

Projet de Fin d'Etudes (PFE) 2019

Identifier les sites de compensation à haut
potentiel de gain écologique : pour une
standardisation des méthodes.



<http://espacesnaturels66.fr/appe-l-a-projet-reconquete-biodiversite/>

Sous la direction de :
Simon Tarabon
Et Francis Isselin

Anne-Laure Lecomte
Marie Lenfant

**Identifier les sites de compensation à
haut potentiel de gain écologique :
pour une standardisation des
méthodes.**

**Simon Tarabon
Francis Isselin**

**Anne-Laure Lecomte
Marie Lenfant**

2018

Avertissement

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

L'auteur (les auteurs) de cette recherche a (ont) signé une attestation sur l'honneur de non plagiat.

Formation par la recherche, Projet de Fin d'Etudes en génie de l'aménagement et de l'environnement

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Dynamiques et Actions Territoriales et Environnementales de l'UMR 7324 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.

Remerciements

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui nous ont permis de mener à bien ce travail et qui ont contribué à l'élaboration de ce document.

Tout d'abord, nous remercions M. Simon Tarabon pour nous avoir guidées durant ce projet de fin d'étude. Nous le remercions notamment pour ses conseils et sa disponibilité malgré la distance.

Merci également à M. Francis Isselin pour avoir su se rendre disponible afin de nous aider à développer nos idées tout au long de ce projet.

Sommaire

Avertissement	
Remerciements	
Sommaire	
Table des figures et des tableaux	2
Liste des acronymes et abréviations	2
Introduction.....	3
1 Etat des lieux de la compensation.....	4
1.1 La compensation dans le monde et dans l'UE	4
1.2 La compensation en France	6
1.3 Constat	6
2 Présentation des méthodes d'identification des sites compensatoires à haut potentiel de gain écologique.....	9
2.1 Méthode 1 : Comment localiser les sites à haut potentiel écologique et orienter la recherche de sites compensatoires ? Méthodologie de diagnostic territorial basée sur la répartition des espèces à enjeux.....	9
2.1.1 Principe de base de la méthode.....	9
2.1.2 Identification des mailles d'intérêt écologique	9
2.1.3 Sélectionner et hiérarchiser les mailles à haut potentiel écologique	12
2.1.4 Identifier les sites d'intérêt écologique.....	13
2.2 Méthode 2 : <i>Marxan and relatives, software for spatial conservation prioritization</i>	13
2.2.1 Présentation du logiciel.....	13
2.2.2 Fonctionnement de la méthode	14
3 Résultats et limites des méthodes présentées.....	17
3.1 Points forts et limites de la méthode 1	17
3.2 Points forts et limites de la méthode 2.....	18
3.3 Comparaison des deux méthodes entre elles	19
3.4 Pistes d'amélioration des méthodes.....	20
3.5 Questions suscitées	23
Conclusion	24
Bibliographie	

Table des figures et des tableaux

Figure 1 : Émergence des politiques exigeant et facilitant la compensation écologique en nombre de pays	5
Figure 2 : Carte des pays possédant ou développant une politique de compensation	5
Figure 3 : Diagramme de sélection de l'hypothèse la mieux adaptée en fonction du jeu de données disponible	11
Figure 4 : Exemple de cartes fournies par Marxan	15
Figure 5 : Carte des aires propices à servir de site compensatoire créée à partir des analyses de Marxan with zones	17
Tableau I : Description des fichiers produits par Marxan et de leur utilisation possible	16
Tableau II : Comparaison des deux méthodes étudiées	19
Tableau III : Lot final d'indicateurs intégré au cadre d'évaluation pour le Niveau Général	22

Liste des acronymes et abréviations :

CPW : *Colorado Parks and Wildlife*

CR : En danger critique d'extinction

EN : En danger

ERC : Eviter, Réduire, Compenser

MARXAN : *Marine reserve design using spatially explicit annealing*

NT : Quasi menacée

SINP: Système d'information sur la nature et les paysages

SRCE : Schéma régional de cohérence Ecologique

UICN : Union internationale pour la conservation de la nature

VU : Vulnérable

ZNIEFF : Zone naturelle d'intérêt faunistique et floristique

Introduction

Depuis 1976 la séquence éviter, réduire, compenser (ERC) a été introduite en droit français par la loi relative à la protection de la nature. Cette séquence impose des réflexions sur les impacts potentiels sur l'environnement de projets, de programmes ou de plans soumis entre autres à évaluation environnementale (Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer, en charge des relations internationales sur le climat, 2017). La démarche d'évitement, de réduction et de compensation est encadrée par le droit européen depuis la directive 85/337/CEE du Conseil du 27 juin 1985 concernant l'évaluation des incidences de certains projets publics et privés sur l'environnement. La loi de 1976 a été renforcée en 2012 avec la doctrine *relative à la séquence éviter, réduire et compenser les impacts sur le milieu naturel* puis en 2013 avec la publication des *Lignes directrices nationales sur la séquence éviter, réduire et compenser les impacts sur les milieux naturels*, documents destinés aux maîtres d'ouvrage, à leurs prestataires, et aux services de l'Etat, qui permet d'aiguiller ces acteurs dans l'application de la séquence ERC (Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer, en charge des relations internationales sur le climat, 2017).

Ce n'est qu'en 2016 que la loi de reconquête de la biodiversité vient compléter les exigences établies en imposant notamment, une absence de perte nette voire de gain de biodiversité, mais aussi une obligation de résultats des mesures de compensation. C'est également au travers de ce nouveau texte de loi que la notion de "sites à fort potentiel de gain écologique" apparaît, sans pour autant en préciser davantage (Journal Officiel de la République Française, 2016 ; Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer, en charge des relations internationales sur le climat, 2017).

Le cadre réglementaire européen et national n'impose aujourd'hui aucune méthode standardisée d'évaluation de l'équivalence écologique. Le secteur privé apporte ses propres réflexions et méthodes en s'inspirant d'exemples développés dans le monde ou réalisés au cas par cas en concertation avec les différents acteurs de la séquence ERC : aménageurs, services instructeurs de l'Etat, Conseil national pour la protection de la nature (CNP), etc. (Bezombes, 2018).

Les mesures de compensation peuvent prendre différentes formes, on retrouve notamment la compensation par l'offre. Elle consiste pour un opérateur à anticiper la demande potentielle de compensation pour un territoire (Radisson, 2015). La compensation à la demande est opérée directement par les développeurs ayant provoqué un impact autorisé (Levrel et al., 2015). Elles peuvent être localisées sur une parcelle adjacente à celle de l'impact (on-site) ou être mise en place sur une autre parcelle (off-site) (Levrel et al., 2015). Les mesures de compensation peuvent également passer par une rémunération de remplacement, il s'agit de fonds récoltés auprès d'un ou plusieurs développeurs ayant provoqué des impacts autorisés, pour la réalisation de mesures compensatoires (Levrel et al., 2015).

De plus, il est souvent difficile d'anticiper les incertitudes sur les résultats écologiques de ces mesures dans un contexte socio-économique et climatique changeant. Plusieurs possibilités peuvent être utilisées pour minimiser ces incertitudes (surdimensionnement des mesures compensatoires afin d'anticiper l'inefficacité de certaines d'entre elles, mise en place d'une gestion adaptative qui permet d'ajuster les actions en fonction des réponses de l'environnement...) (Voir méthodes proposées pour la définition des mesures : (Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer, en charge des relations internationales sur le climat, 2017)) mais les réflexions et méthodes sont toujours très hétérogènes (Regnery, 2013).

Cela nous amène à nous demander si l'objectif d'absence de perte nette voire de gain écologique est réalisable ou est-ce tout simplement utopique avec les méthodes existantes de dimensionnement des mesures compensatoires et d'identification des sites à fort potentiel de gain écologique.

Si les mesures de compensation sont aujourd'hui déclinées dans un grand nombre de projets d'aménagement (les acteurs ne donnant que peu d'intérêt à l'évitement), les méthodes de choix des sites où elles seront appliquées ne sont aujourd'hui pas clairement définies, et peu reproductibles. Le champ d'analyse étant très vaste, nous nous intéresserons principalement à des méthodes d'évaluation liées aux milieux terrestres. Au travers de ce dossier, deux méthodes analysées pour leur transparence sont présentées. Leurs avantages et leurs limites seront étudiés et discutés.

1 Etat des lieux de la compensation

Aujourd'hui, dans de nombreux pays, la compensation est requise afin de contrebalancer les impacts négatifs des projets d'aménagement sur l'environnement. Mais cela n'a pas toujours été le cas, la compensation étant un concept relativement récent.

1.1 La compensation dans le monde et dans l'UE

La première apparition du concept de compensation écologique semble provenir du droit américain et plus précisément du "Fish and Wildlife Coordination Act." de 1934 qui impose de décrire les mesures prises pour compenser les dommages sur la faune sauvage des projets de développement aux Etats-Unis. C'est cependant en 1972, que va apparaître l'obligation du respect de la séquence ERC dans le cadre réglementaire américain avec la création "Clean Water Act". La compensation est donc plus ancienne et bien développée dans ce pays, tout comme au Canada, pays voisin.

Au niveau de l'Union Européenne, la réalisation d'études d'impact et donc la mise en place de mesures compensatoires apparaît plus tardivement dans la directive 85/337/CEE du Conseil du 27 juin 1985 sur l'Évaluation des Incidences Environnementales.

C'est suite au Sommet de la Terre de 1992 que les politiques et les législations exigeant la compensation écologique vont se développer plus globalement à l'échelle mondiale.

La compensation s'est donc imposée progressivement dans la législation depuis 1970 puis s'est fortement développée ces vingt dernières années (Mission Economie de la Biodiversité, 2016) (Voir Figure 1).

