



Année 2012-2013

Master 1 Sciences des Environnements Continentaux et Côtiers

Spécialité Environnement, Sols, Eau, Biodiversité – Parcours Biodiversité

**Sylvain DELABYE**

## Rapport de stage Master 1

Réponse de la biodiversité des champignons  
lignicoles, des lichens et des bryophytes à l'arrêt  
de l'exploitation et à d'autres variables associées à  
la gestion forestière : état d'avancement de la  
méta-analyse

Maître de stage : Frédéric GOSSELIN

Tuteur universitaire : Michael AUBERT

Stage réalisé du 8 Avril au 15 Juin 2013



**FACULTE D'ORIGINE :**

Université de Rouen

U.F.R. des Sciences et Techniques de Mont-St-Aignan

Place Emile Blondel

76821 Mont-Saint-Aignan

Téléphone : 02.35.14.64.66.



**TUTEUR UNIVERSITAIRE :**

Michael AUBERT

Groupe de Recherche ECODIV

Faculté des Sciences & des Techniques

Bâtiment IRESE A, Place Emile Blondel

Université de Rouen

F-76821 Mont Saint Aignan Cedex

Tél : 33 (0)2.32.76.94.47

Fax : 33 (0)2.35.14.66.55

[michael.aubert@univ-rouen.fr](mailto:michael.aubert@univ-rouen.fr)

**ENTREPRISE D'ACCUEIL :**

Centre IRSTEA

Domaine des Barres

45290 Nogent-sur-Vernisson

Tél : 02 38 95 03 30

**ENCADRANT DE STAGE :**

Frédéric GOSSELIN

Ingénieur de recherche

IRSTEA

Equipe Biodiversité

Domaine des Barres

45290 Nogent-sur-Vernisson

Tél : 02.38.95.03.58

[frederic.gosselin@irstea.fr](mailto:frederic.gosselin@irstea.fr)

## Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mon maître de stage Frédéric Gosselin, pour son encadrement, sa disponibilité, son écoute et ses précieux conseils sur la démarche à suivre pour réaliser le travail à fournir. Je le remercie également pour son accueil chaleureux au centre IRSTEA de Nogent-sur-Vernisson.

Je remercie dans ce sens Christian Ginisty pour avoir eu la chance d'effectuer ce stage dans ce centre.

Je remercie ensuite Marion Gosselin et Frédéric Gosselin pour leurs conseils, leur temps passés sur ce rapport et pour la documentation en générale.

Je remercie Michael Aubert pour les bons conseils quant à la rédaction de ce rapport.

Je remercie Hubert Voiry pour ses réponses à mes questions sur les champignons, ainsi que pour les documents mis à ma disposition.

Merci à toute l'équipe d'IRSTEA pour l'accueil chaleureux et les quelques pauses-café pris en votre compagnie.

Merci à l'ensemble des stagiaires, sans qui la vie à Nogent-sur-Vernisson serait...différente. Merci à vous, Deki, Lisa, Yness, Aurélie, Karima, Valène, Juliette, Morghan, Donatien, Etienne, Guillem, Abitbol, Jad et David, pour la bonne ambiance qui règne sur ce Domaine.

Merci à Samantha et Benoît pour les œufs, la rhubarbe et ce bon repas au soleil.

Un grand merci à ma famille, pour leur soutien et leur aide.

Enfin, merci à ma chère et tendre Pauline, qui a su supporter mon absence et qui m'a soutenu pendant ces deux mois.

## Résumé

Le présent rapport expose le protocole de la méta-analyse qui cherchera à montrer quelles sont les variables qui expliquent la réponse de la biodiversité à l'arrêt de l'exploitation. La méta-analyse travaillera sur l'ensemble des taxons du projet GNB (oiseaux, chiroptères, coléoptères saproxyliques, coléoptères carabiques, bryophytes, champignons lignicoles et plantes vasculaire) ainsi que d'autres taxons supplémentaires, tels que les lichens. Dans cet état d'avancement de la méta-analyse, la réponse des bryophytes, des champignons et des lichens sont étudiées. Les variables susceptibles d'influencer ou d'expliquer la réponse de la diversité à l'arrêt de l'exploitation sont présentées sous deux catégories : les variables liées à la naturalité anthropique, type temps d'abandon depuis la dernière coupe, type de gestion appliquée,... et les variables écologiques et biologiques, liées aux caractéristiques dendrométrique, caractérisant les quantités de bois morts et vivants, leur qualité, la densité en arbres,... Les résultats présentés ici font office de résumé et ne sont valables qu'à titre indicatif. Plusieurs hypothèses intégrant les différentes variables seront testées par la suite dans le cadre du projet GNB.

**Mots-clés** : Méta-analyse ; Gestion forestière ; Bryophytes ; Champignons lignicoles ; Diversité biologique

## Sommaire :

Remerciements .....	ii
Résumé .....	iii
Liste des figures et tableaux .....	2
Liste des annexes .....	2
Présentation de l'entreprise .....	3
I) Introduction .....	4
II) Etablissement et suivi du protocole.....	7
1) Définitions et critères sélectifs des forêts exploitées et non exploitées .....	7
a) Notion de naturalité « anthropique » et définitions.....	7
b) Critères éliminatoires .....	8
c) Rencontre de cas limites particuliers .....	9
2) Mesures de la biodiversité .....	9
3) Notion de naturalité « biologique et écologique » .....	10
4) Renseignement du biome et intérêts.....	12
5) Recherche bibliographique croisée .....	12
III) Résultats : résumé de la recherche bibliographique .....	12
1) Résumé sur l'ensemble des trois taxons et des biomes tempérés et boréaux .....	12
2) Etude de la richesse spécifique dans les deux types de forêts .....	13
IV) Discussion.....	16
1) Interprétations des résultats .....	16
2) Hypothèses a priori.....	17
a) Hypothèses liées à la gestion .....	17
b) Hypothèses liées à la naturalité biologique.....	18
c) Variables collectées dans les articles .....	20
Conclusion.....	21
Bilan du stage .....	22
Bibliographie .....	23
Sitographie .....	25
Annexes.....	I

## Liste des tableaux et figures:

Tableau 1 : Nombre de comparaisons par taxon et par biome.....	13
Tableau 2 : Moyennes des richesses spécifiques en forêts non exploitées et exploitées.....	14
Tableau 3 : Moyennes des log du rapport de la richesse spécifique en forêt non exploitée sur la richesse spécifique en forêt exploitée.....	14
Figure 1 : Distribution des log du rapport des richesses spécifiques de chaque taxon sur les deux biomes.....	15
Figure 2 : Distribution du log du rapport des richesses spécifiques en fonction des biomes...	16

## Liste des tableaux et figures:

Annexe A : Organigramme de l'unité de recherche Ecosystèmes forestiers du centre de Nogent-sur-Vernisson IRSTEA.....	I
Annexe B : Liste des mots-clés renseignés sous Scopus.....	II
Annexe C : Carte de la répartition des biomes à l'échelle mondiale (Millenium Ecosystem Assessment).....	III

## Présentation de l'entreprise :

L'Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (IRSTEA), anciennement le Centre national du Machinisme Agricole, du Génie Rural et des Eaux et Forêts (CEMAGREF) est issu de la fusion en 1981 du Centre technique du Génie Rural des Eaux et Forêts (CTGREF) et du Centre National d'Etudes et d'Expérimentations du Machinisme Agricole (CNEEMA). Le changement de nom s'est opéré en 2011 suite à la constatation d'une évolution des missions et objectifs du CEMAGREF vers des problématiques environnementales et agricoles dans une optique de développement durable.

