

## IMPACT DE L'INTENSITE DES PRELEVEMENTS FORESTIERS SUR LA BIODIVERSITE

## IMPACT OF WOOD HARVEST INTENSITY ON FOREST BIODIVERSITY



Philippe Balandier  
Irstea

*Unité de Recherches sur les Ecosystèmes Forestiers*

*Domaine des Barres*

*F-45290 Nogent-sur-Vernisson*

*philippe.balandier@irstea.fr*

### Synthèse du rapport final 21 juillet 2014

*Numéro de contrat MEDDE/MAAF : 10-MBGD-BGF-3-CVS-081*



## Contexte général

L'augmentation des prélèvements de bois en forêt est souhaitée dans de nombreux pays. Elle répond principalement à une demande croissante en bois-énergie en alternative aux énergies fossiles. Par ailleurs, dans le cadre des changements climatiques, de nombreuses recommandations sont faites pour réduire le nombre d'arbres sur pied afin de réduire globalement la consommation en eau de l'écosystème forestier et ainsi mieux faire face aux sécheresses récurrentes que subissent les écosystèmes. Cependant, la préservation de la biodiversité en forêt est également une préoccupation majeure de notre société. Or, bien que la maxime « produire plus tout en préservant mieux la biodiversité » ait été adoptée par le Plan Forestier National et le Grenelle de l'Environnement, peu de recherches ont réellement prospecté le lien entre densité d'arbres sur pied et diversité de différents compartiments de l'écosystème.

La majorité des études sur les liens entre densité des peuplements et biodiversité, à notre connaissance, ne s'est intéressée qu'au compartiment flore et, dans une moindre mesure, à la richesse chimique du sol ou à sa faune en lombric. Peu d'études apportent un éclairage sur les autres compartiments de la diversité, en particulier des invertébrés (insectes, méso- et macrofaune du sol) et des microorganismes du sol. Par ailleurs, la pression d'herbivorie exercée par les ongulés sauvages (Cerf et Chevreuil notamment) est susceptible de moduler l'effet de la densité du peuplement sur les chaînes trophiques, comme par exemple les invertébrés, via la flore.

La diminution de la densité d'un peuplement provoque au niveau du sous-bois une augmentation des ressources, notamment en lumière et en eau. Cette augmentation des ressources conduit généralement à une augmentation de la biomasse au niveau des strates herbacées et arbustives, mais ses effets sur la diversité de l'écosystème sont moins consensuels. D'une manière générale, il ne semble pas exister une relation universelle entre productivité et biodiversité ; plus encore, cette relation peut considérablement varier en fonction des groupes taxinomiques étudiés et aller dans des sens opposés sur un même site. Par exemple, il serait logique de penser qu'une flore plus diversifiée s'établit sous des peuplements plus aérés, mais certains résultats décrivent le développement d'une ou de quelques espèces très monopolistes (e.g. ronces, fougère-aigle, différentes graminées), dites « interférentes<sup>1</sup> », au détriment de la diversité lors de l'augmentation des ressources.

## Objectifs généraux du projet

Le projet Imprebio visait donc à étudier la relation entre itinéraire sylvicole et en particulier le régime d'éclaircie, et biodiversité. Nous avons focalisé sur les peuplements de chênes (*Quercus petraea* et *Q. robur*) en peuplement équienne et régulier. La réponse de la diversité à l'éclaircie pouvant varier en fonction des contextes pédo-climatiques et pour différents compartiments de diversité, nous avons choisi de l'explorer sur un vaste réseau multisites et pour la flore, la faune du sol, les gastéropodes et les insectes, en interaction avec les cervidés.

Les principaux objectifs du projet Imprebio étaient :

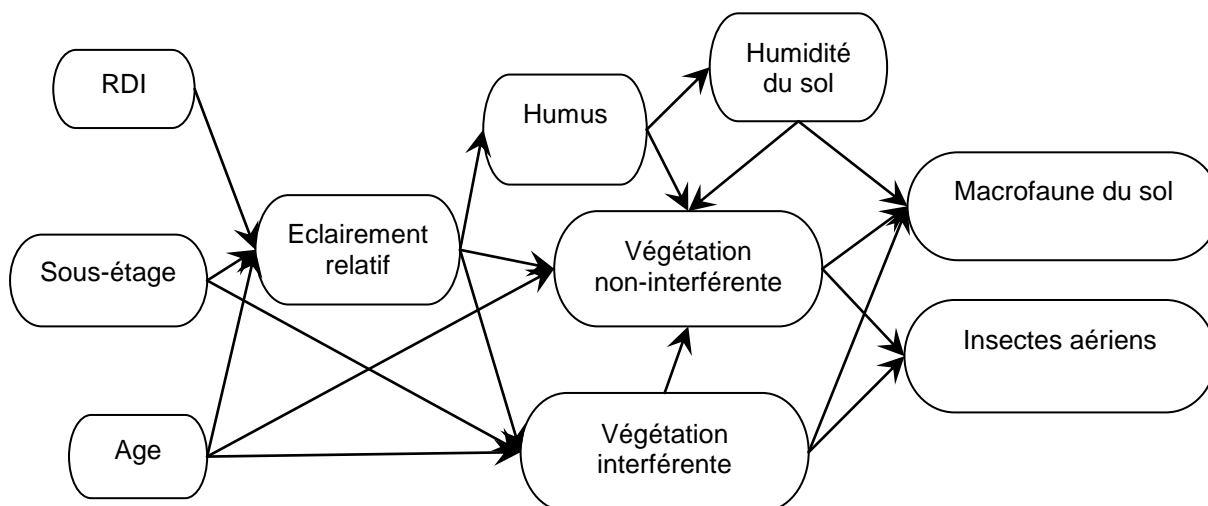
- (1) Mettre en évidence les variations des communautés végétales (flore vasculaire, bryophytes dont les épiphytes), de faune du sol et d'invertébrés sur une gamme de scénarios sylvicoles très contrastés et parfaitement contrôlés. Quelles sont les espèces ou les groupes d'espèces concernés ? Par quels traits fonctionnels sont-ils caractérisés ?
- (2) Approfondir la connaissance des relations entre composition des différents compartiments de biodiversité étudiés, caractéristiques dendrométriques du peuplement, microclimat et ressources.
- (3) Modéliser et simuler ces relations afin d'aboutir à un outil de prédiction, permettant aux chercheurs et aux gestionnaires d'anticiper les conséquences en termes de biodiversité de l'écosystème forestier d'un changement du régime d'éclaircie.
- (4) Proposer des recommandations.

---

<sup>1</sup> Plantes monopolistes à dynamique spatiale de grande ampleur et à forte captation des ressources du milieu

Ces objectifs ont été réunis en particulier à travers une approche intégrée, résumée par le graphe suivant, impliquant une suite de dépendances (figurées par des flèches) :

- (1) dépendances des compartiments biotiques étudiés entre eux (cascades trophiques) ;
- (2) dépendances de ces compartiments au microclimat et aux ressources (lumière, humidité du sol, température) ;
- (3) dépendances de ces propriétés aux caractéristiques du sol et du peuplement (âge, densité, importance du sous-étage).



La démarche d'analyse a suivi cette structuration conceptuelle où les variables peuvent alternativement avoir le rôle de variable de réponse ou de variable explicative. Ce schéma conceptuel considère notamment que la lumière est un, sinon le déterminant clé des compartiments biotiques étudiés, aussi un pan du projet a été dédié à sa quantification et à sa modélisation, notamment pour faire le lien entre nos résultats d'observations et le modèle de dynamique forestière RReShar (Regeneration and Resource Sharing). Ce modèle de type « structure – fonction » de dynamique forestière modélise explicitement la structure de la végétation d'une placette d'1 ha (arbres adultes, sous-bois, végétation herbacée, régénération) et applique ensuite différentes fonctions à cette structure. Ce formalisme permet de rendre compte des interactions (compétition, facilitation) entre les différentes composantes du système. La croissance de l'ensemble de la végétation est calculée en fonction de la disponibilité en lumière et en eau. Le projet Imprebio permet justement d'affiner les relations qui lient structure de la végétation et lumière et eau d'une part, et d'étendre l'étude à la diversité biologique d'autre part.

