

PASSIFOR-2

Proposition d'Amélioration du Système de Suivi de la biodiversité FORestière

Phase 2 du Projet, 2019-2022

Rapport Final – Décembre 2022

Convention n°2102764575

Entre le Ministère de la Transition écologique et de la cohésion des territoires (MTECT)
et le Groupement d'intérêt public « Écosystème forestiers » (GIP Ecofor)

Coordinateurs : Julie Dorioz (Gip Ecofor) et Frédéric Gosselin (INRAE)

Rédacteurs : Christophe Bouget (INRAE), Aristide Chauveau (INRAE), Julie Dorioz (Gip Ecofor), Frédéric Gosselin (INRAE), Marion Gosselin (INRAE), Hervé Jactel (INRAE), Guy Landmann (Gip Ecofor), Hélène Le Borgne (INRAE), Antoine Lévêque (PatriNat).

Citation conseillée :

Dorioz J., Gosselin F. (coord.), 2022. PASSIFOR-2 – Propositions d’Amélioration du Système de Suivi de la biodiversité FORestière, 2ème phase du projet. Paris : Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires – GIP Ecofor, Rapport final, xx p.

Remerciements :

- **Au Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires**, pour le soutien financier
- **Aux membres du Comité d'orientation** : Marianne Bernard, Olivier Giraud, Claire de Kermadec, Antoine Lévêque, Nicolas Picard, Flore Sancey, François Hissel
- **Aux contributeurs** : Julie Dorioz, Aristide Chauveau, Hélène Le Borgne, Christophe Bouget, Frédéric Gosselin, Marion Gosselin, Antoine Lévêque, Hervé Jactel, Romain Julliard, Guy Landmann, Lise Maciejewski, Yann Dumas, Frédéric Archaux, Isabelle Bilger, Fabien Laroche, Guillaume Body, Bastien Castagneyrol, Vincent Banos, Philippe Deuffic, Arnaud Sergent, Elodie Brahic, Jean-Luc Dupouey, Christophe Chauvin, Sylvie Durrieu, Marc Fuhr, Jean-Mathieu Monnet, Hilaire Martin, Kevin Darras, Lucie Vincenot
- **Aux stagiaires du projet** : Marie Cluzel, Pierre Bouchet, Kreshnike Maloku, Noudéhouéou Houessou, Lucia Moboula, Ndongo Seye et El Hadji Cissé Faye
- A Hervé Jactel pour sa formation aux principes de la MCDA et à la méthode ©Prométhée
- **Aux partenaires du projet** :
 - Les participants à l'atelier de pondération, les experts naturalistes/taxinomistes ayant contribué à la construction du tableau de la biodiversité forestière et/ou ayant renseigné les grilles pour leur spécialité, y compris pour l'évaluation de l'effet opérateur, les relecteurs des fiches sur les nouvelles technologies :
 - A. Lévêque, B. Kaufmann, C. Galkowski, C. Baltzinger, C. Baudran, C. Dussaix, C. Lemoine, C. Pelosi, C. Quindroit, C. Villemant, D. Argot, E. Delfosse, E. Iorio, F. Archaux, F. Noël, G. Corriol, G. Parmain, J. Cortet, J. Pétilion, C. Jacquet, J. Trap, J.C. Streito, J.-J. Geoffroy, J.-L. Pratz, J.-C. de Massary, J.-Y. Rasplus, L. Barbaro, L. Tillon, M. Brulin, M. Gosselin, M. Meyer, M. Roy, M.-S. Tixier, S. Kreiter, N. Van Vooren, O. Gargominy, P. Jay-Robert, P. Tillier, P.-A. Moreau, R. Chevalier, R. Poncet, S. Cadet, S. Gadoum, S. Hamlaoui, C. Bernard, T. Decaëns, M. Hedde, T. Noblecourt, W. de Smet, Y. Braet, O. Bardet, E. Langlois, P. Denis, J. Cordier, F. Gillet, J.-Y. Barnagaud, B. Castagneyrol, E. Corcket, G. Decocq, J.-L. Dupouey, B. Frochot, R. Julliard, A. Lalanne, J. Lenoir, J.-P. Siblet, L. Larrieu, F. Gosselin, M. Bernard, B. Benet, L. Sire, J. Orensanz, R. Rougerie, G. Gigot, P. Dupont, S. Wroza, G. Delvare, J.-P. Sarthou, L. Péru, P. Noël, Y. Dumas.
 - Les responsables de dispositifs de suivi, experts et scientifiques qui nous ont renseigné et aidés pour l'élaboration des maquettes :
 - F. Benest, S. Wurpillot, F. Morneau, M. Nicolas, C. Jolivet, C. Imbert, J. Tomasini, G. Body, F. Chantreau, E. Cateau, B. Fontaine, Y. Bas, C. Fontaine, G. Loïs, A. Barboiron, K. Le Rest, J. Dupuy, H. Pontalier, L. Couzi, L. Tillon, F. Delpont, M. Goudet, E. Porcher, L. Larrieu, P. Gonin, L. Saint-André, C. Meredieu, I. Bonhême, M. Dalmaso, Y. Dumas, J.-L. Dupouey, A. Mârell, M. Gosselin, F. Gosselin, L. Maciejewski, A. Chauveau, M. Roy, M. Buée, L. Vincenot, P.-A. Moreau, G. Gruhn, M. Nicolas, X. Cucherat, S. Delhaye, S. Leblond, S. Wroza, K. Darras, F. Archaux, A. Charennat.
- **Aux participants aux webinaires** du projet des 1^{er} décembre 2020, 1^{er} février 2021 et 17 novembre 2022

- **Au Programme de Surveillance de la biodiversité terrestre (OFB/PatriNat)** pour le travail commun et la coordination de nos efforts

Proposition d'Amélioration du Système de Suivi de la biodiversité FORestière

Phase 2 du projet, 2019-2022

Le rapport du projet PASSIFOR-2 comporte trois parties :

- | | |
|-------------|--|
| Partie I. | Rapport de synthèse du projet |
| Partie II. | Principaux travaux scientifiques et techniques |
| Partie III. | Les Annexes du rapport (en ligne) |

Le projet a fait l'objet de trois conventions de recherche :

- Convention n°2020.01 entre Ecofor et INRAe, Unité de recherche Écosystèmes Forestiers de Nogent-sur-Vernisson (UR EFNO)
- Convention n°2019.19 entre Ecofor et INRAe, Unité mixte de recherche Biodiversité, Gènes et Communautés (UMR BIOGECO)
- Convention n°2019.18 entre Ecofor et le Muséum national d'histoire naturelle (MNHN)

Sommaire

Partie I. – Rapport de synthèse du projet

- I- Introduction
- I- Chap. 1 : Contexte général, objectifs, organisation
- I- Chap. 2 : L'élaboration de « maquettes de suivi » de la biodiversité en forêt
- I- Chap. 3 : Principes de gouvernance des systèmes de suivi
- I- Chap. 4 : Composantes de la biodiversité en forêt suivies
- I- Chap. 5 : Variables écologiques et dendrologiques
- I- Chap. 6 : Mesures, échantillonnage, analyses statistiques
- I- Chap. 7 : Conclusion et perspectives

Partie II. - Principaux travaux scientifiques et techniques

- II-A Protocole d'élaboration des maquettes de suivi de la biodiversité en forêt
- II-B Les Grilles d'analyse des objectifs de suivi 1, 2, 3, 4
- II-C Proposition de plan d'échantillonnage multi-taxons pour l'objectif 1
- II-D Objectif 1 – Sous-maquette Ecosystèmes
- II-D Objectif 1 – Protocole de relevés Ecosystèmes
- II-E Objectif 1 – Sous-maquette Arbres
- II-E Objectif 1 – Protocole de relevés Abondance des arbres
- II-F Objectif 1 – Sous-maquette Flore vasculaire (hors arbres)
- II-F Objectif 1 – Protocole de relevés Flore vasculaire (hors arbres)
- II-G Objectif 1 – Sous-maquette Bryophytes
- II-G Objectif 1 – Protocole de relevés Bryophytes
- II-H Objectif 1 – Sous-maquette Chiroptères
- II-H Objectif 1 – Protocole de relevés Chiroptères
- II- i Objectif 1 – Sous-maquette Oiseaux
- II- i Objectif 1 – Protocole de relevés Oiseaux
- II-J Objectif 1 – Sous-maquette Gastéropodes
- II-J Objectif 1 – Protocole de relevés Gastéropodes
- II-K Objectif 1 – Sous-maquette Champignons ectomycorhiziens
- II-K Objectif 1 – Protocole de relevés Champignons ectomycorhiziens
- II-L Proposition de maquette pour le suivi de l'état et l'évolution de [composantes] de la biodiversité en forêt (objectif 1)
- II-M Synthèse bibliographique sur la gouvernance des systèmes de suivi environnementaux (principes)
- II-N Note sur le système de suivi de l'environnement en Suisse
- II-N Note sur le système de suivi en Suède
- II-N Note sur le projet de suivi de la biodiversité en Nouvelle-Zélande

- II-O Synthèse bibliographique : Suivis de biodiversité par la reconnaissance automatique des espèces à partir des sons
- II-P Synthèse bibliographique : suivis de biodiversité par la reconnaissance automatique des espèces sur photographie
- II-Q Synthèse bibliographique : suivi de biodiversité par la reconnaissance des espèces basée sur l'ADN
- II-R Notice explicative – fiches « Pratiques de gestion »
- II-S Fiches de suivi des pratiques de gestion – Rubriques 1, 2, 4
- II-S Application aux coupes
- II-T Méta-analyse de l'effet de la diversité des essences forestières sur la biodiversité

Partie III. – Annexes (disponibles en ligne)

- III-A [Cycle de webinaires : comptes-rendus](#)
- III-B [Analyse de l'existant : Grilles d'Analyse des Dispositifs de suivi](#)
- III-C [Matrices d'analyse des dispositifs par rapport aux attendus de l'objectif 1](#)
- III-D [Tableau récapitulatif des principaux suivis déployés à l'étranger](#)
- III-E [Annexes du rapport sur l'Analyse de Décision Multicritères pour la sélection de groupes taxonomiques candidats à divers suivis de biodiversité en forêt tempérée](#)
- III-F [Analyse des objectifs et pratiques de gestion mises en avant dans les Programme Régionaux de la Forêt et du Bois \(PRFB\)](#)
- III-G [Matrice d'évaluation des liens entre Pratiques de gestion forestière et Variables dendro-écologiques \(VDE\)](#)
- III-H [Tableau commenté des liens entre variables de gestion, biodiversité et pratiques à enjeu identifiées dans les PRFB](#)
- III-I [Politiques publiques et impacts sur la gestion forestière](#)
- III-J [Rapport du stage de Lucia Toly Moboula \(2022\) : Télédétection des mélanges des essences forestières – synthèse bibliographique.](#)
- III-K [Rapport de Stage de Pierre Bouchet \(2020, Master 2 Mathématiques Appliquées – Statistiques de l'Université d'Orléans\) : Proposition d'une approche pour vérifier la cohérence entre données opportunistes et données protocolées pour mieux estimer l'état et la dynamique de la biodiversité](#)
- III-L [Rapport de Stage de Kreshnike Maloku \(2021, Master Mathématiques, Données et Apprentissage de l'Université de Paris\) : Optimisation des suivis de biodiversité en présence d'erreurs de détection.](#)
- III-M [Rapport de Stage de Noudéhouéno Houessou \(2021, Master 2 Méthodes stochastiques et informatiques décisionnelles de l'Université de Pau\) : Optimisation de l'effort d'échantillonnage dans le temps et dans l'espace.](#)
- III-N [Rapport de stage de El Hadji Cisse Faye \(2022, Master 2 Mathématiques Appliquées – Statistiques de l'Université d'Orléans\) : Mélange de placettes temporaires et permanentes pour le suivi de la biodiversité : approche statistique par simulation.](#)

III-O [Rapport de stage de Ndongo Seye \(2022, Master 2 Mathématiques et applications de l'Université de Strasbourg\) : développement d'indicateurs de tendances temporelles de la flore forestière de la France à l'échelle métropolitaine](#)

Proposition d'Amélioration du Système de Suivi de la biodiversité FORestière

Phase 2 du projet, 2019-2022

Partie I. Rapport de synthèse du projet PASSIFOR-2

Table des matières – Partie I.

| | |
|--|----|
| Introduction..... | 13 |
| Références :..... | 15 |
| Chap. 1 : Contexte général, objectifs, organisation | 16 |
| 1.1 Aux origines de « PASSIFOR »..... | 16 |
| 1.2 Les trois temps de PASSIFOR..... | 18 |
| 1.3 Objectifs et tâches du projet..... | 19 |
| 1.4 La gouvernance du projet..... | 21 |
| Références :..... | 24 |
| Chap. 2 : L'élaboration de « maquettes de suivi » de la biodiversité en forêt | 25 |
| Chap. 3 – Principes de gouvernance des systèmes de suivi..... | 37 |
| Résumé..... | 37 |
| 3.1 Contexte et problématique | 39 |
| 3.2 Méthodes | 40 |
| 3.2.1 Etude de la littérature scientifique et d'exemples spécifiques déployés à l'étranger | 40 |
| 3.2.2 Etude des dispositifs de suivi nationaux « candidats » aux maquettes sous l'angle de la gouvernance..... | 42 |
| 3.3 Principaux résultats | 46 |
| 3.3.1 Principes de gouvernance des systèmes de suivi..... | 46 |
| 3.3.2 Etudes de deux cas particuliers à l'étranger (Suède, Suisse) | 48 |
| 3.2 Conclusions et perspectives | 49 |
| Chap. 4 : Composantes de la biodiversité en forêt suivies | 50 |
| Résumé..... | 50 |
| 4.1 Tableau de la biodiversité forestière en France métropolitaine..... | 52 |
| 4.1.1 Contexte et objectifs | 52 |
| 4.1.2 Méthode de décompte des espèces forestières par groupe taxonomique..... | 53 |
| 4.1.3 Résultats : tableaux de la biodiversité en forêt en France métropolitaine..... | 55 |
| 4.2 Analyse de Décision Multicritères pour la sélection de groupes taxonomiques candidats à divers suivis de biodiversité en forêt tempérée..... | 57 |
| 4.2.1 Objectif | 57 |
| 4.2.2 Méthodologie | 57 |
| 4.2.3 Résultats bruts de l'analyse..... | 61 |
| 4.2.4 Analyse multicritères séquentielle | 68 |

| | |
|--|-----|
| 4.2.5 Analyses complémentaires..... | 70 |
| 4.2.6 Perspectives..... | 74 |
| 4.3 Synthèses sur les nouvelles technologies au service de l'échantillonnage et de l'identification des espèces | 76 |
| Références..... | 77 |
| Chap. 5 : Variables écologiques et dendrologiques | 79 |
| Résumé..... | 79 |
| 5.1 Contexte et problématique | 80 |
| 5.2 Méthodes | 81 |
| 5.2.1 Effet des politiques publiques sur les pratiques forestières | 81 |
| 5.2.2 Travail bibliographique..... | 81 |
| 5.2.3 Choix des pratiques forestières d'intérêt dans le cadre d'un suivi de biodiversité en forêt | 83 |
| 5.2.4 Choix des variables à suivre..... | 84 |
| 5.2.5 Identification des VG et VDE indicatrices de la mise en œuvre des pratiques ou des changements de pratiques..... | 85 |
| 5.2.6 Formulation des attendus | 85 |
| 5.2.7 Analyse des attendus et de l'existant relatifs aux VG et VDE, pour la production des camemberts par dispositif, et proposition de protocole d'acquisition des variables..... | 86 |
| 5.2.8 Réalisation des fiches « pratiques de gestion » | 86 |
| 5.3 Principaux résultats | 88 |
| 5.3.1 Politiques publiques susceptibles d'impacter les pratiques forestières | 88 |
| 5.3.2 Pratiques les plus impactées par les politiques publiques (principales conclusions de l'analyse des PRFB)..... | 90 |
| 5.3.3 Travail bibliographique..... | 90 |
| 5.3.4 Choix des pratiques à suivre dans le cadre des objectifs 2 et 3 | 93 |
| 5.3.5 Choix des VG et VDE à suivre, par pratique..... | 94 |
| 5.3.6 Fiches « Pratiques de gestion » | 94 |
| 5.4 Conclusions et perspectives | 97 |
| Références..... | 98 |
| Chap. 6 : Mesures, échantillonnage, analyses statistiques..... | 99 |
| Résumé..... | 99 |
| 6.1 Contexte et problématique | 100 |
| 6.2 Méthodes | 101 |
| 6.3 Principaux résultats | 105 |

| | |
|--|-----|
| 6.3.1 Fusion de données « protocolées » et opportunistes..... | 105 |
| 6.3.2 Estimer la détectabilité des espèces pour bien estimer la tendance temporelle : pas important quand la probabilité de détection est constante..... | 106 |
| 6.3.3 Plans d'échantillonnage : vers un mélange de placettes permanentes et temporaires.... | 106 |
| 6.3.4 Analyse des tendances temporelles en présence d'autocorrélation spatiale : importance de prendre en compte ces autocorrélations à tous les étages du modèle statistique..... | 112 |
| 6.4 Conclusion et perspectives..... | 114 |
| Références bibliographiques..... | 115 |
| Chap. 7 : Conclusion et perspectives..... | 116 |
| 7.1 Principaux apports et difficultés du projet..... | 116 |
| 7.2 Perspectives du projet..... | 117 |

Introduction

Malgré les efforts déployés à différentes échelles, l'érosion de la biodiversité et la dégradation des écosystèmes se poursuivent à un rythme alarmant. Cette situation est largement documentée, notamment par les rapports d'évaluation de la plateforme intergouvernementale sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES) qui montrent un effondrement de la biodiversité à l'échelle mondiale, dans tous les types de milieux - la forêt tempérée n'étant pas épargnée¹. A l'échelle européenne, les stratégies en faveur de la biodiversité se succèdent sans réussir jusqu'à présent à enrayer la perte de biodiversité (European Commission, 2022). La nouvelle stratégie de l'UE en faveur de la biodiversité à l'horizon 2030 insiste sur la nécessité d'intensifier les efforts pour lutter contre les facteurs directs et indirects de perte de la biodiversité, et fixe des objectifs volontaires visant à protéger la nature au sein de l'UE. En complément de ceux-ci et face à l'ampleur des enjeux, des objectifs juridiquement contraignants pour l'UE et ses états membres sont en cours d'élaboration dans le cadre d'un futur règlement européen relatif à la restauration de la nature. Ce règlement ouvre la voie à la mise en place d'un panel d'actions visant la restauration et la préservation de la biodiversité, avec une obligation de résultats pour les Etats membres, à mesurer et évaluer par des dispositifs de suivi déployés sur le terrain.

Au niveau des forêts métropolitaines, les dépérissements liés aux attaques d'insectes, aux sécheresses à répétition et incendies, ainsi que la hausse des prélèvements de bois souhaitée par les pouvoirs publics dans le cadre de la transition énergétique laissent présager une augmentation des pressions sur la biodiversité en forêt. Ce contexte appelle à la vigilance, alors même que la biodiversité en forêt joue des rôles multiples et essentiels vis-à-vis de la société. Elle contribue au bon fonctionnement de l'écosystème forestier et à sa capacité d'adaptation aux changements climatiques (augmentation de la productivité, de la résilience, de la résistance aux maladies et ravageurs...) ainsi qu'à la fourniture de nombreux biens et services écosystémiques à la société (Dorioz *et al.*, 2018).

Si la ressource en bois fait l'objet d'un suivi régulier, les suivis existants ne permettent pas d'établir les évolutions de la biodiversité forestière et les relier aux pratiques sylvicoles (Gosselin et Dallari, 2007). Le besoin de suivi dans le temps de la biodiversité en forêt est donc fort : il s'agit d'abord de mettre en œuvre une « surveillance » - au sens de disposer d'une vision régulière et précise de l'état de la biodiversité des forêts à l'échelle du territoire national - et d'en rendre compte, en publiant des indicateurs intégrateurs au sein de l'Observatoire national de la biodiversité (ONB) ou dans le cadre des reportages européens (Directives « Oiseaux » et « Habitats », futur règlement sur la restauration de la nature). Il s'agit aussi, dans une visée opérationnelle, d'appréhender les facteurs explicatifs des tendances observées, de faire des liens entre pressions, états et réponses, afin de répondre aux questions que se pose la société sur les effets de la gestion forestière ou l'efficacité des politiques publiques, notamment celles de conservation de la biodiversité.

¹ Rapports régionaux d'évaluation de la biodiversité et des services écosystémiques publiés en mars 2018 pour l'Europe et l'Asie centrale, l'Asie et le Pacifique, l'Afrique et les Amériques.

La nécessité d'établir un suivi continu (monitoring) de la biodiversité est démontrée par les scientifiques (Yoccoz *et al.*, 2001) mais également reconnue par les acteurs de la filière forêt-bois comme un élément important de la gestion adaptative du milieu forestier, aux côtés d'approches expérimentales. L'idée de dessiner les modalités pratiques d'un outil national selon un ou plusieurs scénarios est à l'origine du programme PASSIFOR (pour « Propositions d'Amélioration du Système de Suivi de la biodiversité FORestière »).

Dans une première étape soutenue par le ministère de l'agriculture (2012-2015)², un état des lieux des réseaux de suivi existants à l'échelle métropolitaine a mis en évidence une base intéressante mais encore insuffisante pour appréhender l'état et la dynamique de la biodiversité des forêts métropolitaines, en lien avec la gestion forestière et les autres facteurs de changement qui s'exercent sur elle. Aucun ne peut, seul, faire le diagnostic attendu. Une réflexion a alors été initiée pour avancer dans la structuration d'un outil « multi-dispositifs ». Elle a montré l'ampleur des questions scientifiques, techniques et méthodologiques à explorer avant de débiter la phase de scénarisation à proprement parler, dans le cadre d'une seconde étape du programme dite « PASSIFOR-2 ».

Aussi, l'intégration et le renforcement ciblé de l'existant, en réponse à des objectifs de suivi précis, constitue le défi auquel a voulu répondre ce deuxième projet « PASSIFOR-2 » soutenu par le ministère chargé de l'écologie (2019-2022). Un tel système de suivi « multi-dispositifs » de la biodiversité forestière a vocation à s'insérer dans le réseau national de surveillance de la biodiversité terrestre prévu dans le Plan Biodiversité adopté le 4 juillet 2018 (Action 70), actuellement en cours de définition (Pilotage OFB/PatriNat).

² Rapport final du projet PASSIFOR : Landmann G., Gosselin F., (coord.), 2015

Références :

- Dorioz J., Peyron J.-L., Nivet C., 2018. Evaluation française des écosystèmes et services écosystémiques (EFESE) : les écosystèmes forestiers ; rapport technique. Commissariat général au développement durable (Ministère de la transition écologique et solidaire).
- Gosselin F., Dallari R., 2007. Des suivis "taxonomiques" de biodiversité en forêt. Pourquoi ? Quoi ? Comment ? - Nogent sur Vernisson, Cemagref, 119 p.
- Landmann G., Gosselin F., (coord.), 2015. PASSIFOR - Propositions d'Amélioration du Système de Suivi de la biodiversité FOREstièRe. Paris : Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt - GIP Ecofor, Rapport final, 101 p.
- European Commission, 2022. Support to the evaluation of the EU Biodiversity Strategy to 2020, and follow-up: Final evaluation report. European Commission – DG Environnement, Trinomics, 510 pages.
- Yoccoz N. G., Nichols J. D. et Boulinier T., 2001. Monitoring of biological diversity in space and time. Trends in Ecology and Evolution 16, pp 446-453.

Chap. 1 : Contexte général, objectifs, organisation

Auteurs du chapitre : Julie Dorioz (Gip Ecofor) et Frédéric Gosselin (INRAE)

1.1 Aux origines de « PASSIFOR »

L'acquis dans le domaine du suivi des forêts et de leur biodiversité est important.

- Depuis 30 ans, une forte coopération intergouvernementale européenne (« Forest Europe »³) est à l'œuvre, favorisant des exercices nationaux, européens et mondiaux (FAO) de rapportage sur la gestion forestière durable (Levrel *et al.*, 2007). Dans ce cadre, la France s'est engagée à renseigner les indicateurs de gestion durable (IGD) pour ses forêts métropolitaines. Le système d'indicateurs utilisé laisse une place importante à la biodiversité, puisque non seulement la biodiversité constitue un des six critères de gestion durable des forêts mais elle participe également à différents autres aspects de la gestion durable ;
- Aussi, le colloque de Montargis (organisé par Irstea, l'IGN et le Gip Ecofor en décembre 2011) visait à faire un bilan des processus de suivi ciblant la forêt, près de deux décennies après leur mise en place. De nombreuses communications ont alors été consacrées à la biodiversité forestière et à l'amélioration de son suivi à l'échelle nationale : l'articulation entre différents dispositifs a été envisagée dans ce cadre (par exemple : Gosselin *et al.*, 2012) ;
- Un corpus de connaissances sur les liens entre gestion forestière et biodiversité a été acquis dans le cadre du programme « Biodiversité, Gestion Forestière et Politiques publiques » (BGF) soutenu par les ministères de l'écologie et de l'agriculture de 1996 à 2018 (5 appels à propositions de recherche, 42 projets financés)⁴. Un ouvrage de synthèse des réflexions sur les indicateurs de biodiversité forestière a été publié dans ce cadre (Nivet *et al.*, 2012) ;
- Par ailleurs, il existe une diversité de dispositifs qui contribuent déjà au suivi de différentes composantes de la biodiversité des forêts métropolitaines. Un état des lieux réalisé en 2015 a mis en évidence dix réseaux nationaux, d'emprises taxonomiques variées (Paillet, 2017) ;
- Enfin, plusieurs processus mobilisent ces données et indicateurs au niveau national ou régional : le rapportage sur la gestion forestière durable (IGD) évoqué plus haut, le volet forestier de l'Observatoire national de la biodiversité et (ONB/OFB), le bilan patrimonial de l'ONF et les processus de certification forestière (PEFC, FSC).

³ Processus de rapportage sur les forêts européennes initié lors de la Conférence ministérielle pour la protection des forêts en Europe d'Helsinki (1993).

⁴ Picard N., Appora V., Landmann G., 2022. Programme de recherche « Biodiversité et gestion forestière » : bilan 1996-2018. GIP ECOFOR et Ministère de la transition écologique, Paris. 160 p. http://bgf.gip-ecofor.org/wp-content/uploads/2022/06/BGF_bilan1996-2018.pdf

En dépit des acquis importants dans le domaine, les indicateurs actuels de biodiversité en forêt sont surtout des indicateurs indirects, ciblés sur les habitats d'espèces et mobilisant principalement des données dendrométriques, de sorte qu'il manque des informations pour (i) mieux cerner directement l'état et la dynamique de la biodiversité et (ii) mieux évaluer le lien entre politiques publiques en forêt, pratiques de gestion et biodiversité. Ces indicateurs de « lien » sont probablement un des axes importants d'amélioration des indicateurs de biodiversité existants (Gosselin *et al.*, 2012, Pellissier *et al.*, 2013, Bockstaller *et al.*, 2013). De plus, le processus des indicateurs de gestion forestière durable manque d'une concertation et d'une explicitation des objectifs ou questions auxquelles il souhaite répondre (Levrel *et al.*, 2007, Brédif, 2008).

La demande initiale du Ministère de l'agriculture à la base de ce projet provient des suites des débats au colloque de Montargis (2011) et trouve son origine dans ce constat de difficultés persistantes pour apprécier l'état et l'évolution de la biodiversité en forêt ainsi que pour évaluer l'impact des politiques publiques.

Ultérieurement, en réponse aux attentes du Programme national de la forêt et du bois (PNFB) sur la nécessité de déployer un suivi continu de la biodiversité forestière⁵, la Plateforme biodiversité pour la forêt (PBF)⁶ s'est efforcée de soutenir le projet PASSIFOR. En ce sens elle a œuvré à (i) communiquer sur le paysage des initiatives existantes dans le domaine du suivi de la biodiversité, sur la façon dont celles-ci s'articulent et se complètent dans l'optique d'intégrer un système de suivi à l'échelle nationale (Dorioz *et al.*, 2019) et (ii) mobiliser les bailleurs et parties prenantes autour de cet enjeu, notamment via l'organisation d'un séminaire à Paris en décembre 2019. Ainsi, par son action et ses recommandations transmises aux Ministères chargés de la transition écologique et de l'agriculture, l'instance a contribué à lancer la deuxième phase du projet dite « PASSIFOR-2 ».

⁵ PNFB 2016-2026, p 28.

⁶ Instance nationale de concertation autour des enjeux de biodiversité en forêt, mise en place en 2012 par le Ministère de l'agriculture dans le cadre de la Stratégie Nationale de la Biodiversité (SNB) 2011-2020. Depuis 2017, la PBF fonctionne avec un soutien du Ministère de l'agriculture et du Ministère de la transition écologique et solidaire. Elle est co-animée par le GIP Ecofor et l'association France Nature Environnement (FNE).

1.2 Les trois temps de PASSIFOR

PASSIFOR-2 constitue la 2^{ème} phase d'un projet conçu en trois phases (Fig. 1) :

- La 1^{ère} phase du projet, PASSIFOR-1 (2012-2015)⁷: soutenue par le ministère de l'agriculture, elle a comporté trois volets : (1) un état des lieux des dispositifs de suivi forestier et/ou de la biodiversité en France métropolitaine, réalisé par Yoan Paillet (Irstea), (2) une étude de faisabilité d'un suivi quantitatif simplifié direct des coléoptères saproxyliques sur un réseau national de placettes forestières, menée par Christophe Bouget (Irstea), et (3) le montage d'un projet de recherche appliquée sur la façon de combiner au mieux les divers dispositifs de suivi de la biodiversité forestière (réseaux de placettes, données participatives,...), animé par Guy Landmann (Ecofor) et Frédéric Gosselin (Irstea) ; **ce troisième volet correspondant à la préfiguration du projet mis en œuvre sous le nom de PASSIFOR-2** ;
- La 2^{ème} étape du projet, PASSIFOR-2 (fin 2019-2022), soutenue par le ministère de l'écologie, constitue la **mise en œuvre du projet** formulé dans PASSIFOR-1. Il vise à élaborer différents assemblages de dispositifs et proposer des prolongements de l'existant, en réponse à des questions précises. L'objectif est de proposer différentes options pour un suivi continu de la biodiversité en forêt, au service des politiques publiques.
- **PASSIFOR-3** correspondra, si les conditions sont réunies, à la **mise en œuvre effective d'un « observatoire de la biodiversité en forêt »** à l'issue de PASSIFOR-2. Sa réalisation suppose une vision partagée des acteurs. Elle nécessitera probablement des études pilotes conduites par les organismes collecteurs de données.

⁷ Voir le rapport final de la première phase : Landmann G., Gosselin F. (coord.), 2015. PASSIFOR – Propositions d'Amélioration du Système de Suivi de la biodiversité FORestière. Paris : Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt – GIP Ecofor, Rapport final, 101 pages. Accessible en ligne : <http://www.gip-ecofor.org/?p=307>

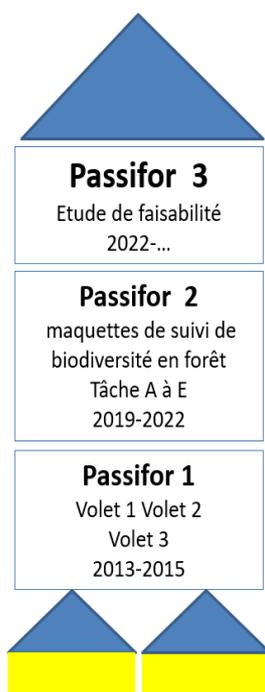


Fig. 1. Vision schématique des trois étages temporels du projet PASSIFOR

Source : Landmann et Gosselin, 2015.

1.3 Objectifs et tâches du projet

L'objet de ce projet est de proposer différentes options pour un système de suivi continu de la biodiversité en forêt à l'échelle de la France métropolitaine. Ces options sont élaborées en réponse à des questions ou objectifs de suivi précis. Elles sont conçues d'assemblages d'éléments de dispositifs déjà existants, et de prolongements envisagés sur certains d'entre eux. Ces assemblages sont appelés dans le projet « **maquette de suivi** » de la biodiversité en forêt.

En réponse aux besoins et enjeux évoqués plus haut, il importe (i) d'améliorer et de compléter l'acquisition de données sur les espèces forestières (proposer, par exemple, le déploiement de protocoles de relevés pour des groupes taxinomiques jusqu'ici peu ou pas suivis) et (ii) de réfléchir à l'évaluation des liens entre politiques publiques en forêt, pratiques de gestion et biodiversité.

La simple addition d'éléments de dispositifs de collecte de données de biodiversité, conçus indépendamment les uns des autres et pour différentes finalités, a peu de chances de constituer un système de suivi cohérent. Aussi, le projet PASSIFOR-2 vise à développer **une stratégie d'ensemble** du point de vue de la définition des objectifs des suivis, du choix des données mobilisées – existantes ou à ajouter – et du fonctionnement possible de ces assemblages. Il s'agit en particulier de réfléchir aux groupes taxinomiques prioritaires dans le cadre d'un suivi de biodiversité en forêt, aux variables écologiques et de suivi de la gestion forestière les plus pertinentes, aux plans d'échantillonnage et aux méthodes d'analyse.

Le projet comporte cinq tâches distinctes mais étroitement reliées (Fig. 2) :

- la **tâche A** intègre les résultats des autres tâches pour proposer différentes options pour un système de suivi de la biodiversité en forêt (conception des « maquettes de suivi ») : la synthèse des travaux de cette tâche correspond **au chapitre 2** du présent rapport ;

- la **tâche B** étudie la gouvernance de systèmes de suivi « multi-dispositifs » et notamment comment les dispositifs, leurs objectifs et leurs données peuvent s’articuler au sein d’un système qui les rassemble.: la synthèse des travaux de cette tâche correspond **au chapitre 3** du présent rapport ;
- les **tâches C et D** déterminent le choix des groupes taxinomiques (C) et des variables écologiques et de gestion (D) à suivre ; les travaux de ces deux tâches sont présentés dans les **chapitres 4 et 5** ;
- la **tâche E** s’intéresse aux plans d’échantillonnage et à l’analyse des données permettant de répondre correctement aux objectifs du suivi : la synthèse des réflexions conduite dans cette tâche est disponible au **chapitre 6** du rapport.

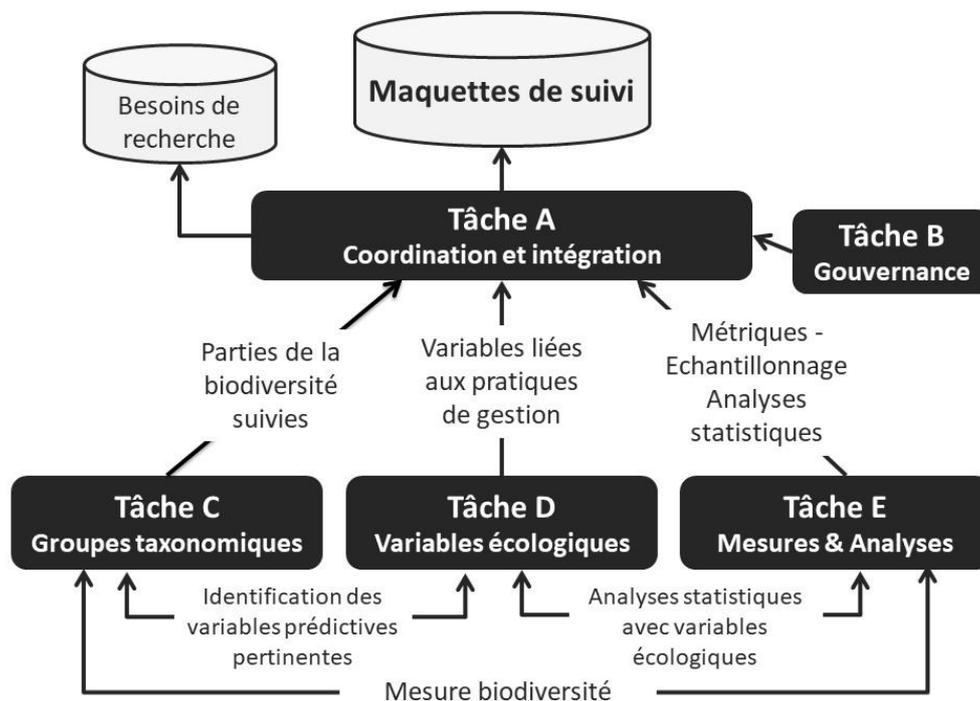


Fig. 2. Architecture du projet PASSIFOR-2
Figure mise à jour à partir de Landmann et Gosselin, 2015

1.4 La gouvernance du projet

Ce chapitre a vocation à présenter les ressources humaines mobilisées sur le projet PASSIFOR-2, l'organisation du travail, et les liens entretenus avec les partenaires du projet tout au long de l'exercice.

- **L'équipe projet et sa coordination**

L'équipe-projet est constituée des responsables des différentes tâches scientifiques et techniques du projet (Tab. 1). Sa mission est de (i) conduire et piloter le projet, (ii) produire les résultats attendus dans les tâches A à E du projet, (iii) les restituer et (iv) les valoriser auprès de différents publics.

Tab. 1 : Composition de l'équipe-projet

| Membres | Structure | Implication |
|-------------------|-----------------|------------------|
| Christophe Bouget | INRAE | Tâche C |
| Julie Dorioz | GIP Ecofor | Tâche A, Tâche B |
| Marion Gosselin | INRAE | Tâche D |
| Frédéric Gosselin | INRAE | Tâche A, Tâche E |
| Hervé Jactel | INRAE | Tâche D |
| Romain Julliard | MNHN | Tâche E |
| Guy Landmann | GIP Ecofor | Tâche A |
| Antoine Lévêque | MNHN (PatriNat) | Tâche C, tâche E |

Au sein de cette équipe : la **coordination scientifique** du travail a été assurée par Frédéric Gosselin (INRA), tandis que la **conduite du projet** a été confiée à Julie Dorioz (Ecofor). La communication entre ses membres et la coordination entre leurs travaux respectifs ont été assurés par des réunions régulières. En particulier, des « points d'étapes » dématérialisés ont été programmés tous les deux à trois mois, soit 15 points d'étape entre le 14 octobre 2019 (lancement) et le 25 octobre 2022 (clôture et préparation de la restitution).

- **Les autres personnels du projet**

L'équipe scientifique a été renforcée par des contributions directes de chercheurs d'INRAE (Fabien Laroche, Jean-Luc Dupouey, Frédéric Archaux), le recrutement de trois personnes en Contrat à durée déterminée (Hélène Le Borgne, 14 mois, Aristide Chauveau, 6 mois, Julie Dorioz, 12 mois) et l'encadrement de six stages M2 et un stage M1 sur l'ensemble du projet.

- **Le comité d'orientation**

Le comité d'orientation est constitué des bailleurs de fonds du projet PASSIFOR-2 et des bailleurs potentiels du futur système de suivi multi-dispositifs (Tab. 2)

Ses missions ont été formulées de la façon suivante :

- i. Discuter de l'avancement du projet, des difficultés rencontrées ou ajustements nécessaires
- ii. Discuter de la pertinence des productions
- iii. Orienter l'équipe projet sur la communication et la valorisation des résultats

A ce titre, le comité a été mobilisé à mi-période (octobre 2021) et à l'occasion d'une réunion finale (octobre 2022) destinée à préparer la restitution (séminaire et rapport finaux) et à discuter des suites du projet PASSIFOR-2.

