

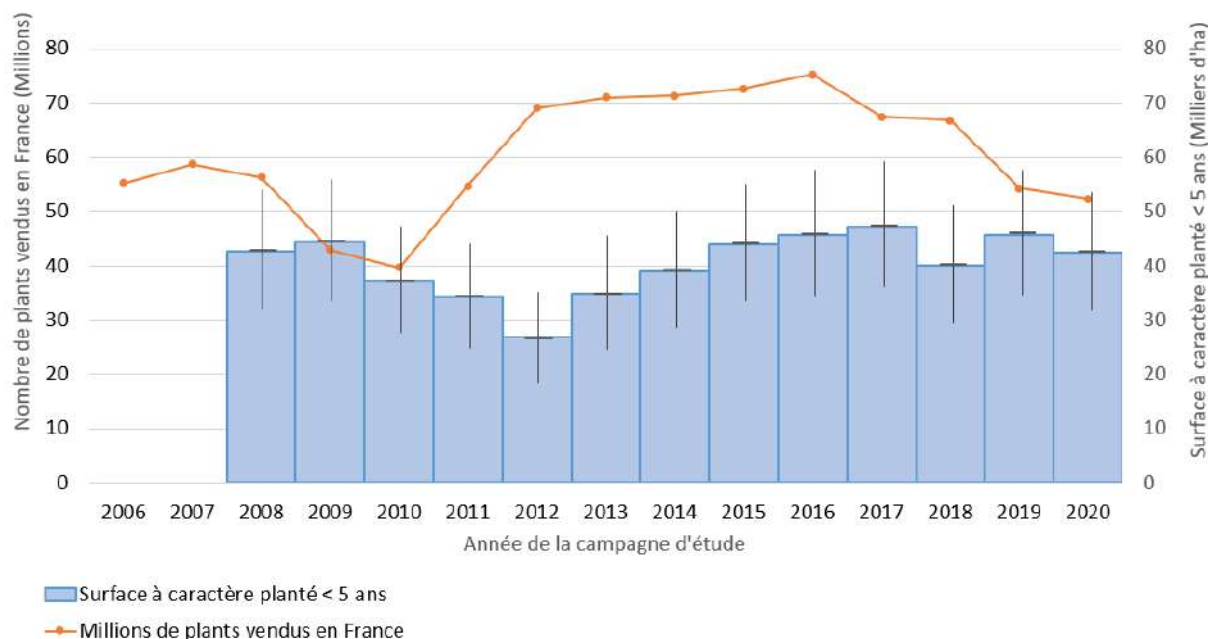


Figure 1.1-10 : Évolution de la commercialisation des plants et de l'estimation des surfaces plantées entre 2006 et 2020

1.4.2.3 Corrélation entre les aides à la plantation, les surfaces à caractère planté et les ventes de plants

En résumé, nous remarquons que les données entre les aides publiques à la plantation, les ventes de plants et les surfaces de plantation sont cohérentes. Il existe cependant un léger décalage dans le temps entre les ventes de plants et l'estimation de la surface par l'IGN. Ce décalage est lié à la méthode d'inventaire des surfaces qui engendre un délai entre la plantation et son recensement effectif dans l'inventaire (passage tous les 5 ans). Pour pallier ce délai, il faut comparer les surfaces de plantations pour une année N avec le nombre de plants vendus deux ans auparavant.

La diminution des surfaces plantées de 2008 à 2012 (de 43 à 27 000 ha) coïncident avec la fin du plan Chablis suite aux tempêtes de 1999. Cela est cohérent avec la diminution des ventes de plants entre 2006 et 2010 (passées de 55 à 40 millions).

À partir de 2013 les surfaces estimées par l'IGN sont en augmentation continue jusqu'en 2017, passant ainsi de 35 000 à 47 000 ha/an, soit 34 % d'augmentation. Cette augmentation est liée aux dégâts de la tempête Klaus de 2009 et la mise en place du plan Chablis pour aider à la reconstitution des forêts sinistrées du sud-ouest. Sur cette même période, les ventes de plants (2011-2015), augmentent également de 33 % (55 à 73 millions de plants). L'augmentation des surfaces ou des ventes de plants intervient quelques années après la tempête et le début du plan Chablis, car avant d'entamer la replantation les aides ont été utilisées pour nettoyer les parcelles sinistrées et construire des pistes forestières.

Actuellement, pour les années 2019 et 2020, nous avons le nombre de plants vendus, mais pas encore les surfaces de plantation estimées par l'IGN en 2021 et 2022. Néanmoins, à l'image du nombre de plants vendus sur ces deux années, les surfaces de plantation devraient diminuer de l'ordre de 15 à 20 %, cette baisse s'expliquant par la fin des aides à la reconstitution du massif landais suite à la tempête Klaus.

1.4.3 Analyse de la nature des essences utilisées pour les plantations forestières

Au cours de cette période tricennale 1990-2020, une évolution des essences utilisées est constatée. Cette évolution est liée, entre autres, à la fin de certaines aides directes de l'État, l'incertitude induite par le changement climatique et les accidents sanitaires rencontrés, sans que l'on puisse toutefois faire précisément la part des choses. Néanmoins, les essences peuvent être regroupées en trois grandes catégories :

- les essences actuellement moins attrayantes pour les plantations ;
- les essences stables ou en légère augmentation ;
- les « nouvelles » essences qui prennent une part de plus en plus importante dans les projets de reboisement.

Dans cette partie, un lien est fait avec les fiches conseils d'utilisation des MFR, qui constituent un état de l'art des connaissances sur les essences réglementées par le code forestier (Pierangelo *et al.*, 2017). Dans le cadre du plan national d'adaptation au changement climatique 2011-2015, le ministère a confié à INRAE la mise en place d'un programme de révision continue des fiches conseils d'utilisations des MFR. Ces fiches existantes depuis 2003 ou les fiches créées pour de nouvelles essences, visent à prendre en compte les risques climatiques pesant sur les prochains cycles sylvicoles. Réalisées par espèce, ces fiches prennent en compte chaque zone d'utilisation, de manière à éviter la création ou le renouvellement à l'identique de peuplements incapables de se maintenir jusqu'au terme de la révolution. Elles permettent également d'engager préventivement l'utilisation des MFR susceptibles d'apporter une meilleure adaptation en contexte d'environnement changeant. Elles ont pour but de mettre à disposition des sylviculteurs et des reboiseurs les connaissances les plus actuelles issues de la recherche française et les recommandations qui en découlent. Ces conseils sont par ailleurs le support d'orientation des aides de l'État à l'investissement forestier pour le boisement et le reboisement (Pierangelo *et al.*, 2017).

1.4.3.1 Des essences en difficultés face aux aléas aujourd'hui

Un certain nombre d'essences, comme le hêtre, l'épicéa commun, le sapin pectiné et le frêne ont été marquées par une diminution progressive des ventes de plants. Les besoins de reconstitution suite aux tempêtes de 1999, ont permis de stopper pendant quelques années cette baisse continue du nombre de plants vendus, initiée dès les années 1960. Malgré cela, ces essences rencontrant des difficultés d'adaptation face au changement climatique et/ou des problèmes sanitaires d'envergure, leurs ventes de plants continuent de régresser.

Le **hêtre** est la deuxième essence feuillue de reboisement en 1992 avec plus de sept millions de plants vendus. Elle est rétrogradée au cinquième rang en 2020. Sur la dernière décennie, la baisse progressive des ventes de plants est attribuable à plusieurs facteurs (ONF, 2007 ; Du Puy *et al.*, 2017) dont :

- la diminution des densités à la plantation à l'image de l'ensemble des feuillus (4 000 tiges/ha dans les années 1980 contre 1 500 tiges/ha à partir de 2010) ;
- les défauts de forme fréquents et nombreux en plantation ;
- la facilité des régénérations naturelles ;
- la sensibilité aux sécheresses et à la chaleur dans un contexte de changement climatique.

Concernant ce dernier point, un des principaux utilisateurs de plants de hêtre, à savoir l'ONF, a mis en garde contre ces risques dès 2007 (ONF, 2007). L'IGN estime à moins de 50 000 ha la surface de hêtre à caractère plantée sur le territoire national (Du Puy *et al.*, 2017).

L'**épicéa commun** était la première essence de reboisement en France en 1992, elle est la huitième essence en 2020 en nombre de plants vendus. Concernant les surfaces de plantations, elle est la troisième essence avec une surface estimée autour de 300 000 ha (Du Puy *et al.*, 2017). La première baisse notable, des ventes de plants, est liée à l'arrêt du FFN. Après des ventes annuelles de deux à quatre millions de plants entre 2000 et 2018, ses ventes chutent depuis 2019. Sa sensibilité à la sécheresse et à la canicule provoque des mortalités, des pertes de croissance et des arbres plus vulnérables aux aléas biotiques. Les attaques de scolytes, notamment le typographe (*Ips typographus*) constitue la problématique majeure de ces dernières années pour l'épicéa : sur des arbres affaiblis par des stress hydriques, les scolytes accélèrent le phénomène de dépérissement. L'évolution du changement climatique et les exigences écologiques de l'épicéa poussent à déconseiller les plantations en zones de plaine (Gillette *et al.*, 2020). Les zones pour lesquelles des plantations d'épicéa commun peuvent être recommandées sont aujourd'hui réduites aux zones montagnardes (> 1000 m d'altitude) et sous conditions entre 600 et 1000 m d'altitude. Après coupe, l'épicéa commun est désormais très fréquemment remplacé par une autre essence (notamment le douglas), le besoin en plants a par conséquent fortement diminué.

Le **sapin pectiné** était la 12^e essence plantée en 1992 et il est en-deçà de la 20^e place aujourd'hui. Cette espèce enregistre une baisse de 90 % du nombre de plants vendus entre 1992 et 2020. La surface à caractère plantée de cette essence en France est estimée à 80 000 ha par l'IGN (Du Puy *et al.*, 2017). Comme pour l'épicéa commun cette essence apparaît peu tolérante aux sécheresses et canicules estivales (Fady *et al.*, 2022). Les épisodes de sécheresse subis depuis 2003 ont provoqué des dépérissements importants. Les zones en dessous de 600 m d'altitude sont aujourd'hui déconseillées à la plantation de sapin pectiné et une attention particulière est portée sur l'adéquation de la parcelle de plantation avec les besoins de l'essence en hygrométrie de l'air et du sol. De fait, sa zone d'utilisation potentielle et par conséquent le besoin en plants sont réduits.

Le **frêne commun** était la cinquième essence feuillue en 1992 avec 1,5 millions de plants vendus ; les ventes sont aujourd'hui quasiment nulles (≈ 10 000 plants en 2020). En 2017, l'IGN estimait les surfaces plantées en frêne à environ 30 000 ha (Du Puy *et al.*, 2017). L'émergence de la maladie de la chalarose du frêne, a provoqué en France depuis 2008 des dépérissements importants pouvant conduire à la mort des arbres (Delport *et al.*, 2018). Devant l'ampleur de son expansion à travers l'Europe, puis la France, la filière s'est organisée autour d'un projet commun : CHALFRAX⁴¹⁶. Les plantations de frêne commun sont fortement déconseillées sur la totalité du territoire métropolitain (Dowkiw *et al.*, 2017), cela explique la chute drastique des ventes de plants depuis 2008.

1.4.3.2 Des essences qui se maintiennent

Pour de nombreuses essences, le nombre de plants vendus est moins important qu'en 1992, mais il reste à un niveau relativement constant ou croissant depuis les années 2000. Nous proposons de traiter ci-dessous quelques exemples d'essences offrant un débouché important pour la filière bois et représentant une part importante des reboisements en France.

Le **pin maritime**, le **douglas** et le **chêne sessile** sont fortement présents dans les plantations au début des années 1990, le sont toujours aujourd'hui et dominent le marché des plants forestiers. Ces dernières années, plus de 70 % des plants vendus en France concernent l'une de ces trois essences. Le pin maritime a vu son nombre de plants vendus augmenter suite aux modifications de techniques de reboisement (semis direct vers plantation) et aux nécessités de reconstitution après tempête. Le douglas retrouve en 2020 son niveau de production de plants des années 1990 (≈ 12 millions de plants)

⁴¹⁶ Voir ici : <https://chalfrax.cnpf.fr/n/chalarose-comment-faire/n:2628>

avec un creux en 2010 puis une demande en augmentation régulière. Le chêne sessile oscille entre 3 et 4 millions de plants depuis 2008.

Pour le pin à l'encens et l'épicéa de Sitka, sur la période 1992-2020 peu de ventes de plants sont enregistrées jusqu'en 2010, puis une augmentation significative des ventes s'est produite à partir de cette date. Ces deux essences, avec plus d'un million de plants vendus chacune en 2020 représentent 5 % des ventes en France :

- le **pin à l'encens** (pin taeda) est utilisé en reboisement dans le massif des Landes de Gascogne depuis les années 1980, offrant ainsi une alternative au pin maritime dans le massif landais (Alazard *et al.*, 2020). Son utilisation a été stimulée une première fois suite à la tempête de décembre 1999 où il a démontré une bonne résistance au vent et une seconde fois de façon plus importante avec le programme d'aide à la reconstitution du massif landais suite à la tempête Klaus (2009). En 2020, elle est considérée comme la quatrième essence de reboisement pour le nombre de plants vendus ;
- l'**épicéa de Sitka** a été planté massivement en Bretagne dans les années 1960-1970 sous l'impulsion du FFN pour répondre à un besoin en bois important (Bastien *et al.*, 2017). À partir des années 2021, il profite d'une reprise des ventes de plants : la vente des bois matures à un prix intéressant a motivé les propriétaires à replanter après coupe rase, malgré quelques alertes concernant des problèmes sanitaires et un encouragement de la filière à une diversification.

Le **cèdre de l'Atlas** était déjà bien présent dans le paysage des plantations avant 1992 car soutenu par différents programmes de subvention dans les années 1970 et 1980, notamment par le FFN et dans le cadre de la restauration des terrains de montagne et en région méditerranéenne. Les ventes de plants pour cette essence représentaient en 1992 plus de 1,6 million de plants ; puis entre 1997 et 2017, les ventes étaient annuellement inférieures à 500 000 plants. Considéré comme ayant une bonne résistance à la sécheresse, il est identifié depuis quelques années pour les reboisements y compris hors région méditerranéenne dans le cadre de l'adaptation au changement climatique (Lefèvre *et al.*, 2016). Les plantations repartent donc à la hausse avec plus de 870 000 plants vendus en 2020, soit 2 % des ventes.

Le **pin laricio de Corse** a été introduit massivement dans plusieurs régions de France (Sologne, Pays de la Loire, Normandie, etc.) (Fady *et al.*, 2020a). Les peuplements de pin laricio sont impactés à partir des années 2010 (et surtout en 2015) par la maladie des bandes rouges. Cette maladie a d'abord fortement inquiété les reboiseurs puis les résultats du projet de recherche Dolar ont permis de quantifier les impacts du pathogène sur la mortalité et la baisse de croissance ; le pin laricio (de Corse et de Calabre) reste une essence de reboisement d'intérêt (Perret *et* Chartier, 2021). Ainsi, après une baisse des ventes entre 2013 et 2016, elles sont reparties à la hausse pour atteindre plus de 1,2 millions de plants vendus en 2020.

D'autres essences représentent moins de plants vendus (inférieures à 70 000 plants/an/essence) mais sont tout de même importantes à prendre en considération car elles permettent d'apporter de la diversification aux plantations. Il s'agit par exemple des chênes méditerranéens et des tilleuls.

1.4.3.3 Des essences qui ont le vent en poupe

De nouvelles essences, jusqu'ici pas ou très peu représentées dans les plantations ont fait leurs apparitions ces dernières années. Le plus souvent, ces essences sont étudiées et expérimentées à travers des projets de recherche visant à mieux connaître leur comportement et leur intérêt face au changement climatique. Elles se substituent généralement à des essences rencontrant des problèmes de dépérissement. Les essences ayant un attrait récent pour la plantation sont principalement : le

chêne pubescent, les pins de Salzmann et brutia et les sapins méditerranéens (Bornmuller et Céphalonie).

Le **chêne pubescent** connaît un certain engouement au cours de ces dernières années. Cette évolution a été stimulée par le projet CONQueth⁴¹⁷ qui a évalué le potentiel adaptatif de cette essence en remplacement des chênes pédonculé et sessile dans le Nord de la France dans le cadre du changement climatique (Girard *et al.*, 2021, 2022). Si le nombre de plants a plus que doublé depuis 2003, il reste cependant encore modeste (170 000 plants vendus en 2020), soit en 21^{ème} position des essences les plus vendues. Portée par le plan France Relance, l'augmentation des ventes de plants de chêne pubescent va se poursuivre. Ces trois dernières années, les récoltes de graines pour la production de plants ont été multipliées par dix.

Le **sapin de Bornmüller** est une essence qui présente plusieurs atouts majeurs face au changement climatique, notamment par sa résistance aux sécheresses et aux fortes chaleurs estivales (Fady *et al.*, 2021). Il est considéré comme une sous espèce du sapin de Nordmann et doit être utilisé préférentiellement au sapin de Nordmann. Il est également le sapin méditerranéen le moins sensible aux gelées tardives. Les ventes de plants sont passées pour la première fois au-dessus des 100 000 plants en 2020 après une augmentation constante depuis le début des années 2000. Cependant des restrictions dans les conseils d'utilisation – liées au risque d'hybridation avec les sapins pectinés autochtones – pourraient limiter son expansion (Fady *et al.*, 2021).

Le **pin de Salzmann** est une essence méditerranéenne considérée comme rustique et résistante à la sécheresse (Fady *et al.*, 2020b). Jusqu'à présent, aucun dépérissement imputable aux conditions climatiques n'ayant été observé, ce pin pourrait constituer une essence de reboisement intéressante en alternative aux autres pins noirs malgré des qualités de forme et de branchaison inférieures. Concernant les ventes de plants, elles sont passées de moins de 10 000 plants par an avant 2017, à plus de 20 000 ces trois dernières années.

Le **pin brutia** est un pin méditerranéen résistant à la sécheresse et au froid (Fady *et al.*, 2019). Il pourrait remplacer les pins noirs et le pin sylvestre, notamment dans les stations méditerranéennes de moyenne altitude. Avec des ventes de plants quasiment inexistantes avant 2019, il atteint 17 000 plants vendus en 2020 mais il est encore trop tôt pour savoir si ces ventes vont se confirmer. Elles resteront probablement limitées du fait de l'utilisation du pin brutia cantonnée à la région méditerranéenne (conseils d'utilisations).

Pour le moment, les ventes de plants de ces essences émergentes sont encore anecdotiques face au marché des plants de pin maritime, de douglas ou de chêne sessile, mais une tendance commence à se dessiner. En 2020, les quatre essences décrites ci-dessus représentaient près de 1 % des ventes de plants en France, contre 0,3 % en 2019 et moins de 0,1 % les années antérieures.

1.5 Besoins de recherche et pistes de recommandations

La plantation forestière en France est aujourd'hui en transition. Elle contribue à adapter les forêts face à des défis émergents multiples, afin d'assurer durablement sa multifonctionnalité. La dynamique des plantations est sous forte influence des décisions politiques européennes et françaises, notamment par les aides publiques à la plantation. Il y a fort à parier que le plan France Relance 2020, puis le plan France 2030 vont induire une hausse des plantations dans les prochaines années. Les premiers chiffres, non publiés, de la campagne de ventes de plants 2021 montrent déjà une très nette augmentation. En effet, avec le plan France Relance fin 2020, l'État a annoncé dédier 150 M€ pour engager le

⁴¹⁷ Capacité d'Occupation du Nord par les Quercus Thermophiles : <https://www.cnpf.fr/nos-actions-nos-outils/focus-sur-quelques-projets/chene-pubescent-projet-conqueth>

renouvellement forestier, l'objectif de ce plan étant d'adapter, régénérer ou reconstituer 45 000 ha de forêts, soit la plantation d'environ 50 millions d'arbres d'ici 2024. Cet effort est prolongé à horizon 2030 suite aux Assises de la forêt et du bois et aux incendies subis lors de l'été 2022, Emmanuel Macron a annoncé, le 28 octobre 2022, la plantation d'un milliard d'arbres d'ici 2030. Si les chiffres annoncés restent relativement modestes par rapport aux efforts du FFN, cela constitue le plus gros effort d'appui à la plantation depuis lors.

Au cours des prochaines décennies, les plantations forestières devront prendre en compte, de façon croissante, l'enjeu majeur que représente l'adaptation des forêts au changement climatique avec l'objectif de réduire les principaux risques forestiers, malgré les conflits sociétaux autour de cette pratique. Il conviendra notamment de considérer les conditions de réussite des reboisements, ainsi que de leur impact sur la biodiversité et sur le territoire (Leroy *et al.*, 2021). Un point clé de l'adaptation des forêts plantées est la diversification des essences et des provenances pour favoriser leur résilience.

La revue de littérature effectuée ici montre que nous manquons d'études sur la connaissance des plantations : leur répartition, leur composition, leur succès, l'évolution des écosystèmes associés, etc.

Le temps imparti pour l'étude n'a pas permis d'aller plus loin ; cependant, les **archives liées aux aides de l'État pour le reboisement, ainsi que les archives de l'ONF et des pépiniéristes et reboiseurs pourraient être mobilisées pour approfondir les estimations de surfaces plantées, ainsi que leur composition et leur localisation**. Il y a un réel intérêt à **pouvoir suivre les plantations réalisées dans le cadre des plans France Relance et France 2030** dans leurs objectifs.

Par ailleurs, nous n'avons aujourd'hui aucune visibilité sur les plantations hors aides, les statistiques annuelles de ventes de plants. La traçabilité des plants s'arrête au fournisseur de ceux-ci et il pourrait être très intéressant d'avoir une **traçabilité jusqu'au lieu de plantation**. Cette thématique de la traçabilité fait actuellement débat à l'échelle de la Commission européenne dans le cadre la révision du Règlement européen sur les semences et plants⁴¹⁸. Cela pourrait permettre d'avoir une **meilleure visibilité des plantations avec aide de l'État et hors aides de l'État** et de pouvoir analyser plus finement les **surfaces réellement plantées** ainsi que la **destination géographique des plants**. La chose est cependant complexe à mettre en œuvre.

Plusieurs programmes vont financer des actions de recherche et développement sur et pour la filière graines et plants dans les années à venir, dont :

- le programme issu de la fiche 2.9 des assises de la forêt et du bois « Produire des matériels forestiers de reproduction adaptés au climat futur » qui va notamment financer l'installation de nouveaux vergers à graines, l'optimisation du processus de classement des peuplements sélectionnés et le renforcement de la R&D sur et pour les MFR ;
- le Programme Prioritaire de Recherche « Forêts » de 50 M€ annoncé en novembre 2022 par le gouvernement. Il doit venir en soutien à la filière graines et plants forestiers et sera piloté par INRAE en lien avec le CNRS, le CIRAD et le GIP Ecofor.

1.6 Références bibliographiques

Alazard, P., Fraysse, J.-Y., Bailly, A., Ricodeau, N., Collin, E., 2020. Fiche conseil d'utilisation du pin à l'encens (*Pinus taeda* L.).

Arnould, B., Demolis, C., Douard, P., Meignien, X., 2016. La restauration des terrains en montagne (RTM) : Mise en œuvre de la politique de prévention des risques par les services RTM (No. CGEDD

⁴¹⁸ Voir ici : https://food.ec.europa.eu/plants/plant-reproductive-material/legislation/future-eu-rules-plant-and-forest-reproductive-material_en

- n°010240-01 ; CGAER n°15061). Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie ; Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt.
- Auricoste, I., de Comarmond, H., de Menthère, C., 2021. Compensations environnementale, forestière et collective agricole : évaluation et mise en cohérence (No. CGEDD n°013246, CGAAER n°20013). CGEDD, CGAAER.
- Barthod, C., 2001. La réforme des financements publics aux investissements forestiers. *Revue forestière française* 53, 9–28. <https://doi.org/10.4267/2042/5800>
- Bastien, J.-C., Ricodeau, N., Collin, E., 2017. Fiche conseil d'utilisation de l'épicéa de Sitka (*Picea sitchensis* Carr.).
- Cinotti, B., 1996. Évolution des surfaces boisées en France : proposition de reconstitution depuis le début du XIXe siècle. *Revue Forestière Française* 48, 547–562. <https://doi.org/10.4267/2042/26776>
- Croisel, J., 2007. L'évaluation des politiques forestières : le cas du Plan Chablis dans le département des Vosges (Sciences humaines et sociales). ENGREF (AgroParisTech), Nancy.
- de Galbert, M., Magrum, M., Morin, G.-A., 2015. Valorisation agricole et forestière de l'espace (No. CGAAER n° 14064). CGAAER.
- de Rochebouet, H., 1987. Le Fonds forestier national a 40 ans : Le reboisement. *RFF numéro spécial* 1987, 10–18.
- Dedinger, P., Bénézit, J.-J., 2020. Mesures fiscales DEFI forêt. Évaluation et propositions d'évolution (No. CGAAER N°19100). CGAAER.
- Delion, D., 1986. A propos de la production des plants d'essences feuillues dans les pépinières forestières de 1974-75 à 1983-84. *Revue forestière française* XXXVIII, 517–529.
- Delport, F., Druilhe, M., Husson, C., Marçais, B., Goudet, M., Bélouard, T., Saintonge, F.-X., Dowkiw, A., Bartela, C., Negrignat, C., Baumeister, M., et al, 2018. Dossier : Chalfrax, programme de gestion nationale des frênaies face à la chalarose. *Forêt entreprise* 243, 16–60.
- Dowkiw, A., Husson, C., Cano, B., Ricodeau, N., Pierangelo, A., 2017. Fiche conseil d'utilisation du frêne commun (*Fraxinus excelsior* L.).
- Du Puy, S., Derrière, N., Wurpillot, S., 2017. La forêt plantée en France : état des lieux. *L'IF, La feuille de l'inventaire forestier IGN* 40, 1–16.
- Escande-Vilbois, S., Dedinger, P., 2021. Impact des scolytes sur le budget des communes forestières dans l'Est de la France et adaptation de la gestion des forêts communales au changement climatique (No. IGA n°21010-R et CGAAER n°21023). Inspection générale de l'administration et Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux.
- Fady, B., Martin, N., Pichot, C., Ricodeau, N., 2019. Fiche conseil d'utilisation du pin brutia (*Pinus brutia* Ten.).
- Fady, B., Perret, S., Ricodeau, N., Pierangelo, A., 2020a. Fiche conseil d'utilisation de pin laricio (*Pinus nigra* var. *corsicana* (Loudon) Hyl. et *Pinus nigra* var. *calabrica* (Loudon) C.K.Schneid.).
- Fady, B., Perret, S., Ricodeau, N., Pierangelo, A., 2020b. Fiche conseil d'utilisation du pin de Salzmann (*Pinus nigra* subsp. *Salzmannii* (Dunal) Franco).
- Fady, B., Scotti-Saintagne, C., Fornes, N., 2022. Fiche conseil d'utilisation du Sapin pectiné (*Abies alba* Mill.).
- Fady, B., Scotti-Saintagne, C., Fornes, N., Pierangelo, A., Ricodeau, N., 2021. Fiche conseil d'utilisation du sapin de Bornmüller (*Abies bornmuelleriana* Mattf.).

- FAO, Commission on genetic resources for food and agriculture, 2014. State of the World's Forest Genetic Resources. Rome.
- Gadant, J., 1996. Quand l'écologie devient nuisance. *Revue Forestière Française* XLVIII, 403–415.
- Gadant, J., 1987. Le Fonds forestier national a 40 ans : Quarante ans au service de la forêt française. *RFF* numéro spécial 1987, 10–18.
- Gillette, M., Saintonge, F.-X., Ricodeau, N., Pierangelo, A., 2020. Fiche conseil d'utilisation de l'épicéa commun (*Picea abies* (L.) Karst).
- Ginisty, C., Ruchaud, F., Baud, S., Guinaudeau, F., 1998. Enquête sur la réussite des boisements, reboisements et améliorations réalisés avec l'aide du Fonds forestier national et du Budget de l'État (période 1973-1988)- Synthèse nationale. AFOCEL et Cemagref.
- Girard, S., Weben, C., Brusten, T., Ducouso, A., Fornes, N., Pierangelo, A., 2022. Fiche conseil d'utilisation du chêne pubescent (*Quercus pubescens* Willd.).
- Girard, S., Weben, C., et al, 2021. Dossier : Le chêne pubescent à la CONQueTh du Nord. *Forêt entreprise* 261, 18–49.
- Guittou, J.-L., Riou-Nivert, P., 1987. Le Fonds forestier national a 40 ans : Reboisement et sylviculture des résineux. *RFF* numéro spécial 1987, 56–67.
- IGN, 2021. Etat et évolution des forêts françaises métropolitaines. Indicateurs de gestion durable 2020 (Rapport 307 p. <https://foret.ign.fr/IGD/>).
- IGN, 2017. La forêt plantée en France : Etats des lieux. L'IF, La feuille de l'Inventaire Forestier National IGN 40.
- IGN, n.d. Évaluation des dégâts de la tempête Klaus.
- Inventaire forestier national, 2003. Les tempêtes de décembre 1999 - Bilan national et enseignements. L'IF 2, 1–8.
- Lavarde, P., Attali, C., Fradin, G., de Menthère, C., Dereix, C., 2013. Vers un filière intégrée de la forêt et du bois (No. CGAAER n°12163). Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie ; Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt ; Ministère du redressement productif.
- Le Chatelier, X., 1967. Le financement du bois par le F.E.O.G.A. *RFF* 680–687. <https://doi.org/10.4267/2042/24858>
- Lefèvre, F., Courbet, F., Ripert, C., Ricodeau, N., Pierangelo, A., 2016. Fiche conseil d'utilisation du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti).
- Legay, M., Le Boulter, H., 2014. Projet NOMADES - Fascicule 1 : Éléments d'histoire et de répartition géographique des essences forestières introduites en France métropolitaine. ONF et CNBF.
- Leroy, M., Bontemps, J.-D., Brahic, E., Dupouey, J.-L., Forget, P.-M., Garcia, S.S., Gond, V., Lengfeld, A.N.K. von, Landmann, G., Morin, X., Pélissier, R., Picard, N., Marty, P., 2021. Quels besoins de connaissances pour le futur des forêts en France ? Au-delà du plan de relance. *Revue forestière française* 73, 7. <https://doi.org/10.20870/revforfr.2021.4992>
- Métro, A., 1975. Dictionnaire forestier multilingue : Terminologie forestière (Sciences forestières, technologie, pratiques et produits forestiers) - Version française, N°2. ed, Collection de terminologie forestière multilingue. Association Française des eaux et forêts Conseil international de la langue française.
- Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2020. Plan de Relance - Appel à manifestation d'intérêt - Aider la forêt à s'adapter au changement climatique pour mieux l'atténuer. Volet "Renouvellement forestier".

- Moreau, F., Piveteau, V., 2022. Le développement de la contractualisation dans la filière forêt-bois (No. CGAAER n°21081-P). Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation - CGAAER.
- Office national des forêts Direction technique, 2007. Gestion des hêtraies dans les forêts publiques françaises, Rendez-vous techniques de l'ONF, hors-serie n°2. ed.
- Perret, S., Chartier, M., 2021. Dossier : Le pin laricio, toujours d'actualité : résultats du programme Dolar. Forêt entreprise 259.
- Perron, D., 2021. La forêt française Une histoire politique, l'aube. ed.
- Pierangelo, A., Bouillon, P., Brando, J., Chauvin, J., Girard, S., Guibert, M., Desprez-Loustau, M.-L., Porquet, I., Ricodeau, N., Riou-Nivert, P., Roman-Amat, B., 2017. Ressources génétiques forestières : Conseils d'utilisation des matériels forestiers de reproduction - Document d'accompagnement des fiches espèces.
- Piton, B., 2021. 4.2. Caractère naturel des forêts, in: État et Évolution Des Forêts Françaises Métropolitaines - Indicateurs de Gestion Durable 2020. pp. 178–182.
- Piton, B., Benest, F., Carouille, F., Cuny, H., Gosselin, M., Montagné-Huck, C., Nicolas, M., Rocquencourt, A., 2021. État et évolution des forêts françaises métropolitaines - Synthèse des indicateurs de gestion durable 2020, IGN Institut national de l'information géographique et forestière. ed.
- Roman-Amat, B., 1983. A propos de la production de plants résineux dans les pépinières françaises entre 1974 et 1982. Bulletin d'information du CEMAGREF 307–308, 47–56.
- Steinmetz, G., 1987. Le Fonds forestier national a 40 ans : Les reboisements feuillus, évolution au cours de la dernière décennie. RFF numéro spécial 1987, 10–18.
- Thivolle Cazat, A., Ginisty, C., 2001. Enquête sur les travaux de boisement, reboisement et d'amélioration forestière aidés par l'Etat en région méditerranéenne (période 1980 - 1995). Rapport final. AFOCEL et Cemagref.