Ce schéma stipule également que la mise en lumière profite plus particulièrement à un nombre limité de plantes interférentes capables, au-delà d'un certain seuil de lumière, de limiter la diversité du reste de la flore et d'autres groupes taxonomiques. Pour décrire ce compartiment, nous avons considéré le recouvrement cumulé de 16 espèces capables de « monopoliser » les assemblages, à l'exemple du Charme, de la Fougère-aigle, de la Molinie et de la Laiche fausse-brize qui dépassent 50% de couvert dans au moins une des placettes étudiées.

## Méthodologie

### Sites d'étude

Afin de travailler sur des itinéraires sylvicoles contrôlés au mieux, tout en échantillonnant un vaste ensemble pédo-climatique, nous avons retenu deux réseaux, le **GIS coopérative de données sur la croissance des peuplements forestiers, groupe chêne** et le **réseau chêne du LERFOB**.

Créé en 1994, le GIS "Coopérative de données sur la croissance des peuplements forestiers" installe et suit des réseaux de placettes permanentes à très long terme, couvrant les différents pédo-

climats des principales essences forestières françaises. Des scénarios-types contrastés de sylviculture en futaie régulière sont définis et appliqués selon des protocoles standardisés rigoureux, basés essentiellement sur des indices de compétition, conduisant à des peuplements à la densité maximale en arbres (aucune intervention) jusqu'à des peuplements avec une très faible densité (individus en « croissance libre »<sup>2</sup>). La planification des travaux au sein de ces dispositifs permet d'anticiper les coupes et ainsi de réaliser des études de type Avant-Après/Contrôle-Impact. Le GIS, fonctionnant par groupes, travaille depuis 20 ans sur quatre essences traitées en futaie régulière (chênes sessile et pédonculé, pin laricio, pin maritime et douglas).

Le groupe Chênes du GIS coopérative des données compte au lancement du projet Imprebio 13 sites installés entre 1995 et 2009, répartis sur 11 départements pour un total de 53 placettes. Les peuplements sont âgés de 20 à 50 ans (en 2013), dans différentes fertilités de station. Chaque site comporte entre 3 et 5 placettes, chacune affectée d'un scénario de densité différent, basé sur l'indice de densité de Reineke (RDI, Relative Density Index, rapport entre la densité d'un peuplement à un moment donné et la densité maximale qu'il pourrait avoir sans éclaircie artificielle au même moment – courbe d'auto-éclaircie). A notre connaissance il n'existe pas d'alternative crédible à ce dispositif expérimental multi-sites pour établir les conséquences d'une diminution de la densité des peuplements sur la production et la biodiversité. Cependant il soulève quelques questions relatives à la jeunesse des peuplements (20 à 50 ans) et à la dimension relativement modeste des placettes (1 ha pour chaque densité) et donc à sa potentialité à pouvoir entièrement répondre aux questions que l'on se pose en termes de biodiversité.

C'est pourquoi nous avons complété ce dispositif en intégrant les placettes du réseau « chêne » du LERFOB. Même s'il n'expérimente qu'une gamme plus limitée de RDI en référence à la sylviculture actuellement pratiquée, il incorpore des parcelles plus âgées que le réseau GIS. Le réseau de placettes Chêne (sessile) du LERFOB a été mis en place entre 1925 et 1956 dans l'objectif de tester différentes intensités d'éclaircie. Il compte actuellement 47 placettes, réparties sur cinq massifs forestiers, recouvrant la moitié supérieure des indices de fertilité possibles, par référence au faisceau de courbes établi par l'ONF. Sur ces placettes d'âge compris entre 29 et 121 ans en début d'expérimentation, les protocoles initiaux ont été appliqués sans discontinuer jusqu'à aujourd'hui.

Les peuplements du GIS ont tous moins de 50 ans à la fin du projet, ceux du Lerfob entre 100 et 200 ans. Nous n'avons donc pas pu échantillonner de placettes pour des âges de peuplement entre 50 et 100 ans. Les treize sites du GIS ont été sélectionnés, et les mesures réalisées dans 3 placettes sur chaque site correspondent à des scénarios de densité contrastés. Huit dispositifs du Lerfob ont été échantillonnés, à raison de 2 placettes par dispositif. Les dispositifs du Lerfob ne couvraient pas une gamme de densité suffisamment contrastée pour permettre de sélectionner 3 placettes. Si la gamme de variation du RDI couvre bien l'ensemble de la fourchette 0 – 1 pour le réseau du GIS, elle est limitée à 0,5 – 1 pour le réseau LERFOB. Les éclaircies sur ce dernier dispositif ont été moins intenses et moins rapprochées que sur le réseau du GIS. Nous avons cependant systématiquement intégré les deux réseaux dans les analyses, en intégrant soit un effet âge, soit un effet dispositif, quitte à les séparer ensuite.

### Données abiotiques et biotiques

Toutes les placettes n'ont pas pu faire l'objet d'un échantillonnage de même intensité, nous avons réalisé un échantillonnage emboîté, en distinguant des placettes avec suivi normal, intensif (9 sites) et très intensif (3 sites). Le sous-étage ligneux, la flore et la lumière sur 24h ont été mesurés sur 54 placettes (21 sites), la faune du sol sur 37 placettes (14 sites), l'abrutissement sur 48 placettes (19 sites dont 10 avec Cerf), les insectes aériens sur 23 placettes (9 sites), la teneur en eau sur 34 placettes (14 dispositifs), les escargots sur 20 placettes (8 sites, 1 site intensif n'a pas été prospecté) et la lumière en continu et la température en continu respectivement sur 15 placettes et 6 sites.

En lien avec le graphe précédent, en plus des descriptions dendrométriques des peuplements réalisées en routine dans les deux réseaux, nous avons réalisé, décrit, mesuré ou échantillonné :

---

<sup>2</sup> Les arbres sont suffisamment éloignés les uns des autres pour ne pas être en compétition entre eux. Mais il demeure tout de même une compétition par la végétation arbustive et herbacée qui les entoure. Le terme de croissance libre est donc un peu abusif.

- une estimation du sous-étage ligneux dans toutes les placettes (recouvrement, hauteur, espèces) ;
- une description pédologique détaillée grâce à l'effort consenti par la coopérative de données dans le cadre du projet CoopEco ;
- des analyses chimiques de l'horizon 0-10 cm (projet CoopEco) ;
- la disponibilité en azote minéral (nitrate et ammonium) du sol ;
- les formes d'humus ;
- la lumière (dans la gamme spectrale de 400 à 700 nm, ce qui correspond au rayonnement photosynthétiquement actif). Trois types de mesures ont été mises en œuvre : (1) des mesures de lumière en continu pour évaluer la variabilité saisonnière de l'éclairement, (2) des mesures sur 24h en été pour estimer l'éclairement en pleine feuillaison et (3) des mesures quadrillant le terrain pour avoir une idée de la variabilité spatiale et temporelle de l'éclairement. Une mesure de référence hors couvert (éclairement incident) est systématiquement associée ; les mesures sont alors exprimées en éclairement relatif, c'est-à-dire le ratio entre éclairement sous couvert / éclairement incident ;
- la teneur en eau du sol ; suite à des problèmes de mise en place et des dégâts de gibier en 2011, seules les données acquises en 2012 et 2013 sont exploitables ;
- la température du sol (à 10 cm de profondeur) et de l'air sous abri (à 1 m au-dessus du sol) ;
- l'abroustissement moyen de la végétation lignifiée (*i.e.* un proxy de la pression d'herbivorie) qui pondère le taux d'abroustissement de chaque plante lignifiée accessible aux cervidés par son taux de recouvrement ;
- les biomasses des décomposeurs primaires (biomasse microbienne et fongique) ;
- le fonctionnement de l'humus (expérience de vitesse de décomposition de litière en sachet durant 12 mois ; toujours en cours) ;
- les macro-arthropodes (diplopedes, isopodes, araignées, chilopodes, carabes, staphylins,...) ;
- les vers de terre épigés, anéciques et endogés ;
- les microarthropodes de la mésofaune du sol ;
- les collembolles (épi-, hémi- et euédaphiques) ;
- les acariens (Oribates, Gamasidés, Uropodes, Actinedida et Acaridida) ;
- le profil métabolique de dégradation de sources carbonées par la microflore cultivable des sols (*i.e.* un proxy de la diversité fonctionnelle de la microflore du sol) ;
- la qualité de la litière (collectée par des paniers ; analyses biochimiques des solubles, hémicellulose, cellulose et lignine, carbone organique et azote total) ;
- la flore vasculaire et bryophytes avec distinction des bryophytes terricoles et épiphytes ;
- l'entomofaune aérienne par battage du sous-étage (ligneux bas) et fauchage de la strate herbacée, et mise en place de 2 pièges chromo-attractifs blancs UV par placette, relevés mensuellement pendant 2 mois ;
- les gastéropodes (recherche à vue sur un quadrat de 400 m<sup>2</sup>, prélèvement de litière dans au moins cinq micro-habitats).

