

Rapport projet Morning - Monitoring de la résilience de croissance des mélanges d'espèces ligneuses sous changement climatique

Auteurs : Lionel Hertzog, Patrick Vallet, Jean-Daniel Bontemps

Table des matières

Rapport - Monitoring de la résilience de croissance des mélanges d'espèces ligneuses sous changement climatique.....	1
1. Présentation du projet – enjeux et objectifs.....	3
2. Bilan des activités	5
3. Description de la méthode de travail – analyse de la résilience à partir des données IFN.....	6
3.1. L'inventaire Forestier National	6
3.2. Les mesures dendrométriques	6
3.3. Détermination et sélection des compositions	7
3.4. Variables écologiques et dendrométriques	9
3.5. Données de référence	10
3.6. Modélisation.....	10
3.7. Indicateurs.....	11
4. Présentation des résultats.....	13
4.1. Modèles et importance des variables	13
4.2. Comparaison globale mélanges-monocultures.....	14
.....	15
4.3. Corrélation entre indicateurs, taille d'échantillon et R^2	15
4.4. Comparaison par triplet mélanges-monocultures	16
.....	18
5. Conclusion et perspectives.....	21
6. Synthèse des sujets pour lesquels des études ou recherches complémentaires seraient nécessaires	22

Annexe.....	23
7. Analyse questionnaire	23
7.1. Contexte	23
7.2 Section 1 - Données générales	23
7.3 Section 2 – connaissances actuelles.....	26
7.4 Section 3 – Besoin en connaissances	28
7.5 Section 4 – Perturbation et gestion de la composition	30
7.6 Section 5 – perspectives futures	35
7.7 Conclusion	38
8. Atelier d'échange	39
8.1 Contexte	39
8.2 Synthèse des discussions.....	40

1. Présentation du projet – enjeux et objectifs

Le changement climatique et l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des perturbations associées réaffirme le besoin de suivi des écosystèmes forestiers et de réflexion sur la nature des systèmes de production forestière les plus viables (MAA 2020). La résilience des peuplements forestiers et le maintien de leur capacité de production de ressource bois devient ainsi un enjeu majeur pour la filière forêt-bois. La diversification des peuplements purs et la gestion des forêts mélangées pour maintenir un couvert mixte sont un des leviers de gestion sylvicole envisageables (Messier et al 2022), dont l'exploration et la mise en œuvre nécessitent des indicateurs et systèmes d'informations nouveaux.

Le programme d'inventaire forestier national est un outil essentiel à l'observation systématique des forêts françaises et de leurs changements (IGN 2022). Ce programme est devenu une enquête statistique systématique annuelle du territoire forestier en 2005, ouvrant la voie à un suivi annualisé de la forêt et de ses évolutions. Au-delà des productions standards rapportées par l'inventaire forestier, la recherche s'approprie pleinement ce dispositif pour répondre aux questions dictées par ces enjeux nouveaux.

Les recherches conduites au sein du LIF sur le phénomène de changement de la croissance des forêts et de son déterminisme climatique ont ainsi permis d'exploiter cette enquête, afin de qualifier et quantifier plus systématiquement ces phénomènes, entre espèces, entre contextes biogéographiques, et de façon spatialement explicite. Ces premières recherches (Charru 2012) ont confirmé la fiabilité de ces explorations, les résultats ayant révélé : i) des cohérences quantitatives avec d'autres sources de données (Bontemps et al. 2011, 2012 ; Charru 2014, 2017), ii) des hiérarchies de réponses entre espèces et contextes conformes aux attendus de l'autoécologie des espèces (Charru et al. 2017), iii) les régularités systématiques des patrons de déterminisme de la productivité mis en évidence par modélisation, iv) l'emprunte principale du réchauffement climatique dans la structuration interspécifique de ces changements (Charru et al. 2017).

En conséquence, l'inventaire forestier a été plus récemment mis à profit dans des recherches visant à imaginer un système de monitoring en temps réel (qui soit mis à jour annuellement, à la faveur de la succession des échantillons statistiques) de la composante climatique de la productivité forestière, offrant la perspective d'un nouveau système d'information sylvo-climatique public, à disposition de l'ensemble de la communauté forestière (Ols et al. 2020, 2021) et de prolongements de recherche : i) à la généralisation à d'autres indicateurs (par exemple mortalité), ii) à la généralisation à des systèmes de production plus complexes, au premier rang desquels les mélanges d'espèces ligneuses. La création d'un observatoire national de la forêt et du bois à l'IGN, lieu de partage de données

quantitatives sur la forêt, et de médiation entre acteurs publics, offre par ailleurs un support tangible pour la dissémination et le maintien de tels systèmes d'information climatiques.

C'est dans ce contexte que c'est inscrit le projet Morning, ciblant expressément la productivité des grands mélanges ligneux du territoire national, et s'intéressant à leur dynamique productive entre 2005 et 2023, leur comparaison aux systèmes de production purs en essence, et au développement du système d'information permettant le suivi mis à jour de ces évolutions et leur hiérarchie. Ce ciblage résulte à la fois de l'effort de généralisation en cours, et de l'hypothèse avancée par la communauté scientifique selon laquelle les mélanges offriraient une meilleure résilience de croissance que les populations pures (Morin et al 2014, Messier et al 2022).

Ce projet s'inscrit dans l'objectif général de mise en place d'un suivi observationnel des impacts du changement climatique sur les forêts. Il a une double finalité plus ciblée de caractérisation de la résilience de croissance des mélanges ligneux (production de connaissances), et de développement d'un système de suivi en continu de cette caractérisation (système d'information). En effet, 1) le recul temporel aujourd'hui permis par l'inventaire forestier national annuel (2005) est suffisant pour établir une première base de connaissances solides sur le comportement de croissance des mélanges ligneux de la forêt, d'autant qu'il peut être étendu à deux décennies antérieures (inventaires décennaux) pour établir des références initiales quant au réchauffement climatique de début de siècle; 2) L'annualisation des échantillons d'inventaire permet par ailleurs un système d'information en continu prolongeant les indicateurs au fil du temps, afin de vérifier la stabilité des relations établies, ou au contraire leurs changements et bifurcations inattendus.

L'objectif relatif à la résilience de croissance des mélanges est double : 1) pour un ensemble d'espèces données (deux) participant à un mélange, opérer un test systématique de l'hypothèse de meilleure résilience de croissance des mélanges, 2) sur un large ensemble de mélanges, établir des hiérarchies de comportement de croissance dans le but d'isoler des régularités associées aux espèces, p. ex. une croissance plus forte dans des mélanges donnés. L'enjeu est ici d'identifier des mélanges dont la composition pourrait être encouragée en gestion, via l'enrichissement de communautés pures en espèces. A ces fins, la régionalisation du diagnostic sera recherchée autant que possible afin de prendre en compte les contextes régionaux.

Un dernier objectif méthodologique est de mener une réflexion approfondie sur la notion d'indicateur de suivi de la résilience. A ce titre, l'interrogation et l'instanciation du concept large de « résilience » est une composante intégrante du projet, dans un contexte où ce type de notion reste mal défini, notamment entre différentes communautés d'utilisateurs (recherche académique, politique publique, gestionnaires, Donohue et al. 2016, Kefi et al. 2019). Au sens large, la résilience

d'un écosystème correspond à sa *capacité à maintenir ses fonctions dans un contexte de perturbations ponctuelles ou de stress plus continus*. S'agissant de croissance, la notion de résilience peut donc être approchée par plusieurs indicateurs : hiérarchie initiale des signaux de croissance (avantage du mélange), tendance d'évolution (stabilité ou dégradation de l'intensité du signal), volatilité interannuelle (variance du signal), autocorrélation temporelle (rigidité du signal), dynamique post-perturbation du signal quand elles sont détectées (résistance et résilience *stricto sensu*). Cette réflexion sur les indicateurs pourra s'appuyer sur un atelier participatif associant les différents acteurs du RMT, afin d'identifier les préoccupations prioritaires en matière d'indicateurs de résilience, et de formaliser les approches permettant de synthétiser la multi-dimensionnalité de la résilience.

2. Bilan des activités

Ce projet a impliqué trois chercheurs de l'IGN et de l'INRAE apportant chacun leurs expertises complémentaires sur la thématique du projet. Des réunions de travail régulières ont été organisées en fonction de l'avancement. L'activité principale a été l'analyse de la résilience des peuplements mélangés à partir des données de l'Inventaire Forestier National. Les résultats ont été rassemblés et discutés dans une publication scientifique soumise à la Revue Forestière Française en juin 2025. À côté de cette analyse, la communauté du RMT Aforce a été sollicitée au travers à la fois d'un questionnaire en ligne et d'un atelier d'échange. Un déroulé des temps forts du projet est donné ci-dessous :

09/2023 – lancement du projet avec séjour de LH au LESSEM à Grenoble

04/2024 – présentation du projet lors de la conférence FOREM

14/05/2024 – comité de pilotage en présence de Cécile Nivet et François Lebourgeois

17/06/2024 – présentation du projet lors d'un webinaire RMT Aforce

09/2024 – envoi de compte-rendu d'avancement du projet au RMT Aforce

18/03/2025 – atelier d'échange

26/03/2025 – présentation du projet lors des journées RMT Aforce à Orléans

3. Description de la méthode de travail – analyse de la résilience à partir des données IFN

3.1. L’inventaire Forestier National

L’Inventaire Forestier National (IFN) est une enquête statistique permanente visant à produire des informations sur la forêt française métropolitaine. Cet inventaire est, depuis 2005, basé sur l’échantillonnage annuel de points couvrant le territoire chaque année (Bouriaud et al., 2023). L’IFN est opéré selon deux phases : (i) une première phase de photo-interprétation pour définir l’usage et la couverture du sol au niveau des points et (ii) une deuxième phase de collecte de donnée sur le terrain sur un sous-échantillon de points identifiés comme forêt lors de la première phase. Actuellement environ 6000 points sont échantillonnés chaque année. Bouriaud et al. (2025) et Duong et al. (2025) décrivent en détails les concepts statistiques et les méthodes de l’IFN.

3.2 Les mesures dendrométriques

Des placettes circulaires de rayon 6, 9 et 15 m sont établies autour du point d’inventaire. Seuls les arbres ayant un diamètre à 1.3 m (dbh) supérieur à 7.5cm sont recensés. Les arbres ayant un dbh inférieur à 22.5 cm sont mesuré sur la placette de 6 m, ceux avec un dbh inférieur à 37.5 cm sur la placette de 9 m et les arbres plus gros sont mesurés sur la placette de 15 m. L’espèce botanique de chaque arbre recensé est identifiée. La croissance des arbres vivants sur les 5 dernières années est estimée à partir de carottes permettant de mesurer la croissance radiale. De ce fait, les observations de croissance ne sont pas indépendantes entres années successives, et introduisent logiquement un signal d’autocorrélation. Pour des raisons budgétaires, tous les arbres ne sont pas carottés, sur chaque placette au moins un individu par classe de diamètre et par espèce présente est carotté. Le nombre de classes de diamètre a évolué de 3 classes en 2005-2007 jusqu’à 5 classes depuis 2016. Le nombre d’individus maximum mesurés par classe de diamètre a évolué de 9 en 2005-2006 à 1 depuis 2014. La croissance des arbres non carottés est imputée localement (au niveau placette) selon la formule suivante :

$$IR5_{imp} = IR5_{ref} * \left(\frac{C13_{imp}}{C13_{ref}}\right)^{\alpha}$$

Avec IR5 la croissance radiale des 5 dernières années, *imp* l’indice d’arbre dont la croissance est à imputer, *ref* indice d’arbre de référence de même essence et classe de diamètre que l’arbre à imputer, C13 la circonférence à 1.3m et alpha un coefficient allométrique estimé en moyenne par

essence et classe de diamètre. La croissance radiale sur 5 ans est utilisée pour estimer la productivité en volume annualisée en se basant sur des équations allométriques disponibles par espèce (Gohon, 2023, non publié).

