



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Office National des Forêts

#74

RenDez-Vous techniques

ESPERENSE

**L'expérimentation
au service de la forêt
de demain**

Printemps 2022

- 03 AVANT-PROPOS**
ESPERENSE,
tout un programme !
- 04 MÉTHODES**
Le projet **ESPERENSE,**
présentation rapide
- 05 MÉTHODES**
Quelles sont en France les zones
forestières conjuguant enjeu de
production et vulnérabilité au
changement climatique ?
*Par Hedi Kebli, Philippe Riou-Nivert, Yves Rousselle,
Céline Perrier*
- 13 MÉTHODES**
Comment choisir les espèces
et provenances à expérimenter
pour l'avenir ?
Par Brigitte Musch, Valentin Bouttier, Salomé Fournier
- 19 MÉTHODES**
Quels dispositifs expérimentaux
pour évaluer les essences en
contexte de climat changeant :
de l'académique au participatif ?
*Par Éric Paillassa, Patrick Pastuszka, Alain Berthelot,
Didier François*

- 24 PRATIQUES**
Comment s'approvisionner en
nouvelles semences forestières
de qualité pour l'élevage de
plants expérimentaux ?
Par Sabine Girard, Patrice Brahic, Joël Conche
- 28 PRATIQUES**
Réseau **ESPERENSE** : une
évaluation participative des
essences de demain
*Par Éric Paillassa, Brigitte Musch, Myriam Legay,
Christophe Orazio, Christian Pichot*
- 31 RÉFLEXIONS**
Comment concilier plantation
et conservation de ressources
génétiques ?
Par François Lefèvre
- 36 RÉFLEXIONS**
Comment les dispositifs îlots
d'avenir peuvent faciliter les
processus évolutifs
Par Alexis Ducouso, Brigitte Musch



Cliquer sur un titre pour aller
directement à l'article souhaité



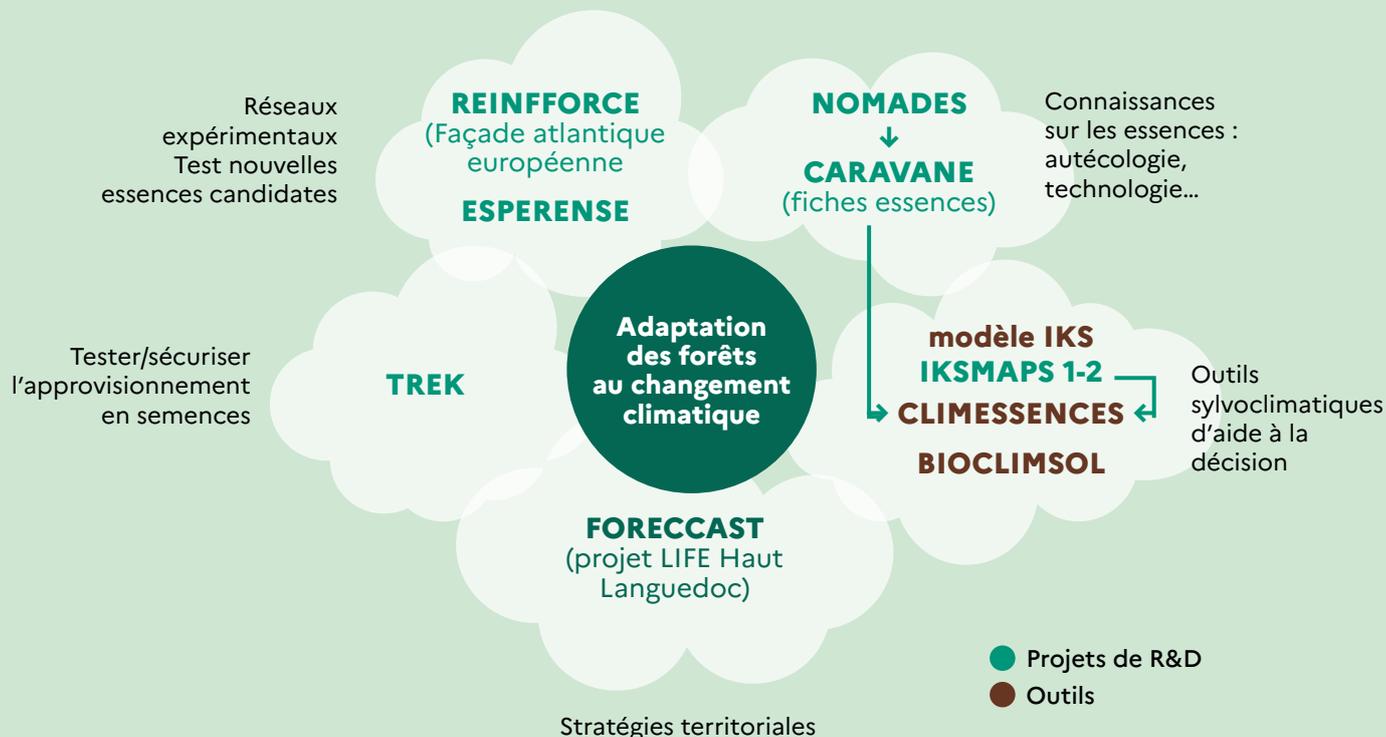
En fin d'article, cliquer sur ce bouton
pour revenir au sommaire

ESPERENSE, tout un programme !

Cette édition de nos RenDez-Vous techniques est principalement consacrée au **projet de recherche ESPERENSE**, dont l'ambition était de jeter les bases d'un réseau d'expérimentations pour évaluer les essences forestières de demain : on trouvera page suivante une description succincte de ce projet, avant d'entrer dans le vif du sujet.

La revue Forêt-Entreprise lui a déjà consacré un dossier fin 2021 (n° 260), et nous ne prétendons pas à l'originalité. Mais un projet collaboratif de cette importance pour les forestiers mérite bien des redites... et éclairages un peu différents. Pour notre part, nous avons voulu retranscrire la richesse des propos tenus lors du webinaire de restitution du projet (26 mai 2021), qui incluait des **réflexions plus larges**, sur les questions d'hybridation par exemple, face aux réticences ou inquiétudes que suscite l'idée de migration assistée des espèces pour l'adaptation des forêts au changement climatique.

POSITIONNEMENT (SOMMAIRE ET NON EXHAUSTIF) DES DIFFÉRENTS PROJETS DE RECHERCHE ET OUTILS CITÉS DANS CE NUMÉRO



Le projet ESPERENSE : présentation rapide

La forêt et le bois sont un atout indispensable de la transition énergétique et écologique, dans le cadre des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Mais les différents scénarios produits par le GIEC font craindre un déclin de la vitalité et de la productivité de la forêt française. La trajectoire climatique de ces dernières années, l'ampleur des impacts et la durée du cycle des essences impliquent une action rapide et appropriée. Notre savoir-faire et nos méthodes sylvicoles ne vont pas suffire pour maintenir des peuplements productifs. Il est donc crucial d'anticiper en proposant dès aujourd'hui des options d'adaptation raisonnées et innovantes à partir des connaissances existantes.

Les gestionnaires sont maintenant très conscients de la vulnérabilité des principales essences forestières françaises vis-à-vis des changements climatiques globaux, mais ils sont aussi désemparés quant au choix des essences pour le renouvellement ou l'enrichissement des peuplements ; un choix lourd de conséquences pour l'avenir.

C'est pour pouvoir répondre à cette inquiétude que les organismes forestiers de R&D ont décidé en 2017 de coopérer pour concevoir et mettre en place une organisation d'évaluation de nouvelles essences ou provenances. Avec l'aide du RMT Aforce, ils ont ainsi monté le projet ESPERENSE, qui a bénéficié du soutien du ministère de l'Agriculture, avec 4 objectifs :

- identifier des territoires forestiers à enjeu de production susceptibles d'être impactés par les changements climatiques et pour lesquels il est utile de trouver des alternatives ;
- proposer des listes d'essences ou provenances potentiellement intéressantes pour l'avenir, à expérimenter en s'appuyant sur nos connaissances acquises ou en cours d'acquisition ;
- donner un cadre global d'expérimentation et mettre à disposition des protocoles d'évaluation à utiliser sans modération,
- concevoir un accord de consortium pour travailler sur ces questions dans la durée et rédiger un cahier des charges d'une plateforme d'échange. Un tel support regroupera toutes les informations liées à ces expérimentations, fédèrera les actions menées sur ce thème et permettra une mise à disposition plus rapide des résultats, de recommandations et d'outils pratiques en lien avec d'autres projets.

Le séminaire de restitution du projet (webinaire du 26 mai 2021) a aussi été l'occasion de replacer ces objectifs dans un contexte plus large, en répondant à certaines questions d'associations et de nos concitoyens sur l'enjeu de préservation de notre patrimoine génétique forestier.

Le projet ESPERENSE (2018-2021)

Porté par le RMT Aforce, le projet « ESPERENSE-rEseau multiPartenaire d'Evaluation de Ressources gENétiques foreStièrEs pour le futur » a été élaboré et mené à bien par les organismes forestiers de R&D : CNPF, FCBA, IEFC*, INRAE et ONF.

Il a bénéficié du soutien financier du ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation dans le cadre de l'appel à projets 2017 « Innovation et investissements pour l'amont forestier » du Fonds stratégique Forêt-Bois.

*IEFC (Institut Européen de la Forêt Cultivée) : réseau transnational de coopération scientifique et technique pour la gestion durable des forêts cultivées. L'IEFC regroupe des instituts de recherche, centres techniques, universités, écoles d'ingénieurs, assurances, coopératives et organisations professionnelles.



Quelles sont en France les zones forestières conjuguant enjeu de production et vulnérabilité au changement climatique ?

Le projet ESPERENSE est de concevoir un réseau d'expérimentations pour évaluer les ressources susceptibles de pallier le déclin des grandes essences de production menacées par le changement climatique. Comment cerner une tâche aussi gigantesque ? En ciblant méthodiquement la réflexion sur les zones majeures de production les plus exposées.

Le projet ESPERENSE s'est donné pour objectif d'initier un réseau d'expérimentations multipartenaires pour l'évaluation de ressources génétiques forestières susceptibles de pallier le déclin des principales essences de production menacées par les changements climatiques. Déclin d'autant plus ennuyeux que les secteurs de forte production sont aussi des « poumons verts » dont il est important qu'ils puissent continuer de fonctionner aussi intensément que possible, pour continuer à capter les émissions de CO₂.

Cependant un tel réseau d'expérimentations exige de rationaliser l'effort d'installation dans un cadre conceptuel global. Notre tâche était donc de développer une méthodologie qui permette de structurer efficacement le réseau sur le territoire de manière qu'il réponde au mieux aux besoins de la filière forêt-bois, en ciblant les **zones à enjeu**, c'est-à-dire les secteurs à la fois essentiels dans la production de bois et préoccupants au regard des changements climatiques.

Ces zones à enjeu ont été déterminées en 2 étapes :

- la première pour caractériser et définir les zones à enjeu de production,
- la deuxième pour évaluer un niveau de préoccupation climatique pour les essences de ces zones de production.