L'IRSTEA est un établissement public à caractère scientifique et technologique dont les 12 thèmes de recherche sont axés autour des eaux, des écotechnologies et des territoires. Il existe 24 unités de recherche réparties dans 9 centres pour 1750 personnes travaillant à l'IRSTEA. Cet institut détient de nombreux partenariats et conventions avec des Ministères (Ministère Enseignement supérieur et de la Recherche et Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt principalement), l'Office National des Forêts (ONF), l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques (ONEMA) entre autres.

Le centre de Nogent-sur-Vernisson (45) étudie seulement le thème des écosystèmes forestiers, où coopèrent 4 équipes (Annexe A) axées sur la gestion de la conservation et la vulnérabilité des écosystèmes terrestres face aux perturbations et changements globaux, sur les risques et sur la qualité des écosystèmes en termes d'habitats et de biodiversité.

Mon stage est intégré dans l'équipe Biodiversité (BIODIV), avec Frédéric ARCHAUX comme chef d'équipe. Une partie de l'équipe travaille sur le projet Gestion, Naturalité et Biodiversité, auquel mon stage est rattaché.

## I) Introduction

Malgré la conférence de Rio de 1992 qui prônait une intégration de la biodiversité dans les plans de gestion et d'exploitation des ressources naturelles, la biodiversité ne cesse de se dégrader durant ces dernières années, y compris dans les écosystèmes forestiers (Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2010). La dégradation de ces milieux s'explique en grande partie par les activités humaines (Esseen et Renhorn, 1998), soit par une exploitation des ressources en bois, soit par une déforestation directe pour un usage agricole, cas majoritairement rencontré dans les forêts tropicales (Becker, 2001). L'exploitation de la ressource en bois a conduit à la disparition de la quasi-totalité des forêts primaires en Europe (Vanbergen *et al.*, 2005). Ces activités entraînent un changement radical au sein des forêts, se traduisant notamment par l'augmentation en intensité de l'effet lisière et par une perte de la diversité en micro-habitats (Kivistö et Kuuvinen, 2000), caractéristiques des forêts naturelles (Larrieu et Cabarettes, 2012). Cela impacte directement les espèces dépendantes de ces habitats (Bengtsson *et al.*, 2000) et entraîne l'arrivée de ces espèces sur les listes rouges (Edman *et al.*, 2004), ce qui va à l'encontre des objectifs de la Convention sur la Diversité Biologique (Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2010).

D'une part, il y a un problème de perte brute d'habitats forestiers : à échelle mondiale, l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture enregistre une diminution globale de la superficie forestière de 13 600 000 d'hectares sur ces vingt dernières années. D'autre part, le phénomène d'érosion de biodiversité persiste alors que, selon les mêmes sources, la superficie forestière affectée principalement à la production de bois diminue de 0.22 %, soit environ 5 000 000 d'hectares et la superficie forestière affectée à la conservation de la biodiversité augmente de 1,53%, soit 9 500 000 hectares (FAO, 2011). Augmenter les surfaces de forêts dédiées à la conservation de la biodiversité ne suffit pas à freiner l'érosion de la biodiversité. De même, à échelle mondiale, Butchart *et al.* (2010) observe que la biodiversité continue de diminuer malgré l'augmentation des mesures de prévention de protection. Il est donc important de mieux comprendre les mécanismes en jeu.

En France, une des mesures adoptées pour la conservation de la biodiversité forestière est l'extension raisonnée du réseau de réserves forestières (Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, 2011). Cette mesure se base sur de nombreuses

études scientifiques, menées majoritairement dans les écosystèmes forestiers tempérés et boréaux d'Amérique du Nord, d'Europe Centrale et d'Europe du Nord (Paillet et *al.*, 2010) selon lesquelles la gestion forestière ampute les écosystèmes de microhabitats importants pour la biodiversité, la non-exploitation étant par conséquent favorable à la biodiversité forestière. (Gosselin, 2004 ; Cemagref, 2011). Toutefois, il y a pour les écosystèmes forestiers de France métropolitaine un défaut de connaissances réelles du sujet : très peu d'études concernent en effet la France et l'Europe occidentale en général. Par ailleurs, les réelles différences d'habitats entre forêts exploitées et forêts non exploitées ne sont pas clairement exposées dans les études et restent encore le plus souvent hypothétiques. De plus, les deux types de forêts ne sont pas toujours comparés à type de milieu (station) égal. Enfin, la différence de biodiversité entre forêts exploitées et non exploitées est variable selon le groupe taxonomique étudié (Paillet et *al.*, 2010). Il est donc nécessaire de s'intéresser en détail à l'impact global de l'exploitation forestière sur la biodiversité, dans le contexte particulier des forêts tempérées métropolitaines et de la sylviculture française.

Ainsi, dans le cadre du projet Gestion forestière, Naturalité et Biodiversité (GNB) [1], la réponse de la diversité spécifique à l'arrêt de l'exploitation forestière est étudiée pour sept groupes taxonomiques que sont les bryophytes, les champignons, les plantes vasculaires, les coléoptères saproxyliques, les coléoptères carabiques, les oiseaux et les chiroptères. Cette étude se déroule dans plusieurs massifs forestiers de France, en plaine et en montagne. Les résultats de cette étude seront comparés à une analyse bibliographique à l'échelle mondiale qui prendra la forme d'une méta-analyse. C'est une méthode quantitative d'analyse et de synthèse des résultats de plusieurs études indépendantes concernant le même sujet (Arnqvist et Wooster, 1995). La méta-analyse permettra de poser des hypothèses quant à l'effet de l'arrêt de l'exploitation forestière sur la biodiversité et orientera les analyses des données issues de l'étude française.

Ce stage vise à préparer la méta-analyse mondiale de la manière suivante :

- Il se restreint à 3 taxons.
- Il doit affiner les critères de sélection des articles et le choix des variables pour répondre aux questions de la méta-analyse :
  - A l'échelle mondiale, les 3 taxons répondent-ils de la même manière à l'exploitation des forêts, en termes de biodiversité (nombre et abondance des espèces, composition) ?

- La diversité de ces taxons est-elle favorisée ou non par l'exploitation ?
  - La biodiversité de ces taxons en fonction du facteur exploitation suit-elle les mêmes tendances selon les biomes, en particulier tempérés et boréaux ?
  - Peut-on, à partir des données biblio de la méta-analyse, identifier des variables écologiques permettant d'expliquer les différences de diversité d'un groupe taxonomique donné entre forêts exploitées et non exploitées ?
- Il doit enfin formuler les hypothèses à tester dans le projet GNB pour analyser les données récoltées dans ce projet (y compris identifier les variables écologiques à inclure pour expliquer les différences de diversité d'un groupe taxonomique donné entre forêts exploitées et non exploitées). Pour mon stage, les hypothèses ne concernent que les groupes mycologiques et les bryophytes, en liens avec le projet GNB. Les lichens ne font pas partie du projet.

Le présent rapport ne présente qu'un état d'avancement du travail en cours. La méta-analyse se basant sur des études publiées dans des revues scientifiques sous-forme d'articles, ceux-ci doivent d'abord être sélectionnés selon des critères choisis et précis. Le protocole établissant ces critères de sélection est d'abord décrit, ainsi que les variables écologiques. Puis une brève analyse des données de diversité sur l'ensemble des articles est présentée avant d'être discutée. Les différentes hypothèses posées pour le projet GNB sont décrites

## II) Méthode : établissement du protocole

La recherche bibliographique et la sélection des articles s'effectuent en deux étapes :

- une recherche primaire, basée sur une liste de mots-clés se référant au sujet (Annexe B). Deux serveurs bibliographiques, Scopus [2] et Web of Science [3], ont été interrogés avec ces mots-clés. A partir des titres et des résumés, 474 articles ont été présélectionnés, tous groupes taxonomiques confondus.
- une recherche secondaire, qui suit un protocole de sélection fine des articles. Cette partie est exposée ci-après.