3.3 Détermination et sélection des compositions

La classification des placettes par composition s'inspire de Vallet & Pérot (2011) et se fonde sur la proportion de surface terrière des différentes espèces identifiées. Cette classification permet de déterminer la composition des placettes sur l'ensemble des données IFN, incluant les données des inventaires antérieurs à 2005. Les proportions de surface terrière des essences en présence (surface terrière essence cible/ surface terrière totale) sont calculées et classées par ordre décroissant. La diversité en espèces de la placette est estimée comme le nombre d'espèces nécessaires à inclure pour obtenir au minimum 80% de la surface terrière. Les placettes avec une diversité supérieur à 2 ne sont pas considérées dans le cadre de cette étude. Par ailleurs, pour limiter les interactions avec d'autres essences dans les peuplements multispécifiques, seules les placettes de diversité 2 pour lesquelles la deuxième essence a une proportion de surface terrière supérieure à la somme de toutes les suivantes sont considérées. Appliquée aux données de l'IFN collectées entre 2005 et 2023, cette méthode de classification permet de repérer 62 compositions en monoculture (diversité = 1) pour un total de 50 338 placettes et 811 en mélanges à deux espèces pour un total de 41 147 placettes.

La distribution du nombre de placettes par composition suit une distribution en J, avec un petit nombre de compositions très fréquentes et un grand nombre de compositions rares (**Fig. 1.1**). Afin de trouver un compromis entre exhaustivité des mélanges étudiés et taille d'échantillon suffisante pour produire des indicateurs robustes, seuls les 21 mélanges les plus abondants, cumulant ensemble un peu moins de 50% des placettes en mélanges, ont été sélectionnés (**Tableau 1**), ces mélanges couvrent l'ensemble du territoire (**Fig. 1.2**), avec toutefois une sous-représentation dans le sud-est et la Corse. Les 14 monocultures associées à ces mélanges sont également sélectionnées.

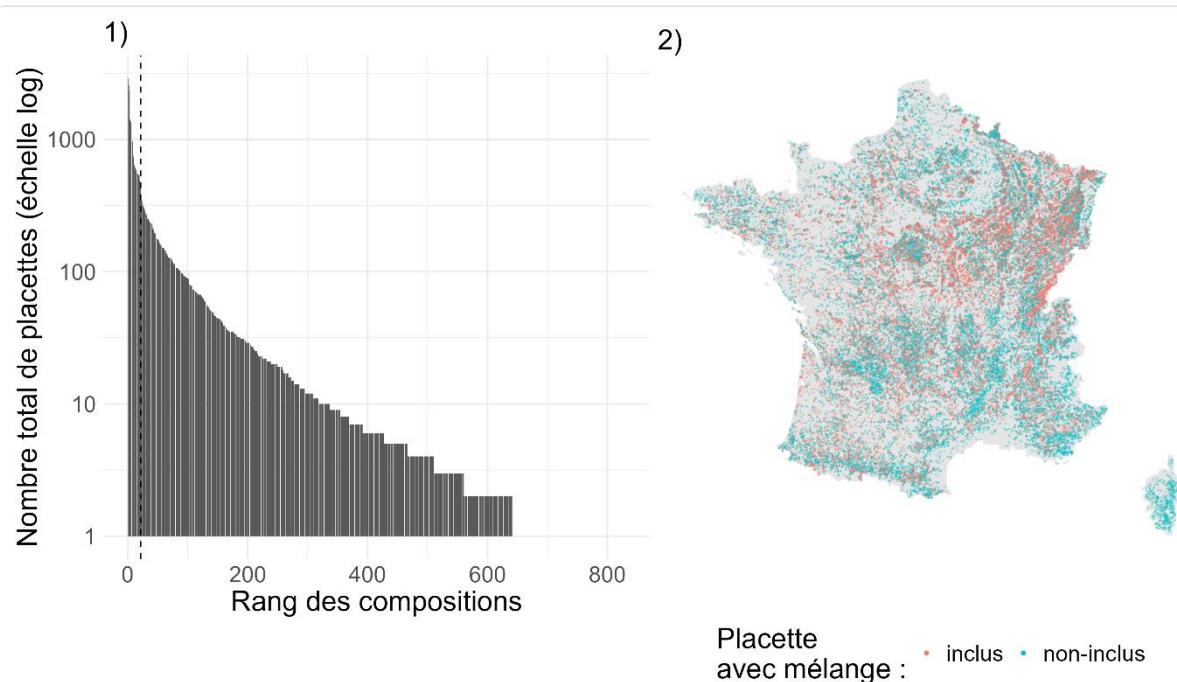


Figure 1: 1) Distribution du nombre de placettes selon le rang fréquentiel décroissant des compositions. La ligne pointillée indique la sélection des 21 mélanges les plus abondants, représentant ensemble un peu moins de 50% des placettes en mélanges. 2) Carte de la position des placettes en mélanges avec différenciation entre les placettes appartenant à un mélange inclus dans l'analyse (rouge) et les placettes appartenant à un mélange non inclus dans l'analyse (bleu).

Tableau 1 : Liste des 21 mélanges sélectionnés avec le nombre de placettes.

Composition	Nombre de placettes
Chêne pédonculé (Chê. ped.) / Charme (Cha.)	2732
Chêne rouvre (Chê. rou.) / Hêtre (Hêt.)	2461
Chêne rouvre (Chê. rou.) / Charme (Cha.)	2232
Chêne pédonculé (Chê. ped.) / Châtaignier (Châ.)	1360
Hêtre (Hêt.) / Sapin pectiné (Sap. pec.)	1265
Chêne pédonculé (Chê. ped.) / Chêne rouvre (Chê. rou.)	1033

Sapin pectiné (Sap. pec.) / Épicéa commun (Epi. com.)	1021
Chêne pédonculé (Chê. ped.) / Hêtre (Hêt.)	921
Chêne pédonculé (Chê. ped.) / Frêne (Frê.)	717
Chêne rouvre (Chê. rou.) / Châtaignier (Châ.)	683
Chêne pédonculé (Chê. ped.) / Bouleau (Bou.)	631
Chêne pubescent (Chê. pub.) / Pin sylvestre (Pin. syl.)	597
Chêne pubescent (Chê. pub.) / Chêne vert (Chê. ver.)	581
Hêtre (Hêt.) / Charme (Cha.)	552
Chêne pédonculé (Chê. ped.) / Chêne pubescent (Chê. pub.)	535
Chêne pubescent (Chê. pub.) / Petit érable (Pet. éra.)	520
Hêtre (Hêt.) / Pin sylvestre (Pin. syl.)	516
Hêtre (Hêt.) / Épicéa commun (Epi. com.)	514
Chêne rouvre (Chê. rou.) / Pin sylvestre (Pin. syl.)	511
Chêne pédonculé (Chê. ped.) / Pin maritime (Pin. mar.)	466
Chêne pédonculé (Chê. ped.) / Pin sylvestre (Pin. syl.)	416

3.4 Variables écologiques et dendrométriques

La croissance est affectée par de nombreux facteurs variables dans le temps, qui relèvent des conditions stationnelles, mais aussi des caractéristiques dendrométriques des peuplements (densité d'arbres, degré de maturité, structure du peuplement). Pour une analyse temporelle, il s'y ajoute par ailleurs l'effet indirect mais non directionnel de variations d'échantillonnage, et, à grande échelle, les tendances de large échelle de certains des facteurs précédents (p.ex. maturation des forêts françaises) qui renforcent le besoin de les contrôler.

Afin de contrôler ces facteurs, un ensemble de variables associées aux placettes d'inventaires ont été rassemblées : (i) des normales climatiques, obtenues sur la plateforme Silvae

(https://silvae.agroparistech.fr/home/?page_id=2683) : température moyenne annuelle,

température maximale estivale et précipitation annuelle cumulée calculée sur la période 1961 –

2020 ; (ii) des variables stationnelles estimées sur les placettes à partir des données collectées sur le

terrain : indices trophiques et hydriques bio-indiqués par la flore (Gégout et al., 2005), réserve utile

du sol et altitude ; (iii) variables dendrométriques estimées à partir des données collectées sur le

terrain : volume de bois à l'hectare, diamètre quadratique moyen (indice de maturation) et indice de

Gini des surfaces terrières individuelles, choisi pour capturer l'hétérogénéité de structure des peuplements (Cordonnier & Kunstler, 2015).

3.5 Données de référence

Pour toutes les variables explicatives une valeur de référence est définie afin d'estimer les variations inter-annuelles de croissance par rapport à des conditions fixées. Cette valeur de référence est la valeur moyenne prise sur l'ensemble des années considérées (2005-2023) pour toutes les variables, à l'exception du volume et du diamètre quadratique moyen, ces deux variables présentant une tendance à l'augmentation sur la période considérée. Dans ce cas, les valeurs de référence ont été choisies comme étant la moyenne observée sur le dernier cycle des données d'IFN départementaux (1987-2004).

3.6 Modélisation

La modélisation visant à estimer la productivité annuelle des peuplements est opérée en deux étapes.

La première étape consiste en la construction de forêt aléatoires distributionnelles multivariées (drf, (Cevic et al., 2022)) pour pondérer les observations en fonction de leur éloignement par rapport à des conditions de référence, et ainsi contrôler la variabilité spatiale climatique, stationnelle et dendrométrique qui pourrait affecter la productivité, et affecter les indicateurs de résilience face au changement climatique (équilibre de plan d'observation). Les forêts aléatoires distributionnelles sont une extension des forêts aléatoires (Cevic et al., 2022), visant à créer des partitions de l'espace des variables explicatives pour réduire la variance dans les variables réponses dans les partitions ainsi créées. A partir des arbres ajustés, il est possible d'estimer une pondération des placettes à partir de n'importe quel point dans l'espace des variables explicatives. Par exemple, des placettes ayant pour certaines années une croissance plus élevée du fait d'une réserve utile plus importante sont isolées dans une partie de l'espace et obtiendront une pondération faible du fait de leurs éloignement par rapport aux conditions moyennes observées. De façon additionnelle, nous avons procédé à une analyse de sensibilité des pondérations prédites par rapport à la paramétrisation de ces modèles. Un jeu de paramètres optimaux a été sélectionné suite à cette analyse. Un modèle de forêts distributionnelles a été estimé séparément pour chaque composition, monoculture et mélange, avec une pondération associée à chaque placette. Cette pondération issue de la modélisation est ensuite

multipliée aux poids statistiques des placettes d'inventaire. Ces poids statistiques prennent en compte l'effort d'échantillonnage variable des forêts françaises.

La deuxième étape consiste à utiliser les pondérations calculées pour estimer la croissance annuelle à partir d'un modèle linéaire pondéré séparément pour chaque composition. La productivité par année ainsi que l'incertitude associée sont estimées à partir de ce modèle. Ce modèle ne comprend aucun autre prédicteur. Les dynamiques temporelles estimées par le modèle linéaire pour les différentes compositions sont disponibles au téléchargement depuis (Hertzog, 2025).

3.7 Indicateurs

Cinq indicateurs de résilience sont calculés pour chaque mélange et monoculture à partir des estimations de variations interannuelles de croissance :

- Le nombre d'anomalies de croissance positives ou négatives (**Fig. 2.1**). Le calcul du nombre d'anomalies s'inspire de Schweingruber et al. (1990), la productivité annuelle estimée étant divisée par la productivité moyenne pendant la période de référence (pré 2005 et donc antérieur à la période étudiée). Si ce ratio est supérieur à 1.2 (augmentation de 20%) il s'agit d'une anomalie positive, à contrario si ce ratio est inférieur à 0.8 (déclin de 20%) il s'agit d'une anomalie négative. L'indicateur correspond au nombre d'années avec des anomalies positives ou négatives, un mélange plus résilient ayant un nombre d'anomalies positives plus élevé et un nombre d'anomalies négatives plus faible,
- La tendance temporelle linéaire (Forzieri et al., 2022) estimée à partir d'un modèle linéaire (**Fig. 2.2**). Une tendance plus négative indique une résilience plus faible,
- Un indice de stabilité quantifié par l'inverse du coefficient de variation (Tilman et al., 2006 et **Fig. 2.3**) calculé en divisant la moyenne interannuelle des productivités estimées par leur écart-type, une valeur plus élevée indiquant une dynamique plus stable. Il faut toutefois se garder de lui donner une interprétation trop qualitative, une faible stabilité pouvant traduire une capacité de réactivité de l'écosystème à des conditions temporelles favorables,
- La variabilité interannuelle autour de la tendance temporelle estimée comme la moyenne de la valeur absolue des résidus du modèle linéaire utilisé pour estimer la tendance (**Fig. 2.4**). Une variabilité importante autour de la tendance indique potentiellement une résilience plus faible.