Tab. 2 : Composition du Comité d'orientation

| Membres | Structure |
|--------------------|---|
| Claire de Kermadec | Ministère chargé de l'écologie, Direction de l'eau de la biodiversité (DEB) |
| Olivier Giraud | Ministère chargé de l'écologie, Direction de l'eau de la biodiversité (DEB) |
| Marianne Bernard | Office français de la biodiversité (OFB) |
| François Hissel | Office français de la biodiversité (OFB) |
| Antoine Lévêque | Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN) |
| Flore Sancey | Ministère chargé de l'agriculture |
| Nicolas Picard | GIP Ecofor |

- **Les partenaires**

Pour mener à bien les tâches B à E, les responsables de ces tâches ont travaillé en lien avec des experts extérieurs. Les échanges ont eu lieu dans le cadre d'entretiens bilatéraux, d'ateliers ou de groupes de travail sur des points précis de l'expertise. Les interactions avec experts et parties prenantes sont décrites pour chacune des tâches, dans les parties « méthodes » des chapitres correspondants.

Le tableau ci-après (Tab. 3) identifie de manière synthétique les personnels et partenaires des différentes tâches du projet.

- **Cycle de webinaires**

D'autre part et de manière transversale à l'ensemble du travail, **un cycle de trois webinaires** a été organisé. Ces séminaires, ouverts à tous les partenaires et parties prenantes, ont été centrés sur des étapes-clés du projet, et ont eu vocation à l'alimenter. Le **premier webinaire**, qui s'est tenu le 1^{er} décembre 2020 et a rassemblé une quarantaine de participants, s'est concentré sur la définition des objectifs de suivi de la biodiversité en forêt - une étape structurante pour la suite du travail. La 1^{er} février 2022, le travail a été poursuivi avec un **deuxième webinaire** : il a réuni soixante personnes pour discuter d'aspects méthodologiques relatifs (i) à la sélection des groupes taxonomiques prioritaires, (ii) au choix des pratiques de gestion forestière et (iii) à l'assemblage des dispositifs au sein de « maquettes ». Enfin, à l'occasion du **webinaire final** du 17 novembre 2022, près de 90 participants sont venus s'informer et échanger autour des conclusions de PASSIFOR-2. Les comptes-rendus de ces trois webinaires sont disponibles en [Annexe III-A](#).

Tab. 3 : Personnels et partenaires par tâche du projet PASSIFOR-2

| Tâches | Responsables | Autres personnels du projet | Partenaires |
|--|-----------------------------|---|---|
| Tâche A Coordination, intégration | F. Gosselin G. Landmann | J. Dorioz, 11 mois de CDD (coord.), A. Chauveau, 3 mois de CDD | Personnels techniques des dispositifs, utilisateurs des données, experts, bailleurs |
| Tâche B Gouvernance | J. Dorioz, 1 mois de CDD | M. Cluzel, Stage M2 | Responsables de dispositifs de suivi à l'étranger (Suisse, Suède). |
| Tâche C Composantes de la biodiversité | C. Bouget A. Lévêque | H. Le Borgne, 8 mois de CDD, A. Chauveau, 1.5 mois de CDD | Groupes d'experts (taxinomiques / nouvelles méthodes d'échantillonnage) |
| Tâche D Variables écologiques | M. Gosselin H. Jactel | H. Le Borgne, 6 mois de CDD, A. Chauveau 1.5 mois de CDD L. Toly Moboula, Stage M1 | Groupes d'experts (politiques publiques / suivi des pratiques de gestion forestière) |
| Tâche E Mesures et analyses | F. Gosselin R. Julliard | F. Archaux, F. Laroche, J-L. Dupouey (INRAE) A. Lévêque (MNHN) P. Bouchet, Stage M2 K. Maloku, Stage M2 N. Houessou, Stage M2 E.H.C. Faye, Stage M2 N. Seye, Stage M2 | Inventaire forestier (IGN), experts INRAE |

Références :

- Bockstaller C., Cariolle M., Guichard L., Leclercq C., c Morin A. et al., 2013. Evaluation agri-environnementale et choix des indicateurs : acquis, enjeux et pistes. *Innovations Agronomiques*, 31(1), 1-14
- Dorioz J., Benest F., Debaive N., Gosselin M., Landmann G. 2019. Vers un suivi multi-dispositifs de la biodiversité en forêt en France métropolitaine. *Forêt Nature* n°150, Janvier-Février-Mars 2019, 50-55
- Gosselin F., Gosselin M., Paillet Y., 2012. Suivre l'état de la biodiversité forestière : pourquoi ? Comment ? *Revue forestière française*, AgroParisTech, 64 (5), pp. 683 - 700.
- Landmann G., Gosselin F. (coord.), 2015. PASSIFOR – Propositions d'Amélioration du Système de Suivi de la biodiversité FORestière. Paris : Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt – GIP Ecofor, Rapport final, 101 pages. Accessible en ligne : <http://www.gip-ecofor.org/?p=307>
- Levrel H., Lois G. et Couvet D., 2007. Indicateurs de biodiversité pour les forêts françaises. État des lieux et perspectives. *Revue forestière française*, 59(1), pp 45-56.
- Nivet C., Bonhême I. et Peyron J.-L. (coord.), 2012. Les indicateurs de biodiversité forestière. Synthèse des travaux du programme de recherche « biodiversité, gestion forestière et politiques publiques ». Paris, MEDDE-GipEcofor, 144 p. www.gip-ecofor.org/doc/drupal/Indicateurs.pdf
- Paillet Y., 2017. Suivis nationaux de biodiversité en forêt en France : une lecture au travers des Variables Essentielles de Biodiversité. *Naturae* 6 : 1-11.
- Pellissier V., Touroult J., Julliard J., Sibley J.-P. et Jiguet F., 2013. Assessing the Natura 2000 network with a common breeding birds survey. *Animal Conservation*, 16(5), 566-574
- Picard N., Appora V., Landmann G., 2022. Programme de recherche « Biodiversité et gestion forestière » : bilan 1996-2018. GIP ECOFOR et Ministère de la transition écologique, Paris. 160 p. http://bgf.gip-ecofor.org/wp-content/uploads/2022/06/BGF_bilan1996-2018.pdf
- Brédif H., 2008. Référentiels de durabilité forestière : l'universalité en question. *Natures Sciences Sociétés*, EDP Sciences, 16 (3), 209-219

Chap. 2 : L'élaboration de « maquettes de suivi » de la biodiversité en forêt

Auteurs du chapitre :

Julie Dorioz (Gip Ecofor), Frédéric Gosselin (INRAE), Aristide Chauveau (INRAE)

Responsables/Coordinateurs scientifiques de la tâche :

- Frédéric Gosselin, Ingénieur Général des Ponts, des Eaux et des Forêts - Chercheur en écologie forestière et biométrie à INRAE, INRAE - UR EFNO - Domaine des Barres - F-45290 Nogent-sur-Vernisson, 02 38 95 03 58, frederic.gosselin@inrae.fr
- Julie Dorioz, Ingénieure en agronomie et environnement, Chargée de mission, Gip Ecofor, Laboratoire EDYTEM, 5 BD de la mer Caspienne, F-73373 Le Bourget du Lac Cedex, julie.dorioz@gip-ecofor.org
- Guy Landmann, Ingénieur des ponts, des eaux et des forêts, Gip Ecofor, 42, rue Scheffer, 75116 Paris, 01 53 70 21 41, guy.landmann@gip-ecofor.org
- Avec les contributions d'Aristide Chauveau (INRAE) et de Lise Maciejewski, (PatriNat, pour le programme de surveillance de la biodiversité terrestre).
- En lien avec les responsables des tâches B à E du projet

Résumé

L'objectif de cette tâche est de proposer **différentes options pour un système de suivi continu de la biodiversité en forêt** à l'échelle de la France métropolitaine. Ce système de suivi est conçu d'assemblages de dispositifs (existants ou à créer) articulés entre eux pour répondre à un objectif de suivi. La réflexion est conduite par composante de biodiversité de façon à élaborer des assemblages élémentaires, appelés « sous-maquettes », dans lesquelles on distingue :

- un cœur (dispositifs indispensables au suivi considéré) ;
- des compléments (dispositifs additionnels dont il faudra préciser l'apport).

L'élaboration des maquettes de suivi de la biodiversité en forêt se base d'abord (1) sur des réflexions et méthodes ad hoc déployées au sein de la tâche A, en lien avec les responsables des autres tâches (2) sur les résultats des analyses conduites dans les tâches B à E. Ce travail a aussi reposé sur un processus itératif de co-construction avec les parties prenantes (producteurs et utilisateurs des données de biodiversité).

Les principales productions de cette tâche intégrative de PASSIFOR-2 comprennent : (1) une réflexion sur les objectifs possibles de suivis de la biodiversité en forêt, parmi lesquels quatre ont été retenus pour la suite du projet ; (2) une analyse des attentes relatives au système de suivi pour chacun de ces

quatre objectifs ; (3) une analyse des caractéristiques des dispositifs existants ; (4) la constitution d'une proposition d'assemblages de dispositifs – ce que nous avons appelé « maquette de suivi » – pour le premier objectif ; cette maquette est composée d'une proposition de plan d'échantillonnage multi-taxonomique pour cet objectif et de huit sous-maquettes – une par composante de biodiversité analysée, comprenant notamment toutes les composantes retenues dans le cadre de la tâche C – auxquelles sont associés des protocoles de mesure de la composante de biodiversité. Nous avons enfin produit un protocole de constitution des sous-maquettes et de la maquette qui pourra être utilisé pour les maquettes à venir sur d'autres objectifs dans le cadre du projet PASSIFOR-2bis.

Contexte et problématique

La communauté forestière pan-européenne a reconnu très tôt la biodiversité comme un des six critères de gestion forestière durable. Pourtant les indicateurs actuels de la biodiversité en forêt sont surtout des indicateurs indirects et difficiles à interpréter, mobilisant des données dendrométriques. De plus, les indicateurs disponibles permettent mal de faire le lien entre action publique, gestion forestière, changements globaux et biodiversité. Les manques proviennent en grande partie des systèmes de suivi en amont de la construction des indicateurs. Aussi, il importe d'**acquérir des informations** qui permettent de mieux cerner directement l'état et la dynamique de la biodiversité en forêt, et de mieux évaluer les liens entre politiques publiques en forêt, pratiques de gestion et biodiversité. C'est en ce sens que le projet PASSIFOR-2 a vu le jour.

De manière générale, il s'agit de **proposer différentes options pour le suivi de la biodiversité en forêt à l'échelle de la France métropolitaine**, en se basant le plus possible sur les dispositifs de suivi déjà existants (par intégration de différentes sources de données) et en envisageant leur(s) prolongement(s) afin de répondre à différentes attentes.

L'idée est de procéder à des **assemblages de dispositifs** (et de proposer des développements de ceux-ci) **en réponse à des attentes précises** auparavant explicitées. Un assemblage de dispositif, conçu en lien avec un objectif de suivi donné, est appelé « **maquette de suivi** » ou plus simplement « maquette ».

Une maquette est constituée de différentes composantes - en partie prises en charge dans les autres tâches B à E du projet. Les composantes retenues par PASSIFOR2 font partie des sept composantes identifiées par Vos et al. (2000) comme importantes à préciser pour les suivis écologiques :

- une explicitation des **objectifs du suivi**,
- une description (i) des **composantes de biodiversité** suivies (tâche C), et des **variables écologiques ou de gestion associées** (tâche D), (iii) des **plans d'échantillonnage**, des **méthodes d'analyse** (tâches E et A) et des modalités de gestion de données,
- des précisions sur les **modalités de collecte des données** (protocoles, sous-maquettes et plan d'échantillonnage multi-taxon de la tâche A (cf. [partie II](#) du rapport),
- des précisions concernant la **gouvernance** (en lien avec la tâche B) : organisation, déploiement dans le temps, coûts et financement, **maintenance...**

Aussi, l'analyse conduite ici (Chap. 2) et les grandes propositions qui en ressortent (maquettes et protocoles de suivi, plan d'échantillonnage multi-taxons en [Partie 2 du rapport](#)) intègrent les apports :

- des tâches analytiques du projet (B à E), dont les résultats et arguments ont été pris en compte dans les choix effectués ici,
- des points d'étape de l'équipe projet qui nous ont permis de mettre en commun les apports des différentes tâches sur des besoins identifiés par la tâche A,
- des parties prenantes réunies à l'occasion de trois webinaires, et en particulier des responsables des dispositifs (entretiens bilatéraux avec beaucoup d'entre eux),
- d'experts consultés sur les propositions de maquettes, de protocoles ou des points précis de l'analyse,
- des bailleurs de fonds actuels et potentiels, réunis au sein du comité d'orientation du projet.

En outre, les travaux ont souhaité s'inscrire le plus possible dans le cadre général du Programme de surveillance de la biodiversité terrestre (OFB/PatriNat).

Méthodes

Définition initiale et choix des objectifs de suivi de la biodiversité en forêt

Il s'agit d'abord de fixer le **cadre du travail commun**, de discuter et **définir des objectifs des suivis** qui serviront de point de départ à la définition de maquettes.

La maquette a été définie comme un assemblage de dispositifs (existants ou à créer) conçu en réponse à un objectif de suivi.

Des objectifs ont été envisagés au départ par l'équipe projet :

- **Objectif 1** : suivi de la biodiversité (de quelques taxons) à l'échelle de la France métropolitaine,
- **Objectif 2** : suivi de la biodiversité (de quelques taxons) à l'échelle de la France métropolitaine en forêt exploitée (ou non protégée) versus en forêt non-exploitée (ou protégée (RBI / Natura 2000) ; le différentiel pouvant constituer un indicateur de gestion durable pour le critère biodiversité,
- **Objectif 3** : suivi de la biodiversité en lien avec une politique publique impactant l'activité forestière ; suivi et évaluation de cette politique (ex : politiques d'atténuation du changement climatique),
- **Objectif 4** : suivi organisé autour de l'un des objectifs listés ci-dessus avec, en plus, la possibilité d'un changement d'échelle (i) avec réplique du protocole biodiversité à des échelles plus locales, ou (ii) via le suivi local de variables écologiques autres que la biodiversité (Indice de Biodiversité Potentielle – IBP – , télédétection, variables dendrométriques) dont le lien avec la biodiversité serait en parallèle étayé au niveau national.

L'Objectif 2 (issu de Gosselin et al. 2012) peut être conçu à la fois comme une expression concrète de l'Objectif 3 – si l'on souhaite évaluer dans le temps l'effet des réserves intégrales – et comme un outil de mesure de l'état et de la dynamique de la biodiversité dans les forêts exploitées prenant les forêts non exploitées comme référence.

Ces propositions ont été présentées et discutées avec les producteurs et utilisateurs des données de biodiversité à l'occasion d'un premier webinar organisé dans le cadre du projet, le 1^{er} décembre 2020. La démarche a consisté à retenir des objectifs assez différents et représentatifs de grands « types » d'objectifs, de façon à illustrer à partir de ceux-ci différentes méthodes de suivi.

Analyse des objectifs de suivi

Le passage des objectifs aux maquettes proprement dites nécessite de renseigner les caractéristiques de ces objectifs. Selon Vos et al. (2000), les composantes classiques des objectifs sont :

- les entités concernées (l'objet ciblé),
- les types de changement qu'on souhaite détecter,

- les contextes géographiques et écologiques d'analyse,
- le délai dans lequel on souhaite avoir détecté l'événement,
- la probabilité avec laquelle on souhaite pouvoir détecter l'événement.

Sur cette base, une **grille d'analyse des objectifs** a été conçue, dans le but d'explicitier les « attentes » vis-à-vis des objectifs de suivi retenus (cf. supra), c'est-à-dire les qualités ou propriétés techniques que devront posséder les dispositifs pour y répondre de manière satisfaisante. Les critères pris en compte dans la grille sont proches des tâches de PASSIFOR-2 :

- Échantillonnage et représentativité (y compris type de placettes permanentes ou temporaires) (tâche E)
- Composantes de biodiversité suivies et capacité à en suivre d'autres (tâche C)
- Mesures de la biodiversité (tâche C- E)
- Précision
- Autres variables suivies (co-variables) (tâche D)
- Aspects temporels (tâche E).

Cette méthode d'analyse des objectifs a été testée et discutée dans le cadre d'ateliers conduits à l'occasion du Webinaire du projet du 1^{er} décembre 2020. La grille d'analyse a ensuite été consolidée, puis déroulée de manière complète sur les 4 objectifs retenus.

L'information contenue dans ces grilles a ensuite été hiérarchisée à dire d'expert. Nous avons défini dans les grilles Objectifs les critères qui sont plus essentiels que d'autres et notamment les critères indispensables pour qu'un dispositif soit dans le cœur de la maquette.

Analyse des dispositifs de suivi nationaux

En parallèle du travail sur le choix des objectifs et leur analyse, les dispositifs existants de collecte de données de biodiversité ont fait l'objet d'une analyse approfondie, du point de vue :

- de leur **fonctionnement actuel** (stratégie d'échantillonnage, qualité des procédures et des données, circuits de décision et modalités de financement) ou encore des aspects liés à la mobilisation et l'utilisation des données susceptibles de poser problème pour la mise en œuvre éventuelle des maquettes,
- de leur **potentiel d'évolution**,
- de leurs **articulations** actuelles ou potentielles avec d'autres dispositifs.

Une Grille d'Analyse des Dispositifs a été produite en lien avec la tâche B consacrée aux questions de gouvernance des suivis (cf. Chap. 3.2.2). Cette grille a été utilisée comme support d'enquête auprès des responsables d'un ensemble de dispositifs de suivi nationaux. Elle a été conçue :

- pour répondre, d'un point de vue technique, aux attentes exprimées dans les Grilles d'analyse des objectifs,
- pour recueillir d'autres informations sur la gouvernance (tâche B) : organisation, acteurs impliqués et financements, liens avec la recherche et l'expérimentation...

La liste des dispositifs analysés a été discutée avec l'équipe projet dans le cadre du point d'étape n°9 du 20 mai 2021. Le choix des dispositifs s'est fait sur la base des critères suivants : (1) priorité donnée

aux dispositifs d'envergure nationale, du fait de l'objectif de l'échelle métropolitaine de notre réflexion, (2) dispositifs possédant a priori une composante forêt et biodiversité⁸, (3) dispositifs de suivi continu (à ce titre les inventaires ponctuels réalisés par exemple par les Conservatoires botaniques nationaux n'ont pas été pris en compte).

Première liste (entretiens réalisés en 2021) :

1. Réseau National de suivi à long terme des ECOSystèmes FORestiers (Renecofor) de l'ONF
2. Réseau de Mesure de la qualité des sols (RMQS) d'INRAE
3. Inventaire forestier national de l'IGN
4. Protocole de Suivi dendrométrique des Réserves Forestières (PSDRF) de RNF
5. Réseau de parcelles de référence de l'AFI (pour le suivi des futaies irrégulières)
6. Suivi Temporel des Oiseaux Communs (STOC) de Vigie-Nature
7. Suivi des chauves-souris (Vigie-Chiro) de Vigie-Nature
8. Suivi Photographique des insectes pollinisateurs (SPIPOLL) de Vigie-Nature
9. Suivi Temporel des Rhopalocères de France (VTERF) de Vigie-Nature
10. Suivi des ongulés sauvages de l'OFB
11. Suivi de la bécasse de l'OFB
12. L'Observatoire « Rapaces » de la LPO
13. Les données opportunistes de la LPO
14. L'Estimation des populations d'oiseaux communs (EPOC) coordonné par la LPO et le MNHN.

L'analyse à proprement parler des dispositifs est basée : (1) sur un entretien de 2 à 3 heures avec le ou les référents d'un dispositif donné, qui consiste à compléter en direct la Grille d'Analyse des Dispositifs, (2) sur une phase de consolidation post-entretien, qui implique généralement la consultation de documents spécifiques (protocoles par exemple) et d'autres échanges avec les mêmes référents. Les entretiens (visio) ont été conduits par Frédéric Gosselin, Guy Landmann ou Julie Dorioz. Pour garantir une certaine homogénéité du traitement de la grille d'analyse d'un dispositif à l'autre, deux premiers entretiens-test (Renecofor et RMQS) ont été conduits en présence des trois enquêteurs.

Cette première liste a été complétée par un deuxième lot de dispositifs considérés potentiellement intéressants en tant que dispositifs complémentaires au cœur des maquettes ou possédant des compétences – par exemple naturalistes – utiles pour la constitution de nos maquettes. **Une deuxième liste de dispositifs** a donc été établie en lien avec l'équipe projet (point d'étape n°9 et 10). Ces réseaux ont fait l'objet d'une enquête dans un format plus léger que les précédents.

1. Réseaux naturalistes de l'ONF
2. Réseau de suivi des dommages forestiers du Département de la Santé des Forêts (MASA)
3. Réseau des correspondants-observateurs du DSF (MASA)
4. In-Sylva (infrastructure nationale de recherche pour la gestion adaptative des forêts)
5. Vigie-Flore (Suivi des changements d'abondance des espèces végétales les plus communes en France) de Vigie-Nature

⁸ Des suivis forestiers ne comprenant pas de composante biodiversité affirmée ont pu être sélectionnés pour leur expérience sur des aspects qui nous intéressaient, par exemple sur le suivi de la gestion forestière.

6. L'Indicateur de Biodiversité Potentielle (IBP) du CNPF
7. Petites chouettes de montagne (ONF-LPO)

Protocole de constitution de maquettes de suivi

L'idée générale est d'envisager la maquette comme la rencontre entre les attentes - exprimées pour un objectif de suivi donné - et les dispositifs existants, avec leurs caractéristiques. En d'autres termes, il s'agit de reprendre les grilles d'analyse des objectifs et de sélectionner les dispositifs – sur la base de leur grille d'analyse individuelle - suivant qu'ils répondent ou pas aux attentes explicitées pour chaque objectif.

Étapes :

- Choix de raisonner par composante de biodiversité : constituer un assemblage (ou une sous-maquette) par type d'objet (type de biodiversité suivie : le « quoi ») : en effet, on ne pourra « associer » des dispositifs aux caractéristiques différentes (avec des approches telles que celle testée dans le M2 de P. Bouchet, tâche E) que s'il s'agit du même objet,
- Constituer des matrices objectif x dispositifs : pour chaque objectif et composante de biodiversité, ajouter une colonne avec les caractéristiques de chaque dispositif collectant des données sur cette composante de biodiversité Colorer les cases suivant que le dispositif répond complètement à la demande de l'objectif (couleur verte), répond imparfaitement à la demande tel quel (couleur jaune), ne peut répondre à la demande qu'après des corrections et vérifications (couleur orange), enfin, ne peut de toute façon pas répondre à la demande (couleur rouge).

Les prémices de ces propositions ont été présentées et discutées avec les producteurs et utilisateurs des données de biodiversité à l'occasion du second webinaire organisé dans le cadre du projet, le 1^{er} février 2022. La procédure détaillée de constitution des maquettes est donnée en Partie 2.

Production des protocoles, sous-maquettes et maquette

Le travail final de la tâche A a finalement consisté à appliquer ce protocole pour produire les sous-maquettes pour les 8 composantes de biodiversité retenues ainsi que la maquette associée. Ce travail a été beaucoup plus long que prévu et a dans un premier temps nécessité d'élaborer des protocoles de mesure pour chacune des 8 composantes de biodiversité retenues – étape que nous avons initialement sous-estimée. Il a été nécessaire à ce stade d'avoir des interactions avec des spécialistes de ces composantes de biodiversité quand nous le jugions nécessaire. C'est pourquoi nous n'avons eu le temps de faire ce travail que pour le premier objectif retenu.

La construction de chaque sous-maquette a commencé par le rappel des attendus de cette sous-maquette pour l'objectif de suivi considéré, puis a été suivie par une analyse des dispositifs existants au regard des attendus pour cet objectif. L'analyse des dispositifs était notamment fondée sur une méthode de synthèse des matrices objectif x dispositifs pour la composante de biodiversité considérée sous forme de représentation graphique de type camembert des trois couleurs utilisées pour noter la cohérence du dispositif avec l'objectif dans chaque élément de la matrice. Cette étape nous a permis de proposer un cœur de maquette – c'est-à-dire un assemblage de dispositifs indispensables pour la mise en place du suivi pour cette composante de biodiversité – ainsi que des compléments à ce cœur,

à savoir des dispositifs qui avaient de moins bonnes propriétés au regard des attentes mais qui pouvaient compléter le cœur de maquette sur certains aspects utiles au suivi de la biodiversité en forêt. Chaque sous-maquette s'est terminée par l'identification de travaux – d'expertise ou de recherche – nécessaires ou souhaitables avant ou pendant la mise en place du suivi.

Le travail s'est terminé par la rédaction de la maquette qui comprenait à la fois une synthèse des sous-maquettes – y compris des besoins de travaux complémentaires avec une proposition de phasage dans le temps – et des considérations plus générales.

Principaux résultats

Choix et analyse des objectifs de suivi

A l'occasion du point d'étape n°6, sur la base de travaux préparatoires de la tâche A, l'équipe projet a choisi de travailler sur 3 objectifs, et d'ouvrir la discussion à l'occasion du séminaire S1 du 1er décembre 2020 pour le choix d'un ou deux objectifs complémentaires. Au fur et à mesure du projet, nous avons petit à petit réalisé qu'il nous fallait élargir l'objet du suivi, non plus uniquement la biodiversité forestière – c'est-à-dire la partie de la biodiversité typique des forêts ou plus fréquente en forêt – mais plus généralement la biodiversité en forêt – donc y compris d'espèces qui ne sont pas fréquentes – ou moins fréquentes – en forêt. Ce choix a été motivé par le fait que les enjeux de biodiversité en forêt ne concernent pas uniquement la biodiversité forestière (la forêt peut dans certains cas être un refuge pour des espèces menacées dans leur milieu d'origine ; cf. Caughley 1994) mais aussi par le constat qu'il pouvait être intéressant de mettre en relation les états et dynamiques des composantes forestière et non-forestière de la biodiversité - et ce même si l'objectif principal est de suivre la biodiversité forestière. Au final, la tâche A travaillera sur quatre objectifs :

- **Objectif 1** : suivre l'état et la dynamique [de composantes] de la biodiversité en forêt
→ De type « surveillance »
- **Objectif 2** : suivre et comparer l'état et la dynamique [de composantes] de la biodiversité en forêt à l'échelle de la France métropolitaine en forêt exploitée (et non protégée) versus en forêt non-exploitée et protégée (Réserves intégrales).
→ Représentatif de suivis de pressions dites « zonales » (que l'on peut délimiter spatialement).
- **Objectif 3** : suivre l'état et la dynamique [de composantes] de la biodiversité en forêt en lien avec certaines actions de gestion
→ Représentatif de suivis de pressions avec des limites spatiales floues ou bougeant dans le temps)
- **Objectif 4** : suivre l'état et la dynamique [de composantes] de la biodiversité en forêt à l'échelle de la France métropolitaine en lien avec le changement climatique
→ Représentatif des pressions diffuses, non cartographiables et non stables dans le temps.

Les grilles d'analyse des objectifs hiérarchisées sont données en [partie 2](#).

Etude des dispositifs existants

Nous avons par ailleurs produit des grilles d'analyse des dispositifs existants suivant la méthode présentée ci-dessus. Les dispositifs de la première liste – a priori potentiellement proches de cœurs de maquette – ont fait l'objet d'une ventilation systématique des éléments recueillis dans les critères et catégories que nous avons identifiées. Tel n'a pas été systématiquement le cas pour les dispositifs de la seconde liste, surtout pour ceux qui n'étaient pas des dispositifs de suivi ou des suivis à des échelles inadéquates. Ces grilles sont fournies [en partie 2 du rapport](#).

Constitution de la maquette pour le suivi de [composantes de] biodiversité en forêt

Comme indiqué précédemment, nous n'avons pu proposer – pour des raisons de temps – de maquette que pour l'Objectif 1 :

- **Objectif 1** : suivre l'état et la dynamique [de composantes] de la biodiversité en forêt.

En amont de la production de la maquette, nous avons produit des matrices d'analyse des dispositifs au regard des attendus de cet objectif (cf. [Partie III du rapport](#)).

Nous avons ensuite produit des protocoles et sous-maquettes pour les 8 composantes de biodiversité retenues : les habitats terrestres (pour le volet écosystème) ; la flore vasculaire ; les arbres ; les bryophytes ; les champignons ectomycorhiziens ; les gastéropodes terrestres ; les chiroptères et les oiseaux. Ces seize documents sont fournis dans la [partie 2](#). En parallèle, nous avons fait une proposition de plan d'échantillonnage de relevé multi-taxonomique de la biodiversité en forêt pour l'objectif 1 – aussi fourni dans la [partie 2 de ce rapport](#). Cette proposition se base assez largement sur la philosophie de l'Inventaire Forestier pour la partie constitution de l'échantillon à trois différences près :

- (i) le nombre de placettes échantillonnées annuellement est beaucoup plus faible que celui de l'Inventaire Forestier – car il nous semblait irréaliste de faire des mesures de biodiversité pour les 8 composantes de biodiversité suivies sur environ 7000 placettes par an ;
- (ii) la mesure annuelle n'est plus constituée d'un unique passage sur la placette sans grande contrainte saisonnière mais par trois passages à des saisons assez bien définies.
- (iii) la proposition de baser l'échantillon sur 2/3 de placettes permanentes et 1/3 de placettes temporaires – alors que pour la biodiversité les placettes de l'Inventaire sont actuellement temporaires⁹. Diverses raisons nous ont conduit à ce choix (cf. document de la [partie 2 du rapport](#)). Compte tenu de ce choix, nous avons proposé que certaines de ces placettes permanentes soient celles du RMQS, permettant ainsi d'assembler ces deux réseaux assez naturellement.

⁹ hormis pour les arbres qui font l'objet de deux passages, rendant les placettes semi-permanentes.

Les sous-maquettes ont largement utilisé ce plan d'échantillonnage dans le cœur des suivis proposés.

Enfin, la maquette pour l'objectif 1 a synthétisé les propositions des 8 sous-maquettes (cf. Tableau 1 ci-dessous) et discuté les travaux qui nous semblent nécessaires à mettre en œuvre (a) avant la mise en place du suivi, (b) en même temps que son déploiement, (c) de ceux qui sont souhaitables mais non nécessaires. Nous avons enfin discuté de questions plus générales, comme l'ouverture future possible à d'autres composantes de la biodiversité, l'articulation de notre proposition avec des suivis de biodiversité à des échelles plus locales – soit par une intensification de la pression d'échantillonnage dans certains territoires (échelles de régions administratives ou de Parcs Naturels par exemple), soit par l'utilisation de l'Indice de Biodiversité Potentielle (IBP) dans des territoires plus petits, dont nous proposons de calibrer les relations avec nos relevés de biodiversité à l'échelle nationale pour produire des estimateurs d'état et de dynamique de biodiversité à partir d'IBP réalisés localement. La maquette a aussi été l'occasion de faire des propositions sur les articulations du suivi avec la recherche et les approches expérimentales.

Les choix effectués pour ces sous-maquettes peuvent être résumés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 1 : Synthèse des sous-maquettes pour les 8 niveaux de biodiversité retenus dans PASSIFOR2. Les **textes en vert** font référence à ce qui est déjà en place au sein de l'Inventaire Forestier, **en violet** à ce qui est relatif au Suivi temporel des oiseaux communs (STOC) alors que les **textes en marron** font référence à ce qui est proposé dans l'échantillonnage multi-taxon.

| Niveau de biodiversité suivi | Cœur de sous-maquette | Synthèse du protocole |
|------------------------------------|---|--|
| Type d'habitat (niveau écosystème) | Plan d'échantillonnage de l'Inventaire Forestier étendu aux zones forestières hors production (& plan d'échantillonnage multi-taxons) | Protocole utilisé par l'Inventaire Forestier |
| Arbres | Plan d'échantillonnage de l'Inventaire Forestier étendu aux zones forestières hors production (& plan d'échantillonnage multi-taxons) | Protocoles utilisés par l'Inventaire Forestier |
| Flore vasculaire | Plan d'échantillonnage de l'Inventaire Forestier étendu aux zones forestières hors production & plan d'échantillonnage multi-taxons | Protocole utilisé par l'Inventaire Forestier (1 ^{er} passage en fin d'hiver - début de printemps) et protocole plus poussé (notamment en termes de temps et de qualité d'observateur) lors du second passage Intensification des relevés répétés pour estimer la détectabilité |

| | | |
|------------------------------|--|--|
| Bryophytes | Plan d'échantillonnage multi-taxons | <p>Relevé de bryophytes par type de micro-habitat/support dans le disque de rayon 15m et relevé complémentaire sur le reste de la surface</p> <p>Détermination des espèces au laboratoire sur des critères morphologique (complément par ADNe à tester)</p> |
| Chiroptères | Plan d'échantillonnage multi-taxons | <p>Enregistreurs d'ultrasons calibrés par placette en termes de volume de détection</p> <p>Détermination au laboratoire par un algorithme d'Intelligence artificielle (IA)</p> |
| Oiseaux | Suivi temporel des oiseaux communs & Plan d'échantillonnage multi-taxons | <p>Protocole STOC (ornithologiste durant deux ou trois passages de 5 minutes dans des bonnes conditions)</p> <p>Enregistreurs sonores calibrés par placette en termes de volume de détection</p> <p>Détermination au laboratoire par un humain (mêmes types de durées/conditions que STOC) complété par un algorithme d'IA</p> |
| Gastropodes terrestres | Plan d'échantillonnage multi-taxons | <p>Prélèvements d'organismes et de microhabitats (litière, haut du sol) dans le disque de rayon 15m</p> <p>Extraction et détermination au laboratoire sur des critères morphologiques (complément par ADNe à tester)</p> |
| Champignons Ectomycorhiziens | Plan d'échantillonnage multi-taxons | <p>Prélèvement d'échantillons de litière et de sol dans le disque de rayon 15m</p> <p>Extraction et détermination au laboratoire par ADNe</p> |

Notons enfin qu'il est prévu de produire en 2024 des maquettes pour d'autres objectifs de suivi (dont les Objectifs 2 et 3 ci-dessus) dans le cadre du projet PASSIFOR-2bis, rendu possible grâce au soutien du MTECT.

Conclusion

Au final, la Tâche A a permis de produire ce qui était prévu en début de projet, mais sur un seul des Objectifs identifiés : le travail demandé pour élaborer cette maquette était en effet supérieur à nos capacités dans ce projet. C'est pourquoi la proposition de maquettes pour d'autres objectifs est reportée à 2024 dans le cadre du projet PASSIFOR-2bis.

En parallèle nous avons mis en place dans cette Tâche une méthodologie de constitution de maquette de suivi qui pourra être mobilisée dans le futur.

Références bibliographiques

- Caughley, G., 1994. Directions in conservation biology. *J. Anim. Ecol.* 63 (2), 215–244.
- Gosselin, F., Gosselin, M., Paillet, Y., 2012. Suivre l'état de la biodiversité forestière : pourquoi ? comment ? *Revue Forestière Française* 64 (5), 683–700.
- Vos, P., Meelis, E., Keurs, W.J. ter, 2000. A framework for the design of ecological monitoring programs as a tool for environmental and nature management. *Environ. Monit. Assess.* 61 (3), 317–344.

Chap. 3 – Principes de gouvernance des systèmes de suivi

Autrice du chapitre et coordinatrice scientifique de la tâche :

- Julie Dorioz, Ingénieure en agronomie et environnement, Chargée de mission, GIP Ecofor, Laboratoire EDYTEM, 5 BD de la mer Caspienne, F-73373 Le Bourget du Lac Cedex, julie.dorioz@gjp-ecofor.org

Résumé

Les systèmes de suivi sont généralement constitués par assemblage de différents dispositifs conçus indépendamment les uns des autres, possédant leurs propres finalités, protocoles de mesure, opérateurs et organisation. Etudier leur gouvernance consiste à analyser comment les dispositifs, leurs objectifs et leurs données s'articulent au sein d'un système qui les rassemble.

La tâche B étudie d'abord la gouvernance de systèmes de suivi de manière générale, avant de s'intéresser à deux exemples précis (chap. 3.2.1). Une synthèse de la littérature a été réalisée sur la gouvernance de systèmes de suivi environnementaux aux échelles nationale, européenne ou mondiale. Elle montre l'intérêt de déployer des suivis multi-dispositifs (couvertures du suivi plus étendues, complémentarité des données permettant de mieux documenter les phénomènes suivis, plus forte influence politique, plus grande efficacité économique...). Elle dresse un état des lieux des questions qui se posent et écueils, mettant en lumière des facteurs clés de réussite. Parmi ceux-ci, on peut citer : (i) une adéquation entre les moyens et la préfiguration du projet, (ii) des financements stables et sécurisés, (iii) des objectifs de suivi définis précisément en amont et en concertation, (iv) la conception d'un outil adaptatif, (v) des liens à tisser avec la gestion forestière, la recherche et les pouvoirs publics à différents niveaux pour une meilleure acceptation et pertinence de l'outil, (vi) et le choix crucial d'un organe « central » reconnu pour sa fiabilité.

Deux grands systèmes de suivi développés à l'étranger ont été étudiés de manière approfondie :

- En Suède, un système de suivi environnemental suédois est déployé depuis 1978 et coordonné par la *Swedish Environmental Protection Agency* (EPA) pour le compte de l'Etat ;
- En Suisse, l'*Office Fédéral de l'Environnement* (OFEV) est chargé par l'Etat fédéral de coordonner un système de suivi de l'environnement destiné à appuyer les prises de décisions politiques.

D'autre part, la tâche B est chargée d'appuyer l'élaboration des sous-maquettes et maquettes produites dans le cadre de la tâche A, par la fourniture d'éléments sur la gouvernance des dispositifs nationaux « candidats » aux maquettes (chap. 3.2.2). Dans ce but, le volet « Gouvernance » d'une Grille d'Analyse des Dispositifs a été rédigé puis soumis à une vingtaine de dispositifs en lien avec la tâche A du projet, pour réaliser un état des lieux de l'existant. L'exploitation de ce volet de l'enquête a été effectuée dans le cadre de la tâche A, les informations contenues dans les grilles d'analyse des dispositifs ayant été utilisées dans le cadre de l'élaboration des sous-maquettes.

3.1 Contexte et problématique

La simple addition d'éléments des dispositifs existants de suivi, conçus indépendamment les uns des autres et possédant chacun leurs propres finalités, protocoles de mesure, opérateurs et organisation, a peu de chance de constituer un ensemble cohérent. Il faut parvenir à développer **une stratégie d'ensemble** du point de vue de l'organisation et du fonctionnement du système de dispositifs et de la synthèse des informations qui en sont issues.

Dans ce contexte, la tâche B étudie d'abord la gouvernance de systèmes de suivi multi-dispositifs de manière générale, avant de s'intéresser à des exemples précis (chap. 3.2.1).

Par « **systèmes de dispositifs** » ou « systèmes de suivi composites » ou système de suivi multi-dispositifs » on entend ici un ensemble de dispositifs articulés entre eux autour d'une même finalité (ou d'un même objectif), portant sur la collecte ou la synthèse de données de biodiversité.

La **gouvernance** se rapporte à l'étude du fonctionnement de ces ensembles coordonnés de dispositifs en matière de :

- de processus de définition d'objectifs, en amont du/des suivi(s),
- d'obtention, d'archivage et de diffusion des données,
- d'organisation pour l'analyse des données, d'interprétation et discussions des résultats,
- de communication,
- de capacité d'apprentissage,
- de lien avec la décision rendue possible par le système de suivi.

Il s'agit ici d'élargir le champ des références en étudiant des systèmes de suivi continus mis en place dans d'autres pays ou dans d'autres domaines environnementaux. Le travail est d'abord bibliographique (recherche et analyse des principales références sur la gouvernance de systèmes de suivi) avant de sélectionner puis d'analyser deux cas parmi les plus pertinents, pour en tirer si possible des enseignements de portée générale.