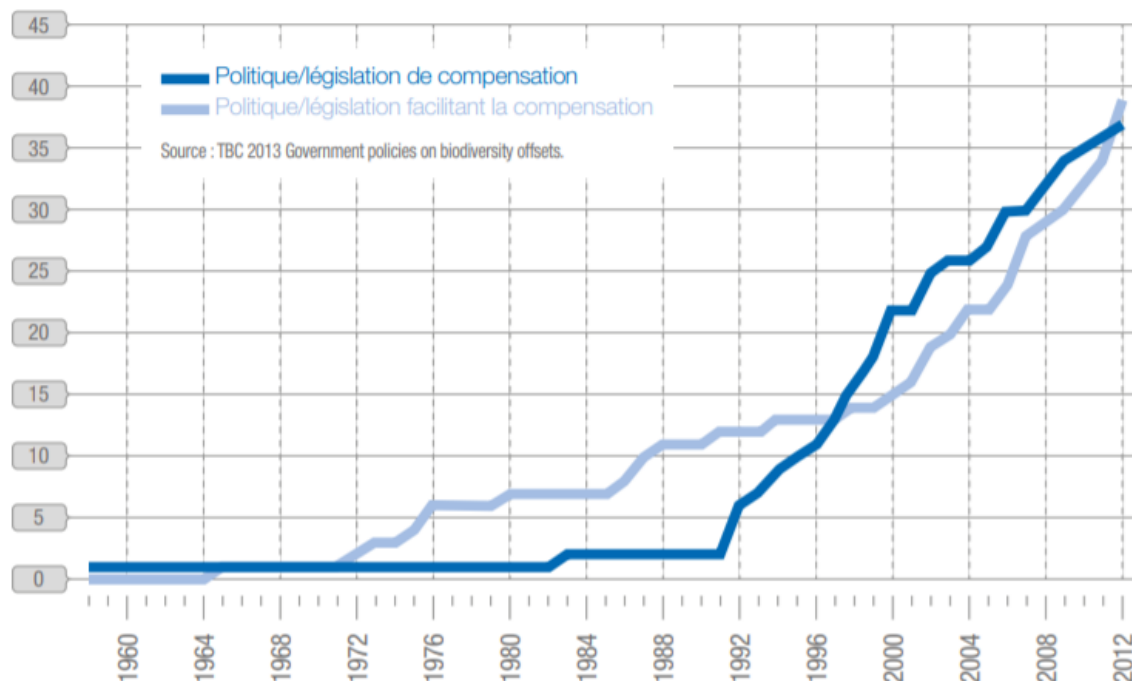


Figure 1 : Émergence des politiques exigeant et facilitant la compensation écologique en nombre de pays (Source : (The biodiversity consultancy, 2016)

En 2016, 100 pays possédaient, développaient ou envisageaient de mettre en place une politique nationale qui requiert, encourage, guide ou permet l'utilisation de la compensation dans le cadre de projets d'aménagement (The biodiversity consultancy, 2016) (Voir Figure 2)

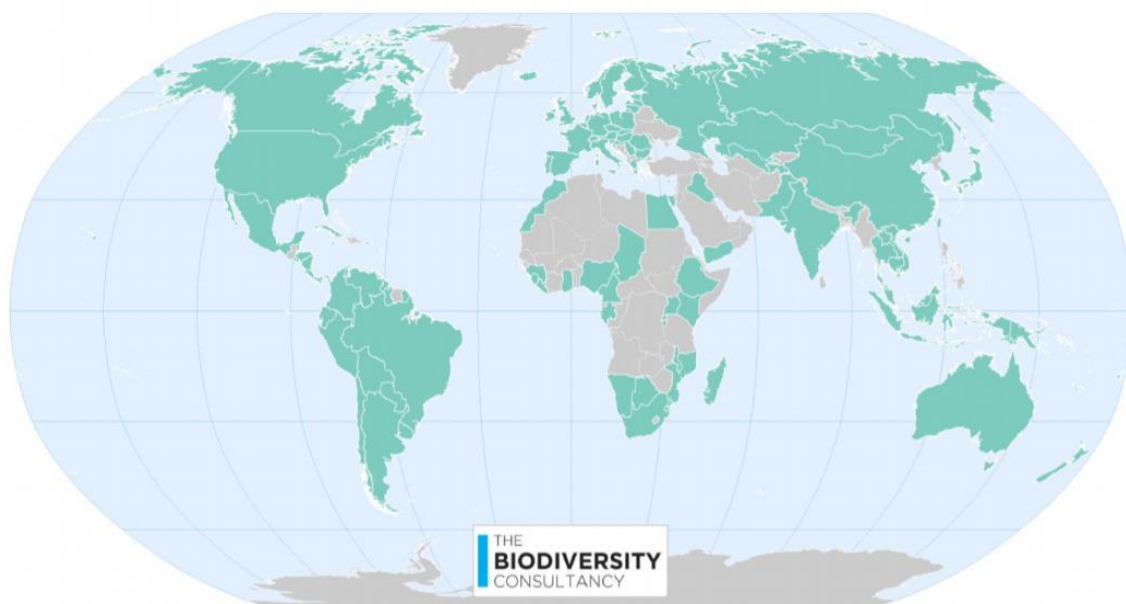


Figure 2 : Carte des pays possédant ou développant une politique de compensation (en bleu) (The biodiversity consultancy, 2016)

Les programmes de compensation développés dans chaque pays leurs sont propres car ils visent les écosystèmes à enjeux de leur territoire. Ainsi, les méthodes développées concernent bien souvent les zones humides aux Etats-Unis et au Canada, la forêt au Brésil, la végétation indigène en Australie (Mission Economie de la Biodiversité, 2016). Mais quel que soit le pays concerné, on remarque une

absence de méthodologie réglementaire et uniforme qui permettrait de choisir les sites compensatoires. Concernant les méthodes permettant le choix de la localisation des sites compensatoires, très peu d'études détaillent le protocole suivi. Les justifications restent bien souvent superficielles. Cependant, suite à nos recherches, nous avons remarqué dans plusieurs études (Ball, Possingham, et Watts, 2009 ; Sochi et Kiesecker, 2016) l'évocation du logiciel Marxan qui permettrait de croiser de multiples facteurs (écologiques, économiques...) afin de proposer les sites compensatoires les plus adaptés.

1.2 La compensation en France

En France, l'introduction de la compensation serait plutôt issue d'une pensée politique des parlementaires qui se serait traduite par l'introduction des mesures compensatoires et de la séquence ERC dans la loi relative à la protection de la nature (Lucas, 2015). En effet, le principe de la compensation écologique découle de l'obligation de respecter la séquence "éviter, réduire, compenser" imposée par la loi pour la protection de la nature du 10 juillet 1976.

D'autres textes juridiques sont par la suite venus appuyer l'application de cette séquence, comme par exemple la loi pour la reconquête de la biodiversité du 8 août 2016. Il existe donc aujourd'hui différents dispositifs juridiques qui requièrent la réalisation d'une évaluation environnementale. Cependant, les modalités et le contenu de l'évaluation environnementale requise diffèrent d'un dispositif à l'autre.

Pour parer à cela et essayer de guider les maîtres d'ouvrage dans la réalisation de la séquence ERC, une Doctrine relative à la séquence éviter, réduire et compenser les impacts sur le milieu naturel ainsi que ses lignes directrices ont été réalisées en 2012 et 2013 par le ministère de l'environnement. Cette Doctrine a pour objectif d'harmoniser l'utilisation de la séquence ERC et de fournir un meilleur encadrement des pratiques (Bas, 2017). Une doctrine nationale de 2012 précise les modalités de la compensation. Cette dernière précise qu'il faut "respecter une équivalence écologique qualitative (les milieux ou espèces bénéficiant des mesures de compensation doivent être similaires à ceux impactés) et quantitative (des gains de biodiversité générés par les mesures de compensation au moins égaux aux pertes liées dues aux impacts), une additionnalité des mesures compensatoires avec des mesures à visée de protection de l'environnement déjà planifiées et financées, ou encore une vocation écologique pérenne des sites d'accueil des mesures compensatoires" (Vaissière, Bierry, et Quétier, 2016).

En France, c'est la compensation forestière, inscrite dans le Code forestier, qui est le système le plus abouti (Vaissière, Bierry, et Quétier, 2016). En effet, la compensation forestière s'appliquant pour un type d'écosystème particulier, elle est bien plus développée et encadrée. Elle impose par exemple une compensation au sein d'une même région forestière, dans un secteur écologiquement comparable mais surtout elle demande aux maîtres d'ouvrage de prendre en compte le rôle social, écologique et économique du bois défriché afin que la compensation soit la plus efficace possible. Cette compensation peut par ailleurs être financière ou en nature.

Les zones humides, qui sont également des écosystèmes terrestres, bénéficient d'un protocole de compensation bien développé dans certains rapports scientifiques (Vaissière, Bierry, et Quétier, 2016).

1.3 Constat

Bien que le principe de la compensation existe depuis plusieurs dizaines d'années, ce dernier pose encore bien des interrogations, tant sur son dimensionnement, que sur sa mise en oeuvre, sa pérennité, son contrôle... La question de la bonne réalisation de la compensation écologique est donc relativement récente, elle se traduit d'ailleurs par le nombre grandissant d'études portant sur ce sujet. 88% des études portant sur la compensation de la biodiversité ont été publiées après 2000 (Gonçalves et al., 2015). Bien que la littérature à propos de la compensation soit grandissante, elle reste majoritairement dominée par

des recherches sur les zones humides, souvent basées aux USA et axées sur l'aspect écologique de celle-ci (Gelcich et al., 2017).

En effet, les Etats-Unis sont les précurseurs en matière de compensation puisque cela fait près de 50 ans que le *Clean Water Act* requiert des mesures compensatoires pour les écosystèmes aquatiques (*US Wetlands Mitigation*) qui seraient endommagés par des projets d'aménagement. La compensation des zones humides se fait, ici, par le remplacement des fonctions et des intérêts de ces écosystèmes détériorés (Scemama et Levrel, 2013).

Il n'existe pas aujourd'hui de politique internationale sur la compensation écologique commune à tous les pays bien qu'il existe des objectifs mondiaux de préservation de la biodiversité (ex : *Business and Biodiversity Program*, la Stratégie en faveur de la biodiversité à l'horizon 2020 de l'UE, la Stratégie de mobilisation des ressources des parties à la Convention sur la Diversité Biologique...). L'instauration d'une méthode mondiale semble difficile puisque les ressources à disposition (données scientifiques, moyens humains et financiers...), les législations et les écosystèmes sont propres à chaque pays. Cependant, certaines méthodes internationales peuvent être applicables en France, comme nous allons le voir dans ce rapport.

