



Expérimenter et Guider pour Initier la Diversité des Essences forestières

Renouvellement mélangé post-crise

Identification des questions croisées Gestionnaires-Chercheurs
pour un développement de dispositifs à l'interface dans le
Grand Est

Maude Cavaliere

Éric Lacombe

Février 2023

Résumé

Les changements climatiques poussent les forestiers à envisager de modifier les peuplements forestiers pour les adapter aux nouvelles conditions climatiques et aux nouveaux régimes de perturbations attendus. Le mélange des essences est un des moyens mis en avant pour adapter des forêts à ces modifications et à l'incertitude quant à leur ampleur. Cependant, les gestionnaires forestiers sont confrontés à de nombreuses questions quant à l'installation et le maintien de ces mélanges, dans le cadre étudié des reconstitutions post-crise (scolytes en particulier).

Une vingtaine de questions de recherche à explorer ont été identifiées, à travers un recensement des thématiques questionnant les gestionnaires, un sondage de priorisation de ces thématiques et leur confrontation avec les fronts de recherches associés.

La priorité a ainsi été donnée à trois thématiques : (1) le choix des essences du peuplement, (2) le niveau de mélange des peuplements et (3) l'utilisation de la régénération naturelle dans les stratégies de reconstitution. Ce document fait aussi état de questions relatives à des thématiques transversales en lien avec les mélanges qui ont été abordées avec les chercheurs. Enfin, nous proposons en fin de document un récapitulatif des thèmes de recherches détectés et des dispositifs qui pourraient permettre de répondre à ces questionnements, en particulier dans le Grand Est et en se situant à l'interface recherche - gestion.

Glossaire

Blocage : situation où un facteur de l'environnement biotique et/ou abiotique limite grandement l'acquisition ou le maintien de la régénération naturelle.

Mélange : tout renouvellement naturel, assisté ou artificiel, comprenant au moins 2 essences dont aucune ne représente plus de 80% de la surface renouvelée.

Recrû : végétation naturelle composée de ligneux et semis-ligneux d'intérêt sylvicole variable.

Régénération naturelle : végétation naturelle composée de ligneux d'intérêt sylvicole (l'intérêt est établi selon les enjeux et choix du propriétaire).

Essence « objectif » : Essence qui doit constituer la production principale du peuplement. Elle doit avoir une production correcte pour une station donnée dans l'état des connaissances actuelles. La notion d'essence « objectif » est fortement dépendante du contexte stationnel, économique, sanitaire, comme des choix du propriétaire forestier (Laurent et al., 2022).

Essence « d'accompagnement » : Essence présente en complément des essences « objectif ». Elle est susceptible de remplir plusieurs fonctions d'intérêt (production, rôle cultural positif pour la conformation des tiges des essences « objectif », support pour la biodiversité, bon fonctionnement des services écosystémiques attendus par la forêt...) (Laurent et al., 2022).

Table des matières

Résumé	2
Glossaire	3
I. Introduction	5
L'adaptation des forêts dans un contexte de changements.....	5
Interconnexion de la gestion et de la recherche	5
II. Objectifs et démarche	6
Description du sondage :	7
Les chercheurs interrogés :	8
Les principaux résultats du sondage.....	8
III. Le choix des essences et provenances	9
Mélanges et adaptation aux niveaux de risques	9
IV. Les stratégies de reconstitution.....	17
Niveau de mélange du peuplement	18
Diagnostic du potentiel de la régénération naturelle	21
V. Pistes de réflexion liées aux thématiques transversales.....	24
VI. Conclusion	25
Annexe.1 : Thématiques du sondage.....	30
Annexe.2 : Liste des chercheurs rencontrés	33
BIBLIOGRAPHIE	34
Remerciements	36

I. Introduction

L'adaptation des forêts dans un contexte de changements

Ces dernières années, de nombreuses crises sanitaires se déclenchent en forêt. Elles sont causées par des perturbations telles que des tempêtes, des sécheresses ou encore la prolifération de parasites ou de pathogènes, qui provoquent de fortes mortalités dans les peuplements. Ces phénomènes voient leur fréquence et leur intensité augmenter avec les effets des changements globaux. Les forestiers doivent alors adapter leur sylviculture à ces perturbations pour éviter ou anticiper des situations de crise.

Un moyen, désigné par les experts et scientifiques, pour limiter ces crises est le **mélange d'essences** (Brang et al., 2016; Jactel et al., 2017). La sylviculture des peuplements mélangés permettrait de mieux gérer le risque par (1) la limitation de la propagation des parasites et pathogènes (Jactel et al., 2017, 2009), ainsi que par (2) la diversification des capacités de survie ou de rétablissement après perturbation des essences constituant le peuplement (Jactel et al., 2009). Ce mélange d'essences est également cité comme pouvant contribuer à la réponse multifonctionnelle des forêts aux attentes de la société (paysage, diversification des produits bois, ...).

Un peuplement est considéré comme mélangé lorsque l'essence principale du peuplement représente moins des trois quarts de son couvert ou de sa surface terrière (Bastien and Gauberville, 2011). Toutefois, cette définition ne rend pas compte de la complexité que peut représenter la gestion de ce mélange pour les forestiers. Un peuplement mélangé peut être composé d'essences requérant une **adaptation de leur gestion** pour s'assurer de la bonne croissance de chacune. Cette adaptation peut, par exemple, être rendue nécessaire par des comportements écologiques différents ou encore par des âges d'exploitabilité variés, impliquant de bien identifier les interventions à réaliser pour garantir la bonne croissance et la qualité des arbres du peuplement. C'est pour cela que les gestionnaires se questionnent quant à la meilleure manière de mettre en place et de maintenir ces peuplements mélangés.

Interconnexion de la gestion et de la recherche

La gestion des forêts est principalement basée sur l'expérience des gestionnaires et experts forestiers. Ces connaissances empiriques sont acquises dans un environnement et un contexte de gestion donné, qui ne permettent pas toujours de bien identifier quels facteurs sont à la source de la réussite ou de l'échec de la technique employée. C'est actuellement le cas dans les systèmes complexes que représentent les peuplements mélangés.

Cependant, depuis une trentaine d'années, la recherche s'attache de plus en plus à valider les nouvelles pratiques des gestionnaires et analyser les mécanismes à l'œuvre. La recherche permet de tester, à travers des expérimentations adaptées, les interrogations techniques des gestionnaires. Néanmoins, elle s'appuie sur des concepts et théories ne reflétant pas toute la complexité du terrain, ce qui rend les résultats des recherches difficiles à exploiter et les résultats doivent alors être mis en perspective pour une utilisation dans la gestion. Cette transition est facilitée lorsque la question de recherche prend en compte dès le départ le point de vue de la gestion, à travers les questions posées mais aussi les dispositifs expérimentaux mis en place pour y répondre. C'est pourquoi il est nécessaire de travailler la mise en relation de ces deux approches, pour permettre, (1) la traduction de problématiques de gestion en question et thématiques de recherche, (2) la mise en avant des applications que peuvent avoir les résultats

de la recherche dans la gestion et (3) la diffusion de ces résultats à travers le réseau des forestiers.

II. Objectifs et démarche

Cette partie du projet Expérimenter et Guider pour Initier la Diversité des Essences forestières (EGIDE) se concentre sur le premier point : la traduction des problématiques des gestionnaires forestiers en questions de recherche.

Les questions et les problématiques des gestionnaires relatives au renouvellement mélangé sont tout d'abord recensées, puis confrontées au front de science par l'intermédiaires de chercheurs, consultés à titre d'expert de leur domaine de recherche. Finalement, différentes questions de recherche en lien direct avec la gestion sont identifiées en croisant, au besoin, plusieurs thématiques (détail des étapes disponible en Figure.1).

Etape 1 : Recensement des questionnements des gestionnaires forestiers

Dans un premier temps, les thèmes qui préoccupent les gestionnaires ont été identifiés par la littérature technique et par des **échanges formels et informels** avec des gestionnaires (tournées terrain, webinaires, ateliers, groupe de travail informel...). Ce recensement n'est pas exhaustif mais il représente déjà une soixantaine de thèmes.

Etape 2 : Hiérarchisation des thématiques

Les questions de recherche ne peuvent se centrer que sur quelques hypothèses et ne peuvent alors pas traiter de toutes les thématiques à la fois. Les questionnements ont dû être priorisés.

Pour cela, un **sondage**, lancé par le projet Interreg Adapted Skills and Knowledge for Adaptive FORests (ASKAFOR), a été soumis à des gestionnaires forestiers du Grand Est et de régions voisines **pour prioriser les thématiques** de reconstitution et de gestion en mélange, préalablement identifiées.

Etape 3 : Croisement des thématiques prioritaires avec le front de recherche

Dans un troisième temps, à partir de cette analyse et de nos recherches bibliographiques, nous avons contacté **9 chercheurs** de domaines variés pour :

faire le point avec eux et avoir leur avis sur **l'état d'avancement de la recherche** dans les thématiques mises en avant par le sondage ;

et souligner les **besoins et manques de connaissances** dans ces domaines.

Etape 4 : Définition des questions de recherche

A partir de ces consultations avec les chercheurs et de la littérature scientifique, nous avons **défini des questions de recherches** plus précises susceptibles d'être portées à projet par les chercheurs consultés ou leurs confrères pour pallier ces manques.

Figure.1 Schéma de la succession des étapes suivies pour l'établissement des questions croisées Gestionnaires-Chercheurs

Description du sondage :

Le sondage a été soumis dans le cadre du projet Interreg ASKAFOR auprès de son réseau de gestionnaires forestiers, pratiquant ou non la SMCC (Sylviculture Mélangée à Couvert Continu) mais ayant tous une expérience et des questionnements relatifs au mélange d'essences. L'expérience de ce réseau sur l'installation et la gestion des mélanges nous a ainsi permis de mieux cerner les manques de connaissance sur leur gestion.

Le sondage était composé de 12 questions permettant de prioriser la soixantaine de thématiques identifiées (détail des thématiques en Annexe.1). Les questions demandaient de donner une valeur entre 1 et 4 à chacune des thématiques proposées. La valeur « 1 » correspondant à la 1ère priorité, « 2 » à la deuxième priorité, etc., jusqu'à 4. Les sondés disposaient aussi d'une réponse « autre » pour indiquer que la thématique n'était pas classée parmi les quatre premières priorités ou quelle n'était pas considérée comme prioritaire du tout.

Le sondage était posté en ligne sur le site web de framaforms (<https://framaforms.org/abc/fr/>) et soumis entre octobre 2021 et décembre 2021 à travers le réseau de gestionnaires du projet ASKAFOR.

