot Test of the Yale Mapping Framework Final Draft Report to Yale University. 71 pages.

COSTE S., COMOLET-TIRMAN J., GRECH G., PONCET L. & SIBLET J-Ph. (2010). *Stratégie Nationale de Création d'Aires Protégées : Première phase d'étude – Volet biodiversité*. Rapport SPN 2010 / 7 MNHN (SPN) – MEEDDM, Paris. 84 pages.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (2014). *Spatial analysis of green infrastructure in Europe*. 53 pages. ISSN 1725-2237.

HOPKINS J.-J., ALLISON H.-M., WALMSLEY C.-A., GAYWOOD M. & THURGATE G. (2007). *Conserving biodiversity in a changing climate: guidance on building capacity to adapt*. DEFRA, London. 25 pages.

ROOIJ S. VAN, H. BAVECO, R. BUGTER, M. VAN EUPEN, P. OPDAM & E. STEINGRÖVER (2007). *Adaptation of the landscape for biodiversity to climate change. Terrestrial case studies: Limburg (NL), Kent and Hampshire (UK)*. Alterra report 1543. Alterra, Wageningen-UR, Wageningen, The Netherlands. Report in the framework of the BRANCH project. 27 pages.

SCIENCE FOR ENVIRONMENT POLICY (2012). *The Multifunctionality of Green Infrastructure*. In-depth Reports. 37 pages.

SORDELLO R., COMOLET-TIRMAN J., DA COSTA H., DE MASSARY J-C., GRECH G., DUPONT P., ESCUDER O., HAFFNER P., ROGEON G., SIBLET J-P., TOUROULT J. (2011a). *Trame verte et bleue – Critères nationaux de cohérence – Contribution à la définition du critère pour une cohérence interrégionale et transfrontalière*. Service du patrimoine naturel, Muséum national d'histoire naturelle, Paris. 54 pages.

SORDELLO R., COMOLET-TIRMAN J., DE MASSARY J.-C., DUPONT P., HAFFNER P., ROGEON G., SIBLET J.-P., TOUROULT J., TROUVILLIEZ J. (2011b). *Trame verte et bleue – Critères nationaux de cohérence – Contribution à la définition du critère sur les espèces*. Service du patrimoine naturel, Muséum national d'histoire naturelle, Paris. 57 pages.

SORDELLO R., GAUDILLAT V., SIBLET J.-P., TOUROULT J. (2011c). *Trame verte et bleue – Critères nationaux de cohérence – Contribution à la définition du critère sur les habitats*. Service du patrimoine naturel, Muséum national d'histoire naturelle, Paris. 29 pages.

WITTE I., TOUROULT J. & PONCET L. (2013). Distribution spatiale et complémentarité des « hotspots » de biodiversité en France métropolitaine. Valorisation des données des Atlas. Service du patrimoine naturel, Muséum national d'Histoire naturelle. 90 pages.

### **Documents cadre ou législatifs**

BRASSARD F., BOUCHARD A.-R., BOISJOLY D., POISSON F., BAZOGE A., BOUCHARD M.-A., LAVOIE G., TARDIF B., BERGERON M., PERRON J., BALEJ R. & BLAIS D. (2010). *Portrait du réseau des aires protégées au Québec – Période 2002-2009*. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs. Disponible en ligne sur : [http://www.mddep.gouv.qc.ca/biodiversite/aires\\_protgees/portrait02-09/](http://www.mddep.gouv.qc.ca/biodiversite/aires_protgees/portrait02-09/)

CONFÉDÉRATION SUISSE (2004). *Réseau écologique national (REN)*. Office fédéral de l'environnement OFEV. 132 pages. Disponible sur : <http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/00540/index.html?lang=fr>

MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ÉNERGIE (2014a). *Document-cadre « Orientations nationales pour la préservation et la remise en bon état des continuités écologiques »*. Approuvé par le Décret n°2014-45 du 20 janvier 2014. 71 pages. Disponible sur : <http://www.trameverteetbleue.fr/presentation-tvb/references-juridiques>

MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ÉNERGIE (2014b). Instruction du Gouvernement du 22 avril 2014 relative à la mise à jour des schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux et des programmes de mesures associés. 7 pages.

MINISTERE DE L'ÉCOLOGIE, DE L'ÉNERGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE LA MER (2009). *Plan de restauration de la continuité écologique des cours d'eau*. 5 pages.

### **Actes de colloques**

HAMON C. (2012a). Compte rendu de la journée d'échange « Trame verte et bleue et changement climatique ». Fédération des parcs naturels régionaux. 14 pages.

HAMON C. (2012b). Fiche de synthèse sur la journée d'échange « Trame verte et bleue et changement climatique ». Fédération des parcs naturels régionaux. 6 pages.

HAMON C. (2012c). Note de bibliographie sur la journée d'échange « Trame verte et bleue et changement climatique ». Fédération des parcs naturels régionaux. 4 pages.

VANPEENE S. (2012). Compte rendu du séminaire "Biodiversité et adaptation au changement climatique". 3 octobre 2012, Paris.

### **Supports de vulgarisation/communication**

VOS C.-C., VAN DER HOEK D.-J. & VONK M. (2009). *Designing a climate corridor for wetland ecosystems as an adaptation strategy to climate change*. Alterra Green World research [Ppt]. 24 diapos.



## **Autres documents**

AGENCE DE L'EAU RHÔNE-MÉDITERRANÉE-CORSE. *Adaptation au changement climatique*. Disponible sur : <http://www.eaurmc.fr/climat.html>

OURANOS. Réseau québécois de scientifiques et professionnels travaillant sur le changement climatique et ses impacts. Disponible sur : <http://www.ouranos.ca>

**- PARTIE 5 -**

**PREPARER L'AVENIR POUR MIEUX  
PRENDRE EN COMPTE LE CHANGEMENT  
CLIMATIQUE DANS LES RESEAUX  
ECOLOGIQUES**



## RESUME DE LA PARTIE 5

**L**a recherche a produit beaucoup de connaissances nouvelles concernant les impacts du changement climatique sur la biodiversité au cours de ces 10 dernières années. Malgré ces avancées, de fortes lacunes persistent, par exemple pour certains compartiments de la biodiversité (par ex : la faune du sol) ou pour certains milieux (par ex : les milieux littoraux). De même, seule la richesse spécifique est étudiée dans la majorité des cas, ce qui n'est pas l'indice le plus pertinent pour les stratégies de conservation. La connaissance est plus faible également à l'échelle des écosystèmes et des communautés : fonctionnement, interactions, effets de seuils liés aux événements climatiques extrêmes. Les liens entre fragmentation et changement climatique peuvent être largement approfondi, par exemple pour comprendre la plus-value de la connectivité dans la réduction du changement climatique (services écosystémiques).

On constate aussi globalement que les approches sont souvent centrées sur le seul changement climatique. Or, il semble nécessaire de privilégier des démarches multifactorielles car le changement climatique ne peut pas être isolé des autres menaces qui pèsent sur la biodiversité. De plus, il existe une asynchronie entre le changement climatique, dont la menace est à long terme, et d'autres pressions anthropiques (pollutions, artificialisation, ...), dont les effets sont immédiats. Pour ces raisons, il est indispensable d'encourager les approches dynamiques, évolutives, adaptatives, s'intéressant aux changements globaux, dont le changement climatique fait partie, et en analysant les évolutions à court, moyen et long-terme. A ce sujet, plusieurs études pointent d'ailleurs un rôle moins important qu'escompté du changement climatique dans les modifications d'aires de répartition, ce qu'il conviendrait de surveiller.

Pour acquérir des connaissances validées par le terrain, les liens entre recherche, gestionnaires et décideurs sont à favoriser, en s'appuyant notamment sur les aires protégées comme des observatoires pour suivre les effets du changement climatique et comme des laboratoires pour expérimenter des mesures innovantes mises en place par de la gestion adaptative.

Le renforcement de ce lien doit aussi pouvoir alimenter la traduction concrète des résultats de recherche en recommandations pour les opérations d'aménagement et de gestion, à travers notamment l'élaboration de guides pratiques (conseils pour le choix d'essences lors de plantations, ...). A l'intérieur même de la recherche, les interactions entre communautés du climat et de l'écologie sont à renforcer pour mieux articuler la chaîne analytique de la modélisation.

Les méthodes de modélisation se sont fortement perfectionnées, à la fois concernant les projections climatiques et les projections d'aires de répartition. Néanmoins, l'usage de cet outil reste l'un des sujets sur lesquels il est le plus urgent de progresser encore dans les années à venir afin de réduire les incertitudes et de maîtriser davantage les biais. De nombreuses pistes d'amélioration existent comme d'effectuer plus systématiquement des études comparatives de modèles et sur la base de scénarios climatiques distincts, d'améliorer les données d'entrée ou encore de choisir plus justement les échelles d'analyse. Là encore, il est préconisé de s'engager dans des approches globales qui s'appuient sur des modèles couplés afin d'intégrer notamment les effets rétroactifs (perméabilité du sol, albédo, ...) et la dimension fonctionnelle (traits de vie), de diversifier les espèces étudiées, de prendre en compte les trois axes d'adaptation de la biodiversité et d'intégrer tous les paramètres du changement climatique (et pas uniquement la température et les précipitations).

La révision des orientations nationales des projets SCAP et TVB pourront bénéficier des avancées de la connaissance marquées depuis leur première version et qu'a présentées ce rapport. Les travaux innovants d'identification de corridor sur la base de l'évolution des enveloppes climatiques pourraient alimenter une nouvelle réflexion concernant les grandes continuités nationales du projet TVB. Pour la SCAP, il est préconisé avant tout d'effectuer une évaluation du réseau d'aires protégées français pour vérifier sa représentativité au regard de l'évolution du climat et ainsi mettre en évidence les éventuelles lacunes (spatiales, fonctionnelles, ...) à horizon 2050 ou 2100.