Un autre constat est que peu d'études détaillent la méthode employée afin de choisir les sites propices à compenser les impacts de leurs projets et surtout leur localisation. Bien souvent, le but est d'atteindre l'équivalence et celle-ci est déterminée par des experts au cas par cas se basant sur des indicateurs déterminés pour chaque projet

La plupart du temps, l'argument utilisé pour justifier le choix de la localisation du site est celui de la proximité (Gonçalves et al., 2015). En effet, la proximité permet de faire en sorte que les actions de la compensation soient bénéfiques au site impacté et ainsi maintenir l'équilibre entre les différents écosystèmes tout en s'assurant d'avoir une équivalence d'espèces, d'habitats et de fonctions écologiques. La plupart du temps, l'argument utilisé pour justifier le choix de la localisation du site est celui de la proximité (Gonçalves et al., 2015). En effet, la proximité permet de faire en sorte que les actions de la compensation soient bénéfiques au site impacté et ainsi maintenir l'équilibre entre les différents écosystèmes tout en s'assurant d'avoir une équivalence d'espèces, d'habitats et de fonctions écologiques (Lucas, 2009). Or, le terme "proximité" est vague et peut varier d'une situation à l'autre et la compensation sur un site proche n'est pas obligatoirement la meilleure solution. Parmi les autres critères de choix on retrouve souvent l'équivalence. Le site de compensation devrait être équivalent au site impacté afin d'atteindre l'objectif d'absence de perte nette. Cependant l'équivalence peut concerner la surface, les espèces présentes, les habitats, les fonctions écologiques... Certaines études précisent sur quel critère d'équivalence se base le choix de la localisation du site de compensation, mais il est rare que la méthodologie employée soit précisée.

Certains articles soulèvent le dilemme entre le choix d'un site compensatoire proche du site impacté afin que les bénéfices se fasse sur la même zone et le choix d'un site qui offre les meilleurs bénéfices pour les espèces impactées mais en étant moins regardant sur sa localisation (Kiesecker et al., 2009).

Pour ce qui est de la France, bien que l'application de la séquence ERC soit une obligation inscrite dans le cadre juridique et administratif français, la documentation existante sur ce sujet reste faible et incomplète à l'heure actuelle. En effet, l'application de la séquence ERC nécessite de faire une étude d'impact en amont or il n'y a pas de méthodologie précise et officielle pour la réaliser, seulement des guides de référence proposant un "cadre commun de préparation et de réalisation de l'étude d'impact" (Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, 2001).

Même si l'amélioration actuelle des connaissances en écologie et les prises de conscience politiques permettent d'envisager une amélioration des méthodes de compensation, les méthodologies restent aujourd'hui peu détaillées. Il a donc été difficile de trouver des articles scientifiques permettant de répondre à la problématique posée dans ce rapport. Néanmoins deux méthodes détaillées permettant de choisir les sites compensatoires ont pu être identifiées suite à nos recherches. La première est une méthode appliquée en France par la mission économie de la biodiversité et la ligue de protection des oiseaux en France et la seconde est une méthode utilisée à l'international se basant sur l'utilisation du logiciel Marxan.

2 Présentation des méthodes d'identification des sites compensatoires à haut potentiel de gain écologique

Les méthodes présentées ci-après ont toutes deux pour but d'identifier des sites à fort potentiel de gain écologique pouvant servir de site compensatoire idéal dans le cadre de projets d'aménagement.

Les méthodes identifiées ne sont qu'au nombre de deux, puisqu'un temps conséquent a été consacré à l'identification de méthode permettant d'identifier les sites à haut potentiel de gain écologique. La littérature sur le sujet n'est en effet pas très importante.

2.1 Méthode 1 : Comment localiser les sites à haut potentiel écologique et orienter la recherche de sites compensatoires ? Méthodologie de diagnostic territorial basée sur la répartition des espèces à enjeux.

Une première méthode d'identification a été élaborée par la mission économie de la biodiversité et la ligue de protection des oiseaux, à destination des départements français.

Cette méthode vise à proposer, sur un territoire défini (le département), des zones dont le potentiel écologique est de nature à répondre aux besoins de compensation écologique des projets d'aménagements. Elle se base sur des jeux de données naturalistes spatialisés. Cette méthodologie a pour objectif d'être compréhensible et facile à mettre en œuvre, applicable par d'autres et ailleurs, d'utiliser des sources de données disponibles et facilement mobilisables (Mission Economie de la Biodiversité, 2016).

2.1.1 Principe de base de la méthode

La méthode s'organise en 4 phases principales :

- La constitution d'une base de données naturaliste ;
- L'analyse de la base de données sur des mailles d'une taille de 25 km² ;
- L'analyse de la base de données sur des mailles d'une taille de 25 ha ;
- L'identification des parcelles de compensation.

Pour la première phase, se sont souvent des bases de données naturalistes déjà existantes qui sont utilisées. Elles sont issues de recueils de données départementales, de données du schéma régional de cohérence écologique (SRCE), d'analyses bibliographiques ou de contacts. Pour autant les bases de données ne sont pas alimentées uniformément, une hétérogénéité dans la répartition géographique des relevés peut être régulièrement soulevée (zones plus ou moins accessibles), mais aussi dans la qualité de données (les observateurs n'ont pas tous les mêmes compétences), enfin l'observation de certains taxons peut être plus compliquée ou susciter moins d'intérêt, ils seront alors sous-représentés dans la base de données, malgré leur présence. C'est néanmoins à partir de ces données que vont être identifiées les mailles d'intérêt écologique (Mission Economie de la Biodiversité, 2016).

2.1.2 Identification des mailles d'intérêt écologique

Les mailles d'intérêt écologique sont des mailles d'une surface de 25 km² identifiées sur le territoire défini pour la compensation, le département.

Les mailles d'intérêt écologique peuvent être identifiées selon quatre hypothèses qui dépendent du jeu de données alloué au traitement.

La **première hypothèse** suppose que : Le nombre d'espèces protégées par maille permet d'identifier des mailles d'intérêt écologique.

Elle est valable dans le cas où les groupes taxonomiques comportent peu d'espèces protégées, puisqu'elle fait effectivement ressortir les mailles d'intérêt écologique, et l'analyse cartographique est simple à réaliser. A contrario cette hypothèse est peu valable pour les groupes comportant un grand nombre d'espèces protégées assorti à un grand nombre de données naturalistes puisque cela fausse le critère "espèces protégées" en faisant apparaître de nombreuses mailles de fort intérêt. Aussi la carte produite représente davantage la diversité écologique dans les zones les mieux inventoriées, ce qui constitue un biais pour la méthode, qui est accentuée lorsque le nombre d'espèces protégées est élevé.

La **deuxième hypothèse** suppose que : L'utilisation de plusieurs critères de menace basés sur la liste rouge UICN permet d'identifier des mailles d'intérêt écologique.

En effet, l'application du critère « espèces protégées et menacées sur liste rouge régionale » permet de sélectionner les mailles les plus importantes en termes de potentiel écologique. Cette hypothèse est à retenir pour les taxons très riches en espèces protégées et en données naturalistes. Pour autant, le risque concernant les taxons comportant peu d'espèces en liste rouge, est de faire ressortir trop peu (voire aucune) maille. La sélection des mailles les plus intéressantes est impossible pour ces groupes taxonomiques.

La **troisième hypothèse** suppose que : L'utilisation du critère de menace le plus important (en danger critique d'extinction sur liste rouge UICN) permet d'identifier des mailles d'intérêt écologique.

Cette hypothèse permet de sélectionner efficacement un nombre réduit de mailles quand le jeu de données initiales est trop important pour isoler des mailles avec les hypothèses 1 et 2.

Cependant, le filtre appliqué sur le jeu de données est draconien. Pour certains départements où aucune espèce en danger critique n'est présente, il faudra revoir ce critère à la baisse (EN ou NT par exemple). Aussi, le critère « espèces les plus menacées » est trop discriminant pour faire ressortir des mailles véritablement d'intérêt écologique. De plus, les espèces en danger critique d'extinction (CR) ne répondent pas nécessairement à un besoin de compensation. La méthode n'est pas applicable aux taxons pour lesquels un nombre très réduit d'espèces sont classées CR.

La **quatrième hypothèse** suppose que : L'utilisation d'un *scoring* appliqué à partir d'un degré de menace basé sur la liste rouge UICN permet d'identifier des mailles d'intérêt écologique.

Cette méthode permet de conserver le jeu de données d'espèces protégées dans son intégralité. L'application d'un *scoring* permet de prendre en compte une notion de diversité spécifique par maille. Mais de manière générale, les résultats obtenus avec la méthode du *scoring* s'apparentent à ceux de l'hypothèse 1 ou l'hypothèse 2.

Pour savoir quelle hypothèse choisir en fonction du jeu de données, une clé dichotomique est disponible comme aide à la décision, voir Figure 3 (Mission Economie de la Biodiversité, 2016).