1.7 Annexes

Annexe 1.1-1 : Liste des essences enquêtées en 2020

Résineux	
Réglementés	
Nom commun	Nom botanique
Cèdre de l'Atlas	<i>Cedrus atlantica</i>
Cèdre du Liban	<i>Cedrus Libani</i>
Douglas vert	<i>Pseudotsuga menziesii</i>
Épicéa commun	<i>Picea abies</i>
Épicéa de Sitka	<i>Picea sitchensis</i>
Mélèze d'Europe	<i>Larix decidua</i>
Mélèze de Sibérie	<i>Larix sibirica</i>
Mélèze du Japon	<i>Larix kaempferi</i>
Mélèze hybride	<i>Larix x eurolepis</i>
Pin à encens	<i>Pinus taeda</i>
Pin brutia	<i>Pinus brutia</i>
Pin cembro	<i>Pinus cembra</i>
Pin d'Alep	<i>Pinus halepensis</i>
Pin de Bosnie	<i>Pinus leucodermis</i>
Pin de Monterey	<i>Pinus radiata</i>
Pin de Salzmann	<i>Pinus nigra Arn. ssp salzmannii</i>
Pin des Canaries	<i>Pinus canariensis</i>
Pin laricio de Calabre	<i>Pinus nigra var. calabrica</i>
Pin laricio de Corse	<i>Pinus nigra var. corsicana</i>
Pin maritime	<i>Pinus pinaster</i>
Pin noir d'Autriche	<i>Pinus nigra Arn. ssp nigra</i>
Pin pignon	<i>Pinus pinea</i>
Pin sylvestre	<i>Pinus sylvestris</i>
Pin tordu	<i>Pinus contorta</i>
Sapin de Bornmuller	<i>Abies bornmuelleriana</i>
Sapin de Céphalonie	<i>Abies cephalonica</i>
Sapin de Vancouver	<i>Abies grandis</i>
Sapin pectiné	<i>Abies alba</i>
Sapin pinsapo	<i>Abies pinsapo</i>
Hors réglementation	
Cryptomère du Japon	<i>Cryptomeria japonica</i>
Cyprès commun	<i>Cupressus sempervirens</i>
Pin à crochets	<i>Pinus uncinata</i>
Pin Weymouth	<i>Pinus strobus</i>
Sapin de Nordmann	<i>Abies nordmanniana</i>
Sapin noble	<i>Abies procera</i>
Séquoia toujours vert	<i>Sequoia sempervirens</i>
Thuya géant	<i>Thuya plicata</i>
Tsuga de Californie	<i>Tsuga heterophylla</i>

Feuillus	
Réglementés	
Nom commun	Nom botanique
Alisier torminal	<i>Sorbus torminalis</i>
Aulne à feuilles en cœur	<i>Alnus cordata</i>
Aulne blanc	<i>Alnus incana</i>
Aulne glutineux	<i>Alnus glutinosa</i>
Bouleau pubescent	<i>Betula pubescens</i>
Bouleau verruqueux	<i>Betula pendula</i>
Charme	<i>Carpinus betulus</i>
Châtaignier	<i>Castanea sativa</i>
Chêne chevelu	<i>Quercus cerris</i>
Chêne liège	<i>Quercus suber</i>
Chêne pédonculé	<i>Quercus robur</i>
Chêne pubescent	<i>Quercus pubescens</i>
Chêne rouge	<i>Quercus rubra</i>
Chêne sessile	<i>Quercus petraea</i>
Chêne vert	<i>Quercus ilex</i>
Cormier	<i>Sorbus domestica</i>
Eucalyptus Gundal	<i>Eucalyptus gunnii x dalrympleana</i>
Erable champêtre	<i>Acer campestre</i>
Erable plane	<i>Acer platanoides</i>
Erable sycomore	<i>Acer pseudoplatanus</i>
Frêne commun	<i>Fraxinus excelsior</i>
Frêne oxyphylle	<i>Fraxinus angustifolia</i>
Gommier à cidre	<i>Eucalyptus gunnii</i>
Gommier bleu	<i>Eucalyptus globulus</i>
Hêtre	<i>Fagus sylvatica</i>
Merisier	<i>Prunus avium</i>
Noyer hybride	<i>Juglans major x regia</i>
Noyer hybride	<i>Juglans nigra x regia</i>
Noyer noir d'Amérique	<i>Juglans nigra</i>
Noyer royal	<i>Juglans regia</i>
Peuplier noir	<i>Populus nigra</i>
Pommier sauvage	<i>Malus sylvestris</i>
Robinier faux-acacia	<i>Robinia pseudoacacia</i>
Tilleul à grandes feuilles	<i>Tilia platyphyllos</i>
Tilleul à petites feuilles	<i>Tilia cordata</i>
Tremble	<i>Populus tremula</i>
Hors réglementation	
Alisier de Fontainebeau	<i>Sorbus latifolia</i>
Alisier blanc	<i>Sorbus aria</i>
Bourdaie	<i>Rhamnus frangula</i>
Néflier	<i>Mespilus germanica</i>
Orme	<i>Ulmus sp.</i>
Poirier sauvage	<i>Pyrus pyraeaster</i>
Saule blanc	<i>Salix alba</i>
Saule fragile	<i>Salix fragilis</i>
Sorbier des oiseaux	<i>Sorbus aucuparia</i>
Tulipier de Virginie	<i>Liriodendron tulipifera</i>

Annexe 1.1-2 : Liste des essences enquêtées en 1992

Résineux	
Nom commun	Nom botanique
Cèdre de l'Atlas	<i>Cedrus atlantica</i>
Cyprés commun	<i>Cupressus sempervirens</i>
Douglas vert	<i>Pseudotsuga menziesii</i>
Epicéa commun	<i>Picea abies</i>
Epicéa de Sitka	<i>Picea sitchensis</i>
Mélèze d'Europe	<i>Larix decidua</i>
Mélèze du Japon	<i>Larix kaempferi</i>
Pin d'Alep	<i>Pinus halepensis</i>
Pin laricio de Calabre	<i>Pinus nigra</i> var. <i>calabrica</i>
Pin laricio de Corse	<i>Pinus nigra</i> var. <i>corsicana</i>
Pin maritime	<i>Pinus pinaster</i>
Pin noir d'Autriche	<i>Pinus nigra</i> Arn. ssp <i>nigra</i>
Pin sylvestre	<i>Pinus sylvestris</i>
Sapin de Nordmann	<i>Abies nordmanniana</i>
Sapin de Vancouver	<i>Abies grandis</i>
Sapin pectiné	<i>Abies alba</i>
FEUILLUS	
Chêne pédonculé	<i>Quercus robur</i>
Chêne rouge	<i>Quercus rubra</i>
Chêne sessile	<i>Quercus petraea</i>
Erable sycomore	<i>Acer pseudoplatanus</i>
Frêne commun	<i>Fraxinus excelsior</i>
Hêtre	<i>Fagus sylvatica</i>
Merisier	<i>Prunus avium</i>
Noyer hybride	<i>Juglans</i> sp.

Annexe 1.1-3 : Tableau des moyennes des ventes de plants pour les principales essences

essence	1992/1995 (4 ans)	1996/2000 (5 ans)	2001/2005 (5 ans)	2006/2010 (5 ans)	2011/2015 (5 ans)	2016/2020 (5 ans)
alisier blanc	nc	nc	nc	18 464	11 318	12 760
alisier torminal	nc	nc	nc	114 300	96 257	85 034
aulne à feuilles en cœur	nc	nc	nc	67 206	57 194	18 098
aulne glutineux	nc	282 560	302 932	206 869	203 493	165 221
bouleau verruqueux	nc	nc	nc	103 378	121 343	130 997
bourdaine	nc	nc	nc	nc	nc	37 502
cèdre de l'Atlas	1 104 975	403 840	259 923	305 291	319 722	593 613
charme	nc	nc	nc	457 330	521 169	345 019
châtaignier	nc	521 520	445 675	316 238	253 413	275 282
chêne chevelu	nc	nc	16 386	18 964	11 720	8 960
chêne liège	nc	nc	nc	9 924	8 894	6 360
chêne pédonculé	3 048 600	1 658 260	1 184 288	695 944	444 601	457 329
chêne pubescent	nc	nc	nc	39 442	38 412	70 813
chêne rouge	2 939 100	1 470 380	997 497	575 725	376 497	469 977
chêne sessile	7 306 000	4 681 240	4 724 736	4 092 729	3 599 647	3 651 338
chêne vert	nc	nc	nc	37 497	19 850	17 078
cormier	nc	nc	37 727	39 483	47 589	41 688
douglas vert	9 915 975	6 849 280	7 749 635	6 289 918	7 849 883	10 872 854
épicéa commun	10 586 350	4 270 840	3 251 420	2 098 116	2 338 980	1 792 747
épicéa de Sitka	518 050	336 860	279 874	363 690	836 565	1 085 737
érable champêtre	nc	nc	236 773	225 896	199 973	88 977
érable plane	nc	nc	85 270	70 053	46 519	52 173
érable sycomore	1 200 075	794 440	581 701	400 233	228 142	182 555
frêne commun	1 483 275	697 540	449 475	289 566	107 304	20 111
gommier à cidre	nc	nc	nc	nc	nc	16 447
hêtre	5 377 700	3 431 280	2 334 604	1 315 164	725 940	481 568
mélèze d'Europe	1 388 350	831 740	1 194 589	1 031 380	918 494	878 742
mélèze du Japon	136 075	102 900	134 977	101 909	133 953	54 805
mélèze hybride	nc	108 340	193 401	166 762	512 218	858 848
merisier	1 225 575	549 320	468 912	359 365	229 990	137 896
néflier	nc	nc	nc	nc	nc	17 724
noyer hybride	nc	nc	nc	nc	40 711	27 622
noyer noir d'Amérique	nc	39 220	13 939	13 170	8 021	10 940
noyer royal	nc	87 360	55 603	106 103	35 366	18 312
pin à crochets	nc	318 750	39 390	30 960	19 841	18 696
pin à encens	nc	40 280	930 814	545 225	1 316 920	1 812 401
pin brutia	nc	nc	nc	95	224	4 176
pin d'Alep	148 450	65 680	32 114	15 574	4 443	7 095
pin de Salzmann	nc	nc	nc	2 132	8 132	17 558
pin laricio de Calabre	744 175	529 600	200 850	183 923	97 460	222 789
pin laricio de Corse	5 270 825	3 137 580	2 356 352	1 737 455	1 018 439	883 755
pin maritime	10 585 875	9 517 660	17 420 614	23 779 421	40 798 829	33 915 428
pin noir d'Autriche	1 572 600	568 000	304 018	168 965	90 738	107 006
pin pignon	nc	124 640	52 783	27 871	5 578	7 757
pin sylvestre	2 414 700	1 253 320	1 010 025	909 621	800 392	620 707
poirier sauvage	nc	nc	29 045	51 611	46 172	35 316
pommier sauvage	nc	nc	nc	56 858	39 601	7 416
robinier faux-acacia	nc	nc	nc	694 541	741 116	675 681
sapin de Bornmuller	nc	nc	nc	7 340	15 204	54 715
sapin de Nordmann	1 532 925	1 176 100	1 031 209	1 556 173	1 604 098	1 137 868
sapin de Vancouver	572 200	423 980	282 251	178 243	174 678	104 843
sapin noble	nc	nc	34 740	81 738	77 298	44 631
sapin pectiné	1 250 125	583 100	501 911	304 345	227 094	166 915
saule blanc	nc	nc	nc	nc	nc	14 523
Séquoia toujours vert	nc	nc	nc	nc	nc	43 274
sorbier des oiseleurs	nc	nc	22 878	40 823	33 027	36 106
thuya géant	nc	nc	nc	nc	nc	33 791
tilleul à petites feuilles	nc	nc	48 733	33 553	35 839	45 870
Essence hors code forestier						
nc = non connu						

Volet 2 | Thème 1. Approvisionnement en graines et plants forestiers

Question 2. Quels sont les freins pour disposer du matériel de reproduction nécessaire à la réalisation des futures plantations ?

Sommaire

2.1 Contexte et problématique	584
2.2 Définitions	586
2.3 Matériel et méthodes, moyens mobilisés, types d'analyse pratiquées	586
2.4 Réponses à la question posée	586
2.4.1 Le besoin en matériels forestiers de reproduction évolue selon de nouveaux paradigmes.....	586
2.4.2 La France dispose de ressource de matériels forestiers de reproduction variées mais actuellement assez peu valorisées dans leur diversité	588
2.4.2.1 Le potentiel de production de MFR peut se révéler insuffisant en raison d'un déficit de surface de peuplements classés ou de vergers à graines (mélèze d'Europe, douglas, etc.)	589
2.4.2.2 Des problèmes phytosanitaires survenus récemment affectent significativement le potentiel de fructification des arbres : exemple de la punaise américaine sur le pin maritime.....	590
2.4.2.3 Les aléas de floraison peuvent induire des déficits conjoncturels d'approvisionnement en MFR, surtout pour les essences dont les semences ne se conservent pas durablement (chênes, cèdre de l'Atlas, etc.)	590
2.4.2.4 Il faut aussi prendre en compte les évolutions spontanées et non anticipées de la demande : exemple du chêne pubescent et de nombreuses autres espèces envisagées en accroissement dans le cadre du plan France Relance.....	591
2.4.3 Les opérateurs de la filière MFR sont-ils en capacité de faire face aux évolutions de la production ?	591
2.5 Conclusion et perspectives	593
2.6 Références bibliographiques	593
2.7 Annexes	593

Rédacteurs

Joël **Conche**, Office national des forêts, Direction des forêts et des risques naturels, Supt (39), France

Contributeur

Jean-Charles **Bastien**, INRAE, Orléans (45), France

2.1 Contexte et problématique

L'effort de boisement réalisé depuis la période de l'après-guerre jusqu'à la fin des années 1980 a été conséquent, puisqu'il se **vendait** alors en France – hors pin maritime, entre 100 et 120 millions de plants par an (voir « Question 1. Quelle est l'évolution des ventes de plants forestiers et des surfaces plantées en France depuis 30 ans ? »). Ce niveau a brutalement chuté dans les années 1990 et a stagné à un seuil moyen proche de 30 millions de plants annuels sur les 20 dernières années.

Depuis 2020, dans le cas des parcelles sinistrées du fait des sécheresses à répétition et des attaques de scolytes, le renouvellement par plantation – en plein ou par enrichissement, doit souvent être envisagé comme une alternative à la régénération naturelle. De surcroît, il convient maintenant de prendre en compte les impacts du changement climatique, ce qui implique parfois, par endroits et après un diagnostic fin réalisé sur le terrain, de substituer par d'autres les espèces/provenances inadaptées aux futures conditions climatiques, voire déjà affectées par des problèmes phytosanitaires aigus (frêne, châtaignier, épicéa, hêtre, etc.)

Dans ce contexte, on peut légitimement penser que les besoins en plants, et donc en semences, vont s'accroître, mais à un rythme conditionné par les opportunités de financement. À très court terme, ils ont déjà augmenté suite à l'annonce, en septembre 2021, du lancement du volet forestier du plan France Relance, doté de fonds dédiés à la plantation **additionnelle** de 45 000 ha. Cette surface correspond à environ 50 millions de jeunes arbres, soit quasiment autant que l'utilisation de plants forestiers en France sur la saison 2019-2020. Pour répondre à ces enjeux de reboisement, les opérateurs de la filière des **matériels forestiers de reproduction (MFR)** (voir Figure 1.2-1) doivent parvenir à anticiper la demande exprimée concernant la quantité et la nature des espèces et des provenances et son évolution possible, et à organiser la fourniture des reboiseurs en MFR en conséquence (disponibilité des MFR en France et à l'étranger, temps de production, stockage, besoins en main d'œuvre, etc.)

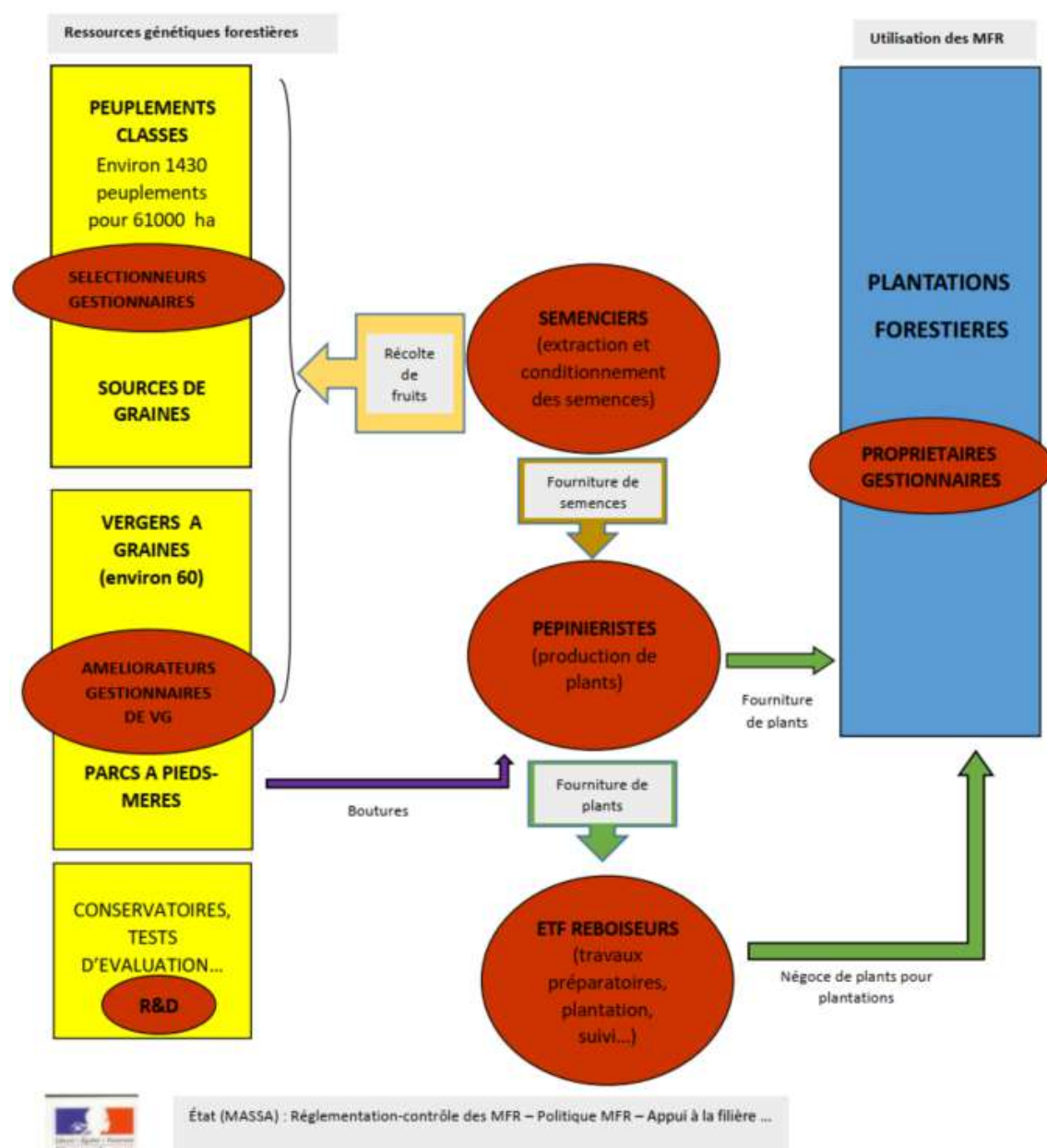


Figure 1.2-1 : Les opérateurs de la filière des Matériels forestiers de reproduction (MFR)

2.2 Définitions

Matériels forestiers de reproduction (MFR) : selon la Directive 1999/105/CE du Conseil de l'Union Européenne du 22 décembre 1999⁴¹⁹, « *par matériel de reproduction, on entend selon le cas :*

- *la semence (les cônes, infrutescences, fruits et graines destinés à la production de plants) ;*
- *les parties de plantes (les boutures de tiges, de feuilles et de racines, explants ou embryons destinés à la micropropagation, bourgeons, marcottes, racines, greffons, plançons et toute partie de plante destinés à la production d'un plant) ;*
- *les plants (les plantes élevées au moyen de semences, de parties de plantes ou les plantes provenant de semis naturels). »*

Verger à graines : cette même directive⁴²⁰ définit le verger à graines comme « *une plantation de clones ou de familles sélectionnés, isolée ou gérée de manière à prévenir ou à réduire les pollinisations extérieures, et gérée de manière à produire des cultures de semences fréquentes, abondantes et aisément récoltées. »*

Enrichissement par plantation : les plantations d'enrichissement visent à garantir ou améliorer la production de bois d'œuvre de qualité, dans des parcelles jusqu'alors insuffisamment pourvues en espèces forestières d'avenir, comme les peuplements clairs, des régénérations incomplètes, des taillis dégradés, des peuplements spontanés ne comportant pas d'essences de valeur. Elles consistent à introduire, dans les endroits dégagés de la parcelle, des plants d'essences objectifs, généralement à croissance rapide. Les plantations d'enrichissement ont ainsi pour double objectif d'améliorer la valeur du peuplement et d'y restaurer ou maintenir la biodiversité.

2.3 Matériel et méthodes, moyens mobilisés, types d'analyse pratiquées

La filière française des MFR dispose de données statistiques sur les flux passés de semences ou de plants. Les producteurs (semenciers, pépiniéristes) sont enquêtés mais, en revanche, les plantations françaises ne sont pas recensées exhaustivement. En conséquence, cette filière ne dispose que de très peu d'indicateurs prospectifs et, lorsque ceux-ci existent, ils sont souvent très incomplets et difficilement exploitables.

Par ailleurs, la prise en compte des évolutions climatiques dans les projets de reconstitution forestière est récente et constamment évolutive. Aussi, l'analyse des problématiques de l'approvisionnement en semences et plants relève davantage de l'expertise que de l'analyse bibliographique. Pour autant, avec son nombre d'opérateurs très restreint, la filière MFR constitue le goulot d'étranglement pour l'approvisionnement en plants forestiers. En conséquence, les informations qu'elle détient sont assez aisément synthétisables pour établir une cartographie des préoccupations nationales.

2.4 Réponses à la question posée

2.4.1 Le besoin en matériels forestiers de reproduction évolue selon de nouveaux paradigmes

La qualité des MFR doit combiner la performance par la sélection dans un objectif d'amélioration de la qualité des arbres (vigueur, forme, etc.), ainsi que la diversité par l'emploi de toute la gamme des variétés ou des provenances disponibles pour chaque espèce, dans un souci d'adaptation aux contextes environnementaux variés des sites à planter, actuels et futurs.

⁴¹⁹ Consultable ici : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:31999L0105>

⁴²⁰ *Ibid.*

Dans le contexte très évolutif des deux dernières saisons de plantation (2020-2021 et 2021-2022), lié en grande partie à l'annonce du volet forestier du plan France Relance, les producteurs de MFR, pépiniéristes ou semenciers, tentent tant bien que mal d'anticiper en amont l'évolution des besoins de plants exprimés par les gestionnaires et propriétaires forestiers. Pour y parvenir, ils disposent d'assez peu d'indicateurs qu'il faut rechercher auprès des grands donneurs d'ordre (ONF par exemple) ou *via* les éléments synthétisés par le ministère en charge de la forêt, concernant notamment les projets de boisement retenus dans le cadre de France relance.

Ces indicateurs seront peut-être consolidés pour la saison de plantation 2022-2023. Pour autant, les productions de MFR auront été initiées 2 à 3 ans plus tôt sur la base de tendances de fond, en grande partie influencées par l'analyse du comportement des essences vis-à-vis des changements climatiques.

Ces tendances se traduisent par un accroissement, une stabilité ou une réduction des commandes de plants par essence ou provenance enregistrées par les pépiniéristes. Par ailleurs, dans le cas de l'ONF, les récoltes de semences tiennent compte des besoins exprimés en amont dans l'objectif de la passation de contrats d'éducation de plants avec fourniture des semences aux pépiniéristes retenus.

Les évolutions des besoins en MFR par essence, évaluées à travers les commandes de plants ou de semences depuis 2020-2021 sont résumées dans le Tableau 1.2-1.

Tableau 1.2-1 : Evolution des besoins en MFR, évaluées à travers les commandes de plants ou de semences depuis 2020/2021

Evolution récente des besoins en MFR	Essences	Raison(s) identifiée(s)
En extinction	frêne commun	chalarose
En très forte baisse	épicéa commun	scolytes
En réduction sensible	sapin pectiné	dépérissements
	hêtre	
Stables	pin sylvestre	pas de progression identifiée voire probable régression à l'avenir (changements climatiques)
	mélèzes (Europe, hybride)	
	pin à l'encens	
	pin d'Alep, pin parasol	
	pin noir d'Autriche	
	érable sycomore	
	châtaignier	
	chêne pédonculé	
En augmentation	douglas	besoins de renouvellement forestier
	pin laricio (Corse et Calabre)	conjoncturel (peu plantés les années précédentes)
	pin maritime	impact des incendies de l'été 2022
	chênes méditerranéens (vert, liège, chevelu)	diversification
	chêne sessile	« valeur sûre »
	chêne rouge	conjoncturel
	érable plane	diversification, comportement vis-à-vis des changements climatiques
	fruitiers (alisier torminal, cormier, merisier, etc.)	

	tilleuls (petites feuilles et grandes feuilles)	
En très forte augmentation	cèdre de l'Atlas	adaptation changement climatique
	pin de Brutie	
	pin de Salzmann	
	sapins méditerranéens (Bornmueller, Céphalonie)	
	chêne pubescent	

Par ailleurs, les gestionnaires forestiers s'intéressent de plus en plus à la migration assistée *via* l'introduction de MFR issus de provenances déjà adaptées aux contextes pédoclimatiques plus méridionaux, voire parfois en limite d'aire naturelle. Ainsi, les demandes pour certains MFR de provenances plus méridionales (par exemple, QPE 362 - chêne sessile Gascogne) sont en très forte augmentation et ne peuvent être satisfaites compte-tenu des possibilités limitées par les faibles surfaces de peuplements sélectionnés adaptées aux besoins historiques.

Les tests de nouvelles essences exotiques (par exemple, calocèdre, liquidambar, etc.) réalisés dans un cadre d'un suivi expérimental sur de petites surfaces, se développent et nécessitent un approvisionnement préalable de semences auprès des opérateurs étrangers. Il doit tenir compte de l'aire de répartition géographique des essences.

Il faudra attendre la publication des statistiques d'utilisation des plants 2021-2022 pour quantifier précisément ces évolutions car elles reflèteront les tendances de la première saison de production *post* plan France Relance. Elles ont cependant déjà été prises en compte par les opérateurs semenciers dès l'annonce du volet forestier du plan France Relance. A titre d'exemple, les volumes de fruits récoltés en chêne pubescent ont été multipliés par neuf et ceux de cèdre par six par rapport à la période précédente.

2.4.2 La France dispose de ressource de matériels forestiers de reproduction variées mais actuellement assez peu valorisées dans leur diversité

Au total, 128 espèces d'arbres sont répertoriées à l'inventaire national métropolitain des ressources génétiques forestières⁴²¹. Parmi celles-ci, 80 sont régulièrement produites dans les pépinières forestières françaises et inventoriées annuellement dans le cadre de l'enquête statistique. Pour autant, les flux de production par espèce ou par provenance sont évolutifs d'année en année, ce qui n'exclut pas les pénuries ou excédents pour tel ou tel MFR.

En outre, la réglementation sur les MFR concerne 67 essences⁴²², qui se déclinent en quatre catégories principales :

- « Testée » (vergers à graines le plus souvent mais aussi clones voire quelques peuplements) : la supériorité de certains caractères améliorés (vigueur, résistance, débourrement, etc.) a été démontrée par les tests d'évaluation ;
- « Qualifiée » (vergers à graines) : la supériorité de certains caractères améliorés (vigueur, résistance, débourrement, etc.) est supposée mais n'est pas démontrée par les tests d'évaluation ;
- « Sélectionnée » (peuplements) : la supériorité est supposée compte tenu de la qualité phénotypique des peuplements récoltés ;

⁴²¹ À consulter ici : <https://agriculture.gouv.fr/linventaire-national-des-ressources-genetiques-forestieres>

⁴²² La liste des espèces réglementées, provenance et matériels de base forestiers est consultable ici : <https://agriculture.gouv.fr/fournisseurs-especes-reglementees-provenances-et-materiels-de-base-forestiers>

- « Identifiée » (sources de graines) : l'information est limitée à l'origine géographique.

Les pépiniéristes forestiers proposent également des plants concernant des essences qui ne relèvent pas de la réglementation sur les MFR (par exemple, sapin de Nordmann, pin à crochets, poirier sauvage, etc.)

L'Annexe 1.2-1 donne plus de précisions sur la situation actuelle des ressources de MFR en France.

D'après les statistiques 2020-2021 publiées par le ministère en charge de la forêt, 62 % des plants forestiers produits en France sont des douglas et des pins maritimes issus de variétés forestières améliorées, constituées d'une quinzaine de vergers à graines. Les deux principaux chênes blancs représentent 8,6 % de la production de plants. Le reste des plants produits, soit seulement environ 29 % du total, se répartit entre 76 espèces, elles-mêmes déclinées en plus de 250 régions de provenance ou vergers à graines.

Fort de ce constat, il est crucial de rappeler que les pépinières forestières n'ont pas la capacité de proposer la gamme complète des MFR en toutes circonstances. De fait, on constate que certains approvisionnements en MFR sont déjà aujourd'hui en tension. Il convient cependant de mettre en perspective ces difficultés, dont on peut identifier plusieurs causes.

2.4.2.1 Le potentiel de production de MFR peut se révéler insuffisant en raison d'un déficit de surface de peuplements classés ou de vergers à graines (mélèze d'Europe, douglas, etc.)

Cette difficulté peut être liée aux limites pour sélectionner de nouvelles ressources répondant aux critères prédéfinis (pin de Salzmann par exemple), ou à des causes phénologiques (par exemple, le gel des fleurs, récurrent sur le verger à graines de mélèze d'Europe du Theil) ou tout simplement en raison du vieillissement du parc de vergers à graines français.

La Section « Arbres Forestiers » du Comité Technique Permanent de la Sélection (CTPS) est une instance consultative pour le ministère en charge de la forêt. Elle a été mandatée pour rédiger une feuille de route de la production de MFR pour l'adaptation et le renouvellement des peuplements forestiers. Dans le cadre de ce travail, chaque essence a été passée au crible afin de définir les priorités en matière de sélection de peuplements ou de programmation de nouveaux vergers à graines, en tenant compte de la prévision d'évolution des besoins, de la capacité de production actuelle et future des vergers à graines et des peuplements sélectionnés, des contraintes de production (dont la récolte des fruits) inhérentes à chaque espèce, des opportunités de nouvelles sélections selon les paradigmes actuels ou évolutifs.

Figure également parmi les leviers identifiés par cette Section du CTPS pour répondre à une demande en MFR croissante en quantité et en diversité, la **transformation de dispositifs expérimentaux en sources de graines**. La conversion d'un dispositif expérimental en source de production de MFR peut constituer en effet une valorisation d'un travail de long terme réalisé par les instituts de R&D en devenant le point d'aboutissement d'une expérimentation souvent unique en son genre par la nature de l'espèce (souvent « secondaire »), la nature du *pool* génétique (parfois d'acquisition difficile) ou la nature du site (éventuellement atypique) dans lequel cette expérimentation a été mise en place. Cette conversion présente plusieurs avantages, dont les principaux sont les suivants :

- la conversion d'un dispositif expérimental en source de production de MFR permet, sans investissement excessif, de mettre rapidement sur le marché des semences pour des essences « secondaires », pour lesquelles il n'existe pas (ou pas encore) de structure « conventionnelle » de production de graines. Cela peut concerner également des espèces « primaires » pour diversifier les sources de graines actuellement disponibles ;

- dans certains cas, notamment lorsque le dispositif est situé en station atypique – voire extrême pour l'espèce (par exemple, station d'altitude, en climat chaud et sec, en zone infectée), il est possible de mettre à profit la sélection naturelle pour produire de la semence d'une population localement mieux « adaptée » (*land race*) ;
- dans le cas de dispositifs multi-provenances, il est possible de tirer profit de la juxtaposition de populations qui naturellement peuvent être distantes géographiquement ou génétiquement afin de produire les semences d'une population synthétique, dotée d'une grande diversité génétique.

Dans le cadre d'un projet cofinancé par le ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire (MASA) et l'interprofession nationale France Bois Forêt, ce « levier » est actuellement exploré conjointement par quatre organismes de R&D (FCBA, INRAE, ONF et IDF) pour une vingtaine d'espèces forestières de diversification dans le contexte du changement climatique.

