EGPN
GESTION PROTECTION NATURE

Travaux de Recherche - Gestion et Protection de la Nature

Diversité des espèces et adaptation des forêts face aux perturbations climatiques



Dans quelle mesure la diversité des espèces dans les forêts mixtes influence-t-elle leur résilience face aux perturbations climatiques par rapport aux forêts monospécifiques ?

UE : Biologie et génie écologique

Juliette Guinchard
2EME ANNÉE BACHELOR GESTION ET VALORISATION NATURALISTE
EGPN LYON ANNÉE 2025-2026

Sommaire

Introduction..... 1
I. Diversité des forêts et résilience face au climat.....2
1. Composantes de la diversité des forêts.....2
2. Rôle de la biodiversité dans le fonctionnement des écosystèmes forestiers.....3
II. Avantages des forêts mixtes face aux perturbations..... 5
1. Résistance aux aléas climatiques.....5
2. Limitation des risques sanitaires.....6
III. Limites et perspectives pour la gestion forestière.....7
1. Limites techniques et économiques de la gestion des forêts mixtes..... 7
2. Gestion forestière adaptative : perspectives et enjeux..... 8
Conclusion..... 10
Abstract..... 11
Annexes..... 12
Bibliographie..... 18

Introduction

Ces dernières années, le changement climatique entraîne des modifications environnementales notamment avec l'augmentation des températures. Ces changements affectent particulièrement les écosystèmes forestiers qui sont sensibles aux variations climatiques.

Nous sommes ainsi confrontés à des sécheresses répétées ainsi qu'à des incendies de plus en plus fréquents. Ces phénomènes affaiblissent les arbres et provoquent des dépérissements dans certains peuplements forestiers. Cette situation met en danger la biodiversité et les services écologiques qu'ils fournissent et entraîne des conséquences économiques, écologiques et sociétales.

Avant toute chose, il est important de définir certains termes qui seront utilisés dans ce travail. Tout d'abord, la résilience correspond à « l'aptitude d'un écosystème à se reconstituer à la suite d'une perturbation (la reconstitution d'une forêt après un incendie, par exemple) ». (Géoconfluence, 2021).

Ensuite, le terme de forêt mixte désigne « une forêt composée de feuillus et de conifères dans des proportions relativement égales. » (M. Robert, 2019). A l'inverse, une forêt monospécifique correspond à « des peuplements pour lesquels une essence d'arbre occupe plus de 75 % du couvert dans l'étage dominant » (IGN).

C'est dans ce cadre que nous pouvons nous demander dans quelle mesure la diversité des espèces dans les forêts mixtes influence-t-elle leur résilience face aux perturbations climatiques par rapport aux forêts monospécifiques ?

Afin de répondre à cette problématique, ce travail s'articulera en trois parties : dans un premier temps, nous étudierons la diversité des forêts et leur résilience face au climat, puis dans un deuxième temps, nous aborderons les avantages des forêts mixtes face aux perturbations. Enfin, nous évoquerons les limites et les perspectives pour la gestion forestière.

I. Diversité des forêts et résilience face au climat

La diversité forestière désigne l'ensemble de la biodiversité présente au sein des forêts et qui inclut les espèces animales, végétales et microbiennes. Nous pouvons distinguer trois formes de diversité : la diversité structurelle, spécifique et génétique. Ces trois formes de diversité jouent un rôle non seulement dans le fonctionnement des écosystèmes forestiers mais aussi dans la capacité des forêts à fournir des services écosystémiques essentiels pour l'Homme et pour le climat.

1. Composantes de la diversité des forêts

Tout d'abord, la première composante de la diversité d'une forêt est la diversité structurelle. Celle-ci correspond à la pluralité des éléments physiques d'un habitat comme la présence de bois mort, les différents niveaux de strates qui favorisent la présence de plusieurs espèces et jouent un rôle important dans la résistance des écosystèmes.

L'article rédigé par Pickering montre que les forêts mixtes avec des strates variées sont plus résistantes dans 80 % des forêts étudiées. Il est expliqué que « cette relation émergente est explorée comme une mesure d'adaptation pour préserver la résilience face au réchauffement climatique : la baisse de résilience associée à un réchauffement de 1 °C serait compensée par une augmentation de 10 % de la complexité du couvert » (Pickering et al. 2025). Ainsi, les résultats recommandent de favoriser la diversité structurelle pour aider les forêts à mieux faire face au changement climatique et aux perturbations (Annexe 1).

Ensuite, la diversité génétique est une composante importante dans la résilience des forêts. En effet, même au sein d'une seule essence, les individus peuvent avoir des différences génétiques qui influent sur leur capacité à résister aux stress, aux maladies ou aux attaques d'insectes. Alfaro et al. expliquent que « la diversité intraspécifique peut favoriser à la fois la résilience aux attaques de ravageurs et la productivité des espèces » (Alfaro et al. 2014), ce qui signifie que malgré le fait que certains individus soient sensibles à la sécheresse ou aux ravageurs, d'autres peuvent survivre et assurer la continuité de la population. Il a aussi été prouvé qu'une forêt où la diversité génétique est élevée peut faire face aux perturbations climatiques et permet de mieux s'adapter aux changements à long terme. En effet, il a été démontré que « le maintien d'une forte diversité génétique au sein des populations d'arbres et entre elles peut accroître la résilience des écosystèmes. » (Alfaro et al. 2014). Par conséquent, plus cette diversité est importante, plus certains individus auront des caractéristiques leur permettant de mieux résister aux changements climatiques, aux maladies ou aux ravageurs, ce qui favorise le maintien de la population sur le long terme. De cette façon, la diversité génétique permet la résilience des forêts en permettant à une certaine population de survivre lorsqu'il y a des perturbations climatiques comme par exemple des sécheresses.

De plus, cette diversité génétique permet aux populations d'évoluer grâce à la sélection naturelle en favorisant les individus les mieux adaptés aux nouvelles conditions climatiques. Sans cela, les différents peuplements seraient plus fragiles à des changements brutaux et entraîneraient des dépérissements massifs.

Enfin, la dernière composante essentielle au bon fonctionnement d'une forêt est la diversité spécifique. Elle désigne « le nombre de différentes espèces d'un milieu » (MNHN 2022). Dans une forêt mixte, les essences présentent des besoins en eau ou en lumière différents, ce qui conduit à diminuer le risque face aux perturbations. En effet, si une essence souffre de la sécheresse, les autres espèces peuvent continuer à maintenir les fonctions écosystémiques de la forêt comme la production de bois ou encore la production de biomasse.