Le sondage a recueilli 19 réponses provenant de techniciens, d'ingénieurs, d'ingénieurs de recherches, de gestionnaires et d'experts forestiers (Figure.2 a/). Les sondés travaillent dans différents organismes comme l'Office National des Forêts (ONF), le Centre National de la Propriété Forestière (CNPF), l'Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement (INRAE), AgroParisTech ainsi que dans l'association Pro Silva et dans différents organismes de gestion forestière indépendants et sont originaires de plusieurs régions de France, principalement du Grand Est, de la Bourgogne-Franche-Comté mais aussi de l'Ile de France, du Centre-Val de Loire et de la Nouvelle Aquitaine et l'un deux depuis la Wallonie en Belgique (Figure.2 b/). Les sondés ont majoritairement plus de 15 ans d'expérience et parmi eux plus de la moitié ont plus de 30 ans d'expérience (Figure.2 c/).

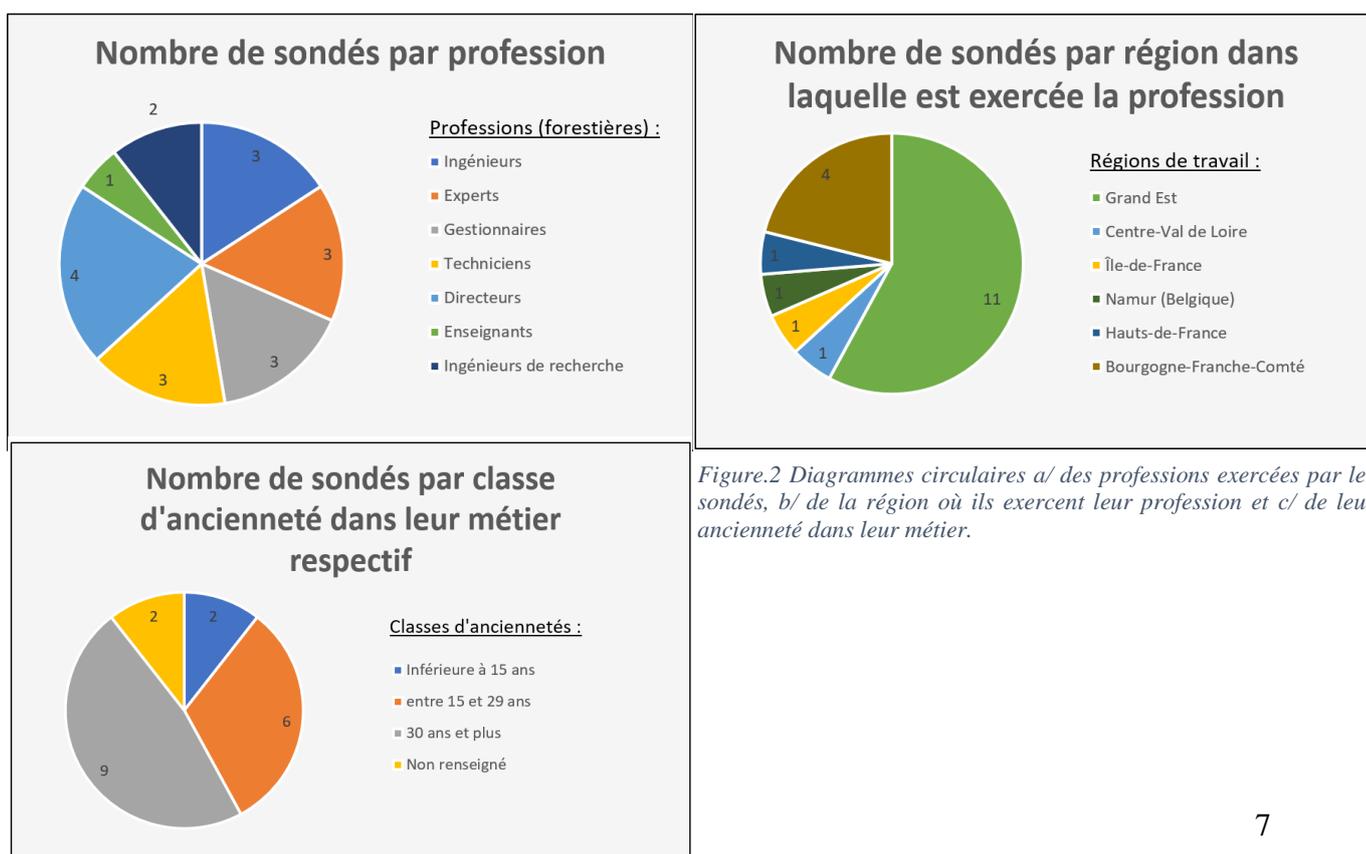


Figure.2 Diagrammes circulaires a/ des professions exercées par les sondés, b/ de la région où ils exercent leur profession et c/ de leur ancienneté dans leur métier.

Pour chaque sous-thématique abordée, les propositions de réponses classées au même niveau de priorité, ont été retirées de l'analyse afin de ne conserver que les réponses permettant de discriminer les propositions dans leur priorité. Il a été remarqué que certains sondés n'ont pas répondu à toutes les questions proposées. Dans ce cas-là, l'absence de réponse à la sous-thématique a été comptabilisée dans la priorité "5. Non-classé".

Les sondés nous ont fait part d'un problème quelques jours suivant la mise en ligne du sondage. Il était impossible de décocher une case lorsqu'elle était cochée. Pour pallier ce problème, les sondés ont coché toutes les cases restantes avec la plus faible priorité à leur disposition. Nous avons par la suite corrigé ce problème en introduisant la réponse "Autre". Pour les réponses faussées, nous avons déclassé les réponses multiples de valeur "4" en valeur "Autre".

Les chercheurs interrogés :

Faisant suite à une première analyse du sondage, nous avons contacté un panel de neuf chercheurs de différents domaines et organisé des entretiens individuels d'une heure, autour des problématiques soulevées par les gestionnaires. Ce panel a été constitué pour toucher un maximum de thématiques de recherche susceptibles d'amener un élément de réponse aux questionnements des gestionnaires. La liste des chercheurs rencontrés figure dans l'Annexe.2.

Les principaux résultats du sondage

Nous avons orienté la réflexion concernant les questions de recherche présentées dans les parties suivantes autour des deux thématiques les plus sollicitées par les sondés (Figure.3). Ces thématiques ont recueilli plus de la moitié des votes de priorité 1 ou 2. Le **choix des essences** et les **stratégies de reconstitution** se détachent ainsi du reste des propositions avec respectivement quinze et dix-sept votes toutes priorités confondues. La troisième thématique, l'équilibre faune-flore, n'as reçu par exemple que 8 votes, les répondants considérant que ce sujet important ne rentrait toutefois pas facilement dans le cadre de cette enquête sur les questions de recherche.

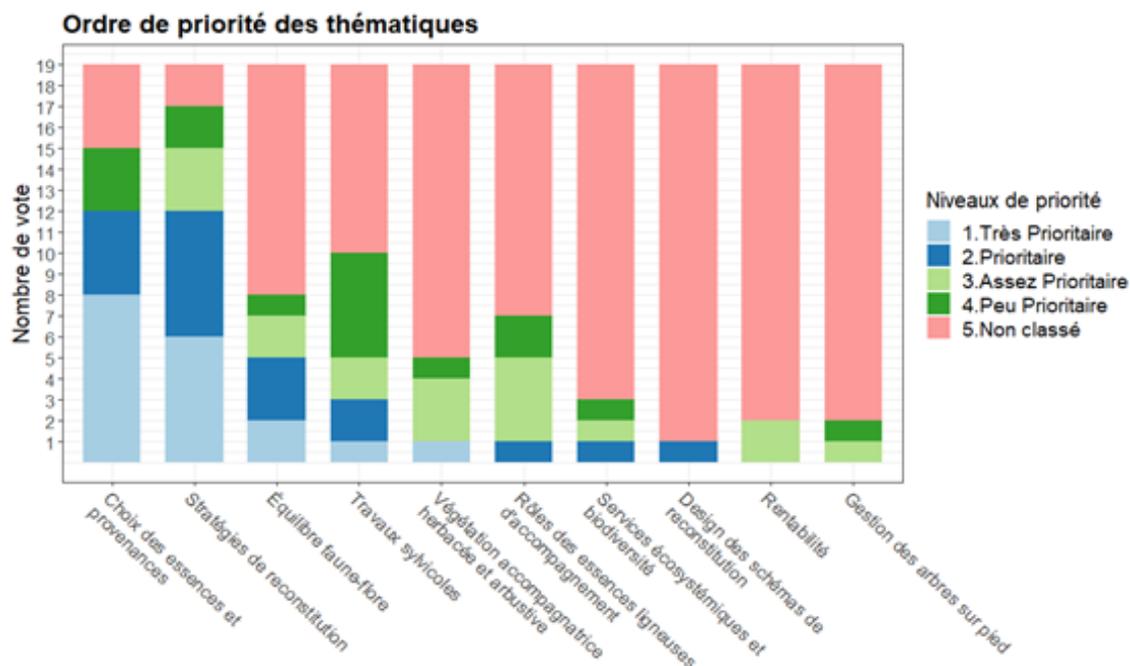


Figure.3. Histogramme cumulé des votes des gestionnaires pour la hiérarchisation des 10 thématiques principales du sondage

III. Le choix des essences et provenances

Le mélange est un outil répondant aux enjeux du forestier. La question du choix des essences en mélange doit alors être orientée selon ses attentes.

Ainsi, pour choisir les essences que l'on veut assembler entre elles il faut d'abord définir quels sont **les objectifs de ce mélange** : Souhaite-t-on favoriser la croissance des essences en jouant sur la synécologie du mélange ? Préfère-t-on valoriser la capacité d'adaptation des essences à reconstituer un peuplement après une crise ? Quel mélange permet d'éviter la situation de crise ? Ou encore, souhaite-t-on considérer des essences allochtones ou des provenances différentes parmi les essences possibles en mélange ?

Le sondage proposait de prioriser ces 4 orientations identifiées par les gestionnaires. La priorité était donnée aux **Types de mélanges susceptibles de s'adapter à différents niveaux de risque** (Figure.4). L'intérêt des gestionnaires s'est porté sur la capacité du peuplement à résister ou se rétablir face aux perturbations annoncées plus fréquentes en raison des changements climatique.