Parallèlement, INRAE (via l'unité EFNO de Nogent-sur-Vernisson) constate, selon la compilation des données statistiques annuelles, que 66 % des peuplements sélectionnés n'ont jamais fait l'objet de récolte au cours des dix dernières années. En conséquence, ce même organisme a entrepris un travail d'analyse commandé par le ministère en charge de la forêt et qui vise à appréhender les raisons de cet état de fait. Les conclusions de cette étude sont attendus prochainement et n'ont pas pu être traités dans le cadre de cette expertise.

Sans préjuger des restitutions définitives de l'ensemble des analyses prospectives précédemment citées, les premières tendances mettent en exergue le besoin de renouvellement du parc de vergers à graines français. Cette constatation n'est pas nouvelle et pour cette raison, des programmes de plantations de nouveaux vergers sont déjà activés (voir Annexe 1.2-1) et d'autres devraient les compléter à brève échéance selon un rythme guidé par les opportunités de leurs financements.

En parallèle, les révisions de classement de peuplements sélectionnés s'inscrivent déjà dans la continuité et sont guidées par l'évolution des besoins. Il est probable cependant que de nouveaux paradigmes de sélection, davantage basés sur l'adaptation et la résilience des arbres vis-à-vis des changements climatiques, soient à l'avenir davantage pris en compte mais cela suppose de nouveaux apports de la R&D.

2.4.2.2 Des problèmes phytosanitaires survenus récemment affectent significativement le potentiel de fructification des arbres : exemple de la punaise américaine sur le pin maritime

Lors de la dernière décennie, les volumes de cônes de pin récoltés par arbre, ainsi que les rendements d'extraction en semences constatés en sécherie, ont chuté vertigineusement (réduction de l'ordre de 50 %). Cet état de fait impacte bien sûr davantage le pin maritime, concerné par des flux de production de MFR particulièrement importants et stratégiques (première essence de boisement en France). Pour tenter de comprendre les phénomènes qui sont à l'origine de ces problèmes, une étude financée par France Bois Forêt, a été confiée à FCBA.

2.4.2.3 Les aléas de floraison peuvent induire des déficits conjoncturels d'approvisionnement en MFR, surtout pour les essences dont les semences ne se conservent pas durablement (chênes, cèdre de l'Atlas, etc.)

Compte-tenu des irrégularités naturelles des fructifications et du caractère périssable des productions de MFR, l'anticipation des besoins en plants de la filière est primordiale car elle guide le dimensionnement des récoltes de graines et des semis en pépinière. Selon les essences, les fructifications de qualité suffisante sont couramment espacées entre elles de 2 à 5 ans et, lorsqu'une

opportunité de récolte de graines se présente, il faut ensuite ajouter entre une et quatre années d'éducation en pépinière.

Certaines semences ne peuvent pas techniquement se conserver durablement. Par exemple, les glands perdent 30 % de capacité germinative après le second hiver de conservation et cela constitue le seuil ultime de durée de stockage. Par ailleurs, les pépinières spécialisées dans la production de plants en conteneurs ne peuvent pas se permettre, pour des raisons techniques, logistiques et économiques, de semer des lots de semences en deçà d'un certain seuil de taux de germination. Cela milite pour un renouvellement en continu des stocks de semences.

2.4.2.4 Il faut aussi prendre en compte les évolutions spontanées et non anticipées de la demande : exemple du chêne pubescent et de nombreuses autres espèces envisagées en accroissement dans le cadre du plan France Relance

Aussi, la mise à disposition d'une ressource nouvelle, sous forme de récolte en France ou par la voie de l'importation, demande un minimum d'anticipation. L'Annexe 1.2-2 : Contraintes d'approvisionnement en matériels forestiers de reproductions (MFR) décrit les contraintes inhérentes à chaque type de MFR et propose des recommandations pour l'utilisateur de MFR ainsi qu'un plan d'action de filière.

Dans l'objectif de reconstitution forestière, chaque segment de la filière (semencier, pépiniériste, reboiseur, gestionnaire-propriétaire, etc.) a ses propres préoccupations. Des espaces d'échanges sont donc nécessaires pour mutualiser des informations et prendre en considération les contraintes de chaque opérateur. Cette communication est naturellement assez fluide dans le cercle des grands opérateurs (comme l'ONF, certaines coopératives, etc.) qui intègrent en leur sein plusieurs de ces segments (récolte et traitement de semences, production de plants, R&D, utilisation de MFR, etc.), mais elle est plus complexe dans les autres situations. Les instances de réflexions autour des MFR (CTPS), les réunions conjointes entre syndicats professionnels et donneurs d'ordres, les groupes de travail au sein de France Fois Forêt, les enquêtes et analyses de filières (ministère en charge de la forêt), les publications diverses etc. ont pour but de fédérer les objectifs nationaux de renouvellement forestier et de rechercher les voies qui permettent de les atteindre dans les meilleures conditions.

De nombreux travaux de R&D, le plus souvent collaboratifs, sont engagés actuellement sur la recherche et/ou l'évaluation d'espèces ou de populations alternatives aux espèces et populations actuellement disponibles.

2.4.3 Les opérateurs de la filière MFR sont-ils en capacité de faire face aux évolutions de la production ?

Les marchands semenciers sont directement impliqués dans l'exploitation des vergers à graines (GIE SFA et SNPF, 2013). Ils gèrent les récoltes de fruits et graines, conditionnent et commercialisent les semences.

Sur un plan strictement quantitatif, leurs outils de production (équipements de tri, de conditionnement, de conservation, laboratoire, etc.) leur permettent de faire face dans l'ensemble à l'expansion de la demande.

Cependant, des pistes de progrès sont à rechercher dans la modernisation des équipements, en raison notamment des exigences plus fortes d'optimisation de la qualité avec la montée en puissance des productions de plants en godets, mais aussi pour prendre en compte toute la diversité des espèces, envisager des durées de conservation plus longues et gagner en réactivité afin de faire face à des opportunités de récolte exceptionnelles ou à des demandes ponctuelles et urgentes entre autres.

En revanche, la création de nouveaux vergers à graines est le fruit d'une réflexion collective qui intègre pleinement tous les acteurs de R&D compte tenu de l'importance des enjeux et des moyens importants qu'elle met en œuvre. Elle s'accompagne par ailleurs d'une prise de risques car les vergers sont eux aussi soumis aux risques climatiques, qui peuvent se traduire par la perte du capital de production (en cas de tempête par exemple) ou par des difficultés chroniques de l'arrivée à terme de la fructification (il y a des exemples de vergers très peu productifs). L'entrée en production des vergers à graines ne commence qu'autour de 10-15 ans, du moins pour les espèces connues. Elle reste hypothétique et exploratoire dans les autres situations.

Il faut en outre intégrer le fait qu'une variété puisse devenir obsolète, notamment dans le cas où les résultats issus des tests d'évaluation ne seraient pas à la hauteur de ce qui était espéré.

Les pépinières forestières françaises sont de toutes tailles et proposent, pour une même espèce, des conditionnements, tailles et âges très différents. Pour exemple, le douglas est cultivé en mottes de différents volumes (200 ou 400 cm³), ou en racines nues (plants de 2 ou 3 ans et hauteur variant de 15 à 80 cm). Par ailleurs, chaque pépinière est unique par sa situation géographique, l'altitude de ses cultures, son sol et son climat. Ainsi, l'offre nationale de MFR est riche de toute cette complémentarité de productions réparties sur l'ensemble du territoire. En fonction de sa clientèle et de sa position, chaque pépiniériste adapte sa production afin de fournir les origines et les types de plants qui répondent aux besoins du client. Cette diversité de production est essentielle compte tenu de la variété des itinéraires de reboisement qui nécessitent des plants forestiers adaptés aux caractéristiques des stations (sol, climat, concurrence végétale, etc.) et compatibles aux contraintes de logistique, de mise en œuvre et d'entretien inhérentes aux parcelles. Le calibrage des infrastructures et du matériel permet aux pépinières forestières d'accroître significativement leur capacité de production.

Cependant, elles ne peuvent pas l'envisager sans un minimum de lisibilité sur les débouchés, afin de former durablement des personnels spécialisés et pour éviter les destructions pour cause d'inventus. Dans ce sens, la passation de contrats de culture constitue une garantie pour les pépiniéristes. Pour autant, leur développement à plus grande échelle se heurte parfois aux craintes de prise de risques anticipées dans les cas suivants :

- incertitudes sur les disponibilités budgétaires lors de l'année « N » alors que les semis sont anticipés lors des années -1, N-2 ou N-3 ;
- retards de décisions attributives de subvention ;
- aléas liés à la préparation des terrains à planter (exploitation des bois non réalisée, conditions climatiques non propices, retard en relation avec la disponibilité des entreprises, etc.)

Des réflexions sont à l'étude pour mutualiser ces risques dans le cadre de groupements d'achats lorsque cela est envisageable (collectivités par exemple). En cas d'impossibilité de réalisation d'un chantier dans les délais prévus, des solutions alternatives peuvent être recherchées avec les autres opérateurs du groupement.

Les entreprises de reboisement sont à l'interface entre le pépiniériste et le propriétaire, soit directement, soit *via* un maître d'œuvre, pour la mise en place des plants. Ces entreprises ont également la charge de tous les travaux amont et aval liés aux plantations (préparation du sol, pose de clôtures ou de protections individuelles, entretiens, etc.) Ces entités de taille variable animent un réseau d'entreprises rurales qui se fournissent auprès de leurs pépiniéristes locaux ou nationaux. Elles sont confrontées aujourd'hui à un afflux de nouvelles sollicitations qu'elles n'ont plus la capacité de satisfaire à court terme, à défaut de disposer de main d'œuvre complémentaire, qu'il faudrait par ailleurs former et pérenniser. À l'instar des pépinières forestières, ces entreprises ont besoin de lisibilité sur les marchés à moyen terme de façon à adapter leur stratégie de développement en conséquence.

2.5 Conclusion et perspectives

La France a la chance de disposer d'une filière forestière organisée et structurée avec des producteurs de MFR établis depuis plusieurs décennies. Elle bénéficie par ailleurs de l'héritage d'un long travail de sélection variétale et du fonctionnement éprouvé d'instances de réflexion, d'analyse et de conseil (Comité technique de coordination des vergers à graines de l'État – CTPS) dans le domaine ayant trait aux MFR et aux ressources génétiques forestières en général.

Parmi toutes les pistes envisagées pour améliorer quantitativement et qualitativement les capacités d'approvisionnement de la filière en MFR, l'installation de **nouveaux vergers à graines** est une proposition ambitieuse mais nécessaire. La gouvernance et la gestion technique des vergers à graines sont maintenant solidement rodées et des structures dédiées sont en mesure de faire face à une demande en expansion, que ce soit pour la création variétale, la multiplication et la production des composants des vergers, l'installation puis la gestion des vergers sous des formats plus ou moins innovants.

Pour autant, un minimum de visibilité à moyen terme (15-20 ans) est nécessaire pour donner corps à des programmes d'amélioration débouchant sur la constitution de nouvelles ressources de MFR diversifiées qui intégreront les acquis de la recherche (performances et résilience des variétés, mais aussi technologie florifère, lutte contre le parasitisme des fleurs et des fruits, etc.) Ainsi, en 2001, le GIS « variétés forestières améliorées » (sous coordination INRAE) avait publié un recueil de réflexions concernant les variétés forestières du futur à l'horizon 2020-2030 (Teissier du Cros, 2021). Ces travaux avaient permis de synthétiser les enjeux d'amélioration par espèce et de prioriser les efforts de création variétale.

Indépendamment des efforts destinés à accroître les ressources de MFR, il est primordial d'anticiper au mieux l'expression des besoins afin de générer les productions de plants, tout en intégrant les durées nécessaires pour récolter les semences et gérer les cultures. À défaut, certains MFR ne seront jamais disponibles et ceci, quelles que soient les surfaces de peuplements sélectionnés ou de vergers à graines. C'est bien l'expression du besoin en amont qui enclenche le mécanisme de production de MFR et non l'inverse. Cela signifie que les producteurs ne peuvent pas assumer les risques d'invendus au-delà d'un certain seuil.

2.6 Références bibliographiques

GIE Semences Forestières Améliorées, SNPF Pépiniéristes Forestiers Français, 2013. Variétés forestières améliorées : pour une forêt d'avenir. France Bois Forêt, Paris.

Teissier du Cros E., 2021. Variétés forestières du futur – réflexions à l'horizon 2020-2030 - GIS "variétés forestières améliorées." INRA Avignon.

2.7 Annexes

Annexe 1.2-1 : Situation actuelle des ressources de MFR en France

Espèces	Catégories des matériels de base disponibles en France	Situation du registre national des MFR fin 2021			
		Nombre de peuplements sélectionnés et testés	Surface de peuplements sélectionnés et testés	Nombre de vergers	Surface de vergers
Alisier torminal	Identifiée				
Aulne à feuilles en cœur	Identifiée				
Aulne blanc	Identifiée				
Aulne glutineux	Identifiée				

Bouleau pubescent	Identifiée				
Bouleau verruqueux	Identifiée				
Calocèdre	Non réglementé MFR				
Cèdre de l'Atlas	Sélectionnée, Testée	45	813 ha		
Cèdre du Liban	-				
Charme	Identifiée				
Châtaignier	Identifiée (Provenance CSA 800 « Corse »), Sélectionnée	54	522 ha		
Chêne chevelu	Identifiée				
Chêne liège	Identifiée, Sélectionnée	19	139 ha		
Chêne pédonculé	Sélectionnée	97	2 509 ha		
Chêne pubescent	Identifiée				
Chêne rouge	Sélectionnée	77	415 ha		
Chêne sessile	Sélectionnée	175	10 400 ha		
Chêne vert	Identifiée				
Cormier	Identifiée, Qualifiée			1	1,4 ha
Cultivars hybrides du genre peuplier	Testée				
Douglas vert	Sélectionnée, Qualifiée, Testée	51	308 ha	8	89,5 ha
Épicéa commun	Sélectionnée, Qualifiée	76	6 683 ha	3	16,31 ha
Épicéa de Sitka	Sélectionnée	12	106 ha		
Érable champêtre	Identifiée				
Érable plane	Identifiée				
Érable sycomore	Identifiée (Provenance APS 400 « Massif central »), Sélectionnée	35	548 ha		
Eucalyptus Gundal	Testée				
Frêne commun	Identifiée (Provenance FEX 400 « Massif central »), Sélectionnée, Qualifiée	51	1 025 ha	1	0,97 ha
Frêne oxyphylle	Identifiée				
Gommier à cidre	Identifiée				
Gommier bleu	Identifiée				
Hêtre	Sélectionnée	123	4 515 ha		
Mélèze d'Europe	Sélectionnée, Qualifiée	37	871 ha	1	13,41 ha
Mélèze de Sibérie					
Mélèze du Japon					
Mélèze hybride	Qualifiée, Testée			2	6,64 ha
Merisier	Identifiée, Sélectionnée, Qualifiée, Testée	54	553 ha	2	1,28 ha
Noyer hybride	Identifiée, Qualifiée			7	5,46 ha
Noyer noir d'Amérique	Identifiée				
Noyer royal	Identifiée				
Peuplier noir	Qualifiée (mélanges clonaux)				
Pin à crochets	Non réglementé MFR				
Pin à encens	Sélectionnée	25	214 ha	1	4,73 ha

Pin brutia	-				
Pin cembro	Identifiée				
Pin d'Alep	Sélectionnée	19	200 ha		
Pin de Bosnie	-				
Pin de Monterey	Identifiée	3	32 ha		
Pin de Salzman	Sélectionnée	3	91 ha		
Pin des Canaries	-				
Pin laricio de Calabre	Qualifiée			1	5 ha
Pin lario de Corse	Sélectionnée, Qualifiée, Testée	44	3 051 ha	2	54,96 ha
Pin maritime	Sélectionnée, Qualifiée	124	13 392 ha	14	385,64 ha
Pin noir d'Autriche	Sélectionnée	32	694 ha		
Pin pignon, Pin parasol	Identifiée, Sélectionnée	32	216 ha		
Pin sylvestre	Sélectionnée, Qualifiée	122	4 996 ha	3	17,36 ha
Pin tordu	-				
Pommier sauvage	Identifiée				
Robinier faux-acacia	Identifiée				
Sapin de Bornmuller	Qualifiée			1	4,5 ha
Sapin de Céphonie	Identifiée			1	4 ha
Sapin de Nordmann	Non réglementée MFR				
Sapin de Vancouver	Identifiée				
Sapin pectiné	Sélectionnée	131	8 620 ha		
Sapin pinsapo	Identifiée				
Tilleul à grandes feuilles	Identifiée				
Tilleuls à petites feuilles	Identifiée				
Tremble	Identifiée				

Annexe 1.2-2 : Contraintes d'approvisionnement en matériels forestiers de reproductions (MFR)

Lieu d'approvisionnement des MFR	Statut réglementation MFR	Exemples	Contraintes réglementaires	Contraintes pour la filière semencière	Contraintes pour la filière pépinière	Recommandations pour l'utilisateur	Plan d'action de filière
MFR français	essences réglementées MFR au niveau UE	Vergers et provenances régulièrement récoltés et avec flux commerciaux importants (par exemple, <i>Pseudotsuga</i> , <i>Quercus petraea</i> , etc.)	Réglementation sur le commerce des MFR	. Irrégularité des fructifications . Limite de durée de stockage pour certaines semences (par exemple, genres <i>quercus</i> , <i>castanea</i> , <i>juglans</i> , etc.)	. Approvisionnement en semences . Irrégularité de la demande . Météo, aléas de culture	Anticiper les commandes 1 an à l'avance	. Installer de nouveaux vergers . Sélectionner de nouveaux peuplements en anticipant les besoins en migration assistée et en intégrant des critères d'adaptation/résilience
		Vergers et provenances conjoncturellement récoltés et avec flux commerciaux faibles (par exemple, <i>Fagus sylvatica</i> des Pyrénées, <i>Pinus nigra salzmannii</i> , etc.)		MFR généralement récoltés sur demande ou selon opportunités - Stock rare	Contrat de culture uniquement	Prévoir souvent une récolte spécifique - anticiper le fait que la récolte ne sera peut-être possible que sur l'année n+1 ou n+2 voire au-delà si absence de fructification	
		Récoltes à titre expérimental (par exemple, hêtraies sèches, etc.)	Dérégulation de récolte à titre expérimental (DRAAF)	MFR obligatoirement récoltés sur demande			R&D sur l'adaptation des MFR
	essences non réglementées MFR au niveau UE	essences fréquemment récoltées (par exemple, <i>Abies nordmanniana</i> , <i>Pinus uncinata</i> , etc.)	non	Sauf demande formulée à l'avance, les informations sur ces MFR ne sont pas forcément tracées		Il est toujours préférable de commander dès connaissance des besoins	Réglementer de nouvelles espèces
		essences (plutôt exotiques) conjoncturellement récoltées sur peuplements atypiques (par exemple, <i>Cupressus arizonica</i> , <i>Pinus rigida</i> , etc.)		MFR généralement récoltés sur demande ou selon opportunités - Stock rare	Contrat de culture uniquement	Prévoir souvent une récolte spécifique - anticiper le fait que la récolte ne sera peut-être possible que sur l'année n+1 ou n+2 voire au-delà si absence de fructification	Inventorier les ressources et rendre accessible les informations
MFR issus d'autres pays de l'UE	essences réglementées MFR au niveau UE	Vergers et provenances régulièrement récoltés et avec flux commerciaux importants (par exemple, <i>Larix decidua sudetica</i> , <i>Robinia pseudoacacia</i> , etc.)	Réglementation sur le commerce des MFR	Dans beaucoup de pays, la filière graines & plants est mal structurée et les MFR ne sont récoltés que sur demande	. Approvisionnement en semences . Irrégularité de la demande . Météo, aléas de culture	Approvisionnement complexe => centraliser les commandes	Donner davantage de lisibilité sur la qualité de ces ressources (via Climessence par ex.)
		Vergers et provenances rarement récoltés et avec flux commerciaux d'opportunité (par exemple, <i>Alnus cordata</i> Italie, etc.)			disponibilités selon opportunités ou contrat de culture		
	essences non réglementées MFR au niveau UE	avec diffusion rare (par exemple, <i>Quercus canariensis</i> Espagne, etc.)	non	Accompagnement d'un service forestier local souvent indispensable	Contrat de culture uniquement	Id ci-dessus et prendre en + l'attache de services forestiers locaux pour appuyer la demande	Envisager des vergers conservatoires en collaboration entre nations (via R&D)
MFR hors UE	essence réglementée MFR au niveau UE	essences régulièrement importées (par exemple, <i>Picea sitkensis</i> , <i>Cedrus libani</i> , etc.)	Déclaration d'importation obligatoire (MAA) - attention à la gestion des équivalences OCDE autorisées - Passeport phyto. pour genres <i>pinus</i> et <i>pseudotsuga</i>	Filières souvent mal structurées (récoltes sur demande, pas de stockage, faible traçabilité) - contraintes logistiques (paiement d'avance, formalités en douane, durée du transport...)	. Approvisionnement en semences . Irrégularité de la demande . Météo, aléas de culture	Approvisionnement complexe => centraliser les commandes - prévoir des solutions alternatives	
	essences non réglementées MFR au niveau UE	essences régulièrement importées mais davantage pour usage ornemental (par exemple, <i>Liquidambar styraciflua</i> , <i>Liriodendron tulipifera</i> , etc.)	Passeport phytosanitaire pour genres <i>pinus</i> et <i>pseudotsuga</i>	Il s'agit souvent de filières pour diffusion "grand public" ou "jardinerie" donc sans traçabilité garantie - prix et logistique "détail"	disponibilités selon opportunités ou contrat de culture		
		essences rarement importées, rares ou protégées dans leur aire d'origine (par exemple, <i>Quercus obovata</i> , <i>Abies numidica</i> , etc.)		Approvisionnement quasiment impossible ou réglementairement interdit	Contrat de culture uniquement	Essayer de se faire accompagner par un service forestier local mais approvisionnement toujours très incertain	Constituer une banque de semences (stockage de sécurité lorsque des opportunités se présentent)

Thème 2. Facteurs de réussite des renouvellements forestiers

Le renouvellement, qu'il soit assuré par régénération naturelle ou par plantation, est une phase fragile du cycle forestier, caractérisée par une forte mortalité des jeunes arbres (semis ou plants). Elle est en effet soumise à de nombreux aléas biotiques et abiotiques. Assurer le bon déroulement de cette phase impose des travaux parfois coûteux, pour favoriser l'installation et la survie des jeunes arbres quelles que soient les conditions rencontrées. Les sécheresses et les fortes températures printanières et estivales constituent tout particulièrement des contraintes importantes pour les jeunes arbres. Aussi, il convient de s'interroger sur l'avenir du renouvellement des forêts dans un futur proche marqué par les changements climatiques, et sur le rôle que nous pouvons jouer pour assurer sa réussite.

Pour examiner cette question, le Thème 2 s'attache à estimer les niveaux de réussite actuels des renouvellements, à analyser les impacts attendus d'une augmentation des sécheresses et des canicules, et à identifier les leviers techniques possibles pour assurer le succès des renouvellements. Il examine les régénérations naturelles et les plantations à travers quatre contributions : une enquête en ligne sur le niveau de satisfaction des gestionnaires vis-à-vis des régénérations naturelles, (2) une enquête de terrain sur la réussite des plantations en première année, (3) et (4) deux études bibliographiques (synthèses narratives non exhaustives) qui traitent des impacts attendus du changement climatique sur la réussite des régénérations naturelles et sur la réussite des plantations en première année, et des leviers sylvicoles à activer pour y contribuer.

Les recommandations sylvicoles actuellement disponibles proposent des itinéraires techniques de renouvellement propres à chaque système sylvicole et à chaque région forestière. Elles ont été élaborées à partir des connaissances scientifiques et techniques acquises au cours de décennies passées, qui intégraient moins d'années sèches et chaudes. Le Thème 2 vise à pointer des leviers techniques qui pourraient permettre de faire évoluer ces recommandations et d'adapter les itinéraires aux conditions climatiques à venir.

Volet 2 | Thème 2. Facteurs de réussite des renouvellements forestiers

Question 1. Obtention des régénérations naturelles : quel est le niveau de satisfaction des gestionnaires forestiers ?

Sommaire

1.1 Contexte et problématique	598
1.2 Description de l'enquête	599
1.2.1 Questions posées.....	599
1.2.2 Diffusion du questionnaire	600
1.2.3 Caractéristiques de l'échantillon	600
1.2.4 Recodage et analyse des réponses	602
1.3 Résultats	603
1.3.1 Ensemble des réponses reçues.....	603
1.3.2 Analyse par contexte	604
1.4 Discussion-perspectives	606
1.5 Références bibliographiques	607

Rédacteurs

Chloé **Agro**, Université de Lorraine, AgroParisTech, INRAE, UMR Silva, Nancy (54), France

Jonathan **Pitaut**, Office national des forêts, Recherche développement innovation, Champenoux (54), France

Vincent **Boulanger**, Office national des forêts, Recherche développement innovation, Fontainebleau (77), France

Catherine **Collet**, Université de Lorraine, AgroParisTech, INRAE, UMR Silva, Nancy (54), France

1.1 Contexte et problématique

La régénération naturelle est le mode principal de renouvellement des forêts en France et la majorité des peuplements feuillus de plaine et des peuplements résineux ou mélangés de montagne est actuellement régénérée par voie naturelle. La régénération des peuplements forestiers, première phase du cycle de la dynamique forestière, constitue une étape clé de la gestion durable puisqu'elle conditionne le maintien de l'état boisé et des capacités de production en bois. Nous **ne disposons pas de données quantitatives sur le succès des régénérations à l'échelle de la France, néanmoins des difficultés dans l'acquisition des régénérations sont signalées depuis plusieurs années, et semblent gagner en fréquence et en intensité** (E.Silva *et al.*, 2012 ; Fuhr *et al.*, 2015 ; Maugard *et* Magnin, 2020). Ces difficultés s'expriment par l'obtention, à l'issue de la phase de régénération, d'un nombre de tiges recrutées, d'une composition spécifique inadéquate, ou d'un couvert forestier jugés insuffisants au regard des objectifs de gestion assignés à la parcelle (Unkule *et al.*, 2022). À l'échelle des massifs forestiers, ces limitations induisent des déficits de renouvellement et vont mener, sur le long terme, à un déséquilibre majeur des classes d'âges dans les essences objectifs du peuplement principal, voire remettre en question la pérennité de l'état boisé dans les massifs les plus touchés. Ces déséquilibres menacent directement la durabilité de la gestion forestière puisqu'il n'est alors plus possible d'assurer la pérennité de la ressource, les peuplements récoltés en entrée de phase de régénération n'étant pas – ou mal – renouvelés.

Les causes de ces difficultés sont multiples : changements climatiques, pression croissante des grands ongulés et de certains ravageurs endémiques ou exotiques, ou encore évolution des pratiques de gestion. L'importance relative de ces différents facteurs, la variabilité de leurs effets sur la régénération selon les conditions pédoclimatiques et le contexte de gestion, ainsi que leur évolution attendue dans les décennies à venir sont autant de questions auxquelles peu de réponses sont pour l'instant

apportées (voir « Question 2. Quels sont les effets attendus du changement climatique sur l’obtention des régénérations naturelles ? »).

L’estimation des difficultés de régénération achoppe sur plusieurs obstacles : (i) l’absence de **définition** canonique du « succès » de la régénération qui va dépendre des objectifs de gestion assignés à la parcelle considérée, (ii) l’absence d’**indicateurs** robustes et généralisés pour mesurer ce que pourrait être le succès d’une régénération estimé au niveau d’une parcelle et enfin (iii) l’absence d’un **système d’information** renseigné à grande échelle sur les surfaces renouvelées, leur dynamique de développement quantitatif et qualitatif, qui permettrait de fournir ces indicateurs aux échelles régionales et nationale. En raison de ces limites, il n’est actuellement pas possible de quantifier de façon robuste les difficultés de régénération, en matière de surfaces concernées ou bien d’enjeux associés, ni d’estimer quelles régions et quels contextes forestiers sont plus particulièrement touchés.

Pour apporter des premiers éléments de réponse, nous avons mené en 2021 une **enquête auprès des gestionnaires forestiers**, avec l’**objectif d’identifier les grands contextes dans lesquels des difficultés pour réussir les régénérations naturelles sont rencontrées**. Cette enquête a estimé le niveau de satisfaction des gestionnaires par rapport aux régénérations naturelles qu’ils ont menées, dans différents contextes forestiers (définis par le type de peuplement, la composition spécifique, le mode de régénération et la région forestière). L’enquête ne permet pas de caractériser l’état des régénérations dans les différents contextes, mais permet d’estimer dans quelle mesure, à l’issue de la phase de régénération, les gestionnaires estiment que la régénération obtenue leur permettra d’atteindre leurs objectifs de gestion. Cette enquête constitue une première évaluation en France du succès des régénérations à travers différents contextes sylvicoles à l’échelle nationale.

1.2 Description de l’enquête

Nous avons mené une enquête quantitative à l’échelle nationale. Le questionnaire a été conçu et publié sur le web. Nous avons ensuite retenu un sous-ensemble de questions prioritaires pour l’analyse des données. Seules ces questions sont présentées ici. Le questionnaire complet et les réponses obtenues sont disponibles à : <https://doi.org/10.57745/R7JEB1>.

Nous avons analysé l’enquête par contexte sylvicole, entité définie comme l’ensemble des peuplements de même composition spécifique, menés selon un même traitement sylvicole et localisés dans une même GRECO. Le répondant était invité à renseigner une réponse par contexte, et à fournir autant de réponses qu’il gérait de contextes sylvicoles différents.

1.2.1 Questions posées

Le questionnaire comprenait 10 questions regroupées en trois sections :

A : Caractérisation du répondant

A1 : Quels types de forêts gérez-vous ? (Liste proposée : (1) forêts domaniales ; (2) forêts communales ; (3) forêts privées. Plusieurs réponses étaient possibles)

B : Caractérisation du contexte sylvicole

B1 : Dans quelle grande région écologique (GRECO) est situé votre contexte sylvicole ? (Liste des GRECO définies par l’inventaire forestier national fournie, accompagnée d’une carte)

B2 : Quel est le traitement sylvicole majoritaire appliqué dans votre contexte sylvicole ? (Liste proposée : (1) Futaie régulière avec coupes de régénération progressives ; (2) Futaie régulière avec coupe de régénération à blanc ; (3) Futaie irrégulière jardinée ; (4) Futaie irrégulière par bouquets ou par parquets ; (5) Ancien taillis sous futaie converti)

B3 : Quelles sont la ou les principales essences présentes dans l’étage dominant ? (Liste de 26 essences, parmi lesquelles le répondant devait choisir trois essences maximum)

B4 : Quelles sont la ou les principales essences présentes dans le sous-étage ? (Liste de 26 essences, parmi lesquelles le répondant devait choisir trois essences maximum)

B5 : Approximativement, quelle est la surface forestière totale (ha) que vous gérez, associée à votre contexte sylvicole ? (La réponse possible a été bornée à 5000 ha maximum)

C : Satisfaction vis-à-vis de la régénération obtenue, dans le contexte sylvicole

C1 : Combien de temps mettez-vous en moyenne, pour régénérer vos peuplements ? (Liste proposée : (1) Moins de 5 ans ; (2) De 5 à 10 ans ; (3) ; De 10 à 15 ans ; (4) Plus de 15 ans). Aucune précision n'était fournie quant à la définition et l'estimation de la durée de régénération.

C2 : Êtes-vous satisfait de la régénération obtenue en termes de densité de tiges ? (Liste proposée : (1) Très satisfait ; (2) Plutôt satisfait ; (3) Plutôt insatisfait ; (4) Très insatisfait).

C3 : Êtes-vous satisfait de la régénération obtenue en termes de couvert ligneux et d'ambiance forestière ? (Liste proposée : (1) Très satisfait ; (2) Plutôt satisfait ; (3) Plutôt insatisfait ; (4) Très insatisfait).

C4 : Êtes-vous satisfait de la régénération obtenue en termes de composition et de diversité spécifique ? (Liste proposée : (1) Très satisfait ; (2) Plutôt satisfait ; (3) Plutôt insatisfait ; (4) Très insatisfait). Aucune précision n'était fournie quant à la définition et l'estimation de la durée de régénération ou du niveau de satisfaction de chacun des trois critères.

1.2.2 Diffusion du questionnaire

L'enquête ciblait les gestionnaires des forêts publiques et privées en France métropolitaine. Nous avons ciblé les responsables du premier niveau territorial (triage à l'ONF, petite unité de gestion en forêt privée) pour favoriser l'homogénéité des contextes renseignés au sein de chaque réponse.