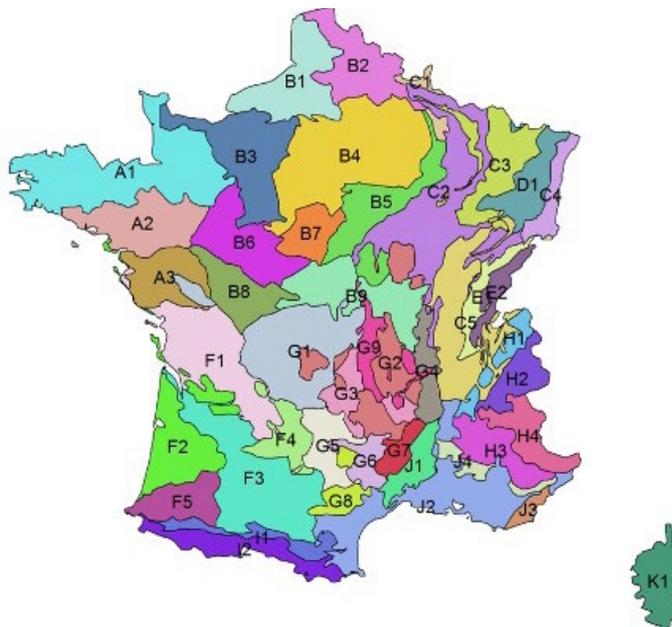
Méthodologie utilisée – Localisation des enjeux de production

Pour déterminer les zones à enjeu de production (première étape), nous avons récupéré auprès de l'IGN les données de volumes sur pied et volumes prélevés des 43 essences les plus communes qui représentent environ 97% du volume sur pied de la forêt en France métropolitaine.

→ **Figure 1.** Découpage en 45 grandes sylvoécორégions (GSER) (source : IGN)
Découpage intermédiaire entre les 11 grandes régions écologiques (GRECO), désignées par les lettres A à K, et les sylvoécორégions

■ Un découpage géographique adapté : les grandes sylvoécორégions (GSER)

Ensuite nous avons choisi un découpage géographique particulier qui s'appuie sur une partition écologique et forestière proposée par l'inventaire forestier de l'IGN. Ce découpage est intermédiaire entre les grandes régions écologiques (GRECO) et les sylvo-éco-régions (SER) dont l'échelle nous paraissait trop fine : les SER ont été regroupées en 45 ensembles que nous avons appelés grandes sylvo-éco-régions (GSER, Fig. 1). Nous avons ensuite écarté les essences qui ne présentent nulle part de fort volume et qui sont dispersées sur le territoire (comme le noyer, le cerisier, l'orme ou le robinier par exemple). Il reste alors une liste de 20 essences principales qui représentent 88% du volume sur pied total.



Caractérisation de la production des essences par GSER

Pour chacune des essences de cette liste, nous avons caractérisé la production selon 3 variables : les volumes sur pied, les volumes prélevés et une valeur potentielle sur pied estimée.

Les prélèvements sont une moyenne annuelle mesurée sur une période de 5 ans, et la valeur potentielle sur pied en euros est estimée en multipliant des prix de vente par diamètre par les volumes sur pied selon des classes de diamètre.

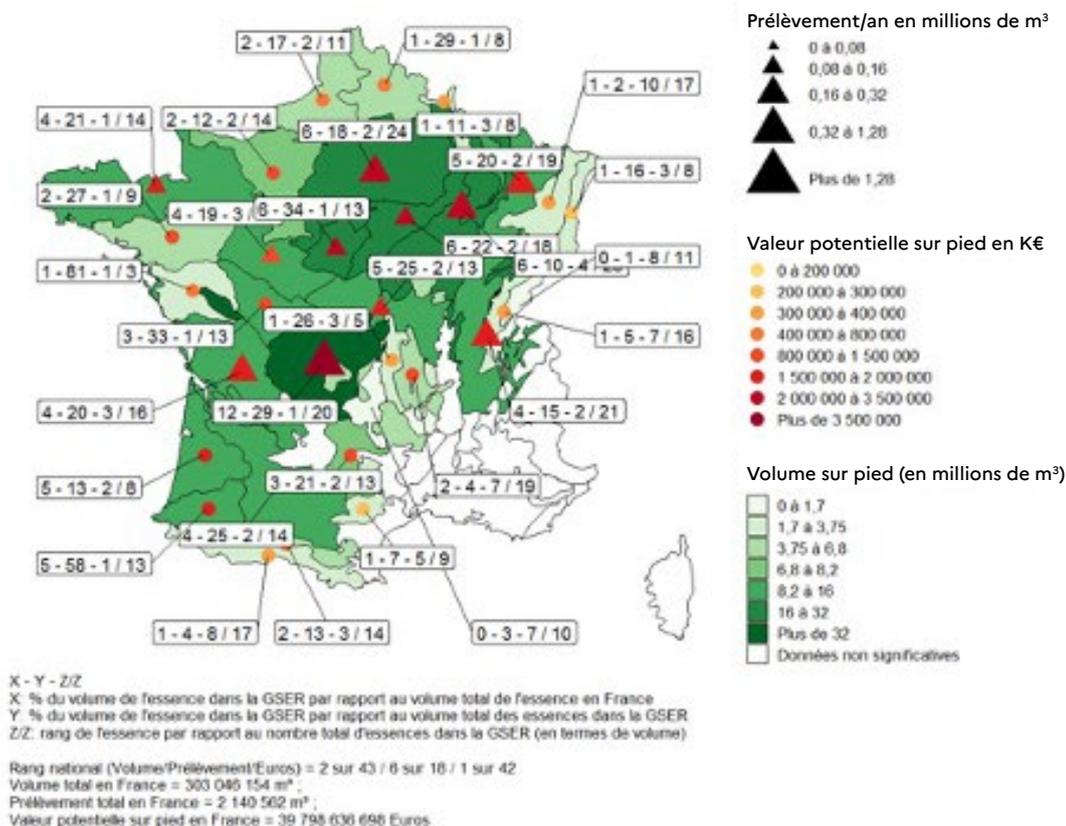
On aboutit à des cartes de caractérisation de la ressource par essence, qui synthétisent l'ensemble des informations. Ces cartes sont un peu chargées, mais en prenant le temps de s'y plonger il est intéressant de pouvoir tout appréhender en un coup d'œil sur une représentation unique.

Prenons comme exemple la carte du chêne pédonculé (Fig. 2). Les GSER pour lesquelles on a des données de volume sur pied pour le chêne pédonculé y sont colorées

en vert (les autres restent vierges) : plus le vert est foncé plus le volume sur pied est élevé. Le « centre » de chacune de ces GSER est marqué d'un point, lui-même rattaché à une étiquette. La couleur du point indique l'estimation de la valeur potentielle sur pied. S'il y a des prélèvements de chêne pédonculé dans la GSER considérée, le point prend la forme d'un triangle dont la taille indique les volumes annuels prélevés. Enfin les étiquettes donnent trois chiffres (X - Y - Z/Z) :

- le premier répond à la question « cette GSER est-elle un gisement important de l'essence représentée (ici, le chêne pédonculé) ? » ; il donne la part (en %) du volume national qui se trouve dans cette GSER ;
- le deuxième chiffre répond à la question « l'essence est-elle importante pour ce territoire ? » ; il donne la part du chêne pédonculé dans le volume total, toutes essences confondues, de la GSER ;
- le dernier chiffre donne le rang du chêne pédonculé (en volume) sur le nombre d'essences principales présentes dans la GSER.

En-dessous de la carte sont aussi affichées les données classant l'essence au niveau national.



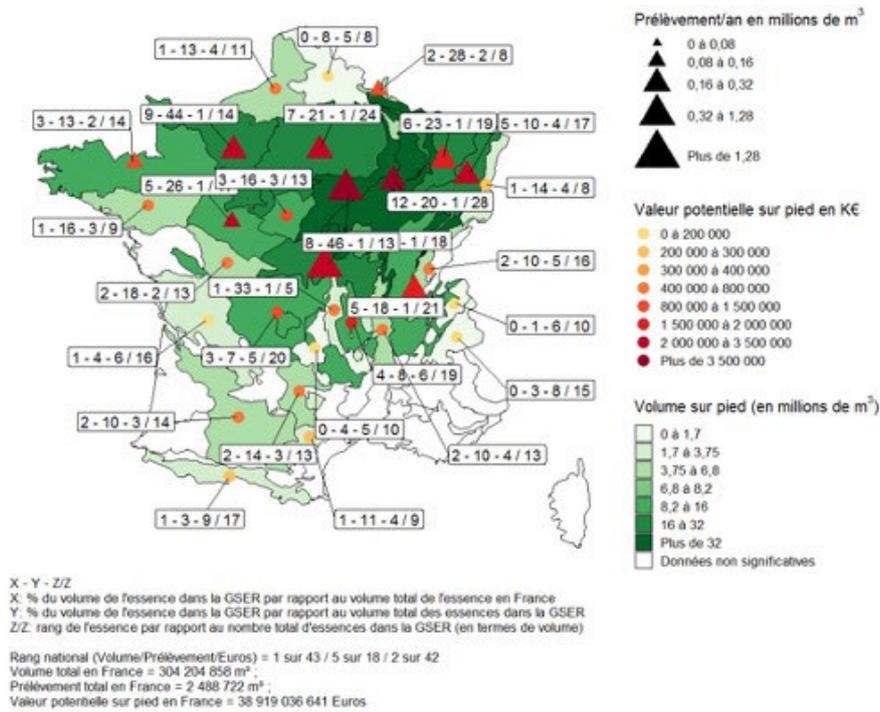
↑ **Figure 2.** Carte de caractérisation de la ressource (zones à enjeu de production) du chêne pédonculé. Dans l'ouest du Massif Central, la GSER G1 (voir fig. 1), en vert foncé, recèle un volume sur pied de chêne pédonculé de plus de 32 Mm³, pour une valeur potentielle (point rouge sombre) dépassant 3,5 milliards d'euros ; le prélèvement annuel (point triangulaire de grande taille) dépasse 1,28 Mm³. L'étiquette associée (12 - 29 - 1/20), indique que 12% du volume national de chêne pédonculé se trouve dans la GSER G1, que le chêne pédonculé représente 29% du volume sur pied de cette GSER et que c'est la première essence en volume sur les 20 essences principales qui y sont recensées. Au niveau national (lignes du bas) le chêne pédonculé est la deuxième essence en volume (derrière le chêne sessile) sur les 43 essences renseignées, la sixième en termes de volume prélevé et la première en termes de valeur potentielle ; les chiffres correspondants en m³ ou euros sont affichés en-dessous.