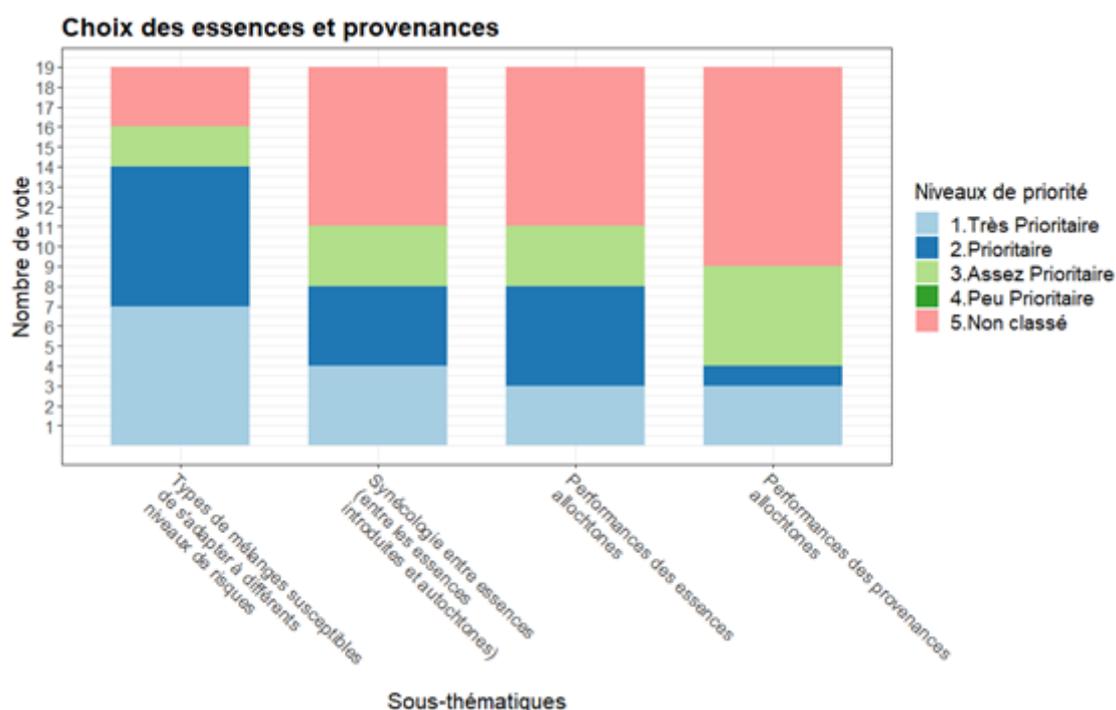


Figure.4 Histogramme cumulé des votes des gestionnaires pour la hiérarchisation des 4 sous-thématiques de la catégorie « choix des essences et provenances »

Mélanges et adaptation aux niveaux de risques

Il faut d'abord rappeler que le choix des essences par un propriétaire ou un gestionnaire est basé sur plusieurs critères agissant comme des filtres successifs pour la sélection des essences du peuplement (Figure.5) :

- la réglementation sur le Matériel Forestier de Reproduction (MFR) n'autorise l'introduction en forêt que des plants d'essences et de provenances spécifiques ;
- les conditions environnementales (biotiques et abiotiques) et la biologie des essences autorisées vont impacter le choix des essences ;
- enfin, les attentes du propriétaire vis-à-vis des essences adaptées à l'environnement de sa parcelle vont définir le mélange final, répondant à ses besoins et attentes.

Des outils d'aide à la décision peuvent être mis à disposition pour aider à réaliser ces choix en proposant des solutions adaptées aux attentes des propriétaires et gestionnaires et en mettant en avant les avantages et inconvénients des solutions proposées. Le guide pratique de reconstitution post-crise du projet ASKAFOR (Laurent et al., 2022) en est un exemple.

Dans le cadre du sondage, l'attente des propriétaires et gestionnaires mise en avant est l'adaptabilité des essences du peuplement aux aléas, d'origine biotique tels que des parasites, des ravageurs ou des pathogènes, ou bien abiotique tels que les tempêtes ou les sécheresses.

Dans le contexte des changements globaux, les modèles climatiques prédisent en Europe une élévation des températures moyennes, des hivers plus doux et humides et des étés plus chauds et secs (Machado Nunes Romeiro et al., 2022), avec une augmentation des perturbations (Pachauri et al., 2015; Pörtner and Roberts, 2022) et des périodes estivales sans pluie plus longues. Plusieurs scénarios climatiques sont actuellement proposés (Pörtner and Roberts, 2022) créant une certaine incertitude sur l'ampleur des changements attendus.

Ces changements climatiques pourraient provoquer un déplacement de la niche écologique potentielle de nombreuses essences forestières aux capacités de migration lentes (Buras and Menzel, 2019; Lenoir et al., 2008), impliquant qu'une partie des essences utilisée actuellement ne soit plus adaptée au climat (baisse de production et/ou mortalité). Mais l'ampleur de ce phénomène est encore mal connue et la liste des essences concernées par des changements d'aires est donc susceptible d'évoluer, rajoutant des incertitudes pour le propriétaire ou le gestionnaire qui doit entamer un renouvellement aujourd'hui. Tout cela pousse les forestiers à anticiper les répercussions des changements climatiques et à vouloir installer dès aujourd'hui des essences résistantes et résilientes (Sousa-Silva et al., 2018), mais la question des options offertes par l'installation d'un mélange d'essences est ouverte, pour offrir plusieurs degrés de sécurité vis-à-vis de changements d'importance incertaine.

Il existe aussi une incertitude quant au futur marché des bois, en particulier celui d'essences exotiques ou d'essences locales résistantes aux sécheresses mais peu utilisées actuellement par la filière en bois d'œuvre, qui renforce la question du niveau de risque pris.

Les changements climatiques devraient aussi modifier le régime de perturbations des forêts par des effets directs sur les conditions environnementales et par des effets en cascades entre les différentes perturbations des forêts (Machado Nunes Romeiro et al., 2022; Seidl et al., 2017).

Par rapport à ce questionnement des propriétaires et gestionnaires, les chercheurs ont évoqué plusieurs points nécessitant l'attention de la recherche pour établir des mélanges répondant à différents degrés de sécurité. Ces points sont récapitulés dans la Figure.5.

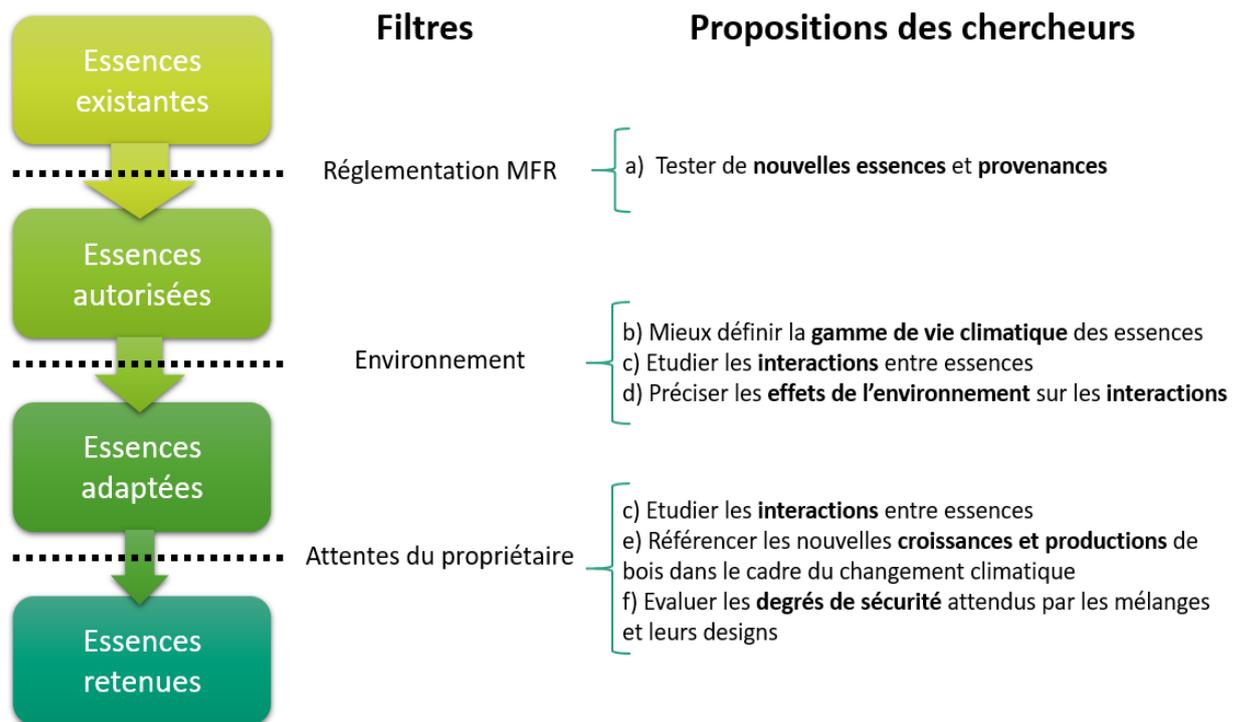


Figure.5 Schéma récapitulatif des filtres agissant sur le choix des essences et des propositions des chercheurs associées pour l'obtention de mélanges adaptés à différents niveaux de risques

a) Tester de nouvelles essences et provenances

Les chercheurs proposent de tester de **nouvelles essences** adaptées aux stations et aux climats actuel et futur à travers des dispositifs expérimentaux pour les ajouter à la liste MFR de la région et essayer d'anticiper les changements climatiques à venir. De la même manière, on peut aussi s'intéresser à **des provenances** originaires de climats plus chauds et ayant des sécheresses prononcées : on compte à ce moment-là sur l'adaptation génétique de cette population pour mieux supporter les futures conditions climatiques que la provenance actuelle.

Avant validation d'une nouvelle essence ou d'une nouvelle provenance, il est nécessaire d'évaluer son comportement dans son nouvel environnement, notamment à travers les questions suivantes :

- Quel taux de survie ?
- Quelle croissance selon les conditions stationnelles ?
- Quels risques encourus par l'écosystème (envahissement, hybridation, ...)
- Quels impacts sur la biodiversité ?
- etc.

Il est alors nécessaire de procéder à des plantations de cette nouvelle essence ou provenance dans des **conditions contrôlées**, sur un éventail de stations.

Des programmes de recherche ont déjà été initiés pour répondre à ces questions (Giono, RENessences, etc.). Les Ilots d'avenir de RENessences en sont un exemple. Ces plantations expérimentales testent de nouvelles essences allochtones ou de nouvelles provenances, susceptibles d'être adaptées au climat futur. Elles sont installées en plantations monospécifiques, généralement de l'ordre de deux hectares, pour tester leur capacité de survie et de croissance sur différentes stations en limitant les interactions avec les ongulés sauvages par un engrillagement.

- Les **essences locales**, aujourd'hui utilisée comme essences « d'accompagnement » et qui sont identifiées comme adaptées aux conditions climatiques futures, peuvent-elles servir d'essences de production ?

Le rôle attribué aux essences est en partie déterminé par la production de ces espèces mais aussi par les demandes de la filière bois, des effets de modes, etc. Ce marché du bois pourrait tendre à changer avec les dépérissements et la diversification des essences des peuplements. Des essences autochtones (ou assimilées) de provenance locale pourraient alors convenir aux propriétaires, autant par leurs capacités de production (une fois valorisées par la sylviculture) que par les demandes du marché du bois dans le contexte de changements climatique à venir. Il faut **alors étudier la croissance de ces essences dans des conditions de gestion qui favorisent leur bon développement** (accès à la lumière privilégié, travail de la végétation environnante en leur faveur, bonne conformation des tiges, etc.).

b) Mieux définir la gamme de vie climatique des essences

Les changements climatiques induisent la mortalité des arbres dans leurs limites chaudes et sèches par la modification des températures et des précipitations (Taccoen et al., 2022). Pour anticiper ces répercussions et fournir les conseils de gestions adaptés, plusieurs outils ont été développés. ClimEssence du Réseau Mixte Technologique (RMT) Aforce, BioClimSol du CNPF et Forestys une solution privée, utilisent différentes prédictions et indicateurs du climats futur, combinés à nos connaissances des essences et de leurs comportements pour conseiller les gestionnaires dans leurs choix d'essences.