# **I. TRAJECTOIRES A INFLECHIR, CONNAISSANCES LACUNAIRES A COMBLER ET DEVELOPPEMENT A ENGAGER**

Cette partie a été alimentée par :

- la réflexion et l'expertise propre du SPN notamment sur la base de toutes les parties précédentes du rapport qui synthétisent la littérature scientifique,

- les réflexions du *Conseil scientifique du SPN sollicité fin 2013*,

- *l'exploitation de documents faisant déjà état de propositions, notamment :*

- *la synthèse bibliographique « Connaissance des impacts du changement climatique sur la biodiversité en France métropolitaine » du GIP-ECOFOR qui liste un certain nombre de lacunes et de pistes pour les résorber concernant le changement climatique et la biodiversité en général (GIP ECOFOR & MEDDTL, 2010 ; Massu & Landmann, 2011),*

- *les conclusions du Conseil scientifique de l'ONEMA qui s'est réuni en novembre 2013 pour contribuer au forum de consultation pour la recherche environnementale ALLEnvi (ONEMA, 2013). Le CS de l'ONEMA a ainsi identifié plusieurs axes de recherche et de développement pour l'étude des impacts du changement climatique sur les ressources en eau et les milieux aquatiques, en interaction avec les autres changements globaux (biodiversité, évolution des usages des sols, des activités des territoires...) ».*

## **I.1. Trajectoires à infléchir**

Cette partie regroupe des propositions d'ordre général pour orienter les politiques de réseaux écologiques dans les directions qui paraissent nécessaires au regard du changement climatique.

**1- Développer les approches multifactorielles** en croisant les différentes pressions qui s'exercent sur la biodiversité aux côtés du changement climatique (pollutions, espèces exotiques envahissantes, changement d'occupation du sol, fragmentation de l'habitat, surexploitation, ...) et qui forment ce que l'on appelle les changements globaux (ONEMA, 2013). Ce point est d'autant plus important que le changement climatique est une menace de long terme et que, dans le temps présent, d'autres pressions peuvent être les plus néfastes et menacer directement certaines espèces. Il est donc important de prendre en compte le changement climatique dans les réseaux écologiques sans en faire une entrée unique, notamment dans l'identification des corridors pour couvrir les enjeux présents et futurs.

**2- Développer les approches qui tiennent compte des interactions entre compartiments** (physiques, biologiques, sociologiques, ...) en s'appuyant sur une véritable transversalité disciplinaire (ONEMA, 2013).

**3- Aller vers une gestion évolutive et adaptative de la biodiversité et plus particulièrement des espaces naturels**, moins fixistes sur les enjeux espèces-habitats. Il s'agit, sans changer les aires protégées, d'évaluer et réviser périodiquement les objectifs de conservation. Cela peut passer par un développement de plans d'adaptation, d'analyses de risques ou encore d'indicateurs de vulnérabilité et de résilience au changement climatique.

4- **Intégrer autant que possible une notion « directionnelle »** aux outils d'identification des continuités, comme la théorie des graphes et la théorie des courants, pour une meilleure prise en compte du changement climatique.

5- **Favoriser les liens entre recherche / gestionnaires / décideurs** (Massu & Landmann, 2011). Cette problématique classique n'est pas propre aux questions de changement climatique mais est particulièrement importante en biologie de la conservation, science de l'urgence qui se veut au service de l'action.

6- **Pratiquer les analyses sur le long terme et à échelle globale**, en cohérence avec le rayon d'action du climat. Par exemple, les analyses de l'efficacité des aires protégées doivent se faire à l'échelle de leur réseau et pas uniquement site par site.

7- **Privilégier les approches associant modélisation, expérimentation et observations** (Massu & Landmann, 2011).

8- **Renforcer les systèmes d'observations et de centralisation de données**, qu'il s'agisse de données naturalistes, de bases de données de traits de vie ou d'observatoires du climat.

9- **Développer le génie écologique** en matière de changement climatique.

11- **Définir des stratégies et des mesures d'adaptation « sans regret »** et évaluer ces stratégies pour en tirer des expériences (ONEMA, 2013).

12- **Favoriser le lien entre la communauté du climat (climatologues, météorologues, ...) et la communauté des impacts (écologues, naturalistes, ...)** (Sordello, 2013 ; Philippe Dandin *in* Vanpeene, 2012).

## **I.2. Lacunes identifiées dans la connaissance fondamentale**

Cette partie regroupe des secteurs qui sont ressortis comme lacunaires au sein de la connaissance fondamentale à travers les publications scientifiques analysées pour ce rapport, et qui mériteraient par conséquent de bénéficier de programmes de recherche pour être élucidés ou approfondis. L'identification de ces thèmes peut donc servir par exemple à la priorisation de nouveaux appels à projets autour du changement climatique.

### **I.2.1. Parties méconnues au sein de la biodiversité et des milieux naturels**

> En termes de milieux

**Les sols et les sédiments ainsi que le littoral** (notamment les littoraux meubles) s'avèrent être extrêmement peu présents dans le corpus bibliographique que nous avons constitué et ce constat est vraisemblablement assez représentatif de la littérature scientifique sur le changement climatique (Massu & Landmann, 2011 ; ONEMA, 2013).

La stabilité du trait de côte est souvent abordée pour les plages, mais rarement pour les littoraux abrités ou semi-abrités alors qu'ils représentent un linéaire important. Il existe actuellement une méconnaissance de leur devenir, en raison : a) De la montée du niveau marin ; b) Des apports solides fluviaux « dénaturés » (ouvrages de déconnexion, usage des sols) ; c) D'un trait de côte souvent figé par des aménagements ou une occupation du littoral ; d) De la conchyliculture qui impacte la morphodynamique (ONEMA, 2013).

> En termes d'organismes

Au sein des vertébrés, les oiseaux, les poissons et dans une moindre mesure les mammifères semblent les plus représentés en publications au sein du corpus. Peu de références traitent des amphibiens et moins encore des reptiles. Au sein d'un même groupe il peut également exister des disparités entre ensemble taxonomique (par exemple les chiroptères paraissent peu étudiés parmi les mammifères, pourtant susceptible d'être très affectés par le changement climatique compte tenu de leur dépendance à la température) ou fonctionnel (par exemple l'impact du changement climatique sur la migration des oiseaux est documenté alors qu'il y a moins d'études concernant les incidences sur les oiseaux sédentaires).

Comme c'est le cas dans d'autres domaines, **les invertébrés** sont très nettement sous-étudiés. Chez les insectes, les publications portant sur des papillons semblent prédominer, quelques-unes traitent des odonates et aucune des orthoptères. Les Coléoptères, qui représentent numériquement l'ordre dominant de la biodiversité terrestre est très peu étudié, hormis les bousiers. Le groupe des araignées n'est concerné que par deux ou trois publications au sein du corpus.

Enfin, il apparaît urgent d'investir des études sur **les champignons, les bactéries et la faune des sols**, en particulier la composante microbienne, tant dans son fonctionnement que dans sa composition (Massu & Landmann, 2011).

La flore n'est pas délaissée dans les études et la connaissance semble être même au moins aussi abondante que pour la faune.

Pour être plus précis et efficace, il faudrait par ailleurs distinguer l'état de la bibliographie en fonction des sous-thématiques (phylogénie, projection de répartition, connaissances sur les traits de vie, ...) car un même groupe peut bénéficier de nombreuses connaissances dans un de ces sous-domaines et pas dans un autre. Un traitement plus poussé du corpus pourrait permettre éventuellement d'aboutir à des résultats plus fins en rattachant pour chaque thème les articles aux différents groupes biologiques traités ou en les regroupant par approche fonctionnelle.

Enfin, ce travail aboutit au constat que les différentes composantes de la biodiversité ne sont pas traitées de manière équivalente. Seule la richesse spécifique est étudiée pour la majorité des études alors que c'est un objectif de conservation très réducteur, les notions de composition des communautés et de diversité bêta étant tout autant essentielles pour les stratégies de conservation. De même, la diversité génétique et fonctionnelle peuvent s'avérer être des composantes importantes dans le cadre de l'adaptation au changement climatique.

## 1.2.2. Thématiques et domaines sous-investis par la recherche

> Sur l'ajustement spatial

### **1- Les différents critères écologiques qui agissent comme une pression de sélection sur les espèces dans le cadre du changement climatique.**

Il est en effet important désormais de dépasser l'approche simpliste « décalage en altitude et en latitude ». Ce rapport a d'ores et déjà mis en évidence plusieurs paramètres déterminants tels que la spécialisation à l'habitat ou les traits de vie liés à la mobilité, qu'il faudrait approfondir et compléter, par de nouvelles recherches et des méta-analyses pour savoir s'ils sont généralisables. Étudier par exemple les interactions entre la capacité de dispersion et l'amplitude de niche climatique afin d'identifier les groupes d'espèces sur lesquels il est le plus pertinent de construire des scénarios et stratégies (si un dispositif de continuité écologique convient à ce type d'espèces, il peut être utile pour de nombreuses autres). Les espèces à faible

capacité de dispersion et à niche climatique étroite seraient les plus vulnérables et pourraient constituer des modèles intéressants, mais on ne peut rejeter d'emblée l'hypothèse d'une forte capacité adaptative locale de ces taxons. Il faut ainsi promouvoir des analyses multicritères pour tenter d'identifier les espèces les plus vulnérables en croisant les facteurs biologiques, écologiques, climatiques, degrés de menace (Foden *et al.*, 2013).

## **2- Les processus qui opèrent au niveau des limites d'aires de répartition.**

Les fronts d'avancée des aires de répartition sont des zones à enjeux car c'est par elles que les espèces vont se déplacer en suivant le climat. Étudier également les différences qu'il peut y avoir entre ce front de colonisation et le front de « retrait » (est-il justement un front de retrait ou bien reste-t-il stable ?). Il existe effectivement des cas où l'on constate peu ou pas de recul sur la marge chaude. Ceci tiendrait à des facteurs limitant différents selon la marge « chaude » ou « froide » de la répartition. Par exemple, dans le cas des remontées en altitude, la température semble être un facteur clé pour l'altitude maximale alors que la compétition serait un facteur déterminant sur la limite de basse altitude (Chen *et al.*, 2009). Il est possible qu'il y ait aussi un retard (dette d'extinction) dans la contraction de la marge « chaude ».