### Base de données et analyses

Nous avons consacré un temps très important dans le projet au « nettoyage » des données recueillies et à la construction d'une base de données (BDD) élaborée sous ACCESS (Microsoft) afin de stocker et conserver proprement ces données d'une part, d'élargir leur champ d'utilisation et de faciliter leur exploitation future d'autre part. Compte-tenu du volume estimé de données au terme du projet (plus de deux millions de lignes pour certaines tables), notamment pour les facteurs abiotiques, un système de BDD liées a été conçu, de sorte à limiter la taille des fichiers à télécharger et à restreindre le partage des données volumineuses aux seuls besoins réellement exprimés.

D'une façon générale, les données ont été explorées selon deux pistes. Soit en lien avec les variables de description des peuplements, et en particulier la surface terrière (m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>) et le RDI. Dans certains cas, l'âge (années), la densité (nombre de tiges par hectare), et les caractéristiques de la dernière éclaircie (intensité en % de surface terrière supprimés, durée depuis cette éclaircie) ont également été considérés. Soit en lien avec le microclimat ou les ressources du milieu pour une approche plus fonctionnelle entre la diversité de tel ou tel compartiment et les caractéristiques du peuplement. La lumière transmise sous la canopée des arbres (en % de la lumière incidente) a été la principale ressource considérée. Dans une moindre mesure, les variables comme l'eau disponible du sol, la température, le pH du sol ont également été testées.

Pour la plupart des compartiments étudiés, nous avons utilisé les modèles linéaires généralisés à effets mixtes (GLMM) pour déterminer les variables indépendantes qui influencent significativement les variables dépendantes dont nous souhaitons modéliser la réponse à l'échelle de la placette ou du plateau. Dans la structure emboîtée de notre dispositif, le réseau (GIS ou LERFOB), le dispositif (site ou forêt) et le cas échéant, la placette (modalité de RDI au sein d'un site ou d'une forêt), ont été considérés comme des effets aléatoires.

Afin de synthétiser l'ensemble des résultats, nous avons exploré deux pistes, d'une part l'utilisation de modèles conceptuels sur le principe de celui exposé précédemment (affiné au besoin pour l'étude de chaque compartiment particulier) à partir de la méthodologie de Confirmatory Path Analysis (CPA) développée par Shipley (2009), et d'autre part l'utilisation exploratoire des modèles d'équations structurelles (SEM) développés en Bayésien.

## **Résultats**

### Effet du couvert sur le microclimat et les ressources

A la suite de précédentes études, les analyses confirment que dans ces peuplements réguliers, (quasiment) monospécifiques, **l'éclairement en sous-bois peut être déduit assez facilement des grandes caractéristiques des peuplements** et en particulier de ses indices d'abondance que sont le RDI ou la surface terrière. On peut affiner ces relations en tenant compte des caractéristiques des éclaircies (intensité des prélèvements en bois). **La prise en compte du sous-étage ligneux dans ces relations est assez fondamentale.** Un obstacle toutefois à cette démarche est lié aux conditions très différentes de gestion de ce sous-étage ligneux, d'un réseau à un autre (il est beaucoup plus présent sur le réseau LERFOB), d'un site à un autre, voire d'une placette à une autre sur le même site. Les conséquences en sont que le couvert du sous-étage ligneux, normalement lié à la disponibilité en lumière sous la canopée arborée, est plus ou moins développé dans les placettes, en fonction de son taux de gestion, ce que nous n'avons pas encore pris en compte dans les analyses.

Un autre apport du projet concerne la méthodologie de mesure de la lumière sous-couvert. Les mesures confirment **une variabilité spatiale plutôt faible de l'éclairement pour une date donnée**, comparativement à des peuplements irréguliers, même si cette variabilité augmente globalement avec le taux d'ouverture du couvert. La variabilité temporelle saisonnière de l'éclairement est bien sûr grandement liée à la phénologie de l'appareil foliaire dans ces peuplements feuillus caducs. Il est d'ailleurs intéressant de noter que les dates de débourrement et de chute des feuilles peuvent être assez différentes d'une année à l'autre, ce qui a sans doute un effet notoire sur la flore du sous-bois. **L'interception de la lumière pendant la phase non feuillée n'est d'ailleurs pas négligeable** : branches et troncs peuvent intercepter jusqu'à 60% de la lumière incidente dans les peuplements les plus denses (RDI = 1). Enfin, ce qui est tout à fait remarquable, c'est **la forte variation de l'éclairement en un même point tout au long de la saison**, parfois du simple au double. Il en résulte que l'éclairement mesuré sur 24h en un point ne donne qu'une idée approximative de l'éclairement reçu sur la saison. Néanmoins la moyenne des mesures réalisées sur 24h sur cinq plateaux en juin ou juillet est très fortement corrélée à la moyenne mensuelle et saisonnière, ce qui justifie l'utilisation de la moyenne des mesures réalisées sur 24h dans le reste des analyses. La meilleure méthodologie pour estimer un éclairement saisonnier de qualité consisterait néanmoins à compléter cette mesure par capteur sur 24h par la prise d'une photographie hémisphérique. La mesure de lumière par capteur permet de seuilier la photographie de manière non subjective pour le jour de mesure considéré. Cette photographie ainsi seuillée est ensuite utilisée pour l'extrapolation sur la saison de végétation, en tenant compte du rayonnement diffus, du rayonnement direct et de l'emplacement des trouées par rapport à la course du soleil.

Le projet a aussi permis de progresser sur la mesure de la température et de la teneur en eau du sol, des paramètres abiotiques rarement relevés dans les études de biodiversité en forêt. En ce qui concerne les températures du sol et de l'air, **les peuplements les plus fermés ont tendance à tamponner les variations de températures, i.e. moins chaudes l'été, moins froides l'hiver**, en comparaison aux peuplements plus ouverts. Les effets ne sont pas toujours significatifs car peu de sites ont été instrumentés. Cependant nous avons suffisamment de données pour entreprendre une démarche de modélisation prenant en compte les différentes couches de végétation et leurs

caractéristiques (pourcentage de couvert notamment). Les données de température recueillies vont être analysées afin d'estimer la capacité d'isolation de la végétation via l'estimation d'une diffusivité thermique apparente. Les premières analyses sont encourageantes. Les données de teneur en eau du sol nécessitent une analyse plus complexe encore en cours. Il faudra notamment que nous prenions en compte les caractéristiques pédologiques des sols que nous avons relevées durant le projet. Les analyses visent à modéliser la pente de la décroissance estivale de la teneur en eau du sol et de la relier aux caractéristiques du peuplement, du sous-étage et de la flore du sous-bois. En première approche, **il semble que les placettes les plus denses (avec les RDI les plus élevés) ont tendance à s'assécher plus précocement et plus rapidement** que les placettes plus ouvertes.