D'autre part, la tâche B est chargée d'appuyer l'élaboration des sous-maquettes et maquettes produites dans le cadre de la tâche A, par la fourniture d'éléments sur la gouvernance des dispositifs nationaux « candidats » aux maquettes (chap. 3.2.2).

3.2 Méthodes

3.2.1 Etude de la littérature scientifique et d'exemples spécifiques déployés à l'étranger

Cette première sous-tâche correspond à l'objectif d'élargissement des références, et comprend les volets suivants :

- L'examen de la littérature scientifique sur la gouvernance des systèmes de suivi composites ou multi-dispositifs,
- L'étude de cas particuliers pris hors du contexte national ou du domaine forestier.

Ce travail s'est largement appuyé sur le stage de Master 2 de Marie Cluzel (Master Sciences politiques Bordeaux) réalisé au GIP Ecofor, au premier semestre 2021 (janvier-juillet).

- *Note de synthèse sur les principes de gouvernance des systèmes de suivi*

Une synthèse de la littérature a été réalisée sur la gouvernance de systèmes de suivi environnementaux aux échelles nationale, européenne ou mondiale, afin de dresser un état des lieux des questions qui se posent et écueils ; et de mettre en lumière des facteurs clés de réussite.

Afin de guider la recherche et l'analyse des principales références pertinentes en matière de systèmes d'observation (principes et gouvernance), plusieurs axes d'intérêt ont été identifiés au préalable :

- **Fonctionnement de la coordination des dispositifs** : il s'agit de s'intéresser (i) aux critères qui guident le choix d'un organisme central chargé de la coordination des dispositifs, (ii) aux instances existantes au sein du système de dispositifs et (iii) à la répartition des rôles et compétences entre dispositifs au niveau de l'ensemble ;
- **Processus de définition des objectifs du suivi** : une attention particulière est portée sur ce processus et sa place dans l'élaboration du système de suivi, notamment sur le choix du type d'objectifs (généraux de type « surveillance » ou ciblés, autour d'hypothèses précises) et sur les acteurs impliqués dans leur définition ;
- **Cycle de vie des données** au niveau (i) de leur acquisition (relevés de terrain, assemblage ou fusion des données...) (ii) de leur archivage (type de bases de données et hébergement), (iii) du processus de validation (organisation humaine et juridique de ce point de vue) et (iv) des règles de diffusion et accès possibles à ces données ;
- **Organisation pour l'analyse des données, l'interprétation et la discussion des résultats** : Comment s'articulent les différents types d'observations (notamment entre observations protocolées et non protocolées...) ? Qui est impliqué dans le processus d'analyse des données et comment se met-on d'accord, notamment sur le choix des indicateurs ?
- **Capacité d'apprentissage du système** : cela comprend le processus d'amélioration continue des observations, les liens avec la recherche, le mise en place éventuelle d'une gestion forestière adaptative (développement de connaissances délibérément organisé au sein même de la gestion et procédure définie pour ajuster la gestion en temps réel à partir de cet apprentissage) ;

- **Stratégie de communication** vers différents publics (grand public, gestionnaires, décideurs...) et entre différentes échelles (communication à la fois ascendante et descendante, entre le niveau local et le niveau national) ;
- **Qualité de dialogue entre les acteurs impliqués** au sein du système de suivi, en particulier avec les opérateurs des relevés (bénévoles ou professionnels) et les gestionnaires ou propriétaires des terrains concernés (dont sont attendues parfois des informations ou autorisation d'accès, etc.) ;
- **Liens avec la décision rendue possible par le système de suivi** : englobe l'ensemble des interactions formelles ou informelles entre le système de suivi et la décision publique ;
- **Les financements** : il s'agit de s'intéresser à l'adéquation entre les financements disponibles et les besoins, à la nature des financements (publics, privés ou autofinancement), à leur stabilité dans le temps (financements sécurisés ou non), leur affectation...
- *Etudes de cas à l'étranger*

Différents exemples de systèmes de suivi d'envergure nationale ont été rencontrés dans la littérature ou sur internet : sans rechercher l'exhaustivité, ces exemples ont été reportés dans un tableau récapitulatif ([Annexe III-D](#)).

Deux cas d'étude ont ensuite été sélectionnés. Cette sélection s'est faite sur plusieurs critères : (1) les systèmes suivent un ou plusieurs compartiments de l'environnement et possèdent une envergure nationale ; (2) ils sont constitués de dispositifs indépendants mais coordonnés entre eux ; (3) des informations à jour sont disponibles et accessibles en français ou en anglais. Ce dernier critère a conduit à écarter de nombreux réseaux, comme ceux déployés en Chine (dont le *Chinese Forest Biodiversity Monitoring Networks*) ou l'*Ecological Monitoring and Assessment Network* au Canada, qui ne semble plus être actif (aucune information à jour disponible).

Deux systèmes de suivi nationaux ont été retenus et étudiés de manière plus approfondie, à partir de l'étude de documents et d'entretiens avec leurs coordinateurs :

- le système de suivi environnemental suédois coordonné par la Swedish Environmental Protection Agency (EPA) ;
- le système de suivi de l'environnement suisse coordonné par l'Office Fédéral de l'Environnement (OFEV).

3.2.2 Etude des dispositifs de suivi nationaux « candidats » aux maquettes sous l'angle de la gouvernance

Cette deuxième sous-tâche s'intéresse à la gouvernance des dispositifs nationaux de suivi de la biodiversité des forêts métropolitaines. Les dispositifs de suivi sélectionnés dans le cadre de la tâche A (candidats aux maquettes) ont ainsi fait l'objet d'une analyse sous l'angle de leur gouvernance. Le travail s'est basé principalement sur la rédaction et l'exploitation du **volet « gouvernance » de la Grille d'Analyse des Dispositifs**, utilisée comme support d'enquête auprès des gestionnaires des dispositifs.

Les questions sur la gouvernance ([cf. Tab. X](#)) portent sur le processus de définition d'objectifs de suivi, sur le cycle de vie des données (collecte, hébergement, diffusion), sur le processus d'élaboration des indicateurs, sur le réseau d'acteurs et en particulier les liens avec la recherche, l'expérimentation et les autres dispositifs de suivi, et enfin sur les financements.

Tab. X. Grille d'Analyse des Dispositifs, Volet Gouvernance

| Qualités | Questions | Précisions |
|---|--|--|
| Processus de définition d'objectifs de suivi | <i>A quel(s) objectif(s) de suivi le dispositif répond-t-il ?</i> | Préciser si certains de ces objectifs portent directement sur la biodiversité. Distinguer si possible : dispositif de surveillance et dispositif de suivi autour d'hypothèses ciblées. |
| | <i>Qui a défini ces objectifs ?</i> | |
| Réseau d'acteurs | <i>Quelle est la capacité du dispositif à ajuster ses objectifs de suivi, en fonction de l'émergence de nouveaux enjeux ?</i> | Si oui : préciser de quelle manière. Donner si possible des exemples. |
| | <i>Quels organismes privés ou publics sont impliqués dans le dispositif de suivi ? Indiquer le rôle de chacun d'eux.</i> | Identifier tous les acteurs et indiquer le statut et le rôle de chacun d'eux. |
| | <i>Quels acteurs de la recherche sont impliqués dans le dispositif à un moment à un autre ? (des personnes, des fonctions, des liens institutionnels ou non...)</i> | N.B : la question cible les acteurs de la recherche impliqués dans la gouvernance du réseau ou dispositif. |
| Lien avec la recherche et les autres dispositifs | <i>Comment le dispositif assure-t-il l'acquisition de la compétence naturaliste, puis son maintien ? Comment le dispositif s'assure-t-il de la qualité des déterminations d'écosystème, d'espèces... ?</i> | NB. Par compétence naturaliste, on entend par exemple la détermination d'espèces, d'habitats, etc. |
| | <i>Le système de dispositif est-il en lien avec la communauté de recherche ? Si oui, de quelle manière ?</i> | N.B: on parle ici de liens au sein aussi bien qu'à l'extérieur du dispositif. |
| | <i>Le dispositif est-il mis en lien avec des dispositifs expérimentaux ou vice versa ?</i> | Si oui : Préciser lesquels et de quelle manière. |
| Financements actuels | <i>Le dispositif s'inspire-t-il, d'une manière ou d'une autre, des dispositifs expérimentaux existant ou de leurs résultats ?</i> | Si oui : Préciser lesquels et de quelle manière. |
| | <i>Le dispositif est-il en lien avec d'autres dispositifs de suivi ou de surveillance de la biodiversité / des écosystèmes ?</i> | Si oui : Préciser lesquels et de quelle manière. |
| | <i>Actuellement, quels sont les sources et les montants annuels des principaux financements qui supportent le programme de suivi ? (y compris auto-financement)</i> | Pour chaque financement identifié, indiquer : le financeur, le montant annuel, et si possible le caractère pérenne / non-pérenne du financement. |
| Cycle de vie des données | <i>Quelle est la tendance globale du budget alloué au programme de suivi ces 5 dernières années ?</i> | Stable/croissante/décroissante/ incertaine |
| | <i>Comment les données sont-elles structurées et archivées ?</i> | Préciser s'il existe une base de données structurée et par qui elle est hébergée, et si elles sont archivées. |
| | <i>Les données collectées par le dispositif sont-elles accessibles et par qui ?</i> | Préciser par quel type de public Préciser l'organisation de la diffusion / qui est habilité à diffuser les données. |
| | <i>Les données diffusées sont-elles des données brutes ou des données traitées ? Existe-t-il une procédure ou une instance de validation des données avant diffusion ?</i> | Préciser si les données accessibles sont brutes / recodées ou filtrées (agglomération des résultats ou floutage géographique par exemple). |
| | <i>Les données collectées par le dispositif contribuent-elles à des systèmes de rapportage ou de synthèse de données de biodiversité ? Précisez lequel ou lesquels.</i> | Dispositif de synthèse de données de biodiversité : type ONB, IGD |
| Indicateurs | <i>Comment se met-on d'accord sur le choix des indicateurs de biodiversité et leur interprétation ? Qui est impliqué ?</i> | Préciser s'il existe une instance spécifique et comment sont prises les décisions. |

Les enquêtes auprès des dispositifs de suivi ont été réalisées dans le cadre d'un travail commun entre la tâche A et la tâche B en 2021 et début 2022 (voir chapitre 2.2.3, analyse des dispositifs nationaux).

- **Première vague d'entretiens :**

1. Réseau National de suivi à long terme des ECOSystèmes FORestiers (Renecofor) de l'ONF
2. Réseau de Mesure de la qualité des sols (RMQS) d'INRAE
3. Inventaire forestier national de l'IGN
4. Protocole de Suivi dendrométrique des Réserves Forestières (PSDRF) de RNF
5. Réseau de parcelles de référence de l'AFI (pour le suivi des futaies irrégulières)
6. Suivi Temporel des Oiseaux Communs (STOC) de Vigie-Nature
7. Suivi des chauves-souris (Vigie-Chiro) de Vigie-Nature
8. Suivi Photographique des insectes pollinisateurs (SPIPOLL) de Vigie-Nature
9. Suivi Temporel des Rhopalocères de France (STERF) de Vigie-Nature
10. Suivi des ongulés sauvages de l'OFB
11. Suivi de la bécasse de l'OFB
12. L'Observatoire « Rapaces » de la LPO
13. Les données opportunistes de la LPO
14. L'Estimation des populations d'oiseaux communs (EPOC) coordonné par la LPO et le MNHN

- **Deuxième vague d'entretiens** (dispositifs considérés comme potentiellement intéressants en tant que dispositifs complémentaires au cœur des maquettes) :

1. Réseaux naturalistes de l'ONF
2. Réseau de suivi systématique des dommages forestiers du Département de la Santé des Forêts (MASA)
3. Réseau des correspondants-observateurs du DSF (MASA)
4. In-Sylva (infrastructure nationale de recherche pour la gestion adaptative des forêts)
5. Vigie-Flore (Suivi des changements d'abondance des espèces végétales les plus communes en France) de Vigie-Nature
6. L'Indicateur de Biodiversité Potentielle (IBP) du CNPF
7. Observatoire Orchamp (LECA)
8. Petites chouettes de montagne (ONF-LPO)

L'exploitation de ce volet de l'enquête a été effectué dans le cadre de la tâche A, toutes les informations contenues dans les grilles d'analyse des dispositifs ([Cf. Partie III-B, Grilles d'Analyse des Dispositifs](#)) ayant été utilisées dans le cadre de l'élaboration des sous-maquettes ([Cf. Partie II, Sous-maquettes](#)).

3.3 Principaux résultats

3.3.1 Principes de gouvernance des systèmes de suivi

La note de synthèse sur les principes de gouvernance des systèmes de suivi peut être consultée dans la [partie II-M du rapport](#). Seuls les points principaux sont repris ci-dessous.

La littérature étudiée montre bien **l'intérêt de déployer des systèmes de suivis « multi-dispositifs »**. Les auteurs mettent en avant les avantages suivants :

- L'assemblage de plusieurs dispositifs permet une augmentation globale de la couverture du suivi, dans les quatre dimensions qui le caractérisent : la taille de l'échantillon (liée à la puissance statistique du dispositif), la couverture biologique, et les couvertures spatiale et temporelle ;
- Le croisement d'informations sur différents compartiments de l'écosystème, rendu possible par la complémentarité de différentes sources de données, est utile à la compréhension des dynamiques écologiques (exemple du croisement de données « habitat » et de données « espèces ») ;
- Le croisement d'information peut également documenter différents aspects ou processus d'un même objet biologique (en particulier par la combinaison de différentes méthodes d'observation) ;
- L'étude des résultats de plusieurs dispositifs sur des variables similaires permet de tirer des conclusions plus fiables, sans avoir à augmenter l'effort mis en œuvre par les dispositifs (d'un point de vue statistique, les similarités entre dispositifs sont des effets additifs permettant d'expliquer une part plus importante de la variation considérée) ;
- La coordination de plusieurs dispositifs au sein d'un système de suivi permet une plus grande efficacité économique par l'amélioration de l'allocation des efforts et des fonds pour le suivi ;
- La communication auprès de différents publics est facilitée par des données plus facilement accessibles (bases de données communes) et des résultats intégrés en un seul ensemble ;
- Un système de suivi va peser plus fortement dans la décision publique.

La note de synthèse bibliographique dresse un **état des lieux des questions qui se posent et écueils** lors de la mise en place d'un système de suivi multi-dispositifs, mettant en lumière les facteurs clés de réussite :

- le financement et sa variabilité dans le temps apparaissent comme un point crucial dans la mise en place et la pérennité d'un système de suivi. En particulier, la préfiguration du projet doit être pensée en adéquation avec les moyens (humains et matériels) disponibles ou potentiellement disponibles ;

- Pour être efficace, le suivi nécessite des objectifs précis et définis en amont, autour desquels organiser le système de suivi : il s'agit d'identifier quelles informations spécifiques fournir, quelles composantes de la biodiversité suivre, et à quelles échelles spatiales et temporelles ;
- Une étape importante consiste à établir une stratégie d'échantillonnage tenant compte de l'hétérogénéité méthodologique dans l'espace et dans le temps entre les dispositifs, celle-ci pouvant s'appuyer sur le déploiement de nouveaux protocoles communs ;
- La combinaison des données peut se faire à différents niveaux (des données brutes, de dénominateurs communs, des estimations de la valeur de l'effet...) et selon différentes méthodes ; elle doit prendre en compte la différence entre les jeux de données en matière de sélection des sites à échantillonner et d'erreurs de mesure (y compris la détectabilité des espèces) ; des choix sont à faire au niveau de la pondération des données, en fonction de différents critères (pour compenser des sur- ou sous représentations, selon le degré de menace pesant sur certaines espèces, etc.) ;
- La continuité temporelle du suivi doit être assurée autant que possible par l'utilisation de méthodes standardisées et détaillées, et grâce à un soutien financier pérenne ;
- Le choix des indicateurs doit être justifié et rationnel (faisabilité) ; il doit comprendre un travail sur les seuils permettant de qualifier la valeur de l'indicateur (déterminer les valeurs limites au-delà desquelles la situation est considérée comme favorable ou défavorable par exemple) ;
- Afin que le suivi soit utile, il est essentiel d'avoir une stratégie de communication et de publier les résultats, notamment afin de démontrer que les financements sont utilisés à bon escient et de garder la confiance des différentes parties prenantes ;
- L'outil doit être en capacité de s'adapter, de se ré-ajuster lorsque c'est nécessaire, avec des changements de priorités, de protocoles, de méthodes (les auteurs parlent de système de suivi adaptatif) ; dans cette optique il est utile de prévoir, dès la phase de conception, que les objectifs de suivi pourront être ajustés plus tard selon les contraintes ou ce qui a été constaté dans la pratique ; en revanche un arbitrage est parfois nécessaire entre suivi adaptatif et continuité temporelle des séries de données.

Pour concevoir un système de suivi efficace, **des liens sont à tisser avec une variété d'acteurs.**

- Il est essentiel d'impliquer toutes les parties prenantes dans la conception du système de suivi pour s'assurer de l'acceptation du projet, de sa pertinence et de la prise en compte des résultats du suivi dans les décisions ; il s'agit aussi de mobiliser les acteurs afin qu'ils y contribuent directement, en cela l'intégration des différents dispositifs doit pouvoir bénéficier aux différentes parties prenantes afin qu'elle soit acceptée et efficace ;
- Le choix de l'organisme coordinateur du système est primordial : un organisme fiable, possédant un leadership fort et développé permet de faciliter l'acceptation des parties prenantes du système de suivi ;

- La contribution de dispositifs de suivi participatif, faisant appel à des citoyens bénévoles, est intéressante en complément des informations d'autres dispositifs professionnels ; les dispositifs participatifs possèdent des avantages importants au regard des dispositifs professionnels (coûts de collecte des données plus faibles, visibilité et légitimité généralement plus importantes, plus grande capacité à se maintenir dans le temps) ; en outre ils bénéficient de l'essor de nouvelles technologies facilitant l'identification des espèces et rendant de ce fait le suivi participatif plus fiable ;
- Des liens spécifiques sont à établir entre avec la gestion forestière, pour une prise en compte optimale des résultats du suivi dans les décisions de gestion : la mise en place d'un outil de suivi intégrant des mécanismes pour effectuer des retours aux gestionnaires, afin qu'ils améliorent leur gestion en fonction des résultats, est particulièrement efficace (gestion forestière adaptative).

3.3.2 Etudes de deux cas particuliers à l'étranger (Suède, Suisse)

Deux systèmes nationaux de suivi de l'environnement (en Suède, en Suisse) ont fait l'objet d'une description du point de vue de leur gouvernance, les deux notes correspondantes sont disponibles dans la [partie II-N du rapport](#). Seules quelques caractéristiques générales de ces deux vastes systèmes de suivi sont reprises ci-dessous :

- Le système de suivi environnemental suédois ([National environmental monitoring](#)) est déployé depuis 1978 et coordonné par la *Swedish Environmental Protection Agency* (EPA) pour le compte de l'Etat. Cet observatoire de l'état de l'environnement et de ses changements rassemble et soutient différents dispositifs au sein d'un ensemble cohérent et contraignant. Pour combler les manques laissés par les réseaux préexistants, l'EPA a soutenu le prolongement de certains d'entre eux et la création de nouveaux dispositifs. La biodiversité, par exemple, ne fait pas l'objet d'un suivi dédié : elle est transversale aux différents dispositifs et de plus en plus suivie bien qu'elle n'ait pas été considérée comme une priorité au départ. On peut citer le déploiement, depuis 2015, du suivi des champignons présents dans les sols forestiers par séquençage de l'ADN environnemental (métabarcoding).
- En Suisse, l'*Office Fédéral de l'Environnement* (OFEV) est chargé par l'Etat fédéral de coordonner un [système de suivi de l'environnement](#) destiné à appuyer les prises de décisions politiques. L'OFEV a pour mission de réunir, harmoniser et agréger au niveau national des données de suivi de l'environnement. Pour compléter l'existant, plusieurs réseaux d'observation nationaux ont été montés et confiés à des prestataires, publiques ou privés (cas du [Monitoring de la Biodiversité en Suisse](#)).

3.2 Conclusions et perspectives

Les éléments liés à la gouvernance sont des aspects essentiels à la réussite d'un projet comme PASSIFOR-2, visant l'élaboration puis le déploiement d'un système de suivi composite intégrant différents dispositifs existants.

La difficulté de cette tâche B est liée à son domaine d'expertise éloigné du champ des connaissances et compétences de la responsable de tâche et des membres de l'équipe projet. En outre, le contexte sanitaire (fermeture des frontières en raison de la pandémie de Covid-19) n'a pas permis de réaliser les missions à l'étranger initialement programmées pour l'étude des systèmes de suivi de l'environnement en Suisse et en Suède.

Les travaux réalisés sont restés généraux et sont intervenus principalement en appui à l'élaboration des maquettes. Le volet « gouvernance » de l'enquête réalisée auprès des responsables des dispositifs est limité à des questions techniques ou factuelles. Les avis et positionnements des acteurs sur le principe d'un suivi multi-dispositifs de la biodiversité en forêt, ou sur des propositions concrètes de mise en application, n'ont pu être approchées jusque-là (notamment par manque d'expertise en Sciences Humaines et Sociales).

De nombreux approfondissements seraient nécessaires afin de pouvoir proposer véritablement des structures de gouvernance et des modes de fonctionnement pour les maquettes envisagées dans le cadre de la tâche A, avec des éléments d'évaluation de leurs avantages et inconvénients. Dans une première étape, la confrontation des projets de sous-maquettes et maquettes (i) aux opérateurs concernés et (ii) à un panel d'experts en Sciences Humaines et Sociales pourrait être envisagée.

L'approfondissement des questions de gouvernance autour des maquettes est un aspect important à prendre en charge dans le cadre d'un PASSIFOR-3 ([cf. Annexe III-A, compte-rendu du webinaire final du projet](#)).

Chap. 4 : Composantes de la biodiversité en forêt suivies

Auteurs du chapitre :

Christophe Bouget (INRAE EFNO), Hélène Le Borgne (INRAE EFNO), Aristide Chauveau (INRAE EFNO)

Coordinateurs scientifiques de la tâche :

Christophe Bouget, Ingénieur-chercheur, INRAE- Unité "Ecosystèmes Forestiers" Domaine des Barres, F-45290 Nogent-sur-Vernisson, 02.38.95.05.42, christophe.bouget@inrae.fr

Antoine Lévêque, Office Français de la Biodiversité / DSUED, Directeur de projet "Surveillance de la biodiversité terrestre", PatriNat, Muséum national d'Histoire naturelle, CP135, 43 rue Buffon - 75005 Paris, antoine.leveque@mnhn.fr

Résumé

La tâche C de PASSIFOR-2 vise l'identification d'un cortège de groupes taxonomiques et/ou écologiques, candidats pertinents au suivi de la biodiversité en forêt métropolitaine.

Le chapitre 4.1 dresse un tableau quantitatif de la biodiversité en forêt, en décrivant (i) le nombre total d'espèces continentales terrestres et dulçaquicoles en France métropolitaine, d'après le référentiel taxonomique national (Taxref v13) du MNHN, et (ii) la proportion d'espèces présentes (facultatifs et obligatoires) dans les forêts françaises, après avoir défini le degré d'affinité à la forêt. Faute de spécialistes taxinomistes disponibles, le tableau final comporte encore beaucoup de lacunes.

Le chapitre 4.2 sélectionne des groupes cibles réactifs, représentatifs et complémentaires pour le suivi de la biodiversité en forêt. Cette sélection a impliqué plusieurs étapes : (i) établir la liste des critères, i.e. les atouts et contraintes pratiques et écologiques, (ii) établir la liste des groupes taxonomiques ou taxo-écologiques de la biodiversité en forêt, expertisables, avec la liste des experts consultables, (iii) faire renseigner la grille multicritères par un expert de chaque groupe, (iv) conduire l'analyse multicritères multi-groupes avec la méthode PROMETHEE, (v) interpréter et compléter les résultats bruts de l'analyse. L'analyse a été conduite pour classer 62 groupes taxonomiques en fonction de 46 critères biologiques, taxonomiques et pratiques, pour plusieurs objectifs de suivi, impliquant une pondération variable des critères. Nous avons démontré un effet opérateur non-négligeable dans l'évaluation de la grille multicritères d'un groupe sur le classement final du groupe. Nos résultats soulignent que le classement est identique pour chaque objectif de suivi étudié, et comporte aux premiers rangs : les oiseaux (ou pics selon la résolution taxonomique de l'analyse), la flore vasculaire (ou Ptéridophytes, Phanérogames et arbres), les Champignons ectomycorhiziens, les Chiroptères, les Bryophytes, les Gastéropodes terrestres. Même s'ils dominent le nombre de groupes testés, aucun groupe d'Arthropodes ne figure dans le haut du classement.

À l'analyse multicritères brute, nous avons ajouté une analyse séquentielle, en opérant une première sélection des groupes les mieux classés sur la base des critères taxonomiques et biologiques

seulement, avant une seconde analyse sur cette sélection de groupes avec les seuls critères pratiques. La première étape montre une avancée des Coléoptères saproxyliques, des Champignons Hydnes et des Lichens, et un léger recul au classement des Bryophytes. Même si les résultats finaux sont assez semblables à l'analyse brute après l'analyse pratique, notons l'apparition des Fourmis, des Orthoptères et des Rhopalocères devant les Bryophytes et les Gastéropodes terrestres en haut du classement. Une analyse multicritères partielle (purement taxo-écologique), suivie d'un post-traitement sur le coût minimal d'échantillonnage, maintient la sélection des Oiseaux, de la flore vasculaire et des Bryophytes, mais écarte les Champignons ectomycorhiziens, les Chiroptères, les Gastéropodes terrestres, au profit des Orthoptères, des Champignons Hydnes, des Reptiles et des Odonates.

Dans plusieurs pays dotés d'un système de suivi de la biodiversité (Suisse, Canada, Suède, Nouvelle-Zélande, Allemagne), la sélection de groupes taxonomiques concorde pro parte avec notre analyse multicritère, en suggérant les plantes vasculaires, les Bryophytes, les Champignons du sol, les Oiseaux, les Mollusques, Chiroptères, mais ajoute également les Lichens, les Araignées, les Rhopalocères, les Annélides, les Acariens et les Mammifères/Micromammifères. De même, la sélection préconisée par le guide des suivis directs de la biodiversité en forêt (Burrascano *et al.* 2022) suggère, comme notre analyse, les plantes vasculaires, les Bryophytes, les Champignons, les Oiseaux et les Chiroptères, mais ajoute aussi les Lichens, les Coléoptères et les Araignées.

L'émergence de technologies devenues accessibles (électronique, capteurs, méga-calculateurs numériques, génomique) suscite des innovations sur les outils d'échantillonnage et d'identification, applicables aux suivis 2.0 de la biodiversité forestière. Dans le chapitre 4.3, trois fiches dressent un état de l'art bibliographique des principes et des applications de ces méthodes (i) acoustiques, (ii) optiques ou (iii) génétiques, et des opportunités du deep learning pour l'automatisation de la reconnaissance des espèces.

4.1 Tableau de la biodiversité forestière en France métropolitaine

4.1.1 Contexte et objectifs

Il s'agit, dans ce chapitre, de faire un état des connaissances sur l'identité de la biodiversité forestière, en dressant un tableau quantitatif de la biodiversité forestière, pour l'ensemble des groupes fondés sur des frontières taxonomiques ou taxo-écologiques, comme les coléoptères coprophages, les coléoptères saproxyliques, les Mollusques gastéropodes terrestres, en décrivant (i) le nombre total d'espèces en France métropolitaine, enregistrées dans le référentiel Taxref du MNHN, et (ii) le nombre ou la proportion d'espèces présentes (facultatives et obligatoires) dans les forêts françaises métropolitaines.

Ce travail n'inclut pas la rédaction du catalogue des espèces forestières.

- *Tableau de la biodiversité en France métropolitaine*

Le tableau de référence de la biodiversité continentale (non marine) métropolitaine terrestre et dulçaquicole a été établi par extraction de Taxref v13. Les catégories suivantes n'ont pas été retenues dans le décompte des espèces : introduit non établi (dont cultivé / domestique), douteux, mentionné par erreur, absent, disparu, éteint, endémique éteint, introduit éteint, occasionnel. Le nombre d'espèces a été mesuré par groupe, à la résolution taxonomique variable de la classe ou de l'ordre.

- *Définition du statut forestier (degré d'affinité à la forêt) des espèces*

En nous inspirant des classifications préexistantes (e.g. Buchanan *et al.* 2011, Schneider *et al.* 2021...), nous avons initialement défini 3 catégories sur le gradient d'association – dépendance à la forêt. **Par souci de simplicité, la typologie a été réduite à 2 classes (forestière stricte ou occasionnelle vs non-forestière).**

- **forestière stricte** (= sylvicole, sylvatique, incluant oligoèce sélective & sténoèce spécialiste), inféodée aux milieux forestiers, avec une forte affinité pour les ambiances forestières fermées, ou nécessitant la présence d'arbres vivants, dépérissants et morts, leurs composants (feuilles, écorce, bois, fruits, cônes...), les dendromicrohabitats qu'ils portent (cavités, suintements, fentes...), ou espèce terricole/humicole associée aux sols et à la litière forestiers, dépendant d'autres taxa forestiers (phytophage de la flore forestière, fongicole des champignons forestiers, parasite, prédateur, parasitoïde d'espèces forestières, pholéophile des nids de Vertébrés forestiers...), ou privilégiant les boisements, et donc plus fréquemment présente en milieu forestier, ou périforestière liée aux bords de forêts (lisières), ou liée étroitement aux milieux associés, ouverts ou aquatiques (mares, ruisseaux, fossés forestiers ; stades forestiers pionniers semi-ouverts, clairières). Est considérée ici comme sylvicole stricte : (i) espèce ripicole recherchant la présence d'un couvert arboré sur les berges, (ii) espèce pour laquelle la présence d'une ripisylve est indispensable, (iii) espèce lignicole (liée aux tissus ligneux) et arboricole rencontrée également dans les milieux arborés non forestiers (parcs, haies, vergers, bocage).
- **forestière occasionnelle**, non inféodée aux milieux forestiers mais les fréquentant régulièrement ou de façon saisonnière, localisée de façon partagée entre milieu forestier et milieux non forestiers, incluant les espèces euryèces (= eurytopes = généralistes = ubiquistes) présentes dans de nombreux types d'habitats sans préférence marquée pour l'habitat forestier, les espèces oligoèces non-sélectives, les espèces qui sont présentes dans les milieux associés, ouverts ou aquatiques, intra- ou extra-forestiers, sans préférence pour les conditions forestières autour de ces milieux.
- **non forestière** = absente en forêt, préférence marquée pour un type d'habitat non forestier, comme les grottes ou les bâtiments, incluant les espèces strictement inféodées à des habitats particuliers non forestiers comme les troglobies, les nivicoles, les halophiles, ou très anecdotiques en forêt.

4.1.2 Méthode de décompte des espèces forestières par groupe taxonomique

Le décompte des espèces forestières au sein de chaque subdivision taxonomique a été réalisé au moyen de l'une ou l'autre de ces deux stratégies contrastées : (i) dénombrement individuel forestier/non-forestier par espèce sur la liste exhaustive des espèces françaises métropolitaines, ou (ii) approximation de la proportion d'espèces par famille/ordre/genre, sur la base de valeurs établies dans un autre pays ou à dire d'expert.

Dans les deux cas, nous avons interrogé les bases de données disponibles sur les affinités d'habitat par groupe taxonomique et conduit des enquêtes auprès d'experts taxinomistes reconnus. Nous avons également fait le point sur les résultats émergeant d'autres initiatives en cours sur un objectif analogue. Ainsi, certains spécialistes naturalistes de l'ONF ont été missionnés par Ecofor pour une expertise sur les listes d'espèces forestières en appui au développement d'indicateurs pour l'Observatoire national de la biodiversité (convention ONF-ECOFOR n° 2019.02) ; ils ont établi une liste des espèces forestières de Vertébrés et de Flore, en faisant un bilan forestier/non-forestier par espèce. D'autre part, plusieurs experts se sont mobilisés pendant la rédaction des Indicateurs de Gestion Durable des forêts métropolitaines (IGD) pour établir des listes d'espèces forestières dans certains groupes taxonomiques.

Sauf exception (Bouget *et al.* 2019), le croisement avec des bases de données préexistantes n'a pas été fructueux. Par ex., la table des habitats du MNHN-INPN ne comporte pas de détails disponibles au-delà d'une distinction « eau douce » vs « terrestre ».

Après avoir conduit deux premiers cas d'étude pour 2 ordres d'insectes, les Coléoptères (C. Bouget) et Lépidoptères Rhopalocères (A. Lévêque), nous avons établi une liste d'experts par groupe pour leur

proposer une collaboration et une méthodologie. Les experts ont été consultés à distance : la liste des espèces françaises métropolitaines de leur groupe de spécialité leur a été envoyée, et nous leur avons suggéré de calculer la proportion des espèces forestières en cochant chaque espèce comme forestière/non-forestière, ou en estimant la sélection des espèces forestières de façon plus grossière.

Faute de spécialistes taxinomistes disponibles, le tableau final comporte encore beaucoup de lacunes. Pour le groupe des Algues, par exemple, la partition en espèces forestières /non-forestières n'a pas pu être entreprise. De nombreuses algues unicellulaires ont conquis des habitats terrestres très diversifiés, pourvu qu'ils soient au moins un peu humides. Des algues verdissent souvent les écorces d'arbres, ou occupent les mares forestières. D'après Taxref v13, 39 espèces d'algues ont un cycle en partie terrestre et en partie en eau douce, 27 espèces sont terrestres et 1522 espèces sont dulçaquicoles.

- *Recours aux expertises déjà disponibles*

En parallèle de ces sollicitations individuelles d'experts, nous avons compilé les documents déjà disponibles sur les listes d'espèces forestières, comme les expertises réalisées dans le cadre de l'ONB et des IGD (cf. ci-dessus), qui portent malheureusement toujours sur les groupes les mieux connus (Oiseaux, Amphibiens, Reptiles, Mammifères, Rhopalocères, Flore vasculaire) et ne permettent pas de combler des lacunes.

La littérature disponible sur le caractère forestier des espèces dans les pays limitrophes, nous a permis de compléter certaines décisions sur la Flore vasculaire (Heinken *et al.* 2022), les Bryophytes (Schmidt *et al.* 2013), les Lombrics, les Araignes, les Opilions, les Pseudoscorpions, les Hétéroptères, les Coléoptères, les Hyménoptères Aculéates, les Macrolépidoptères et les Oiseaux (Schneider *et al.* 2021), les Coléoptères coprophages (Buse *et al.* 2018), les Orthoptères (Gossner *et al.* 2015).