Nous avons par ailleurs vu que certaines espèces se déplaçaient en sens contraire à l'évolution du climat mais peu d'études portent sur ce sujet (Lenoir *et al.*, 2010b).

## **3- Les vitesses d'ajustement.**

Dans la continuité des publications citées dans la note (ex : Devictor *et al.*, 2008 et Devictor *et al.*, 2012 ; Bertrand *et al.*, 2011) développer la connaissance sur la vitesse de colonisation des espèces afin de mieux comprendre comment elle varie. Par exemple pour les oiseaux, les résultats de Hickling *et al.* (2006) en Angleterre montrent une vitesse d'ajustement de 1 km/an alors qu'en France elle est de 5 km/an. Or, en France ces espèces sont au cœur de leur aire de répartition alors que leur limite passe en Grande-Bretagne. Ce constat interroge, notamment par rapport à la question des limites d'aires précédemment évoquée.

Il serait nécessaire par ailleurs de disposer de données de distance/vitesse d'ajustement pour d'autres groupes biologiques que les oiseaux, les papillons et la flore, notamment pour les groupes sous-investis au sein de la biodiversité évoqués précédemment. La comparaison entre les différents types d'ajustements altitudinal, latitudinal, littoral doit être aussi approfondie. En lien avec la vitesse d'ajustement, la question de l'effet retard par rapport à l'évolution du climat est aussi importante.

## **4- L'influence du changement climatique dans la propagation des espèces invasives, maladies, effets indésirables.**

Nous avons vu que les projections pour les espèces introduites comportaient davantage d'incertitudes encore que pour les espèces autochtones car ces espèces exotiques n'ont pas encore atteint leur potentiel de répartition dans notre pays, indépendamment du climat (Poulet, 2012).

## **5- Les affinités météorologiques des espèces et les différences de réaction entre climats/microclimats.**

La réponse des espèces face à l'évolution du climat apparaît différente, en fonction notamment des préférences thermiques de ces espèces (caractère thermophile/cryophile) et de leurs stratégies d'adaptation métabolique aux variations climatiques (cf. Partie 1 du rapport).

Identifier quelle est la météo-dépendance des espèces : événements extrêmes, tendances longues, modification de phase, changement d'amplitude. Ce type de connaissance peut permettre ensuite de mieux exploiter les données météorologiques (Philippe Dandin *in* Vanpeene, 2012).

Comme évoqué, le caractère thermophile ou cryophile d'un milieu ne tient pas uniquement au climat mais à la rencontre des paramètres climatiques et des paramètres édaphiques. Il existe donc des microclimats « antinomiques » avec les enveloppes climatiques dans lesquelles elles se trouvent (Sordello *et al.*, 2011a), susceptible de constituer des habitats refuges pour certains organismes..



> Sur la relativisation de l'ajustement spatial

### **1- La part du changement climatique dans l'ajustement spatial des espèces par rapport à d'autres pressions voire par rapport au hasard.**

Ce sujet fait l'objet de peu de recherches. Grytnes *et al.* (2014) montrent par exemple que la température seule explique finalement assez peu le déplacement des aires de répartition pour certaines espèces de plantes alpines et que ces déplacements ne sont pas plus importants que ceux dus au hasard (liés à la variabilité environnementale, aux traits de vie d'espèce, ...). Groom (2013) étudie le déplacement de répartition de plusieurs espèces végétales vers le Nord et conclut à son tour que le changement climatique n'est pas le premier facteur responsable dans ces mouvements d'aires. Bodin *et al.* (2013) nuancent également le rôle du changement climatique dans la montée en altitude des aires de répartition des forêts de montagne, attribuant ce phénomène essentiellement au processus naturel de maturation de ces milieux.

### **2- La part entre fluctuation annuelle et tendance d'adaptation face à l'évolution durable du climat.**

Permettre de mieux faire la part entre réaction aux variations météorologiques ponctuelles, locales et inhabituelles et réaction pérenne à un changement climatique de long terme, à l'instar des études de Julliard *et al.* (2004) ou Saether *et al.* (2006).

**3- Les interactions entre génotype et environnement** afin de mieux évaluer les capacités locales d'adaptation, notamment autres que spatiales. Approfondir le phénomène de la microévolution et la proportion entre adaptation phénotypique et adaptation génotypique.

**4- La translocation comme recours en cas d'ajustement spatial impossible.** Efficacité, questions éthiques soulevées, synergies possibles avec des programmes de réintroduction en cours ou envisagés.

> Sur l'échelle des écosystèmes et des communautés

**1- La connaissance au niveau des assemblages d'espèces** (remaniement des interactions, modification des réseaux trophiques, ajustements espèces introduites-espèces autochtones...) dans le contexte de la redéfinition des aires de répartition. Ces aspects sont encore très peu connus (Daufresne & Boet, 2007) et c'est ce qu'ont souligné à la fois le CS ONEMA (ONEMA, 2013), la synthèse de Massu & Landmann (2011) et le CS du SPN en 2013. Il est nécessaire désormais de comprendre les conséquences du changement climatique au niveau des communautés et des écosystèmes par des approches multigroupes et multisites (cf. § 1.1.).

**2- Le fonctionnement et le comportement des écosystèmes** face au changement climatique et notamment la possibilité de points de basculement et de phénomènes non linéaires à tous les niveaux (climatiques, pédologiques, hydrologiques, biologiques, écologiques, sociologiques...).

**3- Les risques liés aux évènements extrêmes** accentués par le changement climatique, qui occasionnent des ruptures brutales dans les écosystèmes pouvant potentiellement aller jusqu'à l'extinction d'espèces, contrairement à l'hypothèse de la perturbation intermédiaire. Les risques des petites populations face aux catastrophes dues au changement climatique.

> Sur les synergies entre fragmentation et changement climatique

### **1- La fragmentation comme filtre sur les espèces les moins mobiles.**

Nous savons que la dispersion est un facteur limitant pour l'ajustement spatial et que la fragmentation est un facteur limitant la dispersion. Le phénomène est en revanche plus complexe. Il existe par exemple des événements rares de dispersion extrême chez des espèces, y compris à faibles capacités moyenne de dispersion. Pearson & Dawson (2005) montrent que ces événements ne sont pas dépendants du niveau de fragmentation, sans doute parce qu'ils sont assurés par des individus aux capacités « hors normes » qui sont donc par définition moins sensibles aux barrières que leurs congénères. Par ailleurs, le changement climatique peut faire évoluer les capacités de dispersion elles-mêmes comme nous l'avons vu sur les papillons dont la dispersion est accrue par temps clémente (Cormont *et al.*, 2011 ; Walters *et al.*, 2006).

D'autres auteurs montrent qu'une capacité de dispersion longue distance pour une espèce lui donne à la fois un fort potentiel d'ajustement spatial mais l'expose aussi à des risques de mortalités pendant l'évènement de dispersion potentiellement plus élevés que les espèces dispersant à courte distance. Au final, la capacité de dispersion pourrait se révéler à double tranchant pour le fonctionnement métapopulationnel, notamment pour les espèces ayant naturellement peu d'effectifs (longévives, en sommet des chaînes alimentaires, ...) (Eklof *et al.*, 2012).

Travis *et al.* (2013) mettent en avant l'importance de travailler sur la dispersion : quelles réponses en fonction des traits dispersants, par groupes biologiques et quelle influence du changement climatique sur la dispersion elle-même (possibilité d'évolution).

**2- La fragmentation comme pénalité initiale** pour les espèces aux répartitions déjà morcelées (isolement naturel (espèces endémiques, espèces insulaires, ...) ou anthropique) qu'elles soient mobiles ou non.

**3- La fragmentation/connectivité comme vecteur des effets indésirables** du changement climatique (incendies, propagation d'espèces invasives, ...)

**4- La connectivité versus qualité des habitats** pour répondre le plus efficacement possible au changement climatique. Ceci rejoint le débat récurrent de l'impact propre à la fragmentation par rapport à la quantité/qualité d'habitat mais en y intégrant la dimension temporelle de l'évolution du climat.

**5- La plus-value de la connectivité dans la mitigation** du changement climatique (captation du carbone par exemple). Ce sujet paraît être fondamental pour la TVB et quasi totalement inexploré. L'étudier permettrait de mieux positionner et définir la TVB en tant que projet réduisant les effets du changement climatique en plus de permettre aux espèces de s'y adapter.

**6- Les interactions positives « inattendues » entre fragmentation et changement climatique** qu'ils conviendraient de mieux recenser et comprendre, telles que la diminution des contraintes de la fragmentation par l'accroissement des températures mis en avant chez les insectes (Cormont *et al.*, 2011 ; Hill *et al.*, 2011) ou concernant le phénomène incendie.

## **I.3. Études analytiques à mener à partir de la littérature disponible**

**1- Synthétiser les différentes études qui existent sur les zones refuges et les routes de colonisation passées post-glaciations** (approche de biogéographie historique). Ces études sont désormais nombreuses mais il ne semble pas exister véritablement de synthèse multitaxons et qui soit relativement exhaustive pour l'Europe de l'Ouest. Ce rapport a commencé à en faire une première retranscription mais il paraît important de mener un travail approfondi et spécifique pour disposer d'un socle complet et robuste sur la phylogéographie et la phylogénie. Cette connaissance centralisée permettrait notamment d'alimenter la

révision du critère de cohérence « cartes nationales » en ajustant/confirmant encore davantage les grandes continuités nationales. Dans tous les cas, une bonne connaissance des phénomènes passés ne peut être que bénéfique.

**2- Faire une synthèse des ajustements d'aires déjà constatés de nos jours**, par conséquent issus des observations et non des projections, en analysant l'effet des traits de vie. Étudier la possibilité d'effectuer une méta-analyse.