Une étude sur la richesse spécifique en Chine montre le rôle de la richesse en essence. Les résultats expliquent que « la diversité végétale est souvent essentielle au maintien de la multifonctionnalité des écosystèmes (FME) […] Nos résultats indiquent que les effets directs de la richesse spécifique sur la FME sont plus importants que ceux de l'abondance des espèces ligneuses, et que la richesse spécifique augmente avec la FME. » (Li et al. 2021). Cette étude met en avant que la composition des essences influence directement la capacité des forêts à remplir plusieurs fonctions écologiques en même temps. Une forêt avec une diversité spécifique élevée peut mieux maintenir ses fonctions écologiques face aux perturbations et contribue donc à renforcer la résilience des écosystèmes forestiers.

Pour conclure, nous pouvons constater que la diversité structurelle, génétique et spécifique joue un rôle essentiel et est complémentaire dans la résilience des forêts. Elles permettent l'adaptation des forêts face au changement climatique et de mieux résister aux perturbations. La combinaison de ces trois formes de diversité constitue un atout pour la pérennité des écosystèmes forestiers.

2. Rôle de la biodiversité dans le fonctionnement des écosystèmes forestiers

Au-delà de la richesse spécifique, structurelle et génétique, la biodiversité participe au bon fonctionnement des écosystèmes forestiers en soutenant les fonctions écologiques.

La biodiversité contribue à la stabilité des écosystèmes grâce au principe de redondance fonctionnelle (Annexe 2). Ce concept « se réfère à la complémentarité fonctionnelle parmi les espèces, l'étendue avec laquelle des espèces peuvent se remplacer dans un groupe fonctionnel. Une grande redondance fonctionnelle peut ainsi fournir une garantie d'équilibre quand des espèces sont perdues. » (« Écologie / Ecology - Redondance fonctionnelle », s.d.). Cette redondance fonctionnelle est un élément clé pour comprendre pourquoi certaines forêts restent stables face à des perturbations répétées.

Ainsi, si une espèce disparaît ou si elle décline à la suite de perturbations, les autres espèces peuvent assurer les mêmes fonctions, ce qui permet de limiter les conséquences négatives sur l'écosystème. Ce concept est important dans un contexte de changement climatique où les perturbations se multiplient car de nombreuses fonctions comme la décomposition ou la régulation des populations d'insectes reposent sur plusieurs espèces ce qui permet de sécuriser l'écosystème face aux pertes potentielles.

De plus, la biodiversité est également très importante pour maintenir les cycles du carbone et des nutriments. En effet, la présence d'organismes dans le sol, comme les champignons, les bactéries et les invertébrés, participent à la décomposition de la matière organique et au recyclage des nutriments. Ces différents cycles sont indispensables pour la croissance des arbres et la fertilité du sol. Ils participent au cycle du carbone notamment par le stockage de carbone dans les sols qui aide à la régulation du climat. De ce fait, une perturbation peut avoir des répercussions importantes sur l'ensemble du fonctionnement de l'écosystème forestier. Par exemple, une baisse de prédateurs d'insectes peut entraîner des déséquilibres dans la chaîne alimentaire et avoir un effet de cascade sur l'ensemble de la forêt.

Une étude sur les sols forestiers européens explique qu'« une mosaïque diversifiée de peuplements forestiers structurellement complexes, reliés par des corridors, peut maintenir et protéger des niveaux plus élevés de biodiversité qui peuvent accroître la résilience des écosystèmes forestiers aux perturbations » (Lukac 2017). Cette étude montre que la résilience des forêts repose sur la combinaison de plusieurs facteurs : la diversité des espèces, la variété des strates et la dynamique du sol. L'auteur ajoute également qu'« une biodiversité plus élevée au-dessus et en dessous du sol est susceptible de favoriser une récupération plus rapide après perturbation » (Lukac 2017), ce qui montre que la résilience ne dépend pas seulement de la diversité des arbres mais aussi de l'ensemble des êtres vivants de l'écosystème. En effet, les organismes du sol, la flore et la faune sont complémentaires dans le fonctionnement d'une forêt notamment dans la structuration du sol.

Ainsi, la biodiversité contribue à renforcer la capacité des écosystèmes forestiers à assimiler les perturbations et à retrouver plus rapidement leur fonctionnement. Elle constitue un pilier de la résilience écologique des forêts à long terme.

II. Avantages des forêts mixtes face aux perturbations

Les forêts mixtes présentent des avantages face aux perturbations naturelles, qu'elles soient climatiques (sécheresse, incendies, tempêtes) mais également biologiques (ravageurs, maladies …). De ce fait, la mixité des essences permet de renforcer leur résistance et de limiter les risques sanitaires.

1. Résistance aux aléas climatiques

Tout d'abord, les forêts mixtes présentent une meilleure résistance aux aléas climatiques par rapport aux forêts monospécifiques. La complémentarité entre les espèces permet une réponse au stress hydrique lors des épisodes de sécheresse ou durant les vagues de chaleur (Annexe 3). Cette résistance s'explique aussi par la complémentarité des systèmes racinaires entre les espèces. En effet, « certains arbres comme les chênes s'enracinent plus profondément et peuvent ainsi accéder à l'eau depuis les profondeurs du sol, tandis que les espèces à racines peu profondes comme l'épicéa ne peuvent absorber que l'eau de la couche arable qui se dessèche rapidement en cas de sécheresse » (Prof. Dr. Arthur Gessler 2021). Par conséquent, la diversité des essences limite la compétition en eau et permet une meilleure gestion des ressources hydriques. Cet effet est appelé « complémentarité de niche », cela signifie que les arbres utilisent l'eau et les nutriments à différents niveaux dans le sol, ce qui limite la compétition et permet une meilleure résistance au stress.

De plus, la diversité des peuplements forestiers renforce leur résilience face aux différentes perturbations. En effet, les travaux de (Germain et Lutz 2024) expliquent que les forêts mixtes augmentent la résistance et la capacité de récupération des pins après des perturbations (Annexe 4). Dans cette étude, les chercheurs expliquent que dans les forêts mixtes, les pins se remettent mieux du stress comme la sécheresse car certaines essences améliorent le microclimat en limitant l'évaporation ou en freinant les ravageurs. Les pins bénéficient de ces interactions, ce qui aide à leur résistance et à la capacité de récupération. Ainsi, la diversité d'espèces ne se limite pas à résister aux perturbations, mais elle peut aussi récupérer plus rapidement et donc s'adapter face aux aléas climatiques.