MÉTHODES

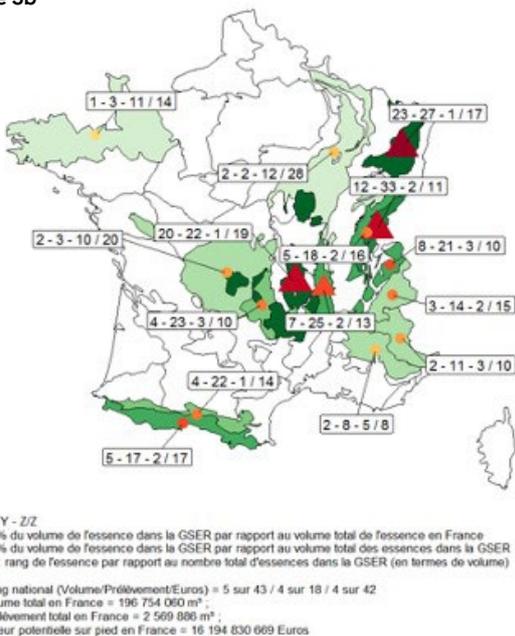
Ce travail de localisation des enjeux de production a été fait pour les 20 essences retenues. La carte du chêne sessile (Fig. 3a) est sensiblement différente de celle du pédonculé, avec une ressource moins présente dans le quart sud-ouest de la France. Du côté des résineux, la carte d'enjeu de production pour le sapin (Fig. 3b) montre que les volumes sur pied sont maximaux dans les Vosges (GSER D1) et dans le Massif Central (GSER G2), où il représente 23% et

20 % de la ressource nationale ; le sapin est la première essence en volume dans ces zones tout en ne représentant que 27 et 22% du volume forestier de ces GSER. Pour l'épicéa (Fig. 3c) on voit que la ressource se concentre dans le Jura, les Alpes et une partie du Massif Central ainsi que dans les Vosges. L'épicéa est en seconde position en termes de volume prélevé à l'échelle nationale, le pin maritime étant en première position.

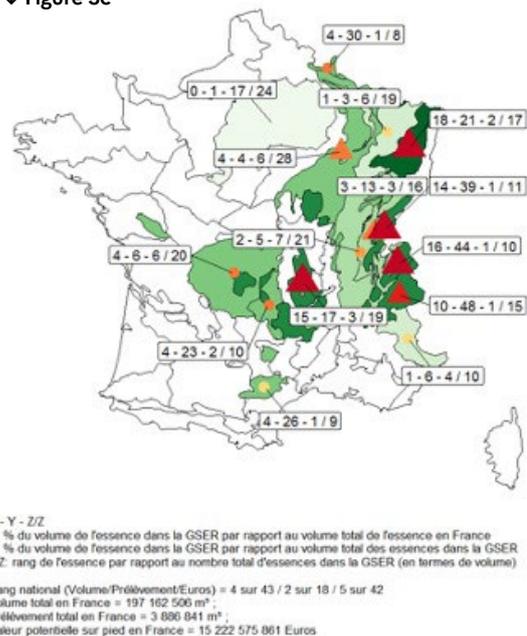
→ Figure 3a



↓ Figure 3b

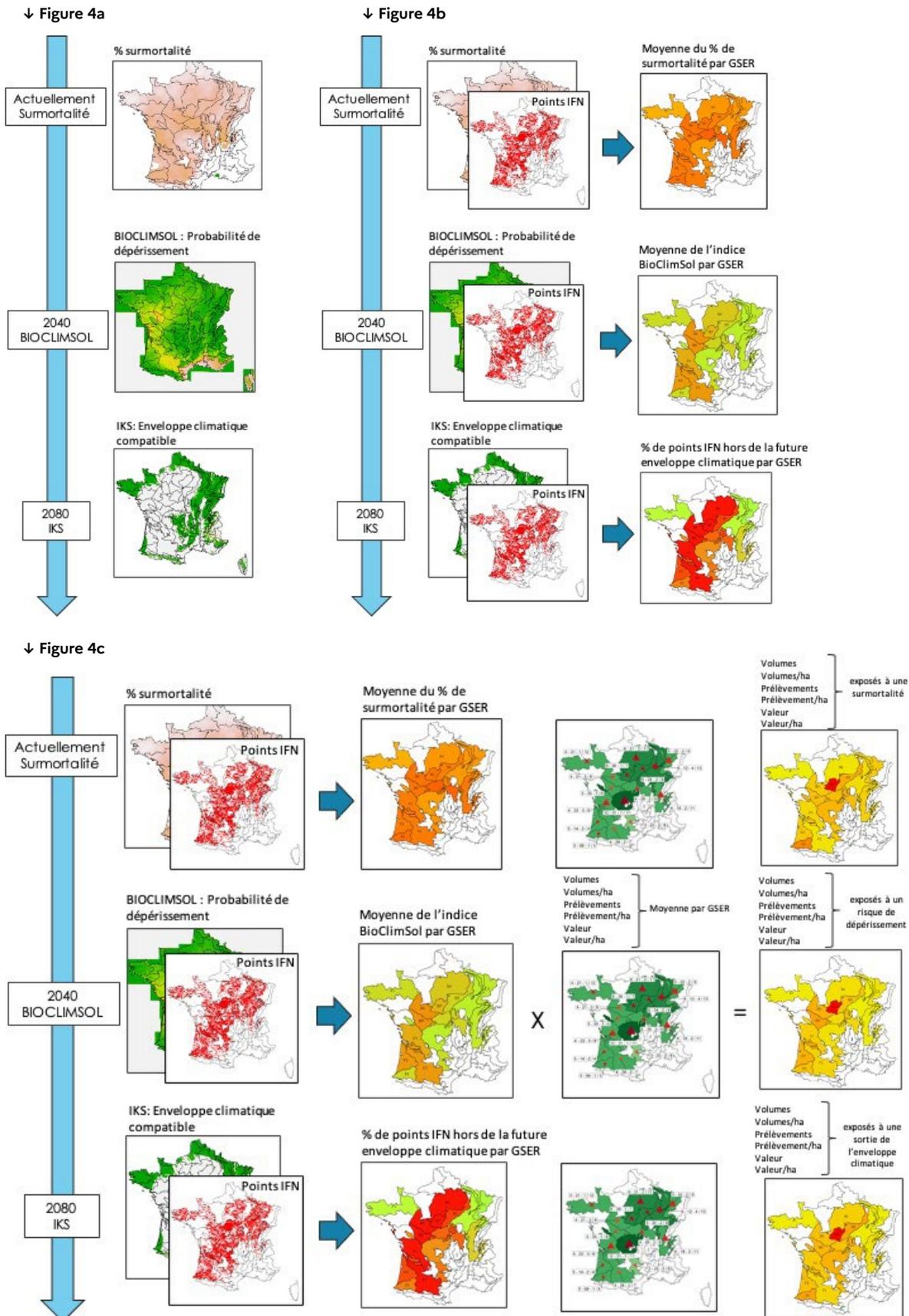


↓ Figure 3c



↑ Figure 3. Cartes des zones à enjeu de production pour le chêne sessile (a), le sapin pectiné (b) et l'épicéa commun (c)

MÉTHODES



↑ **Figure 4.** Illustration de la méthodologie globale d'évaluation de la préoccupation climatique, pour l'exemple du chêne pédonculé. (a) 3 modélisations d'impact climatique avec chacune son horizon temporel ; (b) confrontation avec les points IFN chêne pédonculé pour calcul d'indices moyens sur les GSER ; (c) calcul du niveau d'enjeu = variable de production x niveau de préoccupation climatique

Mais au-delà de ces constats, l'intérêt de cette première étape sur la localisation des enjeux de production est surtout de pouvoir les croiser avec des modèles qui estiment une préoccupation climatique pour les essences concernées sur ces territoires.

Méthodologie utilisée – Évaluation de la préoccupation climatique

La deuxième étape vise à déterminer un niveau de préoccupation climatique pour les zones à enjeu de production. Nous avons préféré dans cette démarche le terme de préoccupation plutôt que les termes *risque* ou *vulnérabilité* qui renvoient à des significations spécifiques dans certains domaines.

Pour cette évaluation, nous avons utilisé trois modélisations développées par trois organismes partenaires :

- modélisation de la surmortalité due aux conditions climatiques, approche développée à AgroParisTech par Christian Piedallu et Adrien Taccoen,
- modélisation de la vigilance climatique, qui est la probabilité d'observer un dépérissement ; c'est le modèle BioClimSol développé au CNPF par Jean Lemaire,
- modélisation de l'évolution de la compatibilité climatique ; c'est le modèle IKS développé par le département RDI de l'ONF

Nous avons croisé ces 3 modèles avec les 6 variables de production affichées sur les cartes précédentes (3 variables exprimées de 2 façons : chiffre global par GSER ou ramené à l'hectare) ; cela consiste tout simplement à multiplier les données de production par les données de préoccupation climatique modélisées. On aboutit à 18 variables de production exposée au changement climatique.

Plus précisément, la méthode est la suivante (Fig. 4). D'abord, le temps et les moyens étant contraints, nous avons choisi d'utiliser chacune des 3 modélisations pour un horizon temporel spécifique : période actuelle pour la surmortalité, vers 2040 pour BioClimSol et vers 2080 pour IKS. Cela permet d'avoir une vision à court, moyen et long terme du niveau de préoccupation et pour chaque essence on a une estimation des zones préoccupantes sur la France entière. L'idée générale est que si, pour tel territoire de production, les modèles indiquent un problème maintenant, dans le futur proche et à un horizon plus lointain, alors c'est dans ce territoire qu'on va devoir se concentrer et prioriser l'effort expérimental.

Ensuite, pour chaque modèle nous avons utilisé les points de l'Inventaire forestier national pour extraire la valeur du modèle à l'endroit de présence de l'essence considérée, ce qui permet de calculer une moyenne par GSER, soit respectivement : moyenne du pourcentage de surmortalité, moyenne de l'indice BioClimSol, pourcentage de points IFN en situation d'incompatibilité climatique. Ces moyennes d'impact climatique sont enfin couplées avec les données de production, c'est-à-dire les cartes de la première étape, en faisant une simple multiplication pour

aboutir finalement à des cartes de données de production exposées à une préoccupation climatique.

Les essences évaluées

Pour déterminer les zones à enjeu, nous avons initialement choisi de travailler sur les 12 premières essences en termes de volume en France ; mais le frêne et le châtaignier ont été écartés à cause de problèmes phytosanitaires qui pouvaient compliquer l'analyse. Restent donc 10 essences pour lesquelles les modèles de préoccupation climatique sont disponibles : chêne pédonculé, chêne sessile, chêne pubescent, Douglas, épicéa commun, hêtre, sapin pectiné, pin sylvestre, pin maritime et charme (pour les 3 dernières, l'évaluation repose sur deux approches seulement : Surmortalité et IKS). Noter que la méthode est évolutive : quand les modèles auront intégré d'autres essences, elles pourront être ajoutées dans l'approche.

Détermination et hiérarchisation des zones à enjeu

Une fois établies les cartes des différentes données de production exposées selon les différentes modélisations de préoccupation climatique, il fallait synthétiser l'information apportée par chacune des approches : l'idée était que la zone à enjeu sera celle où les données de production sont le plus exposées.