**3- Faire une synthèse complète des études de modélisation sur l'ajustement spatiale.** Étudier là aussi la possibilité de faire des méta-analyses pour décrire les résultats de manière objective en tenant compte des incertitudes et en comparant les différents paramètres des modèles. Par exemple pour la dispersion, il serait intéressant d'effectuer une analyse sur les publications en distinguant bien quelle façon de mesurer la dispersion a été employée : dispersion moyenne (mean dispersal), dispersion réelle (realistic dispersal), dispersion réelle avec quelques événements rares de dispersion longue distance (Engler *et al.*, 2009). Cette proposition 3- resterait néanmoins moins porteuse de conclusion que la 2- dans la mesure où il s'agit de d'études prédictives et non d'ajustements observés.

**4- Encourager le développement de guides à destination des gestionnaires et aménageurs pour leurs besoins concrets :** conseils de choix des essences pour leurs plantations (qui soient adaptées au climat, non allergènes, ...). Ces éléments pourraient être utiles notamment dans le cadre de mesures de restauration de corridors nécessitant de la revégétalisation (berges, haies, toits végétalisés, ...).

#### **I.4. Propositions pour améliorer l'usage de la modélisation**

Comme nous l'avons vu, les méthodes de modélisation mises en œuvre dans les publications destinées à prévoir les conséquences du changement climatique comportent un certain nombre d'incertitudes et de biais (cf. Figure 43). Plusieurs auteurs ont commencé à réfléchir sur des solutions pour améliorer l'usage de la modélisation.

Thuiller *et al.* (2008) pointent quatre grands challenges à relever dans la modélisation pour améliorer les prédictions consistant à intégrer :

- les processus de migration,
- les processus aux limites d'aires de répartition,
- les interactions entre espèces,
- les interrelations entre effets du climat et occupation du sol.

Massu & Landmann (2011) préconisent une approche intégrative liant les observations, expériences et modèles pour réduire les facteurs d'incertitude des déterminants de la distribution des espèces et leur fonctionnement. Les auteurs soulignent la nécessité d'aller vers des modèles multifactoriels et couplés pour une intégration :

- des compartiments Climat - Biodiversité - Dynamiques socio-économiques,
- de la gestion,
- des observations - expériences - modélisation.

Bellard *et al.* (2012) listent plusieurs paramètres à améliorer dans les modèles et la partie sur les incertitudes de l'ajustement spatial liées aux modélisations (Partie 2 § VI.) font ressortir les mêmes points.

1- Permettre un **meilleur choix des scénarios climatiques** retenus dont nous avons vu en effet qu'ils peuvent engendrer des différences notoires dans les conséquences constatées sur la faune et la flore, tout en sachant que dans le même temps il n'y a pas de modèle idéal (Beaumont *et al.*, 2008). Tenir compte de la variabilité intermodèle et de la variabilité intrinsèque à chaque modèle (Beaumont *et al.*, 2007).

2- **Disposer de données d'entrée de meilleure qualité (résolution, homogénéité, effort de prospection, ...)** qu'elles soient climatiques ou écologiques, dont les caractéristiques et leurs biais, déterminent une grande part des incertitudes dans les résultats des projections (Beaumont *et al.*, 2007). Il est important aussi de confronter les sorties des modèles aux observations actuelles, en faisant tourner les modèles sur des périodes de passé lointain et de présent ou de passé proche et de présent.

3- **Mieux aiguiller le choix de l'échelle d'analyse** (région, pays, Europe, Monde) et des **niveaux de résolution des modélisations qui doivent aussi être cohérents entre étapes de la chaîne analytique**, nous avons vu que ces incohérences peuvent jouer fortement sur la fiabilité des résultats (sous-estimation ou surestimation des impacts). Des analyses comparatives entre modèles seraient essentielles pour avancer sur cette question, relativement rarement posée pour le moment.

4- **Développer des modèles « couplés »** (c'est-à-dire un couplage entre modèles climats et modèles impacts) ce qui permettrait d'intégrer à la fois l'évolution du climat et les effets des conséquences de l'évolution du climat sur cette évolution du climat (effets rétroactifs ou feedback) (Higgins & Harte, 2008). Il existe en effet de nombreuses interactions, notamment entre végétation et climat, qui font que les modifications engendrées par le climat sur les habitats naturels vont ensuite elles-mêmes modifier les prévisions climat. Or, de nos jours cette rétroaction du biologique vers le climat n'est pas considérée dans les modèles. Parmi ces effets rétroactifs, il existe les conséquences positives du changement climatique qui précisément ne sont que rarement intégrées (période hivernale plus clémente, productivité accrue pour certaines espèces, fixation du Carbone plus importante, ...).

5- **Diversifier les espèces étudiées** car un biais fréquent est constaté en faveur des vertébrés et au dépens des invertébrés. Ce constat est nettement mis en évidence par le corpus constitué pour ce rapport. Une diversification est nécessaire entre études mais aussi au sein d'une même étude en tendant vers des analyses de cortèges fonctionnels ou multitaxons, et surtout de taxons en interaction (plantes – herbivores par exemple).

6- **Ajouter une dimension fonctionnelle aux modèles impacts pour les projections de répartition.** Actuellement, les modèles impacts se basent quasi exclusivement sur la répartition d'espèces, en présence/absence uniquement. C'est donc une simplification forte de la réalité. Quelques modèles intègrent l'occupation du sol mais il est plus rare qu'ils intègrent les traits de vie des espèces étudiées, leur abondance, et encore moins les interactions entre espèces au sein des communautés (Gilman *et al.*, 2010). La dispersion devrait être systématiquement intégrée (Travis *et al.*, 2013).

7- **Développer des modèles permettant l'étude des communautés et écosystèmes** car la plupart se concentrent sur des extinctions ou ajustements d'espèces et occultent donc les échelles supérieures de la biodiversité. Les interactions entre espèces doivent être considérées pour espérer s'approcher des conséquences que le changement climatique aura sur la biodiversité. Généralement, les modélisations testent quelques espèces et non les écosystèmes dans leur globalité et s'appliquent à une échelle locale (Gilles Landrieu *in* Vanpeene, 2012). Il existe ainsi un besoin de compréhension des processus à l'échelle des écosystèmes : synergie, effets en cascade, effet seuil, rétroaction.

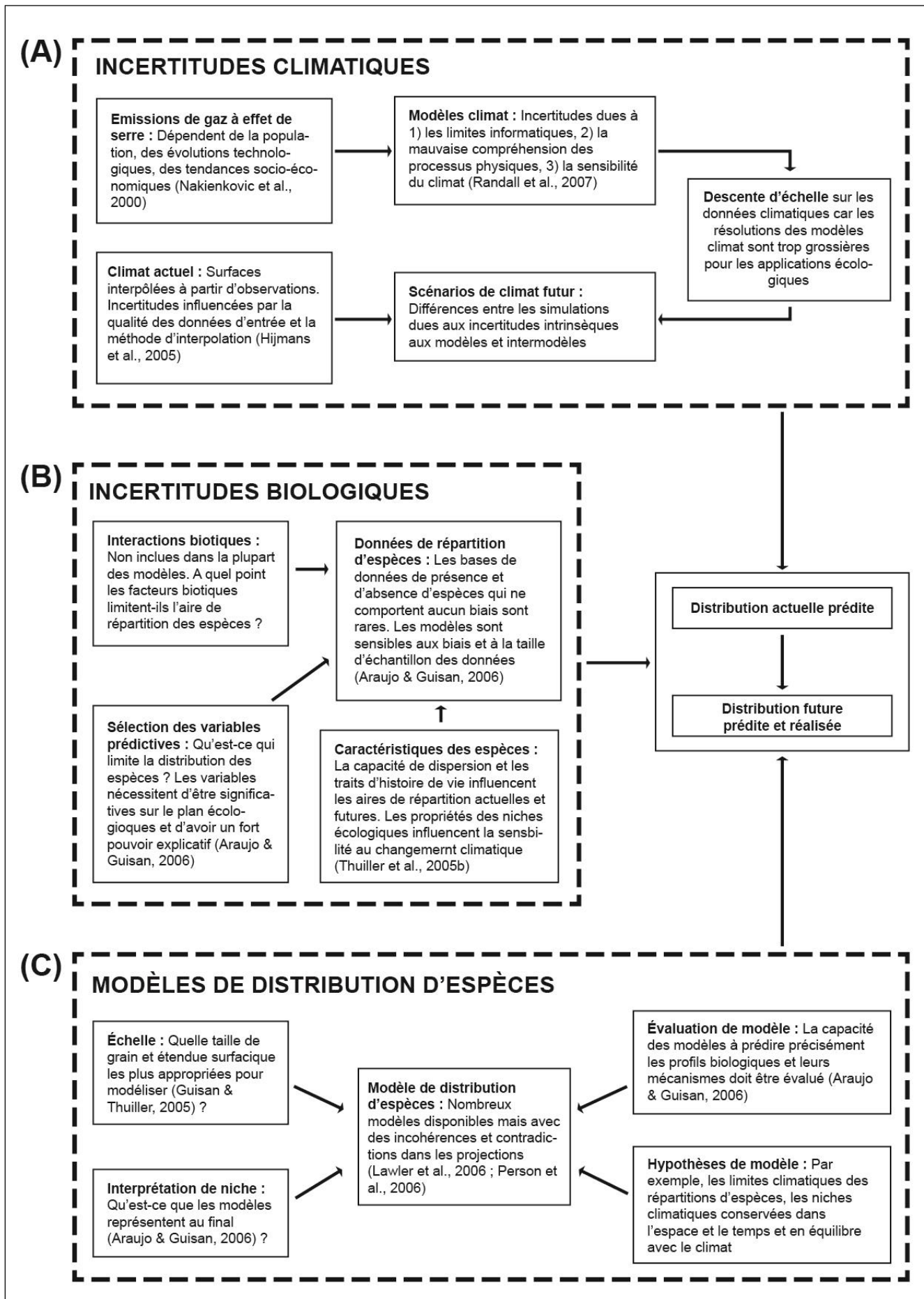


Figure 43 : Résumé des différentes incertitudes et questions soulevées par la modélisation.