Enfin, les essences forestières possèdent des physiologies différentes (profondeur d'enracinement, tolérance à la sécheresse…) ce qui permet un effondrement moindre en cas d'aléas extrêmes. Comme le montrent les travaux de (Grossiord et al. 2015), « en forêts tempérées et thermophiles-décidues, une forte diversité d'essences a été associée à une moindre exposition à la sécheresse, et donc à une plus forte résistance au stress hydrique […] plus diversifiés témoigne en particulier d'une meilleure disponibilité en eau pour les essences qui constituent ces écosystèmes lorsqu'elles sont en mélange. » Ces résultats mettent en évidence que les peuplements mélangés présentent une résistance supérieure aux perturbations climatiques répétées, notamment face aux sécheresses et aux tempêtes et plus largement aux aléas climatiques.

De ce fait, la diversité des espèces apparaît comme un élément important pour la résilience des forêts face au changement climatique. Ainsi, plus une forêt est variée, plus elle est capable de maintenir sa stabilité dans le temps malgré les perturbations environnementales.

2. Limitation des risques sanitaires

Avec le changement climatique et l'intensification des échanges commerciaux, les forêts subissent une augmentation des risques sanitaires notamment avec l'arrivée de ravageurs et de maladies.

Les forêts monospécifiques sont particulièrement touchées par la propagation des risques sanitaires du fait de l'homogénéité génétique, ce qui favorise la prolifération des ravageurs et entraîne des dépérissements importants. A l'inverse, dans les forêts mixtes, la diversité des essences permet de réduire les dépérissements massifs de manière naturelle.

Plusieurs études ont montré que les dégâts causés par les ravageurs sont moins importants dans une forêt mixte que dans une forêt monoculture. De ce fait, « il a été fréquemment observé que l'abondance ou les dégâts causés par les insectes ravageurs sont souvent moindres dans les mélanges d'espèces végétales que dans les monocultures. Cette observation a été qualifiée de résistance associative » (Jactel et al. 2021). La diversité des essences favorise la présence d'ennemis naturels et ralentit la propagation des ravageurs. Ce phénomène s'explique par la présence d'espèces régulatrices comme par exemple, les oiseaux, les chauves-souris ou encore certains insectes prédateurs qui participent à cette régulation naturelle et permet de limiter l'intervention humaine (Annexe 5).

Une autre étude menée par l'INRAE explique que « les insectes herbivores, et notamment les espèces spécialistes, ciblent généralement des espèces d'arbres spécifiques. Ces espèces sont leurs hôtes, qu'ils recherchent pour se nourrir et pondre leurs œufs. Dans les peuplements forestiers mixtes, la diversité des espèces d'arbres présentes émet une variété de signaux olfactifs et visuels, ce qui peut perturber les insectes dans leur recherche du signal de leur hôte. » (INRAE 2020). Cette étude montre que les forêts mixtes peuvent réduire les attaques d'insectes herbivores spécialistes, ce qui contribue à renforcer la résilience des peuplements forestiers.

Ainsi, les forêts mixtes présentent une résilience plus élevée face aux perturbations climatiques grâce à la complémentarité des essences et à la diversité des interactions écologiques. Cela permet de limiter les dégâts, de favoriser une meilleure stabilité et de renforcer l'adaptabilité des écosystèmes forestiers.

III. Limites et perspectives pour la gestion forestière

Malgré les nombreux avantages des forêts mixtes face aux perturbations climatiques et face aux ravageurs, la gestion sylvicole dans les forêts diversifiées reste complexe. En effet, cette diversification peut entraîner des difficultés sur le plan technique ou encore économique pour les gestionnaires forestiers.

1. Limites techniques et économiques de la gestion des forêts mixtes

Même si les forêts mixtes se présentent comme une solution pour rendre les forêts plus résistantes au changement climatique, leur mise en œuvre peut poser plusieurs difficultés.

Tout d'abord, sur le plan technique, la gestion des peuplements mixtes est plus difficile que celle des forêts monospécifiques. En effet, chaque espèce d'arbres se développe à des rythmes différents et a des besoins en lumière, en eau et en nutriments spécifiques. Certaines pratiques sylvicoles (par exemple les éclaircies) sont plus difficiles à réaliser. En conséquence, cela demande une planification plus précise et une surveillance constante pour assurer un équilibre entre les espèces et éviter que certaines ne dominent le peuplement. Les scientifiques expliquent que « l'aménagement des peuplements mélangés pose un défi de taille car il faut tenir compte des espèces dont les modes de reproduction, les taux de croissance et la longévité sont différents. » (Prévost et al. 2009).

De plus, les gestionnaires forestiers manquent de connaissances concernant les forêts mixtes. Comme le souligne cet article « les forestiers ont vite fait de constater que leur connaissance de la forêt mixte et leur expertise en matière d'aménagement et de régénération de cette forêt sont encore très limitées, puisque peu de connaissances utiles peuvent être tirées des pratiques passées » (MFFP 2019). Ce manquement souligne l'importance de la formation continue et les bonnes pratiques auprès des acteurs forestiers. Il est donc important d'accompagner les gestionnaires forestiers afin de mieux prendre en compte les spécificités des forêts mixtes dans leurs choix de gestion.

Enfin, les pratiques de gestion sylvicole traditionnelles ont été principalement développées pour les forêts monospécifiques, ainsi elles ne sont pas toujours adaptées aux forêts mixtes. Il est important d'adopter de nouvelles pratiques sylvicoles en tenant compte de cette diversité d'essences et leurs interactions. Face à ces difficultés, les chercheurs développent de nouvelles approches adaptées, « Les activités des chercheurs en sylviculture et en rendement des peuplements mélangés visent donc à mettre au point des traitements sylvicoles novateurs adaptés à la complexité, à la richesse et à la dynamique de ces écosystèmes afin d'en assurer l'intégrité à long terme. »(MFFP 2019). Les chercheurs expliquent que la gestion des forêts mixtes demande encore des avancées scientifiques et techniques pour mieux adapter les pratiques sylvicoles à leur fonctionnement.

D’un point de vue économique, le passage vers des forêts mixtes implique des coûts supplémentaires. A court terme, ces investissements peuvent être importants et contraignants. Ils prennent en compte non seulement la plantation de différentes essences, mais aussi la formation des gestionnaires ou encore le suivi écologique des peuplements.