La probabilité que la résilience des mélanges soit supérieure (ou inférieure) aux 2 monocultures associées est calculée pour chaque indicateur en utilisant une technique de rééchantillonnage par bootstrap. Les corrélations entre les 5 indicateurs sont également calculées afin d'étudier la redondance d'information entre indicateurs.

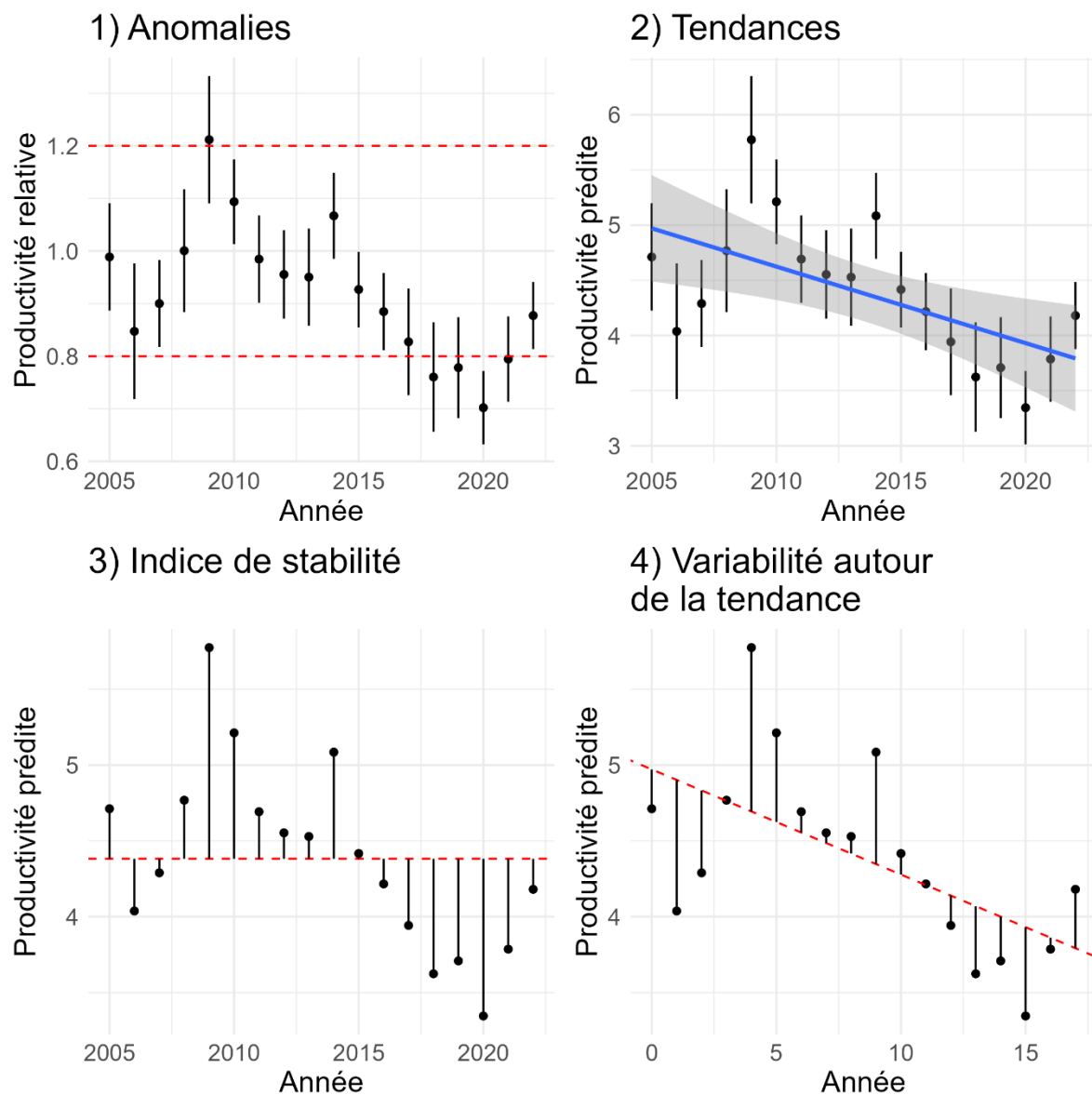


Figure 2: illustration des indicateurs de résilience estimés sur les séries temporelles de productivité prédite. 1) les anomalies excédant les seuils supérieur et inférieur de 20% sont dénombrées sur la période, 2) tendance temporelle moyenne sur la période, 3) indice de

stabilité calculée en rapportant la moyenne de productivité (rouge) à son écart-type (déviations) sur la période, 4) moyenne des anomalies absolues autour de la tendance.

4. Présentation des résultats

4.1 Modèles et importance des variables

Les modèles de forêts aléatoires distributionnelles estimés par composition ont un R^2 moyen de 0.52 avec un minimum à 0.34 pour le petit érable (*Acer campestre*, *opalus* ou *monspessulanum*) en monoculture et un maximum à 0.66 pour le pin sylvestre en monoculture. L'importance des variables incluses dans ces modèles fait apparaître trois groupes de variables (**Table 2**) : (i) les variables dendrométriques du peuplement (Volume, Diamètre quadratique moyen et indice de Gini) sont les plus importantes pour prédire les variations de productivité, (ii) les variables de conditions stationnelles (indice trophique et hydrique, réserve utile et altitude) ont des importances moyenne, et (iii) les variables climatiques (température et précipitation moyenne) ont les importances les plus faibles.

Tableau 2: Importance des variables incluses dans les modèles de forêts aléatoires distributionnelles. L'importance de chaque variable est estimée par composition et un rang est attribué allant de 1 pour la variable la plus importante à 10 pour la variable la moins importante. Les importances sont ensuite synthétisées pour l'ensemble des compositions par le rang médian, le rang minimum et le rang maximum, une valeur faible indiquant une importance plus importante sur les 35 compositions par rapport à une valeur plus élevée.

Prédicteurs	Rang médian	rang min.	rang max.
Volume	1	1	1
Diam. quad. moy.	2	2	8
Gini	4	2	8

Res. utile	5	3	10
Altitude	5	2	10
Ind. troph.	5.5	3	9
Ind. hydr.	6	2	10
Précipitations	7	3	10
Temp. max.	9	5	10
Temp. moy.	9	4	10

4.2 Comparaison globale mélanges-monocultures

En moyenne, les mélanges et les monocultures étudiés présentent des valeurs similaires pour le nombre d'anomalies négatives et la tendance temporelle linéaire (**Figure 3**). Une variance trois fois plus élevée des tendances est observée pour les monocultures comparées aux mélanges ($2.56e-3$ vs $0.77e-3$), en d'autres termes, les monocultures présentent des tendances plus extrêmes (positives comme négatives) quand les mélanges présentent des tendances plus ramassées autour de zéro. Ce patron est dû à 3 monocultures ayant des tendances extrêmes : le petit érable, le pin maritime et l'épicéa commun. Les mélanges présentent en moyenne des dynamiques de productivité plus stable (Mann-Whitney U-test, $p = 0.03$) et avec une variabilité autour de la tendance plus faible (Mann-Whitney U-test, $p = 0.17$). Les monocultures ont, en moyenne, un nombre d'anomalies positives plus important que les mélanges (+70%). Ce patron est dû à 3 monocultures ayant un nombre important d'anomalies positives : le bouleau, le petit érable et le pin maritime.

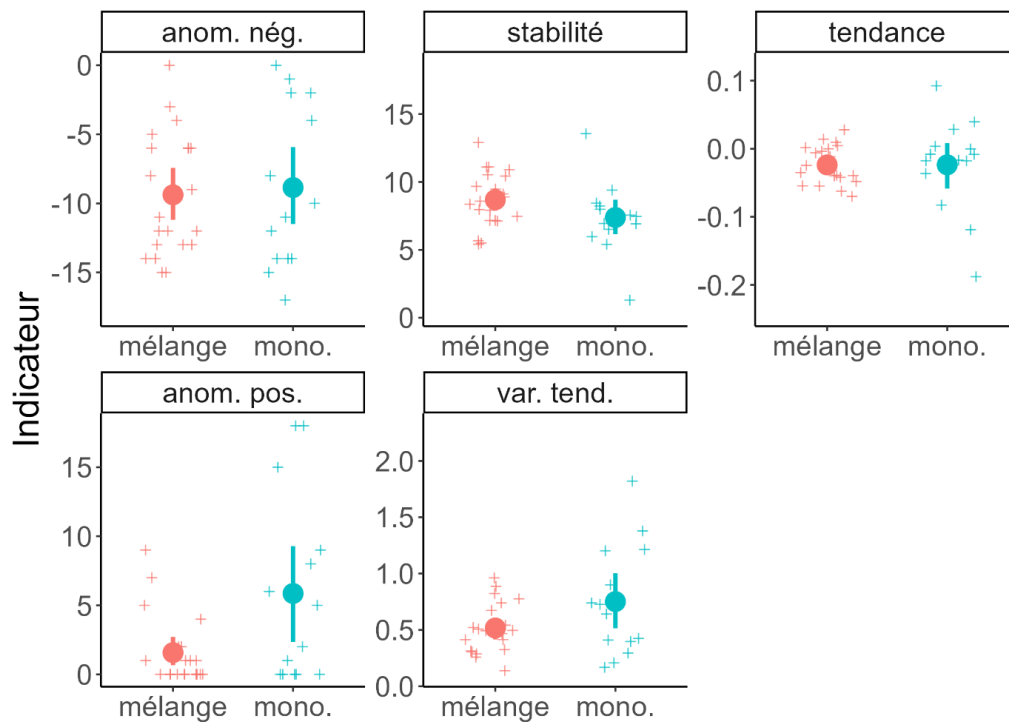


Figure 3: Valeurs des indicateurs obtenus à partir des dynamiques temporelles de productivité pour les peuplements en mélanges ($n=21$) et les monocultures ($n=14$). Les croix indiquent les valeurs pour les différentes compositions avec en superposition la moyenne (point) et l'intervalle de confiance.

4.3 Corrélation entre indicateurs, taille d'échantillon et R^2

Les corrélations entre les indicateurs d'un côté et la taille d'échantillon et le coefficient R^2 des modèles de forêts aléatoires de l'autre permettent de vérifier la sensibilité des indicateurs aux tailles d'échantillon ainsi qu'à la qualité du modèle. Les corrélations entre les indicateurs et la taille d'échantillon ne sont jamais significatives, ce qui confirme que la sélection de mélanges étudiées n'est pas sensible aux effectifs malgré leur variabilité. De même l'absence de corrélation entre le R^2 des modèles et les indicateurs indiquent qu'aucun indicateur n'est dépendant de la qualité des modèles. Les coefficients de corrélations entre indicateurs permettent de révéler des groupes d'indicateurs quantifiant le même aspect de la dynamique temporelle. Les corrélations entre indicateurs varient de -0.53 pour le couple nombre d'anomalie positives – indice de stabilité, à 0.78 pour le couple nombre d'anomalie positives – variabilité autour de la tendance (**Figure 4**). Des corrélations significatives (au seuil de 0.05) sont observées pour les couples d'indicateurs suivants : nombre d'anomalie positives – négatives, nombre d'anomalie négatives – indice de stabilité, nombre d'anomalie positives – indice de stabilité, nombre d'anomalie positives – variabilité autour de la tendance, variabilité autour de la tendance – indice de stabilité.

4.4 Comparaison par triplet mélanges-monocultures

La probabilité qu'un mélange présente une résilience supérieure aux 2 monocultures associées pour les 5 indicateurs suivis est présentée sur la **Figure 5**, et la probabilité réciproque est présentée en **Figure 6**. En premier lieu, aucun mélange ne présente une résilience supérieure ou inférieure aux monocultures sur les 5 indicateurs suivis. Onze des 21 mélanges suivis présentent une résilience supérieure aux 2 monocultures associées sur au moins un des indicateurs. Le même nombre de mélanges présente une résilience inférieure aux 2 monocultures associées sur au moins un des indicateurs. Le **Tableau 3** présente les mélanges ayant un nombre donné d'indicateurs de résilience supérieurs ou inférieurs aux deux monocultures associées. Six mélanges sont plus résilients sur au moins un des indicateurs et moins résilients sur aucun. Le contraire est également observé avec 6 mélanges moins résilients sur au moins un indicateur et plus résilients sur aucun. Cinq mélanges sont plus résilients sur certains indicateurs mais moins résilients sur d'autres. Enfin quatre mélanges ne sont ni inférieurs ni supérieurs aux monocultures sur les indicateurs suivis. Les mélanges n'ont pas de manière générale une résilience supérieure aux monocultures associées sur les indicateurs calculés.