Le questionnaire a été diffusé par courrier électronique à des personnes relais au sein de l'ONF, de la SFCDC, du CNPF, du GCF et des experts forestiers (par l'intermédiaire du CNPF). Ces personnes ont ensuite transmis le questionnaire aux gestionnaires forestiers concernés, au sein de leur organisme. La soumission d'une réponse par les personnes cibles était libre.

Le questionnaire était ouvert d'octobre à novembre 2021.

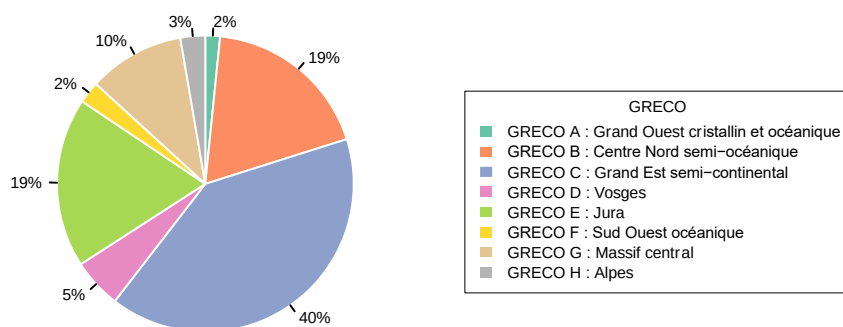
1.2.3 Caractéristiques de l'échantillon

Au total, 372 réponses complètes ont été reçues, pour 281 à 284 répondants (certaines réponses étant anonymes, le nombre n'est pas estimable précisément). Bien que non représentatif de la forêt française en raison de ses modalités de construction, l'échantillon obtenu était de nature variée (voir Figure 2.1-1) :

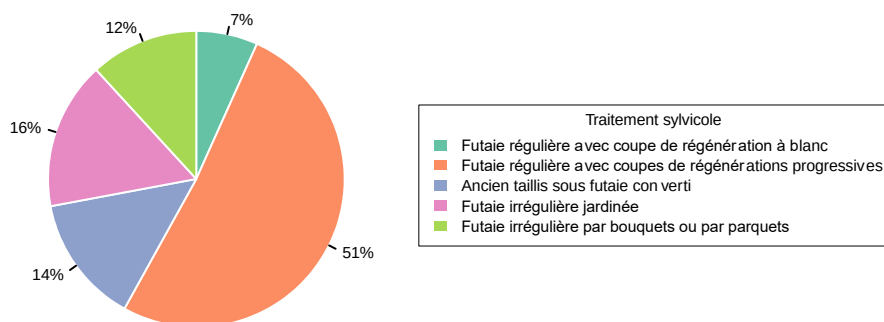
- environ 84 % des réponses concernaient uniquement les forêts publiques, 13 % uniquement les forêts privées et 3 % les deux types de forêts ;
- les principales GRECO renseignées étaient les GRECO C (Grand Est semi-continentale : 40 % des réponses), B (Nord semi-océanique : 19 %), et E (Jura : 19 %) ;
- dans 72 % des réponses, les peuplements étaient traités en futaie régulière (futaie régulière avec coupes de régénération progressives ou coupe à blanc ou ancien taillis sous futaie converti). Dans 28 % des réponses, les peuplements étaient traités en futaie irrégulière (jardinée ou par bouquets ou parquets) ;
- le hêtre a été mentionné dans plus de 80 % des réponses, que ce soit dans l'étage principal ou dans le sous-étage. Le chêne sessile, le chêne pédonculé, le charme et l'érable sycomore ont chacun été mentionnés dans plus de 40 % des réponses. Pour les essences résineuses, le sapin a été mentionné dans environ 30 % des réponses et l'épicéa dans 26 % des réponses. Environ

54 % des réponses comportaient uniquement des essences feuillues, 43 % un mélange d'essences feuillues et résineuses et 3 % uniquement des résineux.

(A) GRECO



(B) Traitement sylvicole



(C) Essence présente

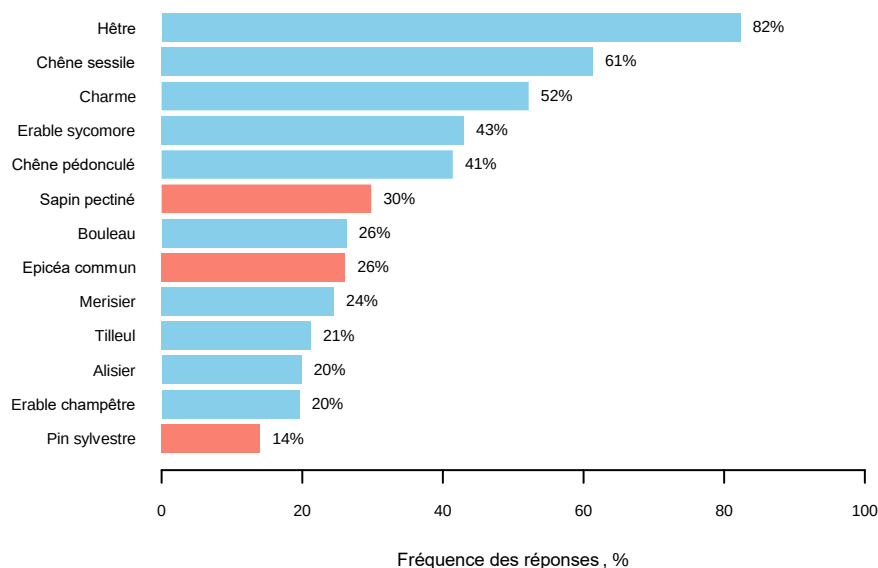


Figure 2.1-1 : Caractérisation des réponses reçues réparties selon : (A) GRECO ; (B) Traitement sylvicole ; (C) Essences présentes (plusieurs essences peuvent être présentes dans une réponse). Les valeurs sont exprimées en pourcentage du nombre de réponses (n = 372)

1.2.4 Recodage et analyse des réponses

Dans une première étape, nous avons analysé l'ensemble des réponses sans distinguer les contextes sylvicoles afin d'obtenir une vue d'ensemble des réponses reçues. Néanmoins, cette approche regroupe des contextes très divers qui peuvent différer dans leurs réponses. De plus, elle ne permet pas de démêler les éventuels effets de différents facteurs de variation qui peuvent se trouver corrélés dans l'échantillon (notamment la composition spécifique du peuplement, la structure du peuplement et la GRECO).

Dans une deuxième étape, nous avons analysé les contextes sylvicoles séparément, en recherchant les contextes pour lesquels nous avons au moins 30 réponses. Pour obtenir un nombre suffisant de réponses, nous avons regroupé certains contextes, en fusionnant des GRECO, des traitements sylvicoles et/ou des compositions spécifiques. Pour chaque réponse, la composition spécifique a été obtenue en regroupant les essences listées dans l'étage principal et dans le sous-étage. Le chêne sessile et le chêne pédonculé ont également été regroupés. Nous avons cherché à séparer autant que possible les différents traitements, les différentes compositions spécifiques, et les différentes GRECO, en respectant le seuil minimum de 30 réponses par contexte. Nous avons ainsi pu définir cinq contextes (voir Tableau 2.1-1) :

1. Hêtraie-chênaie sans résineux en futaie régulière (avec coupes de régénération progressives ou coupe à blanc ou ancien taillis sous futaie converti) dans la GRECO B (Centre-Nord semiocéanique) ;
2. Hêtraie-chênaie sans résineux en futaie régulière avec coupes de régénération progressives dans la GRECO C (Grand Est semi-continental) ;
3. Hêtraie-chênaie sans résineux en futaie régulière en ancien taillis sous futaie converti dans la GRECO C (Grand Est semi-continental) ;
4. Hêtraie avec résineux en futaie régulière (avec coupes de régénération progressives ou coupe à blanc ou ancien taillis sous futaie converti) en montagne dans les GRECO D (Vosges), E (Jura), G (Massif Central) et H (Alpes) ;
5. Hêtraie avec résineux en futaie irrégulière (jardinée ou par bouquets ou parquets) en montagne dans les GRECO D (Vosges), E (Jura), G (Massif Central) et H (Alpes).

Pour l'ensemble des réponses et pour chacun des cinq contextes, nous avons estimé la surface totale représentée par les réponses reçues, en sommant les surfaces renseignées pour chaque réponse.

Tableau 2.1-1 : Caractérisation des cinq contextes analysés individuellement

Composition	Localisation	Traitement sylvicole		GRECO					
		Structure	Mode de renouvellement	B	C	D	E	G	H
Hêtraie-chênaie sans résineux	Plaine	Futaie régulière	avec coupes de régénération progressives	1	2				
			avec coupe à blanc						
			ancien taillis sous futaie converti		3				
Hêtraie avec résineux	Montagne	Futaie régulière	avec coupes de régénération progressives			4			
			avec coupe à blanc						
			ancien taillis sous futaie converti						
Hêtraie avec résineux	Montagne	Futaie irrégulière	jardinée ou par bouquets ou parquets			5			

L'étude se base sur l'**analyse de la perception du succès des régénérations** par les gestionnaires. Au premier abord, ce choix peut paraître inapproprié car c'est une variable éminemment subjective, dépendante de chaque personne interrogée, et le choix d'une mesure répétable (par exemple, l'estimation de la densité des semis dans les parcelles) pourrait sembler plus adéquat. Néanmoins, il faut considérer le fait que le succès est une notion qui s'exprime par rapport à un objectif de gestion

et qu’une caractérisation de la régénération dans les parcelles, aussi précise et robuste soit-elle, ne peut rendre compte à elle seule de l’atteinte – ou non – de l’objectif fixé. Pour cela, la comparaison à des normes établies pour différents objectifs de gestion indiquant le niveau d’atteinte des objectifs serait nécessaire. De telles normes ne sont actuellement pas disponibles. **Ainsi une estimation de la perception par le gestionnaire, qui connaît les objectifs assignés aux parcelles évaluées, constitue probablement un indicateur de succès ou d’échec plus efficace que des grandeurs absolues caractérisant le développement de la régénération.**

Par ailleurs, les indicateurs exprimant la perception des répondants sont connus en psychologie sociale, pour montrer une forte variabilité (Salès-Wuillemin, 2006). Nous estimons que la dimension de l’échantillon de l’étude (372 observations au total, et au moins 30 observations par contexte analysé individuellement) permet de prendre en compte cette variabilité.

Une limite majeure de l’étude découle de la stratégie de **diffusion du questionnaire** et de récolte des réponses, qui ne permet pas de disposer d’un échantillon de réponses représentatif de la cible, qui est la forêt française dans son ensemble. Ce manque de représentativité est tout d’abord géographique, les différents contextes sylvicoles et les différents types de gestionnaires au sein de chaque contexte étant représentés de façon très inégale dans notre échantillon. Nous avons partiellement pallié ce premier défaut en analysant les résultats par grands contextes (pour les cinq contextes avec un nombre suffisant de réponses). Le manque de représentativité s’exprime ensuite dans le profil des répondants, pouvant présenter un biais qui peut être tant négatif (s’exprimeraient prioritairement les personnes ayant un avis négatif et reportant des échecs) que positif (situation inverse). L’existence de tels biais est probable mais leurs signes (positifs ou négatifs) et leurs magnitudes sont difficiles à estimer *a priori*.

Malgré ces limites, cette enquête est la première étude à offrir une approche nationale du niveau de satisfaction des gestionnaires quant à l’obtention des régénérations naturelles dans les grands contextes sylvicoles français. A ce titre, elle constitue une première pierre pour apprécier l’existence de difficultés rencontrées dans la conduite des régénérations.

1.3 Résultats

1.3.1 Ensemble des réponses reçues

Globalement, 58 % des réponses s’avèrent positives (« Très satisfait » ou « Satisfait ») vis-à-vis du critère de composition et diversité spécifique des régénérations et 42 % négatives (« Insatisfait » ou « Très insatisfait ») (Figure 2.1-2). Pour le critère de couvert ligneux et d’ambiance forestière, les réponses sont plus tranchées, avec 76 % de réponses positives et 24 % de réponses négatives. Pour la densité des tiges, les réponses sont positives à 71 % et négatives à 29 %. Ainsi, les répondants sont majoritairement satisfaits des caractéristiques de la régénération naturelle qu’ils obtiennent, dans l’ensemble de l’échantillon.

Les critères sont partiellement corrélés : 45 % des réponses sont positives (« Très satisfait » ou « Satisfait ») pour les trois critères simultanément. Autrement dit, 55 % des réponses présentent au moins un critère négatif. La corrélation entre critères porte à 13 % les réponses négatives (« Insatisfait » ou « Très insatisfait ») pour les trois critères simultanément. Seules 28 % des réponses ont deux critères positifs, et 14 % un seul critère positif.

Les durées de régénération sont variables avec 9 % des réponses pour la classe « 1 à 5 ans » et environ 30 % des réponses pour chacune des trois classes, « 5 à 10 ans », « 10 à 15 ans » et « plus de 15 ans ». Une corrélation a été observée entre la durée de renouvellement et le niveau de satisfaction exprimé, avec des régénérations globalement plus satisfaisantes quand elles sont courtes (1 à 5 ans). Cette corrélation est moins marquée pour le critère de composition et diversité spécifique que pour les deux autres critères.

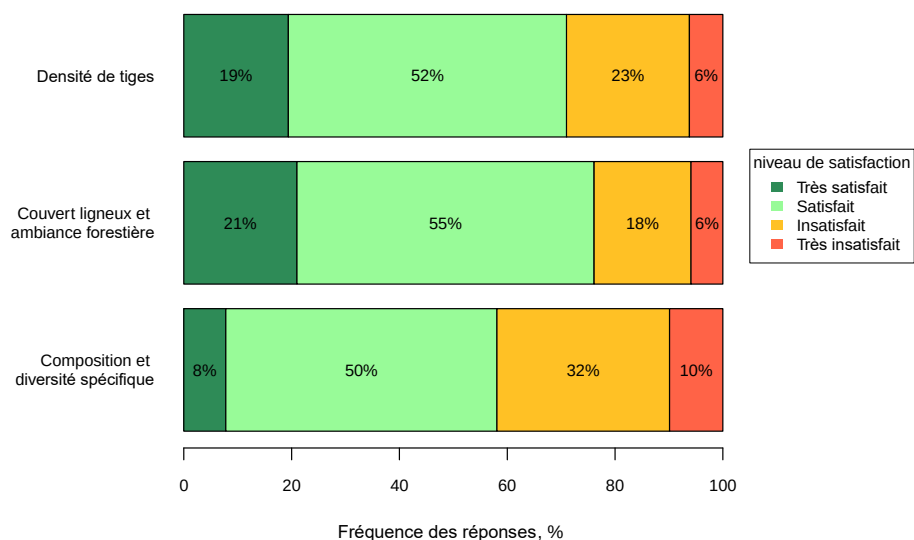
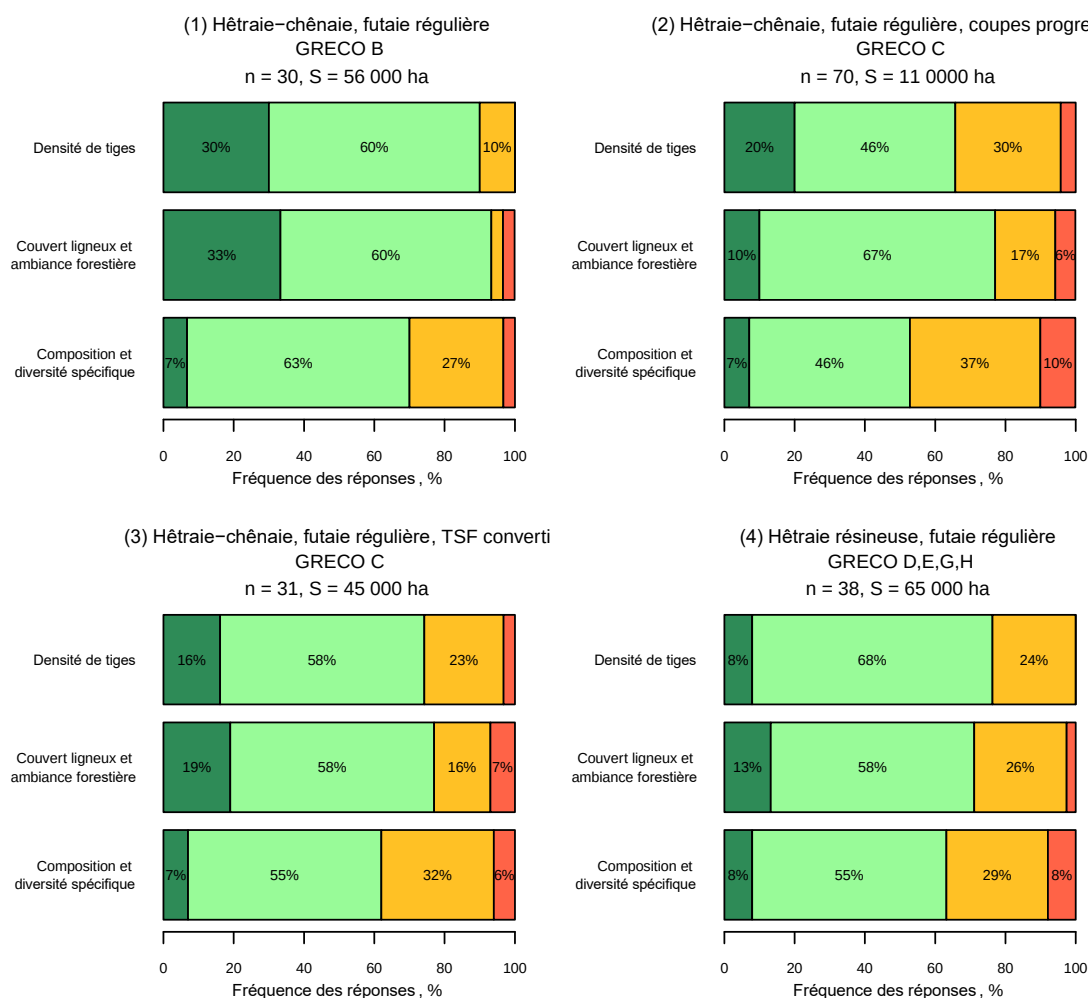


Figure 2.1-2 : Satisfaction concernant la régénération naturelle selon trois critères, exprimée en pourcentage du nombre de réponses (n = 372)

1.3.2 Analyse par contexte

Hormis le contexte 1, les réponses obtenues pour chacun les contextes analysés séparément sont proches de celles de l'échantillon complet (Figure 2.1-3 et Figure 2.1-4).



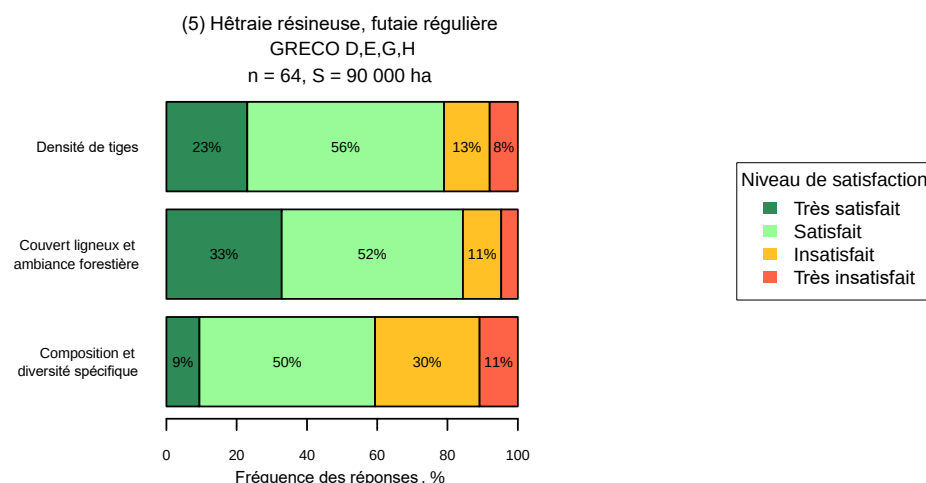


Figure 2.1-3 : Satisfaction concernant la régénération naturelle selon trois critères, exprimée en pourcentage du nombre de réponses pour chacun des cinq contextes sylvicoles étudiés. Pour chaque contexte, le nombre de réponses obtenues et la surface gérée par les répondants dans le contexte sont indiqués.

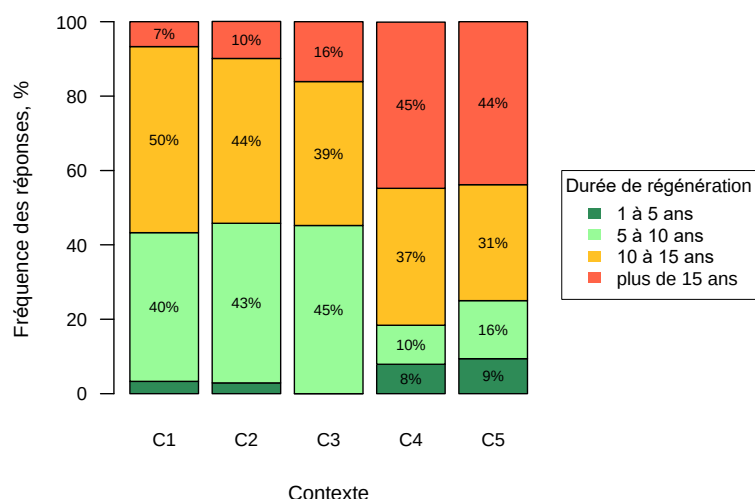


Figure 2.1-4 : Durée de régénération, exprimée en pourcentage du nombre de réponses pour chacun des cinq contextes sylvicoles étudiés (C1 : hêtraie-chênaie en futaie régulière, Centre-Nord semi-océanique ; C2 : hêtraie-chênaie en futaie régulière avec coupes de régénérations progressives, Grand Est semi-continental ; C3 : hêtraie-chênaie en futaie régulière ou en TSF converti, Grand Est semi-continental ; C4 : hêtraie avec résineux en futaie régulière de montagne ; C5 : hêtraie avec résineux en futaie irrégulière en montagne).

Dans le **contexte 1** (Hêtraie-chênaie sans résineux en futaie régulière, Centre-Nord semi-océanique), hormis vis-à-vis du critère « composition et diversité spécifique » pour lequel seuls 70 % des gestionnaires sont satisfaits ou très satisfaits, le niveau de satisfaction est très élevé, avec au moins 90 % de satisfaits ou très satisfaits pour les deux autres critères. Des cinq contextes, c'est celui qui rencontre le meilleur niveau de satisfaction, et qui se distingue le plus des autres contextes et de l'échantillon complet. Près de la moitié des gestionnaires (43 %) reporte des durées de régénération courtes (< 10 ans).

Le **contexte 2** (Hêtraie-chênaie sans résineux en futaie régulière avec coupes de régénérations progressives, Grand Est semi-continental) est celui qui rencontre le moins bon niveau de satisfaction, et tout particulièrement par rapport à la composition et la diversité spécifique, avec 47 % d'insatisfaits ou très insatisfaits. Près de la moitié des gestionnaires (46 %) reporte des durées de régénération courtes (< 10 ans).

Le **contexte 3** (Hêtraie-chênaie sans résineux en futaie régulière en ancien taillis-sous-futaie converti, Grand Est semi-continental) présente un niveau de satisfaction proche de l'ensemble des réponses,

pour chacun des trois critères. Près de la moitié des gestionnaires (45 %) reporte des durées de régénération courtes (< 10 ans).

Le **contexte 4** (Hêtraie avec résineux en futaie régulière de montagne) présente des niveaux de satisfaction pour chacun des trois critères qui sont faibles, et tout particulièrement par rapport à la composition et la diversité spécifique, avec 37 % de (très) insatisfaits. Près de la moitié des gestionnaires (45 %) reporte des durées de régénération longues (> 15 ans).

Le **contexte 5** (Hêtraie avec résineux en futaie irrégulière en montagne), inversement, présente des niveaux de satisfaction qui sont supérieurs à la moyenne générale (+ 8 %, + 8 %, + 1 %, pour les trois critères densité, couvert ligneux, composition et diversité, respectivement). Près de la moitié des gestionnaires (44 %) reporte des durées de régénération longues (> 15 ans).

1.4 Discussion-perspectives

Dans les deux grands contextes de hêtraie-chênaie en futaie régulière du Nord-Est (contextes 2 et 3) et de hêtraie résineuse, régulière ou irrégulière, de montagne (contextes 4 et 5), environ les deux tiers des gestionnaires sont satisfaits des régénérations obtenues. Le tiers restant des gestionnaires estiment ne pas être satisfaits. En revanche, dans le contexte de la hêtraie-chênaie en futaie régulière du Centre et du Nord (contexte 1), le niveau de satisfaction est globalement plus élevé. **S'il est impropre de convertir directement ces indicateurs en taux de succès et en taux d'échec des régénérations, les niveaux d'insatisfaction observés dans ces contextes sylvicoles suggèrent néanmoins des difficultés que rencontreraient les gestionnaires pour conduire ces régénérations et atteindre les objectifs visés.** Ces résultats mènent à de fortes interrogations quant à la réussite effective des régénérations engagées.

Parmi les trois critères utilisés pour qualifier la régénération, le critère « composition et diversité ligneuse » présentaient le plus d'insatisfaction, sans qu'il ait été possible d'estimer la part relative des deux composantes « composition » et « diversité », qui peuvent correspondre à deux difficultés distinctes : (i) ne pas obtenir l'essence objectif souhaitée face à la concurrence des autres essences, ou alors, (ii) ne pas obtenir l'installation d'une diversité d'essences satisfaisante dans la régénération. L'enquête n'a pas détaillé ce point. Il n'a pas non plus été possible de pointer vers des essences particulières mais, dans les deux contextes apparus comme problématiques (hêtraie-chênaie dans le Nord-Est et hêtraie résineuse de montagne), la compétition exercée par le hêtre était probablement à l'origine de nombreuses situations où la composition et/ou la diversité spécifique attendues n'ont pas été obtenues (Collet *et al.*, 2010 ; Unkule, 2022).

Les avis émis sur le critère « couvert ligneux et ambiance forestière » étaient plus positifs. Néanmoins, avec un quart des répondants qui ont émis un avis négatif, ce critère est probablement le plus préoccupant, car il témoigne d'une perte possible de l'état boisé, au moins temporaire.

En premier lieu, **ces résultats interrogent sur la performance de la régénération naturelle dans deux grands contextes forestiers, apparus comme les plus problématiques (hêtraie-chênaie dans le quart Nord-Est et hêtraie résineuse de montagne).** Dans ces contextes, l'obtention des régénérations naturelles se révèle insatisfaisante pour une part importante des gestionnaires et, dans de nombreux cas, ne permet manifestement pas de répondre à leurs attentes.

Un besoin qui apparaît immédiatement est de **confronter les résultats de l'enquête**, qui se basent sur la perception des gestionnaires, à des **évaluations sur le terrain de l'état des régénérations et de leur potentiel pour atteindre les objectifs de gestion à long terme**, qui doivent être estimés à grande échelle (région ou pays). Quelques études françaises font état de densité de semis naturels dans les parcelles qui semblent notablement plus faibles que ce qui est attendu par les gestionnaires (Guignabert, 2018 ; Unkule, 2022). Elles confortent les résultats de l'enquête mais, peu nombreuses et focalisées sur des contextes sylvicoles particuliers, elles ne permettent pas de dégager une vue générale de l'état des régénérations dans les grands contextes forestiers français. Au-delà de ces

études locales, des dispositifs de suivi du renouvellement forestier installés à travers différents contextes forestiers semblent incontournables pour appréhender l'évolution temporelle de l'état des régénérations à l'échelle de grandes régions forestières ou du pays. L'enquête que nous avons réalisée, en pointant une insatisfaction des gestionnaires dans un tiers des situations, met le doigt sur l'**absence de système de surveillance du renouvellement des forêts**, au-delà du suivi de la ressource en bois assuré par l'IGN. Ce défaut de système de surveillance nous empêche de jauger de la représentativité des réponses obtenues dans l'enquête, d'en envisager une interprétation générique pour les forêts françaises et d'estimer la vulnérabilité du renouvellement dans les différents contextes sylvicoles.

L'enquête ne renseigne pas sur (i) les causes qui ont conduit à des régénérations insatisfaisantes, (ii) les mécanismes associés, (iii) leur hiérarchie lorsque ces facteurs sont multiples, ou (iv) leurs interactions avec les conditions stationnelles et (v) les autres facteurs du milieu (Gaudio *et al.*, 2011 ; Guignabert *et al.*, 2020 ; Vernay *et al.*, 2019). Ceci est un autre point essentiel à approfondir, sur la base d'études ponctuelles, qui permettront d'appréhender les conditions dans lesquelles il semble nécessaire de développer et mettre en œuvre de nouveaux itinéraires de renouvellement.

La conception de nouveaux itinéraires techniques pour assurer le succès de la régénération est une autre priorité de recherche. Ce travail demande l'identification des facteurs de blocage de la régénération et des leviers sur lesquels il est possible d'agir pour lever ces blocages. Cette première étape permet ensuite de définir les interventions sylvicoles qui actionnent ces leviers et de les intégrer dans des itinéraires techniques complets, qui permettraient *in fine* d'atteindre les objectifs de gestion. Dans les contextes où aucun itinéraire de régénération naturelle satisfaisant ne se dégagera, il pourrait être nécessaire de recourir à d'autres méthodes, notamment la plantation en plein ou en enrichissement, ou de modifier les objectifs à atteindre à l'issue de la phase de renouvellement.

La mise en place d'études ponctuelles ou de dispositifs de suivi requiert préalablement (i) la définition des critères permettant de caractériser le succès d'une régénération au regard des attentes exprimées par les gestionnaires, (ii) l'élaboration d'indicateurs reflétant les différents critères retenus, et (iii) la définition de valeurs de référence qualifiant le succès ou l'échec pour chaque indicateur élaboré. Ces différentes grandeurs – critères, indicateurs, valeurs de référence – peuvent bien sûr différer selon les essences, les contextes sylvicoles et les objectifs de gestion.

Pour finir, l'**absence de perspective historique quant aux succès et échecs de régénération complique l'interprétation des résultats de l'enquête**. De nombreux peuplements actuellement en phase de régénération sont des forêts de première génération issues des programmes de reconstitution massive des XIX^e et XX^e siècles, dont on ne connaît pas les capacités de régénération, contrairement à des peuplements de forêts plus anciennes dont la régénération a déjà eu lieu, avérant *a priori* la capacité de renouvellement sur le site. Par ailleurs, les niveaux passés de succès des régénérations naturelles dans les peuplements constituant les forêts anciennes ne sont pas connus, et l'absence de valeurs historiques de référence auxquelles comparer les observations actuelles nous empêche de conclure fermement quant à la mise en danger de la pérennité du système actuel, les forêts anciennes ayant peut-être elles aussi présenté des taux de succès de régénération faibles. Ces points historiques mériteraient également d'être investigués.

1.5 Références bibliographiques

- Collet, C., Ningre, F., Constant, T., de Boutray, A., Piboule, A., 2010. Les semis préexistants : une composante importante de la régénération dans les hêtraies mélangées. *Rendez-Vous Techniques ONF* 27–28, 29–35. <https://hal.inrae.fr/hal-02610200>
- E.Silva, D., Mazzella, P.R., Legay, M., Corcket, E., Dupouey, J.L., 2012. Does natural regeneration determine the limit of European beech distribution under climatic stress? *Forest Ecology et Management* 266, 263–272.

- Fuhr, M., Weyant, J., Durand, N., Riond, C., 2015. Dynamique de fermeture des grandes trouées dans les forêts de montagne des Alpes du Nord. Rendez-vous techniques ONF 3–10.
- Gaudio, N., Balandier, P., Dumas, Y., Ginisty, C., 2011. Régénération naturelle du pin sylvestre sous couvert : contrainte de la végétation monopoliste de sous-bois en milieu acide. Rendez-vous techniques ONF 18–24.
- Guignabert, A., 2018. Etude des processus de régénération naturelle du pin maritime en contexte de dune forestière gérée. Influence de la sylviculture, du climat et des interactions biotiques. Thèse Univ. Bordeaux.
- Guignabert, A., Gonzalez, M., Delerue, F., Maugard, F., Augusto, L., 2020. La régénération du pin maritime dans les forêts dunaires d'Aquitaine : un processus complexe et multifactoriel. Rendezvous techniques ONF 52–60.
- Maugard, F., Magnin, C., 2020. Améliorer la réussite de la régénération naturelle du pin maritime dans les forêts dunaires d'Aquitaine. Rendez-vous techniques ONF 46–51.
- Salès-Wuillemin, E., 2006. Méthodologie de l'enquête, in: M., B. et A., Trognon (Eds.), Psychologie Sociale 1. Presses Universitaires de France, pp. 45–77.
- Unkule, M., 2022. Régénération des forêts mixtes épicéa - sapin - hêtre sous la pression du climat et des ongulés. Thèse Univ.Grenoble Alpes.
- Unkule, M., Piedallu, C., Balandier, P., Courbaud, B., 2022. Climate et ungulate browsing impair regeneration dynamics in spruce-fir-beech forests in the French Alps. *Annals of Forest Science* 79. <https://doi.org/10.1186/s13595-022-01126-y>
- Vernay, A., Malagoli, P., Fernandez, M., Améglio, T., Balandier, P., 2019. Régénération du chêne en compétition avec la molinie : un délicat dosage des ressources en eau et en lumière. Rendez-vous Techniques ONF.