#### Réponse du compartiment sol (azote minéral, humus, faune, flore microbienne) à la densité du peuplement

**La conclusion principale de l'étude portant sur l'épisolum humifère est que l'effet de la densité des arbres sur pied est rarement généralisable.** La principale raison réside dans le fait que les effets « âge du peuplement » et « contexte édaphique » sont très souvent prépondérants. En particuliers, les relations mises en évidence diffèrent souvent entre les stations très acides à humus de type moder et celles moyennement acides à neutre à humus de type mull.

En ce qui concerne l'azote minéral, il semble y avoir **un effet peu significatif de la densité des peuplements (effet RDI) sur la disponibilité en nitrate et en ammonium.** Les résultats préliminaires mettent en évidence une très forte variabilité intra-parcellaire des quantités de nitrates ou d'ammonium à 20 cm de profondeur, quelle que soit la parcelle considérée et ce pendant les deux années de campagne de mesure. Nous avons néanmoins observé une diminution de la disponibilité en azote minéral du sol dans les peuplements les plus âgés et une cinétique de piégeage du nitrate très différente entre 2011 et 2012.

**Dans le cas de l'effet de l'âge du peuplement, certains résultats sont d'ailleurs surprenants** au regard de la littérature. La richesse spécifique des collemboles épédaphiques est par exemple supérieure dans les jeunes peuplements. Or, le vieillissement des peuplements s'accompagne généralement d'un effet positif (au pire nul) sur l'abondance et la richesse de ce groupe. Ce résultat inattendu pourrait trouver une hypothèse dans la mise en place des expérimentations au sein des deux réseaux de sites. Pour le LERFOB, les dispositifs étudiés ont été mis en place dans des peuplements âgés de 36 à 95 ans c'est-à-dire des peuplements abritant déjà des cortèges d'espèces spécialistes défavorisées par les perturbations. Dans le cas du GIS, les sites ont été implantés plus récemment dans des peuplements âgés de 8 à 38 ans. Dans cette gamme de peuplements très proches de la phase de régénération, les cortèges peuvent être constitués d'un mélange transitoire d'espèces de stratégie « k » et d'espèces de stratégie « r », favorisées par les perturbations de la phase de régénération du peuplement et qui persistent depuis. Il n'est donc pas possible de contourner l'hypothèse selon laquelle, une partie des effets « âge » observés ici ne serait en fait que des effets « mise en place des dispositifs ».

Toutefois il est possible d'affirmer que **la diminution de la densité des peuplements se traduit par une dégradation de la qualité de la litière de chêne.** Nous avons par ailleurs relevé **une richesse de vers de terre anéciques maximale pour des RDI intermédiaires** (0,6) et minimale voire nulle pour des RDI extrêmes (courbe de réponse en cloche). Dans les contextes d'humus de type mull où ces espèces sont centrales dans le recyclage de la matière organique, il convient d'être prudent sur l'intensité des prélèvements. La diversité de la mésofaune du sol et plus particulièrement celle des assemblages de collemboles répond au RDI en fonction de l'âge des peuplements : la richesse spécifique des collemboles épédaphiques augmente lorsque, dans les vieux peuplements, la densité des peuplements augmente. La réponse est inverse dans les jeunes peuplements. La richesse spécifique des collemboles hémiedaphiques est maximale pour les RDI intermédiaires dans les vieux peuplements. Dans les jeunes peuplements, elle augmente quand la densité des peuplements augmente.

Le fonctionnement de la microflore des horizons O répond au RDI en fonction du contexte édaphique : **l'activité métabolique et la diversité fonctionnelle de la microflore des horizons O diminuent quand la densité des peuplements augmente pour les formes d'humus de type moder.**

En termes de richesse spécifique, **les premiers maillons des chaînes trophiques du sol (décomposeurs primaires et mésofaune) sont ceux qui semblent les plus impactés par la diminution de la densité des peuplements**. Cet impact peut se faire indirectement via la diversité de la flore herbacée. En termes d'abondance, c'est au contraire la macro-faune qui semble la plus sensible au RDI.

#### Réponse des gastéropodes à la densité du peuplement

**La richesse spécifique des gastéropodes est toujours extrêmement faible, avec 16 espèces au total pour l'ensemble des sites**. Les substrats non carbonatés des sites retenus pour le programme sont la cause essentielle de cette pauvreté. L'effet site est donc prééminent. Le second facteur favorable à la fois à la richesse et à l'abondance de la malacofaune serait l'âge des peuplements forestiers. Dans les peuplements forestiers anciens (LERFOB), la litière et le sol pourraient être plus riches en calcium (il faudrait le vérifier), ce qui pourrait compenser légèrement le déficit en carbonate de calcium du substrat. Une structure simplifiée de l'habitat dans ces placettes sylvicoles régulières peut également avoir contribué à la pauvreté des cortèges de gastéropodes. Néanmoins, il n'y a aucune relation claire entre les valeurs de RDI et la richesse spécifique des assemblages. **Au final, la malacofaune n'est pas un bon indicateur de la biodiversité dans ces forêts aménagées** implantées sur des substrats peu favorables aux mollusques terrestres. Une future étude devrait tenir compte de ces exigences en termes de substrat et de conditions édaphiques et intégrer des placettes de référence (peuplements forestiers non gérés ou gérés avec un plus grand degré de naturalité).

#### Réponse des herbivores à la densité du peuplement

**La plus forte variabilité d'abrouissement a été constatée entre placeaux d'une même placette**. Ce résultat s'explique par le fait que les animaux n'explorent pas leur territoire de manière systématique et que le niveau d'herbivorie est presque toujours faible à très faible dans notre échantillon. Un seul dispositif est soumis à une pression d'herbivorie forte, du fait d'une végétation lignifiée peu abondante, sur laquelle se concentre la pression des animaux. Compte-tenu de l'amplitude limitée du gradient d'herbivorie, des effets sont attendus principalement sur les recouvrements des espèces (ronces et charme notamment). Les effets sur la présence des espèces (apparition ou disparition) interviennent en général dans un second temps, pour des pressions soutenues et persistantes, ce qui est peu probable dans le cadre de cette étude. De ce fait, **aucune des variables de peuplement testées (RDI et âge) n'a d'effet significatif sur le niveau d'abrouissement**. Des relevés d'abrouissements ont été effectués avant le projet IMPREBIO sur des dispositifs du GIS coopérative des données mais les évolutions sont complexes et variables entre dispositifs et placettes, ce qui suggère que différents facteurs (sylviculture, densité des animaux, protocole de mesure) difficiles à démêler sont à l'œuvre. Une approche de path analysis a été menée mais plusieurs améliorations sont à apporter avant d'en discuter les résultats.

#### Réponse de la flore vasculaire et des bryophytes à la densité du peuplement

**Les résultats sur la flore confirment l'importance de la lumière pour comprendre l'impact du régime d'éclaircie. Différents compartiments de la flore étudiée (richesse en espèces terricoles, vasculaires, fertiles, héliophiles, xérophiles, hygrophiles, de forêts anciennes ou recouvrement en espèces vasculaires) sont en effet très corrélés positivement à l'éclaircissement en sous-bois**. La lumière semble plus pertinente que les variables dendrométriques classiques que sont la surface terrière ou le RDI, probablement parce qu'elle intègre l'ensemble des strates, y compris le sous-étage, et la nature du feuillage caractéristique de chaque essence qui le compose. La lumière augmente la diversité floristique en favorisant les espèces les plus héliophiles, qui réagissent nettement aux variations du RDI, sans pour autant faire régresser les espèces sciaphiles (qui semblent globalement indifférentes à la densité des arbres). Les peuplements les moins denses favorisent aussi la floraison des plantes du sous-bois.