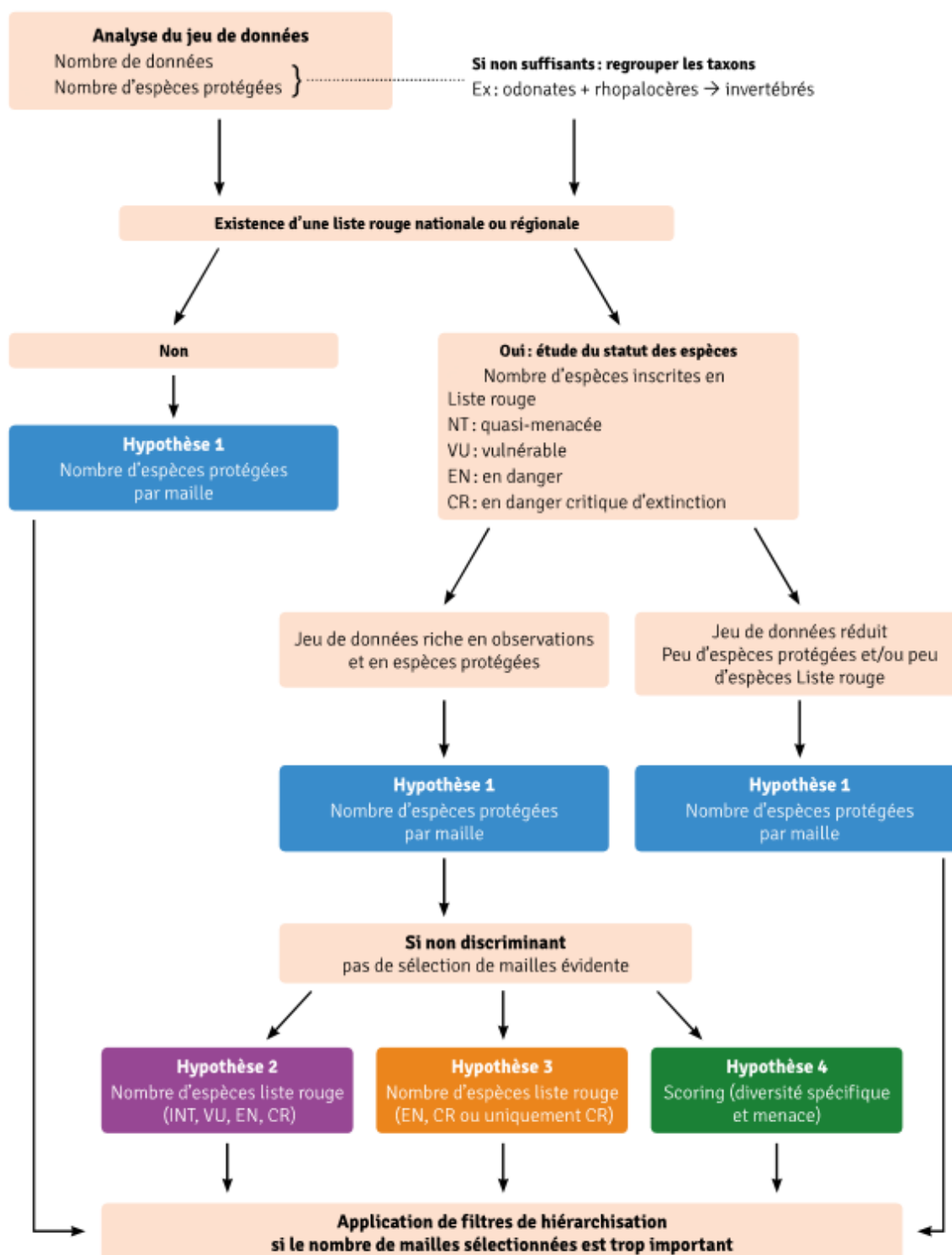


Figure 3 : Diagramme de sélection de l'hypothèse la mieux adaptée en fonction du jeu de données disponible (Mission Economie de la Biodiversité, 2016)

Si les hypothèses précédentes ne permettent pas d'identifier un nombre de mailles assez réduit alors une seconde sélection et hiérarchisation devra être effectuée.

2.1.3 Sélectionner et hiérarchiser les mailles à haut potentiel écologique

De la même façon que pour la première sélection, celle-ci peut se faire de 4 façons différentes, toujours par l'application de filtres.

Le **premier filtre** suppose que : Les mailles d'intérêt écologique pour une espèce cible et cumulant des enjeux pour un ou plusieurs groupes taxonomiques sont sélectionnées prioritairement.

Cette méthode est simple à appliquer et évite le calcul d'indices difficiles à mettre au point pour croiser des données d'espèces très diverses, dans leur écologie ou leur caractère patrimonial. C'est aussi une méthode très sélective pour identifier les zones à forts enjeux biologiques. Cependant elle nécessite d'utiliser des groupes taxonomiques représentatifs, avec des jeux de données suffisamment significatifs.

Le **deuxième filtre** suppose que : Les mailles d'intérêt écologique soumises à la pression anthropique sont les plus adaptées pour des mesures de compensation.

L'application de ce filtre se base sur les indicateurs du SRCE, qui sont une base publique pour une prise en compte des enjeux de biodiversité au niveau régional. La méthode SRCE, est une méthode validée et intégrée au processus de mobilisation du collectif d'acteurs publics. Elle fait référence à la BD TOPO® qui est régulièrement mise à jour et a une résolution fine (de l'ordre du 25 000ème). Des modulations des zones tampons sont possibles pour une analyse multi-échelle. Ces éléments en font une méthode facilement applicable dans les différentes régions et départements français. Néanmoins quelques réserves sont à émettre, puisqu'il existe des SRCE non validés ou en cours de validation qui risquent donc de ne pas permettre l'application de ce filtre. Les valeurs des zones tampons sont arbitraires : le choix des mailles sélectionnées dépend directement des valeurs de zones tampons attribuées. Enfin la sélection des mailles les plus anthropisées se fait par interprétation visuelle, ce qui ne permet pas d'affirmer une reproductibilité de la méthode.

Le **troisième filtre** suppose que : L'identification des mailles d'intérêt écologique doit se faire dans les périmètres ZNIEFF, après application d'un premier filtre sélectif.

Dans le cas de figure où un nombre de mailles satisfaisant est compris dans les périmètres ZNIEFF, le changement d'échelle (passage de la maille à une parcelle) sera facilité lors de la sélection des sites à haut potentiel écologique. Les ZNIEFF sont en effet définies sur des entités géographiques et/ou écologiques cohérentes. Mais certains départements sont peu fournis en périmètres ZNIEFF : le risque est d'avoir de nombreuses mailles d'intérêt situées en dehors des ZNIEFF. Un trop grand nombre de sites à haut potentiel écologique peuvent être exclus. Le résultat est donc dépendant des critères inhérents à la délimitation des ZNIEFF et peut montrer une certaine variabilité d'un département à l'autre en fonction de la gouvernance qui a permis la sélection.

Le **quatrième filtre** suppose que : L'identification des mailles d'intérêt écologique doit se faire dans les périmètres ZNIEFF, après application d'un premier filtre sélectif.

La possibilité d'agrandissement d'une zone protégée réglementairement grâce à des sites à haut potentiel écologique identifiés à proximité peut être étudiée. Malheureusement certains périmètres ne sont pas disponibles en téléchargement libre, ce qui ne permettra pas d'être exhaustif.

Ces quatre filtres permettent donc d'avoir une sélection plus précise et un nombre moins important de zones à haut potentiel écologique (Mission Economie de la Biodiversité, 2016).

2.1.4 Identifier les sites d'intérêt écologique

Une fois la sélection des zones à haut potentiel effectuée, les sites d'intérêt écologique vont pouvoir être identifiés.

Pour cela, les mailles de 25 km² sélectionnées vont être divisées en sous ensemble de 25 ha. Il s'agit ensuite de sélectionner les mailles (25 km²) cumulant le plus de diversité en espèces protégées. Une fois celles-ci sélectionnées, un calcul du nombre d'espèces floristiques protégées dans les mailles de 25 ha sera effectué afin d'identifier les sous-ensembles les plus riches. Ces sous-ensembles de 25 ha sont ensuite agrégés pour pré-sélectionner le site d'intérêt écologique. Enfin une pré-analyse cartographique du site d'intérêt écologique est effectuée, en prenant en compte les parcelles cadastrales et les zones urbanisées. Ceci amène donc à l'identification d'une liste de sites d'intérêt écologique pouvant servir de support pour la mise en place de mesures compensatoires.

Un travail bibliographique, une analyse de terrain et une animation foncière sont ensuite menés afin d'identifier les parcelles susceptibles de faire l'objet de mesures compensatoire. L'analyse cartographique couplée au repérage de terrain permettra de définir les zones pouvant faire l'objet d'une restauration écologique ou d'une récréation du milieu naturel. Les parcelles privilégiées pourront être des carrières abandonnées, des friches industrielles, des friches agricoles, d'anciennes zones militaires, des zones humides dégradées, ou des corridors écologiques à restaurer.

Enfin la précision du périmètre s'effectue en fonction des contraintes foncières et réglementaires, de l'occupation des sols. Cette méthode amène donc à l'identification d'un site d'intérêt écologique pouvant servir de support pour la mise en place de mesures compensatoires (Mission Economie de la Biodiversité, 2016).

2.2 Méthode 2 : *Marxan and relatives, software for spatial conservation prioritization*

2.2.1 Présentation du logiciel

Marxan est un logiciel développé par Ian Ball lors de sa thèse en 1996. Ce logiciel, anciennement nommé Siman puis Spexan, avait pour but de résoudre le problème de conception de la réserve minimale dans le cadre de projets de création de réserves naturelles. Marxan permettait alors de sélectionner des sites permettant d'atteindre les buts de conservation tout en minimisant les coûts et cela grâce à un programme mathématique (Cocks et Baird, 1989). Marxan signifie “*marine reserve design using spatially explicit annealing*” car le logiciel servait au départ pour la définition de réserves marines mais il peut tout à fait être utilisé sur des écosystèmes terrestres.

Marxan permettait alors de sélectionner des sites permettant d'atteindre les buts de conservation tout en minimisant les coûts et cela grâce à un programme mathématique (Cocks et Baird, 1989). Marxan signifie “*marine reserve design using spatially explicit annealing*” car le logiciel servait au départ pour la définition de réserves marines mais il peut tout à fait être utilisé sur des écosystèmes terrestres (Ball, Possingham, et Watts, 2009).

Marxan est aujourd'hui un logiciel gratuit, libre d'utilisation et pouvant interagir avec différents logiciels de SIG (Ball, Possingham, et Watts, 2009). Aujourd'hui il n'est plus seulement utilisé pour sélectionner des sites servant de réserve mais aussi pour résoudre une large gamme de problèmes de priorisation spatiale. Il peut donc être utilisé par les maîtres d'ouvrages pour les aider à sélectionner les sites compensatoires les plus propices. C'est le logiciel de planification le plus utilisé dans le monde, avec des utilisateurs dans plus de 110 pays (Ball, Possingham, et Watts, 2009).

Dans cette partie, nous allons nous concentrer sur la version *Marxan with zones* qui est un outil d'analyse permettant le zonage.