### 1) Définitions et critères sélectifs des forêts exploitées et non exploitées

#### a) Notion de naturalité « anthropique » et définitions

Le projet GNB cherche à caractériser et quantifier l'impact de l'arrêt de l'exploitation forestière sur la biodiversité.

Cette absence d'exploitation est la version forestière de la notion de naturalité « anthropique » (Gilg, 2004). La naturalité « anthropique » représente en effet l'absence de perturbation induite par l'exploitation des activités humaines.

Pour être plus précis, dans le cadre de la méta-analyse, nous avons retenu deux définitions décrivant les forêts exploitées et non exploitées. Pour qu'un article soit retenu, il faut déjà qu'il se réfère à une des deux définitions suivantes :

- 1- Une forêt non exploitée est une forêt qui n'a subi aucune coupe ou exploitation par l'homme durant les 20 dernières années précédant l'étude. Une forêt exploitée est une forêt dont des arbres ont été coupés par l'homme (si l'indication est donnée, au moins dix arbres par hectare et par période de 20 ans doivent être coupés) et emmenés hors du lieu de coupe. La dernière coupe doit être effectuée dans les 20 dernières années précédant l'étude.
- 2- Une forêt non exploitée est une forêt qui n'a jamais subi de coupe ou n'est pas connue pour en avoir subi. Généralement, le peuplement est à un âge assez avancé et les auteurs utilisent des critères complémentaires comme des variables dendrométriques

(quantité de bois mort, densité en arbres,...). Nous avons alors l'équivalent d'une forêt primaire. Dans ces cas, la forêt exploitée doit avoir subi au moins une coupe durant sa vie (équivalence avec les forêts secondaires).

Les articles traitant des forêts exploitées qui subissent ou ont subi une activité humaine autre que l'exploitation des ressources en bois sont rejetés. C'est le cas des pâturages, des forêts à usage unique de chasse, des cas de dégradation du milieu par pollution et par eutrophisation, qui ne correspondent pas avec la définition de la naturalité « anthropique » (exploitation du bois) (Cemagref, 2010).

## b) Critères éliminatoires

En plus du non-respect des temps de dernière coupe pour les forêts exploitées et des temps de non exploitation pour les forêts non exploitées, nous avons exclus deux types d'études comparatives:

- les articles qui comparent un peuplement non exploité très âgé (de type *old-growth*) à un peuplement jeune (en phase de régénération ou coupe à blanc). Un peuplement est dit jeune lorsqu'elle a moins de 20 ans, lorsque son âge est inférieur au temps de rotation de gestion divisé par 3 ou lorsque la hauteur des arbres est inférieure à la moitié de celle atteinte en fin de cycle. En fait, les différences historiques sont trop importantes pour pouvoir imputer la différence de diversité à la naturalité anthropique.
- les articles qui se basent sur des zones nommées habitats-clés en forêts non exploitées (Juuninen et Kouki, 2006 ; Paltto *et al.*, 2008). Les habitat-clés sont définis comme des zones « hotspots » en richesse spécifique, c'est-à-dire qui contiennent un grand nombre d'espèces, des espèces menacées (donc rares) ou endémiques (Juuninen et Kouki, 2006). La connaissance de la présence de ces espèces biaise automatiquement l'échantillonnage entre les deux types de forêts.

### c) Cas limites particuliers

Nous acceptons certaines études qui se basent sur des critères particuliers :

- Les forêts avec moins de 2 arbres coupés par hectare et par période de 20 ans sont considérées comme des forêts non exploitées (Økland *et al.*, 2003)
- Les parcelles où le bois est exploité suite à l'attaque d'un ravageur (*salvage logging*) sont considérées comme des parcelles exploitées. Dans ce cas, la forêt non exploitée est celle ayant subi les attaques du ravageur mais dont le bois n'a pas été récolté.
- Les cas où seul un milieu particulier est étudié dans les deux types de forêts. Par exemple, l'étude de la richesse spécifique dans les zones à canopée ouverte (Baldwin et Bradfield, 2010) est un de ces cas. Le cas est en fait considéré comme expérimental au même titre que les études où des rondins sont placés au sein des parcelles.
- Parfois, les temps d'abandon des forêts non exploitées et les temps de dernière exploitation ne sont pas indiqués. Ces articles sont tout de même retenus si les auteurs distinguent forêt non-exploitée et forêt exploitée.

Il faut maintenant définir la manière dont est quantifiée la biodiversité.

## 2) Mesures de la biodiversité

Il existe plusieurs façons de quantifier la diversité biologique (Gosselin et Gosselin, 2004). L'indice de diversité le plus simple est la richesse spécifique. Elle quantifie le nombre total d'espèces dans la communauté étudiée. C'est un indice simple qui n'est cependant pas parfait. En effet, la richesse spécifique ne prend en compte que les espèces détectables et identifiables, et elle dépend de la surface échantillonnée, l'indice augmentant avec la taille de l'échantillon (Standovar *et al.*, 2006). En outre, elle ne tient pas compte de l'identité des espèces. Pourtant, la richesse spécifique est l'indice le plus couramment utilisé. Il est néanmoins utilement complété par des données sur l'abondance et l'équitabilité de la communauté (Gosselin et Gosselin, 2004). Nous renseignons donc dans la méta-analyse les richesses spécifiques, les abondances et les indices de diversité et d'équitabilité. Pour prendre en compte les défauts (en partie) de l'indice de richesse, la surface des points

d'échantillonnage est notée. De plus, dans le cas de données à plusieurs échelles, l'échelle la plus grande sera seule sélectionnée pour la méta-analyse.

Si la richesse spécifique n'est pas utilisée, d'autres indices de biodiversité sont acceptés, le plus proche de la richesse spécifique étant l'indice de Shannon-Weaver, quantité moyenne d'information apportée par la détermination de l'espèce d'un individu tiré au sort dans la communauté.

Pour pouvoir mener la méta-analyse, la moyenne de la richesse spécifique doit être accompagnée d'un écart-type (SD), traduisant la variabilité des données sur les placettes échantillonnées. Plusieurs cas peuvent se présenter :

- soit l'écart-type est directement indiqué.
- soit c'est l'erreur standard (SE) qui est donnée. Dans ce cas, l'écart type peut être retrouvé grâce à la formule  $SD = SE * \sqrt{N}$ , N étant le nombre d'échantillons ou de strates.
- soit ni l'écart-type, ni l'erreur standard ne sont donnés. Dans ce cas, si la richesse spécifique est indiquée sur plusieurs strates, l'écart-type peut être calculé en moyennant les différentes richesses. Les strates peuvent désigner par exemple un suivi sur plusieurs années, sur plusieurs stades de succession ou sur plusieurs sites d'étude.

Dans le cas où l'écart-type n'est pas donné et ne peut être calculé, ou lorsque la richesse spécifique n'est tout simplement pas indiquée, l'article n'est pas retenu pour la méta-analyse. A noter que les données sous forme graphique sont acceptées. Un logiciel de numérisation [4] est dans ce cas nécessaire.