**La richesse des plantes vasculaires est affectée par le recouvrement des plantes interférentes selon une fonction quadratique**. La richesse de la flore vasculaire s'accroît donc jusqu'à un maximum correspondant à un recouvrement de la flore interférente d'environ 50%, puis décroît pour des valeurs supérieures à ce seuil. Toutefois, des seuils de recouvrement délétères (e.g. de 60 à 80%) de la flore interférente ne sont atteints que dans trois placettes de cette étude. Le



recouvrement en espèces interférentes est plus important dans les peuplements clairs. Or, la lumière ne dépasse pas 20% sur l'ensemble des placettes des deux dispositifs. Les placettes aux sylvicultures les plus extrêmes du réseau GIS coopérative de données n'ont pas été intégrées à ce projet car jugées irréalistes en termes de gestion. Il est toutefois possible d'imaginer qu'elles auraient été plus favorables au développement d'une flore interférente et que l'influence négative de celle-ci aurait pu être alors plus marquée. Nous avons par ailleurs souligné l'importance du sous-étage ligneux dans cette étude. Par conséquent, il est tout à fait réaliste de penser que **dans d'autres contextes que ceux échantillonnés ici, en absence de sous-étage ligneux, à RDI égal, la lumière serait bien plus forte et conduirait alors à un développement explosif des plantes interférentes.**

La surface terrière du peuplement a une influence très significativement négative sur le recouvrement de la flore interférente. Le recouvrement de cette strate est aussi plus important dans les peuplements de chêne pédonculé, pur ou mélangés avec du chêne sessile, que dans les peuplements monospécifiques de chêne sessile. Nous n'avons pas d'explication à ce stade de l'analyse pour éclairer ce résultat. Le recouvrement de la flore interférente est également plus important dans les peuplements du réseau GIS que dans ceux du réseau LERFOB, probablement du fait de caractéristiques dendrométriques peu favorables au développement de cette flore (telle que la présence de hêtre par exemple) dans le réseau LERFOB.

**La richesse en bryophytes terricoles décroît quand l'âge du peuplement augmente et croît avec le RDI.** Elle n'est pas favorisée par un fort éclaircissement relatif contrairement à l'ensemble de la flore terricole. Mais cet éclaircissement, mesuré à 2 m de hauteur, ne rend peut-être pas bien compte de ce que reçoit effectivement la flore bryophyte, du fait de l'interception d'une part très variable par les plantes vasculaires. Le RDI a un effet légèrement positif sur la flore bryophyte terricole, démontrant une relative résilience de cette flore par rapport à la concurrence des arbres.

**La richesse en espèces épiphytes dépend uniquement de l'identité de l'essence,** avec une richesse plus faible dans les peuplements purs de chênes sessiles que ceux de chênes pédonculés ou mélangés des deux essences. Il semble que chaque essence de chêne ait une part d'originalité dans le cortège d'épiphytes qui colonisent la base de son tronc. Ce résultat est tout à fait original mais demande confirmation par une analyse à l'échelle de l'arbre support (et non placette). Ni la richesse chimique du site, ni son hygrométrie ne semblent être l'explication de cette différence entre les deux essences. **Connaissant la sensibilité du chêne pédonculé face aux changements globaux, nous pouvons craindre une baisse importante de la biodiversité en bryophytes épiphytes dans le cas de sa raréfaction en chênaie.** Plus globalement, il semble important de mieux connaître la richesse (en bryophytes mais également en lichens, en insectes ou autres groupes tels que les champignons) associée à chaque essence.

#### Réponse de l'entomofaune aérienne à la densité du peuplement

Comme attendu, la richesse et la composition des communautés d'insectes varient en fonction de la densité des peuplements, et leur réponse aux facteurs physiques n'est pas univoque. Les relations plantes-insectes sont particulièrement dominantes. **La diversité générique des insectes croît avec la diversité spécifique de la flore, et les compositions des assemblages floristiques et faunistiques co-varient.** L'abondance et la diversité des insectes floricoles augmentent avec la diversité floristique, et l'abondance des insectes herbivores croît avec celle de la flore (i.e. le recouvrement floristique total). **Le recouvrement local de la Fougère-aigle a un effet négatif sur l'entomofaune.**

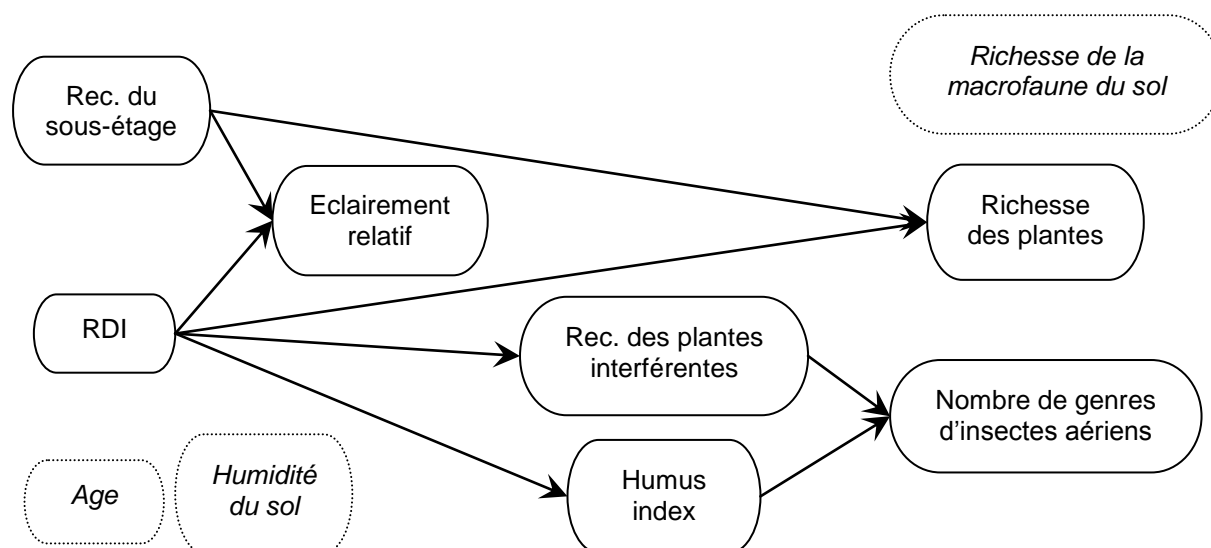
La présence de rémanents, l'âge du peuplement, la température minimale pendant la saison de végétation (avril-octobre) et l'humidité du sol sont également structurants. Pour mesurer rigoureusement l'effet associé à l'ouverture de la canopée qui ne passerait par la flore, l'approche de type « path analysis » pourrait être déployée, même si le nombre réduit de sites étudiés limitera la robustesse des conclusions. Des effets physiologiques indépendants et directs des gradients thermiques et hygrométriques sont en effet envisageables (sur le taux de succès du développement larvaire, sur les taux de mortalité larvaire et imaginal...).

#### Cascades trophiques : approche SEM et path analysis

Nous avons développé une analyse par équations structurelles pour analyser les données du projet de manière plus systémique, prenant en compte les effets structurés des variables écologiques

sur la biodiversité et des parties de biodiversité entre elles. Pour cela, des modèles Bayésiens ont été développés dans le cadre d'un stage de Master de statistiques appliquées, sur un premier modèle très simplifié reliant peuplement, faune du sol et flore (richesses spécifiques de la macrofaune et de la flore). Certains problèmes persistent et si l'approche par SEM est plus compliquée à mettre en place que d'autres approches Bayésiennes, nous pensons néanmoins que l'expérience peu concluante du projet ne signifie pas qu'il faille l'abandonner.

Une seconde approche fonctionnelle multi-groupe a été menée par Confirmatory Path Analysis. Dans une première approche, nous avons cherché à reprendre les principales variables influentes sur les trois groupes étudiés (flore, faune du sol, entomofaune aérienne) et à formaliser et valider le schéma conceptuel simple basé sur des richesses globales (voir schéma validé suivant).