Toutefois, des questions restent à explorer quant à des adaptations phénotypiques ou génotypiques des individus de certaines essences, lorsqu'ils se développent dès les stades juvéniles dans des situations en limite ou hors limite de leur amplitude climatique actuellement connue.

Autrement dit :

- Quelles sont les gammes de vie climatiques des essences locales ?

Cette question peut avoir un intérêt important pour le sylviculteur tant dans la valorisation éventuelle de recrûs naturels que dans l'utilisation dans une plantation d'essences qui pourraient paraître condamnées.

Un moyen de valider ces prédictions est l'étude empirique. L'un des chercheurs rencontrés travaille actuellement à la création d'un projet visant à évaluer la gamme de vie climatique de 50 essences utilisées en France (comme essences principales mais aussi comme essences secondaires), placées dans des marges chaudes et des marges froides en conditions de sol favorables et sans compétition. Dans un premier temps, c'est la connaissance des essences hors

conditions de mélange qui est priorisée, mais elle peut permettre par la suite de composer des mélanges ayant différents degrés de sécurité vis-à-vis du changement climatique.

c) Etudier des interactions entre essences

Au cours des entretiens, les chercheurs ont souvent fait remonter les lacunes dans les connaissances des interactions entre essences. Les études menées sur des mélanges portent généralement sur les mêmes espèces, qui sont des essences de production actuelle et qui représentent une grande proportion du couvert forestier. De plus seuls les mélanges les plus connus permettent d'obtenir la quantité de données nécessaire à des études. Or, dans un contexte d'incertitude vis-à-vis de la survie et de la capacité de production des essences, le besoin d'explorer de nouveaux mélanges se fait ressentir.

Les questions adressées à ces nouveaux mélanges peuvent être :

- Comment deux essences modifient-elles leurs croissances (en hauteur et en diamètre) par compétition ou facilitation vis-à-vis :
 - * de l'accès à la lumière ;
 - * du partage des ressources du sol, et notamment de l'eau disponible ?
- Comment la forme des individus (branches latérales fortes, fourches, déviations des tiges, ...) des deux essences est-elle affectée (améliorée, détériorée, ...) ?

Ces questions sont posées par rapport à une approche à deux essences, ce qui semble plus adéquat pour établir des plans d'expérimentation, mais en fonction des méthodes, et surtout des moyens disponibles, des mélanges plus complexes pourraient être testés.

À noter aussi que l'échelle d'imbrication du mélange, le design d'implantation, les densités, etc., ont aussi un impact sur les interactions entre individus et espèces du peuplement. Cette question sera abordée dans le volet « Niveau de mélange ».

Enfin, les conditions stationnelles peuvent modifier les interactions entre essences (cf. e/ Etude la dynamique spatio-temporelle des interactions).

De nouveaux mélanges d'essences doivent donc être identifiés. Selon les enjeux du propriétaire et les aléas craints, ces mélanges peuvent soit associer des essences actuelles à des essences supposées plus résistantes, soit être uniquement composés d'essences dites « résistantes » aux changements climatiques.

Les essences à expérimenter peuvent être choisies pour la complémentarité des traits fonctionnels relatifs à leur utilisation de l'eau et de la lumière. Ces mélanges peuvent aussi être établis sur la base du comportement des essences (tolérance à l'ombre et vitesse de croissance).

Une proposition des chercheurs porte sur les **mélanges employant des essences locales « secondaires »** les plus résistantes aux climats futurs, pour étudier leurs interactions entre elles ou avec des essences de productions actuelles (et en constituant aussi des références en conduite monospécifique si elles n'existent pas).

Des dispositifs testant ces mélanges se mettent en place depuis quelques années, comme dans le cadre du projet FORest BIOdiversity and ecosystem functioning (FORBIO) mis en place en Belgique en 2014. Ce projet étudie des mélanges originaux de 5 essences assemblées en

monoculture ainsi qu'en culture mélangée à 2, 3 ou 4 essences. Ce type de dispositif pourrait être étendu, ou servir de modèle pour la mise en place de l'étude de nouveaux mélanges.

d) Préciser les effets de l'environnement sur les interactions

L'environnement joue aussi un rôle dans la réponse des interactions entre espèces. La disponibilité des ressources, les conditions climatiques, la densité du peuplement, l'âge du peuplement, etc., sont des paramètres qui modifient la dynamique des interactions au sein d'un mélange donné (Mina et al., 2018). L'environnement biotique est aussi un facteur à prendre en compte dans la dynamique du mélange.

De ce fait, la végétation accompagnatrice rajoute des interactions supplémentaires parmi les interactions entre essences et peut ainsi changer la dynamique du mélange.

L'influence de ces facteurs varie également en fonction du temps et par exemple du stade de développement du peuplement.

Globalement, les mécanismes à l'œuvre dans la réponse des interactions du mélange à leur environnement restent peu quantifiés (Forrester, 2014). La dynamique d'un mélange est liée aux essences qui le composent et à l'environnement dans lequel il se situe, ce qui rend les résultats difficilement généralisables. Les nouveaux mélanges identifiés doivent être testés à travers des gradients environnementaux pour comprendre comment s'expriment d'une part les interactions de nature compétitrice et d'autre part des interactions de nature facilitatrice dans ces mélanges. C'est pourquoi les questions précédemment listées au paragraphe d/, concernant les interactions, sont à remettre dans un contexte plus complexe :

- En quoi les réponses sont-elles modifiées en fonction des stations (selon des gradients environnementaux abiotiques comme la pluviométrie, les températures, la richesse trophique, la réserve utile en eau du sol, ...) ?
- En quoi les réponses sont-elles modifiées en fonction de facteurs biotiques (comme la pression des cervidés, des rongeurs, de bio-agresseurs des stades juvéniles) ?
- En quoi les réponses évoluent-elles dans le temps, par exemple avec le stade de développement du peuplement ?

La prise en compte des stations peut être réalisée par le choix d'implantation de dispositifs dans différentes sylvo-écorégions choisies pour créer un gradient climatique et trophique. La question de la réserve en eau des sols peut être abordée par le choix de stations forestières contrastées à l'intérieur d'une sylvo-écorégion.

La pression des cervidés est actuellement un fait dans la plupart des forêts françaises. Les niveaux d'appétence et de consommation des essences étant variables, il est difficile de mesurer des interactions sur les croissances des plants ou semis sans en tenir compte. La plupart des chercheurs interrogés préconisent de protéger efficacement les dispositifs de façon à annuler cet effet, car le contrôle de la force de cette pression in situ est quasiment impossible.

La question des stades de développement incite à concevoir des dispositifs dont le suivi sera réalisé sur un moyen terme. En particulier, les conséquences des choix sylvicoles sur la forme des plants ou semis ne peuvent guère s'évaluer avant un stade gaulis ou bas perchis, ce qui demande aussi lors de la conception des dispositifs de tenir compte des interactions qui pourront

se produire avec des peuplements de 7 à 8 m de hauteur, ne serait-ce que pour le dimensionnement des zones tampons entre modalités.

e) Référencer les nouvelles croissances et productions de bois dans le cadre du changement climatique

Les années sèches entraînent une diminution de la croissance des essences en place (Latte et al., 2015; Weemstra et al., 2013) (voir un dépérissement dans les cas les plus graves). S'ajoute à cela la modification de la niche écologique des essences qui nécessitera un probable changement des provenances et/ou des essences qui composeront les peuplements.

De plus, certaines études indiquent que les essences adaptées au futur climat ont une croissance plus lente que les essences actuelles (Thurm et al., 2018). Du point de vue des provenances, la résistance à la sécheresse se fait parfois aussi au détriment de l'accroissement (Montwé et al., 2015).

La question de la productivité attendue par le propriétaire est donc au cœur du choix des essences du peuplement, de même que celle de la valeur qui sera accordée par la filière forêt-bois aux essences produites :

- Dans le contexte des changements climatiques, quels accroissements, quelles durées de production attendre pour les futurs arbres implantés ou régénérés ?
- Quelles utilisations et valorisations futures des bois peut-on espérer, en particulier pour les essences locales résistantes mais considérées actuellement comme « secondaires » ?

Il peut y être ajouté la valorisation économique des autres services écosystémiques rendus par les peuplements mélangés installés qui pourrait, par exemple, conduire un propriétaire à renforcer la diversité de ses peuplements.

Ces questions relèvent essentiellement de l'étude des peuplements adultes ou du domaine de l'économie. Elles sont donc citées ici mais ne seront pas davantage développées dans le cadre de cette étude centrée sur l'implantation de renouvellement mélangé et donc sur les stades juvéniles.

Les auteurs soulignent toutefois que ce type de questions rend bien compte de la complexité des facteurs entrant dans la prise de décision du propriétaire. L'aide qui pourrait être apportée dans cette prise de décision relève notamment des analyses multi-critères qui n'ont pas été approfondies dans cette étude mais qui constituent un réel domaine de recherche.

f) Evaluer les degrés de sécurité attendus par les mélanges et leurs designs

Le « degré de sécurité » peut être vu de façon large comme :

- le degré de résistance aux perturbations, définie comme la capacité du système à empêcher la perturbation d'avoir une influence sur le peuplement (ex : éviter la mortalité des arbres dans le cas d'une forêt) ; cette résistance est toujours relative et lorsque son seuil est atteint le peuplement subit alors la perturbation ;
- la capacité de résilience du peuplement, c'est-à-dire, la capacité du peuplement à retourner à son état initial ou à un état proche, après avoir été impacté par la perturbation (ex : capacité à recréer un couvert forestier après la mortalité d'une partie des individus).

Le propriétaire, dans son choix d'essences à planter, peut vouloir accorder une importance plus ou moins grande à cette sécurité vis-à-vis des évolutions climatiques, à l'instar d'une police d'assurance qui va entraîner des frais – se traduisant ici par des moindres croissances des essences résistantes, des coûts de travaux de reconstitution, des frais de gestion de la reconstitution augmentés, ... - pour couvrir en tout ou partie un dépérissement à l'ampleur incertaine.

Les questions sont alors :

- quelle composition répond le mieux en termes de résistance aux aléas attendus et aux enjeux du propriétaire, l'incertitude pouvant par exemple être prise en compte en associant des essences à degrés de résistance et niveaux de production différents ?
- quelle composition et quelle structuration spatiale de reconstitution mélangée confère une meilleure résilience au peuplement, notamment dans le cas d'une mortalité d'une partie des essences ?
- un mélange d'essences progressif dans le temps peut-il permettre de réduire des coûts et de retarder la mise en place d'autres essences reconnues comme plus résistantes après essai (par exemple tirer parti de bouleaux, de peupliers, etc., avant d'installer sous abri une ou plusieurs essences 10 ou 20 ans plus tard) ?