Source : Beaumont *et al.*, 2008

8- **Prendre en compte les trois axes possibles d'adaptations** spatiale/temporelle/phénotypique car toutes les espèces n'auront pas besoin d'ajuster leur répartition, ce qui a des conséquences sur l'identification des réseaux et sur les stratégies de conservation.

9- **Intégrer tous les effets du changement climatique** car les modèles se focalisent souvent sur la température et les précipitations alors que le changement climatique va également entraîner plus de catastrophes ou encore modifier les niveaux des mers, deux conséquences majeures pour la biodiversité.

10- **Croiser le changement climatique avec d'autres facteurs de pressions anthropiques** car une synergie opère entre eux pour constituer le changement global : occupation du sol, pollution, fragmentation, invasions biologiques, ....

Pour tenir compte des différences entre modèles climatiques et/ou entre scénarios, il est nécessaire d'**encourager les études « d'ensembles »** qui ne consistent pas à regarder les résultats d'un seul modèle mais d'un ensemble de modèles et de paramétrisations de modèles, afin d'avoir un panel de possibles puis, à partir de ces ensembles de simulations, d'étudier les incertitudes.

Notons que la Fédération pour la Recherche sur la biodiversité (FRB), a lancé en 2010 un projet « Modélisation et scénarios de la biodiversité », dont l'un des 3 axes est d'effectuer une **synthèse des outils et approches existants sur la modélisation et les scénarios de biodiversité**, complétée par une synthèse des attentes des acteurs de la société civile et des décideurs en termes de scénarios et projections de la biodiversité. Ce besoin paraît effectivement crucial car mieux connaître les modèles et leurs limites c'est effectivement mieux maîtriser leurs incertitudes et donc manier les résultats des études avec le bon degré de confiance.

Plusieurs projets sont également en cours ayant comme objectif de renforcer l'intégration entre la modélisation et les données (ex : les projets DIVERSITALP et VALIDATE, financés par l'ANR) (Massu & Landmann, 2011).

## **II. PISTES D'AMELIORATION CONCERNANT UNE PROCHAINE VERSION DES CRITERES DE COHERENCE NATIONALE DU PROJET TVB**

### **II.1. Pour le critère de cohérence « Cartes nationales »**

Pour les cartes nationales, il est possible qu'une seconde version puisse à terme être basée sur une méthodologie plus quantitative, en mobilisant une approche informatique en s'inspirant des exemples cités en partie 4 du rapport, comme Nunez *et al.* (2013) ou Olson *et al.* (2009), et dans la continuité du travail de Witté *et al.* (2013).

Concrètement, une meilleure intégration des enjeux « changements climatiques » dans l'identification de continuités écologiques nationales pourrait donc être associée à une révision complète de la méthode d'identification, passant de la démarche visuelle/manuelle de la V1 à une démarche biogéographique. La disponibilité de données flore plus importantes permettrait une approche plus globale que via la sélection d'espèces prises en compte en 2011.

Cela consisterait à :

a) Définir les « hotspots » actuels de biodiversité en France continentale (de richesse, de rareté, d'endémisme voire d'autres indicateurs fonctionnels ou phylogénétiques) et modéliser leur évolution, en intégrant l'incertitude des différents scénarios climatiques (recherche de zones robustes, ...)

b) Dans une approche synthétique, travailler à définir des ensembles biogéographiques et climatique à l'échelle française. Il s'agirait ensuite de modéliser leur évolution probable selon les scénarios climatiques. Les ensembles basés sur la composition en espèces paraissent plus utiles que les zonages purement climatiques, car ils sont la résultante de plusieurs phénomènes dont le climat mais aussi les capacités de dispersion, le sol, et des interactions biotiques. Pour être représentatifs et pouvoir servir de base pour des schémas de conservation, de tels ensembles biogéographiques devraient être établis sur un large panel d'espèces (flore, faune dont invertébrés,...) et la force statistique des limites biogéographiques testée.

Le critère interrégional devrait aussi insister sur les zones de forts gradients climatiques actuels, ces zones étant des secteurs privilégiés pour l'adaptation (adaptation avec un moindre déplacement). Les limites de zones biogéographiques devraient aussi être mises en avant, car il s'agit des zones à enjeux pour d'adaptation de la répartition de nombreux taxons. Il s'agirait de privilégier des corridors orientés perpendiculairement à ces limites comme le préconisent Nunez *et al.* (2013), Olson *et al.* (2009). Ceci peut se matérialiser sur les cartes indicatives mais peut aussi se décliner à l'échelle régionale.

En résumé, cela conduirait à :

- 1- Définir des ensembles biogéographiques sur la base de données d'inventaires faune et flore avec une large base taxonomique (similarités de composition). Chacun de ces ensembles est en soi une zone de macro-continuité actuelle,
- 2- Identifier les zones de fort gradient climatique et les limites marquées entre zones biogéographiques,
- 3- Identifier, de part et d'autre de ces grandes limites biogéographiques, les principaux « hotspots » (richesse, rareté, zones refuges etc.), les classer par similarité et identifier les continuités perpendiculaires aux limites des zones biogéographiques, secteurs importants d'un point de vue évolutif et adaptatif.

Cette nouvelle version de cartes nationales pourrait être soutenue également par l'approfondissement des thèmes lacunaires visés plus hauts (routes de colonisation passées, stratégies thermophiles/cryophiles, ...).

## **II.2. Pour le critère de cohérence « Espèces »**

Il serait sans doute possible de réfléchir à ce que la composante climatique soit intégrée plus en amont dans la sélection des espèces de cohérence nationale. En effet, dans le processus de sélection à l'œuvre pour la première version, cette perspective a été intégrée à l'opportunité, sur proposition des Conseils scientifiques régionaux du patrimoine naturel (CSRPN), donc finalement de façon assez sporadique sans démarche vraiment cohérente entre espèces et entre régions pour une espèce. Par exemple, la sélection des espèces sur leur front d'avancée pourrait être systématisée.

## **II.3. Pour le critère de cohérence « Habitats naturels »**

L'absence de cartographie nationale des habitats naturels en France a constitué un frein majeur pour la précision du critère de cohérence nationale « habitats ».

Cette cartographie pourrait permettre à terme de pousser la démarche sans doute jusqu'à une régionalisation de la liste nationale comme ce fut le cas pour les espèces. Selon la typologie retenue pour

cette cartographie, il sera peut-être plus facile de distinguer des habitats naturels selon leur réponse au changement climatique (degré de thermophilie, caractère fixe ou dynamique). Néanmoins, il est probable que le changement global, dont le changement climatique, produise des habitats non analogues à ceux actuels.

Cette cartographie pourrait aussi être utilisée pour des travaux d'écologie du paysage afin de rechercher les continuités fonctionnelles ou potentielles directement à partir de la carte des habitats.

### **III. AMELIORER LA PRISE EN COMPTE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LE PROJET SCAP**

La création des aires protégées doit tenir compte, en premier lieu, des habitats (nature, qualité, surface, ...) qui conviennent le mieux aux traits de vie des espèces visées (Araujo *et al.*, 2004). Par exemple, au Japon, les grands espaces forestiers sont nécessaires pour le succès de la nidification des espèces et c'est donc dans ces cas que les aires protégées jouent un rôle primordial (Kurosawa *et al.*, 2003).

Cependant, dans le contexte actuel de changement climatique, il est désormais nécessaire d'intégrer également ce paramètre climatique dans l'identification de priorités pour de nouvelles aires protégées. En France, ces aspects ont été pris en compte lors de la première version de la SCAP. Ils méritent cependant d'être renforcés au regard de l'avancée de la réflexion sur le sujet, notamment alimentée par ce rapport.

A ce jour, l'une des priorités évidente semble être de mener une évaluation du réseau d'aires protégées français (tous types confondus, y compris Natura 2000) pour vérifier son « efficacité » au regard de l'évolution du climat et par là-même sa complétude. Cette évaluation n'a jamais été réalisée pour le moment et paraît incontournable. Ce manque est mis en avant également par le rapport d'évaluation du dispositif français d'aires protégées produit par le Comité français de l'UICN (Martinez, 2007). Ce dernier fait effectivement le constat qu'« *il n'existe pas de réflexion sur l'impact du changement climatique sur l'ensemble des aires protégées françaises* » et préconise ainsi d'« *intégrer les mesures d'adaptation aux changements climatiques à la planification des aires protégées, aux stratégies de gestion et à la conception des systèmes d'aires protégées.* »

Une telle évaluation pourrait s'inspirer des approches expérimentées par Cianfrani *et al.* (2011) ou Williams *et al.* (2005). Pour ce faire, les logiciels d'optimisation et de modélisation, évoqués précédemment, qui se développent actuellement pour sélectionner des réseaux de maille optimaux selon des critères prédéfinis, paraissent à nouveau utiles. Cette évaluation devrait permettre d'estimer la part des espèces actuellement abritées dans ces aires qui s'y retrouveront ou non à échéance lointaine, 2050 ou 2100 et d'identifier ainsi les lacunes du réseau français. Elle pourrait être effectuée à la fois pour vérifier la persistance des espèces en fonction de leur degré de menace mais aussi par groupe fonctionnel d'espèces ou par types d'écosystèmes, de manière à répondre au besoin d'une représentativité du réseau qui ne soit pas uniquement taxonomique ni patrimoniale. L'évaluation de l'UICN France (Martinez, 2007) rappelle elle-aussi que l'approche par écosystème reste largement à développer.

Par ailleurs, au-delà de l'étape de désignation des aires protégées, améliorer la réponse au changement climatique dans la politique française d'aires protégées doit aussi porter sur la gestion du réseau qu'elles forment, à travers notamment les préconisations d'ordre général proposées plus haut (plans de gestion moins fixistes, ...). La mise en place d'un réseau de surveillance des aires protégées apportera une veille sur ce sujet. Les aires protégées doivent continuer à être des lieux privilégiés pour « *développer des programmes régionaux d'études sur les effets des changements climatiques, en approfondissant l'expertise et en développant des partenariats chercheurs-gestionnaires* » (Martinez, 2007).