Tableau 3: Tableau croisé des mélanges étant supérieurs ou inférieurs aux monocultures associées pour un nombre donné d'indicateurs (abréviation ind.). Par exemple, 3 mélanges sont supérieurs aux monocultures associées pour un indicateur et inférieur aux monocultures associées pour aucun indicateur. Les lignes ou colonnes non indiquées ne contiennent aucun mélange (p.ex. aucun mélange inférieur aux monocultures sur 3 indicateurs).

	Mix < Monos : 0 ind.	Mix < Monos : 1 ind.	Mix < Monos : 2 ind.
Mix > Monos : 0 ind.	Chêne pédonculé – Bouleau, Chêne pédonculé – Frêne, Chêne pubescent – Petit érable, Hêtre - Sapin	Chêne pédonculé – Châtaigner, Chêne pédonculé – Chêne rouvre, Chêne rouvre – Charme, Chêne rouvre – Châtaigner, Hêtre - Charme	Chêne rouvre – Pin sylvestre

Mix > Monos : 1 ind.	Chêne pédonculé – Chêne pubescent, Chêne pédonculé – pin maritime, Hêtre – Epicéa	Chêne pédonculé – Pin sylvestre, Chêne rouvre - Hêtre	Hêtre – Pin sylvestre
Mix > Monos : 2 ind.	0	Chêne pubescent – Pin sylvestre	Chêne pédonculé – Hêtre
Mix > Monos : 3 ind.	Chêne pédonculé – Charme, Chêne pubescent – Chêne vert, Sapin - Epicéa	0	0

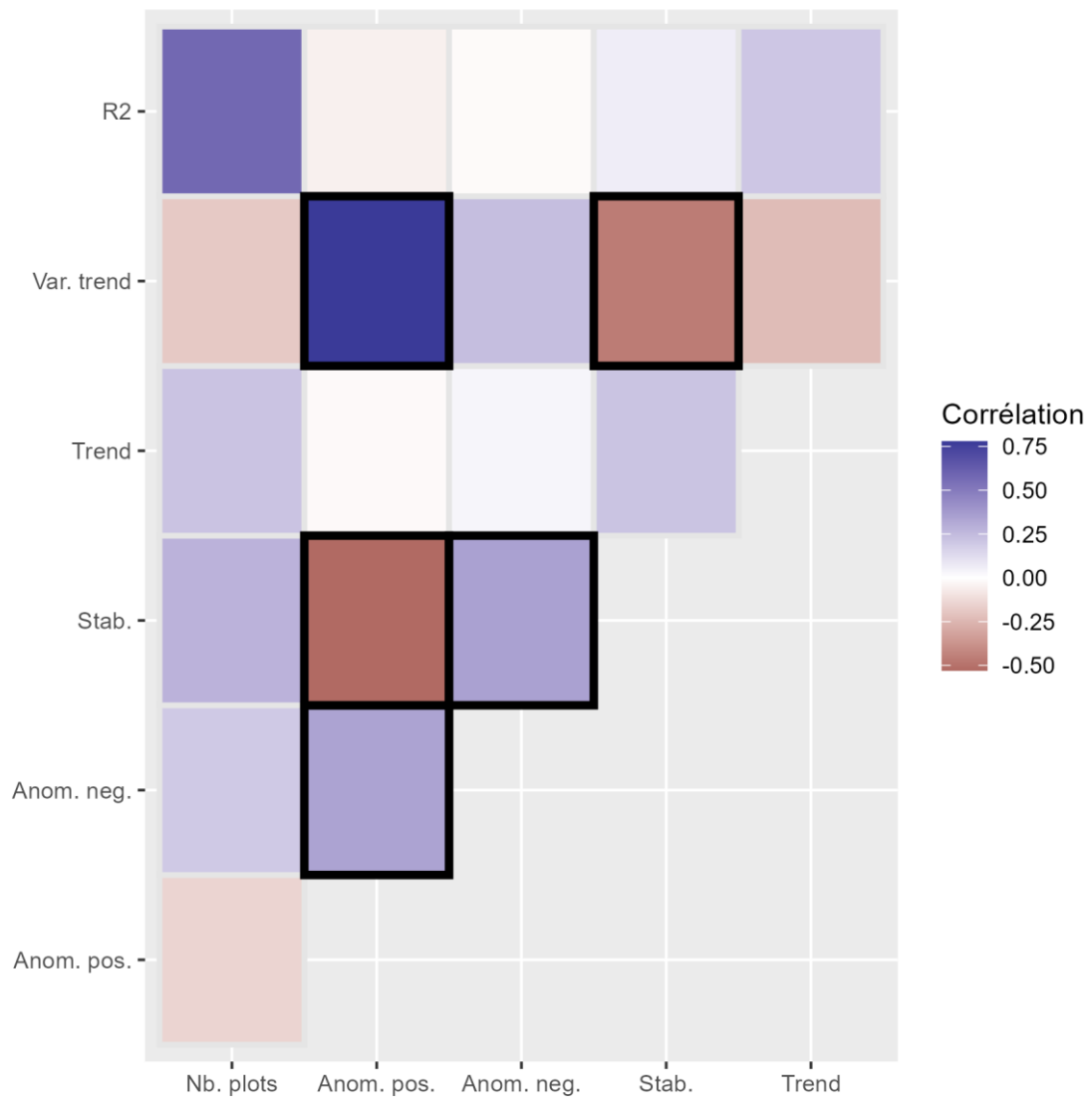


Figure 4: Corrélation de Pearson entre les indicateurs, les R^2 des modèles de forêt aléatoires et la taille d'échantillon. Les corrélations surlignées en noir ont une p -valeur inférieure à 0.05.

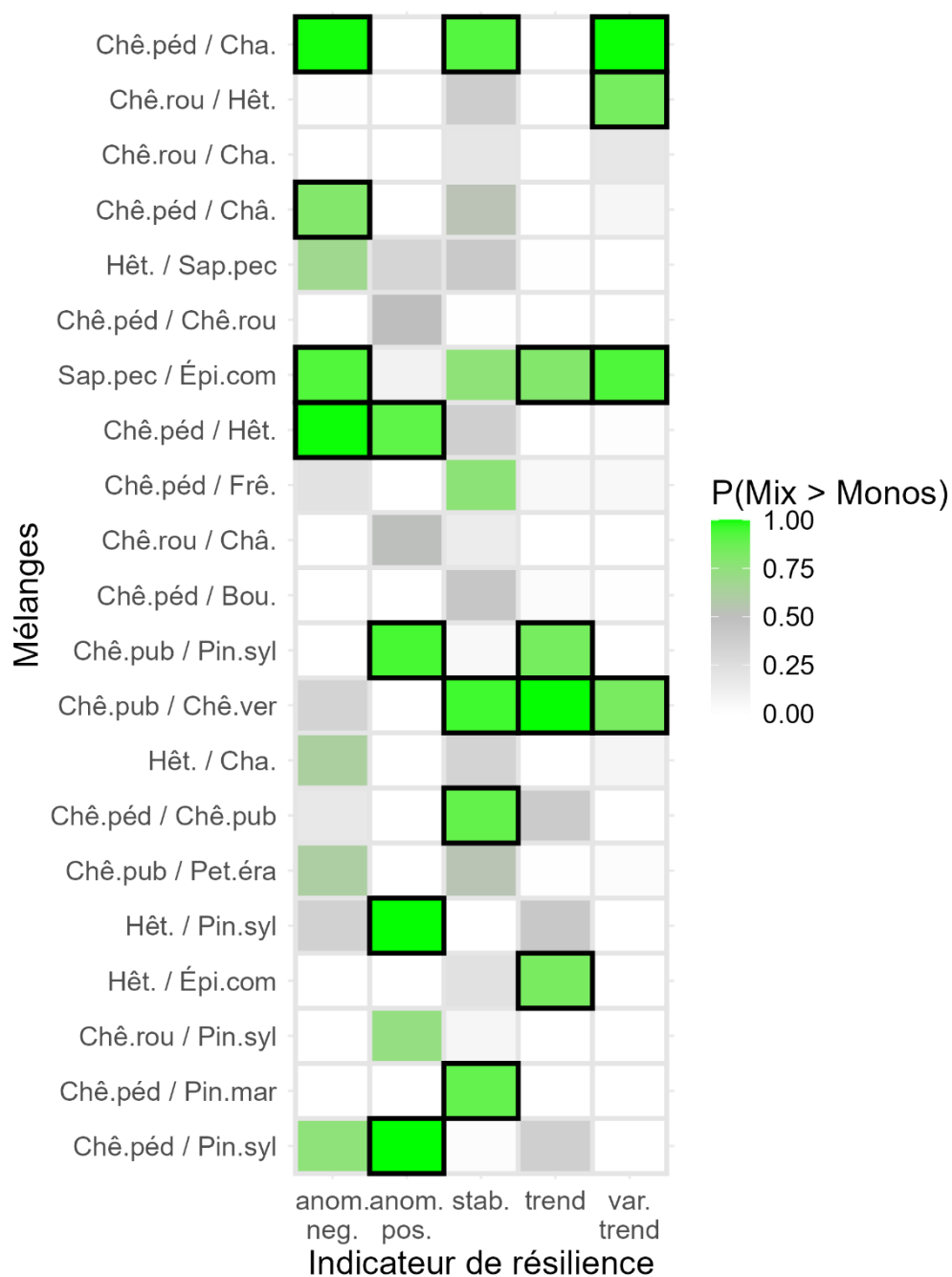


Figure 5: Probabilité que le mélange soit plus résilient que les 2 monocultures associées pour les différents indicateurs considérés. Les mélanges sont ordonnés par abondance (de bas en haut du moins abondant au plus abondant). Pour les indicateurs suivants le mélange est plus résilient quand la valeur de l'indicateur est supérieure aux deux monocultures : anomalie positive, stabilité et tendance. A l'inverse, le mélange est plus résilient quand la valeur de l'indicateur est inférieure aux deux monocultures pour les anomalies négatives et la variabilité autour de la tendance. Une probabilité supérieure à 0.8 est indiquée par un surlignage en noir. Voir Tableau 1 pour retrouver le nom complet des essences.