Ces questions recourent celles déjà abordées dans les parties précédentes pour ce qui concerne le choix des essences et leurs interactions en adéquation avec la station.

Quant à la structuration spatiale du peuplement (ex : la finesse du mélange ou la proportion des essences), elle va dépendre des stratégies de reconstitution adoptées. Ces stratégies seront abordées dans la partie suivante.

Ce type de question rejoint aussi les approches multicritères afin de répondre au mieux à l'ensemble des enjeux du propriétaire, pour balancer notamment avec les avantages et/ou risques économiques plus éloignés dans le temps, procurés par ces mélanges.

IV. Les stratégies de reconstitution

Les crises sanitaires actuelles provoquent le renouvellement prématuré de nombreux peuplements. Cependant, dans le contexte des changements climatiques, les stratégies de reconstitution habituelles peuvent être adaptées pour permettre de constituer des peuplements répondant aux incertitudes à venir.

Les deux thématiques mises en avant par le sondage, à l'intérieur de la rubrique « stratégies de reconstitution », sont le niveau de mélange et le diagnostic du potentiel de la régénération naturelle (Figure.6). Les préoccupations prioritaires des gestionnaires sont donc assez opérationnelles et orientées vers (i) le degré de mélange et la manière d'imbriquer les essences entre elles et (ii) la manière d'exploiter le recrû à disposition pour (re)constituer un peuplement mélangé.

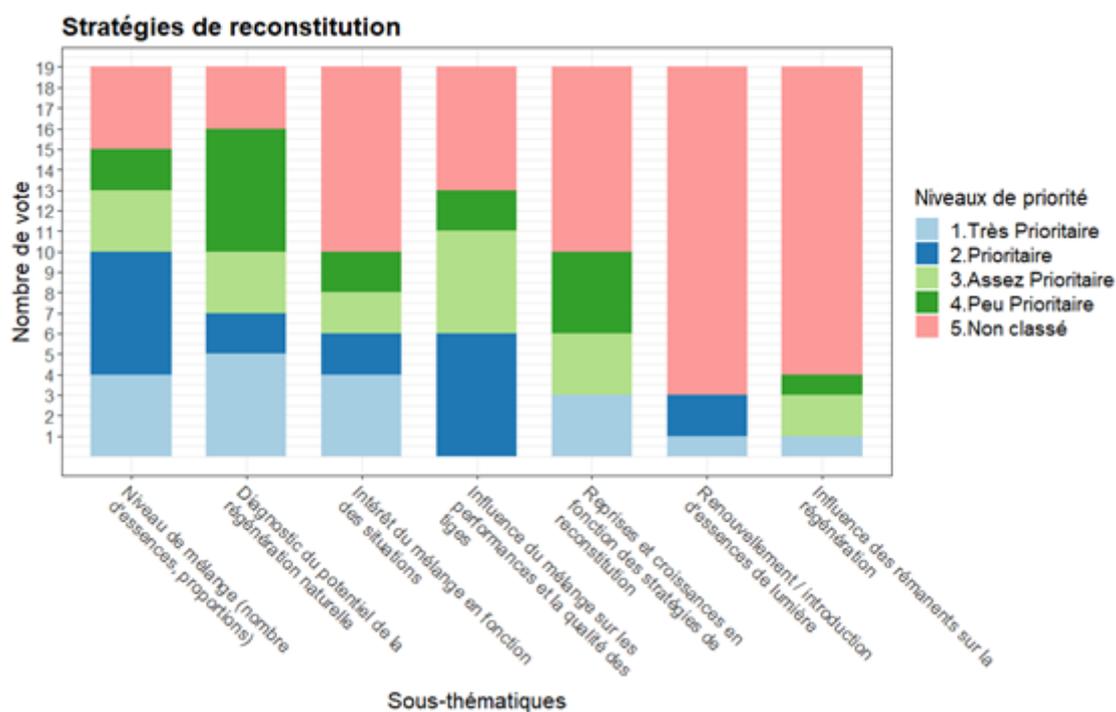


Figure.6 Histogramme cumulé des votes des gestionnaires pour la hiérarchisation des 7 sous-thématiques de « Stratégies de reconstitution »

Au sens large, une stratégie de reconstitution englobe le choix des essences précédemment étudié. Toutefois, dans cette partie et comme présenté dans le sondage, une stratégie de reconstitution sera surtout analysée comme un choix de proportions des essences à associer, de design spatial et de technique de plantation.

Niveau de mélange du peuplement

Le niveau de mélange est une question complémentaire du choix des essences du peuplement. Lors du renouvellement, les questions du nombre d'essences, des proportions de chacune d'elles et de leur disposition (enrichissement ou plantation en plein, à grand écartement, par placeaux ou en bandes, etc.) se posent rapidement aux propriétaires et gestionnaires.

Les enjeux et contraintes du propriétaire vont grandement orienter ces choix (a) de nombre d'essences, (b) de proportions de chacune, ainsi que (c) de l'organisation spatiale des essences entre elles. Plus le mélange sera diversifié et imbriqué de manière fine, plus les interactions seront nombreuses. Cela peut faciliter la gestion du peuplement si les essences du mélange ont une bonne synergie ou au contraire nécessiter plus d'interventions pour canaliser les interactions et orienter le peuplement vers le comportement souhaité.

Le choix du niveau de mélange répond donc plus à la prise en compte des enjeux, souvent croisés, du propriétaire qu'à une question plus scientifique de comportement des essences. C'est pourquoi les chercheurs rencontrés ont en effet souvent privilégié la question des interactions entre essences à celle du niveau de mélange.

En effet, lors des entretiens, les chercheurs n'ont pas émis beaucoup de propositions quant à la thématique du niveau de mélange des peuplements à régénérer. Cependant, à travers l'ajout de modalités (variation du nombre d'essences, de la proportion et de l'imbrication des essences entre elles), il est possible de traiter la question du niveau de mélange dans les expériences traitant des interactions entre essences. Cette association serait même complémentaire du point de vue de la dynamique des interactions.

Enfin, les gestionnaires ayant mis ces questions en avant dans le sondage, il a paru important de traiter cette thématique dans ce document. Les questions listées ci-dessous relèvent donc surtout de propositions des auteurs et pourront être amendées dans la version finale de ce document en fonction des retours reçus.

a) Le nombre d'essences en mélange

Lors des reconstitutions, le nombre d'essences peut être « imposé » dans le cas de la régénération naturelle ou choisi dans le cas de régénération artificielle ou assistée.

Augmenter le nombre d'essences dans une reconstitution est souvent perçu comme un frein :

- l'hétérogénéité des produits rendra leur commercialisation plus difficile ;
- l'installation du peuplement sera plus coûteuse et les plantations plus délicates car il faudra un approvisionnement en différentes essences au même moment ;
- les suivis (dégagements, etc.) risquent de s'étaler sur des périodes plus longues et de devoir être différenciés entre essences ;
- etc.

Cependant, la résilience du peuplement peut être augmentée par la présence de différentes essences. Par exemple, par la présence de bouleau dans la régénération qui accroît les chances de reconstitution en libre évolution (Laurent and Lacombe, 2021). Or la présence de bouleau dans la régénération nécessite d'en avoir conservé dans les peuplements environnants. Les

questions portent donc sur les avantages produits par l'augmentation du nombre des essences, pour contrebalancer ces effets négatifs réels ou supposés :

- Pour quelle augmentation du nombre d'essences en mélange obtient-t-on un bénéfice significatif dans la résistance d'un peuplement (aux bio-agresseurs, aux déstabilisations, aux sécheresses, ...) ? Cela peut rejoindre la thématique du degré de sécurité recherché, déjà abordée précédemment.
- Idem pour ce qui concerne la résilience du peuplement à différents types de perturbations : la diversité des essences peut-elle alors aboutir à des renouvellements plus aisés ?

Cette question commence à être saisie par la recherche. Par exemple, il semblerait que la résistance aux insectes phytophages soit à mettre en relation avec le nombre mais aussi l'identité des espèces qui composent le mélange (Jactel and Brockerhoff, 2007). Cependant cette question demande encore à être généralisée en fonction des conditions environnementales et des perturbations redoutées.

- Cette augmentation procure-t-elle une meilleure résilience économique avec des produits qui permettront de mieux profiter d'un marché fluctuant ? Quel degré d'adaptation de la filière peut-on attendre vis-à-vis de ces nouvelles associations d'essences, de plus petites quantités commercialisées ?

Les chercheurs recommandent d'étudier l'adaptation de la filière au nouveau marché du bois qui devrait se développer avec la pratique du mélange d'essences. Cette compréhension du nouveau marché du bois permettra ensuite d'évaluer la viabilité d'un peuplement mélangé.

- Cette augmentation permet-elle de retourner plus rapidement vers des écosystèmes forestiers fonctionnellement restaurés ?

Ces questions peuvent presque toutes être déclinées en fonction de certains facteurs comme la station, la surface du peuplement concerné et celle de la propriété (une petite surface peut compliquer la commercialisation ultérieure des bois), l'organisation de la gestion, etc.

Ces questions rejoignent les questionnements précédents, relatifs au choix des essences (cf. paragraphe « Choix des essences ») : la question du nombre n'est bien sûr pas indépendante de celle concernant les comportements des essences et de leurs interactions.

À ce titre, les expérimentations et des suivis portant par exemple sur les interactions pourront envisager des associations plus complexes que des associations deux à deux.

La question du nombre est aussi liée à celles de la proportion et de l'imbrication des essences entre elles.

b) La proportion des essences

Les questions relatives au nombre d'essences en mélange, peuvent être reprises en y ajoutant celle de la proportion des essences :

- À partir de quelle proportion une essence donnée aura-t-elle un rôle significatif dans le mélange ?

- Dans quelle mesure la proportion des essences en mélange influence-t-elle la compétition interspécifique exercée ?

Les proportions des essences d'un peuplement mélangé peuvent varier au cours du temps : les dynamiques naturelles, mais aussi les interventions humaines, vont modifier ces proportions. Par exemple, les essences pionnières (forte capacité de colonisation et de dispersion) sont généralement supplantées par des essences plus tolérantes à l'ombrage et plus compétitrices.