Enfin, au regard des liens forts de complémentarité que décrit la littérature scientifique entre corridors et aires protégées pour l'adaptation, la résistance et la résilience de la biodiversité face au changement climatique, le lien TVB-SCAP paraît fondamental à maintenir et à renforcer. Le suivi de l'avancement des SRCE mené par le Centre de ressources TVB devrait donner à terme une vision d'ensemble sur la reprise des zonages « non obligatoires » au sein des réservoirs de biodiversité des SRCE. Ces résultats permettront d'alimenter la réflexion sur le besoin ou non de renforcer le critère de cohérence nationale TVB portant sur les zonages, lors de la révision des Orientations nationales TVB.

## **IV. DEMARCHES LOCALES A ENCOURAGER**

Il paraît nécessaire, compte tenu du peu d'expériences locales relevées, **d'engager un travail d'enquête approfondie, pour faire remonter ces informations depuis les territoires** car il doit indéniablement exister davantage de projets valorisables que ce que nous avons pu trouver pour ce rapport.

La démarche menée en Languedoc-Roussillon mentionnée en partie IV (Breton, 2014) peut servir d'exemple à reproduire dans d'autres régions.

A ce titre, l'initiative **Wiklimat**, mise en œuvre dans le cadre du PNACC 2011-2015 pourrait être mobilisée. Wiklimat est une plateforme internet de type « wiki », développée par le Centre d'études techniques maritimes et fluviales (CETMEF), qui a vocation à centraliser les démarches locales en termes d'adaptation au changement climatique vis-à-vis de différents enjeux, dont la biodiversité. Chaque acteur local (agents des services déconcentrés ou des établissements publics, pilotes des fiches thématiques du PNACC, collectivités, observatoires territoriaux, bureaux d'études, entreprises, associations et organisations non gouvernementales) peut ainsi créer une fiche de présentation pour chacune de ses réalisations. Le Wiklimat est donc un espace de partage de connaissances et de retours d'expériences qu'il sera intéressant de suivre régulièrement.

Plus d'info : <http://wiklimat.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Wiklimat:Accueil>

Il semble également important de développer les démarches de type observatoires. Dans l'Observatoire national de la biodiversité (ONB), rappelons qu'un indicateur est dédié au lien entre changement climatique et déplacement des espèces : « Évolution de l'indice thermique moyen des communautés d'oiseaux en réponse au changement climatique (N° : SNB-D11-12-DCC1). Par ailleurs, le SOeS (service des statistiques du Ministère) travaille actuellement à une caractérisation des indicateurs « Biodiversité et Changement climatique » en lien avec l'ONERC, la DEB (MEDDE) et l'ONB.

Les observatoires régionaux ont aussi un rôle important à jouer et ce type d'initiatives peut être promulgué par des schémas tels que le SRCE ou le SRCAE (Schéma Régional Climat Air Énergie). Ainsi, en Rhône-Alpes, le projet de SRCAE prévoit la mise en place d'un observatoire régional des effets du changement climatique (ORECC) en Rhône-Alpes, à l'image de l'ONERC (Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique) au niveau national.

# **REFERENCES CITEES DANS LA PARTIE 5**

## **Articles scientifiques**

- ARAUJO M.-B., CABEZA M., THUILLER W., HANNAH L. & WILLIAMS P. (2004). Would climate change drive species out of reserve?. *Global Change Biology*. Numéro 10. Pages 1618-1626.
- BEAUMONT L.J., HUGHES L. & PITMAN A.J. (2008). Why is the choice of future climate scenarios for species distribution modelling important?. *Ecology letters*. Numéro 11. Pages 1135-1146.
- BEAUMONT L.J., PITMAN A.J., POULSEN M. & HUGHES L. (2007) Where will species go? Incorporating new advances in climate modelling into projections of species distributions. *Global change biology*. Numéro 13. Pages 1368-1385.
- BELLARD C., BERTELSMEIER C., LEADLEY P., THUILLER W., COURCHAMP F. (2012). Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology letters*. Numéro 15. Pages 365-377.
- BERTRAND R., LENOIR J., PIEDALLU C., RIOFRIO-DILLON G., DE RUFFRAY P., VIDAL C., PIERRAT J.-C. & GEGOUT J.-C. (2011). Changes in plant community composition lag behind climate warming in lowland forests. *Nature*. Volume 489. Pages 517-520.
- BODIN J., BADEAU V., BRUNO E., CLUZEAU C., MOISSELIN J.M., WALTHER G.R. & DUPOUEY J.L. (2013) Shifts of forest species along an elevational gradient in Southeast France: climate change or stand maturation?. *Journal of Vegetation Science*. Numéro 24. Pages 269-283.
- CHEN I.C., SHIU H.J., BENEDICK S., HOLLOWAY J.D., CHEY V.K., BARLOW H.S., HILL J.K. & THOMAS C.D. (2009). Elevation increases in moth assemblages over 42 years on a tropical mountain. *PNAS*. Numéro 106. Pages 1479-1483.
- CIANFRANI C., LE LAY G., MAIORANO L., SATIZABAL H.F., LOY A. & GUI SAN A. (2011). Adapting global conservation strategies to climate change at the European scale: The otter as a flagship species. *Biological conservation*. Numéro 144. Pages 2068-2080.
- CORMONT A., MALINOWSKA A.H., KOSTENKO O., RADCHUK V., HEMERIK L., WALLIS DE VRIES M.F. & VERBOOM J. (2011). Effect of local weather on butterfly flight behaviour, movement, and colonization: significance for dispersal under climate change. *Biodiversity and conservation*. Volume 20. Numéro 3. Pages 483-503.
- DAUFRESNE M. & BOET P. (2007). Climate change impacts on structure and diversity of fish communities in rivers. *Global change biology*. Volume 13. Numéro 12. Pages 2467-2478.
- DEVICTOR V., JULLIARD R., COUVET D. & JIGUET F. (2008). Birds are tracking climate warming, but not fast enough. *Proceedings of the Royal Society*. Numéro 275. Pages 2743-2748.
- DEVICTOR V., VAN SWAAY C., BRERETON T., BROTONS L., CHAMBERLAIN D., HELIÖLÄ J., HERRANDO S., JULLIARD R., KUUSSAARI M., LINDSTRÖM A., REIF J., ROY D.-B., SCHWEIGER O., SETTELE J., STEFANESCU C., VAN STRIEN A., VAN TURNHOUT C., VERMOUZEK Z., WALLISDEVRIES M., WYNHOFF I. & JIGUET F. (2012). Differences in the climatic debts of birds and butterflies at a continental scale. *Nature climate change*. Numéro 2. Pages 121-124.
- EKLOF A., KANERYD L. & MUNGER P. (2012). Climate change in metacommunities: dispersal gives double-sided effects on persistence. *Royal society philosophical transactions biological sciences*. Volume 367. Numéro 1605. Pages 2945-2954.
- ENGLER R., RANDIN C.F., VITTOZ P., CZAKA T., BENISTON M., ZIMMERMANN N.E. & GUI SAN A. (2009). Predicting future distributions of mountain plants under climate change: does dispersal capacity matter?. *Ecography*. Volume 32. Numéro 1. Pages 34-45.

FODEN W.-B., BUTCHART S.-H.-M., STUART S.-N., VIE J.-C., AKCAKAYA H.-R., et al. (2013). Identifying the World's Most Climate Change Vulnerable Species: A Systematic Trait-Based Assessment of all Birds, Amphibians and Corals. *PLoS ONE*. Volume 8. Numéro 6.

GILMAN S.-E., URBAN M.-C., TEWKSBURY J., GILCHRIST G.-W. & HOLT R.-D. (2010). A framework for community interactions under climate change. *Trends in Ecology and Evolution*. Volume 25. Numéro 6. Pages 325-331.

GROOM Q.J. (2013). Some poleward movement of British native vascular plants is occurring, but the fingerprint of climate change is not evident. *PeerJ*. 13 pages.

GRYTNES J.-A., KAPFER J., JURASINSKI G., BIRKS H.-H., HENRIKSEN H., KLANDERUD K., ODLAND A., OHLSON M., WIPF S. & BIRKS H.-J.-B. (2014). Identifying the driving factors behind observed elevational range shifts on European mountains. *Global Ecology and Biogeography*. 9 Pages

HICKLING R., ROY D.-B., HILL J.-K., FOX R. & THOMAS C.-D. (2006). The distributions of a wide range of taxonomic groups are expanding polewards. *Global change biology*. Numéro 12. Pages 450-455.

HIGGINS P.A.T. & HARTE J. (2006). Biophysical and biogeochemical responses to climate change depend on dispersal and migration. *Bioscience*. Volume 56. Numéro 5. Pages 407-417.

HILL J.-K., GRIFFITHS H.-M. & THOMAS C.-D. (2011). Climate change and evolutionary adaptations at species' range margins. *Annual review of entomology*. Numéro 56. Pages 143-159.

JULLIARD R., JIGUET F. & COUVET D. (2004). Evidence for the impact of global warming on the longterm population dynamics of common birds. *Proceedings of the Royal Society of London B (Suppl.)*. Numéro 271. Pages S490–S492.

KUROSAWA R., ASKINS R. A. (2003). Effects of habitat fragmentation on birds in deciduous forests in Japan. *Conservation Biology*. Volume 17. Numéro 3. Pages 695-707.

LENOIR J., GEGOUT J.C., GUIGAN A., VITTOZ P., WOHLGEMUTH T., ZIMMERMANN N.E., DULLINGER S., PAULI H., WILLNER W. & SVENNING J.C. (2010b). Going against the flow: potential mechanisms for unexpected downslope range shifts in a warming climate. *Ecography*. Numéro 33. Pages 295-303.

NUNEZ T.A., LAWLER J.J., MCRAE B.H., PIERCE D.J., KROSBY M.B., KAVANAGH D.M., SINGLETON P.H. & TEWKSBURY J.J. (2013). Connectivity planning to address climate change. *Conservation biology*. Volume 27. Numéro 2. Pages 407-416.