Des études expliquent que « malgré les avantages apparents des plantations mixtes, leur adoption par les entreprises forestières et les exploitants reste limitée. Cette adoption peut être freinée par une plus grande complexité de gestion, le manque de recommandations et des coûts (perçus comme) plus élevés » (Pinnschmidt et al. 2023). Cette étude montre qu' elles demandent plus d’investissement au départ, notamment pour planter plusieurs essences, former les gestionnaires et assurer le suivi des peuplements. Leur gestion est aussi plus complexe que celle des monocultures, ce qui demande plus de temps et de moyens.

Ensuite, les rotations et les coupes sont également plus difficiles à prévoir car chaque essence a un rythme de croissance différent. Ces incertitudes économiques peuvent freiner la prise de décision et limiter le développement des forêts mixtes. Certaines espèces arrivent rapidement à maturité tandis que d’autres ont besoin de plusieurs décennies, ce qui complique la planification des récoltes et la gestion économique.

Enfin, le passage vers des forêts mixtes peut être freiné par l’absence d’incitation et de soutien financier. Le gouvernement propose plusieurs dispositifs de financement dits « Forêt-Bois », par exemple pour le renouvellement des peuplements après sinistres ou pour adapter les forêts vulnérables au changement climatique. Cependant ces aides sont principalement orientées vers la continuité de production et la réponse aux dégâts, plutôt que vers la diversification volontaire des peuplements ce qui limite le développement des forêts mixtes.

2. Gestion forestière adaptative : perspectives et enjeux

Les effets du réchauffement climatique incitent à une remise en question des pratiques forestières traditionnelles. La gestion forestière fait actuellement face à des défis majeurs. Il s’agit pour elle de réussir à concilier des enjeux comme les dépérissements importants observés dans de nombreux massifs en France ainsi que des enjeux de long terme comme l’adaptation des forêts au changement climatique, ce qui oblige une approche à plus flexible. Cette flexibilité passe par une anticipation des risques et une capacité d’ajuster rapidement des pratiques en fonction de l’évolution des écosystèmes.

Parmi les pistes mises en avant par les gestionnaires forestiers, il y a la conservation des vieilles forêts qui « sont plus résilientes aux aléas climatiques que les jeunes forêts » (Académie Des Sciences 2023) ainsi que le maintien de vieux arbres qui contribue à « augmenter la capacité de mémorisation des systèmes » c’est-à-dire la capacité des écosystèmes à conserver des mécanismes de régulation issus

de leur histoire écologique ».(Gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg 2022). Cela s'explique par le fait que les forêts anciennes ont déjà traversé de nombreuses perturbations, ce qui leur permet de mieux absorber les changements et de maintenir leur fonctionnement.

De plus, le rapport de l'Académie des sciences (2023) insiste sur l'importance de la diversification des espèces d'arbres indigènes pour rendre les forêts moins fragiles aux sécheresses répétées et aux attaques de ravageurs. En effet, elle permet de limiter les risques de dépérissements massifs et d'augmenter la résilience globale des peuplements. Ainsi, ces stratégies offrent une approche plus robuste capable de préserver les fonctions écologiques malgré les perturbations.

La gestion adaptative repose aussi sur le maintien d'une structure complexe. En effet, la conservation d'arbres de différents âges, la préservation du bois mort et le maintien d'une diversité de strates végétales favorisent la biodiversité et participent au bon fonctionnement écologique des forêts. Par conséquent, la résilience forestière est le résultat d'interactions entre les espèces, le sol et les strates.

Cette structure complexe permet aussi d'assurer des fonctions écologiques essentielles à l'échelle de l'écosystème.

Parmi les objectifs majeurs, nous pouvons citer la préservation des services écosystémiques essentiels que fournissent les forêts. En effet, les forêts jouent un rôle majeur dans le stockage du carbone, la préservation des sols ou encore la régulation du cycle de l'eau. Le rapport de l'Académie des sciences rappelle que l'adaptation des forêts face au changement climatique permet de lutter contre le changement climatique et la durabilité des territoires.

Enfin, le concept de forêt mosaïque développé par l'ONF est une réponse efficace face aux perturbations climatiques. Cette approche repose sur l'association au sein d'un même massif de parcelles répondant à différentes fonctions: production de bois, accueil du public, protection de la biodiversité. « Les équipes de l'ONF mettent en œuvre des méthodes de migration assistée : « Quand le chêne sessile est en difficulté à cause de la sécheresse, on peut passer à d'autres chênes méridionaux, chêne pubescent, chêne tauzin ». Pour choisir les essences, l'ONF s'appuie sur des modèles prédictifs […] qui prennent en compte le sol, l'orientation, la réserve en eau, la température et le climat projeté dans le futur. ». Le concept de forêt mosaïque encourage la diversification des structures forestières (présence de bois mort, arbres de différents âges, strates variées) et la combinaison des fonctions écologiques et économiques (Annexe 6). Il s'agit d'un outil concret pour aider les gestionnaires à anticiper les effets du changement climatique et à ajuster leurs pratiques en fonction de l'évolution du peuplement forestier et de cette façon garantir une résilience durable des peuplements.

Ainsi, les forêts mixtes nécessitent une évolution des pratiques de gestion sylvicoles ainsi que des soutiens institutionnels. Ces limites montrent l'importance d'une approche plus adaptative capable de concilier résilience et biodiversité face aux perturbations climatiques.

Conclusion

En conclusion, la diversification des peuplements forestiers représente un facteur déterminant dans la capacité d'adaptation des forêts aux perturbations climatiques. La résilience des écosystèmes face aux stress environnementaux, tels que les sécheresses, les tempêtes ou les attaques de ravageurs, est favorisée par la diversité structurelle, spécifique et génétique. Cette diversité contribue au maintien des fonctions essentielles des écosystèmes, parmi lesquelles on peut citer la production de biomasse, le stockage du carbone ou encore la régulation des cycles de nutriments.

On constate que les forêts mixtes offrent une résilience plus importante que les forêts monospécifiques ce qui confirme l'importance d'intégrer de la diversité dans la gestion forestière. La diversité forestière contribue à la stabilité écologique mais joue aussi un rôle important pour les services écosystémiques dont l'Homme dépend comme la production de bois, la régulation du climat ou encore la protection des sols.

Cependant, la mise en place de forêts mixtes se révèle complexe, car elle requiert des connaissances approfondies ainsi que des ressources financières conséquentes. Afin d'assurer une utilisation raisonnée, des solutions innovantes telles que la gestion adaptative et le concept de forêt mosaïque émergent. Ces approches, qui visent à concilier les objectifs de biodiversité, de production et de résilience sur une période prolongée, constituent des éléments essentiels pour la gestion durable des forêts.