- Dans le cas d'un mélange composé d'essences « objectif » et d'essences « d'accompagnement », quel est le degré d'intervention nécessaire pour maintenir une essence en proportion suffisante ?
- Et comment évoluent les proportions du mélange au cours du temps, sans interventions humaine, sous un climat différent qui pourrait modifier le comportement de certaines essences (compétition du hêtre moins affirmée par exemple) ?

c) L'imbrication spatiale du mélange

La manière dont est organisé spatialement le mélange va jouer un grand rôle sur les interactions entre essences. Un mélange organisé par bouquets va permettre de limiter les interactions entre essences aux lisières des autres bouquets ou du recru. Le centre du bouquet se développera en conditions « monospécifiques » pour les jeunes stades, puis il y aura interaction avec les autres essences lors des stades ultérieurs. Plus l'unité d'installation sera petite plus les interactions entre essences auront lieu à des stades précoces. Cette imbrication doit donc être réfléchiée en tenant compte de la synécologie des essences pour créer des interactions qui favorisent une bonne croissance et limiter les interactions qui pourraient aboutir à une mauvaise conformation des tiges ou à la perte du mélange.

Questions pouvant se poser :

- Pour une même proportion d'essences, quelle organisation spatiale d'une plantation est la plus favorable au développement de tiges de qualité en limitant les interventions ?
- Même question avec l'ajout de plants, individuellement ou par placeaux, dans du recru naturel ?

En cas de mortalité d'une des essences, par exemple liées aux changements climatiques, le degré de finesse d'imbrication du mélange permettrait de répartir la surface sinistrée en des zones plus ou moins petites. Une imbrication fine pourrait favoriser une recolonisation plus rapide par les essences résistantes voisines et le peuplement pourrait ne pas être totalement compromis en termes de production, un couvert presque continu perdurant.

- Cette hypothèse est-elle vérifiée d'un point de vue économique, en se plaçant dans des contextes stationnels diversifiés et avec des essences à comportements différents ?

Diagnostic du potentiel de la régénération naturelle

Dans les parties précédentes, les essences du recrû naturel sont souvent amenées à participer au mélange, en jouant *a minima* un rôle d'accompagnement ou en constituant tout ou partie du peuplement principal, selon l'adéquation des essences présentes avec la station et les enjeux du propriétaire. Cela permet, par exemple, de limiter les interventions en plantation ou souvent de diminuer les coûts d'installation du peuplement. Le recrû peut aussi servir à la protection et au gainage des plants.

L'utilisation du recrû naturel demande alors d'évaluer sa composition, sa densité, sa répartition, ce qui, en matière de diagnostic, fait l'objet d'une attente des gestionnaires.

Ce diagnostic doit permettre de faire le bilan de la végétation naturelle présente. Il fait état :

- des essences présentes,
- des caractéristiques de la station,
- de la capacité de production des essences en présence sur la station,
- de la quantité de semis disponible,
- de la pression d'herbivorie exercée sur la régénération,
- de la végétation concurrente à surveiller lors du développement des semis,
- etc.

Cette évaluation permet ensuite d'établir la stratégie de reconstitution la plus adaptée et de construire un itinéraire technique, prévoyant les interventions à réaliser pour obtenir une régénération satisfaisante (travaux sylvicoles, plantations, protections contre l'abrouissement, etc.). Elle revêt une importance supplémentaire en contexte de crise sanitaire, où les moyens financiers et humains peuvent être limités suite à la gestion de la crise.

Acquisition de la régénération naturelle

d) Favoriser l'apparition de la régénération

En situation de renouvellement classique, l'apparition de la régénération s'effectue très souvent à l'aide d'une ouverture progressive et contrôlée du couvert forestier. En conditions post-crise la coupe rase crée une ouverture brutale du couvert et ne permet pas la mise en régénération progressive du peuplement. Les nouvelles conditions lumineuses, thermiques et hydriques couplées aux sécheresses des changements climatiques rendent l'acquisition de la régénération parfois difficile.

L'approche envisagée par les chercheurs lors des entretiens relève des micro-habitats forestiers créés lors de l'exploitation du peuplement atteint par la crise :

- Quelle gestion des rémanents (taille, quantité et répartition) lors de l'exploitation du peuplement atteint par la crise, crée des conditions microclimatiques favorisant la diversité et la quantité de semis d'essences forestières ?

Les gestionnaires quant à eux ont plutôt soulevé la question suivante :

- Quel nombre d'arbre relictuels conservés lors de l'exploitation du peuplement atteint par la crise crée des conditions microclimatiques favorisant la diversité et la quantité de semis d'essences forestières ?

e) Déterminer l'origine et lever un blocage

Dans le cas d'un blocage, il est possible d'améliorer les conditions environnementales pour favoriser l'obtention d'une régénération diversifiée et abondante.

De nombreux facteurs peuvent entrer en jeu dans l'expression de la régénération. La quantité et la diversité des graines disponibles (années favorable à la fructification d'une essence, conditions de fructification différentes selon les essences), la germination des graines (conditions environnementales favorables à la germination comme l'eau, la luminosité, la présence d'animaux favorisant la germination des graines), la dispersion des graines (distance au semencier et l'absence d'animaux dispersant les graines) et la survie des semis (conditions climatiques, pathogènes, végétation concurrente, herbivorie) sont autant de facteurs pouvant expliquer le blocage.

Certains de ces freins sont modulables par la gestion à travers des interventions sylvicoles. Et peuvent donc être levés à condition de les identifier.

Il existe déjà plusieurs dispositifs traitants de la détermination et de la levée de ces blocages tel que le projet REGEneration naturelle en situation de BLOCage (REGEBLOC) du pôle RENouvellement des peuplements FORestiers (RENFOR) de l'ONF et de l'INRAE.

Il n'est donc pas proposé ici de développer spécifiquement des expérimentations et suivis supplémentaires.

f) Laisser la diversité s'exprimer

Après l'ouverture du peuplement, les essences à caractère pionnier s'installent rapidement. Elles sont ensuite remplacées par des essences plus compétitives (Horn, 1974). C'est pourquoi on attend généralement quelques années après l'ouverture du peuplement pour faire le diagnostic. Inversement, si l'on tarde à réaliser le diagnostic et à enclencher des travaux sylvicoles, des essences peu tolérantes à la compétition peuvent disparaître du recru. Repousser les interventions peut aussi permettre à une espèce concurrente d'envahir le recru et de provoquer la disparition d'une partie, voire de la totalité, des semis d'essence d'intérêt. Il est alors important de trouver un compromis afin de disposer d'un maximum d'essences pour reconstituer un peuplement mélangé. Les retours d'expériences des gestionnaires et l'expérience de l'observatoire post-tempête, ciblent 3 à 4 ans après l'ouverture du peuplement pour la réalisation du diagnostic (Laurent and Lacombe, 2021). Cette observation pourrait être validée dans le cadre d'un observatoire post-scolytes, les conditions de développement d'un recru pouvant être supposées plus difficiles compte tenu du peuplement antécédent d'épicéas dense, tel que l'observatoire post tempête le laisse penser sur un échantillon de sites toutefois trop faible :

- La réalisation du diagnostic 3 ans après l'ouverture brutale du peuplement, permet-elle à la majeure partie de la régénération naturelle de s'exprimer ?

Utilisation de la régénération naturelle

Après acquisition de la régénération, l'enjeu est alors de l'exploiter au mieux pour reconstituer le peuplement.

g) Sélectionner les essences

Les essences présentes dans la régénération naturelle diffèrent en fonction de la station, des antécédents cultureux et des peuplements environnants. La composition de cette régénération est donc très variable d'une parcelle à l'autre. Afin de s'appuyer sur la régénération naturelle pour reconstituer son peuplement, il faut d'abord identifier les essences à disposition en réalisant le diagnostic de régénération naturelle.

Cette partie rejoint les questions précédentes sur la capacité des essences à tolérer les perturbations et à rester productive dans le contexte des changements climatiques à venir (cf. « Choix des essences » p9).

h) Ajuster le degré d'intervention

L'utilisation de la régénération naturelle pour la reconstitution du peuplement est un moyen important pour limiter les investissements humains et financiers. Il est d'autant plus important en situation post-crise, où le propriétaire est parfois limité dans ses investissements après la gestion d'urgence du peuplement. Lorsque la régénération naturelle n'est pas assez abondante ou diversifiée, il est alors possible de compter sur l'intervention en travaux sylvicoles et la dynamique naturelle pour permettre à de nouveaux semis de s'installer. Il est aussi possible de compléter cette régénération par des enrichissements, légers à très interventionnistes (libre évolution, travail de la régénération naturelle, enrichissement, plantation en plein mélangée) :

- À partir du recrû à disposition, quelle doit être l'intensité d'intervention à pratiquer pour obtenir une régénération satisfaisante du point de vue sylvicole (de quantité et qualité satisfaisante, diversifiée et adaptée aux conditions climatiques futures) ?

Cette question rejoint celles des proportions et du design de plantation déjà évoquées. S'agissant davantage d'une question en lien avec les pratiques de gestion, elles pourraient être documentées dans un observatoire. Elle peut aussi être abordée du point de vue de la recherche par l'étude des consommations d'eau :

- L'accompagnement ligneux permet-il de réduire globalement la demande climatique en eau (évaporation du sol, transpiration de la régénération, de la végétation accompagnatrice) en réduisant les radiations, la vitesse du vent, tout en étant pas lui-même un trop fort compétiteur pour l'eau/la lumière ?

V. Pistes de réflexion liées aux thématiques transversales

Les chercheurs rencontrés ont évoqué plusieurs points ne s'inscrivant pas directement dans les thématiques mises en avant par le sondage et qui pourraient être explorés à travers des expérimentations pluridisciplinaires ou faire l'objet d'études spécifiques en complément des questions produites par la consultation des gestionnaires.

Représentations sociales de la forêt :

Des questions en lien avec les reconstitutions sont à traiter du point de vue de l'anthropologie sociale :

- Quelles sont les représentations des acteurs du milieu forestier concernant différents degrés d'intervention en travaux ou en plantation (choix d'essences, utilisation partielle ou totale de la régénération naturelle, etc.) ? C'est ici l'aspect symbolique de la plantation, et non l'aspect technique, qui serait étudié. Il serait aussi intéressant d'aborder la tolérance des différents acteurs envers la plantation, selon leur degré d'anthropisation.

Economie forestière :

Les entretiens et discussions avec les chercheurs en économie forestière ont fait ressortir l'importance de mieux intégrer la complexité des mélanges dans les modèles employés (nombre et proportion des essences). Cette intégration du mélange serait la première étape afin de pouvoir traiter au mieux les questions des gestionnaires.

Sols forestiers :

Du point des sols forestiers, certaines questions ont paru plus prioritaires que celles soulevées par les gestionnaires concernant les mélanges. Par exemple :

- Quels sont les effets du travail du sol sur les plantations et les services écosystémiques rendus par les sols forestiers ?
- Quelles sont les répercussions de la mise en place des cloisonnements d'exploitation sylvicole sur le fonctionnement hydrique des sols ?