Nous allons nous baser ici sur l'exemple donné dans l'article "*Optimizing regulatory requirement to aid in the implementation of compensatory mitigation*" de Kei Sochi et Joseph Kiesecker datant de 2016 (Sochi et Kiesecker, 2016). Il s'agit, dans ce cas d'étude, de compenser les impacts d'un projet d'extraction de gaz et de pétrole de 55 000 ha dans le San Juan Basin au Sud-Ouest du Colorado. L'étude d'impacts a montré que ce projet aura des conséquences sur des habitats propices à la vie sauvage et notamment sur des espèces protégées par les "*1298 Rules*" (General Assembly of the State of Colorado, [s.d.]).

La région ayant déjà été impactée par de nombreux projets d'extraction, c'est la compensation en *off-site* qui a été considérée comme la plus appropriée. Une compensation off-site signifie que le site compensatoire ne se trouvera pas à proximité directe du site impacté car son environnement n'est pas propice. Elle s'oppose, par définition, à la compensation *in-site*.

Afin de savoir quel site compensatoire serait le plus propice, les données spatiales de répartition des espèces protégées ainsi que de leurs habitats ont été récoltées auprès de la CPW. Les données concernant les autres espèces présentes sur le site impacté ont été récupérées auprès d'acteurs locaux et d'agences publiques fédérales et de l'état. Certaines données proviennent des bases de données produites par le *Colorado Natural Heritage Program*, du *Nature Conservancy* et du *Colorado State Wildlife Action Plan*. Pour utiliser Marxan, il est important d'avoir à disposition un grand nombre de données permettant ainsi au logiciel de pouvoir analyser avec précision le territoire.

2.2.2 Fonctionnement de la méthode

L'utilisation de Marxan peut se résumer en 3 phases principales :

- Définition des buts de la conservation ou de la compensation ;
- Définition des contraintes pouvant peser sur les sites compensatoires ;
- Définition des zones visées pour la compensation.

2.2.2.1 Définition des buts de la compensation

L'objectif premier du logiciel est d'atteindre des "buts de compensation". Ces buts de compensation correspondent aux espèces, aux écosystèmes ou aux domaines environnementaux impactés et servant donc de base à la compensation. Il est possible de préciser au logiciel si certains buts peuvent être seulement partiellement atteints ou si certains sont inatteignables afin que celui-ci s'ajuste.

Dans notre étude de cas, les buts de compensation sont pour la majorité spécifiques aux espèces animales impactées. Grâce aux données récoltées et aux avis d'experts écologues, 19 espèces ont été identifiées comme cibles de la compensation. Parmi celles-ci, 5 sont des espèces protégées. Des calculs ont permis de déterminer des surfaces impactées : zones de nidification, zones d'hivernage, zones à forte concentration d'individus...

Le but est donc ici de recréer ces aires impactées dans la future zone de compensation. Pour cela, il faut donc que la zone choisie possède les milieux propices mais également qu'elle ait la capacité surfacique pour les accueillir.

Les buts peuvent prendre d'autres formes : conserver un certain pourcentage de la surface originale de chaque type de végétation, maintenir un certain nombre d'individus adultes d'une espèce...

Des indices de pénalités permettent de définir les zones à forte valeur écologique. Si les espèces cibles de la compensation ne sont pas présentes sur un site, ce dernier se verra attribué une pénalité. Cette pénalité est plus forte pour les espèces protégées afin qu'elles soient prioritaires.

2.2.2.2 Définition des contraintes

Cette étape consiste à étudier les contraintes qui pèsent sur le projet de compensation afin que le logiciel puisse les prendre en compte. Parmi ces contraintes on retrouve le coût lié à l'acquisition des terrains, le statut de certaines zones rendant leur acquisition impossible, ou encore les écosystèmes inadaptés... Comme indiqué précédemment, la compensation doit ici être effectuée *off-site*. Il faut donc préciser ce paramètre au logiciel afin qu'il ne propose pas de sites trop proches de la zone impactée. Toutes les zones où le développement des extractions de gaz et de pétrole sont à prévoir, sont elles aussi exclues. Pour cela, on indique au logiciel Marxan de tracer des zones tampons autour des puits actuellement utilisés et de ne pas choisir de zones possédant du gaz ou du pétrole dans leur sous-sol (en se basant sur des données géologiques et pédologiques). Un indice de perturbation est créé symbolisant l'intégrité écologique. Ainsi, une pénalité est attribuée aux sites présentant des routes, des puits, des lignes de transmission ou encore des zones urbanisées car ils sont moins propices à la réalisation d'une compensation efficace (Figure 4).

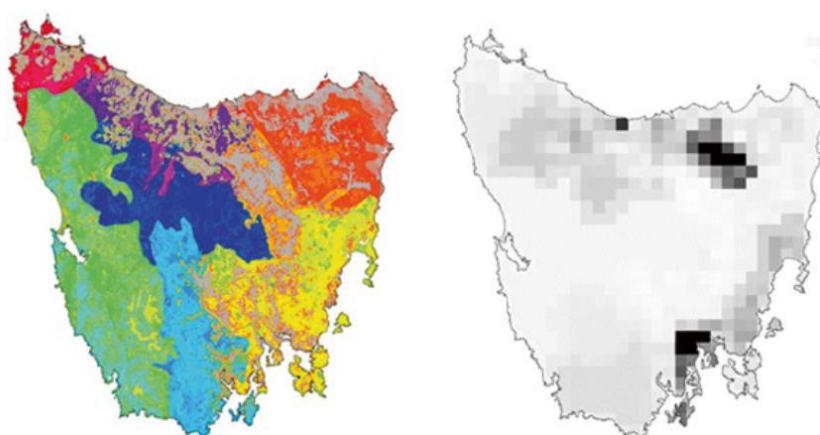


Figure 4 : Exemple de cartes fournies par Marxan. La première représente les types de végétation et la seconde les coûts d'acquisition des terrains, les plus foncés étant les plus chers (Watts et al., 2017)

On prend ainsi en compte à la fois des contraintes techniques, écologiques mais aussi sociologiques puisque le rôle actuel et futur du site est étudié. Il est en effet possible d'indiquer au logiciel quels seront les usages du site compensatoire qui seront autorisés ou interdits (par exemple la pêche, la randonnée...).

2.2.2.3 Définition des zones visées pour la compensation

Dans le but de faciliter l'absence de perte nette, il est préférable de choisir des sites dont les écosystèmes et les fonctions écologiques sont proches de celles du site impacté. C'est ce que précise la loi biodiversité du 8 août 2016 "les mesures de compensation sont mises en œuvre en priorité sur le site endommagé ou, en tout état de cause, à proximité de celui-ci afin de garantir ses fonctionnalités de manière pérenne". Dans le logiciel Marxan, il est possible de préciser quel type d'écosystème est à favoriser dans le choix du site compensatoire. Dans notre étude de cas basée au Colorado, les écosystèmes préférentiels sont des écosystèmes semi-désertiques : steppes arbustives, prairies semi-désertiques...

Un indice dit de "longueur limite" a également été ajouté à l'équation. Cet indice permet d'éviter les propositions de sites compensatoires dont les habitats sont fragmentés.

Cette étape permet donc de cibler précisément quel type de site compensatoire est recherché, tant dans sa forme que dans sa nature. Elle nécessite donc une bonne connaissance du projet par les maîtres d'ouvrage.

2.2.2.4 Résultats obtenus

Deux scénarios ont été testés dans le logiciel Marxan : le premier utilisait uniquement les espèces protégées (*regulatory run*) et le second utilisait les espèces protégées ainsi que d'autres espèces additionnelles (*extended conservation run*).

En sortie, le logiciel produit plusieurs fichiers comme indiqué dans le tableau ci-dessous (Alphandéry et Fortier, 2015) :

Tableau I : Description des fichiers produits par Marxan et de leur utilisation possible

Nom du fichier	Description	Utilisation de ces fichiers
<i>Solution for each run</i>	C'est un fichier texte qui liste les unités de planification (les sites) étudiées et indique si elles sont sélectionnées ou non pour devenir un site compensatoire.	<ul style="list-style-type: none"> ● Afficher les sites compensatoires sur un logiciel de cartographie ; ● Comparer spatialement les sites compensatoires ; ● Les cartes peuvent être utilisées comme outil de communication pour les maîtres d'ouvrage.
<i>Summed solution</i>	Ce fichier indique le nombre de fois où chaque unité de planification a été sélectionnée en tant que site compensatoire potentiel. Ce fichier donne une indication sur l'importance relative d'une unité de planification pour servir de site compensatoire. Il est souvent utilisé pour indiquer les unités prioritaires.	<ul style="list-style-type: none"> ● Affichage SIG de la fréquence de sélection des unités de planification (et donc de leur importance relative) ; ● Permet d'identifier les zones clés pour la compensation.
<i>Missing value information</i>	Ce fichier fournit des précisions sur comment chaque site sélectionné participe aux buts de la compensation (ex : nombre de buts atteints...)	<ul style="list-style-type: none"> ● Indique les buts atteints ou non et à quel niveau ils le sont ; ● Permet de voir les pénalités appliquées à chaque unité de planification.
<i>Summary information</i>	Ce fichier résume les résultats pour chaque scénario étudié (objectifs atteints, score, surface, pénalités...)	<ul style="list-style-type: none"> ● Comparer la "performance" de chaque solution en termes de coût, de score, de buts validés...

Une carte du territoire présentant les zones les plus propices à servir de site compensatoire pour le projet d'aménagement étudié ainsi que les surfaces correspondantes aux buts de compensation peuvent être

réalisées sur un logiciel de cartographie afin de visualiser les résultats de Marxan. On peut ainsi vérifier si les buts sont validés ou non et à quel taux.

Dans notre étude de cas, plusieurs sites compensatoires favorables ont été trouvés, et cela pour les deux scénarios (Figure 5).

Le maître d'ouvrage peut donc visualiser les sites compensatoires les plus propices en termes écologique, économique et social grâce à tous les paramètres rentrés dans Marxan.