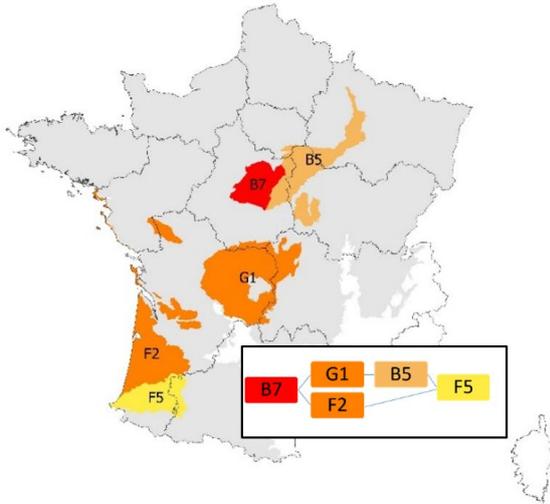
Nous avons identifié les zones à enjeu en combinant les 18 variables (6 variables de production exposées à 3 échéances) grâce la méthode Prométhée-Gaïa, un outil d'aide à la décision qui se base sur l'analyse multicritère. On obtient en sortie une sorte d'arbre de décision. Cela permet de classer les GSER selon leur enjeu, qui intègre les informations des trois approches de préoccupation climatique. On aboutit à des zones à enjeu par essence ou, selon les questions qu'on se pose, à des zones à enjeu multi-essences.

Approche par essence

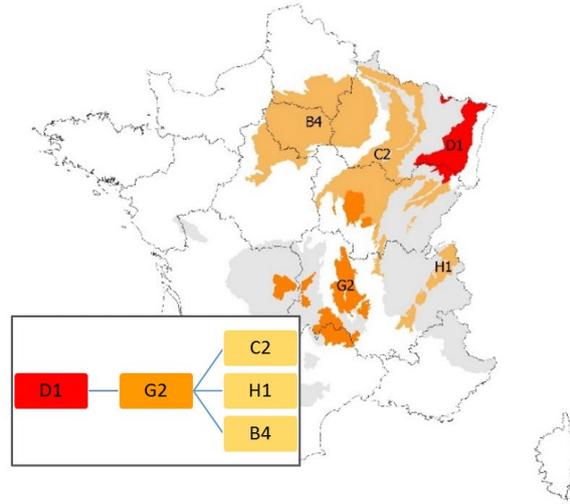
L'approche par essence répond d'abord à la question « Quelles sont les essences dont l'enjeu est le plus fort parmi les 10 étudiées ? ». Les essences à plus fort enjeu sont le chêne pédonculé en tête, suivi du sapin, puis du chêne sessile, de l'épicéa, du hêtre et, assez loin derrière, du Douglas. Pour chacune de ces essences nous avons ensuite cherché à savoir quels sont les territoires où l'enjeu est le plus fort : ce sont les zones en rouge sur les cartes de la figure 5. Par exemple pour le chêne pédonculé, c'est en priorité la GSER Sologne-Orléanais (B7) ; pour le sapin et pour l'épicéa c'est celle des Vosges ; pour le chêne sessile c'est surtout l'arc Champagne humide – Pays d'Othe – Nivernais (GSER B5) et pour le Douglas c'est plutôt dans le Massif Central. Le pin maritime, quant à lui, ne ressort pas comme essence à fort enjeu malgré sa position dominante pour les volumes prélevés car les modèles climatiques ne l'estiment pas très préoccupant.

MÉTHODES

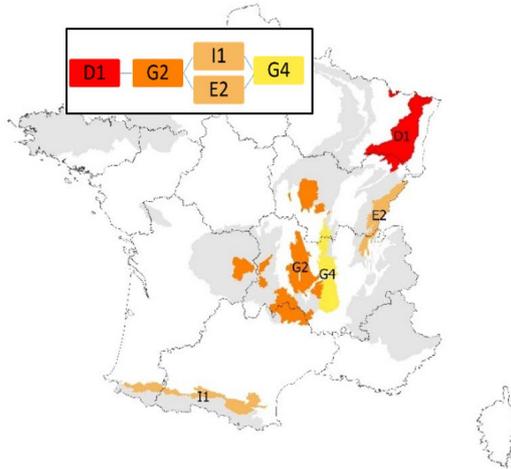
↓ Chêne pédonculé



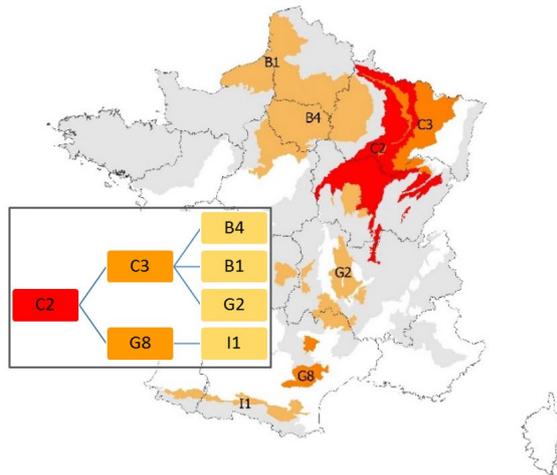
↓ Epicéa commun



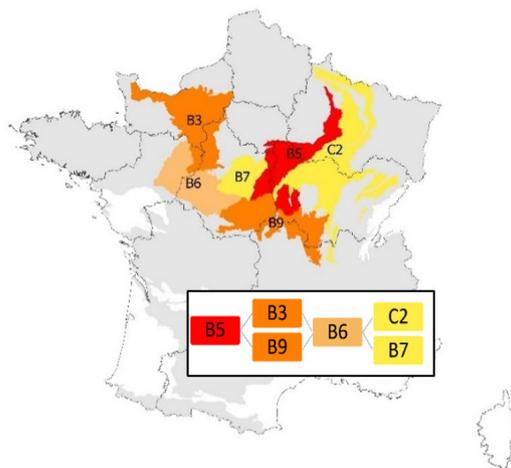
↓ Sapin pectiné



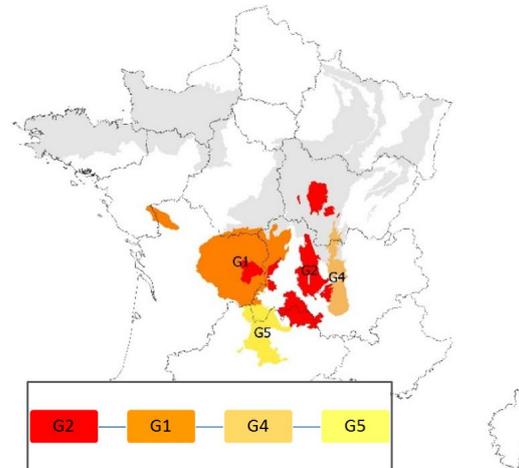
↓ Hêtre



↓ Chêne sessile



↓ Douglas

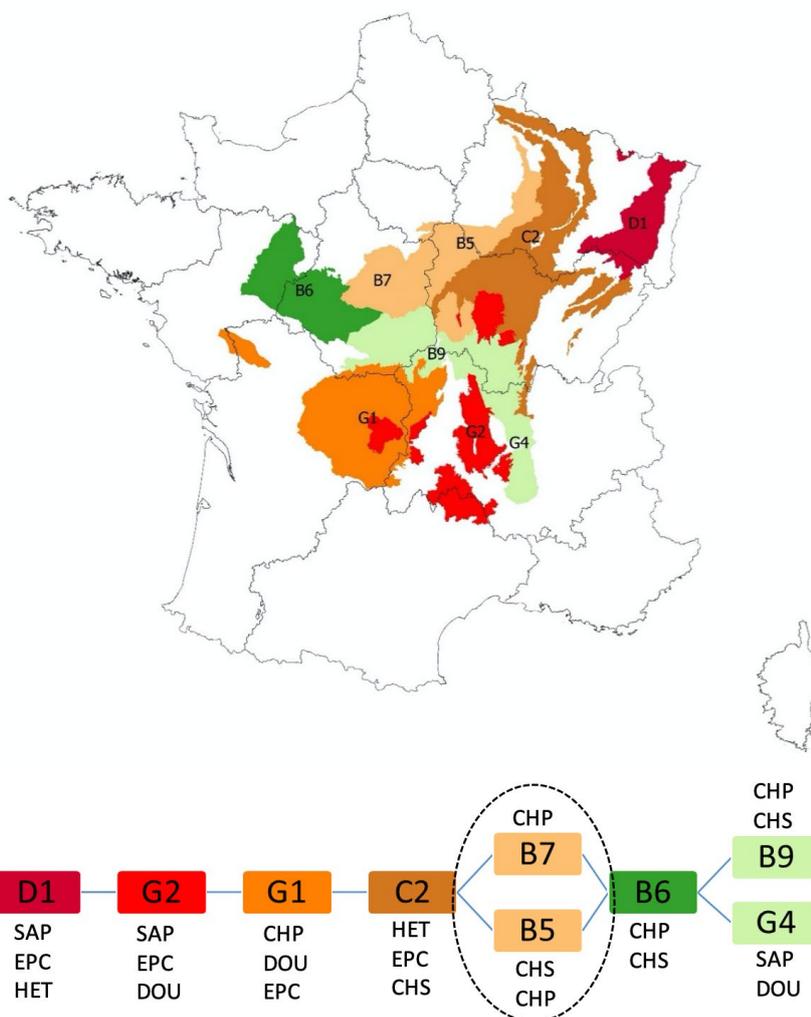


↑ Figure 5. Zones à enjeu pour les 6 essences de production les plus exposées.

Approche multi-essences

L'approche multi-essences répond à la question « Quels sont les territoires où l'enjeu est le plus fort en France ? » sans se focaliser sur une seule essence mais en faisant la somme des essences étudiées par GSER. Il en résulte une carte combinant les 10 essences, où plus la couleur est foncée et plus l'enjeu est important (Fig. 6). L'enjeu est maximal dans les Vosges, puis dans le Massif Central, puis dans le territoire codé en C2. Pour une même valeur d'enjeu (même couleur), le choix de la zone où installer le dispositif expérimental dépend des priorités des décideurs : sur quelle variable souhaitent-ils se concentrer ? Privilégient-ils une approche multi-essence ou préfèrent-ils se focaliser sur une essence en particulier ?

Cependant il y a aussi des **contraintes géographiques** et organisationnelles. Dans le cadre du projet ESPERENSE, par exemple, les contraintes logistiques et de durée limitée nous ont conduits, après discussion avec les différents partenaires du projet, à choisir l'enjeu « **chênes** » pour établir les deux premiers dispositifs expérimentaux d'évaluation. Enjeu chênes, c'est-à-dire les GSER B7 et B5 (en beige sur la carte Fig. 7), qui correspondent aux enjeux forts pour le chêne pédonculé et sessile, respectivement.



← **Figure 6.** Approche multi-essences (10 premières essences en volume), carte des GSER à enjeu fort.

Classement par enjeux décroissants des GSER considérées comme zones à enjeu de production et soumises à une situation climatique préoccupante toutes essences confondues. Les essences les plus préoccupantes dans chaque GSER sont indiquées par ordre décroissant (de haut en bas) : SAP = sapin pectiné, EPC = épicéa commun, CHS = chêne sessile, CHP = chêne pédonculé, HET = hêtre, DOU = douglas, CHA = charme

Compte tenu des contraintes organisationnelles et de durée du projet, c'est pour l'enjeu « chênes » (ellipse pointillée) qu'ont été installés les premiers dispositifs expérimentaux

Conclusion et développements futurs

Notre méthode a permis d'identifier des zones à enjeu, c'est-à-dire des zones de production de bois avec de forts volumes sur pied, prélèvements et valeur potentielle estimée, pour des essences qui sont dans une situation climatique préoccupante à plus ou moins longue échéance.