Ainsi, il serait intéressant d'associer la diversification des essences forestières avec des outils de télédétection pour améliorer la gestion adaptative des forêts. Cette association offre des perspectives pour des pratiques sylvicoles plus résilientes capables de protéger la biodiversité et les services écosystémiques sur le long terme. En plus des enjeux forestiers, cette approche souligne l'importance d'une gestion durable face aux changements climatiques et à la préservation des écosystèmes pour les générations futures.

Abstract

In recent years, forests have faced severe droughts and the arrival of pests, leading to significant dieback and endangering biodiversity and ecosystem services. Mixed forests, composed of several tree species, exhibit structural, species, and genetic diversity that strengthens their resilience to climate disturbances.

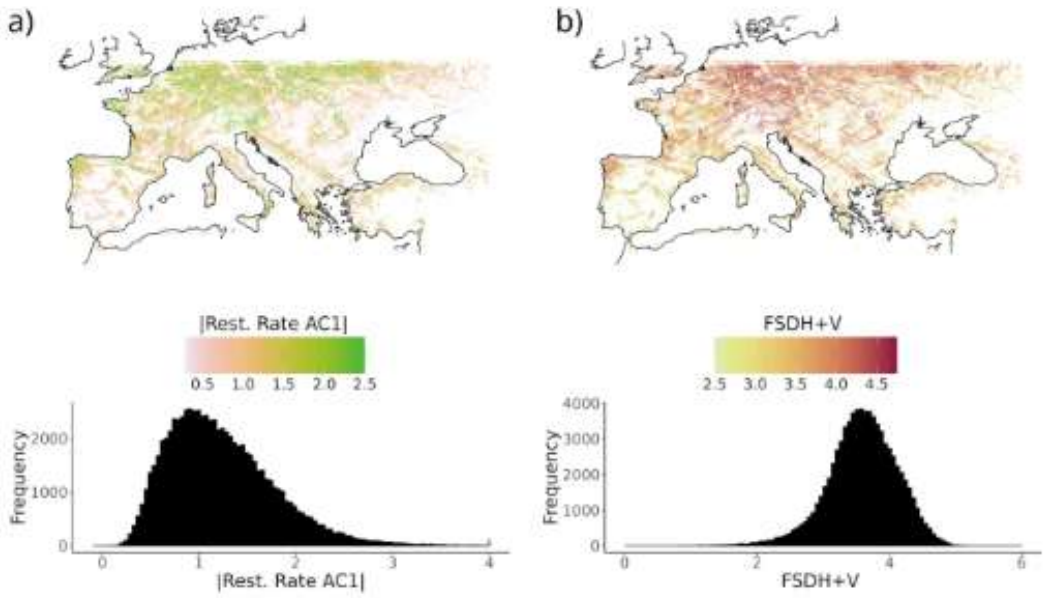
However, biodiversity plays a crucial role through functional redundancy, which helps maintain ecosystem services in the event of species loss and regulates carbon and nutrient cycles.

Despite this, managing mixed forests remains complex due to technical and economic challenges related to species diversity. Adaptive management, the mosaic forest concept, and the preservation of deadwood and old-growth forests are solutions for reconciling resilience, production, and biodiversity.

Annexes

Annexe 1 : Cartes de distribution des taux de la diversité structurelle et restauration forestière

Source : (Pickering et al. 2025)

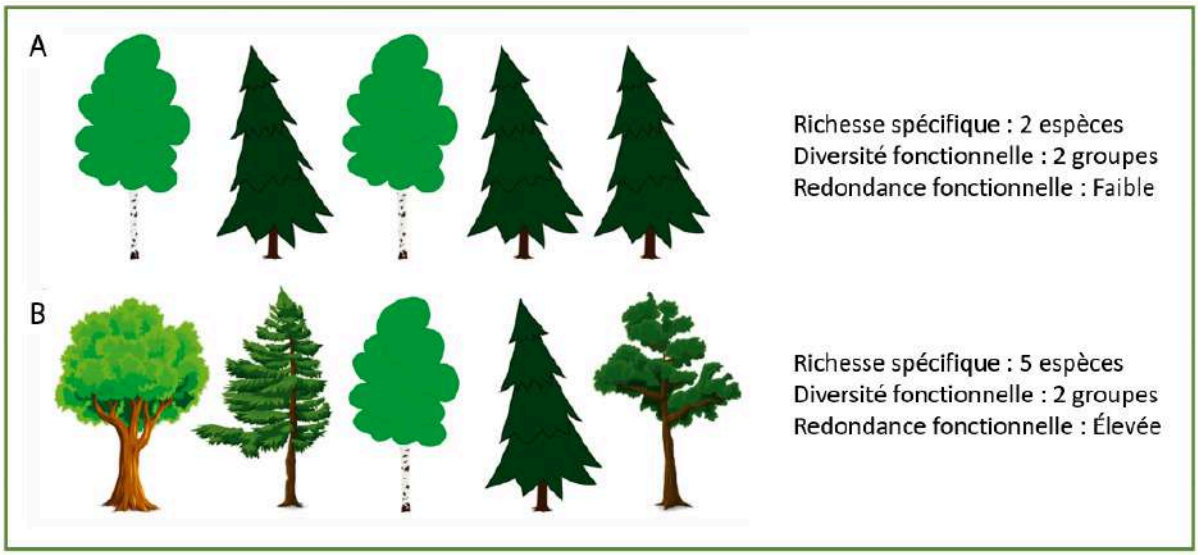


La figure a) est une carte qui montre les taux de restauration des forêts. Les zones vertes indiquent une meilleure capacité de récupération. Nous pouvons remarquer que la plupart des forêts se situent entre 1 et 2.

La figure b) est une carte de la diversité structurelle horizontale et verticale. Les zones rouges sont les forêts les plus diversifiées. L'histogramme montre que la majorité des forêts se situent entre 3 et 4. Ainsi les forêts les plus diversifiées ont un taux de restauration plus élevé ce qui permet d'illustrer le lien entre restauration forestière et diversité structurelle.