Aucune des variables de peuplement ou du sol ne permet de rendre compte des variations de la diversité spécifique de la macrofaune du sol, ce qui rejoint les conclusions précédentes plus détaillées sur la faune du sol et qui concluent à un effet globalement faible du RDI. Par rapport à l'analyse sur le jeu de placettes complet, la diversité floristique s'explique ici mieux par les variables du peuplement que par les variables physiques et le recouvrement de la strate interférente, mais toujours dans le sens attendu. Parmi les variables de peuplement, seul le RDI semble être impliqué dans les variations de la diversité (en genres) de l'entomofaune aérienne. Cette influence est indirecte, à travers l'action de la densité du peuplement sur le recouvrement des plantes interférentes et sur le type d'humus. La diversité de l'entomofaune croît avec le recouvrement de la strate interférente jusqu'à un seuil de couvert (environ 25-30%) au-delà duquel la diversité semble décroître. Cette relation quadratique mériterait d'être confirmée car elle repose essentiellement sur deux placettes pour lesquelles le recouvrement dépasse les 35%. La diversité de l'entomofaune décroît avec l'humus index.

Au final, nous ne détectons pas de covariation entre la diversité (spécifique ou générique) des trois groupes taxonomiques, même si une variable – celle du contrôle expérimental, la densité relative du peuplement RDI – influence deux de ces groupes (flore et insectes). La relation démontrée lors de l'analyse de l'entomofaune aérienne entre la diversité floristique (spécifique) et la diversité entomologique (générique) n'est donc pas nécessairement fonctionnelle. Elle pourrait simplement résulter d'une réponse parallèle de la flore et de l'entomofaune aérienne au recouvrement des plantes interférentes, celui-ci dépendant notamment de la densité du peuplement. Il convient de rappeler cependant que le jeu de données sur lequel est bâti le schéma comporte peu de placettes (n=21), ce qui explique certainement que peu de relations ont été démontrées. Il convient de garder à l'esprit les résultats obtenus en détaillant les différents groupes : l'analyse globale est intéressante mais elle est simplificatrice et ne révèle probablement pas tous les mécanismes biologiques et les interactions potentielles entre groupes de biodiversité. Une approche plus fine, détaillant des groupes de réponse au sein des taxons étudiés permettra certainement d'explorer plus finement les mécanismes sous-jacents.

## Conclusions-perspectives

### Principaux résultats

En termes microclimatiques les résultats du projet Imprebio confirment que les peuplements les plus fermés et les plus denses créent une ambiance tamponnée, aussi bien en termes radiatifs que de variations de températures. Les extrêmes (T° maximales en été, T° minimales en hiver) sont écrêtés, aussi bien dans le sous-bois que dans le sol. Les données enregistrées sur la teneur en eau du sol à 20 cm de profondeur vont dans le sens d'une diminution plus précoce et plus rapide de cette ressource dans les peuplements les plus denses, confirmant ainsi des études précédentes.

Au niveau de la biodiversité, comme attendu, il existe une très forte variabilité des compartiments biotiques entre sites, soulignant comme dans d'autres études, la forte importance du contexte pédoclimatique et historique dans les résultats. Cependant, il est toutefois possible d'en extraire quelques patterns généraux. Ainsi la richesse spécifique en plantes terricoles vasculaires augmente de façon logarithmique avec la disponibilité en lumière, diminue quand l'âge des peuplements augmente et répond selon une courbe en cloche au taux de couverture des espèces interférentes. Ces résultats ne sont évidemment valides que pour la gamme de RDI et de lumière considérée dans ce projet, soit de 0,25 à 1 pour le RDI, ce qui correspond, compte tenu de la présence du sous-étage dans de nombreux peuplements à une variation de la lumière sous couvert de moins de 1% à 20% de lumière. Ce maxima de lumière de 20% est relativement faible comparé à d'autres études ou types de peuplements. Il explique sans doute que l'effet négatif des plantes interférentes sur la richesse spécifique floristique ainsi que sur la richesse générique en insectes (avec de la fougère notamment) ne s'amorce que dans un faible nombre de cas, pour les RDI les plus faibles (0,25, soit environ 20% de lumière sur notre dispositif). Cela mériterait donc une prospection complémentaire pour préciser le phénomène en chênaie. **Cependant il faudrait donc être prudent en termes de gestion pour des éclaircissements plus élevés (i.e. supérieurs à 20%), qui pourraient être atteints pour des peuplements plus denses en l'absence de sous-étage ligneux.**

L'exemple de la flore, mais aussi de la faune du sol, montrent des relations complexes, souvent non linéaires, en réponse à la densité du peuplement ou aux facteurs abiotiques. Ainsi la réponse de la flore à la lumière est logarithmique, sans doute linéaire avec l'âge du peuplement et quadratique (en cloche) en réponse aux espèces interférentes. Ce pattern en cloche est très souvent observé (cf. les résultats sur la faune du sol). Il correspond à un maximum (ou minimum) d'abondance ou de richesse qui n'est pas à l'une ou l'autre extrémité du gradient. Mais bien souvent ces maxima (ou minima) ne sont pas observés pour les mêmes valeurs de RDI ou de lumière, **i.e. l'optimum n'est pas le même en fonction des groupes considérés.**

**L'effet de l'herbivorie par les cervidés est peu probant probablement parce que le gradient d'herbivorie a été relativement réduit.** Les effets sur la présence des espèces (apparition ou disparition) interviennent en général dans un second temps, pour des pressions soutenues et persistantes, ce qui est peu probable dans le cadre de cette étude.

L'ensemble demeure donc complexe et un important travail reste donc à faire dans l'analyse des données. En particulier il reste à intégrer les relations obtenues dans le modèle RReShar afin de pouvoir tester différentes combinaisons de facteurs et ainsi différents scénarios sylvicoles au-delà de la gamme de situations explorées dans ce projet. La structure du modèle est prête à intégrer différents indicateurs de diversité en fonction des variables, soit de peuplement, soit des ressources (lumière et eau notamment). Par ailleurs, la base de données constituée pour ce projet offre un outil scientifique très riche, permettant d'élaborer et de valider des schémas fonctionnels complexes grâce au nombre important de variables (édaphiques, microclimatiques, dendrométriques, écologiques) contenues dans cette base. Là encore c'est un travail en cours et à poursuivre.

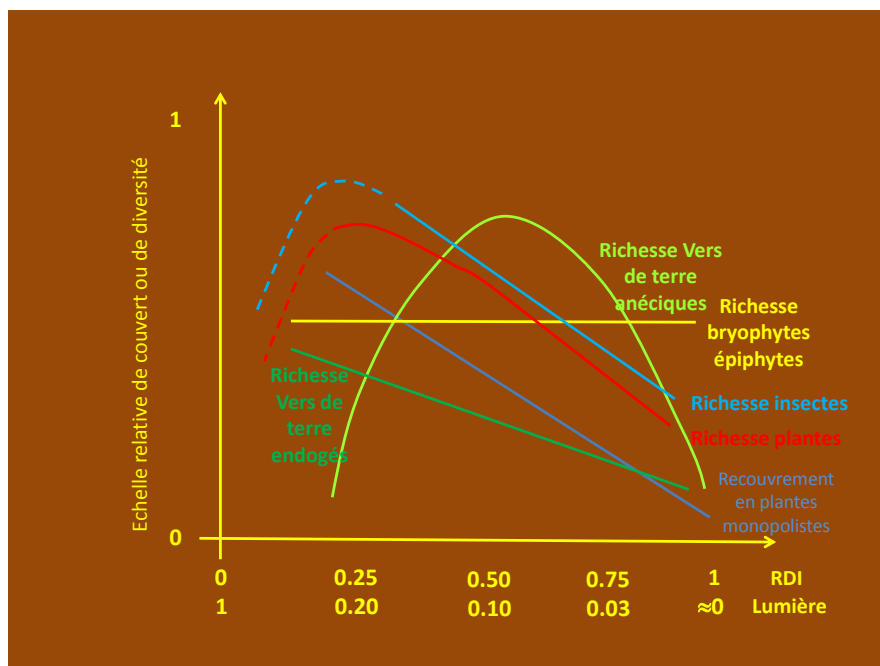


Schéma synthétique d'une partie des résultats obtenus correspondant à un site moyen au sein des réseaux étudiés (GIS coopérative de données et réseau chêne du LERFOB) qui bien sûr n'existe pas en réalité. En particulier les optima obtenus peuvent se décaler à droite ou à gauche selon les sites (leur pédoclimat), voire montrer des patterns opposés (cf. résultats sur la faune du sol) en fonction des groupes fonctionnels considérés. Il peut néanmoins servir de réflexion pour l'élaboration d'itinéraires sylvicoles privilégiant tel ou tel compartiment de diversité. Il montre clairement qu'il n'existe pas de densité universelle de peuplement (de taux de lumière) qui favoriserait l'ensemble des guildes. La réflexion doit donc déboucher sur d'inévitables compromis.