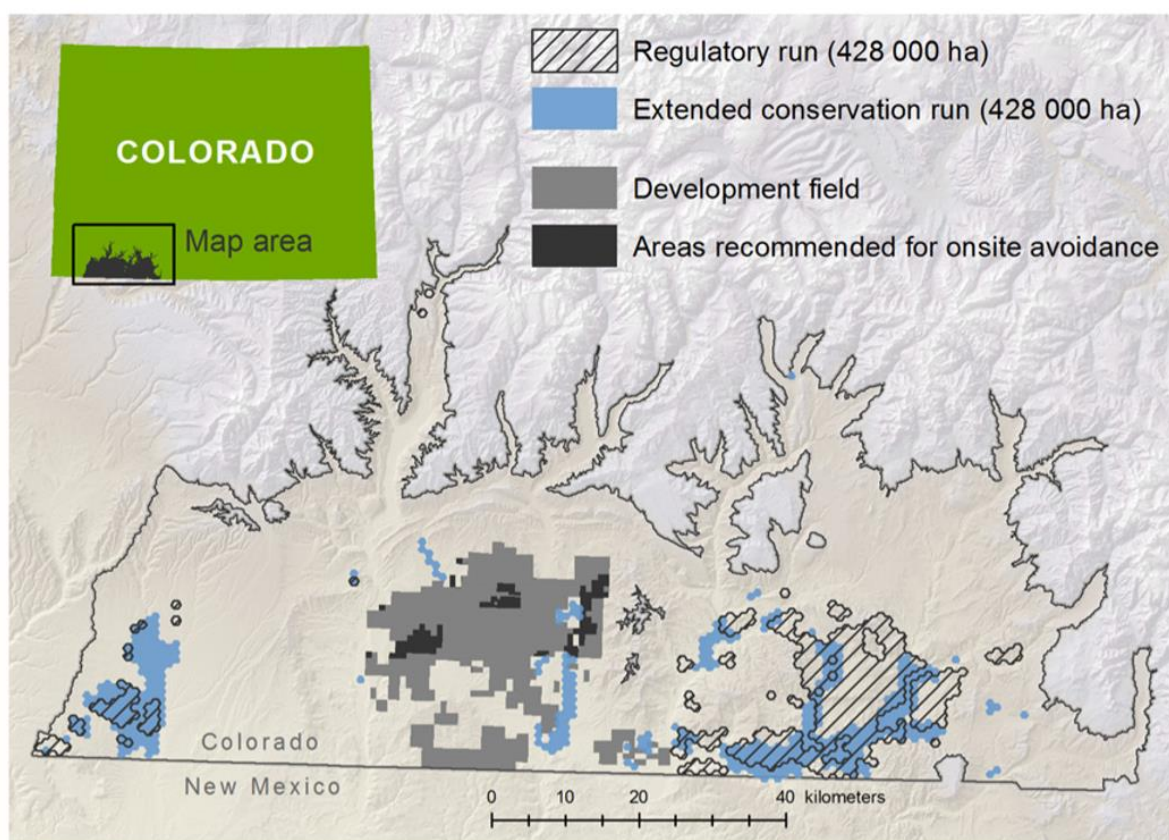


Figure 5 : Carte des aires propices à servir de site compensatoire créée à partir des analyses de Marxan with zones (Sochi et Kiesecker, 2016)

3 Résultats et limites des méthodes présentées

3.1 Points forts et limites de la méthode 1

La méthode proposée par la mission économie de la biodiversité, relative à la localisation des sites à haut potentiel écologique permet d'identifier des sites de façon rapide. En effet sa linéarité, ses échelles d'analyses et ses paramètres en font une méthode facilement reproductible. Pour autant cette méthode est une méthode française, et même si un grand nombre de paramètres qu'elle utilise peuvent être transposés à l'échelle internationale, ce n'est cependant pas toujours le cas. Parmi ces paramètres on retrouve :

- Le premier territoire d'analyse qui est le département, c'est un échelon territorial typiquement français qui n'existe pas dans d'autres pays. Une solution qui pourrait permettre de transposer cette première échelle d'analyse à l'international serait de déterminer un périmètre de recherche

environ équivalent à la surface d'un département pour rechercher les sites à haut potentiel écologique.

- Le concept d'espèce protégé utilisé dans l'hypothèse 1 est un concept français qui semble donc difficilement transposable. Pour autant les listes UICN, se rapprochant du concept d'espèce protégée, sont utilisées dans d'autres hypothèses et peuvent répondre à un questionnaire similaire.
- Certains documents réglementaires, comme le SRCE utilisé dans le filtre 2, sont des documents typiquement français qui ne sont pas internationaux.

La méthode se base sur des jeux de données dont la fiabilité ne peut être certaine, dû aux connaissances diverses des expérimentateurs. Enfin, cette méthode est très récente, il est donc aujourd'hui impossible de connaître l'efficacité des mesures compensatoires qui auraient pu être menées sur ces sites.

3.2 Points forts et limites de la méthode 2

Comme nous venons de le voir, le logiciel Marxan, et plus particulièrement son extension *Marxan with zones* permet d'aider au choix du site compensatoire le plus adapté dans le cadre d'un projet d'aménagement. L'utilisation d'un tel logiciel peut donc être un atout dans le cadre de l'application de la séquence ERC mais elle présente également des limites :

- L'utilisation de Marxan est complexe et nécessite d'avoir un grand nombre de données à disposition, que ce soit des données naturalistes ou économiques. Or, les données à disposition en France sont souvent moins précises et exhaustives qu'aux Etats-Unis.
- Il faut connaître son projet en détails afin de pouvoir indiquer au logiciel tout ce qu'il doit prendre en compte, cela signifie qu'il faut passer beaucoup de temps à étudier toutes les facettes de la compensation.
- L'aspect écologique semble moins détaillé que dans la première méthode. On prend ici seulement en compte la répartition des espèces protégées et le type d'écosystème recherché.

Les points forts de Marxan sont toutefois évidents :

- C'est un logiciel polyvalent et adapté à un large éventail de problèmes de gestion des ressources (Watts et al., 2009): peut s'appliquer à plusieurs types de problèmes de spatialisation (notamment grâce à l'extension *Marxan with zones*), à différents écosystèmes (terrestres et aquatiques) et dans différents pays.
- Prend en compte la problématique budgétaire et d'acquisition des parcelles.
- Prend en compte des facteurs sociologiques et économiques afin que les propositions faites soient écologiquement, socialement et économiquement viables.
- L'utilisation de ce logiciel permet une étude à l'échelle du paysage qui favorise la prise en compte de la nature et des activités humaines au sein du projet et permet d'éviter les conflits.

Ce logiciel et la popularisation de son utilisation restent récents, c'est pourquoi ce dernier s'améliorera probablement suite aux retours d'expérience de plus en plus nombreux. Le logiciel Marxan reste un outil d'aide à la décision et non un outil de prise de décision, l'expérience et le savoir des maîtres d'ouvrage restent indispensables dans le choix des sites compensatoires.

3.3 Comparaison des deux méthodes entre elles

Tableau II : Comparaison des deux méthodes étudiées

Méthode 1 : Méthodologie de diagnostic territorial basée sur la répartition des espèces à enjeux	Méthode 2 : <i>Marxan with zones</i>
Utilisation d'un logiciel de cartographie	Utilisation d'un logiciel spécifique et d'un logiciel de cartographie
Méthode française mais transposition à l'étranger possible car utilise des concepts nationaux facilement transposables à l'international	Méthode applicable sur tous les écosystèmes et donc dans tous les pays à condition de posséder suffisamment de données
Nécessite des jeux de données (naturalistes) importants	Nécessite des jeux de données (naturalistes, sociologiques, économiques) importants
Principe simple donc mise en application assez intuitive	Principe de fonctionnement plus complexe et prise en main du logiciel
Rendu visuel facilement exploitable et compréhensible	Rendu visuel facilement exploitable et compréhensible
Prise en compte de la biodiversité uniquement	Prise en compte des contraintes économiques et sociales
Ne prend pas en compte les aspects économiques de l'achat des sites	Prend en compte l'aspect économique lié à l'acquisition des sites
Site qui a un fort potentiel de gain écologique : généralistes	Site qui correspond le mieux aux espèces détruites/écosystèmes : sites spécialisés pour l'accueil d'une ou plusieurs espèces
Ne prend pas en compte la distance au site impacté	Prend en compte la distance au site impacté

Les deux méthodes étudiées ont pour point commun la nécessité d'avoir à disposition un grand nombre de données écologiques sur le territoire concerné. Elles peuvent toutes les deux s'appliquer sur le territoire français et sont également transposables à l'étranger, sous réserve de quelques modifications. Enfin, les méthodes permettent toutes deux d'obtenir un résultat cartographique facilement compréhensible et exploitable.

La principale différence est que la méthode Marxan prend en compte plus d'indicateurs que la méthode 1 qui elle ne prend en compte que des facteurs purement écologiques dans la recherche du meilleur site compensatoire. La première méthode cherche uniquement à trouver les sites présentant un potentiel de gain écologique important mais ne prend pas en compte la distance au site impacté, les aspects économiques...

3.4 Pistes d'amélioration des méthodes

La première méthode n'est que très peu utilisée car elle est encore récente. C'est en effet une méthode locale, créée en 2016 par la mission économie de la biodiversité et la ligue de protection des oiseaux dans le département des Alpes-Maritimes et à destination des départements. La seconde méthode, quant à elle, est beaucoup plus répandue et a donc déjà été utilisée sur plusieurs projets à travers le monde. Malgré cela, il existe très peu de retours d'expérience permettant de conclure quant à l'efficacité de ces méthodes de choix des sites compensatoires. En effet, le suivi des projets de compensation étant long, cher et non imposé par la législation dans la majorité des pays dont la France, il est rare que la compensation soit suivie après sa réalisation.

Les pistes d'amélioration proposées ci-après se basent donc sur notre propre réflexion vis à vis de ces méthodes.

L'un des points faibles de la méthode 1 est que seule la composante écologique est prise en compte dans la recherche du site compensatoire le plus adapté contrairement à la méthode utilisant Marxan. Cela permet d'obtenir un site dont le gain écologique potentiel est fortement probable puisque les sites choisis sont souvent des sites "écologiquement pauvres", comme d'anciennes carrières ou des friches industrielles. L'efficacité des mesures sera d'autant plus importante que les sites sont entourés de zones dont la biodiversité est très importante (Mission Economie de la Biodiversité, 2016). Il est donc très probable que la faune et la flore colonise rapidement le site compensatoire, si la compensation est bien effectuée. Cependant, cette méthode ne permet pas de dire si les sites sont facilement acquérables (financièrement et foncièrement parlant), s'ils sont proches ou éloignés du site impacté ou encore si les écosystèmes sont identiques à ceux impactés.