Equilibre sylvo-cynégétique :

La manière de traiter le déséquilibre forêt-gibier est une question récurrente du point de vue de la gestion. Même si les gestionnaires n'ont pas mis en avant cette thématique à travers les niveaux de priorités attribués, ils ont souvent indiqué en commentaires que la solution était déjà trouvée : il s'agit de la chasse. La question réside alors dans la gestion de la chasse en lien avec la gestion forestière. C'est aussi ce que soutiennent les chercheurs rencontrés. Des études, comme celle proposée dans le projet ASKAFOR (Duwe, 2022), essaient d'identifier les points à corriger et les solutions à mettre en place sur la base d'exemples de gestion dans les pays voisins. Ces actions restent à poursuivre pour permettre à la situation d'évoluer avec l'adaptation des pratiques de chasse et la formation des chasseurs à ces nouvelles pratiques.

Gestion des peuplements adultes :

En parallèle de l'effet du mélange évoqué pour apporter de la résistance et de la résilience aux peuplements, les chercheurs ont aussi évoqué l'aspect de gestion des peuplements adultes. La densité des peuplements a été identifiée comme un moyen pour diminuer la consommation en eau des sols et permettre de diminuer les impacts de la sécheresse sur ces peuplements (Bottero et al., 2017; Schmitt et al., 2020). Ces études souvent menées sur des peuplements réguliers demanderaient à être étendues aux peuplements gérés en sylviculture mélangée à couvert continu.

Biodiversité :

Les effets des mélanges sur la biodiversité dépendent des compartiments étudiés (Gosselin and Bouget, 2003). Avec le renforcement de l'installation de peuplements mélangés, la question prend d'autant plus de poids.

- Quels sont les effets du mélange sur la biodiversité (au sens large du terme) ?

Les chercheurs rencontrés recommandent d'explorer les effets du mélange sur les autres compartiments de la biodiversité que celui des ligneux et semis ligneux.

VI. Conclusion

Une partie des questions soulevées a été saisie par la communauté scientifique, même si la compréhension des mécanismes à l'œuvre reste à approfondir. Une première étape souvent ciblée est la compréhension des interactions entre les essences ainsi que la dynamique de ces interactions. S'en suivra la compréhension des mécanismes fin du mélange et à l'organisation spatiale de celui-ci.

Une partie encore peu explorée est celle de l'utilisation du recrû naturel pour la constitution de mélanges et la gestion des situations de crise.

Ces différentes thématiques peuvent être explorées par la recherche à travers différents dispositifs. Les expérimentations permettent de comprendre les mécanismes à l'œuvre derrière les réponses des peuplements aux facteurs testés dans des environnements assez contrôlés, même *in situ* ; tandis que les dispositifs de type « observatoire » permettent d'explorer la dynamique des réponses à travers des gradients environnementaux dans des conditions moins contrôlées mais plus proches de la gestion.

Dans les suites données au projet EGIDE, nous proposons des dispositifs d'expérimentation ou d'observation pour traiter les questions des gestionnaires et des chercheurs, identifiées précédemment (Tableau.1).

Des propositions plus détaillées des plans d'expérimentation et de l'Observatoire des Reconstitutions Mélangées post-Scolytes (ORMS) sont disponibles dans les documents « Plans d'expérimentation » et « Observatoire des Reconstitutions Mélangées post-Scolytes ».

Tableau.1 Proposition de dispositifs à mettre en place pour explorer les questions de recherches identifiées. Ces propositions sont indiquées par les croix « X » dans les colonnes « Observatoire » et « Expérimentation » lorsque le dispositif semble être adapté à la thématique. Les colonnes suivantes indiquent si les questions ont été incluses dans les dispositifs proposés par les actions du projet EGIDE.

Libellé synthétique des questions précédemment listées	Localisation de la question dans le document	Observatoire	Expérimentation	Dispositifs abordés dans EGIDE traitant de la thématique.	Complément
Tests d'essences allochtones ou provenances	III.a) Page 11		X		En cours de traitement par ailleurs à travers des expérimentations.
Test et suivi sylvicole d'essences locales adaptées	III.a) Page 11	X	X	Expérimentation 1 et ORMS	Etude dans l'ORMS possible, selon les essences qui seront sélectionnées par les propriétaires des sites : intérêt d'étudier la qualité des perches obtenues d'essences souvent peu favorisées jusqu'à présent en sylviculture.
Gamme de tolérance des essences aux changements climatiques	III.b) Page 12		X		En cours de traitement par ailleurs à travers des expérimentations.
Tests de nouveaux mélanges pour la croissance et la forme des tiges	III.c) Page 13		X	Expérimentation 2	En cours de traitement par ailleurs à travers des expérimentations mais une extension régionale serait intéressante pour l'utilisation en mélange des essences locales dites « secondaire » comme essences principales, et pour affiner l'effet des densités et proportions citées par les gestionnaires.
Effets de l'environnement biotique (bio-agresseurs, ongulés) sur les interactions entre essences	III.d) Page 14		X		Etude à coupler à des tests de mélanges.
Effets de l'environnement abiotique (stations) sur les interactions entre essences	III.d) Page 14		X	Expérimentation 2	
Dynamique temporelle du mélange	III.d) Page 14	X	X	Tous potentiellement	Cette question peut être abordée dans l'ensemble des dispositifs à condition qu'ils soient dimensionnés pour suivre assez longtemps les tiges.

Libellé synthétique des questions précédemment listées	Localisation de la question dans le document	Observatoire	Expérimentation	Dispositifs abordés dans EGIDE traitant de la thématique.	Complément
					L'observatoire fournira des données très parcellaires mais a par contre une bonne dimension dès le départ.
Changements climatique et croissance des peuplements	III.e) Page 15	X			
Valorisation future des bois d'essences secondaires	III.e) Page 15		X		
Nombre d'essences pour augmenter la résistance	IV.a) Page 18	X	X	partiellement	ORMS peut y contribuer dans un nombre de cas restreints avec une longue durée ; E1 et E2 aussi mais essentiellement sur les phases juvéniles de reprise.
Nombre d'essences pour augmenter la résilience	IV.a) Page 18	X	X	partiellement	
Nombre d'essences et résilience économique (adaptation du marché du bois)	IV.a) Page 18				Relève d'études plutôt que de dispositifs sur le terrain. Les études devront s'appuyer sur des résultats (expérimentations ou observatoires).
Proportion d'une essence et significativité de son rôle dans le peuplement	IV.b) Page 19		X	Expérimentation 2	
Proportion et dynamique de la compétition interspécifique	IV.b) Page 19		X	Expérimentation 2	
Interventions et maintien d'une essence	IV.b) Page 19	X			

Libellé synthétique des questions précédemment listées	Localisation de la question dans le document	Observatoire	Expérimentation	Dispositifs abordés dans EGIDE traitant de la thématique.	Complément
Dynamique des proportions sans intervention et effet du climat	IV.b) Page 19	X	X	ORMS	
Organisation spatiale du mélange et interventions favorables	IV.c) Page 20	X		ORMS	
Organisation spatiale du mélange dans le recrû et interventions favorables	IV.c) Page 20	X	X	Expérimentation 1 et ORMS	
Résilience économique des mélanges fins	IV.c) Page 20				Cette thématique ne semble relever directement ni d'observatoire, ni d'expérimentation mais d'une étude économique. L'ORMS pourrait fournir des données mais ne pourrait pas traiter la question directement.
Gestion des rémanents et acquisition de la régénération naturelle	IV.d) Page 21	X	X		
Gestion des arbres relictuels et acquisition de la régénération naturelle	IV.d) Page 21	X	X		Très demandée par les gestionnaires. Pourrait relever de l'études de coupes de régénération fortes suite à des dépérissements ; la crise scolytes ne permet pas bien de traiter cette question.
Identification et levée des blocages de la régénération naturelle	IV.e) Page 22		X		En cours de traitement par ailleurs à travers des expérimentations.
Timing du diagnostic de régénération naturelle	IV.f) Page 22	X		ORMS	

Libellé synthétique des questions précédemment listées	Localisation de la question dans le document	Observatoire	Expérimentation	Dispositifs abordés dans EGIDE traitant de la thématique.	Complément
Recrû disponible et intervention en reconstitution	IV.h) Page 23	X	X	Expérimentation 1 et ORMS	
Bénéfice espéré d'une utilisation du recrû en matière de consommation d'eau	IV.h) Page 23		X	Expérimentation 1	

Annexe.1 : Thématiques du sondage

Thématique	Sous-thématique
Rentabilité	Rentabilité sur le long terme par rapport aux marchés du bois
	Prise en compte des paiements pour services écosystémiques fournis par les peuplements reconstitués
	Coût de l'installation et du maintien du mélange
	Degré d'assurance contre les risques et incertitudes (composition)
Gestion des arbres sur pied (arbres relictuels, peuplement environnant)	Destination des arbres relictuels dans le temps (exploitation)
	Diversité d'un peuplement antécédent et son renouvellement post-crise (densité et composition de la régénération naturelle)
	Distance - abondance des semenciers et composition de la régénération naturelle
Rôles des essences ligneuses d'accompagnement	Techniques d'installation d'un bourrage favorable s'il est absent (semenciers ...)
	Rôle du bourrage (compétition, gainage, production...) et choix des essences de bourrage
Choix des essences et provenances - synécologie	Types de mélanges susceptibles de s'adapter à différents niveaux de risques (sécheresse, tempête, menaces sanitaires...)
	Performances des provenances allochtones et installation de peuplements résistants et résilients
	Synécologie entre essences (particulièrement entre les essences introduites et les essences autochtones)
	Performances des essences allochtones et installation de peuplements résistants et résilients
Végétation accompagnatrice herbacée et arbustive	Rôle du bourrage (compétition, gainage, production...) et choix des essences de bourrage
	Techniques d'installation d'un bourrage favorable s'il est absent (semenciers ...)
Services écosystémiques et biodiversité	Types de mélanges favorisant la biodiversité
	Nouveaux mélanges et biodiversité
	Hiérarchisation des services (production de bois, récréatif, couvert arborescent, piégeage carbone, chasse, maintien du sol...)