L'incertitude est prise en compte par le biais de trois modélisations climatiques qui utilisent des méthodes, des scénarios, des modèles climatiques et des horizons temporels différents.

Cette approche a été développée pour rationaliser le choix des secteurs d'installation de dispositifs expérimentaux, mais elle n'est pas spécifique à cet objectif. Elle peut être utilisée pour guider des décisions dans un but stratégique dans différents domaines (prévention sanitaire, exploitation...).

Par ailleurs, la méthode est évolutive : d'autres modélisations climatiques et d'autres essences pourront être utilisées par la suite pour compléter et affiner les résultats qu'on a obtenus ici. De même, les enjeux locaux sont mal pris en compte dans la mesure où nous avons ciblé les plus forts volumes à l'échelle nationale ; on remarque par exemple une absence de zone à enjeu sur le pourtour

méditerranéen. Mais rien n'empêche d'appliquer cette méthode à une échelle plus régionale, pour déterminer des zones à enjeu spécifiques.

Enfin la méthode se prête à d'autres développements possibles : elle peut être utilisée pour d'autres enjeux que la production de bois, pour les forêts de protection par exemple ou pour les forêts à enjeu de biodiversité (comme les Habitats d'Intérêt Communautaire).

Hedi Kebli CNPF-IDF, **Philippe Riou-Nivert** CNPF-IDF,
Yves Rousselle ONF, **Céline Perrier** CNPF

REMERCIEMENTS

Nous remercions les financeurs du projet ESPERENSE ainsi que toutes les personnes qui ont été sollicitées à un moment ou un autre sur cette étude :

- Myriam Legay, Eric Paillassa, Brigitte Musch, Alexandre Piboule, Hervé Le Bouler, Jean Lemaire, Christian Piedallu, Adrien Taccoen, Jean-Pierre Renaud, François Morneau et Florence Gohon pour leur participation et leur aide directe,
- mais aussi Jean-François Dhôte, Julie Thomas, Jean-Baptiste Reboul, Louis-Michel Nageleisen, Simon Martel, Vincent Badeau, Noémie Pousse et Claude Husson.



© Luc Croisé / ONF

↑ Le chêne pédonculé, un enjeu particulièrement exposé en Sologne-Orléanais (GSER B7)



Comment choisir les espèces et provenances à expérimenter pour l'avenir ?

Face aux dépérissements encourus, la question des espèces ou provenances porteuses d'avenir en climat changeant est cruciale, mais manque encore de réponses. Mobiliser et organiser les connaissances disponibles, identifier les critères indispensables, caractériser les lacunes... le choix des espèces à expérimenter sans se disperser suppose une démarche rigoureuse.

Le projet ESPERENSE consiste à poser les fondements d'un réseau d'expérimentations pour l'évaluation des essences et provenances pour l'avenir, en élaborant pour sa conception des méthodologies reproductibles (applicables à différents territoires ou enjeux). Parallèlement au travail sur la détermination des zones d'enjeu à cibler pour ces expérimentations, notre tâche était donc d'identifier une méthodologie afin de choisir les espèces et provenances potentielles à évaluer pour l'adaptation des forêts au changement climatique.

Dans un second temps, à l'aide de cette méthodologie, il s'agissait de proposer des espèces et provenances pour le présent et le futur climatique des zones à enjeux, et de vérifier les compatibilités climatiques des espèces pour guider les expérimentateurs et les gestionnaires.

Méthodologie : les prérequis

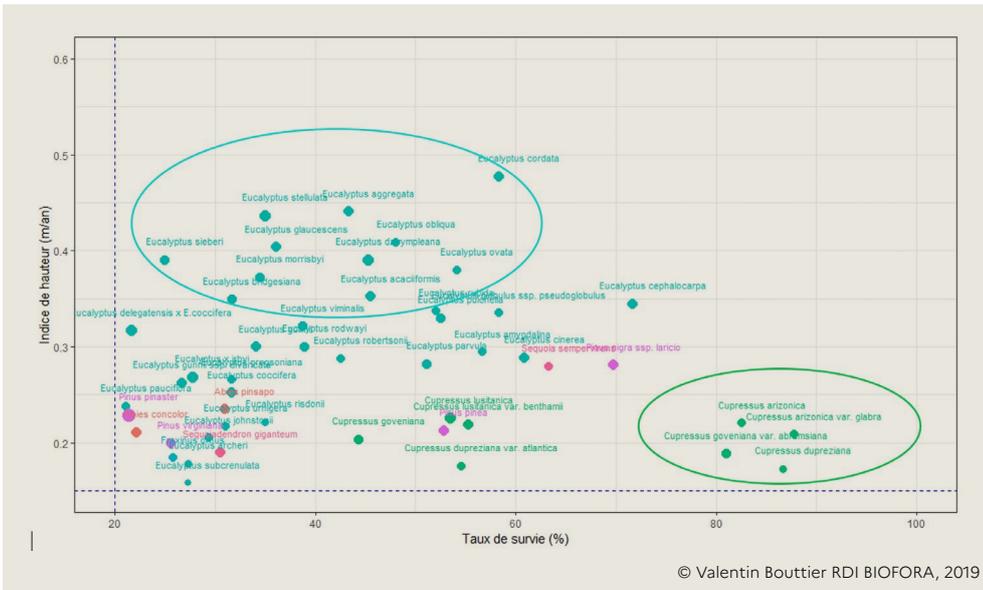
Pour identifier cette méthodologie, nous avons des prérequis. Nous devons rechercher des espèces pour le climat d'aujourd'hui et de demain, qui aient une meilleure résistance au déficit hydrique que l'espèce ou la provenance vulnérable, et qui permettent de conserver un bon niveau de production dans la zone à enjeu puisque c'est l'objet même du projet ESPERENSE. C'est pourquoi nous avons aussi retenu deux critères de performance : une croissance à 40 ans supérieure à 25 m et une certaine diversité dans l'utilisation du bois. Le critère de résistance au froid peut être rajouté pour les zones à enjeu de montagne.

Dernier critère, mais essentiel pour des expérimentations appelées à se multiplier dans le cadre d'un réseau assez étendu : il fallait que ces espèces ne soient pas envahissantes. Pour cela nous nous sommes appuyés sur la « liste des espèces exotiques envahissantes préoccupantes », liste fournie par l'Union européenne et la France.

Méthodologie : les outils mobilisés

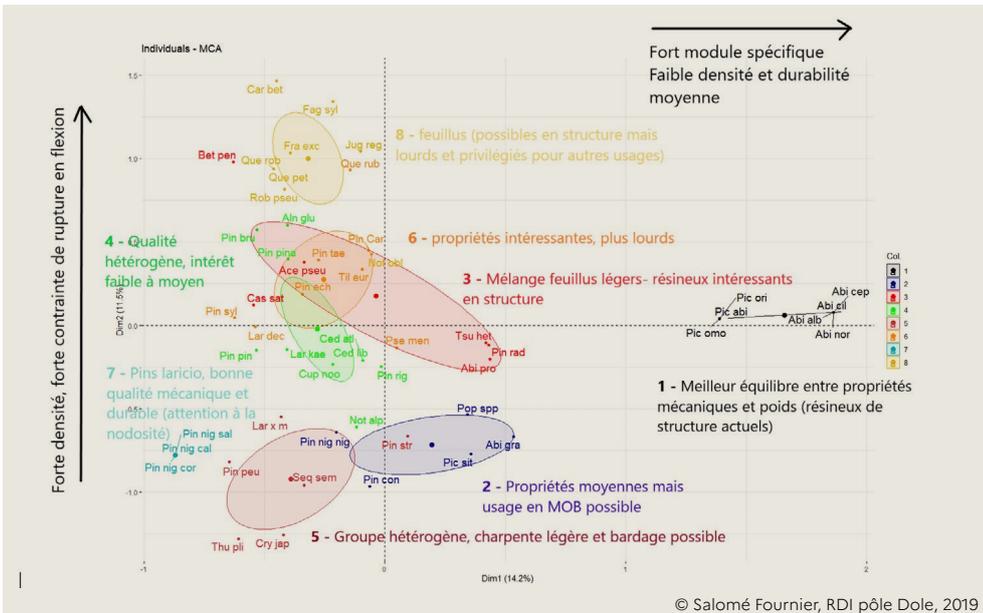
Pour la sélection d'espèces répondant à nos prérequis, nous avons mobilisé différents outils, à commencer par **l'analyse des dispositifs expérimentaux existants**, dont certains sont très anciens. Tous ces dispositifs ont été revus et fournissent des éléments de réflexion intéressants. Prenons l'exemple des arboretums méditerranéens qui ont plus de 40 ans (Fig. 1) : ils ont été implantés dans différentes conditions pédoclimatiques et présentent une grande richesse en espèces, dont chacune comptait 30 individus à la plantation. L'analyse répartit les espèces selon leur taux de survie et un indice de hauteur, sur des mesures réalisées en 2012. En termes de survie, un groupe d'essences se distingue particulièrement dans ces contextes de déficit hydrique assez drastique, c'est celui des cupressus. Et en termes de croissance, c'est un autre groupe qui se distingue relativement bien : celui des eucalyptus. Mais ces résultats sont contraints par les espèces qui avaient été introduites à l'époque.

Nous avons aussi utilisé les fiches espèces détaillées disponibles dans **l'outil en ligne ClimEssences** (146 espèces à ce jour) avec la base de données correspondante, qui permet de trier les essences selon un certain nombre de critères, dont ceux de nos « prérequis ». ClimEssences permet aussi d'afficher, pour une essence donnée, une cartographie « zoomable » des références en France, c'est-à-dire des sites où elle est étudiée dans le cadre d'expérimentations R&D, arboretums ou peuplements atypiques. Par ailleurs ClimEssences permet aussi, pour une cinquantaine d'essences (celles dont les données d'inventaire sont suffisantes pour permettre les simulations), d'éditer les cartes de compatibilité climatique sur le territoire, aujourd'hui et dans le futur (Voir en fin d'article la note sur l'outil ClimEssences).



← **Figure 1.** Arboretums méditerranéens : indice de hauteur en fonction du taux de survie pour les différentes espèces (moyenne des individus).

La taille des points est fonction de l'indice de diamètre ; la couleur représente le genre : Cupressus en vert, Eucalyptus en bleu, Pinus en mauve, Sequoia en rose.