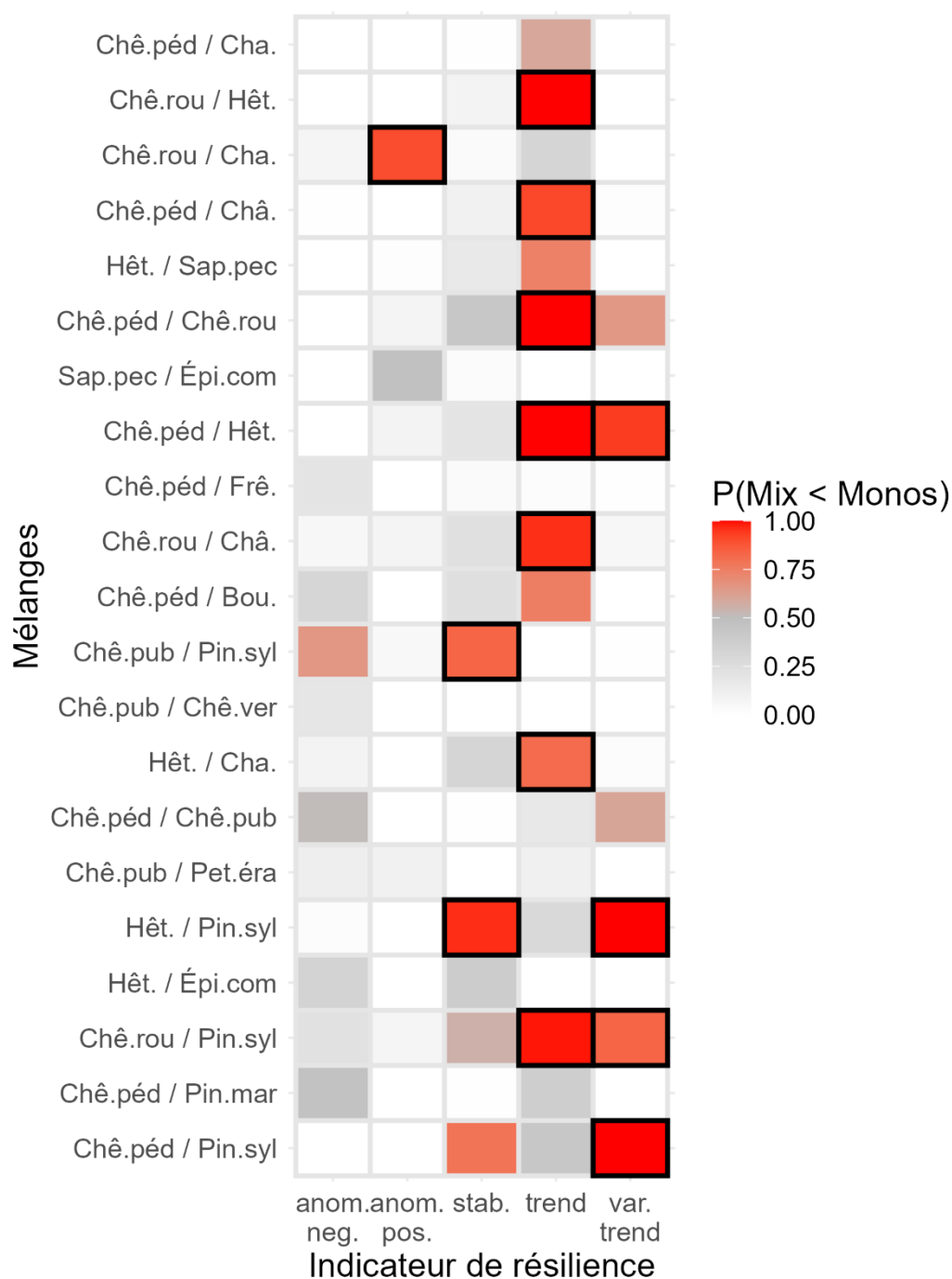


Figure 6: Probabilité que le mélange soit moins résilient que les 2 monocultures associées pour les différents indicateurs considérés. Les mélanges sont ordonnés par abondance (de bas en haut du moins abondant au plus abondant). Pour les indicateurs suivants le mélange est moins résilient quand la valeur de l'indicateur est inférieure aux deux monocultures : anomalie positive, stabilité et tendance. A l'inverse, le mélange est moins résilient quand la valeur de l'indicateur est supérieure aux deux monocultures pour les anomalies négatives et la variabilité autour de la tendance. Une probabilité supérieure à 0.8 est indiquée par un surlignage en noir.

5. Conclusion et perspectives

- La diversification ou l'entretien de la diversité des peuplements forestiers constitue un des leviers d'adaptation aux changements climatiques pour assurer la résilience des services écosystémiques rendus par les forêts. Cette étude, fondée sur les données systématiques et représentatives de l'Inventaire forestier national, met en évidence une variabilité dans les résultats de la comparaison entre les 21 mélanges étudiés et les monocultures associées en termes de résilience de la productivité. Le mélange d'essence n'apparaît donc pas comme étant un levier d'action sylvicole menant systématiquement à une plus grande résilience de la productivité des peuplements forestiers face aux changements climatiques. Ce résultat peut résulter de l'échelle à laquelle l'observation est menée, de première importance pour la gestion des territoires forestiers, et ne reflétant pas spécialement d'autres échelles plus spécifiques d'étude des mélanges (p.ex. Grossiord et al., 2014; Lebourgeois et al., 2013; Vanhellefont et al., 2019)
- Les résultats issus des modélisations indiquent aussi l'importance de variables contrôlables par des actions sylvicoles (stock, maturité et structure du peuplement, voir **Tableau 2**) sur la productivité, constituant autant de leviers d'action sylvicole potentiels au-delà de la gestion de la composition via la diversification des essences en présence.
- L'absence de généricité de résilience supérieure des mélanges s'entend ici strictement sur la productivité, alors que la résilience des écosystèmes forestiers peut être appréhendée de manière multifactorielle (mortalité des arbres, infestations de ravageurs, biodiversité ...), et décrire le maintien fonctionnel d'un écosystème.
- Enfin, dans le contexte des changements climatiques, le cadre conceptuel de la résilience — fondé sur des perturbations ponctuelles et mesurant le retour à des niveaux de productivité ou de mortalité antérieurs — mérite d'être redéfini. D'autres

cadres existent (par exemple (Nagel et al., 2017) définissant un gradient d'approches possibles allant d'actions de gestion visant à maximiser la résistance, jusqu'à des actions accompagnant la transition des peuplements.

6. Synthèse des sujets pour lesquels des études ou recherches complémentaires seraient nécessaires

Le projet Morning a ouvert de nombreuses avenues d'études ou recherche futures sur le thème de la résilience des peuplements mélangés.

Tout d'abord le set d'indicateur retenu dans le cadre du projet pourrait être étendu. Par exemple, les indicateurs d'anomalies de croissance sont calculés indépendamment sur les mélanges et les monocultures associées. De nouveaux indicateurs prenant en compte la covariation des anomalies entre mélanges et monocultures associées pourraient être pertinent pour quantifier la réaction des mélanges sur des années anormales pour les monocultures. Une autre avenue potentielle pourrait être la mesure de l'autocorrélation des séries temporelles, Scheffer et al. (2009) démontre qu'une augmentation de coefficient d'autocorrélation est lié à des changements critiques dans le fonctionnement des écosystèmes.

Ensuite ce projet s'est focalisé sur les 21 mélanges les plus communs présents dans les données de l'inventaire forestier national. Une extension vers un plus grand nombre de mélange, notamment vers des mélanges présents dans le sud-est de la France et en Corse, actuellement peut représenter, pourrait offrir une vue plus complète de la problématique. L'ajout de nouveaux mélanges devra être réalisé en contrôlant le lien entre taille d'échantillon et valeurs des indicateurs, une corrélation significative entre ces éléments indiquant un effet de confusion entre nombre de placette et valeurs des indicateurs potentiellement dû à une inclusion de mélange avec des tailles d'échantillon trop faible.

Ce projet s'est concentré sur la résilience de la croissance des ligneux comme unique variable d'intérêt pour quantifier la résilience des écosystèmes forestier. De nombreuses autres variables pourraient être ajoutée, notamment la mortalité, la régénération ou le taux de couvert afin de créer une vision multi-dimensionnelle de la résilience des forêts.

De manière plus fondamentale, des études sur la formalisation de nouveaux cadres conceptuels et indicateurs sur la résilience face aux changements climatiques mériterait d'être poursuivi. Le cadre proposé par Nagel et al. (2017) basé sur un gradient allant de la résistance à la transition pose de premières bases pour ces développements.

7. Référence bibliographique

[todo]

Annexe

8. Analyse questionnaire

8.1. Contexte

Dans le cadre du projet Morning financé par le RMT Aforce visant à définir un cadre de monitoring de la résilience des peuplements mélangés, nous avons voulu interroger la communauté Aforce sur leurs perceptions des mélanges et les enjeux associés à leur gestion. Le questionnaire comprenait 24 questions en 5 sections : (i) informations générales sur le répondant, (ii) Connaissances actuelles, (iii) Besoin en connaissance et transfert, (iv) Perturbation et gestion de la composition et (v) Perspectives futures. Le questionnaire a été diffusé via la base mail du RMT Aforce le 29/01 et 26/02/2025. L'analyse a été effectuée sur les réponses obtenues au 01/04/2025.

8.2. Section 1 - Données générales

34 réponses ont été récoltées, constituant un échantillon de petite taille mais permettant tout de même de dégager en première instance des informations qui seront à confirmer par la suite. La durée médiane de réponse au questionnaire était de 12min soit 30 secondes par questions. 2 répondants ont pris plus de 50min pour remplir le questionnaire, potentiellement n'ayant pas répondu à toutes les questions d'un seul tenant. 1 répondant a pris moins d'une minute pour répondre. Parmi les profils des répondants, 14 avaient un profil orienté recherche et R&D, 13 avait un profil lié à la gestion forestière, 4 étaient du monde de l'enseignement, 2 du monde politique (collectivité, ministère ...) et un n'a pas donné de réponse. Le pool de répondant est donc équilibré entre acteur de la gestion et acteur de la R&D. En termes de région d'activité 5 participants ont indiqué être actifs sur tout le territoire, les autres participants étaient actifs sur les différentes régions du territoire à l'exception de la Bretagne. Autre aspect surprenant : 1 seul répondant a déclaré être

actif en Nouvelle -Aquitaine malgré la forte couverture forestière dans cette région. Cela indique soit que le questionnaire n’a pas percolé parmi les acteurs de cette région, soit que les questions autour de la résilience des peuplements mélangés n’éveillent pas d’intérêts particuliers parmi ces acteurs.

La dernière question de cette section posait a question ouverte suivante : « A votre sens, quels sont les peuplements forestiers types en termes de composition et de structure d’âge sur lesquels les enjeux d’adaptation sont les plus manifestes ? », 30 réponses ont été obtenues, pointant des contextes variés synthétisés dans le tableau suivant. Ces réponses mettent en avant que les enjeux d’adaptations sont d’abord appréhendé sur les peuplements monospécifiques, mais pointent également les incertitudes existantes sur les mélanges, notamment dû au peu de retour d’expérience disponible. Ces réponses pointent également l’interaction entre composition et structure, 7 des 30 réponses mentionnent l’importance de la structure sur la résilience face au changement climatique.

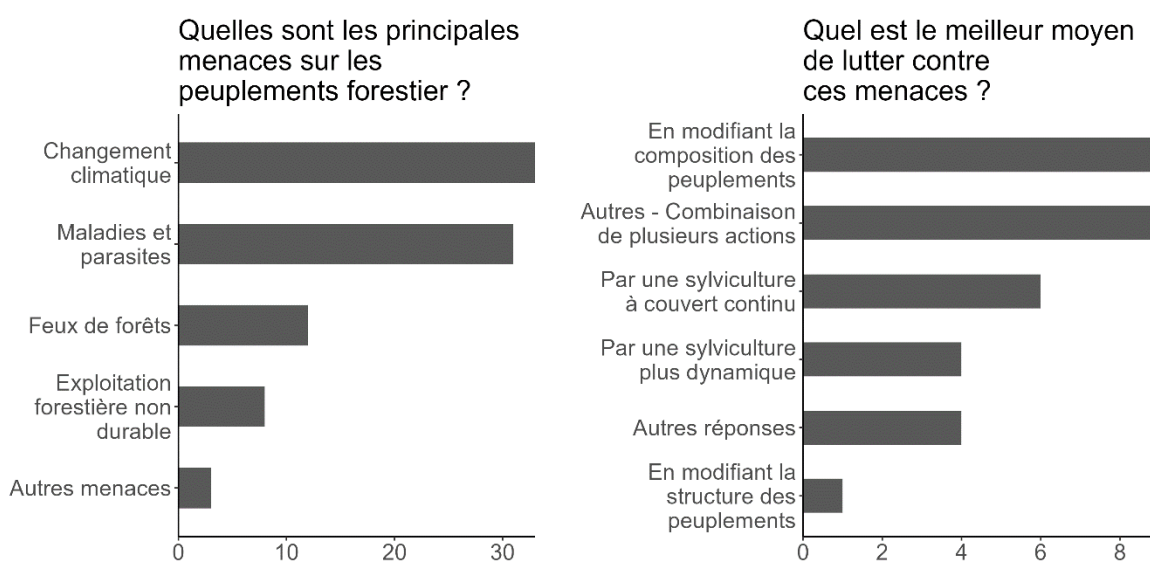
TYPE DE PEUPLEMENT	COMPOSITION	STRUCTURE	ENJEUX D’ADAPTATION IDENTIFIES
MONOSPECIFIQUES RESINEUX PURS (PESSIERES, SAPINIERES, ETC.)	1 seule essence (épicéa, sapin, pin...)	Régulière, souvent dense	Très forte vulnérabilité : dépérissements, stress hydrique, bioagresseurs, hors station
MONOSPECIFIQUES FEUILLUS PURS (HETRAIES, CHENAIES, ETC.)	Hêtre, chêne pédonculé, châtaignier...	Régulière ou irrégulière	Sensibilité au changement climatique, surtout si en limite écologique
PLANTATIONS REGULIERES ANCIENNES	Souvent monospécifiques	Régulière	Héritage de pratiques passées, faible

			résilience, structure peu complexe
PEUPLEMENTS JEUNES REGULIERS	Hêtre, pin sylvestre, etc.	Jeunes, homogènes	Risque de perte de production à moyen terme, faible plasticité écologique
MELANGES CLASSIQUES	Chêne/hêtre, pin/chêne, hêtre/sapin...	Variable	Plus résilients, mais incertitude sur comportement à long terme
MELANGES RARES OU MULTI-ESSENCES (≥ 4 ESPECES)	Diversité élevée	Variable	Potentiel fort de résilience, mais peu d'expériences ou références disponibles
PEUPLEMENTS EN MOSAÏQUE PAYSAGERE	Ilots d'essences différents	Hétérogène	Bonne résilience attendue via compartimentation spatiale
PEUPLEMENTS A STRUCTURE COMPLEXE (FUTAIE JARDINEE, SMCC...)	Mélangés	Âges et hauteurs variés	Favorisent le microclimat, retardent les effets du changement climatique
PEUPLEMENTS EN LIMITE DE STATION ECOLOGIQUE	Localement autochtones mais vulnérables	Divers	Risque élevé de dépérissement, dépend de la capacité d'adaptation individuelle
PEUPLEMENTS MEDITERRANEENS	Autochtones mais soumis à sécheresse	Variable	Fortement concernés par le changement climatique
PEUPLEMENTS MATURES (50-100 ANS)	Divers ou purs	En phase avant l'exploitabilité	Exposés à de fortes pressions climatiques sans possibilité immédiate de régénération