4.1.3 Résultats : tableaux de la biodiversité en forêt en France métropolitaine

■ Animaux Arthropodes

| Groupe1 | Groupe2 | Sous-groupe / composition | Nombre d'espèces | Nb d'espèces forestières (spécialistes et occasionnelles) | Proportion d'espèces forestières | Source | |
|-------------|--------------------------------|--|-------------------------------------|---|----------------------------------|-------------------------------------|--|
| Arachnides | Total | | 3516 | NA | NA | | |
| | Scorpiones | | 6 | NA | NA | | |
| | Araneae | | 1709 | 513 | 30% / 29% | C. Jacquet / Schneider et al. 2021 | |
| | Acarii | Ixodida + Mesostigmata + Sarcoptiformes + Trombidiformes | 1551 | NA | NA | | |
| | Opiliones | | 118 | 41 | 35% / 57% | E. Delfosse / Schneider et al. 2021 | |
| | Pseudoscorpiones | | 123 | NA | 56% | Schneider et al. 2021 | |
| Crustacés | Total | | 920 | NA | NA | | |
| | Isopoda | Isopoda terrestres seulement | 219 | 86 | 40% | P. Noël | |
| Entognathes | Collembola + Diplura + Protura | | 906 | NA | NA | | |
| Insectes | Total | | 39 449 | NA | NA | | |
| | Archaeognatha | | 52 | NA | NA | | |
| | Blattodea | | 38 | NA | NA | | |
| | Dermaptera | | 19 | NA | NA | | |
| | Embioptera | | 2 | NA | NA | | |
| | Ephemeroptera | | 144 | 7 | 5% | M. Brulin | |
| | Mantodea | | 7 | NA | NA | | |
| | Mecoptera | | 10 | 10 | 100% | P. Tillier | |
| | Megaloptera | | 3 | NA | NA | | |
| | Neuroptera | | 175 | 156 | 89% | P. Tillier | |
| | Phasmida | | 4 | NA | NA | | |
| | Plecoptera | | 195 | 0 | 0% | M. Brulin | |
| | Psocodea | | 117 | NA | NA | | |
| | Raphidioptera | | 18 | 18 | 100% | P. Tillier | |
| | Siphonaptera | | 96 | NA | NA | | |
| | Strepsiptera | | 13 | NA | NA | | |
| | Thysanoptera | | 265 | NA | NA | * | |
| | Trichoptera | | 473 | NA | NA | | |
| | Zygentoma | | 16 | NA | NA | | |
| | Insectes | Coleoptera | Total | 10890 | 8055 | 74% / 31% | C. Bouget / Schneider et al 2021 |
| | | | Scolytes (Curculionidae Scolytinae) | 162 | 157 | 97% | G. Parmain |
| | | | Carabidae | 1040 | 340 | 33% | C. Bouget |
| | | | Col. Saproxyliques | 2663 | 2663 | 100% | C. Bouget |
| | | | Coléoptères coprophages | 185 | 18 | 10% | P. Jay-Robert |
| | | Diptera | Total | 8868 | NA | NA | |
| | | | Tipuloidea | 465 | 288 | 62% | C. Quindroit |
| | | | Syrphidae | 561 | 112 | 20% | J.P. Sarthou |
| | | Hemiptera | Total | 3539 | NA | NA | |
| | | | Heteroptera | 1500 | 1000 | 66% / 11% | J.C. Streito / Schneider et al. 2021 |
| | | Hymenoptera | Total | 8630 | 2818 | 32% | C. Villemant |
| | | | Symphytes | 734 | 644 | 88% (stricte = 52%) | T. Noblecourt |
| | | | Formicidae | 229 | 41 | 18% / 17% | L. Péru / Schneider et al. 2021 |
| | | | Abeilles Apoidea | 956 | 58 | 6% / 7% | S. Gadoum / Schneider et al. 2021 |
| | | | Aculeata | 2235 | 65 | 3% / 10% | C. Villemant / Schneider et al. 2021 |
| | | | Parasitica | 5661 | 2109 | 37% | C. Villemant |
| | | | Chalcidoidea | 1329 | 266 | 20% | J.Y. Rasplus/G. Delvare |
| | | | Braconidae | 860 | 430 | 50% | Y. Braet |
| | | Lepidoptera | Total | 5545 | NA | NA | |
| | | | Rhopalocera | 260 | 39 | 15% / 22% | A. Lévêque / Schneider et al. 2021 |
| | | | Heterocera | 5285 | NA | 27% | Schneider et al. 2021 (Macrohétérocères) |
| | | Odonata | | 93 | NA | NA | |
| | | Orthoptera | | 237 | 190 | 80% | C. Lemoine |
| | Insectes aquatiques | Ephemeroptera p.p., Heteroptera p.p., Coleoptera p.p., Diptera p.p., Trichoptera p.p., etc | 1849 | NA | NA | | |
| | Myriapodes | Total | | 534 | 270 | 50% | J.J. Geoffroy |
| | | Diplopoda | | 303 | 151 | 50% | J.J. Geoffroy |
| | | Chilopoda | | 144 | 72 | 50% | J.J. Geoffroy |

- *Autres animaux*

| groupe1 | groupe2 | groupe3 | Nombre d'espèces | Nb d'espèces forestières (spécialistes et occasionnelles) | Proportion d'espèces forestières | Source | |
|----------------------|-------------------------|--|------------------|---|------------------------------------|----------------------------------|---------------|
| <i>Bryozoaires</i> | | | 13 | NA | NA | | |
| <i>Chordés</i> | Herpetofauna | Reptiles + Amphibiens | 85 | 47 | 55% | J.C. De Massary / C. Baudran | |
| | Reptiles | | 42 | 25 | 59% | C. Baudran | |
| | Amphibiens | Total | 43 | 22 | 50% | J.C. De Massary | |
| | | Amphibiens Anoures | 29 | 12 | 40% | J.C. De Massary | |
| | | Amphibiens Urodèles | 14 | 10 | 75% | J.C. De Massary | |
| | Ascidies | <i>Polycarpa errans</i> | 1 | 0 | 0% | | |
| | | Total | 123 | 73 | 60% | G. Gigot | |
| | Mammifères | Ongulés sauvages | | 14 | 8 | 58% | C. Baltzinger |
| | | Chiroptera | | 35 | 25 | 70% | L. Tillon |
| | | Micromammifères (Rongeurs + Insectivores) | | 49 | 15 | 30% | L. Tillon |
| Oiseaux | Total | 419 | 125 | 30% / 27% | F. Archaux / Schneider et al. 2021 | | |
| | Pics | | 10 | 9 | 90% | F. Archaux | |
| Poissons | | | 110 | NA | NA | | |
| <i>Cnidaires</i> | Hydrozoaires | | 9 | NA | NA | | |
| <i>Gastrotriches</i> | | | 53 | NA | NA | | |
| <i>Mollusques</i> | Bivalves | | 42 | NA | NA | | |
| | Gastéropodes | Total | 670 | NA | NA | | |
| | | Gastéropodes terrestres | 413 | 210 | 50 | O. Gargominy | |
| | Gastéropodes aquatiques | 260 | NA | NA | | | |
| <i>Porifères</i> | | | 6 | NA | NA | | |
| <i>Rotifères</i> | | | 486 | NA | NA | | |
| <i>Tardigrades</i> | | | 67 | NA | NA | | |
| <i>Vers</i> | Acanthocéphales | | 10 | NA | NA | | |
| | Annélides | Total | 377 | NA | NA | | |
| | | <i>Crassiclitella Lumbricina</i> (Vers de terre) | 152 | 58 | 38% / 20% | M. Hedde / Schneider et al. 2021 | |
| | | Enchytraeides | 53 | 3 | 5% | C. Pelosi | |
| | Nématodes | | 489 | NA | NA | | |
| | Némertes | | 2 | NA | NA | | |
| Plathelminthes | | 586 | NA | NA | | | |

- *Végétaux*

| groupe1 | groupe2 | groupe3 | Nombre d'espèces | Nb d'espèces forestières (spécialistes et occasionnelles) | Proportion d'espèces forestières | Source |
|----------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------|---|----------------------------------|--------------|
| <i>Algues</i> | Total | | 1760 | NA | NA | |
| | Diatomées | | 1260 | NA | NA | |
| <i>Bryophytes</i> | Hépatiques et Anthocérotes | | 334 | 200 | 60% | Y. Dumas |
| | Mousses | | 1005 | 553 | 55% | Y. Dumas |
| | Total | | 1339 | 773 | 58% | Y. Dumas |
| <i>Trachéophytes</i> | Angiospermes | | 7586 | 986 | 13% | Y. Dumas |
| | Gymnospermes | | 73 | 73 | 100% | R. Chevalier |
| | Ptéridophytes | | 176 | 106 | 60% | R. Chevalier |
| | Total | Flore vasculaire | 7835 | 1175 | 15% | Y. Dumas |
| | Phanérogames | Angiospermes + Gymnospermes | 7659 | 1532 | 20% | R. Chevalier |

- *Autres règnes*

| Règne | groupe1 | groupe2 | groupe3 | Nombre d'espèces | Nb d'espèces forestières (spécialistes et occasionnelles) | Proportion d'espèces forestières | Source |
|------------------|-----------------|-------------|---|------------------|---|----------------------------------|---------------|
| <i>Bacteria</i> | Cyanobactéries | | | 163 | NA | NA | |
| | Protéobactéries | | | 16 | NA | NA | |
| <i>Chromista</i> | Algues | Diatomées | | 1399 | NA | NA | |
| | Cryptophytes | | | 8 | NA | NA | |
| | Foraminifères | | | 1 | NA | NA | |
| <i>Fungi</i> | Ascomycètes | Champignons | Total | 11748 | NA | NA | |
| | | | Champignons Endophytes | NA | NA | NA | |
| | | | Pezizales | 953 | 667 | 70% | N. Van Vooren |
| | Basidiomycètes | Champignons | Lichens | 3135 | NA | NA | |
| | | | Total | 9585 | NA | NA | |
| | | | Ectomycorhiziens | ? | ? | 100% | |
| | | | Polypores = Polyporales, Hymenochaetales, Gloeophyllales de forme polyporoïde | 400 | 380 | 95% | G. Corriol |
| | | Lichens | | 30 | NA | NA | |
| | Lichens | Total | 3165 | 1425 | 45% | R. Poncet | |
| Chytridiomycètes | | | 2 | NA | NA | | |
| Zygomycètes | | | 7 | NA | NA | | |
| <i>Protozoa</i> | Myxomycètes | | 475 | NA | NA | | |

4.2 Analyse de Décision Multicritères pour la sélection de groupes taxonomiques candidats à divers suivis de biodiversité en forêt tempérée

4.2.1 Objectif

L'objectif de ce volet est de sélectionner des groupes cibles de la biodiversité en forêt, réactifs, représentatifs, complémentaires pour le suivi de la biodiversité, en incluant les intérêts et les contraintes écologiques et pratiques.

La complémentarité d'informations écologiques entre groupes a été abordée ici. La complémentarité d'informations écologiques et la complémentarité méthodologique (possibilités d'interférences ou de combinaison) entre les suivis directs et les mesures d'indicateurs indirects (dendrométriques, paysagers...) n'a pas été examinée dans cette tâche C (Blasi *et al.*, 2010). Les perspectives liées au modèle économique et organisationnel (nature des opérateurs, cf. tâche A ; taille et configuration du plan d'échantillonnage, cf. tâche E) n'ont pas été examinées en tâche C.

L'ensemble des éléments détaillés Tabsup et Figsup cités dans ce chapitre sont archivés dans [l'Annexe III-E « Annexes du rapport sur l'Analyse de Décision Multicritères »](#) (en ligne).

4.2.2 Méthodologie

- *Choix de la méthode d'analyse multicritères (MCDA)*

Les analyses décisionnelles multicritères (MCDA, multicriteria decision analysis) peuvent guider les décideurs confrontés à des options complexes à choisir la meilleure solution entre diverses alternatives à travers leur classement sur la base de multiples critères parfois contradictoires et de poids différents (Huth *et al.* 2005; Behzadian *et al.* 2010). Il existe plusieurs exemples d'application de la méthode d'analyse multicritères dans un contexte écologique, marin (Fowler *et al.* 2015; Lieske *et al.* 2019; Fanelli *et al.* 2021) ou terrestre (Huth *et al.* 2005; Sutti *et al.* 2017; Rodríguez-Merino *et al.* 2020). Les modèles MCDA ont été utilisés en milieu forestier (Ananda & Herath 2009; Acosta & Corral 2017), pour sélectionner des zones (Barros *et al.* 2014) et comparer des modes de gestion (Jactel *et al.* 2012) ou de restauration (Zhang *et al.* 2020).

Plusieurs algorithmes sont disponibles pour faire des analyses multicritères (Behzadian *et al.* 2010). La méthode PROMETHEE II (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations), considérée comme conviviale et fiable, fournit un classement des alternatives comparées en fonction de leurs performances par rapport à plusieurs critères (Jactel *et al.* 2012). Elle a été utilisée pour évaluer la vulnérabilité au changement climatique de stratégies de gestion durable des forêts (Seidl *et al.* 2011). Nous avons utilisé **PROMETHEE II** pour classer des groupes taxonomiques en fonction de critères taxonomiques, pratiques et biologiques, pour plusieurs objectifs de suivis de biodiversité.

Son principe est une comparaison des groupes par paire selon chaque critère. Les différents critères doivent être maximisés ou minimisés (Behzadian *et al.* 2010). Pour chaque critère, le poids définit son importance et la fonction de préférence traduit la différence entre les évaluations obtenues par deux groupes. La méthode calcule des flux de surclassement positifs et négatifs pour chaque groupe (Φ^+ : caractère surclassant du groupe et Φ^- : combien un groupe est surclassé par les autres). Le flux net de

surclassement appelé ϕ / Φ fournit un classement complet pour chaque groupe. Pour les meilleurs groupes, Φ^+ est grand et Φ^- petit, le flux net est positif et le groupe est préféré aux autres pour de nombreux critères.

- *Sélection des groupes taxonomiques et taxo-écologiques à comparer*

Une rapide analyse bibliométrique des groupes taxonomiques ou taxo-écologiques les plus utilisés comme indicateurs de réponse en écologie forestière nous a permis de dresser une liste de groupes à comparer. Des 80 groupes initiaux, certains ont été écartés ou redéfinis afin de tenir compte de la disponibilité des experts taxonomistes, pour aboutir à une liste finale de **62 groupes**. En raison du manque d'experts, certains groupes majeurs (Champignons notamment) ne sont pas explorés à la mesure de leur importance numérique et écologique.

En raison de la redondance hiérarchique de certains groupes ou sous-groupes évalués individuellement, nous avons créé deux tableaux multi-groupes à deux résolutions taxonomiques : SUPRA (e.g. 'Amphibien') et INFRA (e.g. 'Anoures' et 'Urodèles').

Pour certaines interprétations, les groupes ont été classés en macro-groupes (Arthropodes indicateurs classiques, Arthropodes non indicateurs, Autres invertébrés non arthropodes, Vertébrés, Plantes, Champignons et affiliés). Dans le macro-groupe des Arthropodes indicateurs, ont été inclus : Carabidae, Formicidae, Odonata, Orthoptera, Coléoptères saproxyliques, Rhopalocera, Syrphidae.

- *Construction de la grille multicritères*

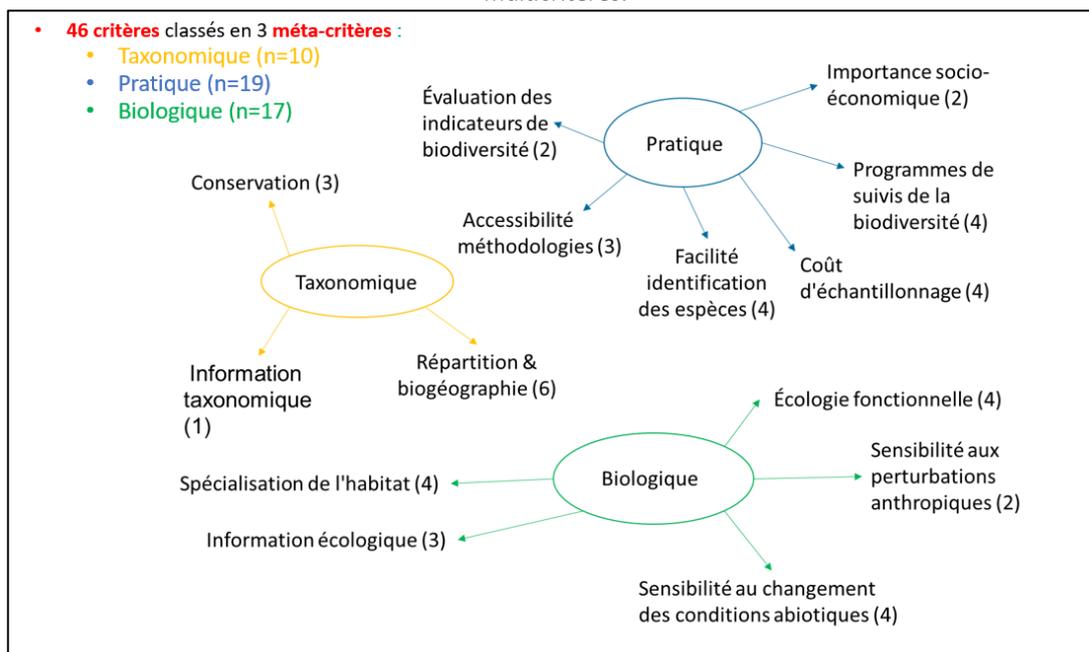
Nous avons identifié les critères d'évaluation par une recherche bibliographique sur les critères de sélection d'indicateurs de biodiversité, en nous inspirant de plusieurs travaux de référence (e.g. Pearson, 1994; Faith & Walker, 1996 ; Hermy & Cornelis, 2000 ; Hilty & Merenlender, 2000 ; Büchs, 2003; Juutinen & Mönkkönen, 2004 ; Heink & Kowarik, 2010 ; Gao *et al.* 2015 ; Larrieu *et al.* 2018). Heink & Kowarik (2010) par exemple ont formalisé une liste de critères dans les catégories suivantes : faisabilité de l'analyse et de l'interprétation, efficacité (parcimonie, universalité...), relation entre indicateur et indicandum, information écologique fournie par l'indicateur, perception des parties prenantes.

Après avoir rédigé plusieurs versions d'une liste de critères et formulé leurs modalités encodables dans l'application Prométhée, nous avons retenu 61 critères binaires, quantitatifs ou qualitatifs, formant 14 familles de critères (Tabsup1). Pour des objectifs d'harmonisation entre les groupes à évaluer, et de cohérence par rapport aux exigences quantitatives de Prométhée, la liste a été réduite à **46 critères** (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), classés en 3 méta-critères : taxonomiques (n=10), pratiques (n=19), biologiques (n=17).

- *Remplissage des grilles multicritères pour chaque groupe*

Nous avons consulté plus de 60 experts pour renseigner la grille multicritères pour chaque groupe ([Tab. 1, p suivante](#)). À cette étape, un dialogue a été entretenu avec les experts pour clarifier la définition des modalités des critères, harmoniser le remplissage et réduire le nombre de données manquantes. Les grilles ont été standardisées et rassemblées en une seule matrice multicritères multi-groupes de 62 groupes taxonomiques et 46 critères, avec moins de 5% de données manquantes (Tabsup 2).

Fig. 1. Répartition des divers critères utilisés pour la sélection des groupes taxonomiques dans l'analyse multicritères.



Tab. 1 - Liste des 62 groupes taxonomiques ou taxo-écologiques retenus et nom des experts consultés pour remplir la grille multicritères.

| Taxon | Expert | Taxon | Expert |
|--------------------------|------------------------------------|-------------------------|------------------------------------|
| Acarii Phytoseiidae | M.S. Tixier avec S. Kreiter | Annélides Enchytréides | C. Pelosi |
| Acarii Tetranychidae | M.S. Tixier avec S. Kreiter | Annélides lombrics | T. Decaëns + M. Hedde |
| Araneae | J. Pétilion + C. Jacquet | Gastéropodes.aquatiques | O. Gargominy |
| Coleoptera Carabidae | C. Bouget | Gastéropodes.terrestres | O. Gargominy |
| Coleoptera coprophages | P. Jay-Robert | Nematodes | J. Trap |
| Coleoptera saproxyliques | C. Bouget | Rotifères | W. de Smet |
| Coleoptera Scolytinae | G. Parmain | Ectomycorhiziens | M. Roy |
| Collembola | J. Cortet | Hydnes Bankeraceae | P.A. Moreau |
| Crustacea Isopoda | F. Noël | Lichens | R. Poncet |
| Diptera Ceratopogonidae | D. Argot | Myxomycetes | M. Meyer |
| Diptera Syrphidae | C. Dussaix | Pezizales | N. Van Vooren |
| Diptera Tipuloidea | C. Quindroit | Polyporoïdes | G. Corriol |
| Ephemeroptera | M. Brulin | Algues | S. Hamlaoui avec C. Bernard |
| Hemiptera | J.C. Streito | Algues Bacillariophyta | S. Hamlaoui avec C. Bernard |
| Hymenoptera Apoidea | S. Gadoum | Algues Charophyta | S. Hamlaoui avec C. Bernard |
| Hymenoptera Braconidae | Y. Braet | Algues Chlorophyta | S. Hamlaoui avec C. Bernard |
| Hymenoptera Chalcidoidea | JY Rasplus | Bryophytes | M. Gosselin |
| Hymenoptera Formicidae | B. Kaufmann + C. Galkowski | Flore.vasculaire | R. Chevalier |
| Hymenoptera Parasitica | C. Villemant | Phanérogames | S. Cadet |
| Hymenoptera Symphyta | T. Noblecourt | Arbres | L. Larrieu |
| Lepidoptera | A. Lévêque | Pteridophytes | R. Chevalier |
| Lepidoptera Heterocères | A. Lévêque | Amphibiens | JC De Massary |
| Lepidoptera Rhopalocères | A. Lévêque | Anoures | JC De Massary |
| Mecoptera | P. Tillier | Chiropteres | L. Barbaro |
| Myriapoda Chilopoda | E. Iorio | Micromammifères | L. Tillon |
| Myriapoda Diplopoda | J.-J. Geoffroy | Oiseaux | F. Archaux |
| Neuropterida | P. Tillier | Ongules | C. Baltzinger |
| Odonata | J.L. Pratz | Picidae | L. Barbaro |
| Opiliones | E. Delfosse | Reptiles | C. Baudran |
| Orthoptera | C. Lemoine | Urodèles | JC De Massary |
| Plecoptera | M. Brulin | | |
| Raphidioptera | P. Tillier | | |

- *Objectifs des suivis, importance relative des critères, choix des pondérations*

L'analyse multicritères multi-groupes a été conduite pour plusieurs objectifs de suivi, dans l'hypothèse que (i) chaque objectif exige une pondération variable des critères d'évaluation, et que (ii) chaque objectif peut requérir une sélection variable de taxons. Ces divers objectifs de suivi de la biodiversité en forêt sont : **Objectif 1** (générique) : suivre l'état et la dynamique de la biodiversité en forêt, **Objectif 2** : suivre l'état et la dynamique de la biodiversité en forêt exploitée versus en forêt non-exploitée et protégée (réserves intégrales), **Objectif 3** : suivre l'état et la dynamique de la biodiversité en forêt en lien avec certaines actions de gestion, **Objectif 4** : suivre l'état et la dynamique de la biodiversité en forêt en lien avec le changement climatique.

Avant de lancer les analyses Prométhée, la pondération de chaque critère d'évaluation a été définie pour refléter son importance dans chaque objectif de suivi. Lors d'un atelier de consultation d'experts (ONF, OFB, MNHN, INRAE), nous avons recherché un consensus sur les poids et le sens de variation des critères, et aménagé certaines modalités par critère. D'autres paramètres ont été définis dans l'application Prométhée (sens de variation des critères, type de variable et choix des fonctions de préférence ajustant chaque critère).

- *Application de la grille multicritères aux groupes de biodiversité en forêt*

En sortie d'analyse Prométhée, les valeurs de la métrique Phi et des rangs des groupes ont été mobilisées pour des analyses complémentaires. Les vecteurs de classements des groupes taxonomiques ont été comparés avec le coefficient de corrélation de Spearman. Sur les listes de classements des groupes, nous avons réalisé des partitions en clusters (k=5) avec la méthode de clustering PAM (*Partition Around Medoids*) fondée sur les valeurs de la métrique Phi. L'algorithme est une approche de clustering liée au clustering k-means pour partitionner un ensemble de données en k clusters. Dans le clustering, chaque cluster est représenté par un point appelé médoïde, qui fait référence au point le plus central du cluster pour lequel la dissemblance moyenne entre lui et tous les autres membres du cluster est plus faible qu'entre lui et les membres des autres clusters.

Encart. Évaluation de l'effet observateur

Pour les 62 groupes comparés ici par MCDA, la grille multicritères n'a été renseignée que par un spécialiste de chaque groupe. Il est donc possible que le classement du groupe soit influencé par la stratégie de l'opérateur qui a rempli la grille, plutôt sévère, ou plutôt tolérant avec les propriétés de son groupe de prédilection.

Nous avons procédé à une estimation d'une partie de l'effet opérateur de cette analyse multicritères, en mesurant la variabilité inter-experts dans le remplissage de la grille pour deux des groupes positionnés dans le haut du classement de nos analyses, les Oiseaux et la Flore vasculaire. Pour chaque groupe, une dizaine d'experts ont été invités à renseigner la grille multicritères indépendamment. Notre objectif est de mesurer si et comment le positionnement d'un groupe dans le classement Prométhée est affecté par les éventuelles divergences d'informations dans la grille multicritères entre experts de ce groupe.

Le changement d'évaluateur sur la grille multicritères d'un groupe taxo-écologique affecte le classement final de ce groupe, de façon non-négligeable (Tab. 2. Le rang de référence initial - obtenu dans la MCDA réalisée avant cet exercice, avec les réponses d'un seul expert - n'est partagé avec un autre expert que dans 1 cas sur 8 (oiseaux) et 4 cas sur 10 (flore). D'autre part, l'effet évaluateur sur la position d'un groupe taxo-écologique dans le classement global est variable entre groupes taxo-écologiques. La variance du critère d'évaluation est plus forte pour la flore vasculaire (61% sur le rang, 27% sur la valeur Prométhée-Phi) que pour les oiseaux (40% sur le rang, 10% sur Phi). Enfin, pour les oiseaux et la flore, contrairement aux attentes, les divergences entre experts sont 2 à 3 fois plus fortes sur les critères biologiques et taxonomiques que sur les critères pratiques.

Tab 2 - Résultats de l'analyse multicritères lorsque plusieurs experts sont interrogés pour un même groupe taxonomique (n = nombre d'experts). La colonne « ref » indique le rang du groupe ou la valeur de Phi dans l'analyse réalisée avant cet exercice, avec les réponses d'un seul expert.

| | | Rang | | | | Phi | | |
|----------------|----------|------|---------------|---------|------|-------|---------------|------|
| | | ref | inter-experts | | | ref | inter-experts | |
| | | | Min-Max | Moyenne | CV.% | | Moyenne | CV.% |
| oiseaux n=8 | Base | 1 | 1-4 | 2.1 | 39.3 | 0.356 | 0.303 | 9.6 |
| | Bio | 5 | 5-14 | 9.3 | 33.6 | 0.244 | 0.168 | 29.8 |
| | Pratique | 1 | 2-3 | 2.1 | 16.6 | 0.523 | 0.442 | 9.2 |
| | Taxo | 3 | 1-6 | 2.6 | 64.2 | 0.198 | 0.222 | 19.4 |
| flore n=10 | Base | 2 | 1-8 | 3.5 | 60.6 | 0.326 | 0.261 | 26.9 |
| | Bio | 10 | 6-29 | 11.9 | 61.6 | 0.175 | 0.152 | 56.0 |
| | Pratique | 2 | 1-7 | 3.1 | 57.8 | 0.513 | 0.405 | 23.2 |
| | Taxo | 5 | 1-27 | 10.2 | 69.3 | 0.179 | 0.141 | 42.5 |

4.2.3 Résultats bruts de l'analyse

- *Classement des groupes par objectif de suivi*

De façon globale, les variations de pondération des critères pour chaque objectif de suivi ont un très faible impact sur le classement des groupes taxonomiques. D'autre part, le classement des groupes pour chaque objectif de suivi diffère peu du classement de groupes par l'analyse multicritères non pondérée (avec équirépartition des poids entre les critères). Les variations de pondération des critères ont donc un très faible effet sur les classements.

Par rapport au nombre de groupes qu'ils comportent, les macro-groupes de Vertébrés et de Végétaux sont sur-représentés en proportion dans les 10 premiers groupes du classement (top10), les Arthropodes indicateurs et les Champignons sont légèrement sur-représentés, et les « Arthropodes non utilisés comme indicateurs classiques » fortement sous-représentés (Tab. 3).

Tab 3 - Répartition des données et des classements pour chaque macro-groupe (objectif 1).

| Matrice | Proportion (%) | Invertébrés non arthropodes | Arthropodes non indicateurs | Arthropodes indicateurs | Vertébrés | Végétaux | Champignons (et affiliés) |
|---------|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------|----------|---------------------------|
| Infra | Dans top 10 | 10.0 | 0.0 | 14.0 | 20.0 | 40.0 | 16.0 |
| | Dans bottom 10 | 26.0 | 74.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| | De groupe taxo dans la grille | 10.9 | 41.8 | 10.9 | 12.7 | 12.7 | 10.9 |
| | De NA dans la grille | 4.3 | 5.2 | 1.1 | 0.3 | 2.5 | 1.8 |
| Supra | Dans top 10 | 10 | 2 | 24 | 24 | 20 | 20 |
| | Dans bottom 10 | 26.0 | 74.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| | De groupe taxo dans la grille | 12.5 | 43.8 | 12.5 | 12.5 | 6.3 | 10.4 |
| | De NA dans la grille | 4.3 | 4.9 | 0.4 | 0.4 | 1.4 | 1.8 |

De même, les « Invertébrés non Arthropodes » et les « Arthropodes non indicateurs » sont sur-représentés dans les 10 derniers groupes du classement (bottom10), à la différence des Arthropodes indicateurs, des Vertébrés, des Plantes et des Champignons. Pour information, la proportion de valeurs manquantes (%NA) est logiquement plus forte dans deux des macro-groupes les moins bien connus, i.e. les Invertébrés non Arthropodes et les Arthropodes non indicateurs.

Tab 4 - Classement, en sortie de l'analyse multicritères, des 20 premiers groupes taxonomiques de la catégorie SUPRA pour les objectifs de suivi 1 à 4. Les six groupes de tête constants sont entourés en rouge.

| taxo | Objectif 1 | | Objectif 2 | | Objectif 3 | | Objectif 4 | |
|------------------|------------|---------|------------|---------|------------|---------|------------|---------|
| | Rang | Cluster | Rang | Cluster | Rang | Cluster | Rang | Cluster |
| oiseaux | 1 | A | 1 | A | 1 | A | 1 | A |
| flore_vasculaire | 2 | A | 2 | A | 2 | A | 2 | A |
| chiropteres | 3 | A | 3 | A | 3 | A | 3 | A |
| ectomycorhiziens | 4 | A | 5 | A | 5 | A | 6 | A |
| gasteropode_terr | 5 | B | 4 | A | 4 | A | 4 | A |
| bryophyte | 6 | B | 6 | A | 6 | A | 5 | A |
| orthoptera | 7 | B | 11 | B | 10 | B | 8 | B |
| odonata | 8 | B | 7 | B | 7 | B | 7 | B |
| reptiles | 9 | B | 14 | B | 14 | B | 16 | C |
| formicidae | 10 | B | 12 | B | 13 | B | 10 | B |
| bankeraceae | 11 | C | 9 | B | 9 | B | 13 | B |
| ephemeroptera | 12 | C | 10 | B | 11 | B | 11 | B |
| syrphidae | 13 | C | 13 | B | 12 | B | 9 | B |
| amphibiens | 14 | C | 17 | B | 18 | B | 15 | B |
| lombric | 15 | C | 16 | B | 16 | B | 14 | B |
| micromammifères | 16 | C | 19 | B | 19 | B | 20 | C |
| lichen | 17 | C | 8 | B | 8 | B | 12 | B |
| araneae | 18 | C | 21 | B | 21 | B | 17 | C |
| ongules | 19 | C | 22 | B | 23 | B | 22 | C |
| saproxylique | 20 | C | 15 | B | 15 | B | 18 | C |
| polypores | 21 | C | 18 | B | 17 | B | 19 | C |

Dans le classement des 20 premiers groupes (catégorie taxonomique SUPRA) pour les objectifs de suivi 1, 2, 3 et 4 (Tab. 4 et Tabsup 4), la sélection des 6 premiers groupes est constante : Oiseaux, Flore vasculaire, Chiroptères, Champignons ectomycorhiziens, Gastéropodes terrestres et Bryophytes. Les

clusters fondés sur les valeurs de Phi+ (surclassants) et Phi- (pénalisants) sont très similaires entre les objectifs (Figsup1). Le cluster de tête comprend les mêmes taxons pour les objectifs de suivi 2, 3 et 4 : flore, oiseaux, Champignons ectomycorhiziens, Chiroptères, Bryophytes, Gastéropodes terrestres, les deux derniers groupes étant exclus du groupe de tête dans l'objectif 1.

De même, dans le classement intégral des groupes INFRA pour les objectifs de suivi 1, 2 et 3 (Tab. 5 ci-dessous et Tabsup 3), la sélection des 8 premiers groupes est constante : Picidae, Ptéridophytes, Arbres, Chiroptères, Champignons ectomycorhiziens, Phanérogames, Gastéropodes terrestres et Bryophytes. Les classements de groupes pour les 4 objectifs de suivi montrent de très fortes corrélations positives (e.g. de Rho (Spearman) de 0.97 à 0.99 pour les groupes INFRA). Le classement intégral est donc quasi identique pour chaque comparaison de paires d'objectifs.

Tab 5 - Classement, en sortie de l'analyse multicritères, des premiers groupes taxonomiques de la catégorie INFRA pour les objectifs de suivi 1 à 4. Les huit groupes de tête constants sont entourés en rouge.

| taxo | Objectif1 | | Objectif2 | | Objectif3 | | Objectif4 | |
|------------------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|
| | Rang | Cluster | Rang | Cluster | Rang | Cluster | Rang | Cluster |
| picidae | 1 | A | 1 | A | 1 | A | 1 | A |
| phanérogames | 6 | A | 4 | A | 4 | A | 2 | A |
| pteridophytes | 2 | A | 2 | A | 2 | A | 3 | A |
| chiropteres | 4 | A | 3 | A | 3 | A | 4 | A |
| Arbres_arbustes | 3 | A | 5 | A | 5 | A | 5 | A |
| gasteropode_terr | 7 | B | 6 | A | 6 | A | 6 | A |
| ectomycorhiziens | 5 | A | 7 | A | 7 | A | 7 | A |
| bryophyte | 8 | B | 8 | A | 8 | A | 8 | A |
| odonata | 10 | B | 9 | B | 9 | B | 9 | B |
| orthoptera | 9 | B | 14 | B | 12 | B | 10 | B |
| syrphidae | 17 | B | 17 | B | 15 | B | 11 | B |
| formicidae | 14 | B | 15 | B | 16 | B | 12 | B |
| rhopalocera | 13 | B | 13 | B | 13 | B | 13 | B |
| ephemeroptera | 16 | B | 12 | B | 14 | B | 14 | B |
| lichen | 21 | C | 10 | B | 10 | B | 15 | B |
| bankeraceae | 15 | B | 11 | B | 11 | B | 16 | B |
| lombric | 19 | B | 19 | B | 19 | B | 17 | B |
| urodela | 11 | B | 16 | B | 17 | B | 18 | B |
| anura | 18 | B | 20 | B | 21 | B | 19 | B |
| reptiles | 12 | B | 18 | B | 18 | B | 20 | C |
| araneae | 22 | C | 24 | B | 24 | B | 21 | C |
| polypores | 24 | C | 21 | B | 20 | B | 22 | C |
| micromammifères | 20 | B | 22 | B | 22 | B | 23 | C |
| ongules | 23 | C | 25 | B | 26 | B | 26 | C |
| carabidae | 25 | C | 23 | B | 23 | B | 28 | C |

Les clusters fondés sur les valeurs de Phi+ (surclassants) et Phi- (pénalisants) sont très similaires entre les objectifs (Figsup 2). Le cluster de tête comprend les mêmes taxons INFRA pour les objectifs de suivi 2, 3 et 4 : Picidae, Ptéridophytes, Phanérogames, arbres, Champignons ectomycorhiziens, Chiroptères, Bryophytes, Gastéropodes terrestres, les deux derniers groupes étant exclus du groupe de tête dans l'objectif 1.

- *Identification des critères discriminants ou pénalisants pour chaque groupe (objectif de suivi 1)*

Dans le classement multicritères pondéré des taxons, il est intéressant de repérer (i) les critères surclassants de chaque taxon, c'est-à-dire ceux dont les valeurs de Phi les plus fortes discriminent positivement ce taxon des autres, ainsi que (ii) les critères qui pénalisent un taxon, c'est-à-dire les valeurs de Phi les plus faibles pour chaque taxon, qui identifient les critères expliquant pourquoi ce

taxon est surclassé par les autres taxons. Le tableau Tabsup1 rappelle la définition et l'abréviation des critères, les tableaux Tabsup 5 et 6 et les figures Figsup 5 et 6 décrivent les variations des valeurs de Phi par critère pour chaque groupe taxonomique.

Le nombre de critères pénalisants (avec des valeurs de Phi négatives), pour lesquels le groupe taxonomique est surclassé par une majorité des autres groupes, est évidemment faible dans les groupes de tête, et plus élevé dans les groupes moins bien classés.

Pour les taxons du top6 constant des classements, les principaux critères surclassants de chaque taxon dans le classement de l'objectif 1 impliquent majoritairement des éléments pratiques alors que les critères pénalisants sont davantage biologiques (Tab. 6). De façon générale, les critères pratiques et biologiques (moindrement) sont très structurants dans la classification des groupes taxonomiques. Rappelons que les critères sont déterminants sur les classements, non pas en fonction de leur poids mais par leur caractère discriminant entre les groupes.

Tab 6 - Principaux critères surclassants et pénalisants dans le classement donné par l'analyse multicritères pour les six groupes (SUPRA) de tête et pour l'objectif 1.

Critères pratiques = bleu ; biologiques = vert ; taxonomiques = jaune.

| | Top6 | oiseaux | flore_vasculaire | chiropteres | ectomycorhiziens | gasteropode_terr | bryophyte |
|-----------------------|------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | rang | | | | | | |
| critères surclassants | 1 | Experts taxo | Experts taxo | Experts taxo | Automatisation | Automatisation | Substitution taxon |
| | 2 | Coûts en temps | Coûts en temps | Automatisation | Traits Hist Vie | Traits Hist Vie | Indicateur Gestion |
| | 3 | Automatisation | Automatisation | Substitution taxon | Librairie ADN | Liste rouge | Structure |
| | 4 | Substitution taxon | Substitution taxon | Traits Hist Vie | Liste rouge | Identifiabilité | Interêt économique |
| | 5 | Librairie ADN | Traits Hist Vie | Librairie ADN | Identifiabilité | Indicateur Gestion | Composition |
| | 6 | Traits Hist Vie | Liste rouge | Liste rouge | Structure | Structure | Indic litt |
| critères pénalisants | 41 | Esp endémiques | Niv troph | Guildeg maj | Niv troph sup | Prog Nat suivis | Identifiabilité |
| | 42 | Esp introduites | Esp Fo Mat | Esp clé de voute | Indicateur Gestion | Esp clé de voute | Niv troph sup |
| | 43 | Guildeg maj | Esp forestières | Atlas euro | Indic litt | Sensibilité lum | Prog Nat suivis |
| | 44 | Esp forestières | Niv troph sup | Suivis ADN | Coût matériel | Suivis ADN | Esp clé de voute |
| | 45 | Esp Fo Mat | Structure | Atlas natio | Sensibilité tempé | Atlas natio | Suivis ADN |
| | 46 | Condition sol | Guildeg maj | Homog éco | Homog éco | Coûts en temps | Atlas natio |

Chez les oiseaux, le groupe le mieux classé, seulement 4 critères sur 46 présentent une valeur de Phi négative : (i) pourcentage d'espèces considérées comme des espèces forestières, (ii) pourcentage d'espèces considérées comme des spécialistes de forêts anciennes et matures, (iii) sensibilité aux conditions du sol et (iv) pourcentage d'espèces avec une forte importance fonctionnelle (décomposeurs, pollinisateurs, mycorhiziens). À l'inverse, parmi tous les critères surclassants, c'est-à-dire positivement discriminants, les principaux critères pour les oiseaux sont : l'existence (i) d'une base de données sur les traits d'histoire de vie, (ii) d'une librairie de codes-barres ADN, (iii) d'un processus automatique d'aide à l'identification des espèces, (iv) la taille de la communauté d'experts taxonomiques disponibles en France, (v) le coût associé au temps nécessaire pour échantillonner et identifier et (vi) la capacité à représenter la diversité d'autres groupes.

Malgré leur dominance dans la diversité des espèces, aucun groupe d'Arthropodes ne figure dans le haut du classement. Le [tableau 7](#) rapporte les principaux critères surclassants ou pénalisants des groupes d'Arthropodes les moins mal classés dans le classement de l'objectif 1. Les groupes d'Arthropodes ne sont pas tous pénalisés par les mêmes critères. Certains sont handicapés par la faible disponibilité des experts taxonomistes (Formicidae), alors que d'autres sont au contraire favorisés par la disponibilité d'experts naturalistes (Orthoptera, Odonata, Carabidae).

Détaillons l'exemple des Coléoptères Carabidae, pénalisés par un grand nombre de critères (22 sur 46), parmi lesquels (i) la difficulté à déléguer l'identification à un bureau d'étude ou à des professionnels institutionnels, l'absence (ii) de données provenant des sciences citoyennes, (iii) de liste rouge et (iv) de programme de suivi dans les pays limitrophes, et (v) le caractère écologiquement hétérogène du groupe, également peu sensible aux conditions de température. Pourtant, plusieurs critères importants surclassent les Coléoptères Carabiques au sein des groupes forestiers : (i) l'utilisation fréquente de ce groupe dans les travaux scientifiques comme indicateur de biodiversité ou de réponse aux conditions forestières, (ii) la taille de la communauté d'experts taxonomiques disponibles en France, (iii) le faible coût associé au matériel nécessaire pour échantillonner et identifier, (iv) la position supérieure du groupe dans les réseaux trophiques et sa capacité à représenter la diversité d'autres groupes.

Tab 7 - Principaux critères surclassants et pénalisants dans le classement donné par l'analyse multicritères pour les groupes d'Arthropodes les moins mal classés pour l'objectif 1.

| | <i>Taxons</i> | <i>Orthoptera</i> | <i>Odonata</i> | <i>Formicidae</i> | <i>Ephemeroptera</i> | <i>Syrphidae</i> | <i>Araneae</i> | <i>Colsaprox</i> | <i>Carabidae</i> |
|------------------------------|---------------|-------------------|--------------------|--------------------|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | RANG | 7 | 8 | 10 | 12 | 13 | 18 | 20 | 22 |
| <i>Critères surclassants</i> | 1 | Experts taxo | Experts taxo | Coûts temps | Liste rouge Fce | Traits hist vie | Aff. structure | Esp Fo Mat | Substitution taxon |
| | 2 | Coûts temps | Liste rouge Fce | Substitution taxon | Indicateur gestion | Aff. structure | Indic Litt | Traits hist vie | Indicateur gestion |
| | 3 | Librairie ADN | Identifiabilité | Prog nat suivis | Prog nat suivis | Intérêt économique | Esp clé de voute | Indicateur gestion | Indic Litt |
| | 4 | Liste rouge Fce | Aff. structure | Indic Litt | Indic Litt | Aff. compo | Atlas euro | Aff. structure | Coût matériel |
| | 5 | Identifiabilité | Prog nat suivis | Atlas euro | Atlas euro | Indic Litt | Coût matériel | Intérêt économique | Experts taxo |
| | 6 | Prog nat suivis | Aff. compo | Esp clé de voute | Suivis ADN | Esp clé de voute | Niv troph Sup | Aff. compo | Niv troph Sup |
| <i>Critères pénalisants</i> | 41 | Aff. compo | Indic Litt | Liste rouge Fce | Aff. compo | Indicateur gestion | Prog nat suivis | Valeurs référence | Prog euro suivis |
| | 42 | Indic Litt | Guildes maj | Indicateur gestion | Coût matériel | Prog nat suivis | Aff. compo | Atlas régio | Liste rouge Europe |
| | 43 | Coût matériel | Suivis ADN | Experts taxo | Esp clé de voute | Coût matériel | Guildes maj | Condition sol | Sensibilité Tempé |
| | 44 | Esp clé de voute | Condition sol | Aff. structure | Sensibilité Lum | Sp emblématiques | Valeurs référence | Sci participatives | Sci participatives |
| | 45 | Suivis ADN | Intérêt économique | Aff. compo | Intérêt économique | Condition sol | Condition sol | Déleg identif | Déleg identif |
| | 46 | Valeurs référence | Librairie ADN | Sensibilité Lum | Aire géo | Coûts temps | Intérêt économique | Sensibilité Humid | Homogénéité écol |

Pour les autres groupes non arthropodes qui figurent juste derrière le peloton de tête, les critères favorisants ou handicapants sont variables ([Tab. 8](#)).