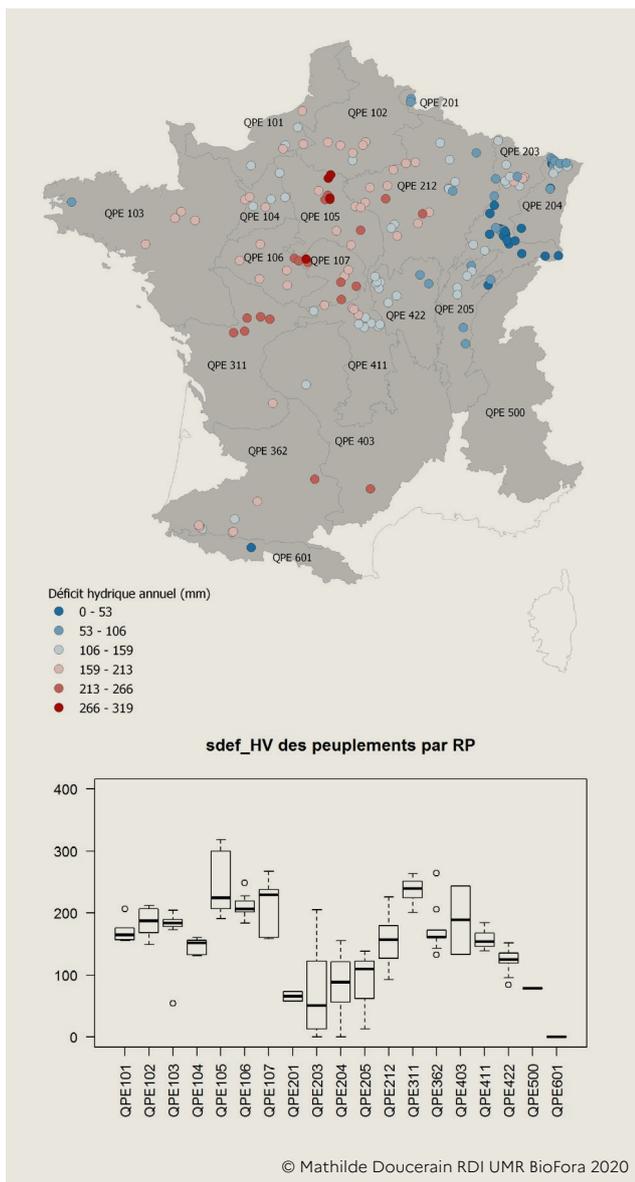
← **Figure 2.** Résultat et interprétation d'une analyse en composantes multiples (ACM) sur les qualités technologiques du bois de différentes espèces.

Pour ne citer que les principales ressources mobilisées, nous avons compulsé un certain nombre de **bases de données internationales**, et en particulier pour la **qualité du bois**, un élément important à prendre en compte. Salomé Fournier a ainsi pu analyser les données de 75 essences dont 22 feuillus : données quantitatives comme le module d'élasticité, la contrainte de rupture, la densité, etc. et des données qualitatives concernant la couleur du duramen, l'imprégnabilité, etc. Cette analyse ACM (Fig. 2) montre qu'on peut regrouper un certain nombre d'espèces entre elles et qu'il est possible, pour les espèces que nous ne connaissons pas, de s'appuyer sur un certain nombre de ressemblances. Les sapins méditerranéens, par exemple, sont très proches entre eux et de notre sapin pectiné, dans le groupe d'essences qui présente le meilleur équilibre

entre propriétés mécaniques et poids (bois de structure). Cela permet donc d'avoir des informations non négligeables sur la qualité ou l'intérêt futurs de ces bois.

L'ensemble de ces ressources appliquées au projet ESPERENSE et en particulier à la zone à enjeu « chêne » sur laquelle nous sommes focalisés (B7 – chêne sessile et B5 – chêne pédonculé), permet de **travailler aussi la question des provenances**. Nous savons que la plupart des espèces présentes sur nos territoires ont des aires de répartition assez vastes et qui couvrent donc une grande variété de conditions pédoclimatiques, en particulier en ce qui concerne les conditions de sécheresse. À l'aide de modèles climatiques, nous avons pu déterminer, parmi les peuplements porte-graines sélectionnés (ou identifiés),

ceux qui connaissent actuellement des niveaux de déficit hydrique importants. Pour le chêne sessile, par exemple (Fig. 3), on peut caractériser chaque peuplement sélectionné par le niveau de déficit hydrique annuel correspondant à sa localisation et aux conditions pédologiques dans lesquelles il se trouve. Cela permet de cibler les provenances les plus « déficitaires » pour introduire de la variabilité et de la résistance à ce critère. Cette méthode est illustrée ici pour le chêne sessile mais peut être appliquée à différentes espèces, notamment parmi celles que nous avons retenues, dans le cadre des premiers dispositifs expérimentaux d'ESPERENSE, pour l'enjeu « chêne ».



↑ **Figure 3.** Déficit hydrique annuel (calculé par IKS) correspondant aux peuplements sélectionnés de chêne sessile, et distribution par région de provenances. Noter que la variabilité de ce critère dans une région de provenances peut être importante, par exemple pour QPE105 (Sud Bassin parisien), comme l'indiquent les boîtes à moustaches du graphique ; il faut donc veiller, au sein de cette même région, à ne pas introduire dans une forêt à déficit marqué des plants d'une provenance ayant connu des conditions plus favorables. De même il peut y avoir des contrastes entre régions de provenances proches, comme entre QPE102 (Picardie) et QPE201 (Ardennes).

Méthodologie : notion de prise de risque selon l'essence/provenance

Avant de proposer des choix possibles d'espèces ou provenances par zones d'enjeu, nous avons jugé nécessaire de fournir aux expérimentateurs une indication du niveau de prise de risque selon le matériel forestier utilisé, au sens où certaines essences/provenances sont bien connues mais d'autres beaucoup moins. Pour cela, nous avons classé les espèces en espèces « aptes », c'est-à-dire les espèces actuellement réglementées, bien connues, et espèces « candidates » qui ne sont pas réglementées à l'échelle de la France. Chacune de ces catégories a été divisée en 3 niveaux de risque, en se basant sur un critère approprié (Tab. 1).

ESPÈCE APTE = ESPÈCE RÉGLEMENTÉE

Apte niveau 3	Essence/provenance vendue à plus de 5 000 000 plants en 2018
Apte niveau 2	Essence/provenance vendue entre 50 000 et 5 000 000 plants en 2018
Apte niveau 1	Essence/provenance vendue à moins de 50 000 plants en 2018

ESPÈCE CANDIDATE = ESPÈCE NON RÉGLEMENTÉE

Candidate niveau 2	Essence/provenance existant dans au moins 20 sites expérimentaux (IDF-ONF)
Candidate niveau 1	Essence/provenance existant dans 6 à 20 sites expérimentaux (IDF-ONF)
Candidate niveau 0	Essence/provenance existant dans 5 sites expérimentaux ou moins voire aucun (IDF-ONF)

↑ **Tableau 1.** Évaluation de la prise de risque selon le MFR utilisé. Plus le niveau est élevé, moins le risque est grand.

Pour les espèces aptes, ce critère est le nombre de plants vendus, ce qui permet d'avoir une bonne idée des conditions climatiques dans lesquelles on peut les trouver et de leur capacité à résister à tel et tel aléa, car plus une espèce est plantée, plus les sites où elle est installée sont variés et plus on a d'informations. Il faut toutefois un peu d'analyse car une espèce comme le pin maritime, qui est l'une des plus plantées, est massivement utilisée dans un secteur très limité, ce qui n'indique rien sur sa capacité à résister à certains aléas. Pour les espèces non réglementées, nous nous sommes appuyés sur les dispositifs expérimentaux ou plantations documentées de l'ONF et du CNPF/IDF que nous avons mis en place dans les années passées. Ces dispositifs sont de différentes natures mais doivent contenir plusieurs individus de la même espèce pour être pris en compte. Nous avons volontairement écarté les arbres de parcs et jardins comme les anciens dispositifs pour lesquels nous n'avions pas de données suffisantes.

L'expérimentateur peut ainsi évaluer le niveau de risque qu'il prend selon les essences/provenances qu'il envisage de tester, depuis le cas d'une espèce bien connue sur laquelle il va avoir de nombreuses références jusqu'à celui d'une espèce qui n'a pratiquement pas été introduite en France, même dans des sites expérimentaux.

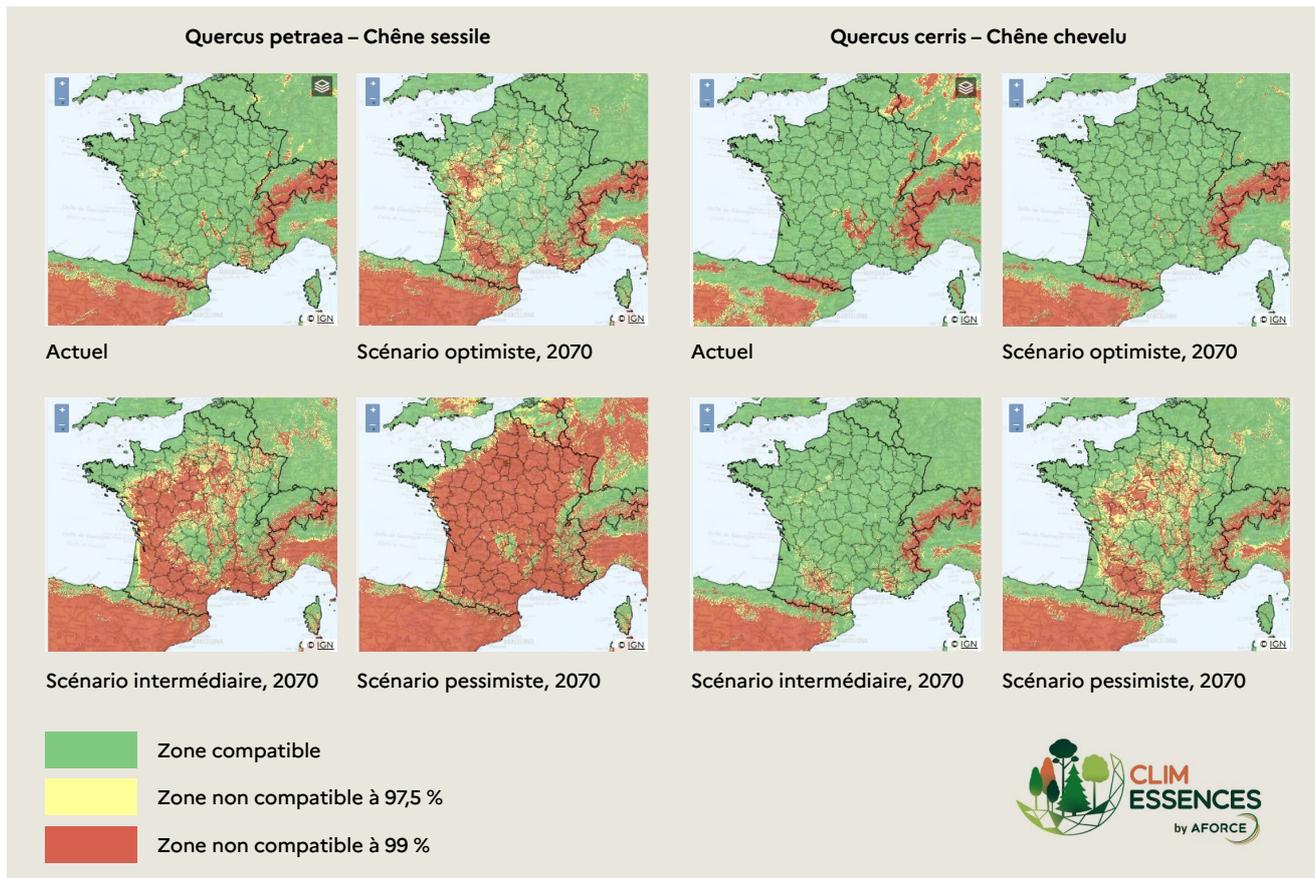
Listes d'essences par enjeu

Nous avons travaillé à partir de tous ces éléments pour fournir des listes d'espèces à expérimenter par grand enjeu. Nous avons commencé par celle de l'enjeu « chêne » (Tab. 2) puisque, dans le cadre du projet ESPERENSE, c'est sur cet enjeu qu'ont été posés les fondements d'un réseau expérimental d'évaluation, avec notamment les quatre premiers tests d'élimination (cf. contribution de Paillassa et al.). Cette liste d'espèces possibles pour l'enjeu chêne est assez étendue, et nous avons cherché en particulier à valoriser la grande diversité des espèces du genre *Quercus* (qui représente un quart de la liste).