	Forêt mélangée reconstituée et qualité de l'air, de l'eau, du sol...
	Influence de l'échelle spatiale du mélange sur les services écosystémiques
Stratégies de reconstitution (taux de mélange, modalité d'utilisation du recru, choix régénération naturelle - plantation...)	Renouvellement / introduction d'essences de lumière au sein de peuplements à base d'essences d'ombre
	Intérêt du mélange en fonction des situations (stations...)
	Influence des rémanents sur la composition, la croissance et la densité de la régénération
	Influence du mélange sur les performances et la qualité des tiges au sein du peuplement (ex. élagage naturel, fourchaison, croissance, rectitude, prospection racinaire...)
	Niveau de mélange (nombre d'essences, proportions)
	Diagnostic du potentiel de la régénération naturelle pour contribuer à un peuplement mélangé de production
	Reprises et croissances en fonction des stratégies de reconstitution (plantation en plein, plantation dans un recru déjà installé...)
Travaux sylvicoles	Qualité des plants issus de pépinière
	Organisation de chantier et surcrot, notamment en fonction du design de plantation
	Techniques de maintien en mélange d'essences aux comportements différents (entretien)
	Techniques de plantation et de préparation des plantations en plein
	Identification des interventions nécessaires pour le maintien du mélange (diagnostic)
	Techniques de plantation et de préparation des plantations en enrichissement
Design des schémas de reconstitution	Tenir compte de l'effet lisière (semenciers, effet masque...)
	Échelle temporelle du mélange (mélange temporaire, cycle entier...)
	Échelle spatiale du mélange (pied à pied, bouquet, parquet...) notamment par rapport aux essences peu compétitives
	Plantation en enrichissement dans le recru
	Structure spatiale de la reconstitution et performances d'essences peu compétitives
Équilibre faune-flore	Design de plantation et protection de la dent du gibier dans le cas spécifique de la plantation par placeaux (association avec des essences évitées...)
	Essences introduites appétentes et déséquilibre faune-flore
	Design de plantation et protection de la dent du gibier (bouquet, recru)

	Techniques de protection en fonction de la densité de gibier, du design, du type de mélange
	Seuil de population et types de mélanges
Attentes de la société et de la filière	Partage d'information gestionnaire - industriel pour permettre à ces derniers de s'adapter aux forêts de demain
	Méthodes et outils pour mieux partager les incertitudes du forestier à moyen et long terme
	Identifier les freins au renouvellement mélangé (techniques, sociétales, administratifs, politiques...)
	Essences résistantes peu valorisées actuellement et valorisation ultérieure par la filière (érable champêtre, alisier blanc...)
	Méthodes et outils facilitant la construction des scénarios en prenant en compte les attentes de la société et les approches multifonctionnelles (analyse multicritères)
	Perception des méthodes de reconstitution par le grand public, les gestionnaires et les écologues (plantation en plein, plantation en enrichissement, degré de mélange) et co-construction de scénarios
	Perception des nouvelles essences par le grand public, les gestionnaires et les écologues et co-construction de scénarios
Gestion préventive des peuplements déperissant	Intérêt d'anticiper la régénération des peuplements d'épicéas hors station mais non déperissant (coupe partielle préventive...)

Annexe.2 : Liste des chercheurs rencontrés

Nom Prénom	Domaine de recherche	Thématique principale de recherche	Organisme	Laboratoire de recherche
Andrés-Domenech Pablo	Economie	Economie forestière	AgroParisTech	UMR BETA
Blondet Marieke	Anthropologie sociale	Représentations sociales de la forêt et des milieux naturels	AgroParisTech	UMR Silva
Breteau Sandrine	Economie	Economie forestière	AgroParisTech	UMR BETA
Collet Catherine	Ecologie forestière	Dynamiques de renouvellement et techniques (RENFOR)	INRAE	UMR Silva
Gégout Jean-Claude	Ecologie forestière	Dynamiques naturelles, distribution spatiale des espèces	AgroParisTech	UMR Silva
Lebourgeois François	Ecologie forestière	Dendroécologie, bioclimatologie Comportement des essences	AgroParisTech	UMR Silva
Mârell Anders	Ecologie forestière	Interactions faune-flore, écologie végétale	INRAE	UR EFNO
Petitjean Caroline	Pédologie	Pédologie forestière, sols à battements de nappes	AgroParisTech	UMR Silva
Ponette Quentin	Ecologie forestière	Biogéochimie des écosystèmes	Université Catholique de Louvain	
Serra Diaz Josep M.	Ecologie forestière	Microclimats forestiers, conservation des écosystèmes forestiers	AgroParisTech	UMR Silva

BIBLIOGRAPHIE

- Bastien, Y., Gauberville, C., 2011. Vocabulaire Forestier Ecologie, gestion et conservation des espaces boisés.
- Bottero, A., D'Amato, A.W., Palik, B.J., Bradford, J.B., Fraver, S., Battaglia, M.A., Asherin, L.A., 2017. Density-dependent vulnerability of forest ecosystems to drought. *J. Appl. Ecol.* 54, 1605–1614. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12847>
- Brang, P., Küchli, C., Schwitter, R., Bugmann, H., 2016. Stratégies sylvicoles et changements climatiques.
- Buras, A., Menzel, A., 2019. Projecting Tree Species Composition Changes of European Forests for 2061–2090 Under RCP 4.5 and RCP 8.5 Scenarios. *Front. Plant Sci.* 9, 1986. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01986>
- Duwe, P., 2022. Quelles pratiques pour restaurer l'équilibre ?
- Forrester, D.I., 2014. The spatial and temporal dynamics of species interactions in mixed-species forests: From pattern to process. *For. Ecol. Manag.* 312, 282–292. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.10.003>
- Gosselin, F., Bouget, C., 2003. L'évolution des pratiques d'exploitation forestières pourrait bénéficier ' ' à la biodiversité ' ': réflexions scientifiques autour du guide de reconstitution de l'ONF, suite à la tempête.
- Horn, H.S., 1974. The Ecology of Secondary Succession. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 5, 25–37. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.05.110174.000325>
- Jactel, H., Bauhus, J., Boberg, J., Bonal, D., Castagneyrol, B., Gardiner, B., Gonzalez-Olabarria, J.R., Koricheva, J., Meurisse, N., Brockerhoff, E.G., 2017. Tree Diversity Drives Forest Stand Resistance to Natural Disturbances. *Curr. For. Rep.* 3, 223–243. <https://doi.org/10.1007/s40725-017-0064-1>
- Jactel, H., Brockerhoff, E.G., 2007. Tree diversity reduces herbivory by forest insects. *Ecol. Lett.* 10, 835–848. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01073.x>
- Jactel, H., Nicoll, B.C., Branco, M., Gonzalez-Olabarria, J.R., Grodzki, W., Långström, B., Moreira, F., Netherer, S., Orazio, C., Piou, D., Santos, H., Schelhaas, M.J., Tojic, K., Vodde, F., 2009. The influences of forest stand management on biotic and abiotic risks of damage. *Ann. For. Sci.* 66, 701–701. <https://doi.org/10.1051/forest/2009054>
- Latte, N., Lebourgeois, F., Claessens, H., 2015. Increased tree-growth synchronization of beech (*Fagus sylvatica* L.) in response to climate change in northwestern Europe. *Dendrochronologia* 33, 69–77. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2015.01.002>
- Laurent, L., Cavaliere, M., Lacombe, É., 2022. Guide pratique pour favoriser les renouvellements mélangés dans les peuplements forestiers gérés selon les principes de la sylviculture mélangée à couvert continu.
- Laurent, L., Lacombe, É., 2021. Guide pratique pour l'optimisation de la reconstitution forestière post-tempête.
- Lenoir, J., Gégout, J.C., Marquet, P.A., de Ruffray, P., Brisse, H., 2008. A Significant Upward Shift in Plant Species Optimum Elevation During the 20th Century. *Science* 320, 1768–1771. <https://doi.org/10.1126/science.1156831>
- Machado Nunes Romeiro, J., Eid, T., Antón-Fernández, C., Kangas, A., Trømborg, E., 2022. Natural disturbances risks in European Boreal and Temperate forests and their links to climate change – A review of modelling approaches. *For. Ecol. Manag.* 509, 120071. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120071>
- Mina, M., Huber, M.O., Forrester, D.I., Thürig, E., Rohner, B., 2018. Multiple factors modulate tree growth complementarity in Central European mixed forests. *J. Ecol.* 106, 1106–1119. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12846>

- Montwé, D., Spiecker, H., Hamann, A., 2015. Five decades of growth in a genetic field trial of Douglas-fir reveal trade-offs between productivity and drought tolerance. *Tree Genet. Genomes* 11, 29. <https://doi.org/10.1007/s11295-015-0854-1>
- Pachauri, R.K., Mayer, L., Intergovernmental Panel on Climate Change (Eds.), 2015. *Climate change 2014: synthesis report*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland.
- Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., 2022. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*.
- Schmitt, A., Trouvé, R., Seynave, I., Lebourgeois, F., 2020. Decreasing stand density favors resistance, resilience, and recovery of *Quercus petraea* trees to a severe drought, particularly on dry sites. *Ann. For. Sci.* 77, 52. <https://doi.org/10.1007/s13595-020-00959-9>
- Seidl, R., Thom, D., Kautz, M., Martin-Benito, D., Peltoniemi, M., Vacchiano, G., Wild, J., Ascoli, D., Petr, M., Honkaniemi, J., Lexer, M.J., Trotsiuk, V., Mairota, P., Svoboda, M., Fabrika, M., Nagel, T.A., Reyer, C.P.O., 2017. Forest disturbances under climate change. *Nat. Clim. Change* 7, 395–402. <https://doi.org/10.1038/nclimate3303>
- Sousa-Silva, R., Verbist, B., Lomba, Â., Valent, P., Suškevičs, M., Picard, O., Hoogstra-Klein, M.A., Cosofret, V.-C., Bouriaud, L., Ponette, Q., Verheyen, K., Muys, B., 2018. Adapting forest management to climate change in Europe: Linking perceptions to adaptive responses. *For. Policy Econ.* 90, 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2018.01.004>
- Taccoen, A., Piedallu, C., Seynave, I., Gégout-Petit, A., Gégout, J.-C., 2022. Climate change-induced background tree mortality is exacerbated towards the warm limits of the species ranges. *Ann. For. Sci.* 79, 23. <https://doi.org/10.1186/s13595-022-01142-y>
- Thurm, E.A., Hernandez, L., Baltensweiler, A., Ayan, S., Rasztovits, E., Bielak, K., Zlatanov, T.M., Hladnik, D., Balic, B., Freudenschuss, A., Büchsenmeister, R., Falk, W., 2018. Alternative tree species under climate warming in managed European forests. *For. Ecol. Manag.* 430, 485–497. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.08.028>
- Weemstra, M., Eilmann, B., Sass-Klaassen, U.G.W., Sterck, F.J., 2013. Summer droughts limit tree growth across 10 temperate species on a productive forest site. *For. Ecol. Manag.* 306, 142–149. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.06.007>

Remerciements

Merci à l'ensemble des personnes ayant répondu au sondage et à Pablo Andrés-Domenech, Marieke Blondet, Sandrine Breteau, Catherine Collet, Jean-Claude Gégout, François Lebourgeois, Anders Mårell, Caroline Petitjean, Quentin Ponette et Josep M Serra Diaz pour nous avoir accordé des entretiens. Merci à Lisa Laurent pour toutes les discussions relatives au renouvellements mélangés et ses retours sur l'expérience de l'observatoire post-tempête. Merci à Anaëlle Dufournet, Nicolas Gomez, Frédéric Guérin, Thibault Léchopier, Benoit Méheux, Kassandra Perrin, Marine Perthuis et Rodolphe Pierrat pour leur aide dans la constitution de l'observatoire, et merci à l'ensemble des forestiers qui nous ont accordé leur temps pour la visite de sites et les tests des protocoles. Merci à Jacques Becquey, Jordan Bello, Célia Bresson et à l'ensemble du groupe de travail informel pour leur aide dans la constitution de la WebCarto EGIDE. Merci à Céline Haller pour la création du logo EGIDE.



Avec le soutien de :