Tab 8 - Principaux critères surclassants et pénalisants des groupes taxonomiques hors Arthropodes classés à la suite des groupes de tête, pour l'objectif 1.

| | VERTEBRES | | | | | CHAMPIGNONS | | | INVERTEBRES | |
|------------------------------|-----------|-------------------|-------------------|---------------------|-------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|
| | Taxon | Reptiles | Amphibiens | Micromammifères | Ongulés | Hydres | Lichens | Polypores | Lombrics | Nématodes |
| | RANG | 9 | 14 | 16 | 19 | 11 | 17 | 21 | 15 | 23 |
| <i>Critères surclassants</i> | 1 | Librairie ADN | Liste rouge Fce | Liste rouge Fce | Experts taxo | Coût temps | Librairie ADN | Substitution taxon | Traits hist vie | Librairie ADN |
| | 2 | Traits hist vie | Prog nat suivi | Identifiabilité | Coût temps | Automatisation | Liste rouge Fce | Indicateur gestion | Indicateur gestion | Traits hist vie |
| | 3 | Liste rouge Fce | Atlas euro | Intérêt écono | Automatisation | Substitution taxon | Indicateur gestion | Spé Fo mat | Prog nat suivi | Indicateur gestion |
| | 4 | Identifiabilité | Coût matériel | Prog nat suivi | Librairie ADN | Librairie ADN | Aff structure | Aff structure | Esp clé de voute | Intérêt écono |
| | 5 | Prog nat suivi | Experts taxo | Atlas euro | Identifiabilité | Liste rouge Fce | Spé Fo mat | Intérêt écono | Coût matériel | Aff composition |
| | 6 | Atlas euro | Guildes maj | Experts taxo | Aff structure | Identifiabilité | Aff composition | Aff composition | Atlas nat | Indic Litt |
| <i>Critères pénalisants</i> | 41 | Indic Litt | Aff structure | Sensibilité Lumière | Liste rouge Euro | Sensibilité Lumière | Esp clé de voute | Suivis ADN | Aff structure | Esp emblématiques |
| | 42 | Guildes maj | Aff composition | Suivis ADN | Sensibilité Tempé | Atlas nat | Suivis ADN | Prog euro suivi | Aff composition | Atlas régio |
| | 43 | Esp emblématiques | Indic Litt | Prog euro suivi | Homogénéité écol | Identification | Prog euro suivi | Atlas régio | Indic Litt | Liste rouge Euro |
| | 44 | Intérêt écono | Esp clé de voute | Sensibilité Tempé | Changement pop | Homogénéité écol | Identification | Conditions sol | Atlas euro | Sciences participatives |
| | 45 | Sensibilité Humid | Conditions sol | Homogénéité écol | Sensibilité Humid | Transférabilité | Atlas régio | Sensibilité tempé | Valeurs référence | Déleg identif |
| | 46 | Changement pop | Connaissances bio | Sensibilité Humid | Traits hist vie | Aire géo | Homogénéité écol | Connaissances bio | Liste rouge Euro | Coût temps |

- *Effets de la variation du poids des familles de critères (méta-critères) sur le classement des groupes*

Le classement des groupes taxonomiques varie selon les poids cumulés associés à chaque méta-critère. Si on met tout le poids sur les critères d'un seul des 3 méta-critères, la corrélation entre les 3 vecteurs des rangs des groupes de résolution SUPRA est plutôt faible (Tab. 9). La corrélation maximale est obtenue entre le classement omni-critères et le classement sur les critères pratiques seuls, confirmant le poids accordé aux critères pratiques dans notre analyse générale, les corrélations minimales entre le classement sur critères biologiques seuls et les classements sur critères pratiques ou taxonomiques.

Tab 9 - Corrélation entre les classements des groupes SUPRA selon que le poids de l'analyse est réparti entre les méta-critères ou porté par un seul méta-critère.

| <i>Obj1 / SUPRA</i> | <i>Taxonomiques</i> | <i>Biologiques</i> | <i>Pratiques</i> |
|---------------------|---------------------|--------------------|------------------|
| Tous | 0.760 | 0.657 | 0.897 |
| Taxonomiques | | | |
| Biologiques | 0.310 | | |
| Pratiques | 0.609 | 0.365 | |

À l'examen des classements résultant d'une analyse Prométhée des groupes de résolution SUPRA focalisée sur les critères de chacun des 3 méta-critères (Tab. 10), on peut dresser les constats suivants :

- les Oiseaux sont le seul groupe du Top6 issu d'une analyse omni-critères à rester en permanence dans le Top6 quel que soit le poids accordé à chaque méta-critère ;
- les Bryophytes sont le seul groupe du Top6 issu d'une analyse omni-critères à être exclu du Top6 dès que l'analyse est focalisée sur un des méta-critères, soulignant le caractère d'un groupe plutôt complet et non promu par un seul des méta-critères ;

- la Flore vasculaire est exclue du Top6 si l'analyse est focalisée sur les critères biologiques seulement, ce qui souligne que ce groupe est porté par les critères pratiques et taxonomiques ;
- si l'analyse est focalisée sur les critères biologiques seulement, les Nématodes et les Coléoptères saproxyliques sont intégrés au Top6 ; si elle est limitée aux critères pratiques, les Ongulés et les Fourmis sont intégrés au Top6 ;
- les Gastéropodes terrestres sont exclus du Top6 si l'analyse est focalisée sur les critères taxonomiques ou pratiques seulement, ce qui démontre que ce groupe est porté par les critères biologiques ;
- les Chiroptères et les Champignons ectomycorhiziens sont exclus du Top6 si l'analyse est focalisée sur les critères taxonomiques seulement ;
- les Reptiles, les Amphibiens, les Odonates et les Ephémères sont intégrés au Top6 si l'analyse est focalisée sur les critères taxonomiques seulement.

Tab 10 - Classement des groupes SUPRA selon que le poids de l'analyse est réparti entre les méta-critères ou porté par un seul méta-critère.

| rank_obj1 | Omnicitères | critères_taxonomiques | critères_biologiques | critères_pratiques |
|------------------|--------------------|------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| 1 | oiseaux | reptiles | colsaprox | oiseaux |
| 2 | flore_vasculaire | amphibiens | chiropteres | flore_vasculaire |
| 3 | chiropteres | oiseaux | nématode | ongules |
| 4 | ectomycorhiziens | odonata | gasteropode_terr | chiropteres |
| 5 | gasteropode_terr | flore_vasculaire | oiseaux | ectomycorhiziens |
| 6 | bryophyte | ephemeroptera | ectomycorhiziens | formicidae |
| 7 | orthoptera | orthoptera | bankeraceae | bryophyte |
| 8 | odonata | micromammifères | lombric | gasteropode_terr |
| 9 | reptiles | ectomycorhiziens | bryophyte | orthoptera |
| 10 | formicidae | araneae | flore_vasculaire | odonata |
| 11 | bankeraceae | lichen | algues | amphibiens |
| 12 | ephemeroptera | chiropteres | syrrhidae | micromammifères |
| 13 | syrrhidae | bryophyte | orthoptera | reptiles |
| 14 | amphibiens | syrrhidae | lichen | ceratopogonidae |
| 15 | lombric | formicidae | polypores | ephemeroptera |
| 16 | micromammifères | gasteropode_terr | chilopode | carabidae |
| 17 | lichen | myxomycetes | plecopteres | syrrhidae |
| 18 | araneae | algues | collembola | lombric |
| 19 | ongules | phytoseiidae | rotifera | bankeraceae |
| 20 | colsaprox | tetranychidae | myxomycetes | polypores |
| 21 | polypores | bankeraceae | neuroptera | araneae |
| 22 | carabidae | chilopode | odonata | opiliones |
| 23 | nématode | symphyte | lepidoptera | lichen |

Comme l'illustrent les figures de clustering aux résolutions INFRA et SUPRA (Figsup 3 et 4), pour l'objectif de suivi générique (obj. 1), on observe de nombreuses variations dans le classement des groupes, lorsque les poids sont alternativement affectés aux différents méta-critères. Les changements sont particulièrement saillants lorsque le poids est accordé uniquement aux critères biologiques.

De même, les différences entre objectifs sont exacerbées lorsque l'analyse est focalisée sur un des méta-critères seulement par rapport à l'analyse omni-critères, en particulier dans le cas des critères biologiques (Tab. 11). Les différences entre les objectifs de suivi (gestion, libre-évolution, climat) se

traduisent logiquement par des contrastes de pondération sur les caractéristiques biologiques des groupes à suivre. On observe davantage de disparités dans les classements entre objectifs, ce qui souligne que les variations de pondération par critère entre objectifs ont davantage d'influence lors de ces analyses focalisées par méta-critère.

Tab 11 - Classement des groupes SUPRA par objectif de suivi, selon que le poids de l'analyse est réparti entre les méta-critères ou porté par un seul méta-critère.

| | omnicritères | | | | critères taxonomiques | | | |
|----|-----------------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------------|------------------|------------------|------------------|
| | obj1 | obj2 | obj3 | obj4 | obj1 | obj2 | obj3 | obj4 |
| 1 | oiseaux | oiseaux | oiseaux | oiseaux | reptiles | reptiles | reptiles | reptiles |
| 2 | flore_vasculaire | flore_vasculaire | flore_vasculaire | flore_vasculaire | amphibiens | amphibiens | amphibiens | amphibiens |
| 3 | chiropteres | chiropteres | chiropteres | chiropteres | oiseaux | oiseaux | oiseaux | oiseaux |
| 4 | ectomycorhiziens | gasteropode_terr | gasteropode_terr | gasteropode_terr | odonata | odonata | odonata | odonata |
| 5 | gasteropode_terr | ectomycorhiziens | ectomycorhiziens | bryophyte | flore_vasculaire | ephemeroptera | ephemeroptera | flore_vasculaire |
| 6 | bryophyte | bryophyte | bryophyte | ectomycorhiziens | ephemeroptera | flore_vasculaire | flore_vasculaire | orthoptera |
| 7 | orthoptera | odonata | odonata | odonata | orthoptera | lichen | orthoptera | micromammifères |
| 8 | odonata | lichen | lichen | orthoptera | micromammifères | orthoptera | micromammifères | ectomycorhiziens |
| 9 | reptiles | bankeraceae | bankeraceae | syrphidae | ectomycorhiziens | micromammifères | ectomycorhiziens | ephemeroptera |
| 10 | formicidae | ephemeroptera | orthoptera | formicidae | araneae | chiropteres | lichen | lichen |
| 11 | bankeraceae | orthoptera | ephemeroptera | ephemeroptera | lichen | ectomycorhiziens | chiropteres | chiropteres |
| 12 | ephemeroptera | formicidae | syrphidae | lichen | chiropteres | bryophyte | gasteropode_terr | gasteropode_terr |
| 13 | syrphidae | syrphidae | formicidae | bankeraceae | bryophyte | araneae | araneae | bryophyte |
| 14 | amphibiens | reptiles | reptiles | lombric | syrphidae | gasteropode_terr | bryophyte | araneae |
| 15 | lombric | colsaprox | colsaprox | amphibiens | formicidae | bankeraceae | bankeraceae | syrphidae |
| 16 | micromammifères | lombric | lombric | reptiles | gasteropode_terr | syrphidae | syrphidae | formicidae |
| 17 | lichen | amphibiens | polypores | araneae | myxomycetes | formicidae | formicidae | bankeraceae |
| 18 | araneae | polypores | amphibiens | colsaprox | algues | myxomycetes | myxomycetes | myxomycetes |
| 19 | ongules | micromammifères | micromammifères | polypores | phytoseiidae | plecopteres | gasteropode_aqua | gasteropode_aqua |
| 20 | colsaprox | carabidae | carabidae | micromammifères | tetranichidae | gasteropode_aqua | chilopode | chilopode |
| | critères biologiques | | | | critères pratiques | | | |
| | obj1 | obj2 | obj3 | obj4 | obj1 | obj2 | obj3 | obj4 |
| 1 | colsaprox | gasteropode_terr | chiropteres | oiseaux | oiseaux | oiseaux | oiseaux | oiseaux |
| 2 | oiseaux | chiropteres | gasteropode_terr | gasteropode_terr | flore_vasculaire | flore_vasculaire | flore_vasculaire | flore_vasculaire |
| 3 | gasteropode_terr | colsaprox | colsaprox | chiropteres | ongules | ongules | ongules | ongules |
| 4 | chiropteres | oiseaux | oiseaux | bryophyte | chiropteres | chiropteres | chiropteres | chiropteres |
| 5 | bryophyte | nématode | lichen | nématode | ectomycorhiziens | ectomycorhiziens | ectomycorhiziens | ectomycorhiziens |
| 6 | syrphidae | lichen | nématode | flore_vasculaire | formicidae | formicidae | formicidae | formicidae |
| 7 | chilopode | bryophyte | bryophyte | colsaprox | bryophyte | bryophyte | bryophyte | bryophyte |
| 8 | lombric | flore_vasculaire | flore_vasculaire | lichen | gasteropode_terr | gasteropode_terr | gasteropode_terr | orthoptera |
| 9 | flore_vasculaire | bankeraceae | bankeraceae | lombric | orthoptera | odonata | amphibiens | amphibiens |
| 10 | bankeraceae | lombric | lombric | syrphidae | odonata | amphibiens | odonata | gasteropode_terr |
| 11 | ectomycorhiziens | ectomycorhiziens | ectomycorhiziens | bankeraceae | amphibiens | orthoptera | orthoptera | odonata |
| 12 | nématode | polypores | polypores | chilopode | micromammifères | ceratopogonidae | ceratopogonidae | ceratopogonidae |
| 13 | plecopteres | chilopode | syrphidae | ectomycorhiziens | reptiles | micromammifères | micromammifères | micromammifères |
| 14 | polypores | syrphidae | chilopode | plecopteres | ceratopogonidae | reptiles | reptiles | reptiles |
| 15 | odonata | plecopteres | plecopteres | odonata | ephemeroptera | carabidae | carabidae | lombric |
| 16 | lichen | ephemeroptera | odonata | polypores | carabidae | ephemeroptera | ephemeroptera | ephemeroptera |
| 17 | araneae | odonata | carabidae | ephemeroptera | syrphidae | lombric | syrphidae | syrphidae |
| 18 | algues | carabidae | ephemeroptera | myxomycetes | lombric | bankeraceae | polypores | carabidae |
| 19 | Hyménoptères-parasiticoïdes | algues | algues | algues | bankeraceae | polypores | lombric | bankeraceae |
| 20 | collembola | myxomycetes | myxomycetes | araneae | polypores | syrphidae | bankeraceae | opiliones |

4.2.4 Analyse multicritères séquentielle

Le constat des fortes influences des familles de critères sur l'issue du classement et de la sélection par l'analyse omni-critères initiale nous encourage à procéder à une analyse multicritères séquentielle en 2 étapes.

Une première sélection des groupes taxonomiques les mieux classés est réalisée par une analyse fondée uniquement sur les méta-critères taxonomiques et biologiques, hors critères pratiques. À ce stade, les résultats illustrent une avancée des Coléoptères saproxyliques, des Champignons Hydnes

(Bankeraceae) et des Lichens, et un léger recul au classement des Bryophytes et des Orthoptères (Tab . 12).

On sélectionne alors les groupes les mieux classés dans les clusters des rangs supérieurs grâce à un clustering PAM (cluster 1 et 2, 15 groupes ici). En deuxième phase, on effectue une deuxième analyse Prométhée sur le sous-échantillon de ces groupes sélectionnés mais avec seulement les critères appartenant au méta-critère pratique.

Tab 12 - Classement des 30 premiers groupes SUPRA après analyse avec pondération sur les méta-critères biologiques et taxonomiques seulement, par rapport à une analyse omni-critères.

| Taxon | Omnicitères | | Critères biologiques + taxonomiques | | | |
|-------------------------|-------------|-----------|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| | Rang_obj1 | Rang_obj1 | cluster_obj1 | Rang_obj2 | Rang_obj3 | Rang_obj4 |
| <i>oiseaux</i> | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 |
| <i>chiropteres</i> | 3 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| <i>ectomycorhiziens</i> | 4 | 3 | 1 | 9 | 8 | 7 |
| <i>flore_vasculaire</i> | 2 | 4 | 1 | 6 | 5 | 4 |
| <i>gasteropode_terr</i> | 5 | 5 | 1 | 3 | 3 | 3 |
| <i>colsaprox</i> | 20 | 6 | 1 | 5 | 6 | 8 |
| <i>bryophyte</i> | 6 | 7 | 2 | 7 | 7 | 5 |
| <i>bankeraceae</i> | 11 | 8 | 2 | 8 | 9 | 11 |
| <i>orthoptera</i> | 7 | 9 | 2 | 17 | 17 | 17 |
| <i>lichen</i> | 17 | 10 | 2 | 4 | 4 | 6 |
| <i>syrphidae</i> | 13 | 11 | 2 | 12 | 10 | 9 |
| <i>reptiles</i> | 9 | 12 | 2 | 20 | 21 | 23 |
| <i>odonata</i> | 8 | 13 | 3 | 11 | 11 | 10 |
| <i>algues</i> | 24 | 14 | 3 | 22 | 22 | 20 |
| <i>ephemeroptera</i> | 12 | 15 | 2 | 10 | 12 | 13 |
| <i>lombric</i> | 15 | 16 | 2 | 16 | 16 | 16 |
| <i>chilopode</i> | 26 | 17 | 3 | 14 | 13 | 12 |
| <i>myxomycetes</i> | 27 | 18 | 3 | 19 | 19 | 18 |
| <i>nématode</i> | 23 | 19 | 3 | 15 | 14 | 14 |
| <i>plecopteres</i> | 29 | 20 | 2 | 13 | 15 | 15 |
| <i>araneae</i> | 18 | 21 | 3 | 21 | 20 | 19 |
| <i>formicidae</i> | 10 | 22 | 3 | 23 | 23 | 22 |
| <i>amphibiens</i> | 14 | 23 | 3 | 26 | 25 | 24 |
| <i>phytoseiidae</i> | 25 | 24 | 3 | 28 | 28 | 26 |
| <i>neuroptera</i> | 39 | 25 | 3 | 27 | 27 | 29 |
| <i>micromammifères</i> | 16 | 26 | 3 | 24 | 26 | 30 |
| <i>polypores</i> | 21 | 27 | 3 | 18 | 18 | 21 |
| <i>collembola</i> | 28 | 28 | 4 | 30 | 30 | 28 |
| <i>rotifera</i> | 38 | 29 | 4 | 31 | 31 | 31 |
| <i>carabidae</i> | 22 | 30 | 4 | 25 | 24 | 27 |

Les résultats (Tab . 13) sont assez semblables à l'analyse Prométhée brute. Notons toutefois l'apparition des Orthoptères devant les Bryophytes et les Gastéropodes terrestres dans la sélection du Top6 à la résolution SUPRA, et celle des Fourmis, des Orthoptères et des Rhopalocères (papillons de jour) dans le Top8 devant les Bryophytes et les Gastéropodes terrestres à la résolution INFRA.

Tab 13 - Classement des groupes des deux premiers clusters retenus sur leurs critères biologiques et taxonomiques, après une nouvelle analyse sur leurs critères pratiques seulement (MCDA séquentielle)

| Rang | INFRA | SUPRA |
|-------------|------------------|------------------|
| 1 | picidae | oiseaux |
| 2 | pteridophytes | flore_vasculaire |
| 3 | Arbres | chiropteres |
| 4 | chiropteres | ectomycorhiziens |
| 5 | formicidae | orthoptera |
| 6 | ectomycorhiziens | bryophyte |
| 7 | orthoptera | gasteropode_terr |
| 8 | rhopalocera | reptiles |
| 9 | gasteropode_terr | ephemeroptera |
| 10 | bryophyte | syrphidae |
| 11 | odonata | lombric |
| 12 | araneae | bankeraceae |
| 13 | bankeraceae | lichen |
| 14 | chilopode | saproxylique |
| 15 | bacillariophyta | plecopteres |
| 15 | charophyta | |
| 15 | chlorophyta | |
| 18 | myxomycetes | |

4.2.5 Analyses complémentaires

- *MCDA partielle et post-traitements*

Post-traitement du coût minimal

Sur les 30 meilleurs groupes sélectionnés par l'analyse fondée uniquement sur les méta-critères taxonomiques et biologiques, hors critères pratiques (objectif 1, résolution SUPRA, Tab. 12), on ajoute un filtre économique des coûts de suivi par groupe pour la sélection finale. L'estimation des coûts par groupe est fondée sur la somme de deux sous-critères de notre grille multicritères (i.e. coûts associés au matériel requis et au temps nécessaire pour échantillonner et identifier ce groupe taxonomique).

Par ce filtre, on sélectionne parmi les meilleurs candidats issus d'une analyse purement taxo-écologique, les moins chers à échantillonner (coût total = 2 ou 3). Cette stratégie maintient les Oiseaux, la flore vasculaire et les Bryophytes dans la sélection, mais en écarte les Champignons ectomycorhiziens, les Chiroptères, les Gastéropodes terrestres, les Coléoptères saproxyliques, au profit des Orthoptères, des Champignons Hydnes, des Reptiles et des Odonates ([Tab. 14](#)).

Tab 14 – Estimation standardisée du coût de suivi pour les groupes SUPRA retenus après une analyse fondée sur les critères taxonomiques et biologiques seulement, pour l'objectif 1. Les groupes au coût de suivi le plus faible (coût total = 2 ou 3) sont soulignés en rouge.

| <i>Rang_obj1_taxobio</i> | Taxo | couttot | <i>Rang_obj1_taxobio</i> | Taxo | couttot |
|--------------------------|-------------------------|---------|--------------------------|-------------------|---------|
| 1 | <u>oiseaux</u> | 2 | 15 | ephemeroptera | 4 |
| 2 | chiropteres | 4 | 16 | <u>lombric</u> | 3 |
| 3 | ectomycorhiziens | 4 | 17 | chilopode | 4 |
| 4 | <u>flore vasculaire</u> | 2 | 18 | myxomycetes | 5 |
| 5 | gasteropode_terr | 4 | 19 | nématode | 4 |
| 6 | saproxylique | 4 | 20 | plecopteres | 4 |
| 7 | <u>bryophyte</u> | 3 | 21 | <u>araneae</u> | 3 |
| 8 | <u>bankeraceae</u> | 3 | 22 | <u>formicidae</u> | 2 |
| 9 | <u>orthoptera</u> | 3 | 23 | <u>amphibiens</u> | 3 |
| 10 | lichen | 4 | 24 | phytoseiidae | 5 |
| 11 | syrphidae | 5 | 25 | neuroptera | 4 |
| 12 | <u>reptiles</u> | 3 | 26 | micromammifères | 4 |
| 13 | <u>odonata</u> | 3 | 27 | polypores | 4 |
| 14 | algues | 4 | 28 | collembola | 4 |
| | | | 29 | <u>rotifera</u> | 3 |

Post-traitement de la complémentarité écologique

Sur les 30 meilleurs groupes sélectionnés par l'analyse fondée uniquement sur les méta-critères taxonomiques et biologiques, hors critères pratiques (objectif 1, résolution SUPRA, [Tab. 12](#)), on ajoute un regard sur la complémentarité écologique des groupes taxonomiques, pour sélectionner le moins coûteux des groupes qui sont écologiquement proches. On effectue une analyse de dissimilarité écologique sur la base des 18 critères relatifs à la spécialisation de l'habitat, à la sensibilité au changement des conditions abiotiques, à l'écologie fonctionnelle, à la sensibilité spatio-temporelle. On réalise ensuite une classification de la matrice de dissimilarité de Bray-Curtis inter-groupes par CAH UPGMA et on identifie le groupe le moins coûteux dans chaque branche.

Sur la [figure 2](#), nous identifions ainsi la flore vasculaire, les Orthoptères, les Champignons Hydnes (Bankeraceae), les Reptiles, les Oiseaux et les Fourmis. Le groupe coûteux des Gastéropodes terrestres peut être ajouté pour représenter sa branche écologique, faute de groupe moins coûteux.

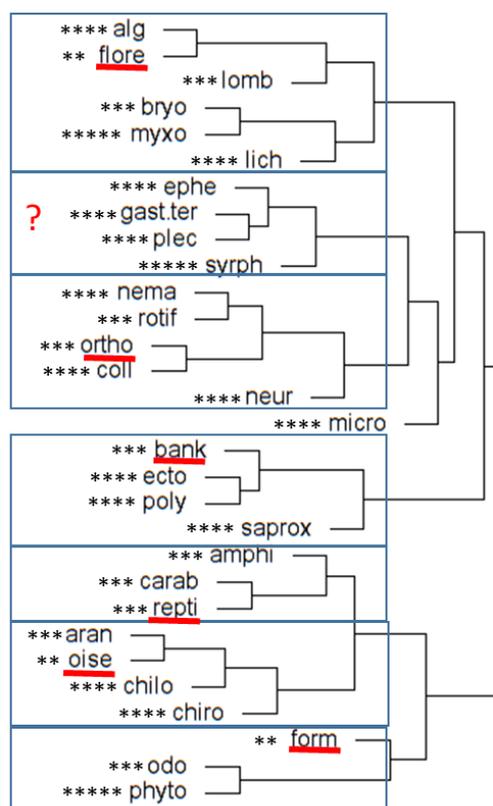


Fig. 2 - Sélection des groupes les moins coûteux au sein de chaque cluster de groupes similaires sur le plan biologique et écologique (coût d'échantillonnage et d'identification de 2 à 5, selon le nombre de *)

- *Recherche de taxons complémentaires*

Synthèse des analyses multicritères

Le [tableau 16](#) rassemble la sélection des meilleurs groupes de résolution SUPRA à l'issue des différentes analyses multicritères, complètes, séquentielles ou partielles et post-traitées, pour minimiser les contraintes économiques ou maximiser la complémentarité écologique.

En complément des taxons qui ressortent de l'analyse multicritères brute complète (Chiroptères, Oiseaux, Flore vasculaire, Champignons ectomycorhiziens, Gastéropodes terrestres, Bryophytes...), nous pouvons établir une liste de taxons additionnels (i) qui couvrent notamment des habitats complémentaires ou (ii) des groupes phylogénétiques complémentaires, et (iii) qui ont pu être pénalisés par d'actuels freins pratiques et méthodologiques susceptibles d'être modérés par des développements méthodologiques émergents : les **Lombrics** pour le suivi d'autres Invertébrés et de la faune du sol, les **Orthoptères et Reptiles** pour celui des milieux ouverts associés, les **Éphémères et Odonates** pour les suivis des milieux humides associés et des Arthropodes, les **Hydnes** pour le suivi des organismes saproxyliques et des Champignons, les **Fourmis et Orthoptères** pour celui des Arthropodes.

Tab 16 –Premiers groupes du classement de chaque analyse multicritères (résolution SUPRA)

| Objectif 1, résolution SUPRA | Type d'analyse | | | |
|------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--|
| | MCDA complète | MCDA séquentielle | MCDA sur critères taxoécologiques | |
| | | | post-traitement sur coûts | post-traitement sur complémentarité écologique + coûts |
| Rang | | | | |
| 1 | oiseaux | oiseaux | oiseaux | flore vasculaire |
| 2 | flore vasculaire | flore vasculaire | flore vasculaire | orthoptères |
| 3 | chiropteres | chiropteres | bryophytes | champignons Hydnes |
| 4 | Champignons ectomycorhiziens | Champignons ectomycorhiziens | orthoptères | reptiles |
| 5 | Gastéropodes terrestres | orthoptères | Champignons Hydnes | oiseaux |
| 6 | bryophytes | bryophytes | reptiles | formicidae |
| 7 | orthoptères | Gastéropodes terrestres | odonates | Gastéropodes terrestres |
| 8 | odonates | reptiles | Lombrics | |
| 9 | reptiles | ephemeroptera | Araignées | |
| 10 | formicidae | syrphidae | formicidae | |

Littérature sur les indicateurs de biodiversité directs en forêt

La liste complémentaire peut également faire l'objet de recherches bibliographiques, en compulsant la littérature sur les indicateurs directs de biodiversité en forêt et la configuration des dispositifs actuels de suivi de la biodiversité forestière à l'étranger (e.g. Gosselin & Paillet 2011).

D'après Burrascano *et al.* (2022), « les groupes souvent échantillonnés sont ceux considérés comme de bons indicateurs », mais cette « circularité » empêche le suivi de groupes moins étudiés. Les organismes du sol, de la litière, de la canopée sont les moins bien représentés. Les nouvelles technologies d'échantillonnage et d'identification (cf. chapitre III) sont à considérer pour combler cette lacune. Le guide de Burrascano *et al.* (2022) est conçu pour proposer des protocoles standardisés pour un suivi direct de la biodiversité en forêt, axé notamment sur les réponses à la gestion forestière, dans la perspective d'homogénéiser à large échelle les méthodologies et de permettre la comparaison de données. Fondé sur l'analyse de 41 jeux de données multi-taxons, en forêt européenne, il propose le suivi de variables dendrométriques et de 8 groupes taxonomiques : Plantes vasculaires (dont arbres), Bryophytes, Lichens, Champignons, Oiseaux, Chiroptères, Coleoptera, Araneae et Opiliones. Un protocole permettant de suivre ces groupes est détaillé. Cette sélection rejoint pour partie l'assortiment de groupes issu de notre analyse multicritères, en suggérant Plantes vasculaires, Bryophytes, Champignons, Oiseaux, Chiroptères, mais en ajoutant : Lichens, Coleoptera, Araneae et Opiliones (Tabsup. 7).

Sélection taxonomique dans les systèmes de suivi d'autres pays

Certains pays se sont dotés d'un système de suivi de la biodiversité, souvent non exclusivement forestier, qui inclut une sélection de groupes taxonomiques (Tab. 17, Tabsup 8). Cette sélection rejoint pour partie le lot de groupes issu de notre analyse multicritères, en suggérant Plantes vasculaires, Bryophytes, Champignons du sol, Oiseaux, Mollusques, Chiroptères, mais elle ajoute : Lichens, Araneae, Rhopalocères, Annélides, Acariens et (Micro)mammifères.

Au final, les préconisations du guide de Burrascano *et al.* (2022), les groupes suggérés par l’inventaire des dispositifs internationaux (Tab. 17) et par nos compléments à l’analyse multicritères brute (Tab. 16) ne se rejoignent que très partiellement.

Tab 17 - Panorama des groupes échantillonnés dans certains systèmes de suivi de la biodiversité

| | |
|---|---|
| Suisse * | Alberta * |
| Plantes vasculaires Mousses Mollusques Papillons diurnes Oiseaux nicheurs | Mammifères Oiseaux Acariens Oribates Plantes vasculaires Bryophytes Lichens |
| Nouvelle-Zélande * | Hesse (All.) – forêts |
| Plantes vasculaires Bryophytes Mammifères Lichens Chiroptères Oiseaux | Flore Coleoptera Macrolepidoptera Annelida Aculeata Araneae Heteroptera Oiseaux nicheurs |
| Suède* | |
| Plantes vasculaires (dont arbres) Bryophytes Lichens Champignons du sol Micromammifères | * Tous milieux |

4.2.6 Perspectives

Au choix des groupes succédera la désignation de combinaisons groupes * méthodes * métriques (présence-absence vs abondance vs biomasse). Pour les couples (méthode x groupe), différents scénarios d’acquisition de données pourront être examinés, incluant des méthodes d’échantillonnage et de dépouillement des échantillons automatiques ou manuelles.

L’estimation des coûts d’acquisition des données par outil et par groupe de biodiversité inclura les coûts économiques directs et les coûts associés aux contraintes logistiques (par exemple les coûts d’animation d’un réseau de collecteurs participatifs, les contraintes de conditionnement des échantillons, l’estimation des étapes intermédiaires de conversion de format des données telle que l’analyse bio-informatique associée au metabarcoding).

La maturité des combinaisons groupes * méthodes pour permettre leur déploiement à grande échelle sera évaluée à la lueur des récents projets engagés, avec le souci d’identifier les besoins de connaissance et de recherches complémentaires à développer (par exemple sur les prospections actuelles d’ADN environnemental de substrats ligneux).

La sélection de certains taxons suivis ensemble de façon intégrée pourra être proposée car les protocoles peuvent être assurés de concert par des opérateurs polyvalents aux savoir-faire analogues, et car la co-analyse reliant la réponse des taxons concernés est intéressante, notamment en lien avec les interactions biologiques entre ces taxons. À la mutualisation des relevés de terrain, pourra être également associée la mutualisation du travail en labo sur les échantillons, comme la mutualisation

des analyses acoustiques pour générer des données sur les oiseaux, les chiroptères et les orthoptères par exemple.

Enfin, une réflexion sera conduite pour identifier des groupes d'intérêt transversal pour le suivi de la biodiversité continentale (y compris forestière), dans une logique de surveillance biologique globale du territoire, intégrant la forêt et d'autres écosystèmes terrestres (humides, prairiaux...).

4.3 Synthèses sur les nouvelles technologies au service de l'échantillonnage et de l'identification des espèces

De récentes innovations pour les outils d'échantillonnage et d'identification des espèces correspondent à l'émergence de technologies devenues accessibles (électronique miniaturisée et moins coûteuse, capteurs optiques, méga-calculateurs numériques, efficacité des réseaux de neurones, protocoles génomiques) et applicables aux suivis 2.0 de la biodiversité en forêt. L'opportunité de ces outils en développement pour relever le défi de produire des données massives, reproductibles, à moindre coût, est questionnée. Ont été abordés, en 3 fiches distinctes, 3 types d'outils pour l'automatisation de l'échantillonnage : (i) méthodes acoustiques, (ii) optiques ou (iii) génétiques, et, de façon transversale, l'usage du deep learning pour l'automatisation de la reconnaissance des espèces dans les échantillons. Chaque fiche dresse un état de l'art bibliographique des principes et des applications des outils, en ajoutant une grille des coûts, par consultation d'experts externes, pour approcher le chiffrage des coûts élémentaires par type d'outil. Les trois fiches ont été individuellement soumises à la revue *Naturae* et figurent intégralement dans la partie II du rapport :

- Suivis de biodiversité par la reconnaissance automatique des espèces à partir des sons : perspectives et défis en milieu continental terrestre ([Partie II-O](#))
- Suivis de biodiversité par la reconnaissance automatique des espèces sur photographies : perspectives et défis ([Partie II-P](#))
- Suivis de biodiversité par la reconnaissance des espèces basée sur l'ADN : perspectives et défis ([Partie II-Q](#))

Références

- Acosta M. & Corral S. 2017. Multicriteria Decision Analysis and Participatory Decision Support Systems in Forest Management. *Forests* 8 (4): 116. <https://doi.org/10.3390/f8040116>
- Ananda J. & Herath G. 2009. A critical review of multi-criteria decision making methods with special reference to forest management and planning. *Ecological Economics* 68 (10): 2535–2548. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.05.010>
- Barros A.E.D., Macdonald E.A., Matsumoto M.H., Paula R.C., Nijhawan S., Malhi Y. & Macdonald D.W. 2014. Identification of Areas in Brazil that Optimize Conservation of Forest Carbon, Jaguars, and Biodiversity. *Conservation Biology* 28 (2): 580–593. <https://doi.org/10.1111/cobi.12202>
- Behzadian M., Kazemzadeh R.B., Albadvi A. & Aghdasi M. 2010. PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research* 200 (1): 198–215. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.01.021>
- Blasi C., Marchetti M., Chiavetta U., (...), Tilia A., Burrascano S. 2010. Multi-taxon and forest structure sampling for identification of indicators and monitoring of old-growth forest. *Plant Biosystems* 144 (1), 160-170
- Bouget, C., Brustel, H., Noblecourt, T., Zagatti, P. 2019. Les Coléoptères saproxyliques de France - Catalogue écologique illustré, Editions du MNHN, Collections « Patrimoines naturels » n°79, 744 p.
- Brans J.P., Mareschal B., Vincke P., 1984. PROMETHEE, a new family of outranking methods in multicriteria analysis. *Operational Research* 84:477–490
- Buchanan GM, Donald PF, Butchart SHM. 2011. Identifying Priority Areas for Conservation: A Global Assessment for Forest-Dependent Birds. *PLoS ONE* 6(12): e29080. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0029080>
- Büchs, W. (2003). Biotic indicators for biodiversity and sustainable agriculture—introduction and background. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 98(1-3), 1-16.
- Burrascano, S.; Trentanovi, G.; Paillet, Y.; Heilmann-Clausen, J.; Giordani, P.; Bagella, S. et al. (2022) Handbook of field sampling for multi-taxon biodiversity studies in European forests. Varazze (Savona) : PM edizioni, 114 p.
- Buse J, Šlachta M, Sladeczek FXJ, Carpaneto GM. 2018. Summary of the morphological and ecological traits of Central European dung beetles. *Entomological Science* 21(3):315–323 doi: <https://doi.org/10.1111/ens.12313>
- Faith, D. P., & Walker, P. A. (1996). How do indicator groups provide information about the relative biodiversity of different sets of areas?: on hotspots, complementarity and pattern-based approaches. *Biodiversity letters*, 18-25.
- Fanelli E., Bianchelli S., Fogliani F., Canals M., Castellan G., Güell-Bujons Q., Galil B., Goren M., Evans J., Fabri M.-C., Vaz S., Ciuffardi T., Schembri P.J., Angeletti L., Taviani M. & Danovaro R. 2021. Identifying Priorities for the Protection of Deep Mediterranean Sea Ecosystems Through an Integrated Approach. *Frontiers in Marine Science* 8
- Fowler A.M., Macreadie P.I. & Booth D.J. 2015. Renewables-to-reefs: Participatory multicriteria decision analysis is required to optimize wind farm decommissioning. *Marine Pollution Bulletin* 98 (1): 368–371. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.07.002>
- Gao, T., Nielsen, A. B., & Hedblom, M. (2015). Reviewing the strength of evidence of biodiversity indicators for forest ecosystems in Europe. *Ecological Indicators*, 57, 420-434.
- Gossner, M. M. et al. 2015. A summary of eight traits of Coleoptera, Hemiptera, Orthoptera and Araneae, occurring in grasslands in Germany. *Sci. Data*. 2:150013 doi: 10.1038/sdata.2015.13
- Heink, U., & Kowarik, I. (2010). What criteria should be used to select biodiversity indicators?. *Biodiversity and Conservation*, 19(13), 3769-3797.
- Heinken, T., Diekmann, M., Liira, J., Orczewska, A., Schmidt, M., Brunet, J., & Vanneste, T. 2022. The European forest plant species list (EuForPlant): Concept and applications. *Journal of Vegetation Science*, 33(3), e13132.
- Hermy, M., & Cornelis, J. (2000). Towards a monitoring method and a number of multifaceted and hierarchical biodiversity indicators for urban and suburban parks. *Landscape and urban planning*, 49(3-4), 149-162.
- Hilty, J. & Merenlender, A. 2000. Faunal indicator taxa selection for monitoring ecosystem health. *Biological conservation*, 92(2), 185-197.