Un point fondamental de l'élaboration de ces listes d'espèces pour guider les expérimentateurs et les gestionnaires est de **vérifier les compatibilités climatiques**. L'outil ClimEssences permet de le faire très simplement pour une cinquantaine d'essences. Pour une essence et un horizon temporel donné (2050 ou 2070), le module « compatibilités climatiques » de ClimEssences donne 4 cartes : l'aire de compatibilité climatique actuelle, l'aire de compatibilité future pour deux scénarios d'émissions de CO₂ (modéré = RCP 4.5 et tendanciel = RCP 8.5) d'après la moyenne des modèles de projection climatique, et enfin l'aire de compatibilité future pour le scénario tendanciel (RCP 8.5) selon le modèle de projection climatique le plus pessimiste. Quand on fait l'exercice pour le chêne sessile à l'horizon 2070 (Fig. 4), on voit bien l'urgence de se préoccuper de cette espèce puisque le scénario RCP 4.5 induit déjà une incompatibilité pour certains secteurs de production importants et que dans la pire hypothèse il ne lui restera la possibilité de se maintenir que sur la bordure de la Manche ou en altitude. Pour le chêne chevelu en revanche (Fig. 4), on peut noter qu'il peut être introduit actuellement et que même dans le cas le plus pessimiste, à la fois en termes de modèles et d'émissions de CO₂ et de modèle climatique, le territoire français lui restera largement favorable.

<i>Abies cephalonica</i> *	<i>Eucalyptus dalrympleana</i>	<i>Pseudotsuga menziesii</i> *
<i>Abies cilicica</i>	<i>Eucalyptus gunnii</i> *	<i>Quercus cerris</i> *
<i>Abies lowiana</i> *	<i>Eucalyptus x irbyi gundal</i> *	<i>Quercus chrysolepis</i>
<i>Abies nordmanniana</i> *	<i>Fraxinus mandshurica</i>	<i>Quercus faginea</i> *
<i>Abies nordmanniana ssp. equi-trojani</i> *	<i>Larix decidua</i>	<i>Quercus frainetto</i> *
<i>Abies pinsapo</i> *	<i>Liquidambar styraciflua</i> *	<i>Quercus ilex</i> *
<i>Acer pseudoplatanus</i> *	<i>Metasequoia glyptostroboides</i> *	<i>Quercus macranthera</i>
<i>Betula alleghaniensis</i>	<i>Pinus brutia</i> *	<i>Quercus nigra</i>
<i>Betula papyrifera</i>	<i>Pinus nigra ssp. nigra</i> *	<i>Quercus petraea</i> *
<i>Betula pendula</i> *	<i>Pinus nigra ssp. salzmannii var. corsicana</i> *	<i>Quercus pubescens</i> *
<i>Calocedrus decurrens</i> *	<i>Pinus pinaster</i> *	<i>Quercus robur</i> *
<i>Carya cordiformis</i>	<i>Pinus ponderosa</i> *	<i>Quercus rubra</i> *
<i>Castanea sativa</i> *	<i>Pinus radiata</i> *	<i>Quercus suber</i> *
<i>Cedrus atlantica</i> *	<i>Pinus rigida</i> *	<i>Quercus vulcanica</i> *
<i>Cedrus libani</i> *	<i>Pinus sylvestris</i> *	<i>Robinia pseudoacacia</i> *
<i>Cunninghamia lanceolata</i> *	<i>Pinus taeda</i> *	<i>Sequoia sempervirens</i> *
<i>Diospyros virginiana</i>	<i>Platanus orientalis</i>	<i>Sorbus torminalis</i>

← **Tableau 2.** Liste d'essences proposées à l'expérimentation pour l'enjeu chêne, à l'issue de la méthode de sélection. Essences « aptes » (réglementées) en vert ; essences « candidates » (non réglementées) en noir. Les essences marquées d'un « * » ont été choisies pour la première expérimentation ESPERENSE.



↑ **Figure 4.** Cartes de compatibilité climatique actuelle et à l’horizon 2070 proposées par ClimEssences pour le chêne sessile et le chêne chevelu. Voir aussi page suivante la note sur l’outil ClimEssences



© Manon Genin / ONF

↑ Élevage de plants de calocèdre, espèce considérée comme prometteuse

Pour conclure

Nous avons mis en place, en matière de choix d’espèces pour l’avenir, une méthodologie qui concerne ici les enjeux du projet ESPERENSE (pour maintenir des peuplements productifs) mais qui est applicable à d’autres enjeux. Cependant nous avons besoin d’augmenter les connaissances et les compétences sur les espèces envisagées, car un certain nombre d’entre elles n’ont pas été expérimentées ou trop peu. Et pour ce qui concerne les espèces natives, nous avons des informations localement, là où elles se trouvent, en tant que provenances possibles pour des régions climatiquement analogues dans un futur plus ou moins lointain, mais nous ne savons rien, par exemple, de ce que pourrait être la résistance du chêne de Bercé dans les conditions de déficit hydrique marqué telles qu’on en rencontre dès maintenant en Provence. La question qui se pose maintenant est donc celle-ci : les zones d’enjeu et les espèces/provenances envisageables étant identifiées comment tester ces nouvelles espèces et provenances pour répondre aux besoins actuels et futurs ?

Brigitte Musch, Valentin Bouttier ONF UMR BioForA,
Salomé Fournier ONF-RDI Dole

ClimEssences : un outil d'aide à la décision pour l'adaptation des forêts aux Changements Climatiques

L'impact des changements climatiques sur les forêts françaises ne fait plus de doute. Que ce soit directement ou indirectement, en cas d'attaques de ravageurs sur des peuplements fragilisés, l'évolution climatique est en train de changer le faciès de nos forêts.

Malgré l'incertitude sur l'ampleur et les manifestations de ces changements, il est nécessaire de rassembler le maximum d'informations et de simuler les différents scénarios possibles pour orienter la gestion sylvicole future. Pour cela les organismes forestiers de R&D ont développé des outils sylvo-climatiques destinés à établir un diagnostic de la situation et proposer des simulations pour aider les gestionnaires et propriétaires forestiers.

ClimEssences est l'un de ces outils. Il a été conçu par des équipes R&D de l'ONF et du CNPF et soutenu et repris par le RMT Aforce pour en faire une application web à destination de la filière. Il résulte de 2 projets de recherche également soutenus par Aforce, Caravane et IKSMAPS, l'objectif étant d'aider le forestier à anticiper l'évolution du climat et l'impact sur la forêt, et de lui donner des informations sur les alternatives possibles.

ClimEssences : aide au choix des essences en fonction du climat

L'évolution du climat impose désormais de représenter méthodiquement les liens entre les essences et le climat (d'où le nom de ClimEssences). Pour décrire les besoins écologiques des essences, en particulier en matière de climat, et le lien entre la répartition des essences et le climat actuel ou prévisionnel, l'outil mobilise deux approches.

La première approche concerne la **caractérisation rigoureuse de près de 150 espèces**, autochtones ou exotiques potentiellement intéressantes pour notre territoire. Elle consiste à compiler et synthétiser l'ensemble des connaissances issues de l'expertise cumulée, d'observations ou d'expérimentations scientifiques dûment documentées et publiées. Outre la description botanique et l'aire actuelle de répartition, chaque essence est ainsi renseignée selon 37 critères organisés par thèmes : facteurs limitants climatiques, et édaphiques ; diversité génétique ; croissance et production de bois ; autres services écosystémiques ; mise en œuvre sylvicole ; vulnérabilité aux risques biotiques, et abiotiques. Les fonctionnalités de ClimEssences permettent à l'utilisateur de trier des essences ou les comparer selon un ou plusieurs critères, en lui offrant une facilité de lecture sur la notation de chaque critère et le degré de fiabilité de l'information.

La seconde approche est la modélisation des facteurs climatiques qui limitent la présence et donc l'évolution des essences, via le modèle IKS. IKS est un modèle de **compatibilité climatique**, c'est à dire une représentation simplifiée des liens entre une espèce et le climat, qui permet, connaissant le climat d'un lieu pour une période de référence, d'évaluer si ce lieu est climatiquement favorable à l'espèce pour cette même période.

En pratique, IKS décrit le climat via trois indicateurs correspondant à des facteurs limitants pour les arbres (manque d'eau, excès de froid, et manque de chaleur ou d'énergie) ; il utilise ensuite des données de présence d'espèces pour calculer sur ces 3 indicateurs les seuils limites qui caractérisent leur enveloppe de compatibilité climatique. Pour les projections dans l'avenir, IKS utilise les trajectoires climatiques du GIEC (SSP2-4.5, SSP5-8.5) et 3 types de modélisations climatiques existantes (optimiste, moyenne et pessimiste) aux horizons temporels 2050 et 2070 ; soit 12 possibilités en plus du cas « actuel ».

Sur cette base, ClimEssences propose deux modules intéressants l'utilisateur :

- le module *Analogie climatique* permettant de visualiser, pour une zone donnée, où se trouve actuellement le climat qui sera observé sur cette zone dans le futur ; ainsi, il est possible de se projeter dans ce qui pourrait être le contexte forestier de demain ;
- le module *Compatibilité climatique* qui identifie pour les principales essences les territoires sur lesquels les prévisions climatiques futures prévoient ou non un risque de limitation de leur présence. Le résultat se présente sous forme de cartes avec les zones de compatibilité et de vulnérabilité de l'essence.

Un diagnostic à affiner

Par construction, ClimEssences reste un outil à utiliser à une échelle assez large correspondant aux Sylvo-écorégions, aux régions forestières IFN voire aux grands massifs forestiers. À cette échelle, il peut donner au propriétaire ou gestionnaire forestier une idée des essences possiblement adaptées aux conditions futures de leur forêt. De même il peut aider les instances régionales à revoir la liste des essences à préconiser dans le cadre des Directives et Schéma Régionaux d'Aménagement. Mais d'autres outils restent nécessaires pour un diagnostic local plus fin, prenant en considération des éléments du milieu comme le type de sol ou la topographie.