La méthode Marxan nous paraît plus complète pour choisir le site compensatoire le plus adapté. Le point faible de cette méthode est qu'elle nécessite une très bonne définition du projet et des attentes de la compensation, ce qui peut prendre du temps. Il serait intéressant de pouvoir simplifier cette méthode même si sa complexité est l'essence même de ce qui la rend efficace.

L'un des points les plus importants pour l'application de ces deux méthodes est d'avoir à disposition des jeux de données conséquents et exhaustifs. Or, c'est peu souvent le cas en France, à grande échelle. Pour démocratiser l'utilisation de ces méthodes il serait donc intéressant de créer au préalable des bases de données naturalistes nationales conséquentes et mises à jour régulièrement. Ce type de projet a déjà été testé en France, avec par exemple la création en 2007 du système d'information sur la nature et les paysages (SINP) par le ministère en charge du Développement Durable. "Ce projet consiste à intégrer le maximum de données sur la nature et les paysages en France pour les rendre utilisables à une échelle plus large. Il s'inscrit ainsi dans l'esprit de la convention d'Aarhus et de la directive européenne Inspire : mettre l'information environnementale à la disposition du plus grand nombre." (Alphandéry et Fortier, 2015). Ce type de projets est donc à démocratiser.

D'autres méthodes d'identification des sites compensatoires existent, permettant d'apporter une autre vision de ce qui est nécessaire pour trouver le site compensatoire idéal. Cette méthode permet de compléter les points faibles identifiés dans les deux méthodes précédentes.

Lucie Bezombes a développé en 2018, au cours de sa thèse, une méthode d'évaluation de la biodiversité basée sur l'utilisation d'un nombre important d'indicateurs. Cette méthode ne permet pas directement de définir la localisation du site compensatoire le plus adapté mais "permet l'évaluation de la biodiversité dans un périmètre élargi autour du site impacté pour comparer le rôle des sites impactés et compensatoires dans un contexte plus général" (Bezombes, 2018). Cette méthode permettrait de combiner les 3 défis de la compensation, à savoir : opérationnalité, bases scientifiques et exhaustivité.

D'après (Bezombes, 2018) , il faut prioriser les efforts de conservation c'est à dire choisir la biodiversité à conserver en priorité :

- critères UICN : afin de conserver les espèces rares ou en voie d'extinction ;
- emblèmes : afin de préserver les espèces ou les écosystèmes emblématiques d'une région. Cette protection est facilitée par l'intérêt du public pour ces emblèmes ;
- utilité pour l'Homme : afin de préserver les espèces ou les écosystèmes qui rendent un service écosystémique à l'Homme (ex : les pollinisateurs, les zones humides...) ;
- espèces indicatrices de la qualité du milieu, clés de voûtes ou ingénieuses ;
- espèces avec le plus fort potentiel évolutif : afin de protéger les espèces qui sauront résister aux changements climatiques à venir.

Elle préconise dans sa méthode d'étudier la biodiversité à différents niveaux : Niveau Général (NG), Niveau Habitat (NH) et Niveau Espèce (NSp). Dans le cadre de l'étude d'impact, ces niveaux sont étudiés à l'échelle du site impacté et à une échelle élargie autour de ce dernier que ce soit pour le site impacté ou pour le site compensatoire.

La biodiversité est étudiée sous trois angles : composition (diversité, patrimonialité, représentativité), fonction (fonctionnalités et pression) et structure (structure et connectivité). Contrairement aux deux méthodes précédentes, la biodiversité est ici évaluée sous plusieurs aspects et non plus seulement sa structure.

Suite à cela des indicateurs sont associés à chaque critère d'évaluation. Ces indicateurs sont à rechercher dans la bibliographie et doivent avoir des bases scientifiques solides tout en étant opérationnels. En tout, 107 indicateurs ont été identifiés mais tous ne doivent pas être utilisés à chaque fois (Tableau III).

Tableau III : Lot final d'indicateurs intégré au cadre d'évaluation pour le Niveau Général (Bezombes, 2018)

Echelle	Critère	Indicateurs
Périmètre élargi	Connectivité	Longueur de linéaire de transport (km)
		Longueur de linéaire de haies (km)
		Surface de corridor écologique traversant le site (ha)
		Nombre d'espèces de cohérence régionale pour la TVB
	Représentativité	Proportion d'habitats naturels (%)
	Patrimonialité	Nombre d'espaces d'intérêt écologique
		Nombre d'espèces déterminantes ZNIEFF
	Pressions	Proportion de milieux cultivés (%)
		Proportion de zones construites (%)
		Surface de plantes invasives (ha)
		Nombre de source de pollution (usines)
Périmètre site	Diversité	Nombre et surface d'habitats naturels (ha; EUNIS niveau 2)
		Longueur de lisière / ha de milieu forestier
		Nombre d'espèces de faune (décliné par groupe taxonomique)
		Nombre d'espèces de flore
	Patrimonialité	Proportion surfacique des habitats patrimoniaux (%)
		Proportion des espèces patrimoniales (%)
	Fonctionnalité	Proportion de l'avifaune nicheuse (%)
		Proportion des espèces (non avifaune) se reproduisant sur le site (%)
		Indice de spécialisation de l'avifaune (Le Viol <i>et al.</i> 2012)
		Proportion d'espèce de chiroptères spécialistes (%)
	Pressions	Surface de milieux cultivés (ha)
		Proportion de zones construites (ha)
		Nombre et proportion surfacique d'espèces exotiques envahissantes (%)

Ces mesures d'évaluation de la biodiversité permettent d'évaluer les pertes et les gains induits par les impacts du projet et par les mesures compensatoires.

Cette méthode s'applique à différentes échelles et à différents niveaux ce qui permet à la fois d'évaluer les pertes de biodiversité engendrées mais également de trouver un site compensatoire à proximité du site impacté, présentant un haut potentiel de gain écologique et ainsi atteindre l'équivalence écologique recherchée.

Ce cadre méthodologique a été testé notamment lors du projet du barrage de Tignes et le projet hydroélectrique de Romanche Gavet. Les retours d'expérience actuels ne permettent pas de dire si cette méthode est efficace à long terme mais les résultats semblent encourageants à court terme avec une plus-value avérée de la méthode notamment en termes d'équivalence des milieux.

Une autre piste d'amélioration qui cette fois ne s'applique pas aux méthodes en elle-même mais plutôt à leur application, serait de mettre en place une compensation centralisée ou du moins d'associer la compensation centralisée avec le système actuel de compensation au cas par cas. La compensation centralisée "consiste à améliorer l'efficacité écologique et organisationnelle des mesures en les regroupant, si possible dans des zones identifiées comme nécessitant une amélioration de leur qualité écologique. Dans cette approche de compensation centralisée, une mesure de grande ampleur compense les impacts de plusieurs projets, ce qui devrait entraîner une meilleure chance de réussite de la compensation écologique et permettre un meilleur contrôle et suivi par les services de l'État."

(Vaissière, Bierry, et Quétier, 2016). Cela pourrait se faire par la mise en place d'un système de compensation par l'offre comme c'est le cas aux Etats-Unis.

3.5 Questions suscitées

Après avoir comparé ces méthodes, plusieurs questions se posent. La première porte sur la vérification de leur efficacité. Le manque de retours d'expérience est le premier obstacle à cette vérification mais le problème principal concerne le fait qu'on ne puisse pas discerner l'effet "choix du site" et l'effet des mesures compensatoires. En effet, dans le cadre de la réalisation de l'aménagement d'un site compensatoire, il est difficile de savoir si la réussite ou l'échec provient des actions mises en place ou bien du choix du site compensatoire. Le choix du site compensatoire fait cependant partie intégrante de la bonne réalisation de la compensation. L'efficacité de ces méthodes reste donc encore à prouver. D'autant plus qu'elles se basent principalement sur des données naturalistes, produites localement au sein d'associations privées et qui peuvent manquer de transparence et d'exhaustivité (Alphandéry et Fortier, 2015).

L'autre question qui se pose est, comment démocratiser l'utilisation de ce type de méthodes ? Comme nous l'avons vu, plusieurs méthodes existent actuellement et pourtant il a été difficile de trouver des rapports mentionnant leur utilisation. Dans le cadre de l'application de la séquence ERC, les sites compensatoires sont souvent choisis en fonction des opportunités foncières, de la proximité au site impacté, du type d'écosystème présent et de la surface disponible pour des questions de facilité. Mais cela ne garantit pas que le site choisi soit le plus adapté, ce qui peut mener à l'échec de la compensation. Pour que leur application se démocratise il faudrait qu'une méthode nationale se développe, basée sur de multiples indicateurs, et qu'elle soit imposée par la législation. Cependant imposer l'une de ces méthodes peut s'avérer coûteux et long, et le choix du site idéal pourrait alors diminuer le temps consacré à la bonne réalisation des mesures compensatoires.

Enfin, toutes ces réflexions nous amènent à nous demander si ces méthodes sont efficaces dans un contexte de changement climatique. En effet, l'intérêt de compenser la perte d'espèces ou d'écosystèmes voués à disparaître sous l'effet des changements climatiques actuels est questionnable. Faut-il compenser la destruction d'espèces qui seront peut-être amenées à disparaître d'ici quelques années ou bien au contraire la compensation ne devrait-elle pas plutôt favoriser leur migration dans le paysage ? Les méthodes peuvent toutefois s'adapter afin d'anticiper les conséquences de ces changements. Par exemple, Lucie Bezombes explique dans sa thèse que les efforts de conservation doivent se faire entre autres sur les espèces avec le plus fort potentiel évolutif afin que la compensation ne soit pas vaine. D'autres outils existent pour faire en sorte que la compensation ne soit pas obsolète. C'est le cas par exemple des outils permettant de modéliser la répartition potentielle actuelle des espèces ainsi que leur répartition future potentielle dans un contexte de changement climatique, tel que Maxent.