### Recommandations pour la gestion

**La diminution attendue, ou souhaitée, de la densité des peuplements forestiers gérés, qui n'atteindra probablement pas les valeurs les plus basses considérées dans ce projet (RDI 0,25), ne devrait pas, selon nos résultats, entraîner de modifications radicales de l'écosystème forestier, en tout cas en ce qui concerne les assemblages biotiques.** Cependant nous avons souligné la faible variation de l'éclairement mesuré en sous-bois dans cette étude, de 1 à 20% environ, pour une gamme de RDI beaucoup plus étendue, de 0,25 à 1. Cela résulte en grande partie de la présence d'un sous-étage ligneux plus ou moins abondant et développé dans beaucoup des placettes échantillonnées. Dès lors, la diminution de la densité des arbres du peuplement est souvent compensée par le développement du sous-étage ligneux, qui limite assez fortement la disponibilité des ressources, sans que ce sous-étage ne soit pris en compte dans les caractéristiques des placettes. Nous avons souligné que in fine **la perturbation associée à la coupe des arbres est sans doute assez fortement tamponnée par le sous-étage (en tout cas dans cette étude), ce qui expliquerait peut-être en partie la faible réponse d'un certain nombre de compartiments de diversité au RDI** (dont le calcul ne tient pas compte du sous-étage) ou d'autres indices d'abondance.

Nos résultats ne sont donc pas transposables, en l'état, à des écosystèmes qui ne présenteraient pas ce développement du sous-étage ligneux et qui, pour des RDI semblables, auraient un éclairage au sol beaucoup plus important. Dans notre étude nous avons souligné à maintes reprises l'impact négatif des plantes interférentes sur la richesse en plantes d'une manière générale mais aussi sur la richesse de certaines guildes d'insectes et probablement de la faune du sol. **Dans notre étude, l'influence néfaste de ces plantes interférentes n'est enregistrée qu'à partir de 60 à 80% de couvert de ces interférentes, soit dans de rares cas à RDI proches de 0,25. Mais de tels couverts de plantes interférentes pourraient très bien être observés pour des densités d'arbres du peuplement plus élevés en l'absence de sous-étage ligneux.** Une solution consisterait donc à prendre en compte ce sous-étage ligneux dans le calcul du RDI. C'est ce que nous avons commencé à explorer.

La figure ci-dessus donne une synthèse réduite de certains résultats les plus probants **qui correspondraient à un site moyen** au sein des réseaux étudiés (GIS coopérative de données et réseau chêne du LERFOB) mais qui bien sûr n'existe pas en réalité. Cette figure montre cependant clairement que **le régime d'éclaircie n'a pas un effet univoque** de type « la diversité augmente avec l'ouverture du peuplement ». Les patterns sont beaucoup plus complexes comme nous l'avons montré ci-dessus. En particulier, **de ce schéma général moyen, les optima obtenus peuvent se décaler à droite ou à gauche selon les sites, leur pédoclimat, voire montrer des patterns opposés (cf. résultats sur la faune du sol) en fonction des groupes fonctionnels considérés**. Il peut néanmoins servir de réflexion pour l'élaboration d'itinéraires sylvicoles privilégiant tel ou tel compartiment de diversité. Il montre clairement **qu'il n'existe pas de densité universelle de peuplement (de taux de lumière) qui favoriserait l'ensemble des guildes**. La réflexion doit donc déboucher sur d'inévitables compromis.

Nos travaux ont essentiellement porté sur l'abondance et la richesse de différentes guildes et montrent que globalement leur assemblage ne devrait pas trop être perturbé par les diminutions de densité envisagées. Mais cela ne présume pas de perturbations plus fonctionnelles. Par exemple **les résultats montrent une diminution de la qualité de la litière avec l'ouverture du peuplement**. Une forte richesse spécifique peut être synonyme de redondance fonctionnelle. Nous n'en sommes qu'au début des analyses sur ces questions et en attente de résultats plus probants, nous recommandons donc dans l'immédiat de ne diminuer la densité des peuplements que dans des proportions raisonnables (i.e. sans doute dans la gamme testée dans ce projet avec présence de sous-étage, probablement pour des densités plus élevées dans d'autres cas sans sous-étage).

**Le projet Imprebio a porté sur les premières parties du cycle sylvogénétique (stade tronqué ne comportant que les phases d'initiation et d'exclusion) et pas sur les phases de vieillissement avancé (phases comprenant des ouvertures dans le peuplement)**. Les conclusions ne peuvent donc pas être transposées à ce cas. La phase de régénération n'a pas été étudiée dans ce projet. Elle consiste souvent à un éclaircissement beaucoup plus fort à un âge avancé qui engendre probablement des perturbations intermédiaires beaucoup plus fortes que celles étudiées dans ce projet. Elles devront faire l'objet d'observations spécifiques.

## Partenariats mis en place

### - Projets CoopEco et OBUP

Le démarrage du projet Imprebio a coïncidé avec le lancement d'une réflexion au sein du GIS « Coopérative de données sur la croissance des peuplements forestiers » sur la caractérisation écologique des dispositifs expérimentaux du GIS. Dans la continuité du travail engagé dans Imprebio, deux projets portés par le GIS ont démarré :

- le premier en 2012 : projet « CoopEco » sur l'adaptation de la sylviculture au changement climatique et cofinancé par le MAAAF et l'ONF. Le protocole de caractérisation écologique des dispositifs du GIS défini dans le cadre de ce projet constitue une adaptation et une généralisation à l'ensemble des réseaux du GIS du protocole d'inventaire floristique défini pour le projet Imprebio.
- le second en 2013 : projet OBUP sur l'optimisation des méthodes de bioindication par les plantes de la qualité des sites forestiers et financé par le Labex ARBRE. Grâce au protocole flore mis en place dans Imprebio puis CoopEco, ce projet propose de tester l'effet de la pression d'échantillonnage, à l'échelle d'une unité expérimentale, sur la qualité de la bio indication, en termes d'estimation de la moyenne et de la variabilité spatiale.

Outre les apports méthodologiques, ces deux projets ont bénéficié d'un apport important de données (inventaires floristiques) du projet Imprebio qui ont contribué à l'alimentation de la base de données partagée du GIS et qui sont valorisées par le projet OBUP. A l'inverse, le projet Imprebio a pu bénéficier de données collectées dans le cadre du projet CoopEco : analyses de sol, descriptions des humus, des sondages tarière et des fosses pédologiques qui ont été chargées dans la base de données Imprebio.

## Liste des opérations de valorisation et de transfert issues du contrat (articles de valorisation, participations à des colloques, enseignement et formation, communication, expertises...)

### PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

Publications scientifiques parues et à paraître

- Aucune

Publications scientifiques en préparation

- Balandier P., Collet C., Perret S. et al., 2014. Light variability in the understorey of temperate broadleaved forests.
- Balandier P., Donès N., De Coligny F., 2014. RReShar: a functional –structural stand model to simulate forest dynamics according to resources availability.
- Balandier P., Perret S., Seigner V. et al., 2014. Microclimate and resources relative to thinning intensity in temperate broadleaved forest.
- Henneron L., Aubert M., Bureau F., Richter C., Boulanger V., Ningre F., Perret S., Balandier P., Chauvat M. Effects of forest stand density management on soil detritivore macro-invertebrate assemblages. *Forest Ecology and Management*.
- Henneron L., Aubert M., Bureau F., Richter C., Boulanger V., Ningre F., Perret S., Balandier P., Chauvat M. Response of collembolan assemblages to forest stand density management – A large-scale assessment across a stand age gradient of sessile oak forests. *Journal of Applied Ecology*.
- Dumas Y., Balandier P., Archaux F., et al. Functional response of ground flora to experimentally-controlled stand density.
- Dumas Y., Balandier P., Archaux F., et al. Microclimatic drivers of plant diversity in managed forests.
- Dumas Y., Balandier P., Archaux F., et al. Abiotic and biotic drivers of epiphytic bryophytes.
- Archaux F., Dumas Y., Henneron L., Bouget C., Aubert M., Chauvat M., Balandier P., et al. Cascading effects of stand thinning on soil and ground biodiversity assessed through Confirmatory Path Analysis.

### COLLOQUES

Participations passées à des colloques

- Balandier P., Donès N., Le Texier E., De Coligny F., 2013. RReShar: a functional –structural forest model to simulate tree regeneration according to resources. ISEM 2013, Ecological Modelling for Ecosystem Sustainability. Toulouse, France, 2013/10/28-31.
- Henneron L. (2013). Impact de la densité des peuplements forestiers sur la biodiversité et le fonctionnement de l'interface sol-végétation : Présentation du sujet de thèse. Atelier REGEFOR 2013 : La gestion de la fertilité des sols forestiers est-elle à un tournant ? juin 2013, Centre INRA de Nancy, Champenoux (Comm. Orale).
- Henneron L., Chauvat M., Bureau F., Gattin I., Aubert M. (2013). Impact de la densité des peuplements forestiers sur la biodiversité et le fonctionnement de l'interface sol-végétation. Séminaire annuel 2013 GRR SER, février 2013, Rouen. (Comm. Orale)
- Henneron L., Chauvat M., Bureau F., Akpa-Vinceslas M., Balandier P., Gattin I., Aubert M. (2013). Tree effect on soil biodiversity and forest floor dynamic - Response to long-term forest canopy cover manipulation. Aboveground Belowground Interactions Session, 11th INTECOL Congress, Ecology: Into the next 100 years, août 2013, Londres. (Comm. Affichée).
- Henneron L., Chauvat M., Bureau F., Akpa-Vinceslas M., Balandier P., Gattin I., Aubert M. (2013). Forest stand density management – Long-term impact on soil biota and forest floor dynamic. Forest Ecology Session, 11th INTECOL Congress, Ecology: Into the next 100 years, août 2013, Londres. (Comm. Affichée).
- Henneron L., Chauvat M., Bureau F., Aubert M. (2012). Forest stand density effect on soil-plant interface biodiversity and functioning: First results on humus forms and mesofauna under young stands. Journée de l'Ecole doctorale Normande de Biologie Intégrative, Santé et Environnement, mars 2012, Rouen. (Comm. Affichée).

## Participations futures à des colloques

- Balandier P. 8th International Forest Vegetation Management Conference, Halmstad, Suède, 25-28 août 2014.
- Balandier et al., 2014. Impact de la densité des peuplements forestiers sur la biodiversité – principaux enseignements du projet Imprebio (2014). Colloque-Atelier « les 20 ans du GIS coopérative des données sur la croissance des peuplements forestiers », Paris (plusieurs communications orales, plusieurs intervenants).
- Henneron et al., 2014. Réponse des assemblages de collemboles à la manipulation expérimentale de la densité des arbres le long d'un gradient d'âge de peuplements de chêne sessile. Journée d'Etude des Sols.
- Henneron et al., 2014. Regional-scale response of earthworm assemblages to forest tree density experimental manipulation across a stand age gradient of sessile oak forests. ISEE10.

**THESES**

## Thèses en cours

- Ludovic Henneron (2011 →). Impact de la densité des peuplements forestiers sur la biodiversité et le fonctionnement de l'épisolum humifère. LEcodiv EA-1293, Université de Rouen, Ecole doctorale EdN BISE-497 ; Allocation Région Haute-Normandie via le GRR-SER (Science de l'Environnement et Risques).

## Thèses prévues

- Aucune

## Master 2

- Govindoorazoo Morghan (2013). Effets de la densité du peuplement et de la pression exercée par les grands herbivores sur le développement de la strate arbustive en chênaie. M2 Ingénierie Biologique pour l'Environnement, Université Paris-Est Créteil.
- Abou-Ghantous Jad (2013). Application de modèles SEM bayésiens à l'étude et la modélisation fonctionnelle de la réponse de la flore du sous-bois à l'intensité des prélèvements de bois. M2 Ingénierie mathématique, Université Descartes, Paris V, France.
- Le Texier E. (2013). Modélisation structure – fonction du partage des ressources dans l'écosystème forestier – Modèle RReShar. Master 2 Ecologie, parcours Modélisation des Systèmes Ecologiques, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 31 p. + ann.

## Master 1

- Bouvet Charline (2013). Etude de l'impact de la densité des peuplements forestiers sur les microorganismes du sol sous futaies régulières de Chênes sessiles sur la moitié Nord de la France. Stage de M1 Gestion des Habitats et des Bassins Versants (Univ. Rennes 1)
- Dornadic Alexandra (2013). Impact de la densité du peuplement forestier sur la mésofaune du sol. Stage de M1 Biologie de l'Environnement (Univ Nantes).
- Mezerette Florian (2013). La densité des peuplements forestiers influence-t-elle la biodiversité en sous-bois ? Cas de la macrofaune du sol en futaies régulières de chênes de la moitié nord de la France. Stage de M1 Patrimoine Naturel et Biodiversité (Univ. Rennes 1)
- Museur Sylvain (2012). Etude de l'impact de la densité des peuplements forestiers sur la mésofaune du sol. Stage de M1 Ecologie et Biologie des Populations (Univ. Poitiers).
- Palie Willem (2014). Simulations avec RReShar. Stage de M1 (Univ. Clermont-Ferrand)
- Viratel David (2012). Impact de la densité des peuplements forestiers sur l'activité et la diversité fonctionnelle des microorganismes du sol. Stage de M1 Sciences de l'Environnement (Univ. Dijon).

## Licence 3

- Maillard Donovan (2012). Etude de l'impact de la densité des peuplements forestiers sur la macrofaune du sol. Stage de L3 Biologie des Organismes (Univ. Rouen).



**ARTICLES DE VALORISATION-VULGARISATION**

Articles de valorisation parus et à paraître

- Henneron L., Chauvat M., Bureau F., Akpa-Vinceslas M., Richter C., Boulanger V., Ningre F., Perret S., Balandier P., Aubert M. (sous presse). Impact de la densité des peuplements forestiers sur la biodiversité et le fonctionnement de l'interface sol-végétation. Acte de l'Atelier REGEFOR 2013 : La gestion de la fertilité des sols forestiers est-elle à un tournant ?. Revue Forestière Française.

Articles de valorisation prévus

- Collectif Imprebio. Impact du régime d'éclaircie en peuplement régulier de chêne sur la biodiversité forestière. Rendez-Vous Techniques ou Revue Forestière Française.

**AUTRES ACTIONS VERS LES MEDIAS**

Actions vers les médias (interviews...) effectuées / prévues

- Aucune

**ENSEIGNEMENT – FORMATION**

Enseignements/formations dispensés / prévus

- Aucun

**EXPERTISES**

Expertises menées en cours prévues

- Aucune

**METHODOLOGIES (GUIDES...)**

Méthodologies produites et en cours d'élaboration

- Aucune

**AUTRES**

Site Web du projet : <http://www1.clermont.inra.fr/imprebio/index.htm>