Volet 2 | Thème 2. Facteurs de réussite des renouvellements forestiers

Question 2. Quels sont les effets attendus du changement climatique sur l'obtention des régénérations naturelles ?

Sommaire

2.1 Contexte : de nouvelles contraintes écologiques et socio-économiques	609
2.2 Matériel et méthodes	611
2.3 Réponses à la question posée.....	611
2.3.1 Le processus de régénération : de la fructification au recrutement	611
2.3.2 Situation dans quelques contextes forestiers en France : des problèmes récurrents de régénération	613
2.3.3 Impacts attendus des changements climatiques sur la régénération naturelle dans quelques grands écosystèmes forestiers en France	614
2.3.3.1 Chêne sessile et chêne pédonculé en forêt de plaine	614
2.3.3.2 Mélange hêtre-épicéa-sapin en forêt de montagne	614
2.3.3.3 Pin maritime dans les forêts dunaires d'Aquitaine	615
2.3.3.4 Les chênaies en zone méditerranéenne.....	615
2.4 Perspectives : du monitoring à l'expérimentation	616
2.5 Pistes de recommandations	617
2.6 Références bibliographiques	618

Rédacteurs

Catherine **Collet**, Université de Lorraine, AgroParisTech, INRAE, UMR Silva, Nancy (54), France

Vincent **Boulanger**, Office national des forêts, Recherche développement innovation, Fontainebleau (77), France

Josep Maria **Serra Diaz**, AgroParisTech, Nancy (54), France

Jonathan **Pitaut**, Office national des forêts, Recherche développement innovation, Champenoux (54), France

Bernard **Prévosto**, INRAE, UMR Recover, Champenoux (54), France

2.1 Contexte : de nouvelles contraintes écologiques et socio-économiques

La régénération naturelle par graine est un mode de renouvellement des forêts dans lequel le futur peuplement est obtenu à partir des graines produites spontanément par le peuplement en place. C'est, avec la régénération naturelle par voie végétative, le principal mode de renouvellement forestier en France, notamment dans les forêts feuillues de plaine et les forêts de montagne (selon l'IGN (2021), en 2020, 13 % des forêts françaises présentaient un caractère de plantation). Les gestionnaires font actuellement état de difficultés récurrentes dans l'obtention des régénérations naturelles par graines dans de nombreux contextes forestiers, en France (voir « Question 1. Obtention des régénérations naturelles : quel est le niveau de satisfaction des gestionnaires forestiers ? ») et à travers le monde (Dey *et al.*, 2019).

Pour un gestionnaire forestier, réussir la régénération naturelle demande de créer les conditions favorables à la régénération des espèces désirées et donc de lever ou de contourner, par les actions sylvicoles, l'ensemble des barrières écologiques, économiques et sociales qui peuvent entraver le processus de régénération de ces espèces. Tout d'abord, les exigences écologiques des espèces désirées doivent être satisfaites. Connaître les exigences des espèces, identifier les conditions dans lesquelles elles se régénèrent, comprendre comment la sylviculture permet de favoriser ces conditions ont constitué les thématiques centrales de très nombreux travaux de recherche au cours du siècle dernier (Pacala *et al.*, 1994 ; Vera, 2000 ; Watt, 1925). Néanmoins, depuis quelques décennies, des

évolutions majeures du milieu forestier modifient en profondeur les conditions dans lesquelles s'effectue le renouvellement forestier.

En premier lieu, les changements climatiques modifient les conditions météorologiques et peuvent dans certains cas faciliter la régénération forestière, avec notamment la levée de contraintes causées par des températures trop basses pour la régénération. À l'inverse, ils peuvent également induire de nouvelles contraintes météorologiques qui vont défavoriser la régénération (par exemple sécheresses récurrentes). Les changements climatiques peuvent également induire des perturbations (incendie, tempête, dépérissement, ravageurs, etc.) qui altèrent le couvert forestier et modifient drastiquement les conditions de la régénération (voir Volet 2, Thème 4, « Question 3.1. Quels itinéraires techniques utiliser pour reconstituer les peuplements endommagés par les tempêtes ? » et « Question 3.2. Quels itinéraires techniques peut-on utiliser pour reconstituer les peuplements après un incendie ? »). Dans de nombreuses situations, les conditions de régénération se trouvent dégradées par différents facteurs qui peuvent agir individuellement ou en conjonction : (i) nombre insuffisant de semenciers et potentialités de fructification des semenciers présents réduites qui limitent la production de graines, (ii) microclimat forestier défavorable à l'installation des semis, (iii) extension et/ou déplacements de l'aire de distribution de ravageurs qui affectent la survie des graines ou des jeunes arbres (voir Volet 2, Thème 3, « Question 1. Identifier les principaux pathogènes et ravageurs qui menacent le renouvellement des peuplements forestiers pour prévenir et limiter leur impact » et « Question 3. Comment le mode de renouvellement des peuplements forestiers et l'itinéraire technique mis en œuvre influencent-ils les dégâts de microrongeurs ? Quelles méthodes préconiser pour les limiter ? »), (iv) augmentation des populations d'ongulés depuis plus de 50 ans qui consomment les graines et les jeunes arbres (voir Volet 2, Thème 3, « Question 2. Comment prévenir et limiter les impacts des grands ongulés afin de permettre le renouvellement des peuplements forestiers ? »).

Par ailleurs, les attentes de la société vis-à-vis de la forêt ont fortement évolué, tout particulièrement en Europe et en Amérique du Nord avec, par exemple, un accent sur la libre évolution des forêts ou le réensauvagement (stratégie qui vise à la restauration de certains processus écologiques à travers des réseaux trophiques disparus ou altérés) (Barthod *et al.*, 2021). De nouvelles contraintes sociales émergent et se traduisent notamment par la remise en cause de certains traitements ou pratiques sylvicoles qui fondaient les itinéraires techniques de régénération naturelle dans de nombreux pays (exemple des questionnements sur le traitement régulier des forêts feuillues en plaine qui amènent à revoir les itinéraires techniques de régénération, en France et dans les pays voisins, voir Volet 2, Thème 4, « Question 5. Quelles sont les évolutions récentes et pressenties en Europe dans le domaine du renouvellement des peuplements forestiers en contexte de changement climatique ? »).

Pour finir, la mise en œuvre de pratiques sylvicoles écologiquement efficaces et socialement acceptées peut conduire à une hausse des coûts. Ces contraintes économiques supplémentaires peuvent *in fine* réduire l'effort de régénération réalisé par le propriétaire forestier.

Chacune de ces transformations – écologiques, sociales, ou économiques – peut affecter profondément le processus de régénération. Leur conjonction remet en cause une partie des connaissances acquises dans les conditions passées, et implique alors la révision de ces connaissances. Définir les pratiques sylvicoles permettant d'assurer la régénération naturelle dans les conditions actuelles et futures suppose de comprendre l'ensemble de ces modifications, ainsi que leurs effets sur le processus de régénération et son pilotage par les gestionnaires. Cette synthèse aborde une seule facette de la question globale, à savoir les impacts des changements climatiques sur la régénération naturelle, et les leviers sylvicoles disponibles pour favoriser la régénération, dans les grands contextes forestiers français métropolitains.

2.2 Matériel et méthodes

Etant donné l'étendue de la question posée, cette synthèse prend la forme d'une revue narrative. Elle fait un bilan des connaissances à partir d'une sélection de publications, et propose de nouvelles pistes de recherche. Les publications sélectionnées concernent uniquement des forêts tempérées, avec un poids tout particulier donné aux publications qui traitent des essences des forêts françaises.

2.3 Réponses à la question posée

2.3.1 Le processus de régénération : de la fructification au recrutement

Le processus de régénération se décompose en étapes successives (Clark *et al.*, 1999), chacune d'elles dépendant de nombreux facteurs biotiques et abiotiques et qui constituent autant de filtres pouvant enrayer le succès du renouvellement (Manso *et al.*, 2014).

Le processus débute par la floraison, la pollinisation, la formation et la maturation des fruits, qui aboutissent à la production des fruits par les arbres du peuplement mature. Pour la plupart des essences forestières, la production de fruits montre une forte variabilité interannuelle, conduisant au phénomène de masting, qui se définit par la fructification massive certaines années alternant avec des années de faible fructification, à l'échelle de la population d'arbres (Herrera *et al.*, 1998 ; Kelly, 1994). La variabilité de la production annuelle de fruits, et donc l'intensité du masting, ont augmenté au cours du dernier siècle pour une très large gamme de plantes au niveau mondial, et plus particulièrement pour les taxons de chênes et de pins (Pearse *et al.*, 2017). À plus long terme, les évolutions climatiques qui augmentent le masting pourraient également favoriser les prédateurs et parasites des graines et venir ainsi contrebalancer l'effet positif attendu sur le masting (Bogdziewicz *et al.*, 2020). Les déterminants de ces évolutions au long terme sont encore mal identifiés (Shibata *et al.*, 2020). **Le masting contraint fortement la conduite des régénérations, tout particulièrement pour les espèces qui présentent des fructifications massives très espacées dans le temps.** La production annuelle de fruits par les peuplements forestiers dépend (i) des caractéristiques des arbres matures, notamment de leurs réserves carbonées et de leur état nutritionnel, (ii) des conditions météorologiques (températures moyenne et extrêmes, vent, humidité de l'air) qui prévalent entre la mise à fleur et la chute des fruits (Pearse *et al.*, 2016 ; Walck *et al.*, 2011) et (iii) des conditions de prédation avant dispersion des graines. Si les déterminants des différentes étapes de la fructification sont connus dans leurs grandes lignes, le niveau de production de fruits et ses fluctuations annuelles restent difficiles à prédire pour la très grande majorité des espèces (Hanbury-Brown *et al.*, 2022).

Les graines produites se disséminent ensuite dans l'environnement, selon des schémas spatiaux propres à chaque espèce qui dépendent des caractéristiques de la graine et des vecteurs (vent, animaux), mais aussi de la structure des peuplements forestiers et des paysages. **La plupart des graines, même celles disséminées par le vent, sont dispersées à une distance relativement faible de l'arbre-mère** (quelques dizaines de mètres) et la densité de graines chute aussi très rapidement avec la distance à l'arbre. Des événements de dispersion à longue distance (plusieurs kilomètres) sont rares et difficiles à prédire, mais ils ont une importance cruciale pour le processus de changement de distribution des arbres (Feurdean *et al.*, 2013) et leur adaptation au changement climatique.

Une fois les graines au sol, se déroulent la germination de la graine, l'installation des semis puis le développement des jeunes arbres jusqu'à atteindre le stade de recrutement dans la canopée adulte (Manso *et al.*, 2014). Chacune de ces étapes est sous la dépendance de facteurs climatiques, édaphiques et biotiques, dont les effets sur le succès de la régénération peuvent être affectés par les changements climatiques en cours. Sans être exhaustif, on peut citer (i) les températures extrêmes et les sécheresses, (ii) la prédation des graines ou des semis, (iii) l'attaque par divers pathogènes, et (iv)

les interactions avec la végétation de la strate basse ou le couvert adulte. La survie des graines, la levée de dormance pour les graines dormantes, et la germination dépendent en premier lieu des conditions de température et d'humidité du sol (Walck *et al.*, 2011). Chaque espèce possède son propre régime de température et humidité (défini par des seuils minimaux et maximaux, des écarts journaliers ou saisonniers, des variations saisonnières, etc.) qui permet *in fine* à la graine de germer (Donohue *et al.*, 2010). **La complexité des patrons déterminant la germination rend difficile la prédiction de l'effet du changement climatique sur le succès de la germination pour les différentes espèces.** Elle mène à de très nombreux exemples où la réponse observée des espèces semble contre-intuitive, et elle oblige à des études approfondies des effets interactifs des différents déterminants pour identifier les mécanismes mis en jeu (Parmesan et Hanley, 2015). Par ailleurs, les graines, tout comme les jeunes semis qui en sont issus, sont très sensibles aux pathogènes et herbivores (Barton et Hanley, 2013) et les changements climatiques peuvent affecter directement leur sensibilité à ces attaques mais aussi les niveaux de population de ces ravageurs. Enfin, **la végétation accompagnatrice et le couvert adulte interagissent avec les graines et les semis, à la fois par des relations de compétition pour les ressources et de protection vis-à-vis des extrêmes climatiques**, via un effet « abri » ou « plante nurse » (Balandier et al., 2005). Les relations de compétition et de protection se produisent simultanément et la résultante, positive ou négative, pour les graines et les semis varie selon les caractéristiques de chaque site. Selon la théorie du « gradient de stress » (SGH en anglais : *Stress Gradient Hypothesis*), le bilan des effets positifs et négatifs bascule vers une résultante positive lorsque le niveau de contrainte du site (par exemple sécheresse estivale) augmente (Bertness et Callaway, 1994). Ainsi, **en forêt tempérée de plaine peu contrainte par le climat moyen, les effets compétitifs de la végétation et du couvert adulte sur les semis sont généralement plus marqués que les effets facilitatifs liés à l'abri dispensé par les végétaux voisins, et le maintien d'une végétation ou d'un couvert adulte au-dessus des graines et des semis s'avère généralement défavorable à leur développement** (Vera, 2000). À l'inverse, **dans les zones plus arides ou en altitude, le maintien d'un couvert végétal permet souvent d'améliorer le recrutement par atténuation des extrêmes climatiques** (Calama *et al.*, 2017 ; Cuesta *et al.*, 2010 ; Smit *et al.*, 2008). De même, en forêt tempérée, un effet bénéfique du couvert peut s'observer ponctuellement durant les années de canicule ou de sécheresse marquées.

L'ensemble des conditions nécessaires à la réalisation des étapes successives de la régénération d'une espèce définit sa **niche de régénération**, qui peut différer de celle établie sur les arbres adultes (Grubb, 1977 ; Zhu *et al.*, 2014). Des travaux récents menés sur différentes espèces forestières de forêts tempérées (Ibáñez *et al.*, 2017 ; Journé *et al.*, 2022 ; Le Roncé *et al.*, 2021) ont montré que les premières étapes du processus de régénération, qui définissent la **fécondité** (estimée à travers le nombre de graines produites par individu ou par peuplement), dépendent principalement de la température et sont généralement favorisées par des températures plus élevées que les températures actuelles et, secondairement, sont défavorisées par des conditions plus sèches. À l'inverse, les étapes constituant le **recrutement** (estimée à travers le nombre d'arbres recrutés par graine produite) sont défavorisées par des températures plus élevées et des bilans hydriques plus faibles, en comparaison avec les conditions actuelles (Davis *et al.*, 2016). Ainsi, selon Qiu *et al.* (2021), il apparaît que **dans des conditions climatiques futures plus chaudes et plus sèches, le filtre du recrutement pourrait s'avérer plus déterminant que celui de la fécondité, pour la régénération d'une majorité d'espèces d'arbres des forêts tempérées.** En zone méditerranéenne, il est connu que le passage des premières saisons sèches par les semis est une étape cruciale dans la dynamique : la jeune plantule au système racinaire peu développé est particulièrement vulnérable au manque d'eau. Ces différences dans la réponse aux facteurs de l'environnement des étapes successives de la régénération nous mènent à définir des niches distinctes pour la fécondité et le recrutement, que l'on peut mettre en regard des conditions

actuelles dans lesquelles se trouvent les peuplements à régénérer. La composition spécifique actuelle des peuplements est la résultante des succès de régénérations passées, après filtrage des étapes de fécondité et de recrutement dans les conditions biotiques et abiotiques courant au moment où se sont déroulés les processus, et après filtrage de la phase de croissance adulte, plus récente. **Les changements climatiques en cours font progressivement diverger les niches de fécondité et de recrutement dans lesquelles les espèces peuvent se régénérer, des conditions dans lesquelles se trouvent actuellement les arbres adultes** (Qiu *et al.*, 2021). Les niches de fécondité et de recrutement différant, la divergence d’avec la distribution actuelle des adultes se fait dans des directions différentes pour les deux processus. Ces disjonctions de niches sont particulièrement visibles en bordure des aires de distribution des espèces et peuvent conduire à des déficits de régénération massifs dans ces zones (Dobrowski *et al.*, 2015 ; E Silva *et al.*, 2012). De tels déficits sont déjà observés (Davis *et al.*, 2016 ; Serra-Diaz *et al.*, 2016) et d’autres, *a priori* plus importants, sont attendus à l’avenir (Sharma *et al.*, 2022).

2.3.2 Situation dans quelques contextes forestiers en France : des problèmes récurrents de régénération

De longue date, des publications relatent des **difficultés de régénération naturelle** des grandes essences forestières, en France et dans les pays voisins : sur chêne (Götmark *et al.*, 2005; Vera, 2000; Watt, 1919), sapin (Drapier, 1985; Duchaufour *et* Rousseau, 1959), épicéa (Ponge *et al.*, 1994; Weissen, 1979) ou hêtre (Silvy-Leligois, 1949; Wagner *et al.*, 2010; Weissen, 1979). Sans surprise, les causes évoquées sont très variables selon les espèces et les contextes de gestion. Elles ont pour origine des limitations dues à la biologie des arbres ou au fonctionnement des écosystèmes (réponses aux événements extrêmes climatiques induisant des mortalités élevées, besoin en lumière des semis déterminant leur survie et leur croissance en milieu fermé, relation allélopathique limitant le développement des semis sous les semenciers de la même espèce, herbivorie, etc.) qui n’ont pas pu être levées par des opérations sylvicoles bien menées (notamment dosage du couvert et du mélange d’essences, gestion des ongulés, gestion de la végétation). Néanmoins, ces études déjà anciennes portent sur des conditions climatiques passées et, en outre, la majorité d’entre elles n’incorporent pas de données microclimatiques, ce qui limite leur utilisation possible pour prédire l’impact des changements climatiques sur la régénération.

Des études plus récentes, réalisées dans différents contextes [peuplements de pin maritime dans le cordon dunaire aquitain (Guignabert *et al.*, 2020 ; Guignabert *et al.*, 2020a ; Guignabert, 2018), forêts mélangées hêtre-sapin-épicéa de montagne (Unkule, 2022), forêt méditerranéenne (Helluy, 2020), chênaie de plaine (réseau Effort, Saïd non publié, et réseau Régébloc, Collet, non publié), font état de difficultés de régénération récurrentes qui mettent en danger le recrutement des espèces désirées et qui semblent au moins en partie liées aux évolutions climatiques récentes.

Actuellement, ces études ponctuelles dans le temps et dans l’espace constituent notre meilleur estimateur de l’état des régénérations en France. En effet, **en l’absence d’un dispositif pérenne de suivi des régénérations forestières, seul capable d’offrir une vue à l’échelle nationale ainsi qu’une perspective historique, nous ne pouvons pas estimer la prévalence actuelle des déficits de régénération en France, ni leur évolution récente ou leurs relations avec les changements climatiques.**

2.3.3 Impacts attendus des changements climatiques sur la régénération naturelle dans quelques grands écosystèmes forestiers en France

2.3.3.1 Chêne sessile et chêne pédonculé en forêt de plaine

Une littérature abondante, française et européenne, traite de la régénération naturelle des chênes sessile et pédonculé et de sa conduite par les gestionnaires. Des difficultés récurrentes dans l'obtention des régénérations ont été rapportées (Mölder *et al.*, 2019). Il s'agit d'un problème historique ancien (Shaw, 1968 ; Watt, 1919) qui prend racine dans les changements de structures des paysages et des modes de gestion forestière et, plus particulièrement, dans la réduction des milieux semi-ouverts et la gestion des ongulés sauvages et domestiques (Bobiec *et al.*, 2018 ; Mölder *et al.*, 2019 ; Vera, 2000). L'étude des différentes étapes du processus de régénération a permis d'identifier certains déterminants du succès de la régénération des chênes sessile et pédonculé.

Les études portant sur la fécondité soulignent l'importance des conditions météorologiques sur les glandées (Schermer *et al.*, 2016). Au cours des deux dernières décennies, une augmentation marquée de la production annuelle de fruits a été observée et mise en relation avec la hausse des températures printanières (Caignard *et al.*, 2017). Par ailleurs, la mise à fleur et la diffusion pollinique s'avèrent très sensibles aux conditions météorologiques printanières (Lebourgeois *et al.*, 2018; Schermer *et al.*, 2019 ; Schermer *et al.*, 2020), faisant de ces deux processus des étapes clé de la dynamique du masting. Les résultats obtenus suggèrent pour les décennies à venir et en moyenne sur l'aire de distribution des chênes, une augmentation de l'intensité des glandées, tant que la disponibilité en eau ne devient pas limitante, assortie d'une augmentation de la variabilité interannuelle de la production de glands (Caignard *et al.*, 2017). En raison de la forte variabilité géographique des conditions climatiques attendues dans le futur, ces évolutions pourront revêtir des caractères différents selon les régions et les localisations.

À l'inverse, les étapes qui déterminent le recrutement ont été étudiées essentiellement en relation avec les facteurs qui peuvent être manipulés par la sylviculture. Ces études s'accordent pour montrer que les chênes (i) nécessitent une ouverture rapide du couvert permettant de dispenser un éclaircissement relatif supérieur à 35 % (Ligot *et al.*, 2013 ; Van Couwenberghe *et al.*, 2013), (ii) demandent un contrôle régulier de la végétation accompagnatrice (Fernandez *et al.*, 2020; Vernay, 2017) et des semis des autres essences notamment le hêtre (Ligot *et al.*, 2013 ; Van Couwenberghe *et al.*, 2013), ainsi (iii) qu'un contrôle strict de la pression exercée par les ongulés (Barrere *et al.*, 2021). Parmi ces études, très peu ont incorporé l'impact des conditions météorologiques sur le recrutement (Kohler *et al.*, 2020). De plus, le corpus disponible comprend une part importante d'études basées sur des données collectées il y a plus de 20 ans, dont les résultats ne peuvent probablement pas être transposés de façon simple aux temps présents.

2.3.3.2 Mélange hêtre-épicéa-sapin en forêt de montagne

La régénération naturelle dans les forêts mélangées hêtre-sapin-épicéa du Jura et de l'arc alpin montre une dynamique lente (Fuhr *et al.*, 2015), à tel point qu'elle peut parfois paraître bloquée (Veuillen *et al.*, 2020). De nombreux travaux menés en France et dans les pays voisins ont permis d'identifier les principaux déterminants de cette dynamique : (i) caractéristiques stationnelles, (ii) conditions météorologiques de l'année, (iii) pression d'herbivorie et (iv) historique de gestion (Diaci *et al.*, 2020 ; Motta, 1996). L'amplitude des changements climatiques observés dans les dernières décennies (augmentation des températures, réduction de l'ETP) et la diversité des conditions stationnelles (sol, altitude, versant) qui offre un large gradient de conditions d'alimentation hydrique et de température de l'air, font des forêts de ces régions un support particulièrement propice pour étudier et anticiper

les impacts des changements climatiques sur la régénération (Mondoni *et al.*, 2012). De plus, la présence d'espèces en mélange permet de comparer les réponses aux changements climatiques d'espèces ayant des besoins écologiques et des stratégies de croissance différents et, en outre, d'estimer les impacts des changements climatiques sur les interactions entre espèces.

Les trois espèces suivent un schéma de masting marqué, qui est largement piloté par la température et le régime hydrique (Davi *et al.*, 2016 ; Hacket-Pain *et al.*, 2019 ; Vacchiano *et al.*, 2017). Néanmoins, on considère que les conditions climatiques attendues dans les prochaines décennies ne devraient pas provoquer d'évolution majeure de la fécondité de trois espèces, car les facteurs climatiques devraient varier dans une gamme où la fécondité est peu sensible aux variations (Andrés *et al.*, 2014 ; Bisi *et al.*, 2016).

Au cours de l'étape de recrutement, les trois espèces montrent une forte sensibilité à la hausse des températures et à la baisse de l'humidité du sol, et cette sensibilité semble plus forte pour l'épicéa et le sapin que pour le hêtre (Kueppers *et al.*, 2017 ; Unkule, 2022). Une baisse importante du recrutement est donc attendue pour les trois espèces, ainsi qu'une dominance accrue du hêtre aux dépens des deux résineux. Par ailleurs, une sensibilité plus forte du sapin aux dégâts causés par les ongulés accentue sa perte de dominance par rapport au hêtre et à l'épicéa (Bernard, 2018 ; Nagel *et al.*, 2015). Les trois espèces présentent des exigences contrastées vis-à-vis de l'éclairement sous couvert, le hêtre et le sapin tolérant des conditions d'ombrage beaucoup plus fortes que l'épicéa (Diaci *et al.*, 2020). Néanmoins, en conditions sèches (sur sols calcaires superficiels), la présence d'un couvert adulte au-dessus de la régénération s'avère favorable à la survie des jeunes semis des trois espèces et pourrait limiter la baisse du recrutement attendue dans ces conditions (Simon *et al.*, 2019). Prises dans leur ensemble, ces observations invitent le gestionnaire forestier à (i) contrôler la végétation du sous-bois pour limiter la compétition en eau vis-à-vis des semis, (ii) contrôler la prédation des semis par les ongulés, et (iii) limiter la dimension des trouées réalisées dans le couvert adulte pour favoriser le recrutement des trois espèces, en veillant toutefois à offrir suffisamment de lumière à l'épicéa, qui est le plus exigeant des trois vis-à-vis de l'éclairement.

2.3.3.3 Pin maritime dans les forêts dunaires d'Aquitaine

Depuis plus d'une vingtaine d'années, le renouvellement traditionnel des pinèdes de la forêt dunaire aquitaine connaît dans certains secteurs des échecs répétés (Maugard *et* Magnin, 2020). Des travaux récents ont montré que la production annuelle de graines dans ces forêts ne semble pas être limitante (Guignabert *et al.*, 2020; Guignabert *et al.*, 2020b; Guignabert, 2018). Les échecs de régénération observés résident plutôt dans le recrutement et sont liés à la conjonction de plusieurs facteurs : (i) des sécheresses estivales qui réduisent la germination des graines et la survie des plantules et qui sont accentuées par la présence d'une végétation accompagnatrice parfois abondante, (ii) les températures estivales élevées, et (iii) une forte prédation par les ongulés et les rongeurs (Gonzalez *et al.*, 2020). Dans les forêts dunaires aquitaines, on peut significativement augmenter le succès de la régénération par (i) le contrôle de la végétation du sous-bois qui améliore le bilan hydrique des plants, et (ii) la réalisation de coupes d'ensemencement qui assurent un apport de graines sur plusieurs années et protègent les plantules et les semis des températures estivales élevées (Guignabert *et al.*, 2020a, 2020b).

2.3.3.4 Les chênaies en zone méditerranéenne

Les chênaies méditerranéennes sont composées de chêne pubescent ou de chêne vert et couvrent environ 800 000 ha presque entièrement sous forme de taillis. Autrefois régulièrement exploités, les coupes de taillis se sont espacées ou arrêtées et les taillis sont pour beaucoup d'entre eux vieillissants alors même qu'une demande en bois de feu et bois énergie a plus récemment émergé. Ce

vieillissement s'accompagne d'une mortalité plus élevée des souches et d'une diminution forte du nombre de rejets (Ladier *et al.*, 2014) lors d'une reprise du régime de taillis. Régime par ailleurs contesté par certains acteurs de l'environnement et usagers pour des raisons écologiques et sociales. Le passage à une futaie sur souche puis à une futaie par régénération naturelle par graines s'impose alors pour renouveler les peuplements. Cependant, les différentes expérimentations in situ pour favoriser la régénération naturelle (le plus souvent des coupes d'éclaircie et suivi du recrutement) se sont soldées par des échecs (Prévosto *et al.*, 2013). Les semis s'installent mais disparaissent au bout de quelques années, témoignant de difficultés de régénération au moins dans la partie Sud-Est de la France. Les raisons de ce blocage sont pour l'instant mal comprises et nécessitent des recherches complémentaires (Helluy, 2020).

2.4 Perspectives : du monitoring à l'expérimentation

Les décennies à venir vont voir des évolutions majeures dans l'obtention des régénérations forestières, dont il est pour l'heure encore difficile de prédire le sens et la magnitude. En effet, les étapes successives du processus de régénération naturelle, de la floraison à la croissance des semis jusqu'au stade adulte, diffèrent sensiblement dans leurs déterminants climatiques, et chaque espèce possède un schéma de réponses aux facteurs climatiques qui lui est propre. **Nos connaissances sur les conditions assurant le succès de la régénération des principales espèces des forêts françaises et européennes sont abondantes mais, pour nombre d'entre elles, se basent sur des données anciennes et n'incorporent que très partiellement les effets des facteurs climatiques**, ce qui limite leur utilité pour prédire l'évolution de la dynamique des régénérations naturelles en conditions de changements climatiques. Par ailleurs, **l'absence de dispositif national de suivi de l'état des renouvellements forestiers empêche d'estimer la prévalence actuelle des déficits de régénération pour les différentes espèces ou les différentes formations forestières, et de détecter les signes de leur éventuelle occurrence dans le futur**. Les réseaux d'expérimentation (Ecodune, Régéblock, Effort) ou d'observation (Renecofor) existant actuellement sont trop locaux ou temporaires, et/ou insuffisamment répétés et n'offrent pas cette vue d'ensemble. De même, les données issues des suivis de gestion des organismes de gestion forestière semblent actuellement parcellaires ou incomplètes et n'ont pas été mobilisées dans le cadre d'études à large échelle géographique. À l'heure actuelle, l'inventaire des ressources forestières nationales réalisé par l'IGN ne comporte pas de données spécifiques aux stades de semis mais une évolution des protocoles de mesures est en cours, qui incorpore une caractérisation de ce stade. L'observatoire des forêts sentinelles, principalement installées dans les réserves forestières françaises, incorpore une caractérisation de la régénération naturelle.

Les principaux besoins de recherche et de monitoring (suivi continu) pour parvenir à anticiper, détecter et corriger les difficultés de régénération, résident dans la mise en place d'approches complémentaires :

- un système pérenne de suivi des renouvellements à l'échelle nationale, qui explore les grands contextes forestiers ;
- des inventaires ponctuels le long de gradients de conditions climatiques déterminées permettant de répondre à des questions plus ciblées ;
- des expérimentations pour analyser la dynamique de la régénération en réponse aux interventions sylvicoles, dans des réseaux qui explorent des gradients de conditions climatiques dans l'espace et le temps ;
- des retours d'expérience de parcelles en gestion, réalisés selon des protocoles permettant de récupérer des métadonnées.

Idéalement, ces différentes actions devraient être conduites de façon coordonnée, pour échantillonner l'ensemble des contextes sylvicoles d'intérêt et pour collecter des jeux de données

interopérables, dans l’objectif de pouvoir mettre en œuvre des analyses d’ensemble. Une connexion voire une insertion dans les réseaux internationaux existants de suivi des régénérations, notamment le réseau Mastif (Clark *et al.*, 2021) et les réseaux des IFN européens serait fort intéressant (Lines *et al.*, 2020).

Dans ces différentes actions, il ne faudrait pas se cantonner au succès global de la régénération, et il est important de caractériser les différentes étapes du processus de régénération en distinguant au minimum les étapes de fécondité et de recrutement, puisqu’elles répondent à des facteurs climatiques sensiblement différents. À chaque étape, il serait intéressant d’aller au-delà de la caractérisation des stocks de régénération, et de mesurer également les flux de régénération qui seuls permettront de bien comprendre la réponse de la régénération à des facteurs qui peuvent montrer de fortes fluctuations temporelles. Les déterminants de la dynamique de la régénération sont véritablement multifactoriels et, parmi l’ensemble des facteurs impliqués, les contraintes hydriques et thermiques et leurs impacts sur les jeunes semis, ainsi que les strates de végétation et leur rôle sur la modulation du microclimat, semblent devoir être étudiés en priorité. Ces facteurs peuvent être manipulés par la sylviculture et le type et l’intensité des opérations sylvicoles à réaliser pour favoriser la régénération doivent être évalués.

2.5 Pistes de recommandations

Quelques pistes de recommandations pour la conduite des régénérations forestières peuvent être ouvertes. Dans l’état de nos connaissances actuelles, ces pistes reposent essentiellement sur des bases théoriques et, pour la plupart des espèces, ne sont pas étayées par des observations en forêt. Avant d’être généralisées, elles demandent donc à être testées et validées pour différentes espèces et différents contextes de gestion, par des expérimentations ou par des tests en gestion.