Annexe 2 : Schéma sur la diversité fonctionnelle et la redondance fonctionnelle

Source : (Messier et al. 2019)

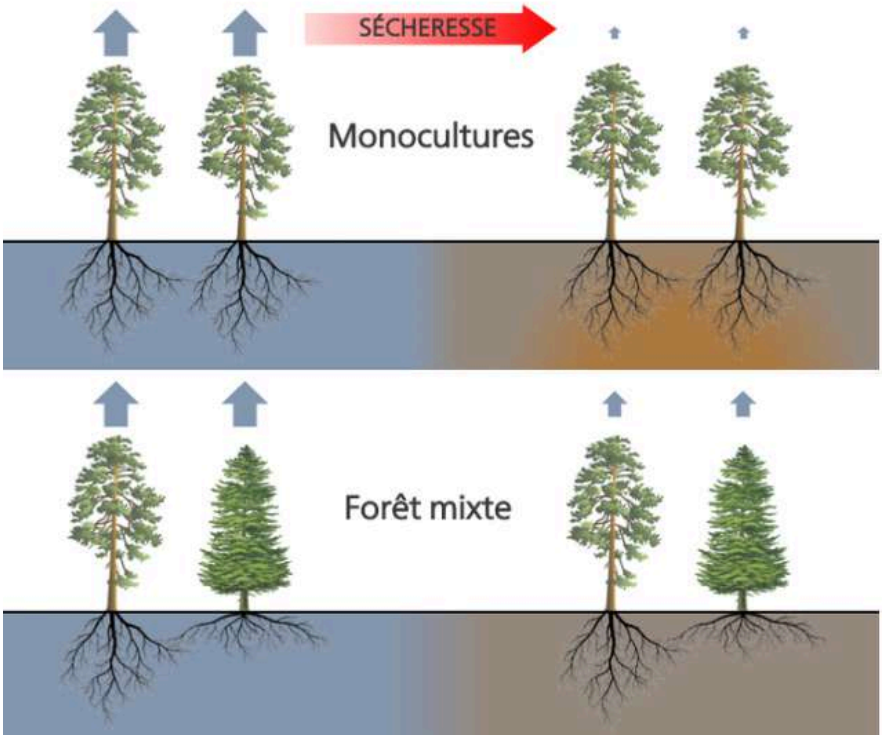


Le schéma compare 2 peuplements. Tout d'abord, le peuplement A à 2 espèces avec des traits fonctionnels différents, la diversité fonctionnelle est plus élevée mais la redondance est faible. Ainsi la disparition d'une espèce entraîne la perte de certaines fonctions écologiques.

Enfin, le peuplement B dispose d'une richesse spécifique de 5 espèces où la diversité fonctionnelle et la redondance fonctionnelle sont élevées, ce qui permet de maintenir les fonctions écologiques même si une espèce disparaît.

Annexe 3 : Illustration de l'avantage d'une diversification des essences par rapport à une forêt monospécifique face au stress hydrique

Source : (Prof. Dr. Arthur Gessler 2021)

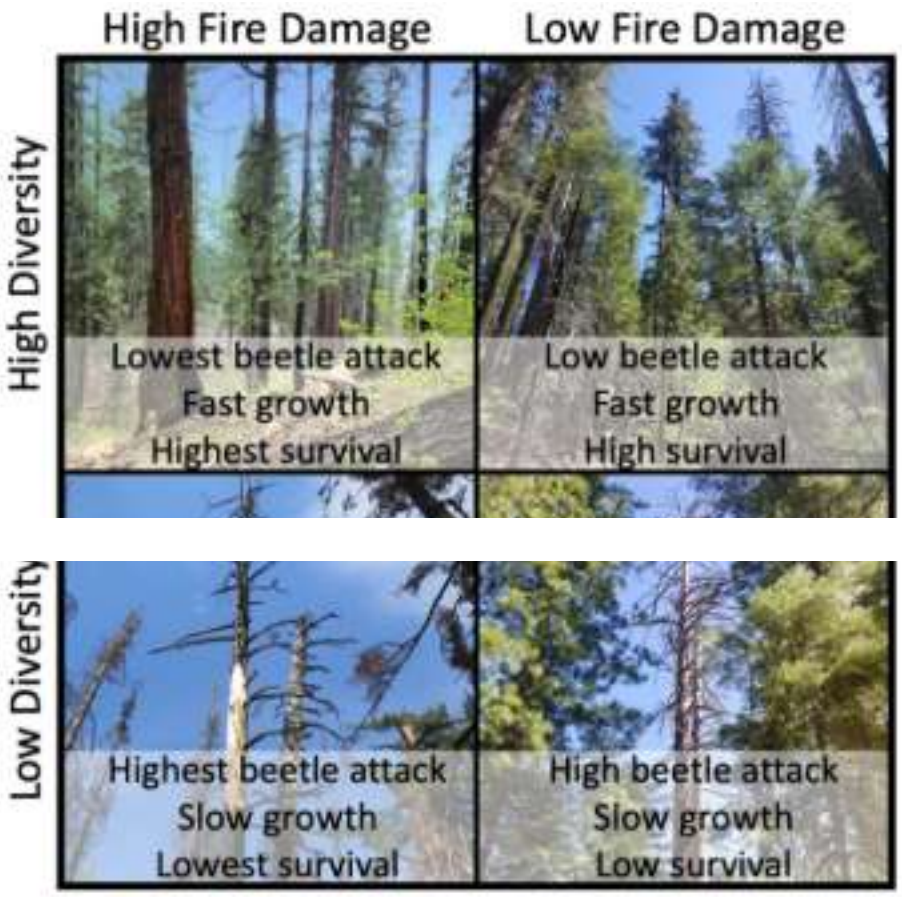


Dans une forêt monospécifique, les arbres sont enracinés avec la même profondeur ce qui les met en compétition pour la ressource en eau en cas de sécheresse.

A l'inverse, dans une forêt mixte en cas de sécheresse, les arbres ne sont pas en compétition car ils ont des profondeurs de racines différentes. Cet effet dans les forêts mixtes est appelé complémentarité de niche.

Annexe 4 : Effet de la diversité des peuplements sur la résistance et la survie des pins après des perturbations.