OLSON D., O'CONNELL M., FANG Y.-C., BURGER J. & RAYBURN R. (2009). Managing for climate change within protected area landscapes. *Natural areas journal*. Volume 29. Numéro 4. Pages 394-399.

PEARSON R.G. & DAWSON T.P. (2005). Long-distance plant dispersal and habitat fragmentation: identifying conservation targets for spatial landscape planning under climate change. *Biological conservation*. Volume 123. Numéro 3. Pages 389-401.

SAETHER E., GROTTAN V., TRYJANOWSKI P., BARBRAUD C., ENGEN S. & FULIN M. (2006). Climate and spatio-temporal variation in the population dynamics of a long distance migrant, the white stork. *Journal of Animal Ecology*. Numéro 75. Pages 80-90.

THUILLER W., ALBERT C., ARAUJO M.B., BERRY P.M., CABEZA M., GUIGAN A., HICKLER T., MIDGLEY G.F., PATERSON J., SCHURR F.M., SYKES M.T. & ZIMMERMANN N.E. (2008). Predicting global change impacts on plant species' distributions: Future challenges. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*. Volume 9. Numéro 3-4. Pages 137-152.

TRAVIS J.M.J., DELGADO M., BOCEDI G., BAGUETTE M., BARTON K., BONTE D., BOULANGEAT I., HODGSON J.A., KUBISCH A., PENTERIANI V., SAASTAMOINEN M., STEVENS V.M. & BULLOCK J.M. (2013). Dispersal and species' responses to climate change. *Oikos*. Volume 122. Numéro 11. Pages 1532-1540.

WALTERS R.J., HASSALL M., TELFER M.G., HEWITT G.M. & PALUTIKOF J.P. (2006). Modelling dispersal of a temperate insect in a changing climate. *Proceedings of the royal society b-biological sciences*. Volume 273. Numéro 1597. Pages 2017-2023.

WILLIAMS P., HANNAH L., ANDELMAN S., MIDGLEY G., ARAUJO M., HUGHES G., MANNE L., MARTINEZ-MEYER E. & PEARSON R. (2005). Planning for climate change: identifying minimum-dispersal corridors for the cape proteaceae. *Conservation biology*. Volume 19. Numéro 4. Pages 1063-1074.

## **Littérature grise**

MASSU N. & LANDMANN G. (coord.) (2011). *Connaissance des impacts du changement climatique sur la biodiversité en France métropolitaine*. Synthèse de la bibliographie. GIP ECOFOR & MEDDTL. 180 pages.

## **Rapports techniques ou d'expertise**

BERTON S. (2014). L'intégration des changements climatiques dans les processus décisionnels de hiérarchisation des actions visant le maintien de la biodiversité et des continuités écologiques dans le département de l'Hérault. Maitrise d'environnement Université de Sherbrooke / Master 2 en gestion de l'environnement, de la biodiversité et des territoires Université Montpellier II. 127 pages.

OFFICE NATIONAL DE L'EAU ET DES MILIEUX AQUATIQUES (2013). Contributions du Conseil Scientifique de l'Onema pour le forum de consultation pour la recherche environnementale - ALLEnvi, 26 novembre 2013. Suite Séance du 19 novembre 2013. 6 pages.

MARTNIEZ C. (coord.) (2007). Analyse du dispositif français des aires protégées au regard du Programme de travail « Aires protégées » de la Convention sur la diversité biologique - État des lieux et propositions d'actions. Comité français de l'UICN, Paris, France. 53 pages + annexes.

SORDELLO R., COMOLET-TIRMAN J., DA COSTA H., DE MASSARY J-C., GRECH G., DUPONT P., ESCUDER O., HAFFNER P., ROGEON G., SIBLET J-P., TOUROULT J. (2011a). *Trame verte et bleue – Critères nationaux de cohérence – Contribution à la définition du critère pour une cohérence interrégionale et transfrontalière*. Service du patrimoine naturel, Muséum national d'histoire naturelle, Paris. 54 pages.

WITTE I., TOUROULT J. & PONCET L. (2013). Distribution spatiale et complémentarité des « hotspots » de biodiversité en France métropolitaine Valorisation des données des Atlas. Service du patrimoine naturel, Muséum national d'Histoire naturelle. 90 pages.

## **Actes de colloques**

GIP ECOFOR & MEDDTL (2010). *Synthèse des connaissances sur les impacts du changement climatique sur la biodiversité en France*. Présentations du séminaire de restitution du 27 septembre 2010 organisé par le GIP Ecofor et le MEDDTL, Paris. 75 diapos.

SORDELLO R. (2013). *Climat et Écologie, retour à l'équipe du Centre de ressources Trame verte et bleue par le MNHN-SPN*. Colloque organisé par le GIS Climat les 12 et 13 novembre 2013, Meudon. 4 pages.

VANPEENE S. (2012). Compte rendu du séminaire "Biodiversité et adaptation au changement climatique". 3 octobre 2012, Paris.

### **Supports de vulgarisation/communication**

POULET N. (2012). Utilisation des modèles de niche pour l'évaluation des risques d'établissement des espèces exotiques. *Sciences eaux & territoires*. Numéro 6. Pages 96-99.

### **Autres références**

WIKLIMAT. Disponible sur : <http://wiklimat.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Wiklimat:Accueil>

# CONCLUSION

**L**a météorologie et le climat s'étudient essentiellement selon les mêmes paramètres mais, schématiquement, ils diffèrent par leur assiette, de temps et d'espace. La météorologie se décrit principalement localement et agit sur les déplacements routiniers ou saisonniers des espèces. Le climat se mesure sur le long terme et prend effet à grande échelle spatiale. De ce fait, il est l'un des déterminants principaux des aires de répartition des espèces.

Le climat a toujours varié sur Terre sous l'effet des paramètres astronomiques, faisant alterner des périodes glaciaires et interglaciaires. Ces variations ont déterminé l'agencement et la diversité génétique des espèces via un mécanisme de régressions/transgressions des aires de répartitions, que l'outil moléculaire permet aujourd'hui de mettre nettement en évidence.

Désormais, nos activités humaines et les gaz à effet de serre qu'elles émettent sont devenus un nouveau moteur de modification du climat. Comme par le passé, les espèces possèdent alors trois axes possibles de réponse : interne, temporel et spatial. Par ce dernier axe, les espèces redéfinissent leur aire de répartition en altitude, en latitude et du littoral vers l'intérieur des terres. Ces conséquences réelles et déjà observées de nos jours semblent donc rappeler simplement celles des variations historiques du climat. Cependant, l'ampleur et la vitesse du changement climatique contemporain force la biodiversité à réagir de manière intense et dans un laps de temps court. Toutes les espèces n'y parviendront pas, cette réponse étant conditionnée par leurs traits de vie, leurs exigences écologiques ou encore l'état initial de leurs populations. Au final, le changement climatique agit comme un filtre qui favorise les taxons les plus mobiles et les plus généralistes et qui renforce le phénomène de fragmentation des milieux. Il faut donc s'attendre dans le futur à des extinctions de populations ou d'espèces et par conséquent à une recomposition des biocénoses, au lieu d'une simple transposition des écosystèmes actuels, incluant des modifications des interactions entre les espèces qui les composent.

Le nombre de publications sur les impacts du changement climatique sur la biodiversité a fortement augmenté au cours de ces 10 dernières années avec par conséquent un accroissement et une diversification de la connaissance. Les méthodes pour mesurer ces impacts se sont perfectionnées avec le développement de nouveaux modèles mécanistes et de niche. Les données climatiques, elles-aussi, évoluent grandement en termes de précisions.

Malgré ces avancées, la connaissance scientifique reste encore fragmentaire sur de nombreux sujets. Si le principe de l'ajustement spatial est désormais bien connu, les modifications qu'il va occasionner à l'échelle des assemblages et des écosystèmes font l'objet de peu d'études. Un biais certain existe aussi pour le moment entre les groupes biologiques traités, au détriment des invertébrés et de la faune du sol, et entre milieux étudiés, au détriment par exemple des milieux littoraux.

Par ailleurs, le changement climatique, qui ne se restreint pas à un accroissement des températures, laisse envisager des événements climatiques extrêmes plus intenses et plus fréquents, dont les conséquences sur les écosystèmes restent méconnues. De même, d'autres possibilités d'adaptations de la biodiversité, comme la microévolution, sont encore relativement peu étudiées.

L'outil de modélisation sur lequel se fondent la plupart des réflexions doit également continuer de s'améliorer. La modélisation comporte en effet une part importante d'incertitudes qui sont difficilement quantifiables et par conséquent rarement associées aux résultats. Il s'agit donc de toujours rester prudent quant aux conclusions, de privilégier les méthodes comparatives et croisées. De nombreuses pistes existent pour améliorer les modèles tout au long de la chaîne analytique des prédictions et des travaux sont déjà

engagés dans ce sens. De plus en plus d'études se basent désormais sur plusieurs modèles comparés, ce qu'il faut encourager.

Si l'activité de recherche sur le thème du changement climatique et biodiversité continue avec l'intensité qu'elle a acquise depuis les années 2000, elle devrait permettre dans la prochaine décennie de compléter plusieurs de ces lacunes et faire avancer ces chantiers importants.

Malgré les incertitudes, les réseaux écologiques ont incontestablement un rôle majeur vis-à-vis du changement climatique. Les corridors en particulier permettent de faciliter l'ajustement spatial des aires de répartition de la faune et de la flore et ils optimisent les facultés de résistance et de résilience des populations. Nous concernant, ces infrastructures vertes peuvent contribuer à réduire le phénomène de changement climatique et les conséquences qu'il a sur nos sociétés, par le fonctionnement des milieux qu'elles recouvrent. La plus-value du caractère connecté des milieux est par contre difficile à quantifier dans la réalisation de ces fonctions. Les aires protégées permettent quant à elles de conserver efficacement une grande partie de la biodiversité malgré ces réajustements de répartition. Leur statut de protection et leur identification dans des zones à forte naturalité en font des espaces qui resteront stratégiques dans l'avenir pour la biodiversité, en plus de constituer des laboratoires pour l'enrichissement de notre connaissance.