Pour favoriser la régénération naturelle dans des conditions climatiques futures attendues, la sylviculture peut suivre deux stratégies complémentaires :

1. pallier la variabilité de la production annuelle de graines et la baisse de la fécondité. D’une part, il s’agit de saisir les opportunités de régénération offertes par les bonnes années de fructification en **déclenchant après chaque épisode de masting les opérations sylvicoles qui permettront de profiter au mieux des graines disponibles**. Néanmoins, ces épisodes sont difficiles à prédire, et cela demande donc de mettre en place un mode de gestion opportuniste qui permet de profiter des fenêtres d’opportunité quand elles se présentent. D’autre part, cela consiste à augmenter les occasions de régénération en **maintenant des semenciers dans les parcelles tant qu’un capital de régénération (nombre de semis considérés comme acquis) suffisant n’est pas présent**. Cela permet d’assurer un apport de graines sur plusieurs années et de mieux enjamber les années défavorables au développement des jeunes semis ;
2. favoriser le recrutement en respectant au mieux les exigences écologiques des semis. Ceci se base principalement sur la **gestion de la végétation du sous-bois** et le **dosage du couvert adulte** dans le but d’améliorer la disponibilité en eau du sol et de réduire les températures et l’exposition au rayonnement du soleil des semis, pour améliorer leur survie et leur croissance. Dans le futur, si les conditions climatiques deviennent plus contraignantes, notamment si elles se font plus sèches, l’effet abri dispensé par le couvert végétal gagnera en importance, et pourrait devenir prépondérant par rapport aux effets négatifs de la compétition pour l’eau et la lumière. Dans ces conditions, le **maintien d’un couvert** deviendrait favorable à la survie des semis. Si cette tendance générale est attendue, les situations où il devient bénéfique de maintenir un abri végétal autour des semis et les modalités précises que doit recouvrir l’abri ainsi créé sont actuellement difficiles à identifier.

2.6 Références bibliographiques

- Balandier, P., Collet, C., Miller, J.H., Reynolds, P.E., Zedaker, S.M., 2005. Designing Forest Vegetation Management Strategies Based On The Mechanisms And Dynamics Of Crop Tree Competition By Neighbouring Vegetation. *Forestry* 79, 3–27.
- Barrere, J., Petersson, L.K., Boulanger, V., Collet, C., Felton, A.M., Löf, M., Saïd, S., 2021. Canopy openness and exclusion of wild ungulates act synergistically to improve oak natural regeneration. *Forest Ecology and Management* 487, 118976. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.118976>
- Barthod, C., Dupouey, J., Larrère, R., Sarrazin, F., 2021. La libre évolution, un concept aux multiples facettes. *Revue forestière française* 73, 105–114.
- Barton, K.E., Hanley, M.E., 2013. Seedling–herbivore interactions: insights into plant defence and regeneration patterns. *Annals of Botany* 112, 643–650. <https://doi.org/10.1093/aob/mct139>
- Bernard, M., 2018. Changements climatiques et herbivorie: influence sur la régénération et le potentiel d’avenir des forêts mélangées (Thèse Université Montpellier, 288p.).
- Bertness, M.D., Callaway, R., 1994. Positive interactions in communities. *Trends in Ecology & Evolution* 9, 191–193. [https://doi.org/10.1016/0169-5347\(94\)90088-4](https://doi.org/10.1016/0169-5347(94)90088-4)
- Bisi, F., von Hardenberg, J., Bertolino, S., Wauters, L.A., Imperio, S., Preatoni, D.G., Provenzale, A., Mazzamuto, M.V., Martinoli, A., 2016. Current and future conifer seed production in the Alps: testing weather factors as cues behind masting. *Eur J Forest Res* 135, 743–754. <https://doi.org/10.1007/s10342-016-0969-4>
- Bobiec, A., Reif, A., Öllerer, K., 2018. Seeing the oakscape beyond the forest: a landscape approach to the oak regeneration in Europe. *Landscape Ecol* 33, 513–528. <https://doi.org/10.1007/s10980-018-0619-y>
- Bogdziewicz, M., Kelly, D., Thomas, P.A., Lageard, J.G.A., Hacket-Pain, A., 2020. Climate warming disrupts mast seeding and its fitness benefits in European beech. *Nat. Plants* 6, 88–94. <https://doi.org/10.1038/s41477-020-0592-8>
- Caignard, T., Kremer, A., Firmat, C., Nicolas, M., Venner, S., Delzon, S., 2017. Increasing spring temperatures favor oak seed production in temperate areas. *Sci Rep* 7, 8555. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-09172-7>
- Calama, R., Manso, R., Lucas-Borja, M.E., Espelta, J.M., Piqué, M., Bravo, F., Del Peso, C., Pardos, M., 2017. Natural regeneration in Iberian pines: A review of dynamic processes and proposals for management. *Forest Syst* 26, eR02S. <https://doi.org/10.5424/fs/2017262-11255>
- Clark, J.S., Andrus, R., Aubry-Kientz, M., Bergeron, Y., Bogdziewicz, M., Bragg, D.C., Brockway, D., Cleavitt, N.L., Cohen, S., Courbaud, B., Daley, R., Das, A.J., Dietze, M., Fahey, T.J., Fer, I., Franklin, J.F., Gehring, C.A., Gilbert, G.S., Greenberg, C.H., Guo, Q., HilleRisLambers, J., Ibanez, I., Johnstone, J., Kilner, C.L., Knops, J., Koenig, W.D., Kunstler, G., LaMontagne, J.M., Legg, K.L., Luongo, J., Lutz, J.A., Macias, D., McIntire, E.J.B., Messaoud, Y., Moore, C.M., Moran, E., Myers, J.A., Myers, O.B., Nunez, C., Parmenter, R., Pearse, S., Pearson, S., Poulton-Kamakura, R., Ready, E., Redmond, M.D., Reid, C.D., Rodman, K.C., Scher, C.L., Schlesinger, W.H., Schwantes, A.M., Shanahan, E., Sharma, S., Steele, M.A., Stephenson, N.L., Sutton, S., Swenson, J.J., Swift, M., Veblen, T.T., Whipple, A.V., Whitham, T.G., Wion, A.P., Zhu, K., Zlotin, R., 2021. Continent-wide tree fecundity driven by indirect climate effects. *Nat Commun* 12, 1242. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20836-3>
- Clark, J.S., Beckage, B., Camill, P., Cleveland, B., HilleRisLambers, J., Lichter, J., McLachlan, J., Mohan, J., Wyckoff, P., 1999. Interpreting recruitment limitation in forests. *Am. J. Bot.* 86, 1–16. <https://doi.org/10.2307/2656950>

- Cuesta, B., Villar-Salvador, P., Puértolas, J., Rey Benayas, J.M., Michalet, R., 2010. Facilitation of *Quercus ilex* in Mediterranean shrubland is explained by both direct and indirect interactions mediated by herbs. *Journal of Ecology* 98, 687–696. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2010.01655.x>
- Davi, H., Cailleret, M., Restoux, G., Amm, A., Pichot, C., Fady, B., 2016. Disentangling the factors driving tree reproduction. *Ecosphere* 7. <https://doi.org/10.1002/ecs2.1389>
- Davis, F.W., Sweet, L.C., Serra-Diaz, J.M., Franklin, J., McCullough, I., Flint, A., Flint, L., Dingman, J.R., Regan, H.M., Syphard, A.D., Hannah, L., Redmond, K., Moritz, M.A., 2016. Shrinking windows of opportunity for oak seedling establishment in southern California mountains. *Ecosphere* 7. <https://doi.org/10.1002/ecs2.1573>
- de Andrés, E.G., Camarero, J.J., Martínez, I., Coll, L., 2014. Uncoupled spatiotemporal patterns of seed dispersal and regeneration in Pyrenean silver fir populations. *Forest Ecology and Management* 319, 18–28. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.01.050>
- Dey, D.C., Knapp, B.O., Battaglia, M.A., Deal, R.L., Hart, J.L., O'Hara, K.L., Schweitzer, C.J., Schuler, T.M., 2019. Barriers to natural regeneration in temperate forests across the USA. *New Forests* 50, 11–40. <https://doi.org/10.1007/s11056-018-09694-6>
- Diaci, J., Rozman, J., Rozman, A., 2020. Regeneration gap and microsite niche partitioning in a high alpine forest: Are Norway spruce seedlings more drought-tolerant than beech seedlings? *Forest Ecology and Management* 455, 117688. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117688>
- Dobrowski, S.Z., Swanson, A.K., Abatzoglou, J.T., Holden, Z.A., Safford, H.D., Schwartz, M.K., Gavin, D.G., 2015. Forest structure and species traits mediate projected recruitment declines in western US tree species: Tree recruitment patterns in the western US. *Global Ecology and Biogeography* 24, 917–927. <https://doi.org/10.1111/geb.12302>
- Donohue, K., Rubio de Casas, R., Burghardt, L., Kovach, K., Willis, C.G., 2010. Germination, Postgermination Adaptation, and Species Ecological Ranges. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 41, 293–319. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102209-144715>
- Drapier, J., 1985. Les difficultés de régénération naturelle du Sapin (*Abies alba* Mill.) dans les Vosges. Etude écologique. *Rev. For. Fr.* 45. <https://doi.org/10.4267/2042/21785>
- Duchaufour, Ph., Rousseau, L.-Z., 1959. Les phénomènes d'intoxication des plantules de résineux par le manganèse dans les humus forestières. *Rev. For. Fr.* 835. <https://doi.org/10.4267/2042/27559>
- E.Silva, D., Mazzella, P.R., Legay, M., Corcket, E., Dupouey, J.L., 2012. Does natural regeneration determine the limit of European beech distribution under climatic stress? *Forest Ecology and Management* 266, 263–272.
- Fernandez, M., Malagoli, P., Vernay, A., Améglio, T., Balandier, P., 2020. Echecs de régénération du chêne en présence de molinie: au-delà d'une simple compétition pour les ressources. *Rendez-vous techniques de l'ONF* 39, 39–45.
- Feurdean, A., Bhagwat, S.A., Willis, K.J., Birks, H.J.B., Lischke, H., Hickler, T., 2013. Tree Migration-Rates: Narrowing the Gap between Inferred Post-Glacial Rates and Projected Rates. *PLoS ONE* 8, e71797. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0071797>
- Fuhr, M., Weyant, J., Durand, N., Riond, C., 2015. Dynamique de fermeture des grandes trouées dans les forêts de montagne des Alpes du Nord. *Rendez-vous techniques ONF* 3–10.
- Gonzalez, M., Augusto, L., Maugard, F., Delerue, F., 2020. Ecologie de l'installation du pin maritime dans les forêts de dune d'Aquitaine. *Journée de restitution du projet ECODUNE*.

- Götmark, F., Fridman, J., Kempe, G., Norden, B., 2005. Broadleaved tree species in conifer-dominated forestry: Regeneration and limitation of saplings in southern Sweden. *Forest Ecology and Management* 214, 142–157. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.04.001>
- Grubb, P.J., 1977. The maintenance of species-richness in plant communities: The importance of the regeneration niche. *Biological Reviews* 52, 107–145. <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.1977.tb01347.x>
- Guignabert, A., 2018. Etude des processus de régénération naturelle du pin maritime en contexte de dune forestière gérée. Influence de la sylviculture, du climat et des interactions biotiques. Thèse Univ. Bordeaux.
- Guignabert, A., Augusto, L., Delerue, F., Maugard, F., Gire, C., Magnin, C., Niollet, S., Gonzalez, M., 2020a. Combining partial cutting and direct seeding to overcome regeneration failures in dune forests. *Forest Ecology and Management* 476, 118466. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118466>
- Guignabert, A., Gonzalez, M., Delerue, F., Maugard, F., Augusto, L., 2020b. La régénération du pin maritime dans les forêts dunaires d'Aquitaine: un processus complexe et multifactoriel. *Rendez-vous techniques de l'ONF* 67–68, 52–60.
- Guignabert, Augusto, L., Delerue, F., Maugard, F., Gire, C., Magnin, C., Niollet, S., Gonzalez, M., 2020. Combining partial cutting and direct seeding to overcome regeneration failures in dune forests. *Forest Ecology and Management* 476, 118466. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118466>
- Hacket-Pain, A., Ascoli, D., Berretti, R., Mencuccini, M., Motta, R., Nola, P., Piussi, P., Ruffinatto, F., Vacchiano, G., 2019. Temperature and masting control Norway spruce growth, but with high individual tree variability. *Forest Ecology and Management* 438, 142–150. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.02.014>
- Hanbury-Brown, A.R., Ward, R.E., Kueppers, L.M., 2022. Forest regeneration within Earth system models: current process representations and ways forward. *New Phytologist* 235, 20–40. <https://doi.org/10.1111/nph.18131>
- Helluy, M., 2020. Adapter la gestion des forêts méditerranéennes au changement climatique : rôle des strates de végétation et modélisation fonctionnelle de la dynamique forestière (Thèse Université Aix-Marseille, 196 p).
- Herrera, C., Jordano, P., Guitian, J., Traveset, A., 1998. Annual variability in seed production by woody plants and the masting concept: reassessment of principles and relationship to pollination and seed dispersal. *The American Naturalist* 152, 576–594.
- Ibáñez, I., Katz, D.S.W., Lee, B.R., 2017. The contrasting effects of short-term climate change on the early recruitment of tree species. *Oecologia* 184, 701–713. <https://doi.org/10.1007/s00442-017-3889-1>
- IGN, 2021. Le Mémento - Inventaire forestier - Édition 2021.
- Journé, V., Andrus, R., Aravena, M., Ascoli, D., Berretti, R., Berveiller, D., Bogdziewicz, M., Boivin, T., Bonal, R., Caignard, T., Calama, R., Camarero, J.J., Chang-Yang, C., Courbaud, B., Courbet, F., Curt, T., Das, A.J., Daskalakou, E., Davi, H., Delpierre, N., Delzon, S., Dietze, M., Donoso Calderon, S., Dormont, L., Maria Espelta, J., Fahey, T.J., Farfan-Rios, W., Gehring, C.A., Gilbert, G.S., Gratzner, G., Greenberg, C.H., Guo, Q., Hacket-Pain, A., Hampe, A., Han, Q., Lambers, J.H.R., Hoshizaki, K., Ibanez, I., Johnstone, J.F., Kabeya, D., Kays, R., Kitzberger, T., Knops, J.M.H., Kobe, R.K., Kunstler, G., Lagueard, J.G.A., LaMontagne, J.M., Leininger, T., Limousin, J., Lutz, J.A., Macias, D., McIntire, E.J.B., Moore, C.M., Moran, E., Motta, R., Myers, J.A., Nagel, T.A., Noguchi, K., Ourcival, J., Parmenter, R., Pearse, I.S., Perez-Ramos, I.M., Piechnik, L., Poulsen, J., Poulton-Kamakura, R., Qiu, T., Redmond, M.D., Reid, C.D., Rodman, K.C., Rodriguez-Sanchez, F., Sanguinetti, J.D., Scher, C.L., Marle, H.S.V.,

- Seget, B., Sharma, S., Silman, M., Steele, M.A., Stephenson, N.L., Straub, J.N., Swenson, J.J., Swift, M., Thomas, P.A., Uriarte, M., Vacchiano, G., Veblen, T.T., Whipple, A.V., Whitham, T.G., Wright, B., Wright, S.J., Zhu, K., Zimmerman, J.K., Zlotin, R., Zywiec, M., Clark, J.S., 2022. Globally, tree fecundity exceeds productivity gradients. *Ecology Letters* 25, 1471–1482. <https://doi.org/10.1111/ele.14012>
- Kelly, D., 1994. The evolutionary ecology of mast seeding. *Trends in Ecology & Evolution* 9, 465–470. [https://doi.org/10.1016/0169-5347\(94\)90310-7](https://doi.org/10.1016/0169-5347(94)90310-7)
- Kohler, M., Pyttel, P., Kuehne, C., Modrow, T., Bauhus, J., 2020. On the knowns and unknowns of natural regeneration of silviculturally managed sessile oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) forests—a literature review. *Annals of Forest Science* 77, 101. <https://doi.org/10.1007/s13595-020-00998-2>
- Kueppers, L.M., Conlisk, E., Castanha, C., Moyes, A.B., Germino, M.J., Valpine, P., Torn, M.S., Mitton, J.B., 2017. Warming and provenance limit tree recruitment across and beyond the elevation range of subalpine forest. *Glob Change Biol* 23, 2383–2395. <https://doi.org/10.1111/gcb.13561>
- Ladier, J., Tessier, C., Amandier, L., Prévosto, B., 2014. Gestion du chêne pubescent dans le Sud-est de la France. Quelle alternative au taillis simple? *Rendez-vous techniques de l'ONF* 44, 9–16.
- Le Roncé, I., Gavinet, J., Ourcival, J., Mouillot, F., Chuine, I., Limousin, J., 2021. Holm oak fecundity does not acclimate to a drier world. *New Phytol* 231, 631–645. <https://doi.org/10.1111/nph.17412>
- Lebourgeois, F., Delpierre, N., Dufrêne, E., Cecchini, S., Macé, S., Croisé, L., Nicolas, M., 2018. Assessing the roles of temperature, carbon inputs and airborne pollen as drivers of fructification in European temperate deciduous forests. *Eur J Forest Res* 137, 349–365. <https://doi.org/10.1007/s10342-018-1108-1>
- Ligot, G., Balandier, P., Fayolle, A., Lejeune, P., Claessens, H., 2013. Height competition between *Quercus petraea* and *Fagus sylvatica* natural regeneration in mixed and uneven-aged stands. *Forest Ecology and Management* 304, 391–398. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.05.050>
- Lines, E.R., Zavala, M.A., Ruiz-Benito, P., Coomes, D.A., 2020. Capturing juvenile tree dynamics from count data using Approximate Bayesian Computation. *Ecography* 43, 406–418. <https://doi.org/10.1111/ecog.04824>
- Manso, R., Pukkala, T., Pardos, M., Miina, J., Calama, R., 2014. Modelling *Pinus pinea* forest management to attain natural regeneration under present and future climatic scenarios. *Can. J. For. Res.* 44, 250–262. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2013-0179>
- Maugard, F., Magnin, C., 2020. Améliorer la réussite de la régénération naturelle du pin maritime dans les forêts dunaires d'Aquitaine. *Rendez-vous techniques ONF* 46–51.
- Mölder, A., Sennhenn-Reulen, H., Fischer, C., Rumpf, H., Schönfelder, E., Stockmann, J., Nagel, R.-V., 2019. Success factors for high-quality oak forest (*Quercus robur*, *Q. petraea*) regeneration. *For. Ecosyst.* 6, 49. <https://doi.org/10.1186/s40663-019-0206-y>
- Mondoni, A., Rossi, G., Orsenigo, S., Probert, R.J., 2012. Climate warming could shift the timing of seed germination in alpine plants. *Annals of Botany* 110, 155–164. <https://doi.org/10.1093/aob/mcs097>
- Motta, R., 1996. Impact of wild ungulates on forest regeneration and tree composition of mountain forests in the Western Italian Alps. *Forest Ecology and Management* 88, 93–98.
- Nagel, T.A., Diaci, J., Jerina, K., Kobal, M., Rozenbergar, D., 2015. Simultaneous influence of canopy decline and deer herbivory on regeneration in a conifer–broadleaf forest. *Can. J. For. Res.* 45, 266–275. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2014-0249>
- Pacala, S.W., Canham, C.D., Silander Jr., J.A., Kobe, R.K., 1994. Sapling growth as a function of resources in a north temperate forest. *Can. J. For. Res.* 24, 2172–2183. <https://doi.org/10.1139/x94-280>

- Parmesan, C., Hanley, M.E., 2015. Plants and climate change: complexities and surprises. *Annals of Botany* 116, 849–864. <https://doi.org/10.1093/aob/mcv169>
- Pearse, I.S., Koenig, W.D., Kelly, D., 2016. Mechanisms of mast seeding: resources, weather, cues, and selection. *New Phytol* 212, 546–562. <https://doi.org/10.1111/nph.14114>
- Pearse, I.S., LaMontagne, J.M., Koenig, W.D., 2017. Inter-annual variation in seed production has increased over time (1900–2014). *Proc. R. Soc. B.* 284, 20171666. <https://doi.org/10.1098/rspb.2017.1666>
- Ponge, J.-F., André, J., Bernier, N., Gallet, C., 1994. La régénération naturelle : connaissances actuelles. le cas de l'épicéa en forêt de macot (Savoie). *Rev. For. Fr.* 25. <https://doi.org/10.4267/2042/26510>
- Prévosto, B., Ripert, C., Ostermeyer, R., 2013. Eclaircir est-il suffisant pour favoriser la régénération de taillis de chêne blanc ? Retour sur un dispositif expérimental installé il y a 27 ans en forêt domaniale de Lure (Alpes-de-Haute-Provence). *Forêt méditerranéenne* 24, 3–12.
- Qiu, T., Sharma, S., Woodall, C.W., Clark, J.S., 2021. Niche Shifts From Trees to Fecundity to Recruitment That Determine Species Response to Climate Change. *Front. Ecol. Evol.* 9, 719141. <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.719141>
- Schermer, É., Bel-Venner, M., Fouchet, D., Siberchicot, A., Boulanger, V., Caignard, T., Thibaudon, M., Oliver, G., Nicolas, M., Gaillard, J., Delzon, S., Venner, S., 2019. Pollen limitation as a main driver of fruiting dynamics in oak populations. *Ecol Lett* 22, 98–107. <https://doi.org/10.1111/ele.13171>
- Schermer, É., Bel-Venner, M., Gaillard, J., Dray, S., Boulanger, V., Le Roncé, I., Oliver, G., Chuine, I., Delzon, S., Venner, S., 2020. Flower phenology as a disruptor of the fruiting dynamics in temperate oak species. *New Phytol* 225, 1181–1192. <https://doi.org/10.1111/nph.16224>
- Schermer, É., Boulanger, V., Delzon, S., Saïd, S., Focardi, S., Guibert, B., Gaillard, J., Venner, S., 2016. Fluctuations des glandées chez les chênes : Mieux les comprendre pour mieux gérer la régénération des chênaies. *Rendez-vous techniques de l'ONF* 50, 21–29.
- Serra-Diaz, J.M., Franklin, J., Sweet, L.C., McCullough, I.M., Syphard, A.D., Regan, H.M., Flint, L.E., Flint, A.L., Dingman, J.R., Moritz, M.A., Redmond, K., Hannah, L., Davis, F.W., 2016. Averaged 30 year climate change projections mask opportunities for species establishment. *Ecography* 39, 844–845. <https://doi.org/10.1111/ecog.02074>
- Sharma, S., Andrus, R., Bergeron, Y., Bogdziewicz, M., Bragg, D.C., Brockway, D., Cleavitt, N.L., Courbaud, B., Das, A.J., Dietze, M., Fahey, T.J., Franklin, J.F., Gilbert, G.S., Greenberg, C.H., Guo, Q., Hille Ris Lambers, J., Ibanez, I., Johnstone, J.F., Kilner, C.L., Knops, J.M.H., Koenig, W.D., Kunstler, G., LaMontagne, J.M., Macias, D., Moran, E., Myers, J.A., Parmenter, R., Pearse, I.S., Poulton-Kamakura, R., Redmond, M.D., Reid, C.D., Rodman, K.C., Scher, C.L., Schlesinger, W.H., Steele, M.A., Stephenson, N.L., Swenson, J.J., Swift, M., Veblen, T.T., Whipple, A.V., Whitham, T.G., Wion, A.P., Woodall, C.W., Zlotin, R., Clark, J.S., 2022. North American tree migration paced by climate in the West, lagging in the East. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 119, e2116691118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2116691118>
- Shaw, M.W., 1968. Factors Affecting the Natural Regeneration of Sessile Oak (*Quercus Petraea*) in North Wales: I. A Preliminary Study of Acorn Production, Viability and Losses. *The Journal of Ecology* 56, 565. <https://doi.org/10.2307/2258251>
- Shibata, M., Masaki, T., Yagihashi, T., Shimada, T., Saitoh, T., 2020. Decadal changes in masting behaviour of oak trees with rising temperature. *J Ecol* 108, 1088–1100. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13337>
- Silvy-Leligois, P., 1949. Les problèmes de la régénération dans les hêtraies normandes. *Rev. For. Fr.* 426. <https://doi.org/10.4267/2042/27637>

- Simon, A., Katzensteiner, K., Gratzner, G., 2019. Drivers of forest regeneration patterns in drought prone mixed-species forests in the Northern Calcareous Alps. *Forest Ecology and Management* 453, 117589. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117589>
- Smit, C., Ouden, J., Díaz, M., 2008. Facilitation of *Quercus ilex* recruitment by shrubs in Mediterranean open woodlands. *Journal of Vegetation Science* 19, 193–200. <https://doi.org/10.3170/2007-8-18352>
- Unkule, M., 2022. Régénération des forêts mixtes épicéa - sapin - hêtre sous la pression du climat et des ongulés. Thèse Univ.Grenoble Alpes.
- Vacchiano, G., Hacket-Pain, A., Turco, M., Motta, R., Maringer, J., Conedera, M., Drobyshev, I., Ascoli, D., 2017. Spatial patterns and broad-scale weather cues of beech mast seeding in Europe. *New Phytol* 215, 595–608. <https://doi.org/10.1111/nph.14600>
- Van Couwenberghe, R., Gégout, J.-C., Lacombe, E., Collet, C., 2013. Light and competition gradients fail to explain the coexistence of shade-tolerant *Fagus sylvatica* and shade-intermediate *Quercus petraea* seedlings. *Annals of Botany* 112, 1421–1430. <https://doi.org/10.1093/aob/mct200>
- Vera, F.W.M., 2000. *Grazing Ecology and Forest History*. CABI Publishing, pp. 13–60.
- Vernay, A., 2017. De la complexité fonctionnelle et écophysologique des ressources lumière, azote et eau dans le réseau précoce d’interactions entre le jeune chêne (*Quercus petraea*) et deux Poacées (*D. cespitosa* et *M. caerulea*) : conséquences pour la régénération des chênaies tempérées (Thèse, Université Clermont Auvergne, 212 p.).
- Veullen, L., Malabeux, L., Riond, C., Cornevin, D., 2020. Le travail du sol en montagne: enjeux, expérimentations passées et pratiques actuelles. *Rendez-vous techniques de l’ONF* 67–68, 16–21.
- Wagner, S., Collet, C., Madsen, P., Nakashizuka, T., Nyland, R.D., Sagheb-Talebi, K., 2010. Beech regeneration research: From ecological to silvicultural aspects. *Forest Ecology and Management* 259, 2172–2182. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.02.029>
- Walck, J.L., Hidayati, S.N., Dixon, K.W., Thompson, K., Poschlod, P., 2011. Climate change and plant regeneration from seed: CLIMATE CHANGE AND PLANT REGENERATION. *Global Change Biology* 17, 2145–2161. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02368.x>
- Watt, A.S., 1925. On the Ecology of British Beechwoods with Special Reference to Their Regeneration: Part II, Sections II and III. The Development and Structure of Beech Communities on the Sussex Downs. *The Journal of Ecology* 13, 27. <https://doi.org/10.2307/2255556>
- Watt, A.S., 1919. On the Causes of Failure of Natural Regeneration in British Oakwoods. *The Journal of Ecology* 7, 173. <https://doi.org/10.2307/2255275>
- Weissen, F., 1979. La régénération naturelle de l’Épicéa en Ardenne. *Bulletin de la Société Royale Forestière de Belgique* 86, 115–123.
- Zhu, K., Woodall, C.W., Ghosh, S., Gelfand, A.E., Clark, J.S., 2014. Dual impacts of climate change: forest migration and turnover through life history. *Glob Change Biol* 20, 251–264. <https://doi.org/10.1111/gcb.12382>

Volet 2 | Thème 2. Facteurs de réussite des renouvellements forestiers

Question 3. Quelle a été l'évolution des taux de succès des plantations de l'année au cours des quinze dernières années ?

Sommaire

3.1 Contexte et problématique	624
3.2 Matériel et méthodes	624
3.2.1 Sites d'étude et mesures	624
3.2.2 Traitement des données	625
3.2.3 Caractérisation de l'échantillon	625
3.3 Réponses à la question posée.....	627
3.3.1 Reprise et mortalité globale des plants	627
3.3.2 Mortalité des plants par type de dégâts.....	627
3.3.3 Taux de reprise par essence ou par groupe d'essences	628
3.3.4 Distribution spatiale de la réussite des plantations analysées en fonction des grandes régions écologiques (GRECO)	629
3.3.5 Taux de reprise moyen selon le type de travaux réalisés lors de la première année de plantation	631
3.3.6 Conclusions	633
3.4 Perspectives	634
3.5 Références bibliographiques	634
3.6 Annexes	635

Rédacteurs

Bernard **Boutte**, Ministère de l'Agriculture – DGAL, Département de la santé des forêts, Avignon (84), France

Claude **Husson**, Ministère de l'Agriculture – DGAL, Département de la santé des forêts, Champenoux (54), France

François-Xavier **Saintonge**, Ministère de l'Agriculture – DGAL, Département de la santé des forêts, Ardon (45), France

3.1 Contexte et problématique

La réussite des plantations de l'année est observée par **le DSF**. L'objectif de ce suivi mis en place en 2007 est d'évaluer le niveau de réussite des plantations lors de **leur première année de végétation** ainsi que l'importance relative des différentes contraintes potentielles (abiotiques, biotiques, anthropiques) induisant une mortalité de plants pour les principales essences françaises (Ministère de l'Agriculture - DGAL, 2017).

3.2 Matériel et méthodes

3.2.1 Sites d'étude et mesures

L'évaluation de la réussite des plantations de l'année (plantations de l'automne de l'année précédente ou du printemps de l'année de notation) est effectuée par les Correspondants-Observateurs du DSF dans des plantations forestières de plus de 1 ha, représentatives des plantations du secteur d'activité de chaque Correspondant-Observateur (antécédent cultural, essence, type de plant, répartition géographique, etc.) Chaque parcelle fait l'objet de deux notations la même année : une à la fin du printemps (en mai-juin) et une à la fin de la saison de végétation (en octobre-novembre) (Ministère de l'Agriculture - DGAL, 2017). Les observations sont réalisées sur 100 plants de la même essence répartis dans la plantation. En cas de plantations mélangées, il est possible de répéter les mesures selon le

même protocole pour chaque essence, sur la même plantation. Si la plantation a une surface supérieure à 5 ha, les mesures peuvent être répétées pour chaque tranche de 5 ha supplémentaires.

Chaque plant de l'échantillon est examiné. Son état sanitaire est noté. Les observations permettent d'appréhender l'ensemble des facteurs qui constituent une source potentielle de stress et de mortalité pour les plants. Ainsi, les facteurs biotiques et abiotiques qui affectent le plant, sont notés. Si le plant est mort, la raison principale est recherchée parmi les facteurs de mortalité mentionnés : facteurs biotiques (insectes, champignons, rongeurs, gibier) ou abiotiques (gel, sécheresse, etc.) Tous les cas de mortalité inexpliqués ou mettant en cause plusieurs facteurs (qualité des plants ou de la plantation, stress abiotique ou anthropique) ont été regroupés en une seule mention « abiotique ». La mortalité due aux champignons est probablement sous-estimée car des analyses de plants complets, notamment sur les systèmes racinaires, ne sont pas effectuées de manière systématique sur les plants morts.

Au niveau de la parcelle, sont également consignés : les coordonnées géographiques, l'essence plantée, les travaux préparatoires et les traitements effectués après plantation (voir Annexe 2.3-1).

3.2.2 Traitement des données

Pour chaque catégorie de plantation examinée (par essence, par grande région écologique, par année, etc.), trois indicateurs de réussite des plantations ont été retenus :

1. **le pourcentage de plantations non réussies** : une plantation présentant moins de 80 % de plants vivants au 1^{er} octobre est considérée comme non réussie. Le pourcentage de plantations non réussies est calculé comme le nombre de plantations non réussies rapporté au nombre total de plantation décrites dans la catégorie examinée. Cet indicateur est intéressant car il renseigne sur le nombre de plantations qui devront être regarnies (installation de nouveaux plants en remplacement des plants morts). Le seuil de 80 % est le seuil classiquement utilisé par les gestionnaires pour déterminer la réalisation de regarnis dans une plantation.
2. **le taux de mortalité global de plants** : Ce taux est un pourcentage calculé comme le nombre de plants morts rapporté au nombre total de plants plantés, dans la catégorie examinée. Cet indicateur renseigne plus directement sur l'intensité de la mortalité que le pourcentage de plantation réussies.
3. **le taux de reprise global des plants** : Ce taux est un pourcentage calculé comme l'inverse du taux de mortalité global de plants dans la catégorie examinée.