- Huth A., Drechsler M. & Köhler P. 2005. Using multicriteria decision analysis and a forest growth model to assess impacts of tree harvesting in Dipterocarp lowland rain forests, *Decision Support in Multi Purpose Forestry. Forest Ecology and Management* 207 (1): 215–232. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.10.028>
- Jactel H., Branco M., Duncker P., Gardiner B., Grodzki W., Langstrom B., Moreira F., Netherer S., Nicoll B., Orazio C., Piou D., Schelhaas M.-J. & Tojic K. 2012. A Multicriteria Risk Analysis to Evaluate Impacts of Forest Management Alternatives on Forest Health in Europe. *Ecology and Society* 17 (4). <https://doi.org/10.5751/ES-04897-170452>
- Juutinen, A., & Mönkkönen, M. (2004). Testing alternative indicators for biodiversity conservation in old-growth boreal forests: ecology and economics. *Ecological Economics*, 50(1-2), 35-48.
- Larrieu, L., Gosselin, F., Archaux, F., Chevalier, R., Corriol, G., Dauffy-Richard, E., ... & Bouget, C. (2018). Cost-efficiency of cross-taxon surrogates in temperate forests. *Ecological Indicators*, 87, 56-65.
- Lieske D.J., Tranquilla L.M., Ronconi R. & Abbott S. 2019. Synthesizing expert opinion to assess the at-sea risks to seabirds in the western North Atlantic. *Biological Conservation* 233: 41–50. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.02.026>
- Pearson, D. L. (1994). Selecting indicator taxa for the quantitative assessment of biodiversity. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 345(1311), 75-79.
- Rodríguez-Merino A., García-Murillo P. & Fernández-Zamudio R. 2020. Combining multicriteria decision analysis and GIS to assess vulnerability within a protected area: An objective methodology for managing complex and fragile systems. *Ecological Indicators* 108: 105738. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105738>
- Schmidt et al., 2013 Waldartenlisten der Farn- und Blütenpflanzen, Moose und Flechten Deutschlands.. BfN-Skripten, 299 p.
- Schneider, A., Blick, T., Pauls, S.U. & Dorow, W.H.O. 2021. The list of forest affinities for animals in Central Europe – A valuable resource for ecological analysis and monitoring in forest animal communities? *Forest Ecology and Management* 479: 1185
- Seidl R., Rammer W. & Lexer M.J. 2011. Climate change vulnerability of sustainable forest management in the Eastern Alps. *Climatic Change* 106 (2): 225–254. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9899-1>
- Sutti F., Strong A. & Perlut N. 2017. A Multicriteria Decision Analysis for Identifying Priority Conservation Areas for Grassland Birds. *Northeastern Naturalist* 24 (sp8): 99–118. <https://doi.org/10.1656/045.024.0sp801>
- Zhang T., Lan J., Yu J., Liu Z. & Yao S. 2020. Assessment of forest restoration projects in different regions using multicriteria decision analysis methods. *Journal of Forest Research* 25 (1): 12–20. <https://doi.org/10.1080/13416979.2019.170436>

Chap. 5 : Variables écologiques et dendrologiques

Auteurs du chapitre :

Marion Gosselin (INRAE) et Aristide Chauveau (INRAE)

Coordinateurs scientifiques de la tâche :

- Marion Gosselin, Ingénieur en Ecologie Forestière, INRAE, Unité de Recherche Ecosystèmes Forestiers. Domaine des Barres, F – 45290 Nogent-sur-Vernisson, 02 38 95 03 29, marion.gosselin@inrae.fr
- Hervé Jactel, Directeur de Recherche, INRAE, UMR 1202 Biodiversité Gènes et Communautés, Équipe BioDiv, INRAE 69 route d'Arcachon, 33610 Cestas– France, 05 35 38 53 11, herve.jactel@inrae.fr

Résumé

La tâche D se situe dans la perspective des objectifs 2 et 3, où le suivi national envisagé aurait à évaluer l'impact des politiques publiques sur la biodiversité en forêt. **Objectif 2** : suivre l'état et la dynamique de la biodiversité en forêt exploitée versus en forêt non-exploitée et protégée (réserves intégrales), **Objectif 3** : suivre l'état et la dynamique de la biodiversité en forêt en lien avec certaines actions de gestion.

En prenant comme cadre conceptuel les effets « en cascade » des politiques publiques sur les pratiques sylvicoles, les habitats et la biodiversité, nous avons successivement :

- Identifié les politiques publiques susceptibles d'influencer les pratiques forestières, et conclu que le Programme National De la Forêt et du Bois (PNFB) et ses déclinaisons régionales (PRFB, Programmes Régionaux de la Forêt et du Bois) intégraient l'ensemble des orientations de ces politiques publiques ;
- Identifié les principales pratiques susceptibles d'être impactées par la mise en œuvre du PNFB et des PRFB ;
- Réalisé un travail bibliographique sur les liens entre pratiques forestières et biodiversité ;
- Etabli une liste de 13 pratiques d'intérêt, au titre de leur lien avec les PNFB et PRFB ou de leur lien avec la biodiversité ;
- Construit une procédure pour (i) identifier, pour chaque pratique, les variables de gestion (VG) et les variables dendrologiques et écologiques (VDE) à suivre en parallèle des variables d'état de la biodiversité ; (ii) formuler les attendus pour chacune de ces variables (unité, échelle d'acquisition de la donnée, etc.) ; (iii) analyser les dispositifs de suivi au regard de l'attendu pour renseigner in fine le critère « Variables environnementales et de gestion » utile à l'analyse de l'existant dans le cadre de l'élaboration des sous-maquettes ;
- Appliqué cette procédure entièrement à la pratique « coupes » et partiellement (item (i)) pour les autres pratiques.

5.1 Contexte et problématique

La tâche D du projet se situe dans la perspective des objectifs 2 et 3, où le suivi national envisagé aurait à évaluer l'impact des politiques publiques sur la biodiversité en forêt :

- Objectif 2 : suivre et comparer l'état et la dynamique [de composantes] de la biodiversité en forêt en forêt exploitée (et non protégée) versus en forêt non-exploitée et protégée (Réserves intégrales) ;
- Objectif 3 : suivre l'état et la dynamique [de composantes] de la biodiversité en forêt en lien avec certaines actions de gestion.

Elle a pour objectif d'identifier les variables qui seraient alors à suivre en plus des relevés multi-taxonomiques envisagés dans le suivi « de base » de la biodiversité en forêt, qui est celui de l'objectif 1. Ces variables supplémentaires doivent permettre d'identifier, en chaque placette d'inventaire, la mise en œuvre de politiques publiques, soit directement (**variables de gestion, VG**), soit indirectement par les effets sur la composition et la structure des peuplements forestiers (**variables dendrologiques et écologiques, VDE**).

Nous avons choisi une démarche « top-down » en suivant le raisonnement suivant : des politiques publiques ont un effet sur les options ou objectifs de gestion forestière, les options de gestion forestière se traduisent par la mise en œuvre de pratiques sylvicoles, ces pratiques sylvicoles modifient la composition et la structure des peuplements forestiers qui, *in fine* influencent l'abondance et la qualité des habitats d'espèces et donc la biodiversité.

Suivre en parallèle l'évolution de la biodiversité et l'évolution de variables renseignant sur la mise en œuvre de pratiques sylvicoles encouragées par les politiques publiques permettra :

- d'identifier des hypothèses quant aux effets des politiques publiques sur la biodiversité ;
- de vérifier si les relations déjà connues et documentées dans la littérature scientifique sont stables dans le temps, ou selon les contextes.

La tâche D ne vise pas à traiter les politiques publiques et pratiques forestières dans leur exhaustivité. Son objectif est de proposer une procédure, s'appuyant sur les effets « en cascade » des politiques publiques sur les pratiques sylvicoles, les habitats et la biodiversité, pour identifier les variables écologiques et dendrologiques à suivre en parallèle des variables d'état de la biodiversité, dans le cadre de l'objectif 3 (évaluer l'impact de politiques publiques sur la biodiversité en forêt). La tâche D a démontré la possibilité et la faisabilité de cette procédure en l'appliquant dans le cas des pratiques de « coupes »¹⁰ encouragées par le Programme National de la Forêt et du Bois.

Dans le cadre de l'objectif 2 (comparer la biodiversité et son évolution entre réserves intégrales et peuplements exploités), la tâche D propose une procédure pour identifier les variables écologiques d'intérêt à suivre en parallèle des relevés de biodiversité, en tant que covariables (pas besoin dans ce cas de variables principales pour caractériser la pratique, celle-ci étant localisée de façon pérenne, et cartographiable).

¹⁰ « Opération sylvicole portant sur des bois commercialisables. Se distingue des travaux sylvicoles par le fait qu'elle génère habituellement des recettes au propriétaire forestier. » (Bastien et Gauberville (Eds.), 2011)

5.2 Méthodes

5.2.1 Effet des politiques publiques sur les pratiques forestières

Nous avons d'abord recensé, à dire d'experts (réunion du 11 février 2020 avec Arnaud Sergent, Vincent Banos, Philippe Deuffic, Elodie Brahic, Marion Gosselin et Hervé Jactel (INRAE), et échanges ultérieurs), les politiques publiques (PP) les plus susceptibles d'influencer notablement les pratiques forestières.

Nous avons ensuite analysé le Programme National de la Forêt et du Bois (PNFB) et ses déclinaisons régionales (Programmes régionaux de la Forêt et du Bois, PRFB), qui synthétisent les orientations et la mise en œuvre de ces PP, pour identifier les pratiques forestières impactées (par exemple : changement d'espèces, âge d'exploitabilité des arbres, plantations, modes d'exploitation, densité des peuplements, valeur des prélèvements de bois...) :

1. **Grille d'analyse des PRFB** : notre grille d'analyse croise 8 objectifs standards, partagés par tous les PRFB (au moins 10 sur 12) et 26 pratiques forestières standards, susceptibles d'être mises en œuvre à l'échelle du peuplement pour atteindre ces objectifs (établies par regroupement de 64 pratiques initiales détaillées). Pour chaque PRFB, nous avons renseigné chaque case de la grille : 1 si le PRFB mentionne explicitement la pratique pour l'objectif concerné, 0 sinon. Ces 12 matrices (12 PRFB) ont ensuite été résumées en une seule (avec dans chaque case, la somme des valeurs renseignées pour chaque PRFB, soit une pondération entre 0 et 12 pour chaque pratique).
2. **Exploitation de la grille** : Nous avons calculé des statistiques descriptives simples de la matrice (histogrammes), chacune des 12 régions étant une répétition du test. Un dendrogramme a permis regrouper les pratiques le plus souvent citées ensemble, c'est-à-dire dans un même PRFB.

Nous avons ainsi identifié 11 pratiques mises en avant par les PRFB.

5.2.2 Travail bibliographique

En appui au choix de pratiques ou de variables à suivre, nous avons exploré la bibliographie sur les relations entre la biodiversité et les pratiques, variables de gestion ou variables dendrométriques et écologiques. A dire d'expert, nous avons aussi évalué les liens (directs ou indirects, forts ou faibles, univoque ou non) entre les 11 pratiques mises en avant par les PRFB et des variables génériques de gestion ou des variables dendrométriques et écologiques.

(i) Liens entre pratiques de gestion encouragées par les PRFB et la biodiversité : nous avons recherché les méta-analyses ou synthèses bibliographiques récentes, disponibles en milieux forestiers tempérés et boréaux, pour le cas des 6 pratiques partagées par tous les PRFB : coupes de régénération, éclaircies, régénération naturelle (cf. [Tab 1](#)) et mélange d'essences, changement d'essences, plantations (cf. [Tab 2](#)).

Tab 1. Equations de recherche sous SCOPUS pour le cas des coupes de régénération, éclaircies, régénération naturelle.

| | | | |
|--|--|--|---|
| Bloc « biodiversité » (in TITLE-ABS-KEY) | <i>forest* AND (species AND richness OR species AND diversity OR biodiversity</i> | | |
| AND | | | |
| Bloc « pratique » (in TITLE-ABS-KEY) | <i>thinning</i> | <i>(silviculture OR clearcut* OR select* cut* OR retention) AND regeneration)</i> | <i>natural* regenerat* OR Shelterwood OR Seed-Tree OR Two-Age</i> |
| AND | | | |
| Bloc « revue » (in TITLE) | <i>review OR systematic OR synthesis OR meta-analysis OR meta-analyses</i> | | |
| AND NOT | | | |
| Bloc « biome » (in TITLE-ABS-KEY) | <i>tropical</i> | | |

Tab 2. Equations de recherche sous WOS pour le cas des mélange d'essences, changement d'essences, plantations (par comparaison aux forêts « naturelles »)

| | | | |
|----------------------------------|--|--|--|
| Bloc « biodiversité » (in TOPIC) | <i>(biodiversity or (species and richness) or (species and diversity))</i> | | |
| AND | | | |
| Bloc « pratique » (in TOPIC) | <i>(forest or stand or (tree species)) AND (pure or monoculture) AND (mix* or polyculture)</i> | <i>(change or substitution) AND (tree species) AND (forest or stand)</i> | <i>(plantation or planted) AND (natural* forest)</i> |
| AND | | | |
| Bloc « revue » (in TOPIC) | <i>meta-analys*</i> | | |

(ii) Liens entre VDE (associées à des pratiques mises en avant par les PRFB¹¹) et biodiversité : nous n'avons pas exploré l'ensemble des VDE ni des pratiques. Nous avons établi une liste de VDE (sur la base des données IGN, ICP forests et compléments à dire d'experts), que nous avons évaluées sur leur degré de relation avec les pratiques de gestion et sur leur lien avec la biodiversité. Cette matrice « [Pratiques x VDE](#) » a ensuite guidé le choix des VDE sélectionnées pour le suivi de chaque pratique¹².

Dans le cas particulier de la pratique « mélange d'essences », qui faisait partie des pratiques les moins documentées par les méta-analyses ou synthèses existantes (cf. [Tab 4](#)) mais qui est souvent mise en avant avec l'idée, à vérifier, d'un effet positif sur la biodiversité, nous avons choisi de mener une méta-analyse sur deux VDE associées à cette pratique¹³ :

- La richesse en essences du peuplement (analyse par régression de l'effet du nombre d'essences) ;

¹¹ Un travail d'identification des liens entre VDE génériques (pas forcément dépendantes de pratiques de gestion) et biodiversité a été envisagé, mais n'a pas été réalisé. Il aurait pu identifier des VDE importantes pour la biodiversité, mais indépendantes des pratiques de gestion. Nous avons considéré que ce n'était pas crucial dans les cadres des objectifs 2 et 3, qui visent à évaluer l'effet de politiques publiques via les pratiques forestières.

¹² La matrice « Pratiques x VDE » peut être consultée dans [l'Annexe III-G](#) du rapport (en ligne).

¹³ Une troisième VDE associée à cette pratique a été identifiée : la répartition des abondances entre essences. Celle-ci n'a pas été traitée dans notre méta-analyse

- La variable catégorielle « peuplement pur » versus « peuplement mélangé » (analyse de la comparaison par $\log(\text{ratio})$).

(iii) Liens entre variables de gestion, pratiques phares des PRFB et biodiversité : [dans un tableau Excel](#)¹⁴, pour une liste de variables génériques de gestion (VG), nous avons renseigné à dire d'expert :

- Le lien de la VG avec la biodiversité (sur la base de nos connaissances bibliographiques, en citant les références connues, mais sans faire de revue systématique) ;
- Le lien de la VG avec les 11 pratiques mises en avant par les PRFB.

Ce tableau a été utilisé par la suite pour identifier des VG d'intérêt, au double titre de leur lien avec la biodiversité et des pratiques « phares » des PRFB, ou au titre de l'un de ces deux liens s'il était reconnu comme fort. Il a aussi été utilisé pour sélectionner les pratiques à suivre.

(iv) Réflexions sur les apports de la télédétection pour l'acquisition de VDE : le stage bibliographique de Lucia Toly Moboula a porté sur les possibilités de télédétection des mélanges d'essences. Il a abordé les questions suivantes :

- Est-il possible de discriminer les peuplements feuillus (purs ou mélangés) des peuplements résineux (purs ou mélangés) ?
- Est-il possible de discriminer les peuplements purs (une seule essence principale, représentant plus de 75% du peuplement en abondance d'individus ou en taux de recouvrement) des peuplements mélangés (au moins deux essences principales d'abondance supérieure à 25%) ? Les mélanges sont-ils plus faciles à détecter lorsqu'il s'agit de mélanges feuillus-résineux ?
- Pour un peuplement pur, est-il possible d'identifier l'espèce ?
- Pour un peuplement mélangé (c'est-à-dire qui compte au moins deux essences d'abondances sensiblement égales), est-il possible de discriminer les essences principales ?

Par ailleurs, nous avons utilisé une synthèse récente relative à la télédétection des coupes (contribution de Kenji Osé et Stéphanie Wurpillot à l'expertise collective CRREF, In : Landmann et al, 2023) pour alimenter la rédaction de la fiche « coupes ».

5.2.3 Choix des pratiques forestières d'intérêt dans le cadre d'un suivi de biodiversité en forêt

La liste des 11 pratiques phares des PRFB, augmentée de la pratique « réseau national de réserves intégrales » (prônée à l'échelle nationale par le PNFB) et de 3 pratiques ajoutées par le groupe projet à l'issue du travail bibliographique intermédiaire, a été présentée et discutée en ateliers ouverts aux utilisateurs ([Webinaires du projet des 1^{er} février et 5 mai 2022](#)¹⁵).

Les participants ont identifié des pratiques importantes à ajouter à cette liste : pratiques liées au bois énergie (peu mis en avant dans les PRFB), type d'exploitation (notamment débardage par câble, cheval ou engins motorisés), pratiques de gestion passées (caractère ancien ou non du peuplement). Ils ont

¹⁴ Ce tableau Excel est disponible dans [l'Annexe III-H du rapport](#) (en ligne).

¹⁵ Voir les comptes-rendus des webinaires du projet disponibles dans les [Annexes III-A](#) (en ligne).

souhaité pouvoir préciser certaines pratiques par des sous-catégories (par exemple : âge ou diamètre d'exploitabilité pour la pratique « coupes de régénération »).

Sur la base de ces discussions, l'équipe projet a complété la liste et procédé à des regroupements de pratiques (certaines étant des sous-catégories pouvant être utilisées comme variables qualifiant une pratique d'ordre supérieur, par exemple : le type de débardage ou le type de coupe sont des variables de gestion qualifiant la pratique « coupes »), pour aboutir à une liste finale de 13 pratiques à suivre (cf. Tab 4).

5.2.4 Choix des variables à suivre

Les ateliers des 1^{er} février et 5 mai 2022, consacrés au choix des pratiques à traiter et des VDE à suivre, ont testé des procédures, sous forme de liste de questions, pour identifier les variables à suivre. Ce faisant, ils ont permis de clarifier les attendus du suivi des pratiques et de prendre les décisions suivantes :

- Attendus du suivi : veut-on suivre l'intentionnalité de la gestion (c'est-à-dire ce qui a été prévu en amont de la mise en œuvre de la pratique) ou la réalité de gestion (c'est-à-dire sa mise en œuvre) et des structures de peuplement forestier qui en résultent sur le terrain ? Dans l'objectif 3, les deux aspects sont concernés : pour évaluer l'impact de politiques publiques sur la biodiversité en forêt, on cherche à suivre les effets de l'intentionnalité de la gestion, telle qu'encouragée par les politiques publiques, ainsi que les effets de la gestion effectivement pratiquée sur le terrain. D'autre part, les deux ateliers ont conclu que l'intentionnalité de gestion n'est pas constatable sur le terrain. Décision : pour les pratiques d'intérêt, et pour chaque variable de gestion qualifiant la mise en œuvre de la pratique, l'intentionnalité sera évaluée par enquête auprès des gestionnaires (voir cadre ICP Forests utilisé par RENECOFOR) ou par étude des documents de gestion (PSG ou aménagement), en parallèle des suivis de pratiques mises en œuvre sur le terrain (sur les points d'inventaire multi-taxonomique).
- Le lien univoque entre une VDE et une pratique sylvicole intentionnelle est rarement observé : il est difficile de trouver une VDE qui soit une variable indicatrice, de façon univoque, de la mise en œuvre d'une pratique de gestion. Décision : abandonner la recherche de lien univoque entre pratique et VDE, et préférer la notion de lien **direct** entre Pratique et VDE, en définissant une VDE associée à une pratique par « une variable, dendrométrique ou écologique, qui rend compte de l'effet direct d'une pratique sur les composantes de l'écosystème sur lesquelles elle s'applique »
- Pour les pratiques ou variables zonales, pérennes ou semi-pérennes, donc cartographiables (e.g. aires protégées, îlots de sénescence, forêts anciennes) : la stratégie d'échantillonnage proposée dans le cas de l'objectif 2 sera applicable ou transposable à ces pratiques. Ces pratiques étant cartographiables, il n'est pas nécessaire de suivre des VG ou VDE indicatrices de ces pratiques pour identifier leur mise en œuvre. Nous recensons tout de même des variables de gestion, ou des VDE associées, qui pourront être suivies en sus.

5.2.5 Identification des VG et VDE indicatrices de la mise en œuvre des pratiques ou des changements de pratiques

- *Démarche générale*

Nous avons choisi de distinguer :

- Des **variables de gestion** (VG), qui permettent de qualifier la pratique en tant que telle, de mesurer sa mise en œuvre ou non, ses modalités, son intensité ;
- Des **variables dendrométriques et écologiques** (VDE), qui permettent de caractériser l'effet direct d'une pratique sur les composantes de l'écosystème sur lesquelles elle s'applique.

Par exemple, pour la pratique des coupes, l'intensité de la coupe est une variable de gestion, qui caractérise la pratique, tandis que la densité de tiges après la coupe est une variable dendrométrique qui mesure l'effet de la pratique sur la population d'arbres (qui est la partie de l'écosystème sur laquelle la coupe s'applique directement).

- *Priorisation des VG et VDE*

La priorisation des variables à suivre est réfléchi pour une pratique donnée.

Les variables de gestion ont été priorisées en premier lieu selon leur importance dans la caractérisation de la pratique, puis selon leur lien potentiel avec la biodiversité. Les variables dendrométriques et écologiques ont été priorisées selon leur lien potentiel avec la biodiversité, notamment avec les taxons retenus pour l'élaboration des maquettes de suivi de PASSIFOR-2, ou avec plusieurs groupes taxonomiques, ou encore avec des variables préconisées dans ce cadre par [Oettel et Lapin \(2021\)](#).

5.2.6 Formulation des attendus

Les attendus ont été réfléchis par les pilotes des tâches D et A, en tenant compte des conclusions des ateliers avec les utilisateurs (webinaires des 1^{er} février et 5 mai 2022).

Pour chaque variable, qu'il s'agisse de VG ou de VDE, nous précisons la nature de la variable à suivre, si nécessaire le pas de temps sur lequel la variable est définie, et ce qui est attendu pour obtenir une mesure représentative : l'échelle de mesure (peuplement, paysage ou région), le mode d'obtention des données (placettes temporaires, permanentes ou semi-permanentes, enquête, cartographie, moyenne de plusieurs relevés...), l'intervalle de repasse si nécessaire. Voir la notice explicative des fiches « pratiques de gestion », en [partie II-R du rapport](#), pour plus de précisions.

Mode d'obtention des données pour les variables de gestion : dans certains cas, l'action anthropique (= la pratique en tant qu'intervention humaine) est détectable ou observable sur le terrain (par exemple, une coupe laisse des souches d'exploitation) et la variable de gestion peut être notée sur la placette d'inventaire. Dans d'autres cas, la variable de gestion n'est accessible que par enquête auprès du propriétaire (par exemple, type de débardage) ou par des observations à échelle plus large que celle du relevé d'inventaire (par exemple surface totale de coupe dans le paysage autour du relevé).

Mode d'obtention des données pour les variables dendrométriques et écologiques : ces données sont soit observables sur le terrain (moyennant parfois des placettes permanentes ou semi-permanentes), soit à acquérir par des moyens géomatiques (télédétection ou exploitation de cartographies).

5.2.7 Analyse des attendus et de l'existant relatifs aux VG et VDE, pour la production des camemberts par dispositif, et proposition de protocole d'acquisition des variables.

Par rapport aux attendus sur chaque variable, l'existant est analysé dans les dispositifs de suivi suffisamment représentatifs de la forêt française métropolitaine, ou dans les dispositifs apportant des données ciblées sur la pratique étudiée (la liste des dispositifs analysés peut donc changer selon les pratiques de gestion ciblées).

La rubrique « Description succincte des dispositifs étudiés » résume dans un tableau les caractéristiques des dispositifs susceptibles d'être pertinents pour un suivi des pratiques de gestion.

La concordance avec l'attendu est notée selon trois niveaux : Conforme, Partiellement conforme, Non conforme. La conformité d'un dispositif par rapport à l'attendu est évaluée d'après les mesures qu'il réalise et leur cohérence avec l'échelle spatio-temporelle de mesure souhaitée. Un dispositif peut ne pas être à lui seul représentatif de l'ensemble des forêts métropolitaines mais être conforme, dans son protocole et pour son objet d'étude, à ce qui est attendu.

En fin de fiche, un tableau synthétise par des graphiques (de type « camemberts ») la proportion de variables suivies de manière conforme, partiellement conforme ou non conforme par les dispositifs évalués.

En complément, nous formulons des propositions d'amélioration de l'existant, ou, en cas d'absence de données, des propositions d'implantation de la mesure.

Pour plus de détail, voir la Notice explicative des fiches « pratiques de gestion », en [partie II-R](#) du rapport.

5.2.8 Réalisation des fiches « pratiques de gestion »

Pour chaque pratique, une fiche présente les VG et VDE à suivre, analyse les données des dispositifs existants au regard de ces attendus, et fournit *in fine* pour chaque dispositif le camembert destiné à renseigner le critère « Variables environnementales et de gestion » du tableau synthétique coloré des sous-maquettes livrées par PASSIFOR-2.

Les fiches sont organisées comme suit :

Intitulé de la pratique

1. Description de la pratique et de ses déclinaisons
2. Motivations pour le suivi de cette pratique (dont lien avec la biodiversité)
3. Description succincte des dispositifs étudiés
4. Synthèse des variables sélectionnées
5. Variables de gestion caractérisant la pratique
 - Intitulé de la variable (préciser le type de suivi, options combinables : placette temporaire, placette permanente, enquête, télédétection)
 - Attendu : brève description, type de variable (qualitative, quantitative), unité, catégories le cas échéant
 - Existant : variables existantes dans les dispositifs retenus
 - Compléments envisageables : propositions d'amélioration de l'existant ou, si absence de données, proposition d'implémentation de la mesure
6. Variables dendrométriques et écologiques retenues pour mesurer l'effet direct de la pratique sur les composantes de l'écosystème sur lesquelles elle s'applique
 - Intitulé de la variable
 - Attendu
 - Existant
 - Compléments envisageables
7. Synthèse

La rubrique « Description de la pratique et de ses déclinaisons » a été rédigée sur la base de nos connaissances bibliographiques et d'expertise. Elle décrit la pratique de gestion et ses modalités d'application.

La rubrique « Motivations pour le suivi de la pratique » a été rédigée à partir des résultats du travail bibliographique réalisé dans la tâche D, ainsi que des discussions en équipe projet et en ateliers avec les utilisateurs (webinaires des 1er février et 5 mai 2022).

Les deux rubriques « Variables de gestion caractérisant la pratique » et « variables dendrométriques et écologiques » détaillent, pour chaque variable :

- les attendus,
- l'analyse de l'existant sur les dispositifs ciblés, notée selon trois niveaux : Conforme, Partiellement conforme, Non conforme ;
- et, si besoin, les propositions pour implémenter la mesure lorsqu'elle n'existe pas déjà ou pour l'améliorer lorsque l'existant n'est que partiellement conforme.

Dans la rubrique « Synthèse », un tableau synthétise par des graphiques la proportion de variables suivies de manière conforme, partiellement conforme ou non conforme par les dispositifs évalués. Il est accompagné d'un texte résumant l'adéquation des dispositifs aux objectifs, leur rôle envisagé, les obstacles actuels et les développements nécessaires, le rôle éventuel d'autres acteurs et les perspectives sur la structure que pourrait prendre un suivi de la pratique.

[La Partie II-S](#) de ce rapport fournit un exemple de fiche entièrement renseignée pour le cas de la pratique « [coupes](#) » ; la Partie I (ci-dessous, chap. [5.3.6](#)) en fournit des extraits (rubriques de synthèses : 4 et 7). Pour les autres pratiques d'intérêt, seules les rubriques 1, 2 et 4 sont renseignées (nous fournissons pour celles-ci une liste de VG et VDE candidates, [cf. Partie II-S du rapport](#), mais il reste à dérouler l'exercice de définition des attendus pour chaque variable et de confrontation aux données offertes par les dispositifs existants).

5.3 Principaux résultats

5.3.1 Politiques publiques susceptibles d'impacter les pratiques forestières

Les politiques qui ont le plus de force de frappe sont les politiques réglementaires et les politiques qui sont sources de financements (par exemple en créant une demande de bois) : par exemple la politique Climat-Energie crée une nouvelle demande (en bois-énergie). Elle ne se traduit pas forcément par plus de prélèvements, mais par de nouvelles utilisations des bois.

Les autres politiques impactantes sont les périmètres de protection (sylviculture de protection, rétention) :

- Code Urbanisme : espaces boisés classés ;
- Code Environnement : autres espaces type Arrêté de Protection de Biotope (APB), Réserve biologique intégrale ou dirigée, etc.

En dehors des changements induits par ces politiques publiques (réglementaires, financements et périmètres de protection), peu de choses changent. Dans un milieu (la forêt) où il y a peu de changements de façon générale, ce qui a changé depuis 10 ans, c'est bien l'impact du bois-énergie (même si, finalement, il y a encore peu d'exploitations de bois-énergie).

La politique forestière actuelle incite à la *gestion* active (pas à des orientations sylvicoles précises). La puissance publique est de moins en moins prescriptrice de pratiques précises : elle donne des orientations (par exemple : prélever plus) mais laisse beaucoup de liberté aux propriétaires et gestionnaires forestiers sur les moyens. En revanche, le nombre d'acteurs devient plus concentré (quelques coopératives + ONF sont les principaux prescripteurs de la gestion).

Le groupe d'experts a conduit sa réflexion sur la base de 4 tableaux présentés en [Annexe III-i](#), qui recensent dans des onglets séparés :

- Les outils des politiques publiques ;
- Les dispositifs de zonage à enjeux spécifiques ;
- Les enjeux d'articulation entre prescriptions forestières et dispositifs stratégiques territoriaux ;
- Le cadrage stratégique de la politique forêt-bois.

Le groupe d'experts est parvenu à la conclusion que **le PNFB (Programme National de la Forêt et du Bois) et ses déclinaisons régionales (PRFB) intègrent tous les objectifs des politiques publiques transversales concernant de près ou de loin la forêt et présentées au [Tab 2](#).**

Tab 2. Cadrage stratégique de la politique Forêt-Bois

| | Politique forêt-bois | Politique biodiversité | Politique changement climatique | Politique énergétique | Politique bioéconomie | Autres |
|-----------------|--|---|--|---|--|---|
| National | Programme national de la forêt et du bois 2016-2026 (PNFB) | Stratégie nationale de la biodiversité 2011-2020 | Plan National d'Adaptation au Changement Climatique 2018-2022 (PNACC) | Loi n°2015-993 du 17 août relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) | Une stratégie bioéconomie pour la France, Enjeux et vision / Plan d'action 2018-2020 | Stratégie nationale de transition écologique vers un développement durable 2015-2020 |
| | LAAF (loi d'avenir pour l'agriculture, l'alimentation et la forêt, 13 oct. 2014) | Orientations nationales pour la préservation et la remise en bon état des continuités écologiques (ONTVB) | Projet de stratégie nationale Bas-Carbone (en cours de consultation publique en 2020) | Stratégie Nationale de Mobilisation de la Biomasse (SNMB) | | Economie circulaire, plan ressources pour la France 2018 |
| | Code forestier | Loi n°2016-1087 du 8 août 2016 pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages | Plan climat 2017 | | | Label "bâtiment biosourcé" (Décret n° 2012-518 du 19 avril 2012, Arrêté du 19 décembre 2012 relatif au contenu et aux conditions d'attribution du label « bâtiment biosourcé ») |
| | Plan recherche et innovation 2025 filière forêt-bois | Plan biodiversité 2018 | Label bas-carbone (Arrêté du 28 nov. 2018 définissant le référentiel du label "Bas-Carbone", Présentation des méthodes balivage, boisement et reboisement, Décret n°2018-1043) | | | Loi n° 2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire |
| | Contrat stratégique de la filière bois 2018-2022 (CSF) | Code de l'environnement | Stratégie française pour l'énergie et le climat 2019-2023 / 2024-2028 Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) | | | |
| | Contrat d'objectifs et de performance CNPF 2017-2021 | | | | | |
| | Contrat d'objectifs et de performance ONF 2016-2020 | | | | | |
| Régional | Plan régional forêt-bois 2018-2027 (PRFB) | Stratégie régionale biodiversité | | | | |
| | | Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable et d'Egalité des Territoires (SRADDET) | | Schéma régional Biomasse | | Schéma régional de développement économique, d'innovation et d'internationalisation (SRDEII) |

5.3.2 Pratiques les plus impactées par les politiques publiques (principales conclusions de l'analyse des PRFB)

Nous avons recensé les pratiques à l'échelle du peuplement discutées dans les PRFB au regard de 8 grands objectifs communs. A l'échelle de la France métropolitaine, les binômes objectifs-pratiques partagés par plus de 9 PRFB sur 12 sont (en gras, les **pratiques**) :

- la dynamisation par des **coupes (amélioration et régénération)**, le **changement d'essence** ou la **remise en gestion** de peuplement peu ou pas gérés,
- l'adaptation au changement climatique par des **plantations**, des **changements d'essences** et **mélanges d'essences**,
- un effort de renouvellement par **plantation** ou **régénération naturelle**,
- le **maintien de souches et rémanents**, des précautions particulières en **coupe de régénération** et la **gestion différenciée de milieux humides**, pour la protection des sols,
- le **maintien de gros bois morts, d'arbres-habitats et de vieux arbres (isolés ou en îlots)** pour la biodiversité

Cela représente 11 pratiques mises en avant par les PRFB (les 6 premières présentes dans tous les PRFB) :

- Coupes d'amélioration
- Coupes de régénération
- Régénération naturelle
- Plantation
- Changement d'essences
- Mélange d'essences
- Remise en gestion
- Maintien de souches et rémanents
- Gestion différenciée des zones humides et leurs abords
- Maintien de gros bois morts (autres que souches et rémanents)
- Maintien d'arbres-habitats et vieux arbres (isolés ou en îlots)

Matrices d'analyse des PRFB : Les 12 matrices d'analyse des PRFB sont consultables en [Annexe III-F](#) de ce rapport, ainsi que la [matrice de synthèse de l'ensemble et le diaporama de présentation des résultats](#).

5.3.3 Travail bibliographique

Les résultats du travail bibliographique mené dans la tâche D ont alimenté la rédaction des fiches pour le suivi des pratiques forestières, en particulier la rubrique « motivation pour le suivi de la pratique » (voir les références citées au fil des fiches) et la hiérarchisation des variables à suivre (variables

prioritaires en gras dans la rubrique « Synthèse des variables sélectionnées ») : voir les références citées au fil [des fiches présentées dans la Partie II-S du rapport](#), et le [Tab 4](#) ci-dessous.

- *Méta-analyse des effets du mélange d'essences sur la biodiversité*

L'augmentation de la diversité des essences forestières est, avec la complexification de la structure des peuplements et la conservation du bois mort et des arbres habitats, l'une des options proposées pour accroître localement la biodiversité en forêt. La réponse des différents groupes taxinomiques à cette diversification semble cependant variable.

Pour quantifier la réponse de différents taxons à l'augmentation de la diversité des essences, nous avons réalisé une méta-analyse pour comparer la biodiversité dans des forêts pures ou mélangées (1149 cas d'études) et une méta-régression entre la diversité des organismes et la richesse spécifique des arbres (257 corrélations).

Les principaux résultats de la méta-analyse et de la méta-régression sont présentés ci-dessous. Le rapport détaillé de la méta-analyse est consultable [en Partie II-T](#) du présent rapport.

La biodiversité est un peu plus importante en forêt mélangée qu'en forêt pure (+5%) avec une disparité de réponse entre taxons, plus forte pour les plantes vasculaires et les arthropodes (environ +10%) mais neutre pour les vertébrés, les champignons et les microbes. Au niveau du règne, les plantes et les animaux sont plus nombreux ou divers en forêts mélangées (environ +10%) mais pas les microbes. L'effet positif du mélange est significatif pour les organismes aériens mais neutre pour les organismes souterrains.

La corrélation entre la biodiversité des organismes et la richesse spécifique des arbres est toujours positive, de faible magnitude ($r=0,3$) et plus importante en forêt naturelle qu'en forêt gérée.

La faible magnitude de l'effet de la diversité des arbres sur la biodiversité des taxons en forêt et la forte variabilité observée entre études suggère **que la richesse spécifique en arbre peut être utilisée comme indicateur indirect d'état de la biodiversité mais seulement en complément d'autres indicateurs**.

La constance de corrélation positive entre diversité des arbres et diversité des autres taxons suggère en revanche que l'augmentation de la diversité des essences forestières serait un bon indicateur indirect de réponse de la biodiversité aux changements de mode de gestion des forêts.

- *Apports de la télédétection pour l'acquisition de VDE*

Le rapport de stage de Lucia Toly-Moboula est consultable en [Annexe III-J](#). Quatre méthodes d'acquisition de données ont été évaluées ([Tab 4](#)). Toutes nécessitent un nombre élevé de points d'échantillonnage sur le terrain pour constituer la base de référence sur laquelle s'appuient les algorithmes de classification (de type machine learning ou deep learning). En imagerie optique, les précisions de classification au niveau espèce dépassent rarement 80 %, en raison de problèmes de similarité spectrale entre espèces, d'une part, et de variabilité spectrale intraspécifique souvent plus élevée que la variabilité interspécifique. Les méthodes utilisant des séries temporelles d'images satellitaires exploitent les différences de variations phénologiques des essences au cours des saisons, et donnent de meilleurs résultats que les approches monoimages. De même, la classification

automatisée des espèces à partir des données LIDAR en nuages de points 3D utilisées seules reste difficile, car malgré le bon niveau de précision de classification que cette technologie fournit parfois, la variabilité dans les réflectances des espèces rend la classification difficile, surtout pour des zones vastes. La combinaison de données optiques hyperspectrales multitemporelles et de données LIDAR semble la voie la plus prometteuse, avec des précisions de classification comprises entre 88 et plus de 95%, au niveau espèce, en peuplements mixtes. Enfin, la combinaison de données optiques et de données radar, utilisée avec succès en forêt tropicale car le radar permet de s'affranchir du bruit lié aux nuages, est une piste en cours de test par le Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère.