Malgré tout, les réseaux d'aires protégées actuels doivent être complétés pour conserver un taux de représentativité satisfaisant sous changement climatique. Plusieurs acteurs entament ainsi des démarches d'évaluation de leur réseau actuel, auquel ils superposent les projections climatiques et biologiques pour estimer le taux de recouvrement et, le cas échéant, identifier des aires protégées supplémentaires. Ces démarches doivent être encouragées en les élargissant car une part non négligeable de groupes biologiques et de dimension de la biodiversité (diversité génétique, ...) n'est toutefois pas ou très peu prise en compte pour le moment pour vérifier la complétude de ces réseaux.

Des réflexions innovantes voient également le jour pour identifier des corridors en intégrant les variations prévisibles du climat, faisant ainsi cohabiter dans les réseaux des corridors « pour maintenant » et des corridors « pour plus tard ». L'intégration des services écosystémiques dans l'identification des réseaux écologiques se développe également peu à peu, notamment à l'échelle européenne via le concept de Green infrastructure.

En dépit de cette mise en avant forte des réseaux écologiques comme une solution pour l'adaptation et l'atténuation du changement climatique, les démarches concrètes restent rares et les méthodologies balbutiantes. A défaut, on peut dire que l'identification et la préservation et la restauration d'un réseau écologique est de toutes façons une première étape qui ne peut qu'être bénéfique pour la lutte contre le changement climatique.

Le développement des démarches aux différentes échelles en France et en Europe concernant les réseaux écologiques devrait être un moteur pour faire émerger des innovations dans la prise en compte du changement climatique pour l'identification des corridors et des aires protégées.

La France a d'ores et déjà intégré l'enjeu climatique au sein du cadrage national du projet Trame verte et bleue, dès sa première version des orientations nationales, ainsi que dans sa Stratégie de création des aires protégées. Le changement climatique a notamment été pris en compte dans les différents critères de cohérence nationale, et en particulier lors de l'identification des grandes continuités écologiques interrégionales. La méthode, innovante, a reposé sur la connaissance des voies de colonisation de la flore et de la faune lors des fluctuations passées du climat. Cette prise en compte dans la TVB et dans la SCAP pourra être améliorée lors des révisions des cadrages nationaux, en mobilisant notamment les outils informatiques en développement pour évaluer la représentativité du réseau français d'aires protégées et compléter l'identification de continuités nationales en s'inspirant des démarches biogéographiques mises en évidence dans ce rapport.

# TABLES DES MATIERES

## Figures

Figure 1 : Aperçu des références stockées sur dropbox. ....	14
Figure 2 : Répartition des références du corpus par type de publication.....	15
Figure 3 : Répartition des références du corpus par année et par type de publication. ....	16
Figure 4 : Cumul des articles scientifiques du corpus de 1971 à 2014. ....	16
Figure 5 : Analyse bibliométrique dans les bases de données de sciences humaines sur les mots clefs greenway et climat.....	17
Figure 6 : Répartition des articles rassemblés par la revue de Heller & Zavaleta (2009).....	18
Figure 7 : Répartition des articles scientifiques recensés par thème avec distinction par année.....	18
Figure 8 : Contribution des revues au corpus en nombre de publications. ....	19
Figure 9 : Pourcentage d'utilisation des références téléchargées pour chaque catégorie du corpus. ....	20
Figure 10 : Pourcentage d'utilisation des références téléchargées pour chaque partie du rapport. ....	20
Figure 11 : Pourcentages d'utilisation des références téléchargées au sein des articles scientifiques, répartis par thème. ....	21
Figure 12 : Pluviométrie (à gauche : Précipitations cumulées sur l'année en mm (normale 1981 - 2010)) et températures (à droite : Température moyenne annuelle (normale 1981 - 2010)) en France. ....	31
Figure 13 : Les cinq grands climats en France. ....	32
Figure 14 : Zones biogéographiques françaises.....	32
Figure 15 : Voies de colonisation post-glaciaires européennes et nord-américaines déduites à partir de la génétique.....	36
Figure 16 : Les différents impacts du changement climatique sur la biodiversité. ....	48
Figure 17 : Progression de le Processionnaire du pin en France.....	50
Figure 18 : Différents cas de figures concernant le comportement d'une aire de répartition sous changement climatique. ....	54
Figure 19 : Décalage de répartition pour 16 groupes biologiques. ....	55
Figure 20 : Évolutions possibles de répartition d'espèces en réponse à un changement climatique, en contexte fragmenté ou pas.....	57
Figure 21 : Échelle d'action du changement climatique par rapport à l'ensemble des changements globaux. ....	59
Figure 22 : Prédiction de l'aire de répartition de <i>Salmo trutta</i> sur le réseau hydrographique français.....	63
Figure 23 : Prédictions des habitats favorables des migrateurs amphihalins européens à l'horizon 2100 selon des modèles d'aire de distribution (scénarios d'émission de gaz à effets de serre A2 et modèle climatique global HadCM3). ....	63
Figure 24 : Effets attendus du changement climatique aux différentes échelles de la biodiversité. ....	68
Figure 25 : Spirale de l'extinction en dessous d'un certain effectif de population. ....	70



Figure 26 : Descente d'échelle depuis les scénarios climatiques jusqu'aux modèles impacts. ....	73
Figure 27 : Modèle mécaniste et modèle corrélatif. ....	75
Figure 28 : Comparaison des forces et faiblesses entre modèles mécanistes et modèles de niche (empirique). ....	77
Figure 29 : Préconisation pour les régions du globe, comme l'Europe, qui cumulent une forte exposition au changement climatique et peu d'espaces naturels préservés. ....	93
Figure 30 : La fragmentation du milieu aquatique contribue au réchauffement des eaux, en synergie avec le réchauffement climatique. ....	97
Figure 31 : Processus d'aide à la décision afin d'opter ou non pour la migration assistée. ....	101
Figure 32 : Lignes directrices pour favoriser l'adaptation de la biodiversité dans un contexte de changement climatique. ....	130
Figure 33 : Fonctionnalités écologiques devant se trouver représentées dans les réseaux écologiques afin d'assurer la persistance et la capacité d'évolution à long terme de la biodiversité. ....	131
Figure 34 : Recommandations du projet BRANCH pour la prise en compte du changement climatique dans le domaine des réseaux écologiques. ....	131
Figure 35 : Concept de corridor tracé en fonction des gradients climatiques. ....	133
Figure 36 : Identification de corridor pour l'adaptation au changement global. ....	134
Figure 37 : Tests de classifications biogéographiques pour tous les taxons (1097 espèces) en fonction du nombre défini de classes. ....	136
Figure 38 : Résultats obtenus pour le service écosystémique « stockage du carbone ». ....	137
Figure 39 : Réseaux d'habitats durables pour le Lézard des souches dans le Limbourg, modélisés par ALTERRA, sans (à gauche) et avec (à droite) l'existence du corridor écologique. ....	139
Figure 40 : Carte des zones prioritaires pour la Loutre en Europe à l'horizon 2080 en cas de réalisation du scénario B2 du GIEC et confrontation au réseau d'aires protégées actuel. ....	141
Figure 41 : Géométries possibles pour les aires protégées et proportion qui en résulte entre climat actuellement favorable (gris clair) et climat favorable actuellement et dans le futur (gris foncé). ....	143
Figure 42 : Illustrations produites pour les orientations nationales TVB. ....	145
Figure 43 : Résumé des différentes incertitudes et questions soulevées par la modélisation. ....	165

## Tableaux

Tableau 1 : Thèmes retenus pour le classement des articles scientifiques du corpus. ....	13
Tableau 2 : Lien espace-temps entre météorologie/climat d'un côté et déplacements d'espèces de l'autre. ....	30

## Encadrés

Ce qu'il faut retenir du 5ème rapport du GIEC. ....	46
Observatoire phénologique. ....	49
Le portail « DRIAS Les futurs du climat ». ....	74

Rappel du contexte international.....	108
Le point de vue du Conseil de l'Europe en 2005 .....	111
Le changement écologique au sein de la politique de l'eau sur la continuité aquatique : .....	144



Le changement climatique prend de nos jours une place de plus en plus importante au sein des politiques publiques et notamment celles liées à la biodiversité du fait des menaces qu'il fait peser sur elle.

Le projet Trame verte et bleue (TVB) et la Stratégie de création des aires protégées (SCAP) ont intégré cet enjeu dans leur cadrage national.

Afin de mieux maîtriser les liens entre réseaux écologiques et changement climatique et en vue des révisions de ces cadrages, le Ministère en charge de l'écologie a missionné le service du patrimoine naturel du MNHN pour conduire une étude sur ce sujet, au titre de l'expertise scientifique et technique qu'il assure, notamment au sein du Centre de ressources TVB.

L'objectif de ce rapport est de faire un point sur la connaissance disponible, d'identifier les lacunes qu'elle présente et de proposer des pistes de développement pour la recherche et pour les projets TVB et SCAP.

Après avoir constitué un corpus de plus de 500 références, environ 300 d'entre elles, dont 200 articles scientifiques, ont été exploitées pour aborder en cinq grandes parties :

I) Les notions de météorologie et de climat et la manière dont ils influent sur les déplacements des espèces,

II) L'ajustement spatial provoqué par le changement climatique contemporain, son hétérogénéité, ses conséquences et ses incertitudes,

III) Le rôle des réseaux écologiques, corridors et aires protégées, comme facteurs d'adaptation et d'atténuation, et comment ceux-ci sont préconisés par les institutions,

IV) Les méthodes d'identification des réseaux écologiques permettant d'intégrer le changement climatique, en revenant notamment sur la prise en compte de cet enjeu dans les projets TVB et SCAP,

V) Les lacunes dans la connaissance que l'ensemble du rapport a permis de mettre en évidence et des propositions de recherche et de développement à engager dans les années à venir, notamment pour améliorer cette prise en compte dans les projets TVB et SCAP.