3.2.3 Caractérisation de l'échantillon

Le suivi porte sur 14 ans (de 2007 à 2021). Sur cette période, 12 288 plantations ont été observées. Les essences ont été réparties en six catégories :

- pin maritime ;
- douglas ;
- chêne sessile ;
- autres résineux (42 espèces) ;
- peupliers (38 cultivars + quatre «groupes») ;
- autres feuillus (48 espèces).

Les trois premières essences sont les principales essences de reboisement actuelles en France, elles représentent 70 à 80 % des plants vendus par an et 50 % des plantations observées dans le suivi DSF.

Les 12 288 plantations analysées sont ainsi réparties :

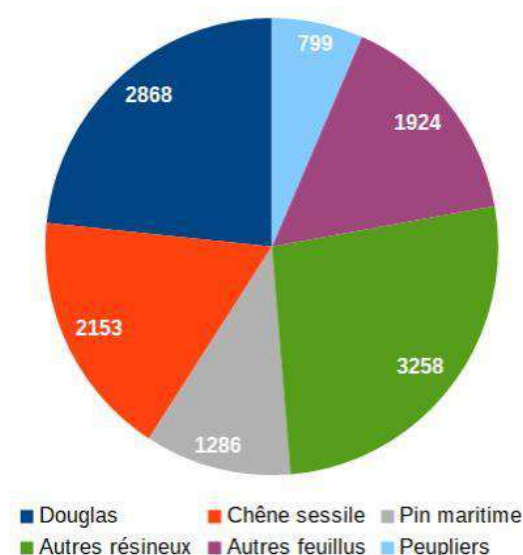


Figure 2.3-1 : Répartition par essence des peuplements observés par le DSF entre 2007 et 2021

Le détail par année est indiqué dans le tableau en Annexe 2.3-2.

Les plantations observées se ventilent selon les GRECO suivantes :

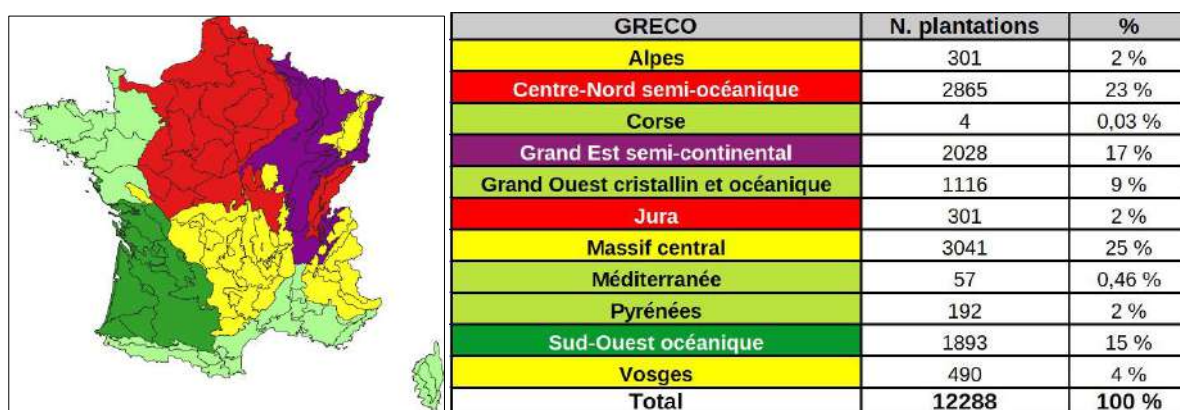


Figure 2.3-2 : Répartition par GRECO des plantations de l'année notées par le DSF (2007-2021)

Les principales modalités d'échantillonnage sont les suivantes :

- cinq plantations par correspondant-observateur en moyenne sont observées chaque année, elles sont choisies au printemps, avant la saison de végétation : les observations ne sont donc pas orientées vers des chantiers avec une problématique phytosanitaire ;
- trois à quatre plantations représentent les essences et les techniques « habituelles » du secteur d'activité du correspondant DSF ; un à deux plantations avec des essences ou des techniques moins « usuelles » (exemple : plantations de pin taeda dans le massif des Landes de Gascogne, plantations de douglas en godets dans un secteur de plantations en racines nues, etc.) ;
- ces modalités conduisent à un taux d'échantillonnage moyen est de 2/1000 plants vendus, avec des variations selon les essences (faible pour le pin maritime, fort pour le peuplier par exemple) et les régions.

Si des situations variées sont observées dans l'échantillon de plantations DSF, l'échantillonnage n'est pas pour autant représentatif des plantations en France : des écarts peuvent être observés avec les résultats des gestionnaires forestiers selon les essences, les itinéraires techniques, les régions, etc.

3.3 Réponses à la question posée

3.3.1 Reprise et mortalité globale des plants

Sur la période 2007-2021, 81,5 % des plantations observées par le DSF ont réussi et présentent un taux de reprise supérieur à 80 %. Cela correspond à un taux de mortalité de 11,6 % des plants observés.

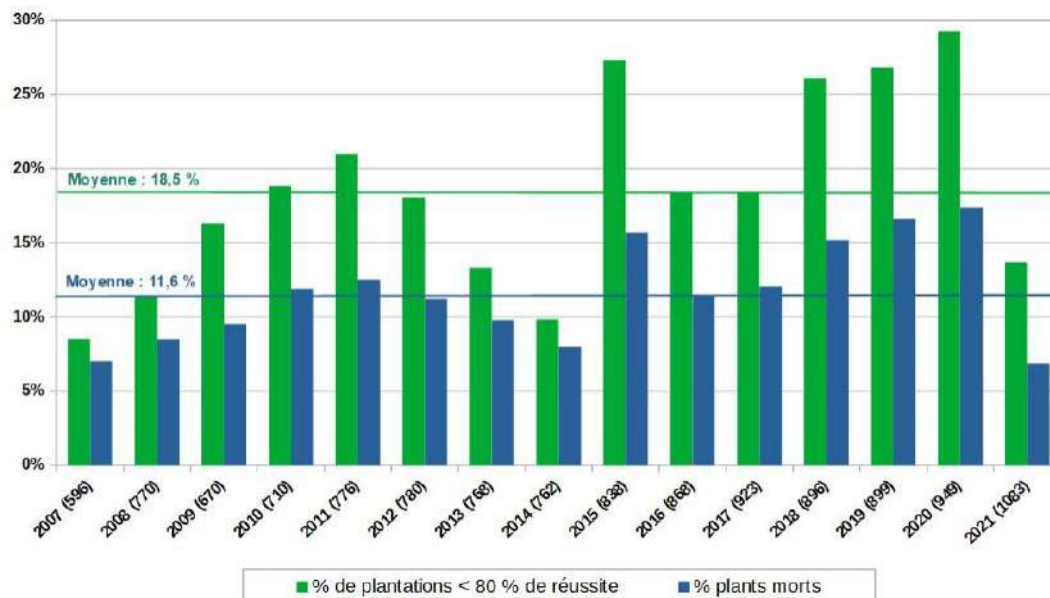


Figure 2.3-3 : Évolution du taux de plantations de l'année non réussies et du taux de mortalités des plants. Le nombre de plantations observées chaque année est indiqué entre parenthèse : observation de 12 288 plantations sur la période 2007-2021. Les moyennes calculées sur toute la période d'observation sont indiquées

On note que les années à fort déficit hydrique estival (2015 et 2018 à 2020) ressortent nettement dans la Figure 2.3-3. De la même façon, les années à été pluvieux (2013, 2014, 2021, etc.) se caractérisent par des taux d'échec nettement plus bas que la moyenne. **Il y a donc une corrélation forte entre le stress hydrique (dû à un déficit hydrique et/ou une température élevée) subi par les plants pendant la période de végétation et la reprise des plantations (Tallieu *et al.*, 2022). Si une tendance à une plus mauvaise reprise des plantations sur la période 2007-2021 était observée à partir de l'année 2018, celle-ci a été freinée en 2021 grâce à une pluviométrie plus favorable (Tallieu *et al.*, 2022).**

3.3.2 Mortalité des plants par type de dégâts

Les causes de mortalité des plants sont classées en quatre groupes : entomologique (insectes), pathologique (champignons, bactéries, etc.), animaux autres que les insectes (rongeurs, cervidés, oiseaux, etc.) et abiotique ou indéterminé.

Tableau 2.3-1 : Répartition des plants morts selon les causes de mortalité, pour chaque année, entre 2007 et 2021, toutes espèces confondues

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1
Dégât d'origine abiotique, complexe ou indéterminée	79 %	83 %	85 %	87 %	88 %	87 %	80 %	80 %	88 %	86 %	86 %	90 %	91 %	89 %	79 %
Dégât d'origine entomologique	10 %	3 %	7 %	4 %	5 %	3 %	7 %	9 %	6 %	4 %	4 %	5 %	3 %	5 %	9 %

Dégât d'origine pathologique	1 %	1 %	1 %	2 %	0 %	1 %	3 %	0 %	0 %	2 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Dégât dus à des animaux	10 %	12 %	7 %	7 %	6 %	10 %	10 %	11 %	6 %	8 %	10 %	5 %	6 %	6 %	12 %

Les mortalités sont d'origine abiotique, complexe ou indéterminée pour plus de 85 % des plants en moyenne sur la période 2007-2021, la mortalité est ensuite due aux animaux autres que les insectes (près de 8 % des plants morts), aux insectes (5 %) et enfin aux pathogènes (moins de 1 %).

Les écarts à la moyenne 2007-2021 peuvent être illustrés, mettant en avant les causes de mortalité prépondérantes chaque année (voir Figure 2.3-4). Ainsi, pour les mortalités d'origine abiotique, les années à fort déficit hydrique estival (2015 et 2018 à 2020) ou de gel hivernal (2012) ressortent ; les années avec une saison de végétation favorable (pluvieuse), comme 2013, 2014 et 2021 également.

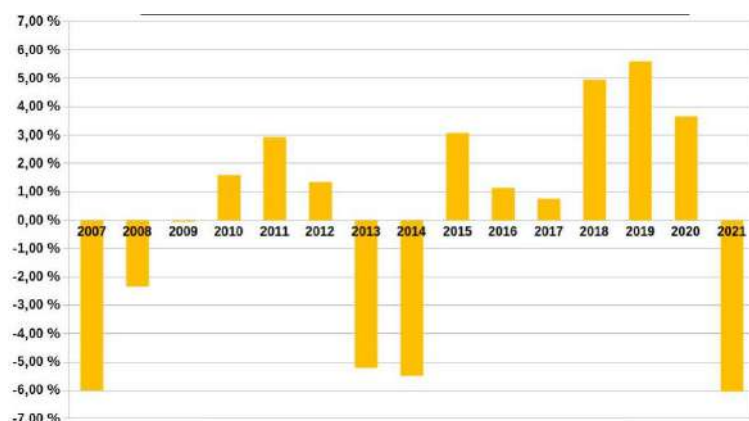


Figure 2.3-4 : Evolution du taux de mortalité abiotique, complexe ou indéterminé des plants. Écart à la moyenne 2007-2021 (moyenne = 86,5 %). Données issues des bases de données du DSF : observation de 12 288 plantations sur la période 2007-2021

3.3.3 Taux de reprise par essence ou par groupe d'essences

La Figure 2.3-5 ci-dessous illustre le taux de reprise moyen, sur la période 2007-2021, par essence ou groupe d'essences.

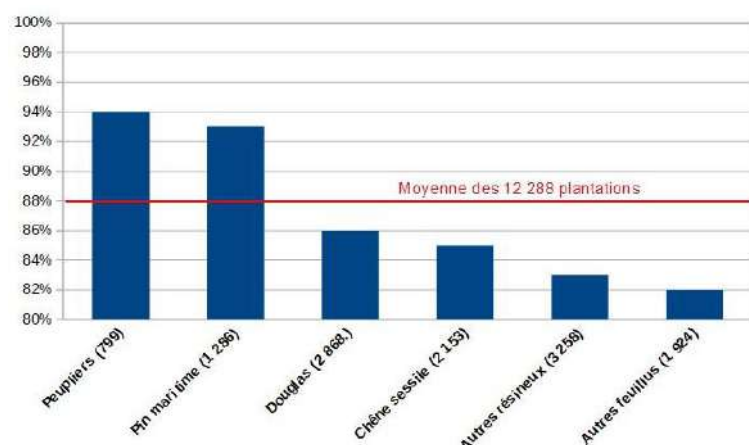


Figure 2.3-5 : Taux de reprise moyen par essence ou groupe d'essences sur la période 2007-2021. Le nombre de plantations observées pour chaque essence est indiqué entre parenthèses

Les peupliers et le pin maritime sont les deux essences qui présentent les meilleurs taux de reprise sur la période 2007-2021. Ces essences sont celles dont les itinéraires techniques de plantation sont particulièrement optimisés (milieux relativement homogènes, préparation de sol mécanique voire fertilisation, utilisation de matériel végétal amélioré génétiquement et très homogène – cultivars pour le peupliers et vergers à graines pour le pin maritime, etc.) Mais ce sont aussi celles qui ont été les

moins soumises à des sécheresses estivales exceptionnelles : climat océanique, moins touché par les canicules et les sécheresses récentes pour le pin maritime et stations alluviales pour les peupliers. Par ailleurs, le pin maritime est une essence réputée pour sa très grande robustesse (Dumas *et al.*, 2021).

Le douglas (86 %) et le chêne sessile (85 %) sont en dessous de la moyenne (88 %). Les « autres résineux », 83 % et les « autres feuillus », 82 %, ont les résultats les moins favorables, cachant une forte disparité, selon les essences, les années et les régions.

Le détail par année et par essence ou groupe d'essences est illustré dans la Figure 2.3-6 ci-dessous :

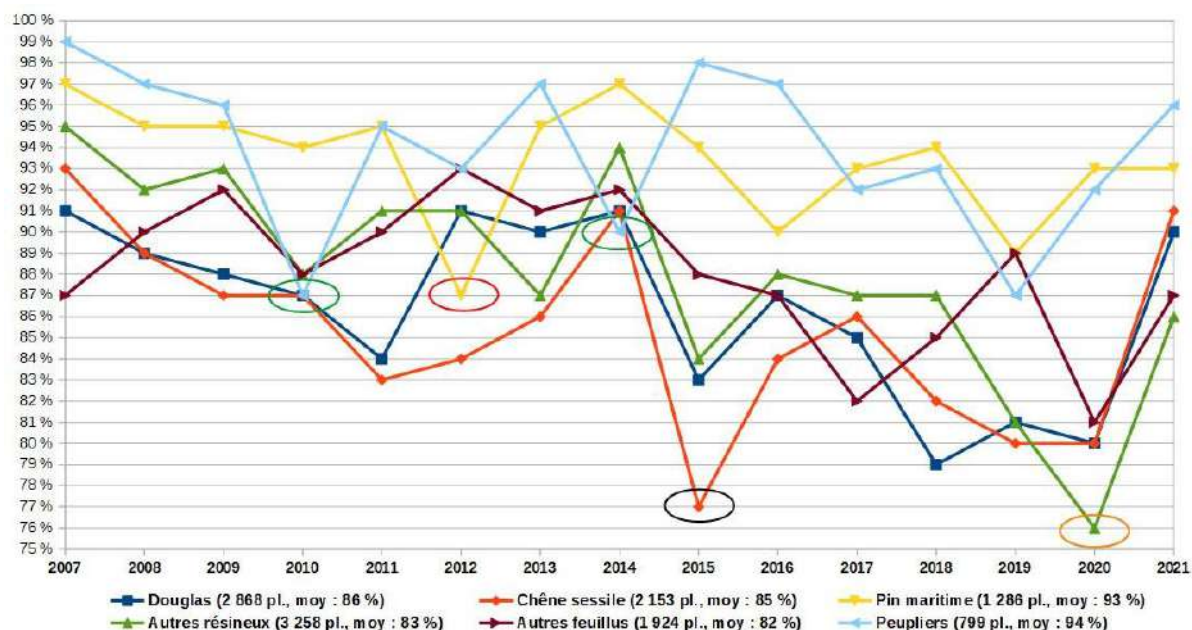


Figure 2.3-6 : Evolution du taux de reprise des plants par essence ou groupe d'essences sur la période 2007-2021. Le nombre de plantations observées et la moyenne 2007-2021 du taux de reprise pour chaque essence sont indiqués entre parenthèses

Quelques commentaires sur des taux de reprise « anormaux » :

- pin maritime, 87 % de réussite en 2012 : impact du gel de février 2012 en plantations sur des reboisements d'automne dans le Nord-Ouest ;
- peupliers, 87 % et 90 % de réussite en 2010 et 2014 respectivement : surmortalité « abiotique » des clones Brenta (une plantation avec 100 % de mortalité due à l'engorgement), Soligo en 2010 et Albelo et Raspalje en 2014 dans les plantations observées ;
- chêne sessile, 77 % de réussite en 2015 : la sécheresse estivale en 2015 fut très marquée, le chêne sessile dans le Nord-Est en a le plus souffert ;
- autres résineux, 76 % de réussite en 2020 : année de sécheresse estivale forte (12 essences en dessous de 80 % de réussite dont le pin laricio de Corse, le pin noir d'Autriche, le sapin pectiné, le mélèze d'Europe et hybride).

3.3.4 Distribution spatiale de la réussite des plantations analysées en fonction des grandes régions écologiques (GRECO)

La réussite des plantations n'est pas homogène sur le territoire national : la Figure 2.3-7 illustre le taux de reprise moyen, sur la période 2007-2021, pour ces régions écologiques. Le tableau indiquant les résultats annuels des observations par GRECO est en Annexe 2.3-3 : Taux de reprise par GRECO sur la période 2007-2021. Données issues des bases de données du DSF : observation de 12 288 plantations sur la période 2007-2021.

Annexe 2.3-3.

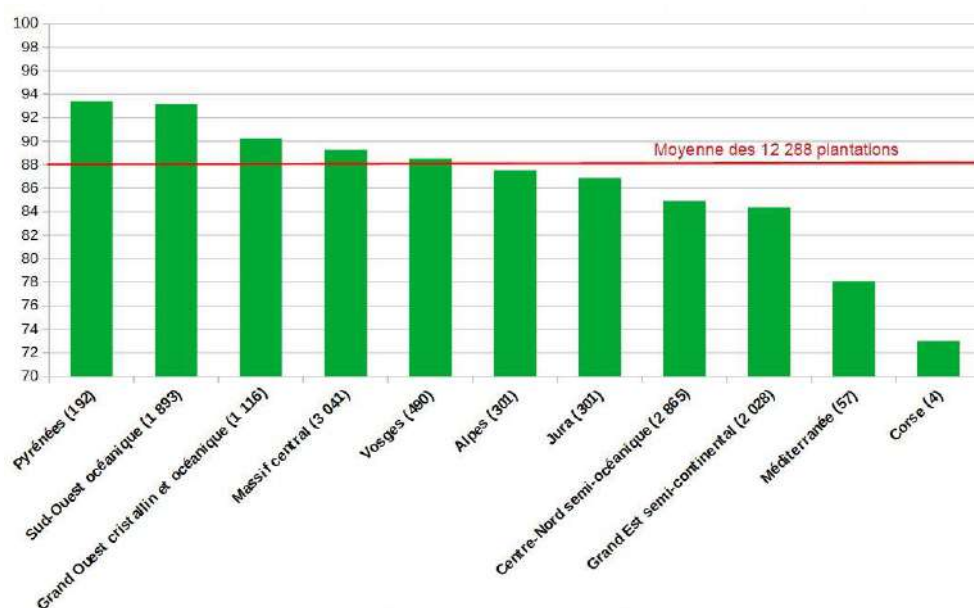


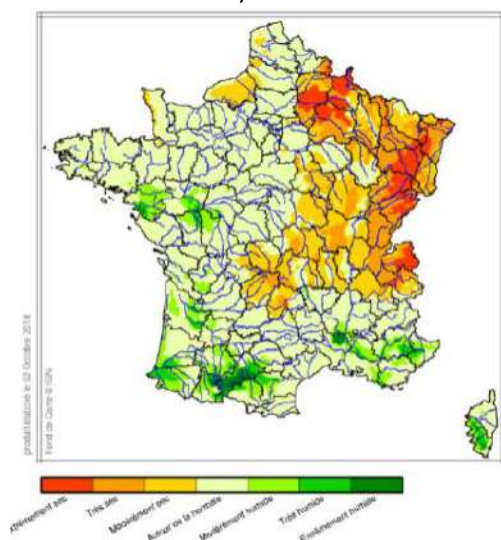
Figure 2.3-7 : Taux de reprise moyen par GRECO sur la période 2007-2021. Le nombre de plantations observées pour chaque GRECO est indiqué entre parenthèses

Les régions situées dans le sud-ouest présentent une réussite supérieure à la moyenne : Pyrénées et Sud-Ouest océanique (93 %). Le Grand-Ouest (90 %), le Massif central et les Vosges (89 %) complètent les GRECO avec une reprise supérieure à la moyenne. Cette « meilleure » réussite s’explique à la fois par l’essence plantée (le pin maritime dans le Sud-Ouest océanique bénéficie d’un itinéraire technique maîtrisé en plantation, voir « 3.3.3 Taux de reprise par essence ou par groupe d’essences ») et/ou des conditions climatiques favorables à la bonne reprise des plantations (climat océanique ou océanique dégradé).

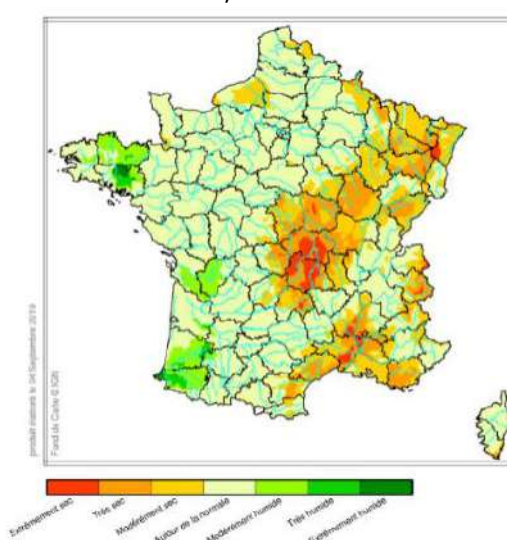
Les régions méridionales présentent les plus mauvais taux de reprise, eu égard aux conditions stationnelles et climatiques peu favorables : Méditerranée (79 %) et Corse (73 % pour quatre plantations).

Les régions Grand-Est (84 %) et Centre-Nord (85 %), ayant subi de manière sévère les sécheresses estivales des sols en 2015 et de 2018 à 2020, présentent un taux de reprise inférieur à la moyenne. Les trois cartes ci-dessous, issues des bulletins hydrologiques mensuels de Météo-France, illustrent, à titre d’exemple, l’état de sécheresse des sols lors des étés 2018, 2019 et 2020.

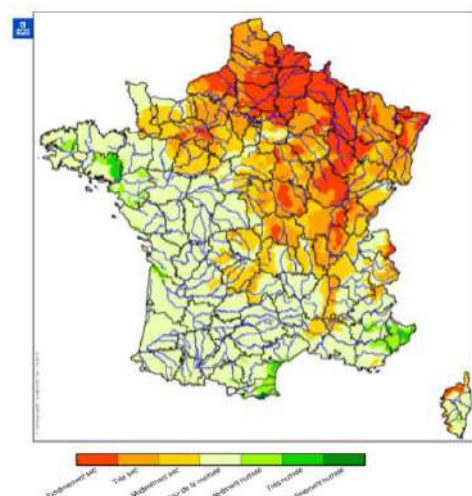
SWI 3 mois 07-08-09 / **2018**



SWI 3 mois 06-07-08 / **2019**



SWI 3 mois 06-07-08 / 2020



L'indice d'humidité des sols (S.W.I. : Soil Wetness Index) indique l'état de la réserve en eau d'un sol, par rapport à sa réserve optimale (réserve utile maximale). Quand le S.W.I. est voisin de 1, voire supérieur à 1 = le sol est humide, tend vers la saturation. Quand le S.W.I. tend vers 0, voire passe en dessous de 0, le sol est en état de stress hydrique, voire très sec.

Pour les trois cartes présentées, l'indicateur de la sécheresse des sols est calculé à partir de l'indice d'humidité des sols moyenne sur 3 mois. Cet indice de probabilité permet un classement des sols (d'extrêmement sec à extrêmement humide) par rapport aux 3 mêmes mois sur la période de référence 1981-2010.



Figure 2.3-8 : Indice de sécheresse des sols sur 3 mois en 2018, 2019 et 2020

3.3.5 Taux de reprise moyen selon le type de travaux réalisés lors de la première année de plantation

Les travaux indiqués dans les fiches-plantations sont de deux types : « préparatoires » ou « post-plantation ». Pour les premiers, ils sont regroupés en « compartiments » : travaux sur les rémanents (broyage, andainage, etc.), du sol (labour, etc.), au niveau des souches, etc.

Des combinaisons de travaux sont possibles (andainage + labour, etc.) Dans les graphiques suivants, les travaux sont présentés par type « simple », mais le taux de reprise indiqué intègre les effets combinés. Exemple : 92 % de réussite « souches » (1 090 occurrences) prend en compte les plantations qui ont bénéficié d'un travail préparatoire au niveau des souches, seul ou avec d'autres travaux.

1 - les travaux préparatoires (les travaux sont regroupés dans la Figure 2.3-9 et détaillés dans la Figure 2.3-10) :

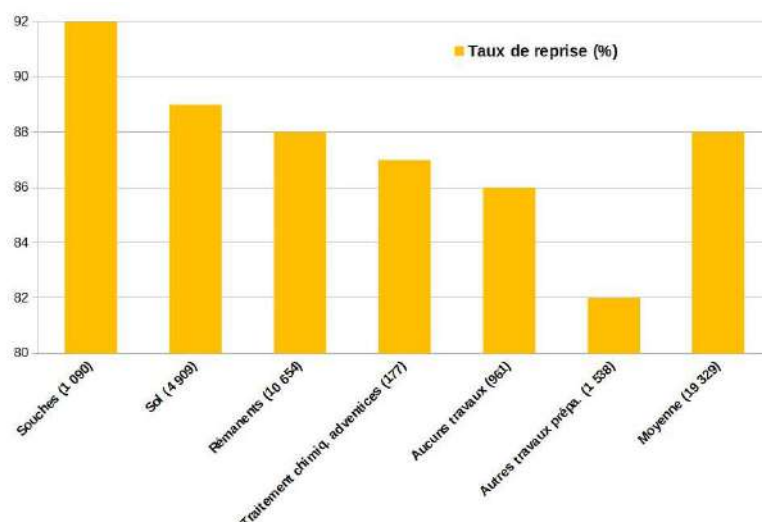


Figure 2.3-9 : Taux de reprise en fonction des travaux préparatoires à la plantation (les effectifs sont indiqués entre parenthèses après le type de travaux)

Les plantations précédées d'interventions au niveau des souches (arrachées et mises en tas ou évacuées ou arasées par un croque souche) et du sol (sous-solage, labour, potet travaillé, travail superficiel ou autres) ont une reprise supérieure à la moyenne ; celles avec des traitements des adventices, d'autres travaux et sans travaux ont une reprise inférieure (Figure 2.3-9).

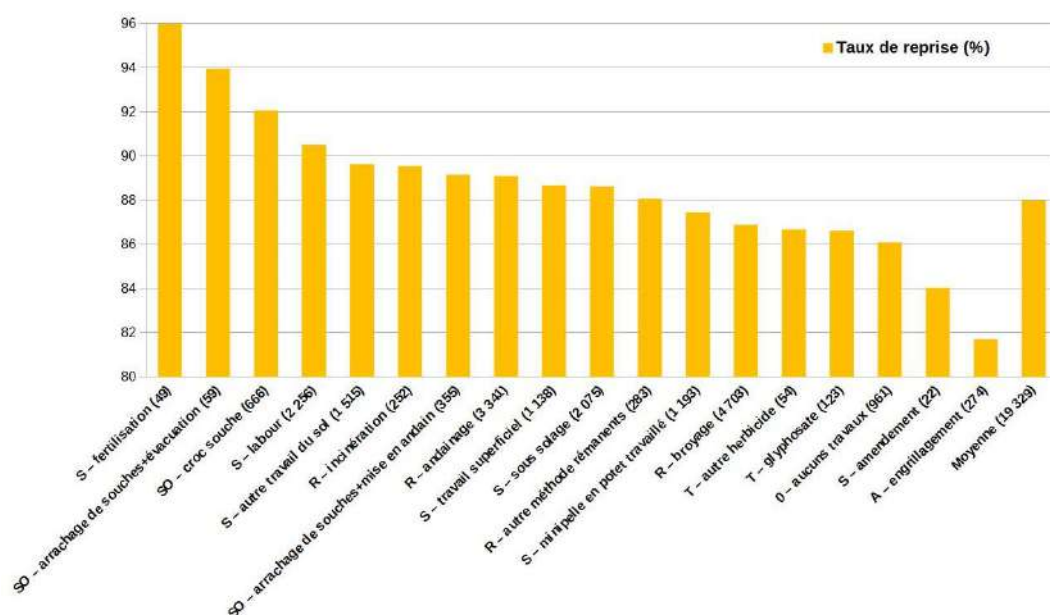


Figure 2.3-10 : Taux de reprise en fonction des travaux préparatoires à la plantation (les effectifs sont indiqués entre parenthèses après le type de travaux). R = rémanents, S = sol, SO = souches, T = traitement adventice, A = autres, O = aucuns travaux. Données issues des bases de données du DSF : observation de 12 288 plantations sur la période 2007-2021

Parmi les interventions les plus « favorables », il y a la fertilisation (qui concerne surtout le pin maritime et les peupliers qui présentent les meilleurs taux de reprise), l'arrachage et le « croquage » des souches. Les moins bons résultats sont observés dans les plantations « engrillagées » et celles « amendées » : les faibles effectifs de ces deux modalités ne permettent pas de conclure à un effet réellement défavorable de ces deux types de travaux (Figure 2.3-10).

2 - les travaux faisant suite à la plantation :

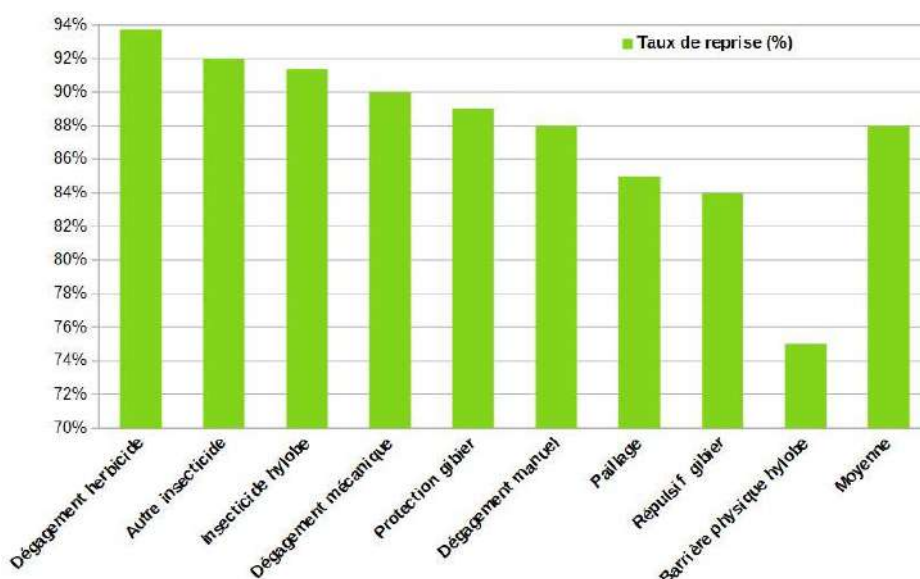


Figure 2.3-11 : Taux de reprise en fonction des travaux post-plantation. Données issues des bases de données du DSF : observation de 12 288 plantations sur la période 2007-2021

Toutes les interventions avec des produits phytopharmaceutiques améliorent la reprise des plantations : les dégagements avec herbicides (94 %), le traitement contre l'hylobe (91 %) ainsi que les autres traitements insecticides (92 %). Les moins bons résultats sont observés dans les plantations protégées par des barrières physiques contre l'hylobe (75 % de réussite), des répulsifs à gibier (84 %) et avec du paillage (85 %). Les autres travaux post-plantation (dégagement manuel ou mécanique et protection individuelle contre le gibier) sont observés dans des plantations présentant un taux de reprise proche de la moyenne.