7.2 Section 2 – connaissances actuelles

La première question de cette section demandait les menaces identifiées sur les régions d'exercices des répondants, la liste contenait les menaces suivantes (plusieurs réponses étaient possibles) : (i) changements climatiques, (ii) Maladies et parasites, (iii) Feux de forêts, (iv) exploitation non durable, (v) autres menaces. Les répondants pouvaient sélectionner une ou plusieurs réponses. Un total de 87 menaces a été sélectionné, donc en moyenne 2.5 menaces par réponses. La figure ci-dessous reprend le nombre de fois que chaque menace a été sélectionné. Ces réponses montrent que les deux menaces principales identifiées sont le changement climatique et les maladies / parasites. 15 des 34 réponses reprenaient également la combinaison de ces deux menaces.

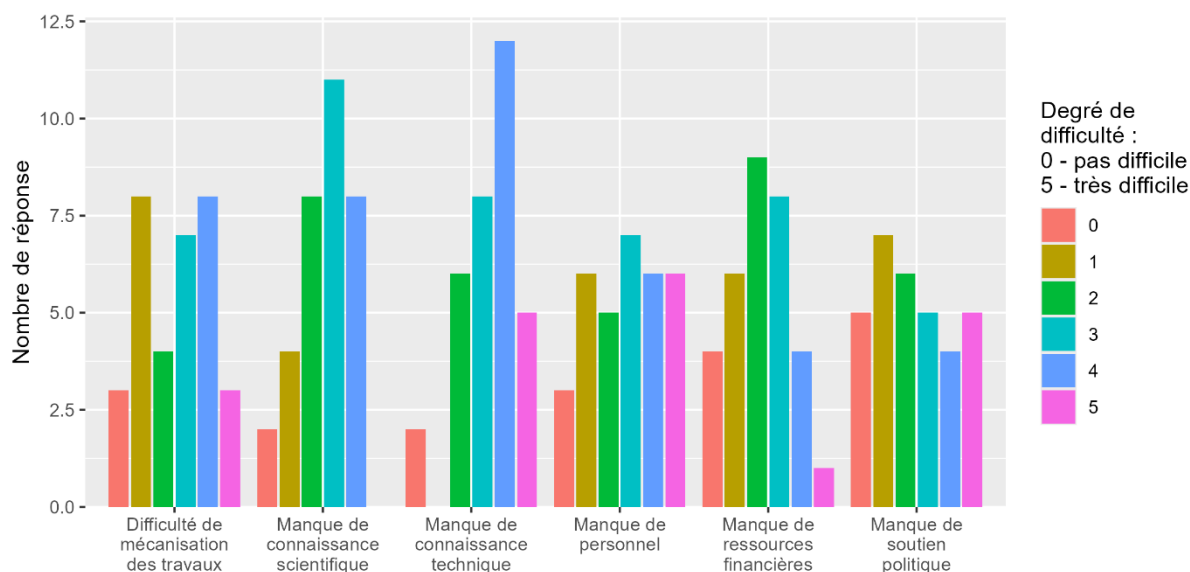
La seconde question demandait le meilleur moyen de lutter contre les menaces identifiées dans la question précédente, les options données étaient : (i) en modifiant la composition des peuplements, (ii) en modifiant la structure des peuplements, (iii) par une sylviculture à couvert continu, (iv) par une sylviculture plus dynamique, (v) autres (avec demande de précision si sélectionner), une seule réponse était possible. La majorité des répondants (13) ont sélectionné la réponse autres, et dans la précision (texte libre), 9 ont mentionné le besoin de combinaison de différentes actions. Les autres options qui ont été retenues sont la modification de la composition du peuplement (9 réponses) et la sylviculture en couvert continu (6 réponses).



La question suivante demandait d'identifier l'avantage principal des peuplements mélangés par rapport aux monocultures, parmi les options suivantes (une seule réponse possible) : (i) résilience accrue, (ii) support de la biodiversité, (iii) productivité plus importante, (iv) meilleure résistance aux maladies, (v) autres (précision en texte libre). La majorité des réponses (18) étaient résilience accrue, suivis d'autres (7 réponses dont 2 mentionnant une combinaison d'avantage), de meilleure résistance aux maladies (5) et support de la biodiversité (3). Il est intéressant de noter la forte proportion de réponse sur la résilience accrue des mélanges, alors que très peu de réponse mentionne le support de la biodiversité et aucune les effets positifs du mélange sur la productivité. Cela est potentiellement dû au profil « forêt » des répondants.

La question suivante demandait l'inconvénient majeur des mélanges par rapport aux monocultures. Les options données étaient (une seule réponse possible) : (i) complexité de gestion sylvicole, (ii) difficulté à cibler les espèces d'avenir, (iii) manque de guide de gestion, (iv) recours à des essences exotiques, (v) autres (avec demande de précision). La majorité des répondants (14) ont sélectionné la complexité de gestion, suivis de manque de connaissance (7), de la difficulté de choisir les espèces à cibler (4), d'une combinaison de facteurs (3) et d'inconvénients d'ordre économique. Le frein à la diversification des peuplements forestier apparaît donc d'abord lié à la complexité de la gestion de ces peuplements.

La dernière question de cette section demandait de noter de 0 (pas difficile) à 5 (très difficile) différentes contraintes liées à la gestion des peuplements mélangés. Les degrés de difficultés attribués aux différents items est présenté dans la figure ci-dessous. Le manque de connaissance technique apparaît comme une difficulté importante dans la gestion de peuplement mélangé, mais également le manque de connaissance scientifique. Les réponses aux autres questions montrent une grande divergence dans les degrés des difficultés, par exemple à l'item « Difficulté de mécanisation des travaux », 8 participants ont indiqué une difficulté de 1 (peu difficile) et 8 ont indiqué une difficulté de 4 (difficile). Ces divergences peuvent être dû à des contextes d'intervention différents des répondants. Séparer les réponses en fonction de la profession révèle également que les répondants chercheurs donnent des difficultés plus importantes aux manques de connaissances techniques et scientifiques que les répondants gestionnaires. Les répondants gestionnaires pointant plus souvent le manque de soutien politique.

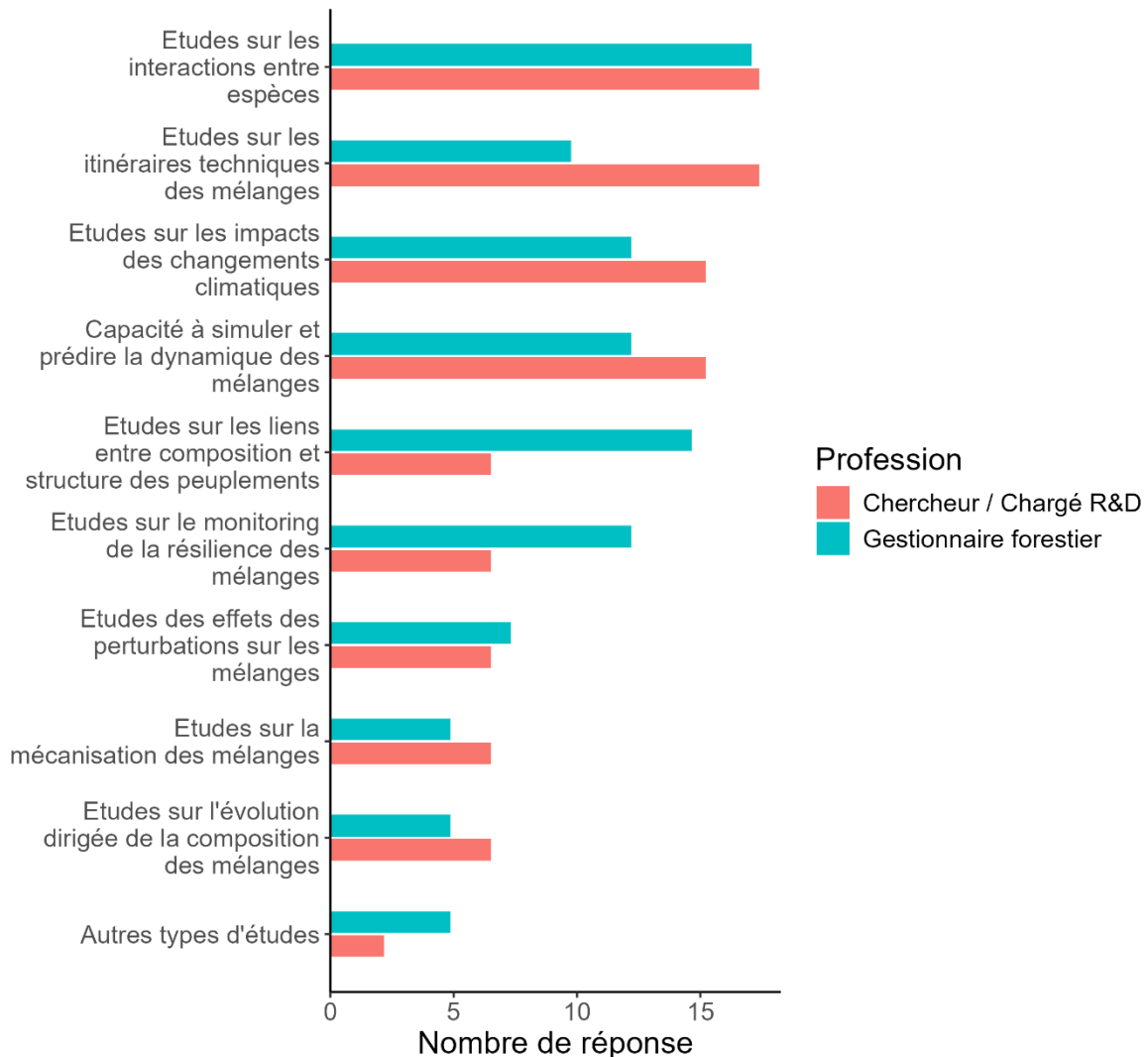


7.3 Section 3 – Besoin en connaissances

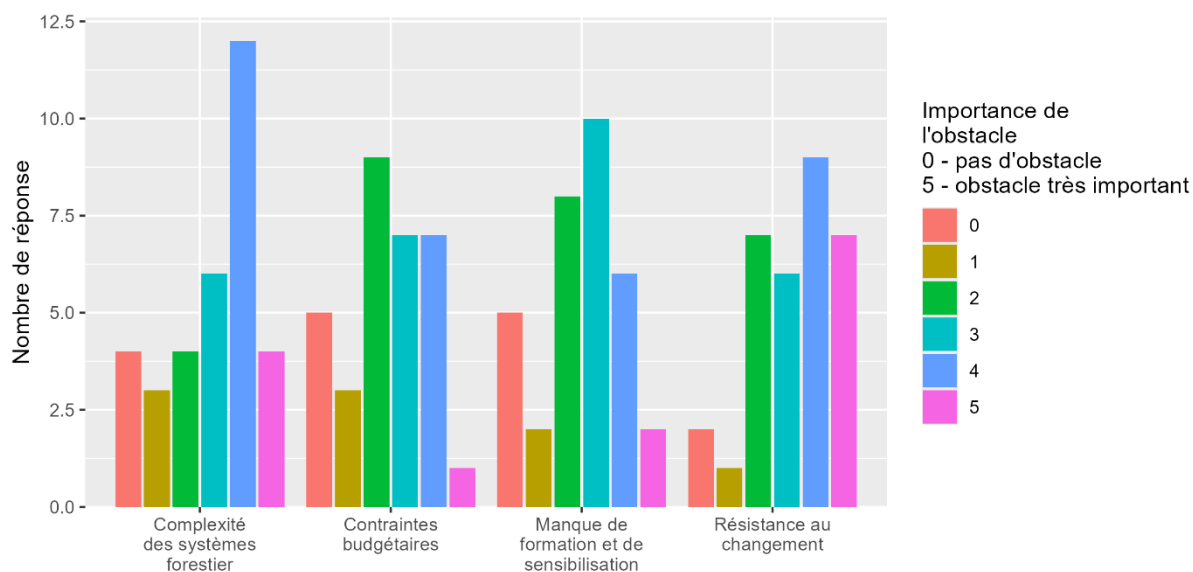
La première question de cette section demandait d'évaluer (sur une échelle de 1 à 5) la qualité de l'accès aux connaissances scientifiques sur la gestion des peuplements mélangés. La moyenne des réponses est de 3, les répondants évaluent l'accessibilité aux connaissances scientifiques sur les mélanges comme étant moyenne.