La richesse spécifique d'un taxon ne reflète pas forcément bien la diversité réelle. En fonction du rôle des espèces au sein de l'écosystème et de leur intérêt de conservation, donner un poids à ces espèces permet de se rapprocher de la réalité et d'affiner la réponse de la biodiversité aux différentes variables (Gosselin et Gosselin, 2004). Ainsi, nous pouvons prendre en compte des groupes écologiques tels que les espèces saproxyliques, les espèces terricoles, les espèces de canopée ou encore des groupes selon leur statut de protection, comme les espèces rares, les espèces menacées,...

De ce fait, nous indiquons pour la méta-analyse les mêmes mesures de la diversité pour les groupes écologiques et/ou tout autre groupe susceptible d'être analysé.

L'estimation de la différence de diversité s'exprime par la variabilité anthropique mais aussi par la variabilité écologique et biologique.

### 3) Notion de naturalité « biologique et écologique »

La naturalité biologique est représentée par toute chose non liée directement à l'homme. La naturalité biologique en forêt fait référence aux caractéristiques non induites par la gestion de l'homme.

Sur la base des travaux menés par Paillet *et al.* (2010) et Gosselin (2004), le projet vise non seulement à caractériser et quantifier la réponse de la biodiversité à l'arrêt de l'exploitation mais aussi à identifier les variables qui expliquent ou influencent les variations de la biodiversité forestière entre des zones exploitées et non exploitées. Ces variables seront présentées en discussion.

### 4) Renseignement du biome et intérêts

Le biome boréal est du point de vue biogéographique et phylogéographique en continuité avec le biome tempéré à l'échelle de l'Europe (Blondel, 1995). Mélanger les études de ces deux biomes permet de garder un échantillonnage homogène en termes biogéographiques. Nous considérons donc que ces deux biomes sont comparables. Mais ils seront également analysés séparément. Le biome méditerranéen pourrait être pour les mêmes raisons intégré aux biomes tempéré et boréal. Cependant, il n'entre pas dans le cadre du projet GNB. Enfin, à l'échelle mondiale se retrouve le biome tropical, mais il n'a pour le moment aucun intérêt dans le cadre de nos travaux.

Dans notre recherche, soit le biome est spécifié dans l'article et nous notons le biome mentionné, soit il n'y a aucune indication, et dans ce cas une carte du Millennium Ecosystem Assessment (2005) peut servir de référence (Annexe C).

## 5) Recherche bibliographique croisée

Lorsque les articles ont été sélectionnés, une recherche croisée doit être effectuée pour ceux-ci. Les citations, les articles citant l'article et les articles auxquels a participé le premier auteur sont passés en revue afin de rechercher la bibliographie potentiellement intéressante qui ne répondait pas à la liste de mots-clés initiale.

## 6) Méthodes d'analyse des données

Nous proposons deux manières d'analyser brièvement les données. Pour comparer les différences de richesse spécifique, la première se base sur un effet additif de la richesse spécifique d'une forêt à l'autre. Nous proposons une seconde manière d'analyser ces données moyennes de richesse spécifique, correspondant mieux à un éventuel effet « multiplicatif » de l'arrêt de l'exploitation sur la richesse spécifique – c'est-à-dire un modèle dans lequel on envisage que lorsque l'on passe d'une forêt exploitée à une forêt non exploitée on multiplie la richesse spécifique par un certain coefficient – au lieu d'ajouter un coefficient comme le sous-entendait la méthode ci-dessus. Pour cela, nous calculons le logarithme du rapport de la richesse spécifique de la forêt non exploitée sur la richesse spécifique de la forêt exploitée (Tableau 3). Cela permet de mieux exprimer la variation inter-études.

### III) Résultats : résumé de la recherche bibliographique

#### 1) Résumé sur l'ensemble des trois taxons et des biomes tempérés et boréaux

Nous avons actuellement effectué la lecture et le remplissage du jeu de données de la méta-analyse pour les taxons bryophytes, champignons et lichens des biomes tempérés et boréaux.

Notre jeu de données contient 127 comparaisons (études individuelles) entre les forêts exploitées et non exploitées pour 37 articles analysés (Tableau1). Le nombre de comparaisons par article varie de 1 à 10.

La distribution des comparaisons au sein des taxons est assez homogène, malgré un nombre d'études plus faible chez les champignons.

En revanche, au sein des taxons, il y a une grande disparité chez les bryophytes et les champignons d'un biome à l'autre, le biome boréal comportant environ deux fois plus de comparaisons, soit 70% des études en boréal chez les champignons et chez les bryophytes.

Taxons	Boréal	Tempéré	Total
Ensemble des taxons	85 (26)	42 (11)	127 (37)
Bryophytes	31 (11)	13 (4)	44 (15)
Champignons	22 (6)	10 (2)	32 (8)
Lichens	23 (10)	18 (3)	41 (13)
Plantes vasculaires + Bryophytes	0 (0)	1 (1)	1 (1)
Bryophytes + Lichens	3 (2)	0 (0)	3 (2)
Bryophytes + Lichens + Champignons	6 (1)	0 (0)	6 (1)

Tableau 1 : Nombre de comparaisons par taxon et par biome (le nombre d'articles concernés est entre parenthèses)

En ce qui concerne les biomes, les zones concernées dans la méta-analyse se situent majoritairement en Europe du nord et au Canada pour le biome boréal, en Europe centrale, à la frontière américo-canadienne, au Japon et sur la côte sud-est de l'Australie pour le biome tempéré.

## 2) Etude de la richesse spécifique dans les deux types de forêts

Du fait de leur faible représentativité, nous avons retiré des analyses les données qui rassemblent plusieurs taxons.

La moyenne des richesses spécifiques pour chaque biome et chaque taxon est donnée (Tableau 2). Les écarts-types entre valeurs moyennes – inter-études – sont aussi donnés seulement à titre indicatif. En effet, les techniques de méta-analyse prennent aussi en compte les écarts-types intra-études, que nous ne prenons pas en compte ici.

Biome	Boréal			Tempéré			Total		
	Etat exploitation	Non exploité	Exploité	Nb de comp°	Non exploité	Exploité	Nb de comp°	Non exploité	Exploité
Bryophytes	21,1 (15,5)	16,9 (12,4)	31	14,9 (9,4)	9,4 (4,4)	13	19,6 (14,4)	15 (11,4)	44
Champignons	14,1 (9,5)	10,9 (9,8)	22	42,3 (16,8)	41,4 (17,1)	10	22,9 (17,9)	20,5 (18,9)	32
Lichens	28,7 (27,4)	20,4 (22,6)	23	5,7 (7,9)	6,3 (8,3)	18	18,6 (23,9)	14,1 (19)	41
Ensemble des taxons	20 (18,3)	17,8 (16,8)	76	20,4 (20,2)	14,6 (16,5)	41	20,2 (19,2)	16,3 (16,7)	117

*Tableau 2 : Moyennes des richesses spécifiques en forêts non exploitées et exploitées (les écarts-types sont entre parenthèses)*

Globalement, la richesse spécifique est supérieure en forêts non exploitées qu'en forêts exploitées (Tableau 2). Tous les groupes ont un effet favorable à l'arrêt de l'exploitation, sauf le cas des lichens en zone tempérée, où la richesse spécifique en forêts exploitées est supérieure à celle en forêt non exploitée. Une différence très faible est visible pour les champignons en zone tempérée en faveur des forêts non exploitées.

Enfin, l'écart de richesse spécifique est en moyenne plus grand en zone tempérée qu'en zone boréale.