3.3.6 Conclusions

Tableau 2.3-2 : Synthèse de quelques critères de réussite des plantations DSF. Données issues des bases de données du DSF : observation de 12 288 plantations sur la période 2007-2021

	Favorables	Neutres ($\pm 2\%$ / moyenne)	Défavorables
Essences	Pin maritime, peupliers	Douglas	Chêne sessile, autres feuillus et résineux
GRECO	Sud-ouest océanique, Pyrénées, Grand-ouest cristallin et océanique	Massif central, Vosges, Alpes, Jura	Méditerranée, Corse, Grand-est semi-continental, Centre-nord semi-océanique
Travaux préparatoires	Arrachage des souches et évacuation, croque-souche, fertilisation, labour	Andainage, incinération, arrachage souches et mise en andains, broyage, travail superficiel, sous-solage, potet mini-pelle, herbicides	Aucuns travaux, amendement, engrillagement
Travaux post-plantation	Dégagement herbicide, insecticide contre l'hylobe, autre insecticide	Dégagement mécanique ou manuel, protection individuelle gibier	Barrières physiques hylobe, répulsif à gibier, paillage

Les principaux facteurs de réussite des plantations qui ressortent des observations de ce suivi DSF sont donc liés à l'essence plantée, au contexte « stationnel » au sens large (GRECO) et aux types de travaux effectués. Certains travaux sont favorables à une bonne reprise des plantations lorsqu'ils améliorent l'alimentation hydrique et minérale des plants (labour, fertilisation), limitent la concurrence de la végétation (dégagement) et les dégâts des bioagresseurs comme l'hylobe ou grand charançon du pin (arrachage ou destruction des souches, traitement insecticide). Les facteurs pris en compte ne sont pas exhaustifs et les interactions difficiles à analyser (essences vs itinéraires techniques par exemple) ne permettent pas d'établir des conclusions plus précises à l'issue de cette évaluation.

Cette base de données établie sur 14 années (2007-2021) a été utilisée dans le cadre d'une étude intitulée « Conception d'indices météorologiques pour prendre en compte le risque de sécheresse estivale dans la garantie de reprise des plantations » dont le rapport a été publié en octobre 2022 (Tallieu *et al.*, 2022). Les conclusions de cette étude indiquent que la mortalité abiotique des plants est dépendante de l'essence considérée, certaines étant plus vulnérables que d'autres aux aléas de sécheresse. Elle a également permis d'identifier deux variables météorologiques qui expliquent les mortalités de plants : un indice lié aux précipitations et un indice de sécheresse des sols, calculés au cours des trois mois d'été (juin, juillet et août). Cet indice de sécheresse des sols (SSWI) est illustré dans la Figure 2.3-8.

3.4 Perspectives

La présente contribution montre l'intérêt de mener des observations dans les plantations lors de leur première saison de végétation, dont la reprise est variable selon les années, les essences, les régions, les itinéraires techniques, etc. et de chercher à identifier les causes de mortalités.

La base de données « plantations de l'année du DSF », ouverte et disponible sur demande, peut également être utile dans le cadre d'études plus ciblées. Elle a d'ores-et-déjà servi pour les études suivantes : « Évaluation et perspectives de développement des plantations de douglas en conteneurs de 300 cc et moins » (Girard *et al.*, 2019), « Écologie, monitoring et étude du comportement de l'hylobe en milieu forestier » (Bakouri, 2020), « Projet REPLANT-CLIC » (Tallieu *et al.*, 2022, voir 3.3.6) et « Types de plants de cèdre pour une utilisation hors zone méditerranéenne » (Institut pour le Développement Forestier, en cours).

Si les mortalités en plantation peuvent être d'origine biotique (voir Volet 2, Thème 3, « Question 1. Identifier les principaux pathogènes et ravageurs qui menacent le renouvellement des peuplements forestiers pour prévenir et limiter leur impact »), la mortalité est principalement d'origine abiotique (pour 85 % des cas dont plus de la moitié à cause des sécheresses estivales). Ainsi, dans la perspective des évolutions climatiques déjà observées sur le terrain (chaleur et sécheresses estivales récurrentes), la bonne réussite des plantations doit passer par une réflexion approfondie sur les itinéraires techniques. Au-delà des facteurs habituels (choix des essences, les provenances, types de plants, travaux, etc.), d'autres paramètres seraient à étudier ou à expérimenter : la taille des parcelles reboisées, leur orientation, le maintien éventuel d'un couvert léger sous forme de bouquets ou d'arbres isolés, la plantation dans le recrû, le mélange des essences, la mycorhization des plants avec des espèces de champignons « économiseurs » d'eau, la profondeur de plantation, apport d'hydro-rétenteurs dans le trou de plantation, la fréquence et l'intensité des entretiens, etc.

À l'initiative des acteurs concernés, un suivi à court-moyen terme de la qualité des plantations pourrait être envisagé, par un retour sur certaines plantations dans un délai de 3 à 5 ans suivant la notation initiale par exemple.

3.5 Références bibliographiques

- Bakouri, K., 2020. Écologie, monitoring et étude du comportement d'*Hylobius abietis* en milieu forestier (Mémoire de fin d'études d'ingénieur). Bordeaux Sciences Agro.
- Dumas, N., Dassot, M., Pitaud, J., Piat, J., Arnaudet, L., Richter, C., Collet, C., 2021. Four-year-performance of oak and pine seedlings following mechanical site preparation with lightweight excavators. *Silva Fennica* 55, 24. <https://doi.org/10.14214/sf.10409>
- Girard, S., Veuillen, L., Chaumet, M., Thivolle-Cazat, A., 2019. Évaluation et perspectives de développement des plantations de douglas réalisées avec des plants élevés dans des conteneurs inférieurs à 300cc - Rapport final de la convention n° E17/2018 Passée entre le Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, le CNPF (IDF) et FCBA.
- Ministère de l'Agriculture - DGAL (Ed.), 2017. Dispositif national de surveillance de la santé des forêts.
- Tallieu, C., Collet, C., Renaud, J.-P., Pitaud, J., 2022. Conception d'indices météorologiques pour prendre en compte le risque de sécheresse estivale dans la garantie de reprise des plantations. Rapport du programme « Reprise des plantations en climat changeant (REPLANTCLIC) » 71.

3.6 Annexes

Annexe 2.3-1 : Fiche d'observation du DSF



MINISTÈRE
DE L'AGRICULTURE
ET DE
L'ALIMENTATION

DÉPARTEMENT DE LA SANTÉ DES FORÊTS

Fiche d'observation
Suivi plantation
Notation de printemps / notation d'automne*



Mai 2018 – V. définitive

Code CO	Date d'observation	Numéro de fiche
----------------	---------------------------	------------------------

LOCALISATION	RELEVÉ AU GPS	OUI / NON *	RÉFÉRENTIEL
	X RÉFÉRENTIEL (OU LONGITUDE)*	Est / Ouest	Y RÉFÉRENTIEL (OU LATITUDE)* Nord
	DÉPARTEMENT – COMMUNE		
	PROPRIÉTÉ FORÊT DOMANIALE / AUTRE FORÊT PUBLIQUE / FORÊT PRIVÉE OU AUTRE PROPRIÉTÉ *		

ANNEE DE L'EXPLOITATION	<i>(BTA Si non boisé)</i>	ESSENCE EXPLOITÉE
TRAVAUX PREPARATOIRES 1		TRAVAUX PREPARATOIRES 2
ESSENCE DOMINANTE		MOIS ET ANNEE DE LA PLANTATION
TRAVAUX POST PLANTATION 1		TRAVAUX POST PLANTATION 2

ESSENCE CONCERNEE	Racine nue / godet ou motte **	NOMBRE D'ÉCHANTILLONS
TYPE DE PLANTS	plançon *	NOMBRE ESTIME DE PLANTS ABSENTS

(*) : rayer la mention inutile
(**) : godet ou motte : 4 volumes : G 100, G 200, G 300 ou G 400 cm³

OBSERVATION DE 100 PLANTS
(ou moins de 100 plants s'il y a des plants estimés absents)

ESSENCE OBSERVÉE	AUTRES PROBLÈMES	CODE	PLANTS ATTEINTS PAR LE PROBLÈME MAIS VIVANTS	PLANTS MORTS <i>(ne renseigner que la cause principale de la mortalité)</i>	NOMBRE ÉCHANTILLONS
TOUTES	Défoliateurs				
	Rongeurs				
	Gibier				
	Autre insecte ou champignon déterminé				
	Cause inexpliquée, abiotique (sécheresse...) ou anthropique (qualité des plants, de plantation...)				

Annexe 2.3-2 : Répartition annuelle par essence ou groupe d'essence des plantations observées par le DSF entre 2007 et 2021

Années	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	TOTAL
Douglas	111	143	132	142	172	181	182	188	232	218	230	235	230	223	249	2 868
Chêne sessile	83	143	136	140	142	147	135	149	114	143	159	164	154	150	194	2 153
Pin maritime	52	49	61	68	87	70	82	82	94	89	107	109	113	106	117	1 286
Autres résineux	174	192	169	188	184	173	185	203	233	264	250	218	237	268	320	3 258
Autres feuillus	142	195	136	128	132	142	140	90	120	104	120	106	115	102	152	1 924
Peupliers	34	48	36	44	59	67	44	50	45	50	57	64	50	100	51	799
TOTAL	596	770	670	710	776	780	768	762	838	868	923	896	899	949	1 083	12 288

Annexe 2.3-3 : Taux de reprise par GRECO sur la période 2007-2021. Données issues des bases de données du DSF : observation de 12 288 plantations sur la période 2007-2021

GRECO	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Moyenne (%)
Alpes (301 pl.)	94	91	94	84	77	80	93	95	80	89	76	89	90	83	92	88
Centre-Nord semi-océanique (2 865 plant.)	93	89	88	86	80	86	87	91	79	84	88	82	78	78	89	85
Corse (4 plant.)		92	67													73
Grand Est semi-continental (2 028 plant.)	92	92	93	88	90	90	88	87	75	87	85	78	73	73	89	84
Grand Ouest cristallin et océanique (1 116 plant.)	91	93	93	85	89	94	89	92	90	89	90	86	91	92	91	90
Jura (301 plant.)	93	93	89	90	89	91	92	95	72	92	89	79	88	75	89	87
Massif central (3 041 plant.)	94	91	90	89	89	90	92	92	86	91	89	86	87	86	91	89
Méditerranée (57 plant.)	80	82	91	99	94	74				70	49	83	58	98	80	78
Pyrénées (192 plant.)	96	95	94	78	88	96	97	96	98	96	88	83	97	96	96	93
Sud-Ouest océanique (1 893 plant.)	97	95	94	94	93	88	94	96	94	93	93	93	91	91	94	93
Vosges (490 plant.)	90	92	93	96	91	90	88	92	86	90	79	81	83	85	86	89
Moyenne (%)	93	91	91	88	87	89	90	92	84	89	88	85	83	83	90	88

Volet 2 | Thème 2. Facteurs de réussite des renouvellements forestiers

Question 4. Comment limiter le stress de transplantation pour assurer l'installation des plants en contexte de changement climatique ?

Sommaire

4.1 Contexte et problématique	636
4.2 Matériel et méthodes	638
4.3 Le projet de plantation	638
4.4 Caractérisation du stress de transplantation	639
4.5 Réponses à la question posée	640
4.5.1 Quel choix d'essence/provenance adapté au contexte de plantation ?	640
4.5.2 Godet ou racines nues : quels sont les avantages et inconvénients ?.....	641
4.5.3 Quels critères de qualité et de robustesse des plants et quelles opérations de culture permettent de limiter le stress de transplantation ?	642
4.5.4 De la pépinière à la mise en terre : comment assurer le transport et le stockage ?	645
4.5.5 Quel rôle peuvent jouer les travaux de préparation avant plantation ?	645
4.5.6 Quels outils pour améliorer la reprise dans des conditions de déficit hydrique accru ?.....	646
4.5.7 Quel rôle peut jouer le couvert végétal ?	648
4.6 Besoins de recherche	648
4.7 Références bibliographiques	650

Rédacteurs

Vincent **Boulanger**, Office national des forêts, Recherche développement innovation, Fontainebleau (77), France

Stéphane **Brault**, Office national des forêts, Recherche développement et innovation, Fontainebleau (77), France

Laurent **Lelasseur**, Office national des forêts, Recherche développement et innovation, Fontainebleau (77), France

Malaurie **Puyal**, Office national des forêts, Recherche développement et innovation, Fontainebleau (77), France

Jonathan **Pitaud**, Office national des forêts, Recherche développement innovation, Champenoux (54), France

Catherine **Collet**, Université de Lorraine, AgroParisTech, INRAE, UMR Silva, Nancy (54), France

Sabine **Girard**, CNPF-IDF, Lyon (69), France

4.1 Contexte et problématique

En France métropolitaine, la plantation forestière concerne environ 40 000 ha chaque année, en moyenne sur la période 2005-2020 (voir Volet 2, Thème 1, « Question 1. Quelle est l'évolution des ventes de plants forestiers et des surfaces plantées en France depuis 30 ans ? ») et permet de répondre à différents enjeux. Elle est indispensable pour restaurer les peuplements partiellement ou totalement endommagés dont les arbres ne produisent plus les graines requises pour assurer la régénération naturelle. Elle est également incontournable quand il s'agit d'afforester une ancienne parcelle agricole. Elle permet enfin d'engager des changements d'essences qui peuvent s'avérer nécessaires pour adapter la forêt au changement climatique. Elle contribue ainsi à assurer la pérennité de l'approvisionnement des industries du bois, notamment en produits issus de la ressource résineuse. Les scénarios prospectifs prévoient une augmentation significative des surfaces plantées dans les décennies à venir, en France et dans le monde (Ginisty *et al.*, 2020 ; Payn *et al.*, 2015), que ces

plantations soient réalisées dans des objectifs de production de bois ou de conservation des écosystèmes forestiers.

Sur la période 2007-2020, 60 millions de plants ont été vendus en moyenne chaque année, (voir Volet 2, Thème 1, « Question 1. Quelle est l'évolution des ventes de plants forestiers et des surfaces plantées en France depuis 30 ans ? ») et, selon l'enquête annuelle de plantation menée par le DSF depuis 2007 (voir « Question 3. Quelle a été l'évolution des taux de succès des plantations de l'année au cours des quinze dernières années ? »), environ 12 % des plants plantés sont morts au cours de leur première année. Nous ne disposons pas d'estimation à l'échelle nationale de la mortalité des plants au-delà de la première saison de végétation, mais les études ponctuelles s'accordent sur une tendance générale caractérisée par une mortalité qui peut être élevée en première saison et qui décroît progressivement dans les années qui suivent (del Campo *et al.*, 2021 ; Vyse, 1981). Outre le fait qu'elle est plus forte, la mortalité en première année semble plus idiosyncratique que la mortalité des années suivantes (Dumas *et al.*, 2021). Alors que la mortalité après quelques années (4 à 10 ans) est déterminée par des facteurs dont les variations sont tendanciellées sur le long terme comme le climat local, la fertilité du sol ou les densités locales d'ongulés (Cole *et al.*, 2018 ; Dumas *et al.*, 2021 ; Sikström *et al.*, 2020), les causes de la mortalité de première année sont liées à des événements ponctuels difficiles à prédire comme la météo de l'année ou les attaques biotiques, le risque de mortalité étant accru par l'inadéquation des plants au site de plantation ou un itinéraire technique inadapté (del Campo *et al.*, 2021 ; Margolis *et Brand*, 1990).

Lors de la plantation, les plants qui ont été élevés dans les conditions très favorables de la pépinière, sont transplantés dans un milieu bien moins propice à leur développement et auquel ils doivent s'adapter. La transplantation constitue un stress que le plant doit surmonter rapidement pour survivre au-delà de quelques semaines ou quelques mois (Grossnickle, 2012, 2005). Par ailleurs, en gestion courante, la première année se distingue des années suivantes car elle fait généralement l'objet d'une garantie de la part du reboiseur, qui s'engage alors à assurer le remplacement des plants morts dans les cas où la survie des plants est inférieure à 80 % en fin de saison de végétation (Ministère de l'urbanisme des logements et du transport *et al.*, 2012). En deçà de ce seuil, la plantation est considérée comme ayant échoué et cet échec est alors imputé aux choix techniques des opérateurs. Ces choix techniques, qui comprennent l'essence de plantation, le type de plants, les conditions de transport et de stockage des plants et l'itinéraire technique de plantation, doivent être raisonnés pour réduire l'impact des différents facteurs de mortalité. Des erreurs dans ces choix techniques peuvent conduire à une augmentation du stress de transplantation et un échec du projet de plantation.

L'enquête annuelle de plantation du DSF montre une augmentation des échecs de plantation les années caractérisées par des printemps et des étés secs. De façon similaire, les études réalisées dans les régions d'Europe méridionale font état de difficultés de plantation bien plus marquées qu'en zone tempérée (del Campo *et al.*, 2020; Rey Benayas *et al.*, 2015). Les scénarios climatiques pour les décennies à venir augurent de difficultés croissantes pour les planteurs forestiers et, pour assurer le succès des plantations dans un contexte de contraintes vraisemblablement accrues et multiples, il est nécessaire de développer des méthodes qui permettent de réduire le stress de transplantation.

L'objectif de cette synthèse est d'analyser les facteurs à l'origine du stress de transplantation et d'identifier les leviers techniques permettant aux plants de surmonter ce stress et donc d'améliorer la reprise des plants et leur survie au cours de la première année. En premier lieu, nous positionnerons la phase de transplantation dans le projet de plantation complet, nous caractériserons le stress de transplantation, puis nous analyserons les différentes méthodes envisagées pour améliorer la reprise des plants et nous dégagerons des pistes de recherche.

4.2 Matériel et méthodes

Étant donné l'étendue de la question posée, cette synthèse prend la forme d'une revue narrative. Elle fait un bilan des connaissances à partir d'une sélection de publications, et propose de nouvelles pistes de recherche. Les publications sélectionnées concernent majoritairement les forêts tempérées et autant que possible des synthèses d'études ponctuelles et articles de position.

4.3 Le projet de plantation

L'opération de plantation est un projet que les sylviculteurs anticipent plusieurs mois avant l'étape ultime de mise en terre des plants (Bastard *et al.*, 2018 ; Faure *et al.*, 2014). Le diagnostic initial des caractéristiques du site va permettre au forestier d'évaluer l'opportunité de reboisement, de choisir l'essence de reboisement, et de déterminer les travaux nécessaires. Le choix et la qualité de réalisation des travaux préparatoires à la plantation va agir directement sur les contraintes et atouts pour l'accueil des plants mis en terre. La préparation mécanisée des sols préalable à la plantation n'est pas obligatoire mais elle devient souvent incontournable pour décompacter un sol tassé par suite d'opérations de récolte des bois ou réduire une végétation concurrente ; or son efficacité dépend du respect d'un cahier des charges en partie contingent aux conditions climatiques, imposant alors une contrainte organisationnelle forte sur les opérateurs.

Hormis dans le système de gestion « coupe-rase-plantation », les plantations sont par construction ciblées sur les zones difficiles. Elles interviennent couramment suite à un échec de régénération naturelle, qui reflète des conditions locales globalement défavorables au développement des jeunes arbres. Un autre cas de figure est le changement d'essence par plantation appliqué aux peuplements considérés comme vulnérables ou la restauration des peuplements dépérissants. Ces peuplements se trouvent eux aussi sur stations contraignantes. Les chantiers de plantation concernent donc une proportion plus forte de contextes de contraintes marquées (régime hydrique, caractéristiques physico-chimiques des sols, exposition aux sécheresses, pression des ongulés), contraintes qui, en outre, sont généralement exacerbées par les changements climatiques.

Depuis leur milieu de culture en pépinière jusqu'à la mise en terre sur la parcelle cible, les plants vont suivre une chaîne de transplantation, dont chacune des étapes constitue un risque en cela qu'elle place les plants en dehors de leurs conditions optimales de vie et peut porter atteinte à leur intégrité structurelle et fonctionnelle. Cette chaîne de transplantation (depuis leur milieu d'élevage jusqu'au site de plantation) joue un rôle critique dans l'assurance pour le forestier de planter des plants dans le meilleur état physiologique possible afin de maximiser leur potentiel de reprise. Les contraintes que les étapes de transport et stockage font peser sur les plants sont liées à leur temporalité (durée plus ou moins longue) et aux conditions physiques dans lesquelles elles se déroulent. Ainsi, la maîtrise des conditions de transport et la disponibilité des personnels à réception des plants pour leur mise en jauge (racines nues) ou entreposage sous aspersion (godets) est un point clé, d'autant plus critique avec les dérèglements climatiques qui provoquent chaleurs précoces ou gels tardifs.

Enfin, la réussite des plantations est de plus en plus fréquemment scrutée sous l'angle socio-économique. Les attentes sociétales sur la restauration des écosystèmes forestiers après dégradation s'expriment plus librement à travers des groupes d'opinion et d'utilisateurs ; ce n'est plus seulement la durabilité du système de production de bois qui est attendue, mais un ensemble de services écosystémiques (paysages, protection de la qualité de l'air et de l'eau, biodiversité). Le niveau de ces attentes contraste avec la situation des forces vives à même de mettre en œuvre l'ensemble de la chaîne de transplantation, faisant face à une pénurie de personnel et obligeant à une meilleure performance et efficacité. Enfin, le modèle économique d'une plantation forestière est généralement basé sur le réinvestissement d'une part des recettes issues de la récolte, et ne laisse donc que peu de

possibilités pour financer des travaux correctifs en cas d'échec. Les subventions – publiques ou privées – permettent d'assouplir ce modèle économique pour le propriétaire ; toutefois les bailleurs de fonds seront aussi attentifs à la performance des plantations subventionnées, notamment à travers des critères de réussite et obligent donc à envisager la manière de limiter le stress de transplantation pour améliorer la reprise et la croissance des plants.

4.4 Caractérisation du stress de transplantation

De manière générale, le stress de transplantation est un phénomène délétère pour l'implantation d'un jeune arbre nouvellement planté (Grossnickle, 2016). Il résulte de changements dans son environnement (depuis la pépinière jusqu'au site d'implantation définitif) qui ont des impacts sur sa physiologie : absorption-transport-transpiration d'eau et photosynthèse. Le plant est extrait d'un milieu de culture conçu (substrat de culture dans un godet) ou travaillé (terre ameublie pour les plants de pleine terre conditionnés en racines nues) pour optimiser son développement initial, puis installé dans un environnement dont les caractéristiques (humidité, température, nutriments) ne sont plus contrôlées et donc susceptibles d'être moins favorables à son fonctionnement physiologique.

Lorsque les plants sont plantés dans des conditions de sol bien alimenté en eau et présentant une faible évapotranspiration, le système racinaire existant suffit à absorber l'eau nécessaire au fonctionnement de l'appareil aérien et à sa transpiration (Simpson et Ritchie, 1997). Le plant est alors fonctionnel et peut ainsi réparer (dans le cas des plants à racines nues) et développer son appareil racinaire dans un premier temps, puis son appareil aérien.

Le stress de transplantation apparaît dès l'instant que les plants ne sont pas totalement intégrés dans le cycle hydrique par lequel l'eau précipitée au sol circule dans les particules de sol (organiques et minérales), est absorbée par les racines du plant puis transpirée par l'appareil aérien (Grossnickle, 2005). Ce sont donc les altérations de la circulation de l'eau dans le continuum sol-plante-atmosphère, voire sol-mycorhize-plante-atmosphère (Rincón *et al.*, 2007) qui génèrent une situation de stress chez le plant. Cette altération peut être plus marquée lorsque les réserves glucidiques du plant ont été fortement altérées (Guehl *et al.*, 1993 ; Puttonen, 1986). Pour le plant, le stress de transplantation se définit comme l'écart de son fonctionnement physiologique par rapport à un fonctionnement optimal.

L'eau apparaît comme la variable déterminant au premier ordre la physiologie du plant et donc le stress de transplantation (Jacobs *et al.*, 2009 ; Rolando *et al.*, 2011, voir Figure 2.4-1) ; la principale cause de mort des plants semble être le dessèchement (voir « Question 3. Quelle a été l'évolution des taux de succès des plantations de l'année au cours des quinze dernières années ? »). Les manifestations extérieures sont généralement des signes de dessiccation des tiges, feuilles ou bourgeons. Elles ont pour conséquence une moindre photosynthèse, et donc une croissance réduite. Un stress intense ou prolongé peut conduire à l'arrêt complet des fonctions physiologiques, la destruction des tissus et entraîner la mort du plant. De manière plus ponctuelle, des déficits en éléments minéraux ou, *a contrario*, la présence d'éléments phytotoxiques (dans le sol ou l'atmosphère) peuvent altérer le fonctionnement physiologique du plant et engendrer un stress.

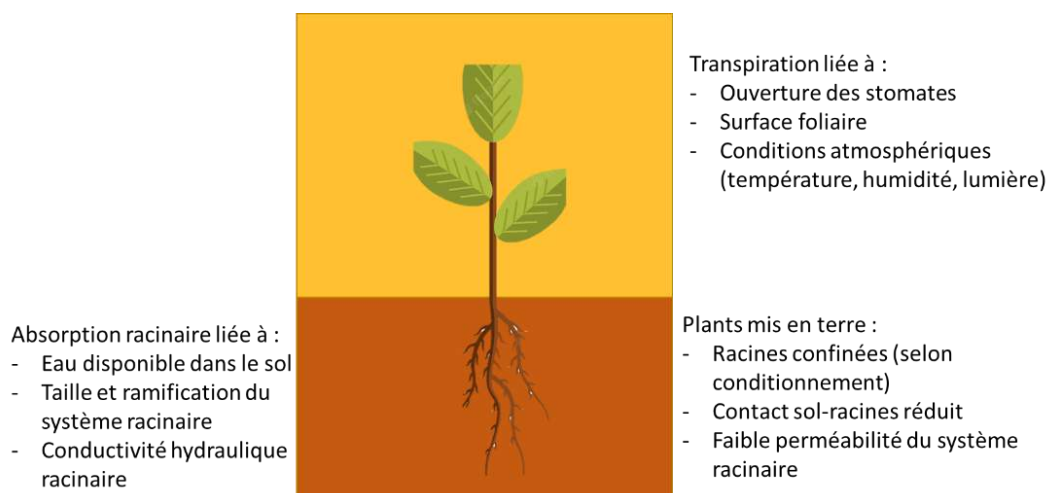


Figure 2.4-1 : Variables déterminant le stress de transplantation pour un plant forestier, d'après Grossnickle (2016)

4.5 Réponses à la question posée

4.5.1 Quel choix d'essence/provenance adapté au contexte de plantation ?

Empiriquement ou sur la base des outils formels qu'étaient les catalogues de stations, le choix de l'essence plantée se base sur des éléments de son autécologie (climat, sol). Le respect de cette adéquation essence-station permet *a minima* d'éviter les écueils en écartant les incompatibilités connues. Les choix ne se sont pas systématiquement portés sur la meilleure adéquation essence station, il s'agit plus vraisemblablement d'un choix opérationnel qui prend aussi en compte l'ensemble des services attendus de l'essence : récolte de bois et rentabilité d'itinéraire, rôle de stabilisation des terrains, etc. (Faure *et al.*, 2014). La disponibilité des plants constitue un élément pragmatique dans le choix de l'essence.

Désormais, les scénarios de changement climatique annoncés posent des défis à différents horizons temporels pour les projets de plantation. Les outils que sont les modèles de compatibilité climatique et leurs projections à moyen terme selon différents scénarios climatiques (à l'instar de l'outil sylvo-climatique ClimeSSences⁴²³, ONF et CNPF, 2021) permettent d'appréhender les effets de ces évolutions tendanciennes moyennes, ceci à des échelles territoriales plus ou moins grandes. Ainsi, ces outils permettent sinon d'identifier les essences bien adaptées, *a minima* de cibler les essences qui ne seront *a priori* plus compatibles avec les conditions climatiques attendues pour leur âge adulte. Par ailleurs, les accidents climatiques, plus fréquents et plus intenses, constituent des contraintes que doivent surmonter les jeunes arbres plantés, et qui accroissent le stress de transplantation dès à présent. Il s'agit donc ici d'appréhender la niche climatique juvénile des arbres (Ghosh *et al.*, 2016; Koide *et al.*, 2016), et surtout leurs seuils de tolérance aux événements extrêmes, afin d'identifier les essences ou provenances les plus à même de supporter un stress de transplantation accru par des accidents météorologiques. Les travaux menés dans le cadre du projet Replant-CLIC (Tallieu *et al.*, 2022) ont mis en évidence que le comportement des essences au stade juvénile, au niveau de leur résistance à la sécheresse, peut différer par rapport à leur niche écologique générale, définie d'après la répartition des populations d'arbres. Le défi vise donc à identifier des essences non seulement mieux adaptées au stade adulte afin que les peuplements fournissent les services écosystémiques attendus, mais aussi

⁴²³ Accessible ici : <https://climeSSences.fr/>

celles dont le comportement juvénile s'avère suffisamment robuste pour leur assurer résistance et résilience aux contraintes environnementales du lieu et moment de leur implantation.

4.5.2 Godet ou racines nues : quels sont les avantages et inconvénients ?

Deux conditionnements de plants sont proposés pour les plants forestiers, selon leur méthode d'élevage. Les plants élevés en pleine terre sont livrés « racines nues » après arrachage. Les plants élevés hors sol sont livrés avec la motte de substrat dans lequel ils ont germé et été élevés ; l'appellation plant « en godet » peut être considérée comme générique, elle comprend les plants élevés en conteneurs (individuels ou en plaques alvéolées) et les « plants en motte », élevés sans contenant mais directement dans des plaques d'un mélange tourbe-écorce-vermiculite. La production de plants en godets présente surtout les avantages d'un élevage réalisé en conditions contrôlées : rapidité de germination et croissance, uniformité, souplesse dans la saison de plantation (Aung *et al.*, 2019 ; Stein *et al.*, 1975). Dans une revue très détaillée, Grossnickle *et al.* (2016) ont synthétisé les résultats publiés sur la performance respective des deux conditionnements, tant pour l'élevage en pépinière que pour la reprise après plantation. Il ressort de cette synthèse que les plants en racines nues sont généralement plus grands que ceux en godet, en raison d'un élevage à plus faible densité et sur une durée plus longue (donc plus âgés). Les plants en godet présentent un rapport biomasse de tige/biomasse de racine plus faible et un système racinaire mieux ramifié (et non affecté par l'arrachage) leur conférant *a priori* un meilleur potentiel de croissance racinaire et par là même une meilleure résistance aux épisodes de sécheresse. Les plants en racines nues sont plus vulnérables lors de leur manipulation, transport et au moment de la mise en terre, ce qui peut affecter leur performance. Réciproquement, les plants en godet sont moins vulnérables à ces opérations et ils ont l'avantage d'être installés avec leur substrat de culture, au contact direct des racines, qui leur assure un stock d'eau et de nutriments immédiatement disponibles pour le plant au moment de sa reprise. Notons toutefois que le conditionnement en godet peut aussi engendrer des problèmes sur la croissance des racines et l'architecture d'ensemble du système racinaire (enroulement dans le conteneur d'élevage, difficulté à croître en dehors du substrat) et par là même sur les performances à court et moyen terme des plants (Riedacker, 1978 ; Verger *et al.*, 1995). Ces déformations, liées à l'utilisation de godets non adaptés ou à la prolongation de la durée de culture des plants dans les godets, peuvent généralement être évitées par l'utilisation de godets aux bords cannelés.

De toutes ces différences morphologiques ou physiologiques, peuvent résulter des comportements spécifiques aux deux types de plants. Sur les sites de plantation à forte contrainte de sécheresse, toutes essences confondues, les plants en racines nues ont en moyenne des taux de reprise significativement plus faibles que les plants en godet. En revanche, sur les sites ne présentant pas de contrainte, les deux types de conditionnement donnent des taux de reprise semblables. Passée la phase d'implantation (intégration fonctionnelle du plant en terre), le conditionnement initial semble ne plus avoir d'effet sur la survie et la croissance des plants. Néanmoins, les études comparant les deux types de conditionnement toutes choses égales par ailleurs sont peu mises en œuvre en France. Les types de conditionnement proposés par les pépiniéristes sont souvent uniques pour une essence donnée (racines nues ou godet) ; les modalités de chaque conditionnement peuvent toutefois varier, mais sont rarement plantés en comparaison sur un même site. Dans le cas du douglas, la comparaison des plants conditionnés en racines nues et en godet n'a pas révélé de différence sur les critères de survie, croissance et stabilité ; les plants en godet, généralement plus petits et plus jeunes, se sont révélés plus sensibles aux dégâts d'hylobes, et les plants en racines nues plus sensibles à la qualité de la mise en terre (Girard *et al.*, 2019). Des travaux menés sur les résineux – pins, sapins et épicéas, concluent également à l'absence d'effet du type de conditionnement des plants (Jäärats *et al.*, 2016 ; Kolevska *et al.*, 2020). Dans un essai après incendie, sur station contraignante, les plants en godets semblent