La question suivante demandait quel type d'études sont le plus nécessaires pour combler les manques de connaissances actuelles sur les mélanges (plusieurs réponses possibles). Les résultats sont présentés dans la figure ci-dessous par profession. En moyenne chaque répondant a sélectionné 3.7 types d'étude. De manière intéressante le type d'étude sortant en tête est l'étude des interactions entre espèce. De plus, les chercheurs identifient plus souvent le besoin d'études sur les itinéraires techniques des mélanges que les gestionnaires. A contrario, les gestionnaires sont plus nombreux à demander des études sur le monitoring de la résilience et les liens composition / structure.

Quels types d'études pensez-vous être les plus nécessaires pour combler les manques de connaissances actuelles ?



La dernière question de cette section demandait d'évaluer de 0 (pas d'obstacles) à 5 (obstacles très important) 4 obstacles potentiels à la mise en œuvre des connaissances scientifique dans la gestion des mélanges. Les obstacles les plus importants identifiés sont la complexité des systèmes forestier et la résistance au changement. Pour ce dernier item, les réponses étaient divergentes, 7 répondants donnant la note maximale quand 7 aussi ont donné une note basse. Ces divergences proviennent en partie du profil des répondants, les répondants chercheurs donnant un score plus faible à l'importance de cet obstacle que les profils gestionnaires. Le manque de formation et les contraintes budgétaires apparaissent comme des obstacles moins importants au transfert de connaissances scientifique vers la gestion des mélanges.



7.4 Section 4 – Perturbation et gestion de la composition

La première question de cette section demandait comment est envisagé la gestion de la perte d'une essence dans un mélange, les options possibles étaient (une seule réponse possible) : (i) Acceptation temporaire de la monoculture avec un plan de diversification à long terme, (ii) Adaptation des pratiques de gestion pour favoriser la régénération naturelle, (iii) Replantation immédiate d'autres espèces choisies pour leur meilleure adaptation au climat futur, (iv) autres avec demande de précision, (v) sans opinion. 10 répondants ont choisi l'option lié à la régénération naturelle, 9 l'option d'enrichissement par replantation, 8 l'option d'acceptation temporaire de la monoculture avec plan de diversification, 5 mentionnent la combinaison de différentes approches, 1 donne une réponse autres et 2 sont sans opinion. Ces résultats montrent une divergence avec un nombre égal de répondant sélectionnant d'un côté une approche basé sur la régénération existante et de l'autre une approche basée sur enrichissement pour retrouver une composition désirée. L'acceptation temporaire de la monoculture est également sélectionnée par un nombre conséquent de répondant, faisant apparaitre que le mélange n'est pas toujours un objectif prépondérant dans la gestion des peuplements.

La question suivante demandait d'évaluer la résilience d'un mélange qui se retrouve en monoculture suite à une perturbation sur une échelle de 1 (peu résilient) à 5 (très résilient). La majorité des répondants (21) ont évaluer la résilience d'un tel peuplement comme peu résilient (score 1 ou 2), quant 2 répondants ont attribué un score de 5. Les répondants évaluent donc la résilience d'un mélange perdant une essence suite à une perturbation comme étant peu résilient. La résilience est

donc perçue par les acteurs comme une capacité d'abord liée à la diversité du peuplement (plus d'une essence en présence), et justifierais donc les actions de gestion pour rétablir le mélange suite à une perturbation.

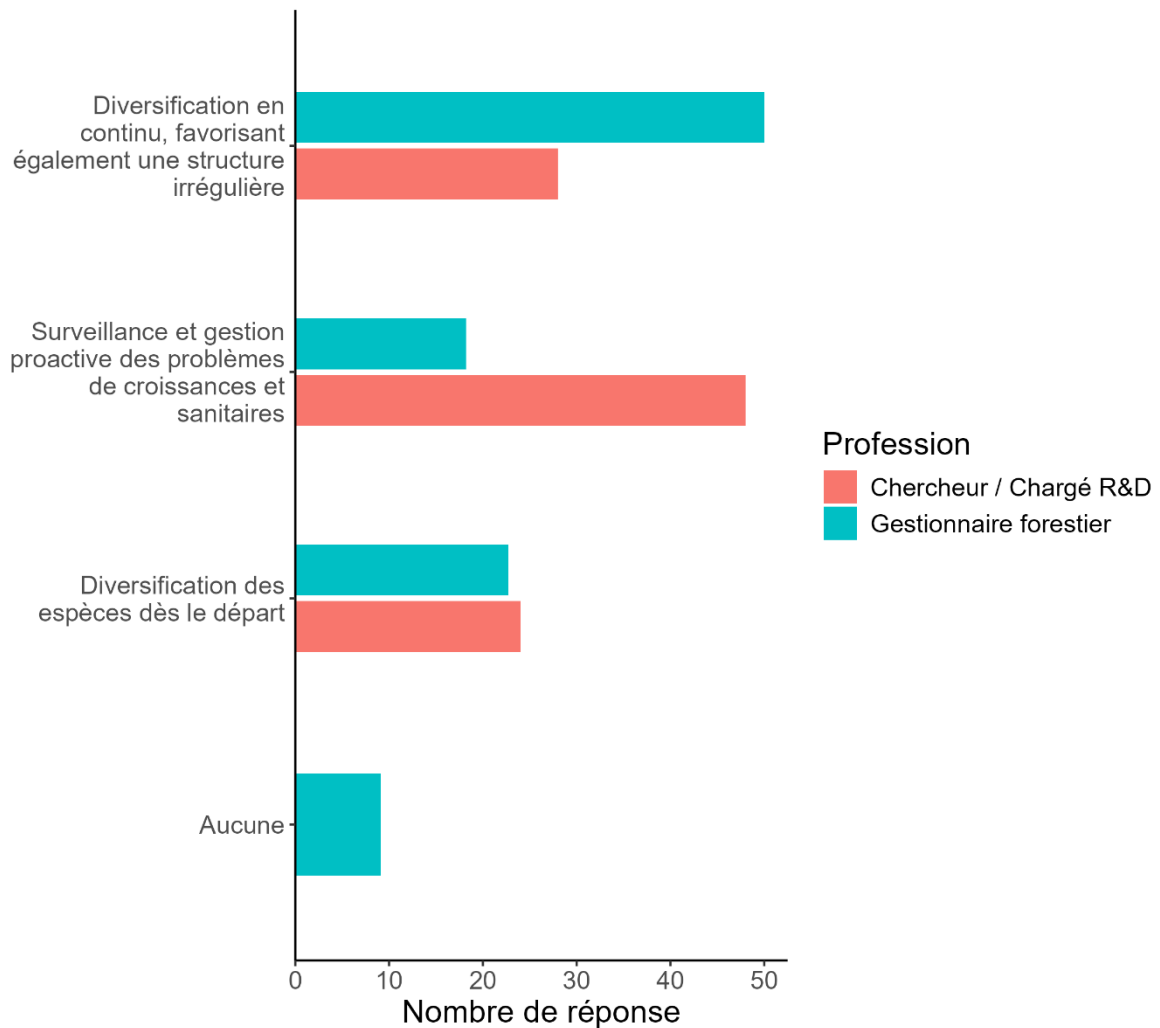
La question suivante demandait de justifier le score donné dans la question précédente sous format libre. Le tableau ci-dessous synthétise les réponses données. Les répondants mettent d'abord en avant la variabilité des réponses selon le contexte, mais également la fragilité des monocultures suite à la perte des effets bénéfiques de la diversité. De manière intéressante les effets de l'échelle spatiale sont mentionnés, notamment des effets de compensation au niveau du paysage, les mécanismes potentiels mériteraient d'être exploré, tout autant que l'effet de l'échelle temporelle.

JUSTIFICATION DONNEE	SYNTHESE DES OPINIONS EXPRIMEES	EXTRAITS REPRESENTATIFS
DEPENDANCE AU CONTEXTE	La résilience dépend fortement de l'espèce restante, du climat local, de la surface concernée et des conditions stationnelles.	« Cela dépend du contexte, de l'espèce restante et de la structure/densité du peuplement. »
FRAGILITE ACCRUE DES MONOCULTURES	Monocultures perçues comme plus vulnérables aux maladies, ravageurs, et événements climatiques extrêmes.	« 1 seule essence = fragilité / maladie... », « Sensibilité accrue aux attaques sanitaires si une seule essence. »
ROLE DE LA DIVERSITE	La diversité (essences, strates, cortèges faune/flore/fonge) est vue comme clé de la résilience ; sa perte est donc problématique.	« La diversité du mélange [...] est une des clés de la fonctionnalité et de la résilience. », « Perte d'effets synécologiques facilitants », « mise en pleine lumière = dessèchement... »
ÉCHELLE D'ANALYSE	L'évaluation de la résilience varie selon l'échelle : parcelle, massif, paysage. Des mosaïques de peuplements peuvent compenser une perte locale.	« Si parcelles plus petites et dans le cadre d'une forêt mosaïque [...] il faut réfléchir à l'échelle du massif. »
COMPLEXITE DU TERME "MONOCULTURE"	Le terme est parfois jugé inadapté pour décrire un peuplement devenu monospécifique suite à une perturbation.	« Le terme monoculture est ici inadapté... », « On peut avoir des peuplements monospécifiques qui ne sont pas des monocultures... »

CHANGEMENT CLIMATIQUE	La perturbation et la transformation en monoculture se produisent dans un contexte climatique évolutif, rendant les projections incertaines.	« Après une grosse perturbation, rares sont les peuplements qui se montrent résilients dans un contexte de changement climatique. »
ASPECTS FILIERES / ECONOMIQUES	Résilience aussi perçue à l'échelle des filières économiques selon leur capacité à réagir aux crises.	« La résilience des monocultures est à considérer à l'échelle des filières qu'elles approvisionnent... »

La question suivante demandait quelles mesures préventives mettre en place pour éviter qu'un mélange ne se retrouve en monoculture. Les options possibles étaient (plusieurs réponses possibles) : (i) diversification des espèces dès le départ, (ii) diversification en continu, favorisant également une structure irrégulière, (iii) surveillance et gestion proactive des problèmes de croissances et sanitaires, (iv) aucune, (v) sans opinion. Les répondants ont sélectionné en moyenne 1.7 items, et d'abord la diversification en continu (25) suivis de la surveillance et gestion proactive (18) et la diversification dès le départ (14). La séparation des répondants selon leur profession révèle une divergence, les profils chercheurs ont sélectionné plus souvent l'option de surveillance et gestion proactive que les gestionnaires, quant les gestionnaires ont plus souvent sélectionné l'option diversification en continu.

Quelles mesures préventives pensez-vous être les plus efficaces pour éviter que les peuplements mélangés ne se retrouvent en monoculture suite à une perturbation ?