Conclusion

La mise en place d'une méthode standardisée d'identification des sites de compensation à haut potentiel de gain écologique remplissant l'objectif d'absence de perte nette semble aujourd'hui impossible ; pour cause principale : le manque de retours d'expérience des deux méthodes utilisées. En effet, même si les deux méthodes identifiées semblent pouvoir être efficaces et assez facile à mettre en place, le manque de retours d'expérience sur l'une et l'autre méthode ne permet pas de conclure sur leur efficacité dans la mise en place de mesures compensatoires. D'autres méthodes existent (comme celle de Lucie Bezombes), mais elles ne permettent pas encore de valider l'efficacité des mesures compensatoires à long terme bien qu'elles soient globalement cohérentes à court terme.

L'absence de méthodes standardisées ne permet pas non plus une identification facile de l'efficacité des mesures compensatoires. En effet la mise en place d'une méthode nationale standardisée permettrait de rendre obligatoire, d'un point de vue réglementaire, la mise en place d'un suivi des mesures compensatoires. Cette mesure permettrait d'avoir un plus grand nombre de retours d'expérience, et orienterait les actions selon les résultats obtenus dans un objectif de réussite des mesures compensatoires et d'absence de perte nette.

Aussi, dans un contexte de changement climatique, l'efficacité et la pertinence des mesures compensatoires peut être fortement compromise, la question qui se pose est : doit-on compenser des espèces qui seront peut-être amenées à disparaître d'un territoire donné dans quelques décennies, ou si au contraire la compensation ne devrait pas favoriser leurs déplacements dans le paysage pour migrer. C'est pour cette raison que des mesures de suivi sont primordiales afin d'apporter des réponses sur l'efficacité des mesures de compensation et sur leur pertinence.

Au-delà des mesures de compensation, les mesures d'évitement sont tout de même à privilégier. Elles permettent de limiter à la source l'impact des aménagements effectués et permettent donc une meilleure prise en compte de la biodiversité.

Bibliographie

Alphandéry P., Fortier A. « Les données naturalistes à l'épreuve de la transparence ». *Études Rural.* 1 juin 2015. n°195, p. 127-144.

Ball I. R., Possingham H. P., Watts M. E. « Marxan and Relatives: Software for Spatial Conservation Prioritization ». 2009. p. 12.

Bezombes L. *Développement d'un cadre méthodologique pour l'évaluation de l'équivalence écologique: Application dans le contexte de la séquence « "Éviter, Réduire, Compenser" » en France* [En ligne], 2018. Disponible sur : < <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01746852/document> >

Cocks K. D., Baird I. A. « Using mathematical programming to address the multiple reserve selection problem: An example from the Eyre Peninsula, South Australia ». *Biol. Conserv.* [En ligne]. 1 janvier 1989. Vol. 49, n°2, p. 113-130. Disponible sur : < [https://doi.org/10.1016/0006-3207\(89\)90083-9](https://doi.org/10.1016/0006-3207(89)90083-9) >

Gelcich S., Vargas C., Carreras M. J., Castilla J. C., Donlan C. J. « Achieving biodiversity benefits with offsets: Research gaps, challenges, and needs ». *Ambio* [En ligne]. 1 mars 2017. Vol. 46, n°2, p. 184-189. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1007/s13280-016-0810-9> >

General Assembly of the State of Colorado. *CONCERNING THE CONSERVATION OF WILDLIFE HABITAT IN CONNECTION WITH THE DEVELOPMENT OF OIL AND GAS, AND MAKING AN APPROPRIATION THEREFOR 1298* [En ligne]. Disponible sur : < [http://www.leg.state.co.us/clics/clics2007a/csl.nsf/billcontainers/A5025BD576A9A6E587257251007D5AF5/\\$FILE/1298_enr.pdf](http://www.leg.state.co.us/clics/clics2007a/csl.nsf/billcontainers/A5025BD576A9A6E587257251007D5AF5/$FILE/1298_enr.pdf) >

Gonçalves B., Marques A., Soares A. M. V. D. M., Pereira H. M. « Biodiversity offsets: from current challenges to harmonized metrics ». *Curr. Opin. Environ. Sustain.* [En ligne]. 1 juin 2015. Vol. 14, p. 61-67. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2015.03.008> >

Journal Officiel de la République Française. *LOI n° 2016-1087 du 8 août 2016 pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages - Article 70* [En ligne]., 2016. Disponible sur : < https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexteArticle.do;jsessionid=5A1C0DC9F8FC275796DEA1654481A61F.tpdila13v_3?idArticle=JORFARTI000033016417&cidTexte=JORFTEXT000033016237&dateTexte=29990101&categorieLien=id > (consulté le 13 décembre 2018)

Journal Officiel de la République Française. *Directive 85/337/CEE du Conseil du 27 juin 1985 concernant l'évaluation des incidences de certains projets publics et privés sur l'environnement.*

Kiesecker J. M., Copeland H., Pocewicz A., Nibbelink N., McKenney B., Dahlke J., Holloran M., Stroud D. « A Framework for Implementing Biodiversity Offsets: Selecting Sites and Determining Scale ». *BioScience* [En ligne]. 1 janvier 2009. Vol. 59, n°1, p. 77-84. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.1.11> >

Levrel H., Frascaria-Lacoste N., Hay J., Martin G., Pioch S. *Restaurer la nature pour atténuer les impacts du développement analyse des mesures compensatoires pour la biodiversité.* [s.l.] : Quae, 2015. (Synthèses (INRA)).

Lucas M. « La compensation environnementale, un mécanisme inefficace à améliorer ». *Rev. Jurid. Environ.* [En ligne]. 2009. Vol. 34, n°1, p. 59-68. Disponible sur : < <https://doi.org/10.3406/rjenv.2009.4844> >

Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement. *L'étude d'impact sur l'environnement* [En ligne]., 2001. Disponible sur : < http://www.pays-de-la-loire.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Etude_Impact_cle7abd69-1.pdf >

Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer, en charge des relations internationales sur le climat. *La séquence « éviter, réduire, compenser », un dispositif consolidé* [En ligne]. [s.l.] : [s.n.], 2017. Disponible sur : < <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Th%C3%A9ma%20-%20La%20s%C3%A9quence%20%C3%A9viter%20r%C3%A9duire%20et%20compenser.pdf> >

Mission Economie de la Biodiversité. *Les cahiers de BIODIV'2050 : La compensation écologique à travers le monde*. [En ligne]., 2016. Disponible sur : < <http://www.mission-economie-biodiversite.com/wp-content/uploads/2016/12/N10-COMPRENDRE-FR-BD.pdf> >

Radisson L. « La compensation par l'offre, avancée ou recul pour la biodiversité ? » In : *Actu-Environ.* [En ligne]., 2015. Disponible sur : < <https://www.actu-environnement.com/ae/news/compensation-par-offre-espaces-naturels-avancee- recul-biodiversite-24251.php4> > (consulté le 10 janvier 2019)

Regnery B. *Les mesures compensatoires pour la biodiversité Conception et perspectives d'application* [En ligne]. : PIERRE ET MARIE CURIE, 2013. Disponible sur : < <http://www.ittecop.fr/doc/0THESES/REGNERY.pdf> >

Scemama P., Levrel H. « L'émergence du marché de la compensation des zones humides aux États-Unis : impacts sur les modes d'organisation et les caractéristiques des transactions ». *Rev. Déconomie Polit.* [En ligne]. 2013. Vol. 123, n°6, p. 893-924. Disponible sur : < <https://doi.org/10.3917/redp.236.0893> >

Sochi K., Kiesecker J. « Optimizing regulatory requirements to aid in the implementation of compensatory mitigation ». *J. Appl. Ecol.* [En ligne]. avril 2016. Vol. 53, n°2, p. 317-322. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12583> >

The biodiversity consultancy. *Government policies on biodiversity offsets* [En ligne]. [s.l.] : [s.n.], 2016. Disponible sur : < <https://www.thebiodiversityconsultancy.com/es/wp-content/uploads/2013/07/Government-policy-2.pdf> >

Vaissière A.-C., Bierry A., Quétier F. « Mieux compenser les impacts sur les zones humides : modélisation de différentes approches dans la région de Grenoble ». *Sci. Eaux Territ.* 2016. Vol. Numéro 21, n°4, p. 64-69.

Watts M. E., Ball I. R., Stewart R. S., Klein C. J., Wilson K., Steinback C., Lourival R., Kircher L., Possingham H. P. « Marxan with Zones: Software for optimal conservation based land- and sea-use zoning ». *Environ. Model. Softw.* [En ligne]. décembre 2009. Vol. 24, n°12, p. 1513-1521. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.06.005> >

Watts M. E., Stewart R. R., Martin T. G., Klein C. J., Carwardine J., Possingham H. P. « Systematic Conservation Planning with Marxan ». In : Gergel SE, Turner MG (éd.). *Learn. Landsc. Ecol.* [En ligne]. New York, NY : Springer New York, 2017. p. 211-227. Disponible sur : < https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6374-4_13 > (consulté le 13 décembre 2018) ISBN : 978-1-4939-6372-0.

Directeurs de recherche :

Simon Tarabon

Francis Isselin

Anne-Laure Lecomte

Marie Lenfant

PFE/DAE5

UIT/ADAGE

2018-2019

Identifier les sites de compensation à haut potentiel de gain écologique : pour une standardisation des méthodes.

Résumé :

En France, l'identification des sites de compensation à haut potentiel de gain écologique doit permettre une absence de perte nette de biodiversité, mais aujourd'hui cette identification n'est pas précisément encadrée par la loi. En effet l'absence de méthode nationale standardisée amène à se demander si l'objectif d'absence de perte nette, voire de gain écologique, est réalisable ou bien s'il est tout simplement utopique avec les méthodes existantes de dimensionnement des mesures compensatoires et d'identification des sites à fort potentiel de gain écologique.

Pour ce faire nous avons réalisé une étude bibliographique des méthodes utilisées pour identifier les sites compensatoires à haut potentiel de gain écologique, afin d'identifier leur efficacité et leur reproductibilité. Deux méthodes suffisamment transparentes ont été identifiées. Elles permettront probablement une transposition vers une méthode standardisée utilisable à l'échelle nationale (voire internationale ?).

Mots Clés : Compensation, Séquence ERC, Eviter, Réduire, Compenser, Méthodes, Sites à haut potentiel de gain écologique.