Biome	Boréal	Tempéré	Total
Bryophytes	0,076 (0,139) – 31	0,164 (0,185) - 13	0,098 (0,155) - 44
Champignons	0,257 (0,317) – 22	0,019 (0,089) - 10	0,178 (0,285) - 32
Lichens	0,186 (0,295) – 23	0,019 (0,318) - 18	0,115 (0,317) - 41
Ensemble des taxons	0,221 (0,295) – 76	0,065 (0,244) - 41	0,124 (0,251) - 117

*Tableau 3 : Moyennes des log du rapport de la richesse spécifique en forêts non exploitées sur la richesse spécifique en forêts exploitées (les écarts-types sont indiqués entre parenthèses, le nombre de comparaisons après les écarts-types)*

Ainsi, d'après le Tableau 3, la richesse spécifique est supérieure d'environ 12% en forêt non exploitée qu'en forêt exploitée. Tous les groupes ont cette fois-ci un effet favorable à l'arrêt de l'exploitation. Cependant, les groupes des lichens et des champignons observent une différence moyenne proche de la neutralité en zone tempérée. A l'inverse, ce sont ces deux mêmes groupes qui obtiennent l'écart de richesse spécifique les plus élevés (environ 20% et 30%) respectivement en forêt boréale en faveur des forêts non exploitées.

Les données du Tableau 3 sont graphiquement visualisables dans les Figures 1 et 2 sous forme de boxplots.

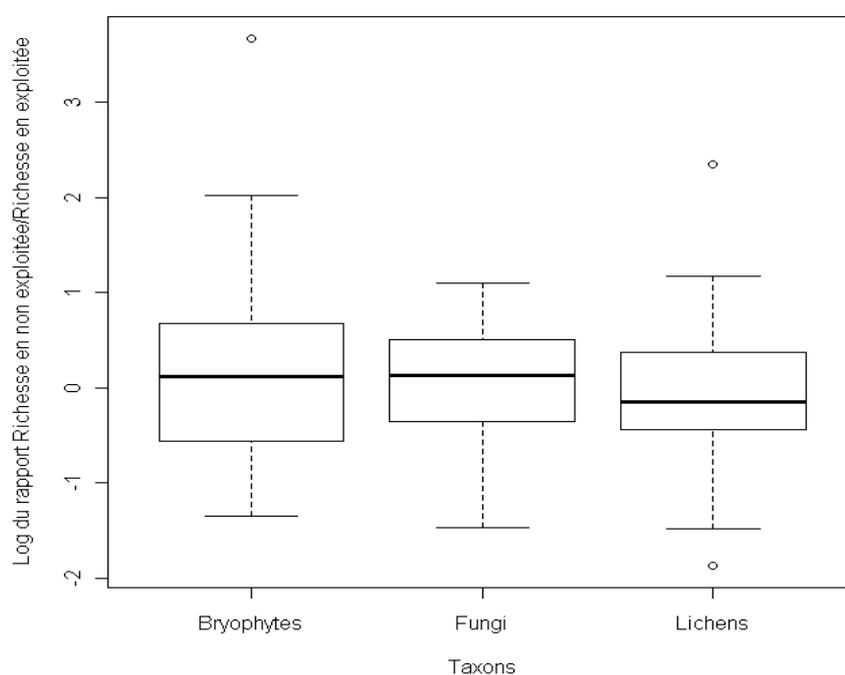


Figure 1 : Distribution des log du rapport des richesses spécifiques de chaque taxon sur les deux biomes

Par rapport aux moyennes, ces figures permettent de rendre compte de la distribution des données. Ainsi, si nous comparons avec les résultats précédents, nous remarquons que les bryophytes ont en zone tempérée un grand nombre de comparaisons où l'écart de richesse spécifique est supérieur de plus de 10% en faveur des forêts non exploitées, avec une forte dispersion (Figure2A), contre une moyenne à seulement 6% (Tableau 3), soit une plus faible différence.

Cet exemple montre bien que la dispersion des moyennes des log du rapport des richesses spécifiques est trop grande. Visuellement, ces figures ne donnent pas ou très peu d'informations.

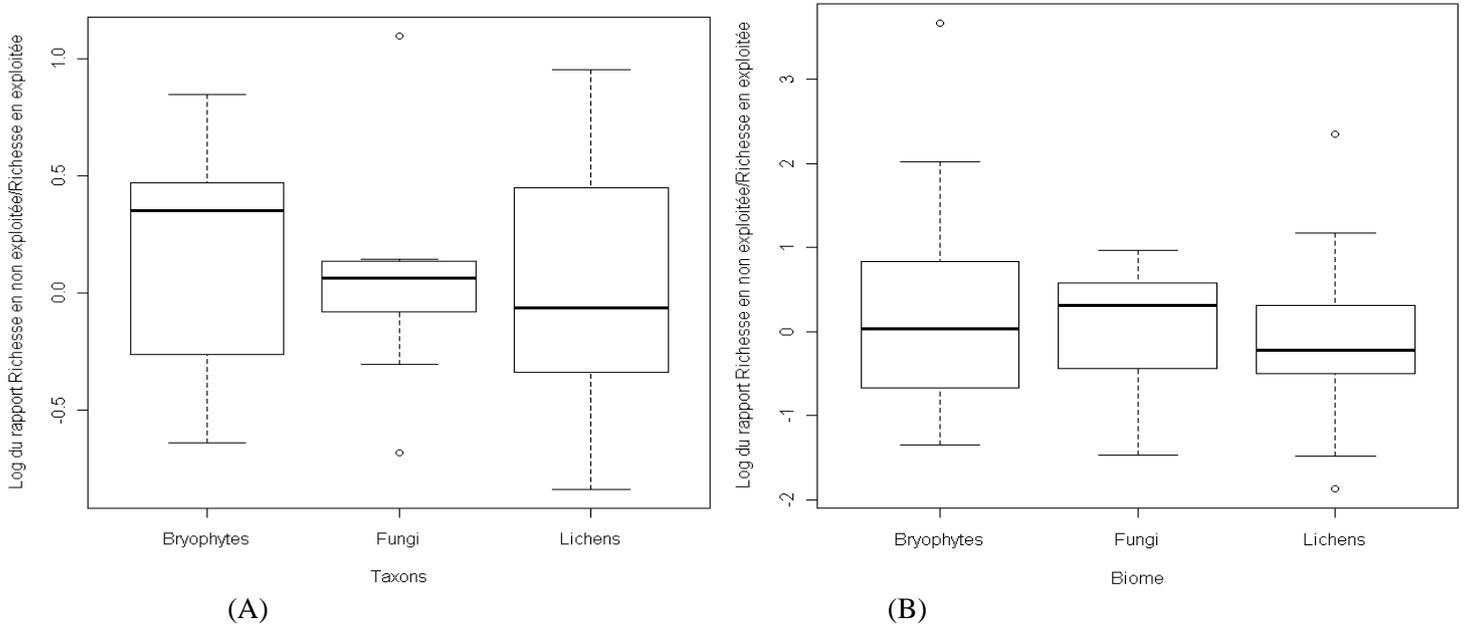


Figure 2 : Distribution du log du rapport des richesses spécifiques en fonction des biomes. (A) : biome tempéré. (B) : biome boréal.

## iv) Discussion

### 1) Interprétations des résultats

Ces résultats sont difficilement interprétables. En effet, il reste à voir si l'estimation de la moyenne des richesses spécifiques et des écart-types inter-études sera maintenu après avoir pris en compte les écart-types intra-études dans le cadre de la méta-analyse. C'est l'un des objectifs de la méta-analyse qui sera capable d'intégrer l'ensemble des variables afin de répondre à la question posée.