Source : (Germain et Lutz 2024)

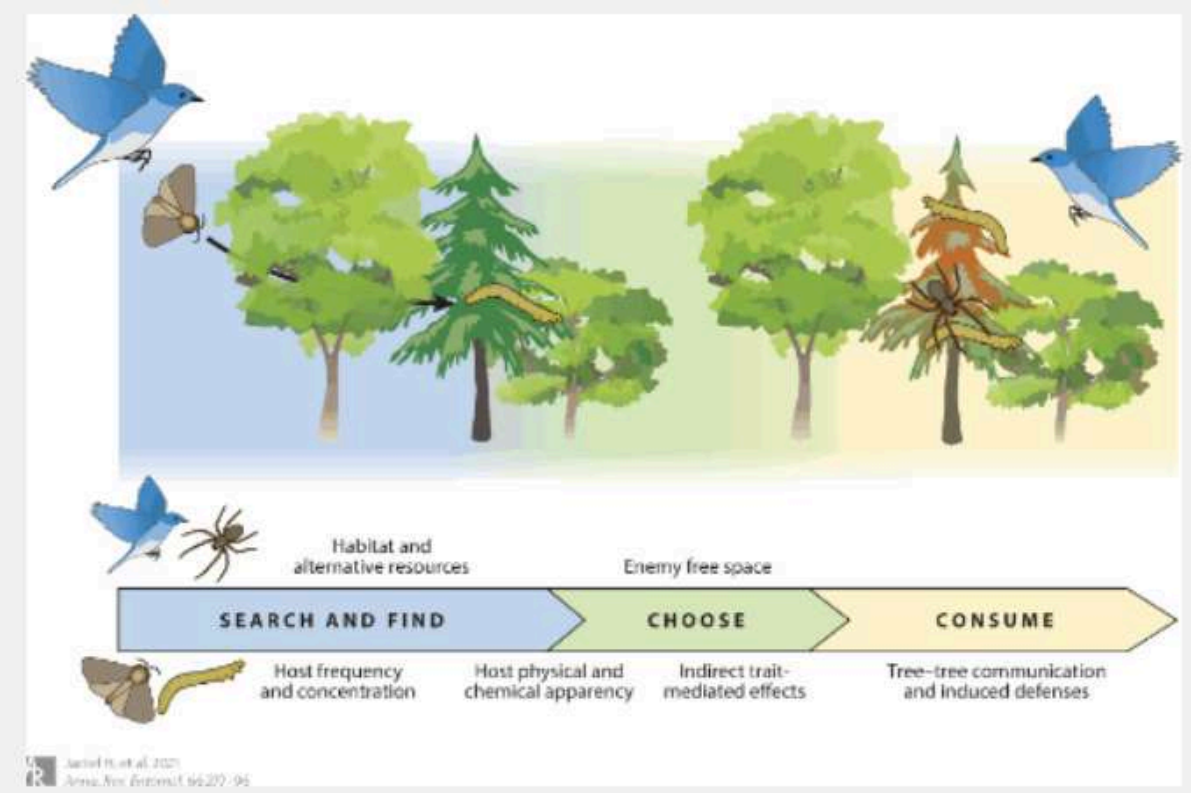


Ce schéma montre que les pins qui se situent dans les peuplements avec une forte diversité subissent moins d'attaques de ravageurs, ont une croissance rapide et un taux de survie plus élevé.

A l'inverse, dans les peuplements de pins avec une faible diversité, les attaques de ravageurs sont élevées, la croissance est plus lente et le taux de survie est faible également. Ainsi, la diversité des essences permet de résister face aux perturbations combinées.

Annexe 5 : Graphiques des effets de la diversité des arbres sur les ennemis naturels

Source : (Jactel et al. 2021)

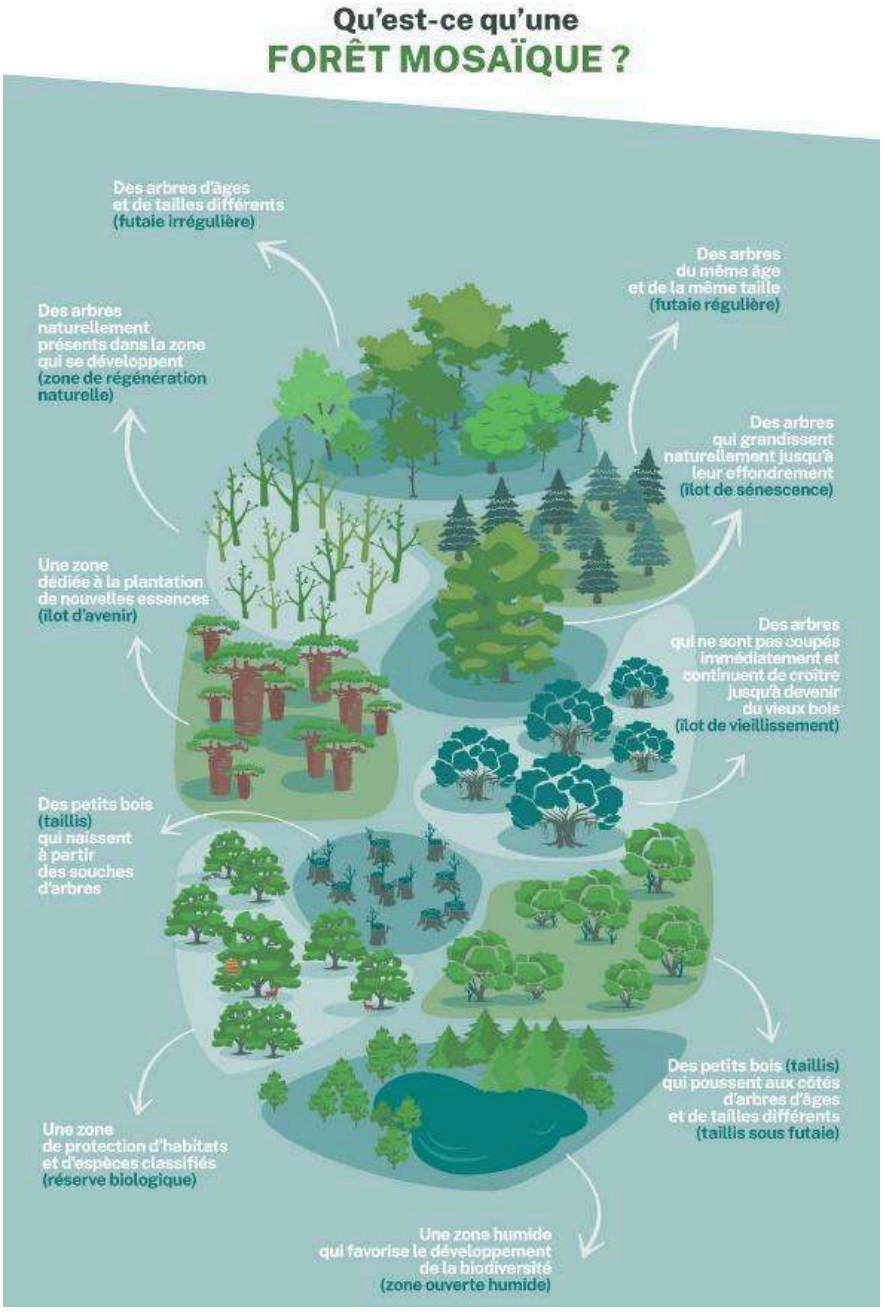


Le schéma montre comment la diversité des arbres autour d'un conifère (entouré de deux espèces de feuillus) peut réduire les dégâts causés par un insecte spécialisé comme la chenille de papillons. La protection se fait par effets ascendants grâce aux arbres non hôtes et descendants par les ennemis naturels comme les oiseaux, les araignées ou les parasitoïdes.