Tab 3. Précisions de classification (en % de classification correcte) de quatre méthodes de télédétection (en ligne), en fonction du grain de précision souhaité (en colonne), et commentaires. Voir le rapport de stage de L. Toly-Moboula pour plus de précisions.

| | Capacité à discriminer peuplements feuillus VS résineux | Capacité à discriminer peuplements purs feuillus VS purs résineux VS mixtes | Capacité à discriminer la nature (espèce ou genre) et le nombre d'essences principales du peuplement, en peuplement mixte |
|---|--|--|---|
| Imagerie optique | | | |
| Imagerie satellitaire | > 95% | non | 70 à 85% Jusqu'à 90% avec la méthode du pansharping pour 3 essences principales en peuplement mixte feuillu (fusion d'images multispectrales panchromatiques à haute résolution et basse résolution pour créer une seule image couleur à haute résolution) |
| Imagerie satellitaire multitemporelle | > 95% | Oui (80 à + de 90%) | 70 à 85% |
| Imagerie hyperspectrale aéroportée | | | Précision de classification au niveau espèce = 70% (cas d'arbres en peuplement) à 86% (arbres individuels en arboretum). Nécessite un nombre élevé de points d'échantillonnage terrain (e.g. 2400 points pour une zone de 180 km ² boisée à 44% dans Stereńczak et Wietecha (2015)) |
| Lidar aéroporté | | | 70 à 80, voire 95 % pour certaines espèces (en exploitant les nuages de points en 3D) |
| Combinaison Lidar + imagerie optique multitemporelle | | | 88 à + de 95 % |
| Combinaison Radar + imagerie optique | | | Méthode utilisée avec succès en forêt tropicale, en cours de test en forêt tempérée |

5.3.4 Choix des pratiques à suivre dans le cadre des objectifs 2 et 3

Tab 4: Pratiques de gestion à suivre retenues dans le cadre de PASSIFOR-2

| Pratiques de gestion | Source de l'intégration au projet | Méta-analyses (MA) ou revues bibliographiques récentes sur le lien avec la biodiversité |
|---|-----------------------------------|---|
| Pratiques cartographiables (objectif 2) | | |
| Réseau national de réserves intégrales | PNFB | |
| Îlots de sénescence | Atelier 1 ^{er} février | |
| Ancienneté des forêts | Atelier 1 ^{er} février | |
| Pratiques non cartographiables (objectif 3) | | |
| Coupes | Tous les PRFB | Coupes de régénération : 7 MA, 10 revues Eclaircies : 10 MA, 4 revues |
| Mélange d'essences | Tous les PRFB | 4 MA, 3 revues (mais faible gamme de taxons, pas de synthèse concernant l'effet de la richesse locale en essences, ou d'autres niveaux de mélanges que 2 essences à parts égales) |
| Changement d'essences | Tous les PRFB | |
| Mode de régénération | Tous les PRFB | Régénération naturelle : 1 MA, 2 revues Plantation vs forêt naturelle : 7 MA |
| Maintien de souches | 9 PRFB sur 12 | |
| Maintien d'arbres-habitats, de vieux arbres et de gros bois morts | 9 PRFB sur 12 | |
| Maintien de rémanents | 9 PRFB sur 12 | |
| Remise en gestion | 9 PRFB sur 12 | |
| Gestion différenciée des zones humides | 9 PRFB sur 12 | |
| Mode de traitement sylvicole | Intérêt à dire d'expert | |

N.B. Le *type de débardage* et la *durée depuis la dernière coupe*, initialement retenus en tant que pratiques non cartographiables, ont finalement été intégrés comme variables de gestion dans la pratique « coupes ».

5.3.5 Choix des VG et VDE à suivre, par pratique

La tâche D retient l'importance de suivre les deux niveaux (intentionnalité de la pratique / réalité observée), en accord avec Vos et al. (2000) : les 2 niveaux sont complémentaires, en tant que drivers d'un côté (= intentionnalité de gestion) et variables plus causales de l'autre (VDE et VG résultant de la mise en œuvre de la pratique).

Pour identifier les intentions du gestionnaire (avec toutes les incertitudes que cela comporte), deux possibilités sont retenues : enquête auprès des gestionnaires des parcelles (voir cadre ICP Forests utilisé par RENECOFOR) ou étude des documents de gestion (Plan Simple de Gestion ou Aménagement), en parallèle des suivis de pratiques mises en œuvre sur le terrain (sur les points d'inventaire multi-taxonomique).

La liste des VG et VDE proposées pour chacune des 13 pratiques est renseignée dans les fiches « pratiques de gestion » (cf. documents en [Partie II-S du rapport](#)).

5.3.6 Fiches « Pratiques de gestion »

Chaque pratique fait l'objet d'une fiche qui la décrit, présente les VG et VDE proposées, par ordre de priorité, détaille les attendus pour chaque variable et les croise avec l'existant, et synthétise l'évaluation par un tableau qui présente sous forme graphique, pour chaque dispositif évalué, la proportion de variables suivies de manière conforme, partiellement conforme ou non conforme par le dispositif. La notice détaillée d'utilisation des fiches « pratiques de gestion », est disponible dans la [Partie II-R](#) du rapport.

- *Exemple avec la fiche « coupes »*

La fiche complète est consultable en [Partie II-S](#) de ce rapport. En voici un résumé (avec les rubriques de synthèses 4 et 7) :

Résumé des variables sélectionnées

Tab 5. Variables sélectionnées pour la pratique « coupes ». Les variables considérées comme étant à suivre en priorité sont indiquées en gras. Les variables dont le lien avec la pratique ou la biodiversité est considéré comme plus indirect sont entre parenthèses.

| Variables de gestion | Variables dendrométriques et écologiques |
|---|---|
| Présence ou absence de traces de coupes | Densité de tiges |
| Présence de souches de moins de 10 ans | Densité de tiges par classe de diamètre |
| Intensité des coupes de moins de 10 ans | Surface terrière |
| Durée depuis la dernière coupe | Surface terrière par classe de diamètre |
| Nature de la dernière coupe | Densité de souches |
| Taille de la dernière coupe au point de relevé | (Volume sur pied) |
| Pourcentage de territoire passé en coupe dans une fenêtre paysagère autour du point de relevé | (Production biologique par catégorie de diamètre) |
| Taille moyenne des coupes dans la région | (Prélèvement annuel de bois) |
| Type de débardage de la dernière coupe | |

Maintien ou exploitation des rémanents de la dernière coupe
 Maintien ou exploitation des souches
 Pratique de cloisonnements d'exploitation

Synthèse de la fiche « coupes »

| Critère | IGN | PSDRF | RENECOFOR | AFI |
|--|-----|-------|-----------|-----|
| Variables de gestion | | | | |
| Variables dendrométriques et écologiques | | | | |
| Total | | | | |

Fig 3-Proportion, pour chaque dispositif, des variables suivies de manière conforme (vert), partiellement conforme (jaune) et non conforme (rouge) pour la pratique "coupes".

Pour la pratique « Coupes», quatre dispositifs sont évalués (cf. Fig 1): l'Inventaire forestier de l'IGN, le Protocole de suivi dendrométrique des réserves forestières (PSDRF), RENECOFOR, et le réseau de parcelles de référence de l'Association futaie irrégulière (AFI). L'IGN et le PSDRF sont considérés comme à prendre en compte en priorité pour leur capacité à assurer, en complémentarité l'un de l'autre, une bonne représentativité des forêts françaises de métropole. RENECOFOR et l'AFI ne permettent pas à eux seuls un suivi statistiquement représentatif des forêts métropolitaines, mais peuvent être considérés comme dispositifs complémentaires ou pertinents pour les éclairages méthodologiques et scientifiques qu'ils peuvent apporter. De la même façon, les variables mesurées par le Réseau systématique de suivi des dommages forestiers (RSSDF) sont indiquées ponctuellement, quand elles sont appropriées.

Le suivi fin des pratiques de coupes nécessite d'acquérir un panel varié de données (cf. Tab 5), à différentes échelles spatiales et temporelles. De manière générale, les dispositifs actuels ne permettent pas de concilier à la fois un échantillonnage représentatif de la forêt française métropolitaine et la mesure de ces variables aux échelles retenues (en particulier l'échelle du peuplement, qui est la plus fréquente dans les attendus).

D'un côté, l'IGN et le PSDRF, qui permettent conjointement une bonne couverture du territoire et des modalités de gestion forestière, ne sont dans l'ensemble pas optimisés pour être analysés au niveau du peuplement. Ils forment néanmoins un socle important et permettraient le suivi de nombreuses variables d'intérêt, moyennant (i) amélioration, par exemple par des relevés sur des placettes plus larges voire, pour l'IGN, sur des placettes permanentes, et (ii) réflexion sur la représentativité de l'échantillonnage sur la base de ces deux dispositifs.

De l'autre côté, la stratégie d'échantillonnage de RENECOFOR et de l'AFI ne permet pas de mobiliser ces dispositifs pour accéder à une représentativité globale de la forêt métropolitaine. Par leur

construction au niveau placette, ils permettent en revanche de mesurer plus souvent des variables à l'échelle du peuplement. Etant donné la proximité de leurs protocoles, il pourrait être intéressant pour le PSDRF d'étudier les apports de relevés plus proches de ceux de l'AFI (jauge d'angle plus faible, mesures de hauteur). RENECOFOR apporte une expérience importante : ce dispositif réalise depuis plusieurs années un suivi sur des placettes de grande taille, il a mis en place un relevé standardisé des informations de gestion dans le cadre d'un réseau européen (Ferretti et al. 2020) et son rôle dans l'étude du fonctionnement des écosystèmes forestiers peut permettre d'explorer l'influence d'autres variables que celles envisagées pour ce suivi des coupes. Ces réseaux peuvent ainsi servir de modèles méthodologiques aux dispositifs dont l'échantillonnage est représentatif de la forêt métropolitaine, apporter des hypothèses de recherche ainsi que du recul sur les tendances observées.

L'influence de la structure forestière à des échelles plus larges que le peuplement peut aider à expliquer la biodiversité locale (Bouvier et al. 2017) : mesurer des variables à ces échelles permettrait d'explorer les relations entre biodiversité et contexte paysager ou régional des pratiques de coupes. Cela peut demander d'utiliser des techniques de télédétection, éventuellement à développer par l'intermédiaire d'autres acteurs plus spécialisés que les dispositifs discutés ici (Osé K. et al., 2023). D'autres variables sont difficilement accessibles autrement que par enquête auprès des gestionnaires, tout comme la mesure des intentionnalités de gestion. Il serait nécessaire d'intégrer au suivi un volet intégrant cette approche, ce qui n'existe actuellement pas pour l'IGN et n'est que peu développé pour le PSDRF. Réaliser des enquêtes et des mesures répétées peut amener un gestionnaire concerné à modifier ses pratiques, il serait alors important d'évaluer et minimiser cet effet.

Le suivi des pratiques de gestion se fait dans une optique de mise en relation avec la biodiversité, il est proposé de développer l'acquisition des données de gestion nécessaires sur des points d'inventaire de biodiversité seulement, avec un plan d'échantillonnage à définir pour cet objectif 3. Il paraît envisageable d'organiser un suivi des pratiques de coupes pour évaluer leur impact sur la biodiversité en s'appuyant sur des dispositifs existants, complété par des développements méthodologiques pour intégrer des placettes permanentes et de nouvelles mesures de terrain, des données issues d'enquêtes ainsi que de télédétection.

5.4 Conclusions et perspectives

La tâche D a abouti à ce jour aux livrables suivants :

- Liste de 13 pratiques de gestion d'intérêt dans le cadre des objectifs 2 et 3 de suivi, au titre de leur lien avec les politiques publiques (pratiques susceptibles d'être impactées par la mise en œuvre du PNFB et des PRFB, qui intègrent les orientations de l'ensemble des politiques publiques en lien avec la forêt) et au titre de leur lien avec la biodiversité en forêt ;
- Notice détaillée (procédure) pour construire les fiches « pratique de gestion », à savoir : (i) identifier, pour chaque pratique, les variables de gestion (VG) et les variables dendrologiques et écologiques (VDE) à suivre en parallèle des variables d'état de la biodiversité ; (ii) formuler les attendus pour chacune de ces variables (unité, échelle d'acquisition de la donnée, etc.) ; (iii) analyser l'existant au regard de l'attendu, par dispositif, pour renseigner in fine le critère « Variables environnementales et de gestion » utile à l'analyse de l'existant (tableaux synthétiques) pour l'élaboration des sous-maquettes
- Fiche complète « coupes » et rubriques 1, 3 et 4 (dont la liste des VG et VDE) pour toutes les pratiques ;
- Méta-analyse de l'effet des peuplements mélangés et méta-régression de l'effet du nombre d'essences sur la biodiversité à l'échelle des peuplements ;
- Analyse bibliographique des apports de la télédétection pour détecter et qualifier le mélange d'essences.

La tâche D a démontré la faisabilité de la procédure proposée pour organiser le suivi de VG et VDE dans le cadre des objectifs 2 et 3 dans le cas particulier de la pratique « coupes ».

Il reste à appliquer la procédure au cas des 12 autres pratiques, pour une intégration dans les maquettes des objectifs 2 (3 pratiques sont concernées) et 3 (9 pratiques sont concernées). Il reste aussi à mieux évaluer les apports possibles de la télédétection pour le suivi des VG ou VDE.

Références

- Bastien, Y., Gauberville, C. (Eds.), 2011. Vocabulaire forestier. Ecologie, gestion et conservation des espaces boisés. Institut pour le Développement Forestier, Paris.)
- Bouvier, M.; Durrieu, S.; Gosselin, F.; Herpigny, B. (2017) Use of Airborne Lidar Data to Improve Plant Species Richness and Diversity Monitoring in Lowland and Mountain Forests. In : PloS one, vol. 12, n° 9, e0184524. DOI: 10.1371/journal.pone.0184524.
- Osé K., Duprez M., Planells M. et Puiseux J., 2023. In : Landmann, G., Delay, M., Marquet, G. (Coord). et al. Expertise collective CRREF « Coupes Rases et Renouveaulement des peuplements Forestiers en contexte de changement climatique », Rapport scientifique de l'expertise, Paris : GIP ECOFOR, RMT AFORCE (mai 2023), 782p.
- Osé K. et Wurpillot S., 2023. Quels pourraient être l'objectif et les composantes d'un système opérationnel de suivi régulier des coupes rases et fortes en France métropolitaine? In : Landmann, G., Delay, M., Marquet, G. (Coord). et al. Expertise collective CRREF « Coupes Rases et Renouveaulement des peuplements Forestiers en contexte de changement climatique », Rapport scientifique de l'expertise, Paris : GIP ECOFOR, RMT AFORCE (mai 2023), 782p.
- Oettel, J.; Lapin, K. (2021) Linking forest management and biodiversity indicators to strengthen sustainable forest management in Europe. In : Ecological indicators, vol. 122. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.107275
- Vos, P.; Meelis, E.; Keurs, W. J. ter (2000) A framework for the design of ecological monitoring programs as a tool for environmental and nature management. In : Environmental monitoring and assessment, vol. 61, n° 3, p. 317–344.

Chap. 6 : Mesures, échantillonnage, analyses statistiques

Auteur du chapitre : Frédéric Gosselin (INRAE)

Responsable/Coordinateur scientifique de la tâche :

- Frédéric Gosselin, Ingénieur Général des Ponts, des Eaux et des Forêts - Chercheur en écologie forestière et biométrie à INRAE, INRAE - UR EFNO - Domaine des Barres - F-45290 Nogent-sur-Vernisson, 02 38 95 03 58, frederic.gosselin@inrae.fr
- En lien avec Romain Julliard (Équipe Mosaic, MNHN) et Antoine Lévêque (OFB/Patrinat)

Résumé

La tâche E avait pour objectif de fournir au reste du projet PASSIFOR-2 des éléments relatifs à l'**échantillonnage** (où et quand faire les relevés de biodiversité), à la **mesure** (comment relever la biodiversité) et à l'**analyse des données de biodiversité** (quelles métriques de biodiversité, quels types de modèles). Elle s'est déployée à travers cinq stages d'étudiants de Master 2 de 2020 à 2022. Les stages ont couvert certaines des questions relatives à la mesure, au plan d'échantillonnage et à l'analyse des données. Si les stages relatifs à l'analyse des données floristiques de l'inventaire forestier et à la prise en compte de la détectabilité n'ont pas livré de résultats très utiles pour le projet PASSIFOR-2, les trois autres stages de M2 ont été utiles pour la confection des maquettes sur les points suivants :

- En proposant une autre manière de traiter la fusion de données protocolées et de données opportunistes, permettant de garder toutes les données pour à la fois estimer les tendances de biodiversité et évaluer l'adéquation du modèle de fusion aux données. Ce travail a conforté le choix de séparer les cœurs de maquettes – correspondant aux données protocolées – des compléments – correspondant aux données opportunistes.
- En mettant en place un cadre de simulation statistique prenant en compte les autocorrélations spatiales et temporelles, qui nous a permis de commencer à traiter des questions utiles pour PASSIFOR-2, à savoir la place des placettes temporaires et permanentes dans les cœurs de maquette de PASSIFOR-2. Les résultats indiquent que l'exactitude de la tendance temporelle est meilleure avec 100% de placettes permanentes quand l'autocorrélation spatiale était faible ou moyenne – en particulier si les variations spatiales étaient pour partie indépendantes (i.e., effet de pépite) – alors que les deux autres schémas (100% de placettes temporaires et 50% de placettes permanentes et 50% de placettes temporaires) peuvent être préférables pour des autocorrélations spatiales fortes ; le mélange à 50% des deux types de placettes est par exemple légèrement préférable quand l'autocorrélation spatiale est forte et l'autocorrélation temporelle faible.
- En utilisant ce cadre de simulation statistique spatio-temporelle pour mettre en évidence l'intérêt de prendre en compte des variations spatialement structurées de la tendance temporelle dans les modèles statistiques d'analyse des données. En effet si les données ont des tendances temporelles variables dans l'espace de manière spatialement structurée,

estimer leur tendance avec des modèles ne prenant pas en compte ces caractéristiques biaise les résultats et les rend moins précis. C'est un résultat important à prendre en compte pour les analyses statistiques de données de biodiversité – et qui à notre connaissance n'est pas mis en œuvre de nos jours.

6.1 Contexte et problématique

Le contenu de cette tâche – mais aussi du projet PASSIFOR-2 dans son ensemble - s'appuie notamment sur deux synthèses parues dans les années 2000 ([Vos et al., 2000](#); [Yoccoz et al., 2001](#)) qui proposent un état de l'art des aspects méthodologiques à prendre en compte pour mettre en place des suivis environnementaux ou des suivis de biodiversité. Les choix en matière d'échantillonnage sont fondamentaux pour la qualité des résultats des suivis ([Vos et al., 2000](#), [Yoccoz et al., 2001](#)). [Vos et al. \(2000\)](#) désignent même l'échantillonnage comme le cœur méthodologique du suivi. En forêt, quelques exemples de suivi ne sont pas satisfaisants sur ce plan-là (cf. [Ferretti & Chiarucci, 2003](#) pour le cas du suivi Européen forestier de niveau II). Ce n'est donc pas une surprise si les premières interactions avec la communauté PASSIFOR-2 ont fait émerger une question liée aux plans d'échantillonnage : celle des placettes permanentes vs. temporaires. Même s'il ne traitait que de placettes permanente, le travail de [Rhodes & Jonzen \(2011\)](#) semblait très pertinent à cet égard : il indiquait que l'allocation optimale entre davantage de passages sur moins de placettes – ou l'inverse – dépendait des niveaux d'autocorrélations spatiale et temporelle des données ; dans un contexte de forte autocorrélation temporelle et de faible autocorrélation spatiale, il valait mieux passer moins souvent sur des placettes plus nombreuses (et inversement dans le cas où l'autocorrélation spatiale était forte et l'autocorrélation temporelle faible). Néanmoins, l'approche de [Rhodes & Jonzen \(2011\)](#) était tronquée d'un point de vue statistique – faisant notamment l'hypothèse qu'on avait une connaissance parfaite des paramètres autres que la tendance temporelle. De plus, s'ils recherchaient le nombre de passage optimal sur les placettes, [Rhodes & Jonzen](#) n'ont pas montré les gains apportés en termes de précision de la tendance temporelle. Enfin, ils n'ont pas abordé la question des placettes temporaires – toutes leurs placettes étant des placettes permanentes visitées au moins deux fois.

Enfin, cette tâche a pris en compte des développements récents, d'une part sur la modélisation statistique intégrant explicitement autocorrélations spatiales et temporelles (avec notamment des approximations des matrices de dépendance spatiales qui rendent les calculs numériques bien plus rapides ; [Linden et al. 2011](#) & [Thorson et al. 2015](#)), et d'autre part sur la fusion de données de biodiversité de différentes qualités dans le but d'estimer plus précisément les tendances temporelles de la biodiversité (par exemple dans la communauté française : [Giraud et al. 2015](#) & [Coron et al. 2018](#)). L'approche de [Coron et al. \(2018\)](#) pour la fusion de données passait par une comparaison de la capacité prédictive du modèle statistique fusionnant les données et du modèle statistique ne gardant que les données protocolées sur un troisième jeu de données, utilisé uniquement pour choisir si on gardait la fusion de données ou pas. Il n'y avait pas à notre connaissance de procédure qui se contentait de la cohérence de cette fusion de données avec les données utilisées pour l'estimation – permettant ainsi de garder toutes les données pour l'estimation.

6.2 Méthodes

C'est dans ce contexte fertile de nouvelles pistes utiles pour la mise en place de suivis de biodiversité que nous avons choisi plusieurs thèmes d'approfondissement traités dans le cadre de stages d'étudiants de statistique-probabilité en Master 2, sur les années 2020, 2021 et 2022. Les étudiants recrutés provenaient de quatre masters différents (deux du master d'Orléans, et un étudiant pour les masters de Pau, Paris-Cité et Strasbourg). A part pour le premier stage (celui de Pierre Bouchet sur la fusion de données), un collectif d'encadrants a été sollicité pour orienter les stages de ces étudiants. Trois des stages ont utilisé des approches de simulation statistique, un a davantage été tourné sur la réécriture mathématique du modèle et un dernier visait l'analyse statistique de données réelles. Les thèmes abordés durant ces stages M2 ont été les suivants :

- **Une procédure pour diagnostiquer l'adéquation du modèle aux données de différents points de vue en utilisant toutes les données ayant servi à estimer les tendances temporelles.** Il s'agissait du stage M2 de Pierre Bouchet (2020, Master 2 Mathématiques Appliquées – Statistiques de l'Université d'Orléans, [rapport de stage disponible en Annexe III-K](#)) encadré par F. Gosselin. Reprenant le travail de Coron et al. (2018) utilisant des modèles Bayésiens, Pierre Bouchet l'a étendu en vérifiant la bonne convergence de ces modèles. Puis il a simulé des jeux de données avec différents types de divergences entre données protocolées et opportunistes et il a appliqué différentes manières de diagnostiquer ces différences avec des p-valeurs de qualité d'ajustement (« goodness-of-fit p-values » ; cf. Gosselin 2011) appliqués sur les modèles statistiques estimés. Nous avons considéré différentes fonctions de « discrédance » (c'est-à-dire de résumé des données et des paramètres statistiques), certaines d'entre elles visant des différences entre données protocolées et données opportunistes – par exemple la différence de l'AIC du modèle de l'abondance avec un effet type de données et un effet espèce avec l'AIC du modèle avec juste un intercept. La mécanique de ces p-valeurs avec ces fonctions de discrédance était assez simple : comparer les valeurs de la fonction de discrédance calculée sur les vraies données et celles de la même fonction calculée avec des données « répliquées » à partir du modèle statistique¹⁶ ; la comparaison se fait en calculant la probabilité empirique de la fonction sur les données observées par rapport à cette même fonction calculée sur un grand nombre de jeux de données répliquées – d'où le terme de p-valeur : si le modèle statistique n'est pas cohérent avec les données du point de vue d'une fonction de discrédance, la p-valeur associée est « extrême » (proche de 0 ou proche de 1, suivant la manière dont elle est construite). La p-valeur utilisée était celle développée par Gosselin (2011 ; la « sampled posterior goodness-of-fit p-value »), qui a l'avantage d'avoir un comportement connu quand le modèle statistique correspond bien aux données ;

¹⁶ La mécanique est la suivante : (i) le modèle statistique Bayésien fournit pour N jeux de paramètres ; (ii) on tire au sort un seul jeu de paramètres à partir duquel on peut construire la loi de probabilité associée dans le modèle ; (iii) on tire n jeux de données répliquées avec cette loi ; (iv) on applique la fonction de discrédance sur chacun de ces jeux de données répliquées ; (v) on compare ces n valeurs à la discrédance calculée sur les données observées.

- **Quelle est l'importance de bien estimer la détectabilité d'une espèce pour bien estimer sa tendance temporelle ?** C'est Kreshnike Maloku (2021, Master Mathématiques, Données et Apprentissage à l'Université de Paris, [rapport de stage disponible en Annexe III-L](#)) qui a effectué ce stage, encadrée par Frédéric Archaux, Fabien Laroche et Frédéric Gosselin. Elle a simulé des données de présence-absence d'une espèce dont la détectabilité était contrôlée. Elle a évalué si la tendance temporelle était correctement estimée ou non, en fonction du nombre de passages répétés sur les mêmes placettes et de la prise en compte ou non de la détectabilité dans le modèle statistique.

- **Des questions relatives à la place des placettes temporaires et permanentes dans le plan d'échantillonnage. Ce thème a fait l'objet de deux stages de Master 2, encadrés par Frédéric Gosselin, Fabien Laroche, Romain Julliard et Antoine Lévêque :** le stage de Noudéhouéno Houessou (2021, Master 2 Méthodes stochastiques et informatiques décisionnelles de l'Université de Pau, [rapport de stage disponible en Annexe III-M](#)), et celui d'El Hadji Cissé Faye (2022, Master 2 Mathématiques Appliquées – Statistiques de l'Université d'Orléans, [rapport de stage disponible en Annexe III-N](#)). Ces deux stages ont porté sur **l'optimisation ou la comparaison de plans d'échantillonnage comportant des placettes permanentes et temporaires en fonction du niveau d'autocorrélation spatiale et temporelle des données**. Ces stages faisaient suite au travail de Rhodes et Jonzén (2011) [RJ]. Sur la base de modèles de dynamique d'abondance densité-dépendants de type Gompertz et spatialisés, RJ avaient comparé deux stratégies d'échantillonnage à effort constant : faut-il faire plus de placettes avec moins de passages ou plus de passages sur moins de placettes ? Ils ont montré que les stratégies optimales d'échantillonnage pour estimer le plus précisément la tendance temporelle dépendait de manière cruciale des niveaux d'autocorrélation spatiale et temporelle. Sous l'hypothèse d'une tendance temporelle constante sur un pas de temps important (ici 30 ans), ils ont trouvé les résultats suivants : quand l'autocorrélation spatiale est faible et la temporelle forte, il vaut mieux échantillonner beaucoup de sites mesurés peu souvent ; inversement, si l'autocorrélation spatiale est forte et la temporelle faible, il vaut mieux passer plus souvent sur moins de placettes. Ces résultats, s'ils peuvent paraître logiques, sont assez nouveaux dans le contexte des suivis de la biodiversité et éclairent sous un nouveau jour le débat entre placettes permanentes et placettes temporaires... Sauf que RJ n'ont pas envisagé de placettes temporaires en tant que telles et que leur travail était basé sur de nombreuses simplifications et hypothèses. Le stage de Houessou (2021) a consisté à affermir la base mathématique du travail de RJ, à expliciter les hypothèses/limitations de leur travail et à reprendre leurs outils pour optimiser les plans d'échantillonnage en incluant des placettes temporaires. Sur ces bases, le stage de Faye (2022) a développé une méthodologie de simulation statistique complète, plus réaliste que celle de RJ. Nous l'avons appliquée au cas d'un budget de 10 000 observations sur 20 ans (soit 500 observations par an). Plusieurs problèmes numériques ont dû être résolus pour faire ces simulations dans un temps raisonnable, dont l'approximation des matrices de variance-covariance spatiale par des matrices creuses portées par des grilles latentes virtuelles (Lindgren et al. 2011, Thorson et al. 2015).

Le travail de Faye a tourné autour de **3 scénarios de simulation** et d'analyse de données spatio-temporelles :

- **Le scénario 1** incluait une tendance temporelle moyenne fixe (0.04 par an en échelle log avec une variation spatiale suivant un écart-type de 0.02) et de l'autocorrélation spatiale classique, telle que deux placettes infiniment proches l'une de l'autre devaient avoir une corrélation de 1. Le modèle statistique était semblable au modèle utilisé pour générer les données.
- **Le scénario 2** incluait une tendance temporelle moyenne fixe (comme dans le scénario 1) et une autocorrélation spatiale avec effet « nugget » (appelé aussi effet pépité), c'est-à-dire un effet placette pour partie structuré dans l'espace comme précédemment et pour partie non structuré dans l'espace, indépendamment du reste (l'effet « pépité »). Avec ce modèle, des placettes infiniment proches l'une de l'autre n'ont plus une corrélation de 1. Nous voulions vérifier si cela changeait beaucoup de choses par rapport au cadre défini par RJ qui n'incluait pas cet effet nugget. Le modèle statistique était semblable au modèle utilisé pour générer les données.
- **Le scénario 3** incluait une génération des données suivant la même structure de modèle que dans le scénario 1 mais une analyse des données qui pouvait être différente pour ce qui est de la tendance temporelle (qui pouvait être fixe, ou bien variable dans l'espace mais sans dépendance spatiale ou enfin variable dans l'espace comme dans le modèle ayant généré les données (donc avec autocorrélation spatiale). Nous souhaitions étudier la dépendance des résultats de la manière de modéliser statistiquement cette tendance temporelle.

Les deux premiers scénarios (1 et 2) étaient directement associés à **nos questions de plan d'échantillonnage** puisqu'ils comparaient 3 types de plans d'échantillonnage, pour les mêmes paramètres d'autocorrélation spatiale et temporelle – variables – ainsi que de tendance temporelle moyenne – fixe – : un plan d'échantillonnage « 100 % PP » avec 500 observations par an ne comprenant que des placettes permanentes (PP) – avec quatre passages sur la période de 20 ans – , un plan d'échantillonnage « 100 % PT » ne comprenant que des placettes temporaires (PT) et plan d'échantillonnage « 50-50 » mixant équitablement les deux. La base du plan d'échantillonnage utilisait des mailles à la manière de celles de l'inventaire forestier de l'IGN. La tendance temporelle annuelle était en moyenne de 0.04 en échelle log avec une variation spatiale suivant un écart-type de 0.02 et une autocorrélation spatiale ayant la même portée que les autres autocorrélations spatiales dans le modèle. Nous n'avons pas cherché à optimiser la proportion de placettes temporaires dans le plan d'échantillonnage mais plutôt à analyser la magnitude des métriques qui nous intéressaient, à savoir d'un côté le ratio des erreurs-type de la tendance temporelle entre plan d'échantillonnage « 100%PP » et le plan d'échantillonnage « 50-50 » et de l'autre côté le même type de ratio mais entre le plan d'échantillonnage « 100%PT » et toujours le plan d'échantillonnage « 50-50 ». Houessou (2021) avait déjà identifié des gains faibles d'erreur type – quelques pourcents – avec l'optimisation de la

proportion de placettes temporaires. Nous souhaitions ici isoler les cas où les gains étaient faibles¹⁷, de cas où ces ratios étaient plus forts. Ce travail a été repris après le rendu du rapport de Faye (2022) parce que d'une part des erreurs ont été détectées dans le code, d'autre part nous avons souhaité analyser l'exactitude de l'estimation et pas sa précision comme précédemment, et enfin nous avons souhaité développer des résultats en l'absence d'approximation des matrices de variance-covariance spatiale par des matrices creuses portées par des grilles latentes virtuelles, notamment parce que l'approximation n'est a priori valable que dans des domaines d'autocorrélation spatiale forte. Ce dernier choix a impliqué de réduire drastiquement la taille d'échantillon totale (de 10 000 à 260) mais nous a permis d'étendre assez considérablement la gamme d'autocorrélation spatiale étudiée (notamment vers les autocorrélations spatiales faibles). Ce sont ces résultats que nous montrons dans les Figures 3 à 4 à venir. Dans ces scénarios, la population était initialement très au-dessus de sa situation d'équilibre (non stationnarité initiale) et ne rejoignait sa dynamique d'équilibre que grâce à la densité-dépendance.

Le travail de Faye (2022) a par ailleurs permis dans son scénario 3 de **comparer différentes techniques d'analyse des données à plan d'échantillonnage constant**. Il s'agissait, dans le cas où les données étaient simulées avec un niveau d'autocorrélation spatiale fixée structurant aussi les variations de tendance temporelle dans l'espace, de comparer des méthodes d'analyse statistique suivant qu'elles prenaient en compte la variation de cette tendance temporelle dans l'espace, et de manière structurée ou non. Le stage de Ndongo Seye (2022, [rapport de stage disponible en Annexe III-O](#)) a permis d'utiliser les modèles développés par Faye (2022) pour commencer à mettre en œuvre une analyse de l'évolution temporelle de la présence-absence de quelques espèces (Sapin pectiné, Houx, Anémone sylvie) relevées par l'Inventaire Forestier de l'IGN. Les mêmes types de modèles que ceux de Faye (2022) ont été déployés sur un peu plus de 80 000 relevés en tout, sur 14 ans (2007-2020). Ndongo Seye a été encadré par Frédéric Gosselin, Jean-Luc Dupouey et Frédéric Archaux.

¹⁷ correspondant à des logarithmes des ratios ci-dessus entre environ -0.05 et 0.05, voire - 0.10 à 0.1 – indiquant des augmentations et baisses de l'erreur type de moins de 10% environ.

6.3 Principaux résultats

6.3.1 Fusion de données « protocolées » et opportunistes

Les résultats de l'utilisation des p-valeurs de qualité d'ajustement de type « sampled posterior goodness_of_fit p-values » pour diagnostiquer l'incohérence entre le modèle fusionnant les données opportunistes et protocolées, et les données, sont globalement en accord avec ce qui était attendu : quand les données opportunistes simulées incluaient des différences par rapport aux données protocolées non prises en compte par le modèle statistique, ces p-valeurs étaient souvent extrêmes au moins pour certaines fonctions de discrédance, indiquant une incohérence entre le modèle et les données – et donc que la procédure de fusion était critiquable du point de vue de cette fonction de discrédance. A l'inverse, quand les données – opportunistes comme protocolées - étaient simulées avec les conditions du modèle statistique, les p-valeurs de la plupart des fonctions de discrédance suivaient la loi uniforme comme attendu – à quelques exceptions près. Il reste néanmoins à régler plusieurs problèmes qui ont été identifiés durant le stage :

- Comprendre pourquoi certaines fonctions de discrédance donnaient des p-valeurs au comportement pas tout à fait attendu quand les données étaient générées avec un modèle compatible avec le modèle statistique ;
- Comprendre pourquoi ce n'étaient pas toujours les fonctions de discrédance choisies pour diagnostiquer les problèmes introduits dans la simulation des données qui étaient les plus puissantes à détecter les différences entre modèle et données.

Ce premier stage a néanmoins validé l'idée générale qui a été suivie durant l'élaboration des maquettes de PASSIFOR-2 :

Réserver pour le cœur de maquette les données/dispositifs qui ont des bonnes propriétés par rapport à nos attentes en termes de protocole et de plan d'échantillonnage et placer en complément, de façon distincte, des données/dispositifs aux comportements sous-optimaux.

La proposition de PASSIFOR-2 est alors de chercher des modèles statistiques de fusion des deux types de données qui permettent de traiter les différences entre données opportunistes et données protocolées avec comme critère de réussite de n'avoir de p-valeur de qualité d'ajustement « extrême » avec aucune des fonctions de discrédance envisagées. Cette procédure permet d'envisager d'utiliser toutes les données pour les estimations et aussi pour critiquer les modèles.

La philosophie proposée dans PASSIFOR-2 est de garder l'ensemble des données quand le modèle de fusion de données n'est incohérent avec les données d'aucun point de vue, et de ne garder que les données « cœur de maquette » si une discordance importante entre modèle de fusion de données et données est détectée avec les p-valeurs.

Cela nécessitera une « force de frappe » importante d'analyse des données pour mettre en place cette procédure.

6.3.2 Estimer la détectabilité des espèces pour bien estimer la tendance temporelle : pas important quand la probabilité de détection est constante

Contrairement à nos attentes, l'estimation de la détectabilité n'avait pas d'impact sur la bonne estimation de la tendance temporelle en moyenne dès lors que la tendance était calculée en échelle log ; finalement, il valait mieux échantillonner plus de sites qu'échantillonner moins de sites de manière répétée. Cette conclusion était valable en moyenne, même si on a pu remarquer que la prise en compte de la détectabilité a pu dans certaines itérations de notre simulation donner des tendances estimées étonnamment faibles. Nous concluons que la détectabilité est importante pour estimer le niveau absolu de la fréquence ou de l'abondance, mais pas vraiment leur tendance temporelle, si la détectabilité est constante (qu'elle soit faible ou forte). Il est en revanche peu probable que cette conclusion persiste si la détectabilité varie, par exemple par année (Kéry *et al.*, 2010), entre observateurs ou en fonction de l'abondance ou fréquence de la population, ce qui correspond certainement à la majorité des situations réelles.

6.3.3 Plans d'échantillonnage : vers un mélange de placettes permanentes et temporaires ?

Le travail de Houessou (2021) a tout d'abord identifié les principales hypothèses qui limitent le travail de Rhodes et Jonzén (2011) [RJ], à savoir :

- Que le suivi prend place dans un contexte stationnaire où l'espèce a déjà atteint son équilibre, ne s'appliquant donc pas à des espèces qui sont en train de passer d'un « équilibre » à l'autre ;
- Que la tendance de l'espèce est constante dans le temps sur un pas de temps long (30 ans), cette tendance pouvant néanmoins varier dans l'espace de manière aléatoire et non structurée. La première hypothèse est une vraie limitation car dans un suivi, on doit s'outiller pour estimer des tendances longues mais aussi pour pouvoir détecter des changements de tendances.
- Qu'on connaît parfaitement les niveaux d'autocorrélation temporelle et spatiale ainsi que les différents niveaux de variance et donc qu'on n'a pas à les estimer. Or dans un vrai suivi, on ne les connaît pas et il faut les estimer.
- Que les passages sur les placettes sont synchrones (tous la même année) et qu'on passe le même nombre de fois (et au moins deux fois) sur chaque placette.
- Qu'on cherche des valeurs optimales des paramètres de l'échantillonnage (nombre de passages sur les placettes permanentes, ...) parmi un petit nombre de valeurs (optimisation discrète).

Dans un second temps du travail de Houessou (2021), nous avons introduit des placettes non permanentes et asynchrones mélangées avec des placettes permanentes et synchrones, levant donc l'avant-dernière limite. Nous avons par ailleurs utilisé les outils de RJ, donc avec les mêmes autres limites qu'évoquées ci-dessus. Nous avons trouvé que l'introduction de placettes non-permanentes asynchrones baissait le nombre de passages optimal sur les placettes permanentes synchrones (Figure 1) et que la proportion optimale de placettes non permanentes était majoritairement supérieure à 50% pour des niveaux d'autocorrélation spatiale au-dessus de 0.5 et des niveaux d'autocorrélation temporelle était proche de 0.5 (Figure 2). Malgré tout, l'amélioration de la précision de l'estimateur

de la tendance temporelle avec l'introduction des placettes non permanentes était très ténue (baisse de 1 à 3% de l'erreur type).