Néanmoins, la méthode multiplicative semble mieux renseigner la dispersion des données que la méthode additive. De plus, la méthode additive ne fait que renseigner une différence absolue alors que la méthode multiplicative, en estimant les log moyens des rapports de richesses, permet de comparer les variations entre les deux types de forêts.

## 2) Hypothèses a priori

L'un des buts de la méta-analyse est d'effectuer une sélection parmi un grand nombre de modèles associés à des hypothèses biologiques formulées à partir de résultats antérieurs issus d'autres études. Nous exposons ici les grandes hypothèses qui seront testées dans la méta-analyse mais aussi sur les données du projet GNB. Deux ensembles d'hypothèses sont distinguables : celles liées à la gestion (naturalité anthropique) et celles liées à la naturalité biologique.

### a) Hypothèses liées à la gestion

- L'hypothèse de base et de référence à la méta-analyse est que la richesse spécifique est corrélée à la différence entre les peuplements exploités et non exploités, les peuplements non exploités étant dans cet état depuis au moins 20 ans.
- La deuxième hypothèse prend en plus de la première hypothèse la durée depuis l'arrêt de l'exploitation. Paillet *et al.* (2010) ont testé cette hypothèse. Il est ressorti que les champignons répondent de manière significative à l'arrêt de l'exploitation avec une richesse spécifique plus élevée en forêt non exploitée à partir de 43 ans après l'arrêt de l'exploitation. Aucun effet de la durée d'arrêt d'exploitation n'est observé pour les bryophytes et les lichens. Pernot (2012) observe également que la richesse spécifique des champignons augmente avec l'ancienneté de la dernière exploitation.
- D'autres éléments peuvent affiner l'hypothèse précédente, en y intégrant par exemple le volume prélevé lors de l'exploitation (Juuninen *et al.*, 2006).
- Une hypothèse possible intègre les trouées. Les trouées constituent un des fonctionnements de l'écosystème forestier et un des micro-habitats, qui réapparaît dans les forêts non exploitées par rapport à leurs équivalents en forêt exploitée (Spies et Franklin, 1996). L'hypothèse testée est donc que la richesse spécifique est bien corrélée à la proportion de la surface en trouée.

## b) Hypothèses liées à la naturalité biologique

Prendre en compte la structuration des forêts permet de caractériser des différences dendrométriques. La dendrométrie est la caractérisation et la mesure des arbres afin de suivre leur évolution. Une analyse dendrométrique fait ressortir les facteurs pouvant expliquer les différences de richesse spécifique. Voici quelques hypothèses basées sur certains éléments dendrométriques :

- *Dendrométrie des arbres vivants non vétérans :*

Une hypothèse se base sur la dendrométrie des arbres vivants non vétérans. Plusieurs auteurs observent des différences de biodiversité entre les deux types de forêt expliquées par des facteurs dendrométriques tels que l'abondance du peuplement, l'abondance de l'espèce dominante ou des espèces principales (type essences feuillues, essences résineuses, essences de taillis,...) (Beatty, 1884 ; Graae et Heskjaer, 1997). De chaque facteur peut découler une hypothèse : corrélation de la richesse spécifique avec la surface terrière, de la richesse spécifique avec l'essence dominante,...

- *Dendrométrie des vieux arbres vivants et micro-habitats associés :*

Une des caractéristiques les plus souvent évoquées expliquant les différences de diversité biologique (notamment des oiseaux et des espèces saproxyliques type champignons et insectes) entre forêts exploitées et non exploitées est la présence et l'abondance des gros bois et très gros bois (de 40 à 70 cm de diamètre) et des micro-habitats associés (structure du houppier, arbres fourchus, rejets de souche, blessures, coulées de résine,...) (Vuidot *et al.*, 2011). L'abondance de ces micro-habitats augmente avec l'âge de l'arbre, notamment au stade sénescence (Gosselin, 2004). Les hypothèses testées sont donc que la richesse spécifique est corrélée à la surface terrière des gros et très gros bois, ensemble (diamètre supérieur à 45 cm) ou séparément, qu'elle est corrélée à la surface terrière des très très gros bois (diamètre supérieur à 90 cm), et qu'elle est corrélée au nombre d'arbres à micro-habitats.

- *Dendrométrie des arbres et bois morts :*

Ces paramètres sont souvent mobilisés pour expliquer les différences de biodiversité (Gosselin, 2004). Les différentes hypothèses sont équivalentes de celles du bois

vivant : corrélation de la richesse spécifique avec la quantité totale de bois mort, avec la diversité des pièces de bois mort, avec la quantité de bois mort de grosses dimensions, ou encore selon l'origine du bois mort (houppier, souches, chandelles, au sol).

Le stade de décomposition du bois peut aussi être pris en compte : une succession se met en place de la mort du bois jusqu'à sa décomposition totale. Une succession est visible chez les Insectes saproxyliques, mais aussi chez les bryophytes : les épiphytes facultatives, présentes sur le bois avant sa chute, disparaissent en général quand il se décompose par les insectes et les champignons. Les épiphytes strictes leur succèdent (Gosselin, 2004 ; Johansson *et al.*, 2007).

- *Taux de recouvrement :*

Cette hypothèse prend en compte les taux de recouvrement de chaque strate (étages hauts). Økland *et al.* (2003) observent une diminution de la richesse spécifique sous les couverts très forts de la strate arborée en forêt exploitée. L'hypothèse testée est donc que la richesse spécifique est corrélée aux recouvrements des différentes strates.

- *Continuité spatiale et temporelle des forêts :*

L'existence de zones non perturbées de manière forte depuis longtemps dans des forêts non exploitées amène à introduire différents types de continuité importantes pour la diversité (Nilsson *et al.*, 1995), liées ou non à des différences entre forêts exploitées et non exploitées. Nous pouvons émettre une hypothèse sur la corrélation entre richesse spécifique et :

- la continuité du couvert arboré
- la continuité des très gros arbres
- la continuité du bois mort

- *Aspects climatiques et stationnels :*

La présence d'une espèce dans une forêt non gérée ne dépend pas forcément de l'état de non exploitation de la forêt mais plus des facteurs abiotiques. Par exemple, Horak et Rébl (2013) observent une préférence des coléoptères saproxyliques (Elateridae) pour les arbres morts isolés ensoleillés que pour les arbres morts à l'ombre en canopée fermée. Ainsi, les espèces dépendantes des forêts non exploitées pourraient, pour un

même groupe taxonomique, changer d'un secteur biogéographique à l'autre ou d'une station à l'autre (Olivero et Hix, 1998).

### c) Variables collectées dans les articles

A la lecture des articles, toutes les variables ne peuvent être collectées, soit parce qu'elles ne sont pas ou peu indiquées, soit parce qu'elles n'ont pour l'instant pas d'intérêt pour le projet GNB. Les variables collectées sont donc :

- Pour les variables liées à la gestion :
  - les forêts non exploitées depuis plus de 20 ans.
  - la durée depuis l'arrêt de l'exploitation dans les forêts non exploitées.
  
- Pour les variables biologiques :
  - l'identité des espèces principales et leur proportion
  - la surface terrière
  - le volume du bois mort
  - le volume du bois vivant
  - les variables climatiques (précipitation, altitude, température)

Nous avons donc une panoplie de facteurs à considérer et à tester dans le cadre de cette méta-analyse et plus particulièrement dans le projet GNB. Il reste aussi à étudier pour chaque groupe taxonomique si certaines variables ont un effet plus fort que d'autres, notamment si les variables liées à la gestion ont un effet plus important ou non sur la réponse de la biodiversité à l'arrêt de l'exploitation que l'effet des variables biologiques et écologiques, ou si les deux types de variables sont liés. Autrement dit, les variables écologiques expliquent-elles les différences de richesse exploitées/non exploitées ? Sont-elles plus fortes que les variables de gestion ? Ou bien sont-elles en interaction ?