La question suivante demandait des exemples concrets de succès ou d'échec de gestion de mélange face à des perturbations sous format libre. 12 réponses ont été donné, synthétisé dans le tableau ci-dessous. Les répondants mentionnent à la fois des succès, notamment via des enrichissements, mais également des difficultés et des échecs notamment face aux grands ongulés ou à la sécheresse.

THEME ABORDE	SYNTHESE DES OPINIONS EXPRIMEES	EXTRAITS REPRESENTATIFS
PATHOLOGIES COMME MOTEUR DE TRANSFORMATION	Plusieurs réponses mentionnent la chalarose (frêne) ou le dépérissement du sapin comme déclencheurs de changement de composition des peuplements.	« Oui suite à la chalarose du frêne... », « dépérissement de sapin, maintien des hêtres... »
SUCCEES LIES A DES ENRICHISSEMENTS ET PLANTATIONS	Les enrichissements ponctuels (points d'appui), les plantations ciblées (hêtre sous résineux) ou les régénérations naturelles diversifiées sont considérés comme des approches efficaces.	« Enrichissements par points d'appui », « plantations de hêtres sous abri de pessières et douglasaies pures »
ÉCHECS DES REGENERATIONS MONOSPECIFIQUES	Les régénérations naturelles sans enrichissement, surtout en résineux comme l'épicéa, sont vues comme des échecs.	« Régénérations pures d'épicéa non-enrichies après perturbation »
ROLE LIMITANT DES CERVIDES	Le déséquilibre forêt-gibier est fréquemment cité comme frein à la régénération naturelle et au mélange des essences.	« Le déséquilibre forêt-cervidés est un frein constaté et vraiment pénalisant... »
EFFETS DE LA SECHERESSE	La sécheresse compromet la régénération et le maintien des mélanges, notamment dans les systèmes chêne-pin.	« Difficulté à maintenir et régénérer des systèmes chêne-pin après [...] sécheresse »
REPONSES NUANCEES OU INCOMPLETES	Certaines réponses mentionnent des cas trop récents pour évaluer leur succès, ou évoquent l'intérêt de recueillir des données supplémentaires.	« Peut trop récent pour parler de succès ou d'échec », « demanderaient à être précisés par les membres... »
EFFET POSITIF DES PERTURBATIONS	Une réponse indique que certaines perturbations peuvent favoriser le mélange plutôt que le réduire.	« C'est plutôt l'inverse, des perturbations 'permettent' de mélanger selon moi »

7.5 Section 5 – perspectives futures

La première question dans cette section demandait les attentes pour l’avenir de la gestion des peuplements mélangés avec les options suivantes (une seule réponse possible) : (i) augmentation de la diversité des espèces indigènes, (ii) augmentation de la diversité des espèces, y compris avec des espèces exotiques, (iii) promotion de la sylviculture en couvert continu, (iv) autre. Les répondants ont d’abord sélectionné l’augmentation de la diversité en incluant les espèces exotiques (13) suivis de la sylviculture à couvert continu (9), de l’augmentation de la diversité des indigènes (4) et une combinaison de possibilité (4).

Enfin la dernière question laissait le champ libre aux répondants d’indiquer des aspects et/ou question autour de la résilience des mélanges non abordés dans le questionnaire. 22 réponses ont été obtenu synthétiser dans le tableau ci-dessous.

THEME ABORDE	SYNTHESE DES OPINIONS EXPRIMEES	EXTRAITS REPRESENTATIFS
CADRE CONCEPTUEL A CLARIFIER	Certains répondants questionnent la définition même de résilience, insistant sur la résistance ou la robustesse comme notions plus pertinentes.	« Ce n'est pas vraiment de la résilience selon moi », « travailler sur la robustesse des écosystèmes forestiers... »

TEMPS LONG ET INERTIE DU SYSTEME FORESTIER	Le temps nécessaire à l'établissement de peuplements mélangés est vu comme un frein majeur à leur mise en place.	« très très long pour avoir une vraie forêt mélangée », « que sur 50-80 ans »
ROLE DES FACTEURS BIOTIQUES ET DU CONTEXTE HISTORIQUE	L'impact du déséquilibre forêt-gibier, des trajectoires passées et des changements mycorhiziens est souligné.	« le principal frein au mélange est le déséquilibre forêt-cervidés », « pas assez de prise en compte des modifications mycorhiziennes »
OPTIMISATION DES MODALITES DE MELANGE	De nombreuses questions portent sur le type de mélange (pied à pied, bouquet, mosaïque), leur fonctionnement et leur efficacité.	« Comment optimiser types de mélanges [...] et niveau de rentabilité », « analyser les différentes stratégies de mélange »
ÉCHELLE SPATIALE PERTINENTE	Certains suggèrent de penser le mélange non pas à l'échelle de la parcelle mais du massif ou du territoire.	« Focaliser sur les peuplements mélangés [...] mais aussi à l'échelle des massifs »

**ASPECTS TECHNIQUES ET
DONNEES**

Des appels sont faits pour plus de données économiques, de recul sur certaines essences, et pour des outils comme le land equivalent ratio adapté à la forêt.

« données sur l'accroissement des peuplements mélangés... », « manque de recul sur de nouvelles essences »

**ENRICHISSEMENTS ET
SYLVICULTURE EN
COUVERT CONTINU**

Des propositions incluent le développement de l'enrichissement sous couvert et la sylviculture adaptée au Climat Futur.

« enrichissement sous couvert mérite une attention particulière », « sylviculture mélangée en couvert continu »

**APPROCHE
ECOSYSTEMIQUE ET
INSPIRATION NATURELLE**

L'exemple des ripisylves est proposé comme modèle d'inspiration pour comprendre les peuplements mélangés.

« Le meilleur exemple [...] est le peuplement forestier naturel [...] en ripisylve. »

PRISE EN COMPTE DES SCENARIOS CLIMATIQUES	Appel à intégrer les scénarios climatiques récents dans les politiques forestières, en particulier TRACC2023DRIAS.	« prendre en compte les conséquences de la TRACC2023DRIAS »
PRECAUTIONS METHODOLOGIQUES	Mise en garde contre le solutionnisme et la généralisation abusive des bienfaits du mélange.	« Attention au solutionnisme simplifié », « ne pas généraliser ! »

7.6 Conclusion

Les réponses au questionnaire font ressortir les éléments suivants :

- Face aux besoins d'adaptation des forêts et pour promouvoir la résilience des peuplements, les répondants mettent en avant le besoin de considérer une multitude d'options, dont la diversification en essence et le maintien des mélanges en place.
- Une divergence a aussi été observée entre certains répondants mettant en avant une approche sylvicole particulière pour favoriser la résilience des forêts (sylviculture mélangée en couvert continu) quand d'autres répondants favorisent une diversité d'approche adaptée aux contextes (« ne pas généraliser »).
- Les répondants étaient à part égale issus du monde de la recherche d'un côté et de la gestion forestière de l'autre. Sur certaines questions le domaine d'activité des répondants n'a pas d'impact sur les réponses, quand sur d'autres questions des divergences sont observées. Il est par exemple intéressant de noter que les profils

recherche sont plus nombreux à mettre en avant le besoin d'étude sur les itinéraires techniques des mélanges que les profils gestionnaires.

- A plusieurs endroits dans le questionnaire, différents répondants ont questionné la pertinence du cadre conceptuel de la résilience notamment via le suivi de la productivité des arbres. Des besoins d'extensions à d'autres paramètres ainsi que le besoin de développer un nouveau cadre conceptuel ont été indiqués.

9. Atelier d'échange

8.1 Contexte

Le 18/03/2025 un atelier d'échange autour de la résilience des mélanges a eu lieu à la Géoroom de l'IGN à Saint-Mandé. Le programme de la journée fut le suivant :

9h30 – 10h00 : Accueil – Collation

10h00 – 10h10 : Mot d'accueil et présentation des intervenants du matin

10h10 – 10h40 : Olivier Bouriaud (Uni. Suceava) – Mesurer la résistance et résilience des forêts, effets des mélanges d'espèces

10h41 – 11h01 : Xavier Morin (CNRS) - Effets du mélange d'essence sur la résilience des forêts : Etat des connaissances et apports des modèles forestiers

11h01 – 11h16 : Questions

11h17 – 11h32 : Thomas Cordonnier (ONF) – Quelle compatibilité pour la lumière de peuplements réguliers mélangés ? Développement d'une méthode d'analyse à l'échelle des sylvoécorégions

11h33 – 11h53 : Lionel Hertzog (IGN) - Monitoring de la résilience de croissance des mélanges d'espèces ligneuses sous changement climatique

13h15 – 15h00 : Instructions et travaux en groupes

15h00 – 15h21 : Retour des travaux en groupes

15h21 – 15h45 : Echange plénière

15h45 – 16h00 : Mot de conclusion

Une vingtaine de personnes ont participé à cette journée.

8.2 Synthèse des discussions

Les discussions au cours de l'atelier Morning ont fait émerger les points saillants suivants :

La conceptualisation actuelle de la résilience basée sur une perturbation ponctuelle entourée de période de stabilité pour la variable considérée apparaît de moins en moins pertinente. Le changement climatique mène à des néo-climat créant de nouvelles conditions dans lesquels les écosystèmes forestiers doivent s'adapter. Dans ces conditions de système climatique changeant amenant un stress chronique il apparaît illusoire de chercher des périodes de stabilité. De plus, les perturbations ponctuelles deviennent également plus intenses et plus fréquentes, rendant incommode la définition de période stable pré et post perturbation. Les participants de l'atelier ont manifesté leurs intérêts au développement de nouveau cadre conceptuel et de nouvel indicateur d'écosystème forestier en transformation.

La majorité des études scientifique quantifie la résilience des forêts avec comme variable cible la productivité des arbres. Les participants ont questionné ce choix notamment face à d'autres variables de plus en plus pertinentes comme la mortalité, le dépérissement, la régénération ou encore le taux de couvert. Différents participants ont souligné l'intérêt de suivre la productivité en tant que propriété émergente encapsulant une variété de processus physiologique, mais aussi le fait que des déclin de productivité sont des indicateurs précoces de dépérissement et de mortalité, que la productivité des arbres représentent l'excédent de ressources disponibles aux arbres une fois les besoins métaboliques couvert et enfin le fait de la relative facilité d'obtenir des données de productivité comparé à d'autres variables. Pour autant, l'ensemble des participants sont tombés d'accord sur le besoin d'étendre les variables considérées dans les études de résilience des mélanges avec un intérêt marqué pour le suivi de couvert.

Face aux néo-climats à venir les essences en place ne seront potentiellement plus adaptées, deux types d'études manquent encore cruellement : (i) les expérimentations avec des essences exotiques en mélange, face au problème combinatoire posé par la diversité des compositions potentielles une approche par traits fonctionnels pourrait être développé, (ii) la prise en compte de variabilité intra-

espèce p.ex. via les variations de géno- et phénotype. Les participants ont souligné les limites et incertitudes associées aux modèles corrélatifs de compatibilité climatique (climessence) pour prédire le fonctionnement d'espèces dans les néo-climats futures. De même la réaction d'essences exotiques à des contextes pédoclimatiques non observés dans les aires de distributions actuelles ajoutent des incertitudes sur le comportement de ces essences. Les réticences sociétales aux plantations d'exotiques sont également à prendre en compte et à atténuer par le biais de concertations et d'échanges.

L'adaptation des écosystèmes forestier au changement climatique peut s'appuyer sur les mélanges mais devra également faire jouer d'autres leviers, moins étudiés dans la littérature scientifique, tel que la structure verticale ou la densité. La sylviculture mélangée en couvert continu est une des options intéressantes pour gérer des peuplements dans le contexte du changement climatique, pour autant, certains contextes / certains peuplements seront difficiles voire impossibles à amener vers ces structures. Des participants ont également pointé les effets positifs attendus d'évènements de fondation pour des essences non présentes dans les peuplements actuels (p.ex. exotiques). L'échelle spatiale à laquelle se planifie ces gestions est apparu également comme un aspect méritant plus d'investigation entre des mélanges pied à pied et des variations de peuplements à l'échelle du paysage avec comme idée sous-jacente le concept de forêts mosaïques.

Les études et les recommandations sur les leviers d'adaptation via une gestion active des peuplements forestier face aux changement climatique doivent prendre en compte la faisabilité économique, le besoin en soutien public ainsi que la disponibilité en personnel qualifié pour implémenter des itinéraires de gestion plus complexes.