Annexe 6 : Illustration expliquant le concept de forêt mosaïque .

Source : ONF (2023)

.



Cette illustration montre la répartition de différentes zones forestières selon leurs fonctions (production de bois, îlot de vieillissement, réserve biologique…) ce qui permet de renforcer la résilience face aux perturbations climatiques.

Bibliographie

Géoconfluences. s. d. « Résilience ». Consulté le 13 mars 2026.

https://www.geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/resilience.

Robert, M. 2019. « Forêt mixte ».

https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/26557253/foret-mixte Consulté le 13 mars 2026

IGN. s. d. « Forêt monospécifique ».

https://inventaire-forestier.ign.fr/spip.php?rubrique78#:~:text=Les%20peuplements%20purs%2C%20aussi%20appel%C3%A9s,%2C2%20millions%20d'hectares. Consulté le 13 mars 2026

Pickering, Mark, Agata Elia, Gonzalo Oton, et al. 2025. « Enhanced Structural Diversity Increases European Forest Resilience and Potentially Compensates for Climate-Driven Declines ». *Communications Earth & Environment* 6 (1): 852. https://doi.org/10.1038/s43247-025-02592-8.

Alfaro, René I., Bruno Fady, Giovanni Giuseppe Vendramin, et al. 2014. « The role of forest genetic resources in responding to biotic and abiotic factors in the context of anthropogenic climate change ». *Forest Ecology and Management* 333: 76-87. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.04.006.

MNHN. s. d. « Qu'est-ce que la biodiversité ? ». Consulté le 13 mars 2026. https://www.mnhn.fr/fr/qu-est-ce-que-la-biodiversite.

Li, Shuaifeng, Wande Liu, Xuedong Lang, Xiaobo Huang, et Jianrong Su. 2021. « Species richness, not abundance, drives ecosystem multifunctionality in a subtropical coniferous forest ». *Ecological Indicators* 120: 106911. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106911.

« Écologie / Ecology - Redondance fonctionnelle ». s. d. Consulté le 13 mars 2026. https://www.bonobosworld.org/fr/glossaire/redondance-fonctionnelle.

Lukac, Martin. 2017. « Soil biodiversity and environmental change in European forests ». *Central European Forestry Journal* 63. https://doi.org/10.1515/forj-2017-0010. Consulté le 13 mars 2026

Prof. Dr. Arthur Gessler. 2021. « Les forêts intelligentes pour le climat de l'avenir ». National Centre for Climate Services.

https://www.nccs.admin.ch/nccs/fr/home/das-nccs/themenschwerpunkte/waldfunktionen-und-klimawandel/kernaussagen/klimavertraegliche-waelder-der-zukunft.html. Consulté le 13 mars 2026

Germain, Sara J., et James A. Lutz. 2024. « Stand Diversity Increases Pine Resistance and Resilience to Compound Disturbance ». *Fire Ecology* 20 (1): 53. https://doi.org/10.1186/s42408-024-00283-x. Consulté le 13 mars 2026

Grossiord, Charlotte, Arthur Gessler, André Granier, et Damien Bonal. 2015. « Les forêts tempérées face aux conséquences du changement climatique : est-il primordial de favoriser une plus forte diversité d'arbres dans les peuplements forestiers ? » *Revue forestière française* 67 (2): 99-110. https://doi.org/10.4267/2042/57901 . Consulté le 13 mars 2026

Jactel, Hervé, Xoaquín Moreira, et Bastien Castagneyrol. 2021. « Tree Diversity and Forest Resistance to Insect Pests: Patterns, Mechanisms, and Prospects ». *Annual Review of Entomology* 66: 277-96. https://doi.org/10.1146/annurev-ento-041720-075234. Consulté le 13 mars 2026

INRAE. 2020. « Les peuplements forestiers mixtes résistent mieux aux insectes ravageurs ». https://www.inrae.fr/en/news/mixed-forest-stands-better-resist-insect-pests. Consulté le 13 mars 2026

Prévost, Marcel, Vincent Roy, et Patricia Raymond. 2009. « Sylviculture et régénération des forêts mixtes du Québec (Canada) ». https://www.fao.org/4/XII/0871-B4.htm. Consulté le 13 mars 2026

MFFP. 2019. « Répertoire des projets de recherche 2019-2020-2021 Direction de la recherche forestière ». https://mffp.gouv.qc.ca/publications/enligne/forets/activites-recherche/sylviculture/index.asp. Consulté le 13 mars 2026

Pinnschmidt, Arne, Rasoul Yousefpour, Anja Nölte, et Marc Hanewinkel. 2023. « Tropical mixed-species plantations can outperform monocultures in terms of carbon sequestration and economic return ». *Ecological Economics* 211: 107885. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2023.107885. Consulté le 13 mars 2026

Ministère de l'Agriculture, de l'Agro-alimentaire et de la Souveraineté alimentaire. s. d.-b. « Les dispositifs de financement « Forêt-Bois » de la Planification écologique ». https://agriculture.gouv.fr/la-foret-mosaique-ou-le-pari-de-la-diversite Consulté le 13 mars 2026

Académie des sciences. 2023. « Les forêts françaises face au changement climatique ». https://www.academie-sciences.fr/pdf/rapport/060623_foret.pdf. Consulté le 13 mars 2026

Gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg. 2022. « Les forêts intelligentes pour le climat de l'avenir».https://www.nccs.admin.ch/nccs/fr/home/das-nccs/themenschwerpunkte/waldfunktionen-und-klimawandel/kernaussagen/klimavertraegliche-waelder-der-zukunft.html. Consulté le 13 mars 2026

Office national des forêts (ONF). 2022. « Infographie : la forêt mosaïque, une nouvelle sylviculture face au changement climatique ».

https://www.onf.fr/vivre-la-foret/+/8e4::infographie-la-foret-mosaique-une-nouvelle-sylviculture-face-au-changement-climatique.html. Consulté le 13 mars 2026