## Conclusion

La méta-analyse qui sera réalisée dans le cadre du projet GNB est basée sur des données et des hypothèses a priori issues d'anciennes études. Afin de caractériser la réponse des bryophytes, des champignons et des lichens face à l'arrêt de l'exploitation des milieux forestiers, ces hypothèses seront testées pour mesurer l'effet de chaque facteur sur cette réponse. La distinction des variables liées à la naturalité anthropique et des variables liées à la naturalité biologique sera particulièrement étudiée.

A la suite du travail de lecture des articles dans le but d'indiquer les données, une autre recherche bibliographique sera réalisée dans l'optique d'affiner les hypothèses susceptibles de répondre à la problématique, mais aussi dans le but d'en trouver pourquoi pas de nouvelles. Les résultats du projet GNB seront alors appliqués à cette méta-analyse.

Les autres groupes taxonomiques seront ainsi étudiés de la même façon par la suite.

## Bilan du stage :

Ce stage est ma première expérience dans le monde de la recherche. Même si mon stage ne portait que sur de la bibliographie, une réflexion sur le sujet était nécessaire et sans cesse en évolution. La recherche bibliographique sur une longue période permet d'amasser une grande quantité d'informations. Par ailleurs, effectuer une recherche bibliographique demande de savoir assez précisément ce que l'on cherche. Cela permet aussi de maîtriser pleinement les outils bibliographiques.

L'aspect du thème de recherche intégré dans un projet à échelle nationale est particulièrement attrayant : cela permet de fonder des partenariats avec d'autres organismes ou groupements et donc de communiquer et d'échanger des idées avec beaucoup de personnes, tant au sein du lieu de travail que sur le terrain.

De plus, il y a de nombreux projets et thèmes de recherche au sein du même laboratoire/centre, une même personne pouvant travailler sur plusieurs projets à la fois. Cela donne une grande diversité dans les manières de travailler.

Le seul regret que j'ai pu avoir est l'absence de terrain, notamment dans le cadre de ce projet où les lieux d'échantillonnages sont répartis un peu partout en France. De plus, l'expérience naturaliste n'est pas idéale non plus. Une phase de détermination en laboratoire aurait été la bienvenue.

Mais dans l'ensemble, je garde de ce stage un bilan positif. Continuer dans cette voie me tente assez, avec tout de même une collecte des données sur le terrain.

## Bibliographie

- Arnqvist, G. et Wooster, D., 1995. Meta-analysis – Synthesizing research findings in ecology and evolution, *Trends in Ecology and Evolution*, **10**, 236-240.
- Baldwin, L.K. et Bradfield, G.E., 2010. Resilience of bryophyte communities in regenerating matrix forests after logging in temperate rainforests of coastal British Columbia, *Botany*, **88**, 297-314.
- Beatty, S.W., 1984. Influence of microtopography and canopy specie on spatial patterns of forest understory plants, *Ecology*, **65**,1406-1419.
- Bengtsson, J., Nilsson, S. G., Franc, A., Menozzi, P. 2000. Biodiversity, disturbances, ecosystem function and management of European forests, *Forest Ecology and Management* **132**, 39-50.
- Blondel, J., 1995. Biogéographie. Approche écologique et évolutive. Editions Masson.
- Butchart, S. H.M., M. Walpole, B. Collen, A. Van Strien, J. P.W. Scharlemann *et al.*, 2010. Global biodiversity: Indicators of recent declines. *Science*, 328(5982), 1164-1168.
- Cemagref, 2010. Gestion, Naturalité et Biodiversité: développements méthodologiques et étude de la biodiversité des forêts exploitées et non-exploitées. Cemagref, Centre de Nogent-sur-Vernisson.
- Edman, M., Kruys, N., Jonsson, B.G., 2004. Local dispersal sources strongly affect colonization patterns of wood-decaying fungi on spruce logs, *Ecological Applications*, **14**, 893-901.
- Esseen, P.A. & Renhorn, K.E. 1998. Edge effects on an epiphytic lichen in fragmented forests, *Conservation Biology*, **12**, 1307-1317.
- FAO 2011. Situation des forêts du monde. 2011. Rome, Italie.
- Gilg, O., 2004. Forêts à caractère naturel, *Atelier Technique des Espaces Naturels*, pp96.
- Graae, B.J., et Heskjaer, V.S., 1997. A comparison of understorey vegetation between untouched and managed deciduous forest in Denmark, *Forest Ecology and Management*, **1**,171-188.
- Gosselin, F., 2004. Imiter la nature, hâter son œuvre ? Quelques réflexions sur les éléments et stades tronqués par la sylviculture, dans Biodiversité et gestion forestière. Connaître pour préserver, 217-252, Gosselin, M., Laroussinie, O., GIP Ecofor, CEMAGREF Editions, Paris.
- Gosselin, F. et Gosselin, M., 2004. Comment analyser la diversité taxinomique ?, dans Biodiversité et gestion forestière. Connaître pour préserver, 58-84, Gosselin, M., Laroussinie, O., GIP Ecofor, CEMAGREF Editions, Paris.