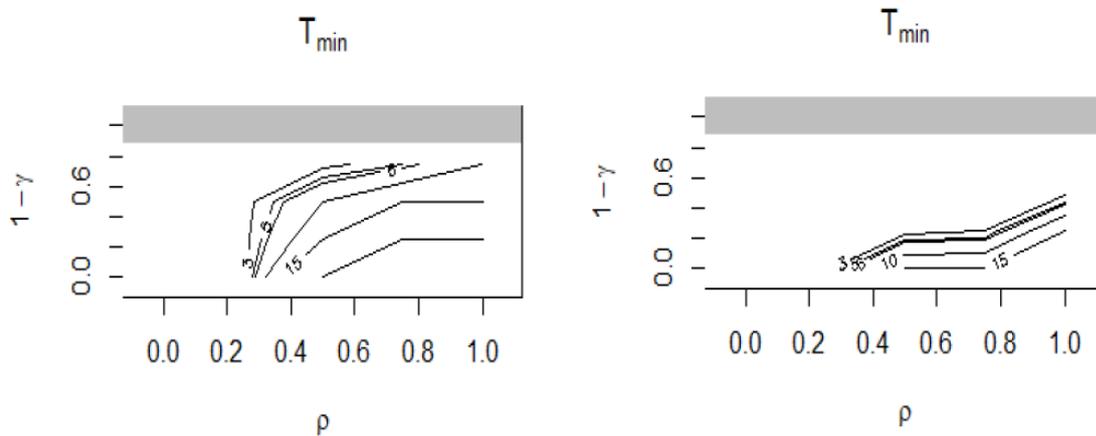


Figure 1 : Nombre optimal - pour estimer le plus précisément la tendance temporelle - T_{\min} de passages sur les placettes permanentes dans le cas où on n'a que des placettes permanentes synchrones (à gauche) et dans le cas où les placettes permanentes synchrones sont mélangées avec des placettes non permanentes asynchrones (à droite). Les courbes sont les courbes de niveau de la variable T_{\min} , c'est-à-dire les courbes joignant les points du plan ayant les mêmes valeurs de T_{\min} . Le niveau d'autocorrélation spatiale augmente avec la valeur du paramètre ρ (axe des abscisses) ; il en va de même pour l'autocorrélation temporelle avec la valeur du paramètre $1-\gamma$ (axe des ordonnées).

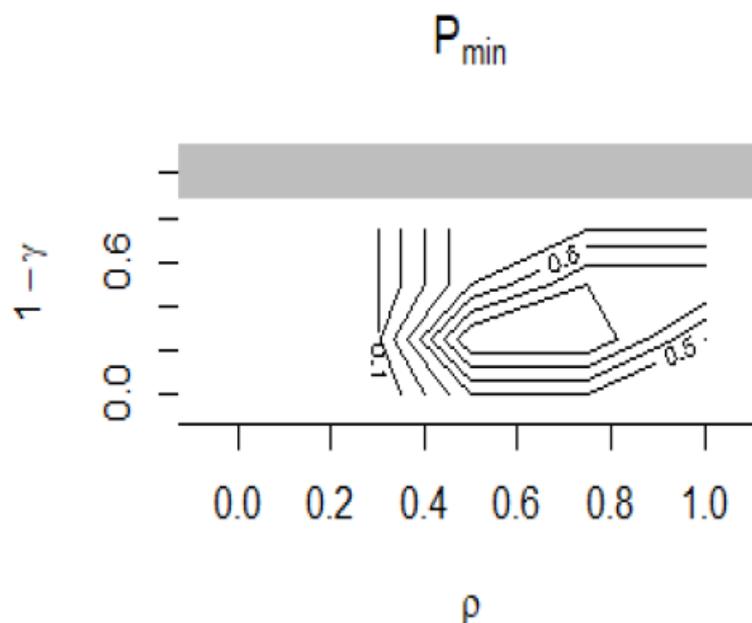


Figure 2 : Proportion optimale - pour estimer le plus précisément la tendance temporelle - P_{\min} de placettes non-permanentes asynchrones. Les courbes sont les courbes de niveau de la variable P_{\min} , c'est-à-dire les courbes joignant les points du plan ayant les mêmes valeurs de P_{\min} . Le niveau d'autocorrélation spatiale augmente avec la valeur du paramètre ρ (axe des abscisses) ; il en va de même pour l'autocorrélation temporelle avec la valeur du paramètre $1-\gamma$ (axe des ordonnées).

En troisième partie du master de Houessou (2021), nous avons essayé d'estimer les paramètres du modèle complet non-stationnaire, mais n'avons pas réussi pendant le temps du stage malgré des essais sur plusieurs packages R. C'est ce que le stage de Faye (2022) a résolu, en effectuant des simulations de jeux de données avec différents niveaux de corrélation spatiale et temporelle et en les analysant avec des modèles statistiques écrits avec la package R TMB.

Les résultats du scénario 1 – sans effet nugget dans la dépendance spatiale – montrent tout d'abord que globalement – i.e. en moyenne sur tout l'espace des valeurs possibles d'autocorrélations spatiale et temporelle – le plan d'échantillonnage avec uniquement des placettes permanentes est supérieur aux deux autres. Dans certaines zones de l'espace autocorrélation spatiale/autocorrélation temporelle – notamment pour les portées (autocorrélation spatiale) faibles – il est assez largement supérieur aux deux autres (Figure 3). A l'inverse, on peut préférer un mélange 50% PP/50%PT pour des autocorrélations spatiales fortes et des autocorrélations temporelles faibles (voire des autocorrélations spatiales faibles et temporelles fortes) et du 100% PT pour des autocorrélations spatiales et temporelles fortes. Il faut néanmoins se méfier des résultats avec autocorrélation temporelle forte (plus grande que 0.9 environ), car cette zone était associée à une certaine instabilité des résultats¹⁸.

¹⁸ C'est peut-être une des raisons pour lesquelles les graphes de RJ s'arrêtent à des autocorrélations temporelles de 0.9.

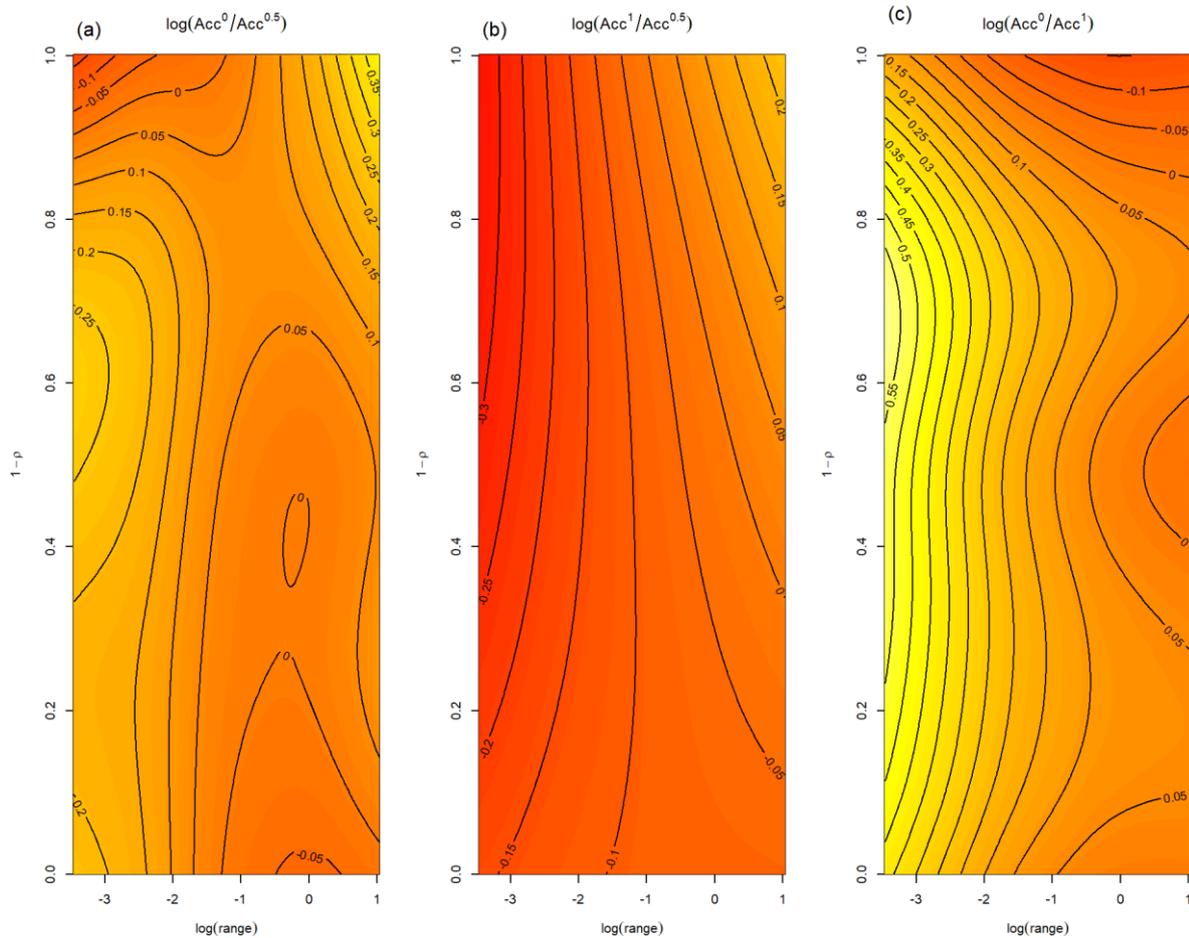


Figure 3 (Scenario 1) : Variation en fonction des paramètres de l'autocorrélation spatiale (abscisses) et temporelle (ordonnées) du logarithme du ratio des exactitudes (« Accuracy » en anglais, notées Acc^{19}) d'estimation de la tendance temporelle d'abondance pour les différents plan d'échantillonnage : échantillonnage « 0% PT » vs « 50%PT » (à gauche), « 100% PT » vs « 50% PT » (au centre) et « 0% PT » vs « 100% PT » (à droite) où PT signifie Placette Temporaire. Il s'agit du Scenario 1 où il n'y a pas d'effet nugget dans la simulation des données ni dans le modèle statistique. Si l'exactitude est la même entre les deux plans d'échantillonnage comparés, alors le logarithme du ratio est égal à 0 : les isoclines 0 indiquent donc les zones d'équivalence entre plans d'échantillonnage. Si l'exactitude est plus forte avec le plan d'échantillonnage évalué (au numérateur) par rapport au plan d'échantillonnage de référence (au dénominateur), la valeur du log du ratio est positive. Le niveau d'autocorrélation spatiale augmente le long de l'axe des abscisses ($\log(\text{range})$); il en va de même pour l'autocorrélation temporelle l'axe ces ordonnées ($1-\rho$).²⁰ La portée (ici notée range) est la distance à laquelle les autocorrélations des effets aléatoires spatiaux

¹⁹ La notion d'exactitude prend en compte la justesse d'un estimateur (i.e. la distance de l'estimateur moyen à la vraie valeur) et sa précision (l'incertitude qui lui est associée, souvent appréhendée par la notion d'erreur type de l'estimateur) : elle varie en sens opposé avec la moyenne de la distance entre la vraie valeur et les valeurs tirées au sort dans la distribution de l'estimateur.

²⁰ A noter que les notations ont changé entre le stage de Houessou et celui de Faye : ρ était lié à l'autocorrélation spatiale dans Houessou alors qu'il est ici associé à l'autocorrélation temporelle.

du modèle sont égales à 5%. Pour les interpréter il est bon de savoir que le territoire simulé était un carré de côté 1, i.e. quand $\log(\text{range})$ vaut 0, la portée est égale au côté du territoire.

Les résultats du scénario 2 – avec effet nugget dans la dépendance spatiale – sont à peu près cohérents avec ceux du scénario 1 à part que la zone favorable au mix 50% PP/50%PT pour des autocorrélations spatiales faibles et des autocorrélations temporelles fortes a disparu – de sorte que le 100%PP est maintenant préférable aux deux alternatives dès que l'autocorrélation spatiale est faible (Figure 4).

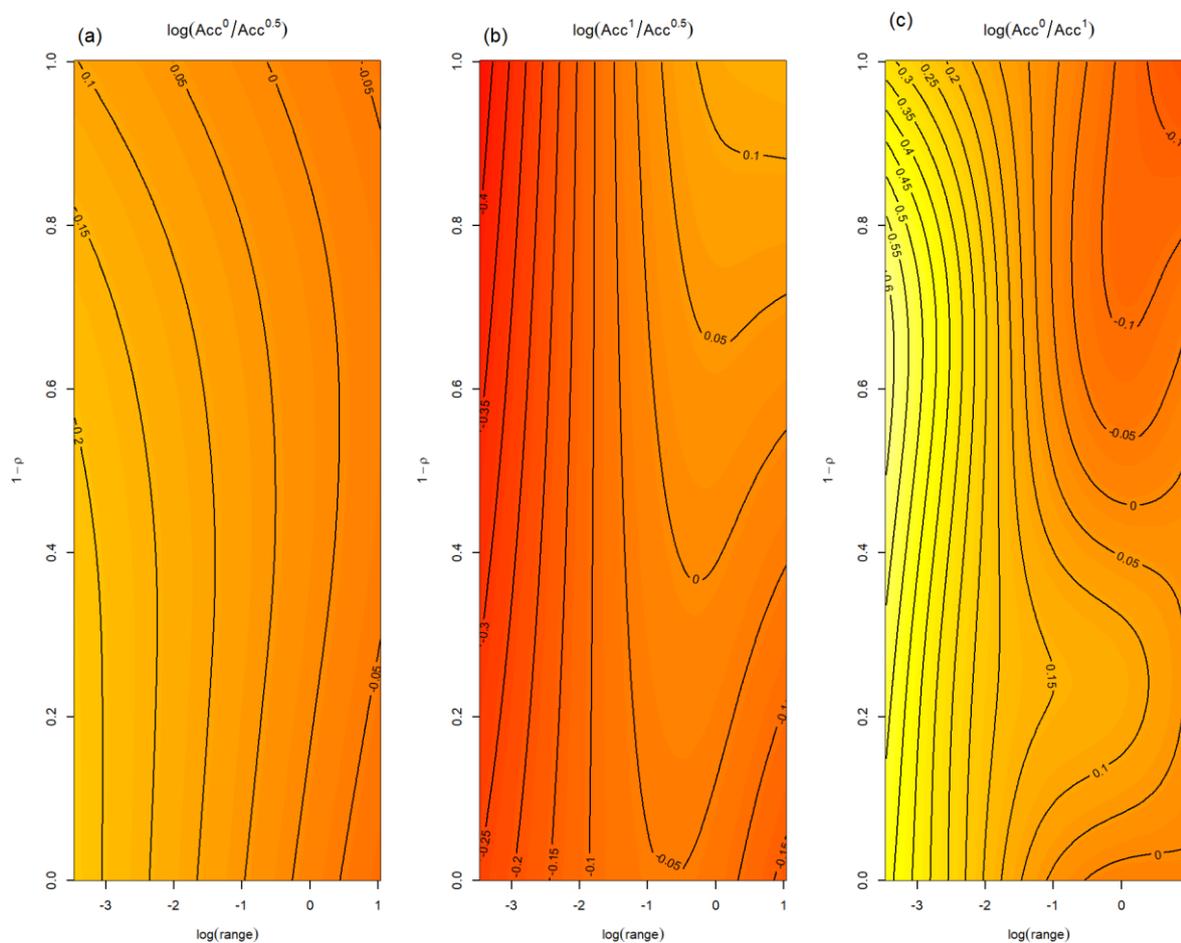


Figure 4 (Scénario 2) : Variation en fonction des paramètres de l'autocorrélation spatiale (abscisses) et temporelle (ordonnées) du logarithme du ratio des exactitudes (« Accuracy » en anglais, notées Acc^{21}) d'estimation de la tendance temporelle d'abondance pour les différents plan d'échantillonnage : échantillonnage « 0% PT » vs « 50%PT » (à gauche), « 100% PT » vs « 50% PT » (au centre) et « 0% PT » vs « 100% PT » (à droite) où PT signifie Placette Temporaire. Il s'agit du Scénario 2 où il y a un effet nugget dans la simulation des données et dans le modèle statistique. Si

²¹ La notion d'exactitude prend en compte la justesse d'un estimateur (i.e. la distance de l'estimateurs moyen à la vraie valeur) et sa précision (l'incertitude qui lui est associée, souvent appréhendée par la notion d'erreur type de l'estimateur) : elle varie en sens opposé avec la moyenne de la distance entre la vraie valeur et valeurs tirées au sort dans a distribution de l'estimateur.

l'exactitude est la même entre les deux plans d'échantillonnage comparés, alors le logarithme du ratio est égal à 0 : les isoclines 0 indiquent donc les zones d'équivalence entre plans d'échantillonnage. Si l'exactitude est plus forte avec le plan d'échantillonnage évalué (au numérateur) par rapport au plan d'échantillonnage de référence (au dénominateur), la valeur du log du ratio est positive. Le niveau d'autocorrélation spatiale augmente le long de l'axe des abscisses ($\log(\text{range})$); il en va de même pour l'autocorrélation temporelle l'axe ces ordonnées $(1-\rho)$.²² La portée (ici notée range) est la distance à laquelle les autocorrélations des effets aléatoires spatiaux du modèle sont égales à 5%. Pour les interpréter il est bon de savoir que le territoire simulé était un carré de côté 1, i.e. quand $\log(\text{range})$ vaut 0, la portée est égale au côté du territoire.

²² A noter que les notations ont changé entre le stage de Houessou et celui de Faye : ρ était lié à l'autocorrélation spatiale dans Houessou alors qu'il est ici associé à l'autocorrélation temporelle.

Nous retenons de ces résultats pour la constitution des maquettes qu'à coût d'échantillonnage constant, il semble préférable de travailler avec des placettes permanentes quand l'autocorrélation spatiale est faible ou moyenne. Ce n'est essentiellement que quand l'autocorrélation spatiale est forte que les autres schémas peuvent être préférables.

Il reste à étudier la généralité de ces résultats car ceux-ci ont été obtenus avec un modèle particulier (une extension de celui de RJ) et des valeurs de paramètres de ce modèle particuliers – hormis les paramètres d'autocorrélation spatiale et temporelle qui ont été variés pour les Scenarios 1 et 2. Ce sont des travaux qui sont en cours.

6.3.4 Analyse des tendances temporelles en présence d'autocorrélation spatiale : importance de prendre en compte ces autocorrélations à tous les étages du modèle statistique

Les résultats du scénario 3 de Faye (2022) comparant différents modèles statistiques d'analyse de données simulées ont révélé d'assez grandes variations des résultats suivant que le modèle statistique incorporait ou non la variation spatiale de la tendance temporelle, et suivant que cette variation était structurée dans l'espace ou indépendante. Ils ont permis de montrer (Figure 5) sur ce cas de figure que si le modèle statistique n'incorporait pas les variations incorporées lors de la simulation des données (modèle 1), la tendance temporelle moyenne estimée était moins précise (plus grande erreur type), mais était aussi biaisée (dans notre cas surestimée). Ces différences entre modèles semblaient d'autant plus fortes que la vraie tendance temporelle moyenne était forte (cf. Appendice de Faye 2022). Ces résultats sont cohérents avec ceux de Thorson et al. (2015) qui avaient trouvé que pour bien estimer le niveau de densité dépendance (c'est-à-dire la régulation de la démographie de la population en fonction de sa densité) – au lieu de la tendance temporelle ici – il fallait inclure dans le modèle la possibilité que les données soient structurées dans l'espace ; ils en sont une extension au cas où la dynamique démographique n'est pas stationnaire et nous montrons qu'il est aussi important de prendre en compte la structuration spatiale de la dynamique temporelle pour bien l'estimer.

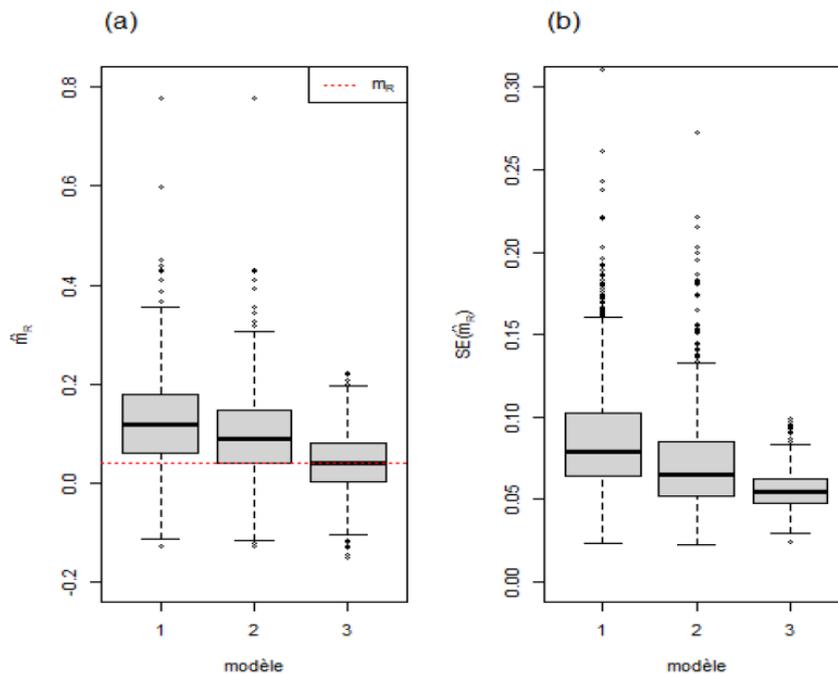


Figure 5 (Scenario 3) : Estimateurs de la tendance temporelle (à gauche) et son erreur-type (à droite) issus de 1000 simulations de données et d’analyse de ces données dans le Scenario 3, pour 3 modèles : le modèle 1 incorpore toute la structure de la simulation des données hormis la variation spatiale de la tendance temporelle dans l’espace – i.e. dans ce modèle la tendance temporelle est supposée constante dans l’espace ; le modèle 2 incorpore toute la structure de la simulation des données hormis le caractère structuré dans l’espace de la variation de la tendance temporelle dans l’espace – i.e. dans ce modèle la tendance temporelle varie dans l’espace mais de manière indépendante ; le modèle 3 incorpore toute la structure de la simulation des données. Dans ce scénario, les niveaux d’autocorrélation spatiale et temporelle ont été gardés constants ($\kappa=2.5$ et $\rho=0.5$) et la tendance temporelle moyenne était de 0.04 (représentée par le trait rouge dans la figure de gauche).

Ces résultats sont importants pour les analyses qui seront faites des suivis de biodiversité spécifique ; ils indiquent qu’il y aura tout lieu de prendre en compte la possibilité de variation spatiale structurée des tendances temporelles, faute de quoi nous risquons de produire des résultats biaisés et peu précis.

L’idée initiale du stage M2 de Seye (2022) était de modéliser la phénologie de différentes espèces de la flore française et d’estimer leur détectabilité (faisant ainsi une synthèse des approches de Faye 2022 et Maloku 2021), mais il n’a pas été possible d’atteindre ce stade des analyses. Tout au plus pouvons-nous indiquer que, sans prendre en compte phénologie et détectabilité, le sapin et le houx n’avaient pas de tendance temporelle significative tandis que l’anémone décroissait assez fortement et de manière très significative.

6.4 Conclusion et perspectives

A travers cinq stages de master 2, la tâche E a produit certains résultats importants pour les maquettes de PASSIFOR-2 mais aussi certains résultats intéressants sur un plan académique :

- La Tâche E n'est pas stricto sensu à l'origine de l'idée de distinguer des cœurs de maquettes constitués de dispositifs aux bonnes propriétés par rapport à nos objectifs et des compléments de maquettes pouvant incorporer des dispositifs produisant des données aux propriétés moins optimales. Cette idée existait déjà par exemple dans les travaux de Giraud et al. (2015) et Coron et al. (2018). Notre travail a apporté une procédure qui permette de jauger si les modèles de fusion de données cœur-complément (ou : « protocolées »-opportunistes) incorporent des hypothèses cohérentes avec les données. La procédure proposée devrait permettre d'utiliser toutes les données pour l'estimation et pour la « critique » des modèles là où la procédure précédente nécessitait de séparer les données entre estimation des tendances et critique du modèle.
- Nos résultats sur la détectabilité indiquent simplement qu'une détectabilité constante différente de 1 n'est pas un problème pour estimer la tendance temporelle, ce qui est une bonne nouvelle dans la perspective de conception de suivis. Cette conclusion préliminaire ne signifie pas pour autant que la détectabilité des espèces est un problème systématiquement négligeable pour estimer une tendance temporelle, notamment quand cette détectabilité varie, par exemple par année, entre observateurs ou en fonction de l'abondance ou fréquence de la population, ce qui correspond probablement à la majorité des situations réelles.
- Les résultats de la tâche E sur les plans d'échantillonnage sont globalement en faveur des placettes permanentes – notamment quand l'autocorrélation spatiale est faible –, mais avec des zones des valeurs d'autocorrélations spatiale et temporelle tout de même favorables au mix 50/50 entre placettes permanentes et temporaires et d'autres favorables au 100% placettes temporaires.
- Enfin sur le plan de l'analyse des données, nous avons mis en évidence l'intérêt de modéliser des variations spatialement structurées de la tendance temporelle si nous souhaitons estimer la tendance temporelle moyenne de manière précise et non biaisée. Ce résultat s'applique au-delà de PASSIFOR-2, et notamment à l'analyse des tendances des données existantes.

Compte tenu des acquis, il nous semble intéressant de prévoir à la suite du projet :

- La valorisation sous forme d'article scientifique du travail de Pierre Bouchet (2020) et de celui de Noudéhouéno Houessou (2021) et d'El Hadji Cissé Faye (2022)
- Une valorisation, probablement plutôt « technique » et en français, de l'ensemble de la tâche E.
- De nouveaux stages de Master 2 en 2023 pour (i) finir le travail de Ndongo Seye sur les données floristiques de l'inventaire Forestier et (ii) continuer les travaux de Houessou et Faye sur d'autres questions relatives aux plans d'échantillonnage.
- A terme, il pourrait être intéressant de faire une synthèse des gammes d'autocorrélation spatiale et temporelle estimées en pratique – modulo le fait que ces estimations dépendent probablement de la forme précise du modèle utilisé, dans notre cas une extension spatiale du modèle densité-dépendant de Gompertz.

Références bibliographiques

- Bouchet, P., 2020. Proposition d'une approche pour vérifier la cohérence entre données opportunistes et données protocolées pour mieux estimer l'état et la dynamique de la biodiversité, Master 2 Mathématiques Appliquées, Statistiques. Université d'Orléans, Orléans.
- Coron, C., Calenge, C., Giraud, C., Julliard, R., 2018. Bayesian estimation of species relative abundances and habitat preferences using opportunistic data. *Environmental and Ecological Statistics* 25, 71-93.
- Faye, E.H.C., 2022. Mélange de placettes temporaires et permanentes pour le suivi de la biodiversité : approche statistique par simulation, Master 2 Mathématiques appliquées Statistiques. Université d'Orléans, Orléans.
- Ferretti, M., Chiarucci, A., 2003. Design concepts adopted in long-term forest monitoring programs in Europe - problems for the future? *Science of the Total Environment* 310, 171-178.
- Giraud, C., Calenge, C., Coron, C., Julliard, R., 2015. Capitalizing on opportunistic data for monitoring relative abundances of species. *Biometrics* 72, 649-658.
- Gosselin, F., 2011. A New Calibrated Bayesian Internal Goodness-of-Fit Method: Sampled Posterior p-values as Simple and General p-values that Allow Double Use of the Data. *Plos One* 6, e14770.
- Houessou, N.F.M., 2021. Optimisation de l'effort d'échantillonnage dans le temps et dans l'espace, Master 2 Mathématiques et applications - Parcours MSID. Université de Pau et des Pays de l'Adour, Pau.
- Kéry, M., Royle, J.A., Schmid, H., Schaub, M., Volet, B., Häfliger, G., Zbinden, N., 2010. Site-Occupancy Distribution Modeling to Correct Population-Trend Estimates Derived from Opportunistic Observations. *Conservation Biology* 24, 1388-1397.
- Lindgren, F., Rue, H., Lindström, J., 2011. An explicit link between gaussian fields and gaussian markov random fields: The stochastic partial differential equation approach. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B: Statistical Methodology* 73, 423-498.
- Maloku, K., 2021. Optimisation des suivis de biodiversité en absence d'erreur de détection. Influence de l'effort d'échantillonnage et du niveau de réplication sur la qualité de l'estimation de la tendance temporelle de l'occurrence, Master 2 Mathématiques, Données et Apprentissage. Université Paris Cité, Paris.
- Rhodes, J.R., Jonzén, N., 2011. Monitoring temporal trends in spatially structured populations: how should sampling effort be allocated between space and time? *Ecography* 34, 1040-1048.
- Saas, Y., Gosselin, F., 2014. Simulation-based comparative analysis of spatial count regression methods on regularly and irregularly-spaced locations. *Ecography* 37, 476-489.
- Seye, N., 2022. Développement d'indicateurs de tendances temporelles de la flore forestière, Master 2 Mathématiques et applications. Université de Strasbourg, Strasbourg.
- Thorson, J.T., Skaug, H.J., Kristensen, K., Shelton, A.O., Ward, E.J., Harms, J.H., Benante, J.A., Inouye, B.D., 2015. The importance of spatial models for estimating the strength of density dependence. *Ecology* 96, 1202-1212.
- Vos, P., Meelis, E., Ter Keurs, W.J., 2000. A framework for the design of ecological monitoring programs as a tool for environmental and nature management. *Environmental Monitoring and Assessment* 61, 317-344.
- Yoccoz, N.G., Nichols, J.D., Boulinier, T., 2001. Monitoring of biological diversity in space and time. *Trends in Ecology and Evolution* 16, 446-453.

Chap. 7 : Conclusion et perspectives

Auteurs du chapitre : Frédéric Gosselin (INRAE), Julie Dorioz (GIP Ecofor)

7.1 Principaux apports et difficultés du projet

En lien étroit avec le programme de Surveillance de la biodiversité terrestre, le projet PASSIFOR-2 a abouti à une première proposition de maquette pour suivre la biodiversité en forêt à l'échelle de la France métropolitaine. Les apports originaux du projet ont été d'explicitier les objectifs de ces suivis en lien avec les acteurs concernés, d'impliquer les dispositifs existants, de prêter une attention à la gouvernance de ces suivis, et de raisonner scientifiquement le choix des groupes d'espèces à suivre, ainsi que les modalités d'échantillonnage (quelles associations de placettes permanentes ou temporaires, de données protocolées ou opportunistes), de relevés et d'analyse de données (prise en compte des autocorrélations spatiales et temporelles) pour répondre au mieux aux objectifs préalablement définis.

En cela PASSIFOR-2 a permis de produire de nouvelles approches :

- une méthode de constitution des maquettes de suivi de biodiversité, testée sur un objectif de suivi (surveiller l'état et la dynamique de la biodiversité en forêt) et applicable à d'autres objectifs ;
- un choix objectif, par analyse multi-critères, des composantes de biodiversité à suivre – les oiseaux, les chiroptères, les arbres, les plantes vasculaires, les bryophytes, les champignons ectomycorhiziens, les gastéropodes terrestres ont été retenus ;
- une méthode d'analyse des changements de pratiques induits par les politiques publiques en forêt, pour proposer des variables dendrométriques et de gestion à suivre en parallèle des relevés pluri-taxonomiques de biodiversité ;

Et de nouveaux résultats :

- des résultats statistiques - sur la fusion de données protocolées et de données opportunistes, sur l'importance de l'autocorrélation spatiale dans l'estimation des tendances temporelles de biodiversité et sur la place des placettes permanentes et temporaires – permettant de guider les plans d'échantillonnage et l'analyse des données de ces suivis
- une proposition de maquette pour l'Objectif 1, composée de huit sous-maquettes – 7 pour chacune des composantes de biodiversité identifiées ci-dessus et une pour le niveau habitat – utilisant un plan d'échantillonnage nouveau associant le plan d'échantillonnage du RMQS et une partie de celui de l'Inventaire Forestier de l'IGN.

Pour mûrir, la méthode d'élaboration des maquettes a nécessité du temps car elle s'est appuyée sur les acquis des autres tâches du projet (dépendances aux autres tâches). Le besoin de raisonner par composante de biodiversité pour l'élaboration des maquettes, qui n'avait pas été anticipé, a eu pour effet de multiplier le travail nécessaire. Un effort collectif plus conséquent que nos prévisions initiales a été accompli, sans toutefois permettre de construire les maquettes autour des objectifs de suivi 2, 3 et 4. D'autre part, les multiples aspects ayant trait à la gouvernance de ces maquettes restent à étudier

en grande partie, en lien étroit avec les responsables des dispositifs concernés. Pour accompagner ce travail sur la gouvernance, la mobilisation d'experts spécialistes de ces questions est un préalable indispensable. Ces experts sont à rechercher dans les domaines des sciences de la gestion ou des sciences politiques.

Lors du séminaire de restitution du projet PASSIFOR-2 (voir compte-rendu en Annexe III-A), les participants ont souligné **des avancées remarquables d'un point de vue méthodologique** pour la mise en place d'un suivi pérenne à large échelle de la biodiversité en forêt. Les lacunes et points de discussion mis en avant par les participants concernent : (i) les forêts de l'outre-mer (non prises en compte) et la faible représentativité des milieux forestiers plus particuliers ; (ii) le choix des taxons via l'analyse multi-critères, considéré comme discutable par de nombreux participants, notamment en raison de l'absence des groupes taxonomiques saproxyliques, et (iii) l'articulation entre PASSIFOR-2 et le programme de surveillance des écosystèmes terrestres, qui reste pour certains un point de vigilance.

7.2 Perspectives du projet

Ce projet sera poursuivi par INRAE en 2023-2024 dans le cadre du projet PASSIFOR-2bis grâce au soutien du MTECT pour (i) produire aux moins deux autres maquettes de suivi de la biodiversité en forêt autour de deux autres objectifs – dont celui de suivre les relations entre gestion forestière et biodiversité et (ii) valoriser davantage le projet (publications techniques en français et publications scientifiques en anglais).

Un enjeu est à présent de voir comment les méthodes et maquettes développées par PASSIFOR-2 peuvent être utilisées par le Programme de surveillance de la biodiversité terrestre, en ce qui concerne les écosystèmes forestiers. **Le passage des outils à bas TRL développés par PASSIFOR-2 à des outils opérationnels à haut TRL nécessiterait la mise en œuvre d'un projet « PASSIFOR-3 »**. Le GIP Ecofor pourra catalyser les réflexions pour le développement d'un tel projet. Ces développements se feront en lien étroit avec les dispositifs de suivi concernés et le programme de Surveillance de la Biodiversité Terrestre, piloté par l'OFB/PatriNat.

La restitution finale du projet PASSIFOR-2 (cf. compte-rendu en Annexe III-A) ainsi que la maquette proposée dans PASSIFOR-2 ont permis de dégager plusieurs axes pour PASSIFOR-3 dans le cadre d'une discussion finale avec l'ensemble des participants :

- **Amélioration des protocoles** dans la continuité de ce qui a été fait dans PASSIFOR-2, avec différents aspects à approfondir ou développer (méthodes acoustiques, deep learning pour les bryophytes, sciences participatives...)
- **Faisabilité, prototypes et tests préalables** (tests méthodologiques sur des méthodes émergentes, des processus de fusion de données, définir les premiers indicateurs...)
- **Passage à l'opérationnel / la production** : avec un lien plus fort à établir avec **les opérateurs** pour étudier la mise en œuvre des maquettes (questions de gouvernance, liens à développer avec le programme de surveillance, chiffrage des coûts ...) et pour envisager des changements d'échelle.

Du point de vue de l'organisation de PASSIFOR-3, les acteurs principaux qui ressortent de cet exercice de brainstorming sont : l'**OFB (UMS Patrinat)**, l'**IGN** (Composante IFN mais aussi Observatoire des forêts en cours de construction, qui pourrait être un réceptacle structuré pour les informations issues des suivis de biodiversité en forêt), le **CESCO**, les organismes qui pilotent le programme **STOC**, les

organismes qui pilotent le programme **Vigie-Nature**, le **GIP Ecofor** (sous l'angle de la coordination, de l'animation et du portage des objectifs 2, 3 et 4, mais aussi pour faire le lien avec le niveau européen), le **MTECT** en tant que financeur possible de PASSIFOR-3. On note un intérêt important **des acteurs régionaux** (PNR, ONF, Collectivités...) pour contribuer à la démarche en tant qu'utilisateur et producteur des données.

Ce futur projet PASSIFOR-3 pourra en outre s'articuler avec d'autres projets ou initiatives qui démarrent ou qui sont en passe de démarrer et qui concernent le suivi de la biodiversité forestière. On pourra citer par exemple le projet ciblé « Système agile de monitoring écologique des forêts » (PC MONITOR) du Programme et équipements prioritaires de recherche « Forêts et changements globaux : systèmes socio-écologiques en transition » (PEPR FORESTT)²³, dont un des axes de travail, dans l'état actuel du développement en cours du projet, concerne le suivi du carbone et de la biodiversité des forêts françaises métropolitaines peu gérées. Le PC MONITOR, qui est un projet de recherche, pourrait produire des résultats dont le transfert vers le développement pourrait alimenter PASSIFOR-3. On peut citer également l'Observatoire des forêts françaises²⁴ qui envisage la mise en place d'un club thématique sur la biodiversité forestière, espace qui recenserait les sources de données, d'indicateurs et d'informations disponibles sur la biodiversité forestière. Les produits de PASSIFOR-3 pourraient typiquement alimenter cet observatoire.

²³ <https://www.pepr-forestt.fr/>

²⁴ <https://foret.ign.fr/>

Proposition d'Amélioration du Système de Suivi de la biodiversité FORestière

Phase 2 du projet, 2019-2022

Partie II. Principaux travaux scientifiques et techniques

Partie II. - Principaux travaux scientifiques et techniques

Sommaire

- II-A Protocole d'élaboration des maquettes de suivi de la biodiversité en forêt
- II-B Les Grilles d'analyse des objectifs de suivi 1, 2, 3, 4
- II-C Proposition de plan d'échantillonnage multi-taxons pour l'objectif 1
- II-D Objectif 1 – Sous-maquette Ecosystèmes
- II-D Objectif 1 – Protocole de relevés Ecosystèmes
- II-E Objectif 1 – Sous-maquette Arbres
- II-E Objectif 1 – Protocole de relevés Abondance des arbres
- II-F Objectif 1 – Sous-maquette Flore vasculaire (hors arbres)
- II-F Objectif 1 – Protocole de relevés Flore vasculaire (hors arbres)
- II-G Objectif 1 – Sous-maquette Bryophytes
- II-G Objectif 1 – Protocole de relevés Bryophytes
- II-H Objectif 1 – Sous-maquette Chiroptères
- II-H Objectif 1 – Protocole de relevés Chiroptères
- II- i Objectif 1 – Sous-maquette Oiseaux
- II- i Objectif 1 – Protocole de relevés Oiseaux
- II-J Objectif 1 – Sous-maquette Gastéropodes
- II-J Objectif 1 – Protocole de relevés Gastéropodes
- II-K Objectif 1 – Sous-maquette Champignons ectomycorhiziens
- II-K Objectif 1 – Protocole de relevés Champignons ectomycorhiziens
- II-L Proposition de maquette pour le suivi de l'état et l'évolution de [composantes] de la biodiversité en forêt (objectif 1)
- II-M Synthèse bibliographique sur la gouvernance des systèmes de suivi environnementaux (principes)
- II-N Note sur le système de suivi de l'environnement en Suisse
- II-N Note sur le système de suivi en Suède
- II-N Note sur le projet de suivi de la biodiversité en Nouvelle-Zélande
- II-O Synthèse bibliographique : Suivis de biodiversité par la reconnaissance automatique des espèces à partir des sons
- II-P Synthèse bibliographique : suivis de biodiversité par la reconnaissance automatique des espèces sur photographie
- II-Q Synthèse bibliographique : suivi de biodiversité par la reconnaissance des espèces basée sur l'ADN
- II-R Notice explicative – fiches « Pratiques de gestion »
- II-S Fiches de suivi des pratiques de gestion – Rubriques 1, 2, 4
- II-S Application aux coupes
- II-T Méta-analyse de l'effet de la diversité des essences forestières sur la biodiversité