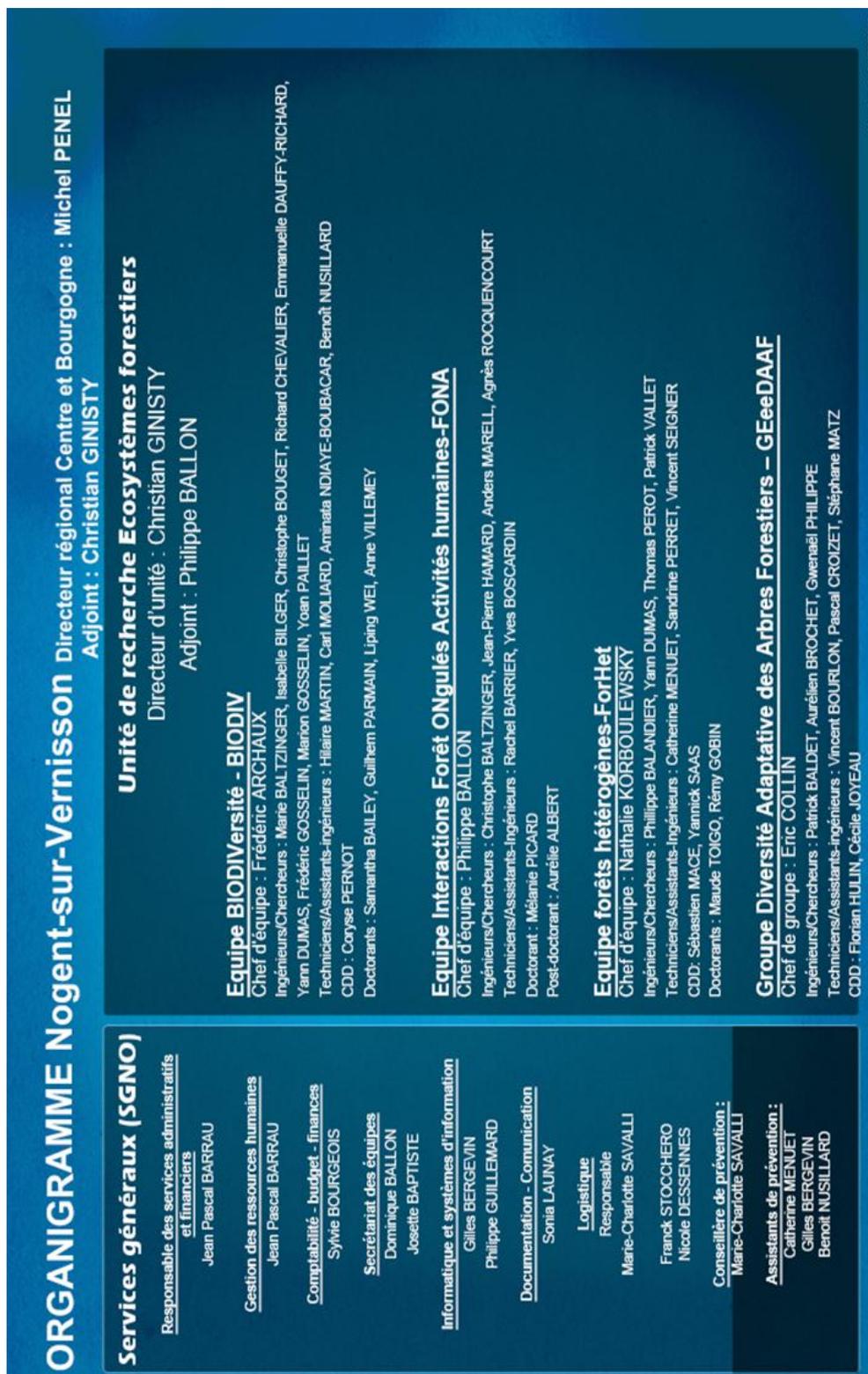
- Horak, J., Rébl, K., 2013. The species richness of click beetles in ancient pasture woodland benefits from a high level of sun exposure, *Journal of Insect Conservation*, **17**, 307-318.
- Johansson, T., Hjalten, J., Hilszczanski, J., Stenlid, J., Ball, J.P., Alinvi, O., and Danell, K., 2007. Variable response of different functional groups of saproxylic beetles to substrate manipulation and forest management: Implications for conservation strategies. *Forest Ecology and Management*, **242**, 496-510.
- Juuninen, K., et Kouki, J., 2006. Are woodland key habitats in Finland hotspots for polypores (Basidiomycota)? *Scandinavian Journal of Forest Research*, **21**, 31-42.
- Juuninen, K., Simila, M., Kouki, J., et Kotiranta, H., 2006. Assemblages of wood-inhabiting fungi along the gradients of succession and naturalness in boreal pine-dominated forest in Fennoscandia, *Ecography*, **29**, 75-83.
- Kivistö, L. et Kuusinen, M., 2000. Edge effects on the epiphytic lichen flora of *Picea abies* in middle boreal Finland, *Lichenologist*, **32**, 387-398.
- Larrieu, L., Cabanettes, A., Delarue, A., 2012. Impact of silviculture on dead wood and on the distribution and frequency of tree microhabitats in montane beech-fir forests of the Pyrenees. *European Journal of Forest Research*, **131**, 773-786.
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005. Ecosystems and Human Well-being: Biodiversity Synthesis. World Resources Institute, Washington, DC.
- Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, 2011. Stratégie nationale pour la biodiversité. 2011-2020, Paris, France.
- Nilsson, S.G., Arup, U., Baranowski, R., et Ekman, S., 1995. Tree-dependant lichens and beetles as indicators in conservation forests, *Conservation Biology*, **9**, 1208-1215.
- Økland, T., Rydgren, K., Økland, H., Storaunet, K.O., Rolstad, J., 2003. Variation in environmental conditions, understory species number, abundance and composition among natural and managed *Picea-abies* forest stands, *Forest Ecology and Management* **177**, 17-37.
- Olivero, A.M. et Hix, D.M., 1998. Influence of aspect and stand age on ground flora of southeastern Ohio forest ecosystems, *Plant Ecology*, **139**, 177-187.
- Paillet, Y., Bergès, L., Hjalten, J., Odor, P., Avon, C., Bernhardt-Römermann, M., Bijlsma, R.-J., De Bruyn, L., Fuhr, M., Grandin, U., Kanka, R., Lundin, L., Luque, S., Magura, T., Matesanz, S., Mészáros, I., Sebastià, M.-T., Schmidt, W., Standovar, T., Tothmérész, B., Uotila, A., Valladares, F., Vellak, K. et Virtanen, R., 2010. Biodiversity differences between managed and unmanaged forests: meta-analysis of species richness in Europe, *Conservation Biology*, **24**(1), 101-112.

- Paltto, H., Nordén, B., Götmark, F., 2008, Partial cutting as a conservation alternative for oak (*Quercus* spp.) forest-Response of bryophytes and lichens on dead wood, *Forest Ecology and Management*, **256**, 536-547.
- Pernot, C., 2012. Comparaison de structure et de biodiversité entre des forêts exploitées et non exploitées en France : bilan des données acquise et premières perspectives. Rapport de stage. Master 2 "Environnement et Aménagement", Université Paul Verlaine - Metz:55p.
- Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2010. Global Biodiversity Outlook 3; Convention on Biological Diversity (CBD), Montreal, p.94.
- Spies, T.A, et Franklin, J.K., 1996. The diversity and maintenance of old-growth forests, in Szaro R. et Johnston D.W. (Eds), *Biodiversity in managed landscapes: theory and practice*, New-York, Oxford University Press, p.296-314.
- Standovar, T., Odor, P., Aszalos, R., Galhidy, L., 2006. Sensitivity of ground layer vegetation diversity descriptors in indicating forest naturalness, *Community Ecology*, **7**, 199-209.
- Vanbergen, A.J., Woodcock, B.A., Watt, A.D., Niemela, J., 2005. Effect on land-use heterogeneity on carabid communities at the landscape scale, *Ecography* **28**, 3-16.
- Vuidot, A., Paillet, Y., Archaux, F., Gosselin, F., 2011. Influence of tree characteristics and forest management on tree microhabitats, *Biological Conservation*, **144**, 441-450.

## Sitographie

- [1] <http://gnb.irstea.fr/> : Site du projet Gestion, Naturalité et Biodiversité
- [2]<http://www.scopus.com/home.url> : Site du serveur bibliographique Scopus.
- [3]<http://apps.webofknowledge.com> : Site du serveur bibliographique Web of knowledge.
- [4] <http://digitizer.sourceforge.net/>: Site où télécharger le logiciel de numérisation Engauge Digitizer 4.1 [Qt].

**Annexe A** : Organigramme de l'unité de recherche Ecosystèmes forestiers du centre de Nogent-sur-Vernisson IRSTEA



## **Annexe B** : Liste des mots-clés renseignés sous Scopus

TS=(forest\* OR stand OR wood\*) AND TS=(impact OR effect OR influence OR role OR compare\*)

AND TS=(species OR species richness OR abundance OR occurrence OR similarity OR species diversity OR biodiversity OR deadwood OR species composition)

AND TS=(natural\* OR semi-natural\* OR primary OR primeval OR manag\* OR unmanag\* OR virgin OR old-growth OR remnant\* OR ancient\* OR silviculture OR cut\* OR clear-cut OR felling OR clear-fell\* OR clearfell\* OR select\* cut\* OR thinning\* OR coppic\* OR log\* OR unlog\* OR regeneration OR plantation\* OR planting OR intensification OR old OR abandonment OR set aside)

**Annexe C:** Carte de la répartition des biomes à l'échelle mondiale (Millenium Ecosystem Assessment)