Quels dispositifs expérimentaux pour évaluer les essences en contexte de climat changeant : de l'académique au participatif ?

L'expérimentation forestière demande du temps ; or le temps manque, sans même parler des moyens, vu l'ampleur des questionnements. Toute l'ambition d'ESPERENSE est là : proposer une stratégie d'expérimentation bien cadrée, qui combine différents types de test en impliquant tous les acteurs, de façon à obtenir rapidement des réponses pertinentes.

La forêt et la gestion forestière n'échappent pas aux effets des évolutions climatiques en cours, évolutions rapides et déjà sensibles. Certaines essences de production sont en danger à court ou moyen terme, on en voit les signes sur le terrain, et cela indique qu'il va peut-être falloir utiliser des essences alternatives pour les relayer. Le problème concerne une grande partie du territoire national, parce que ce changement climatique est global ; la mise en évidence des zones à enjeu, c'est-à-dire les zones de production sujettes à forte préoccupation climatique, le confirme (cf. contribution de Kebli *et al.*). Pour y faire face, il existe un panel d'essences et de provenances alternatives potentielles, identifiées selon des critères et une démarche rigoureux (cf. contribution de Musch *et al.*). Pour l'ensemble des enjeux sur lesquels nous avons travaillé jusqu'ici, on arrive à une liste de 124 essences à évaluer, sans compter les provenances.

Connaissant les territoires à enjeu, connaissant les essences alternatives potentielles, comment s'y prendre pour l'expérimentation vu l'urgence de la situation et l'ampleur de la tâche ? « Quels dispositifs expérimentaux pour évaluer les essences en contexte de climat changeant : **de l'académique au participatif ?** ». Notre titre donne une indication de l'idée force de la stratégie élaborée dans le cadre du projet ESPERENSE : chercheurs, instituts techniques, organismes gestionnaires, forestiers de terrain, tout le monde travaille dans la même direction.

Le défi, la stratégie

L'objectif des expérimentations ESPERENSE, c'est d'évaluer ce panel d'essences et de provenances sur trois points principaux. Premièrement, l'adaptation au climat d'aujourd'hui et de demain : si on plante ces essences aujourd'hui, il faut déjà qu'elles supportent le climat actuel avant d'avoir à

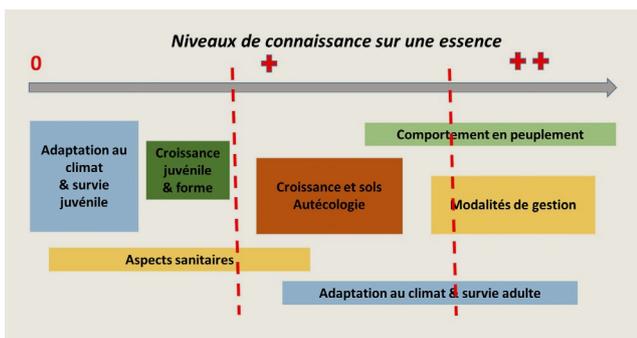
résister au climat de demain (problèmes de froid aujourd'hui, problèmes de chaleur excessive ou de stress hydrique demain). Deuxièmement la croissance, qui doit être compatible avec l'objectif de production de bois (bois de structure, surtout) : il est tout à fait envisageable d'avoir d'autres objectifs mais le projet ESPERENSE s'attache à la production de bois. Troisièmement, la compatibilité avec les sols forestiers de notre territoire national.

Le défi est énorme, ne serait-ce que par l'ampleur de l'évaluation : il y a beaucoup d'essences potentiellement intéressantes, beaucoup de territoires à enjeu et les combinaisons possibles représentent un volume de travail colossal. Mais en plus il y a urgence, nous sommes pris à la gorge en quelque sorte : les opérateurs de terrain voudraient tout de suite des réponses alors que l'expérimentation forestière demande du temps. Face à cette ampleur et à cette urgence, il faut essayer de travailler le plus vite possible... sachant que la disponibilité du matériel de base ne va pas de soi : l'installation des expérimentations suppose qu'on ait pu produire en temps voulu les plants des essences prévues, c'est-à-dire toute une logistique amont qui commence avec l'approvisionnement en graines et qui, pour des essences nouvelles, est souvent sujette à incidents ou obstacles. Les choses vont se faire progressivement et pas aussi rapidement qu'on l'aurait souhaité.

L'évaluation d'une essence nouvelle (pour un territoire de production donné) demande de répondre à un certain nombre de questions aux différents stades de développement ; or si on dispose de quelques indications pour certaines d'entre elles d'après des références expérimentales existant en France, d'autres nous sont très peu connues.

On peut représenter par un gradient l'évolution du niveau de connaissance tiré de l'expérimentation sur une essence, et positionner le long de ce gradient les types de question-

nement auxquels on cherche à répondre dans la perspective d'une éventuelle utilisation à large échelle (Fig. 1). Partant de zéro, les premières questions concernent forcément les aptitudes juvéniles de l'espèce : la faculté d'adaptation au climat, avec notamment la survie (la réponse est assez rapide), ainsi que la croissance et la forme à l'état jeune, informations qui peuvent être importantes pour la suite. Sans oublier les aspects sanitaires susceptibles d'impacter l'espèce dans ses premières années : se demander si on peut les maîtriser, vérifier qu'il n'y a pas de néopathogènes, voir si l'espèce supporte les pathogènes existants... Lorsque cette connaissance initiale est acquise on peut s'intéresser aux stades plus âgés, en cherchant à savoir dans quelle mesure l'essence est véritablement adaptée aux sols des régions forestières, à mieux comprendre son autécologie. Et à mesure qu'on avance dans le temps on cherche enfin à progresser dans les connaissances sur la vie de cette essence en peuplement, sur la façon de la gérer, et on commence à percevoir dans la durée les aspects de survie par rapport au climat. L'acquisition de tout le corpus d'informations dont on a besoin se fait ainsi en trois grandes phases, et ce schéma se retrouve dans les différents niveaux d'évaluation proposés pour le réseau ESPERENSE.



↑ **Figure 1.** Les bases de la stratégie d'évaluation des essences, en 3 phases selon le niveau de connaissance préalable

La solution ESPERENSE proposée

La solution imaginée dans le cadre du projet ESPERENSE consiste à avancer ensemble pour faire des évaluations communes. Les évaluations s'appuient donc sur les équipes de recherche et développement mais aussi sur les équipes de terrain et l'activité des gestionnaires. Leurs compétences et savoir-faire sont différents mais complémentaires, et peuvent être utilement conjugués pour avancer le plus rapidement possible. Cela présente aussi l'avantage que, en impliquant l'ensemble de la recherche, du développement et des gestionnaires, on peut avoir une répartition territoriale des évaluations beaucoup plus satisfaisante.

Naturellement, cela nécessite des méthodes appropriées. Nous proposons ainsi **trois niveaux de test** d'évaluation, qui traduisent les trois phases de la stratégie expérimentale : les tests d'élimination, les tests de comportement, et les îlots d'avenir. Trois types de tests qui peuvent être lancés simultanément, mais pour des lots d'essences différents selon le niveau des connaissances déjà disponibles.

Nous projetons aussi d'avoir **une approche multisite** : ne pas installer dans un coin 3 ou 4 dispositifs dont les résultats n'auraient forcément qu'une portée limitée, mais avoir un grand nombre de sites bien répartis sur l'ensemble du territoire de façon à couvrir la variabilité des situations rencontrées par les gestionnaires et en tirer le meilleur parti possible. Enfin dans le cadre de cette problématique climatique, nous allons mettre en place une nouvelle approche, dite **des sites miroirs**. Voyons cela en détail.

Le test d'élimination

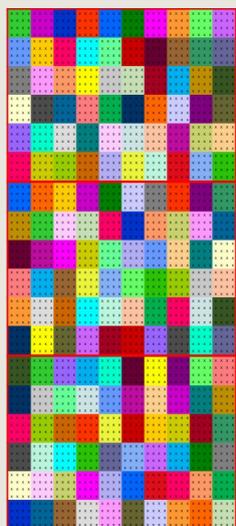
Le premier niveau de test est celui des tests d'élimination : l'objectif est de sélectionner rapidement des essences potentielles parmi un grand nombre d'essences, mais de faire cette évaluation sur de bons sols, correspondant aux enjeux de production concernés. Le résultat attendu, très simple, est d'arriver à deux listes : une liste d'essences à évaluer de façon plus approfondie et une liste d'essences à abandonner pour des raisons identifiées. C'est clairement du *go/no go* : soit on continue, soit on arrête en fonction des résultats observés pour chaque essence. On va ainsi abandonner celles qui ont une sensibilité climatique particulière, ou une croissance juvénile franchement insuffisante, ou encore une sensibilité à des agents pathogènes repérés. Rappelons que les essences invasives sont *a priori* exclues de la liste des essences ESPERENSE (c'est un des prérequis de la sélection des espèces à expérimenter) et qu'elles ne figureront donc pas dans ces tests d'élimination, ni dans les deux autres niveaux de test.

Le plan d'expérience (Fig. 2a) est assez complexe puisque, sur un site qui fait un peu plus de 2 ha, il s'agit de tester 40 à 60 essences/provenances (autrement dit 40 à 60 unités génétiques) à raison de 48 arbres suivis par essence/provenance. Et pour pouvoir faire des analyses statistiques valides, c'est réparti en 3 blocs où chacune des essences/provenances est représentée par un placeau de 16 arbres et où leur position relative est aléatoire. Pour chaque arbre on va suivre régulièrement pendant 10 ans la survie et la croissance juvénile, avec en outre une vigilance sanitaire particulière. Les acteurs pressentis pour ce type d'expérimentation assez exigeant sont bien évidemment INRAE, FCBA, le CNPF/IDF et le réseau RDI de l'ONF.

Le test de comportement

Le deuxième niveau, c'est le test de comportement (Fig. 2b). Il s'agit d'évaluer à moyen terme le comportement d'essences/provenances d'intérêt potentiel sur des sols différents. Ne sont retenues là que les essences dont on sait déjà qu'elles sont potentiellement intéressantes, mais pour lesquelles on manque d'information sur leur autécologie et leur comportement en peuplement : tolérance à la concurrence et, à plus long terme, réaction à l'éclaircie. Le plan d'expérience est beaucoup plus simple que le précédent avec 3 à 8 essences étudiées sur un site de 1 à 2 ha, chacune étant représentée par un placeau de 252 arbres où ne sont mesurés que les 64 arbres du centre. Il n'y a pas de répétition (bloc unique), l'idée étant plutôt d'avoir des mini peuplements de taille suffisante pour pouvoir approcher les questions de comportement.

Le test d'élimination



Objectif : Sélectionner rapidement des essences potentielles parmi un grand nombre, sur des bons sols et selon les enjeux

Résultats attendus

Liste d'essences à évaluer de façon plus approfondie
Liste d'essences à abandonner pour des raisons identifiées (sensibilité climatique, croissance juvénile insuffisante, sensibilité aux agents pathogènes)

Plan d'expérience

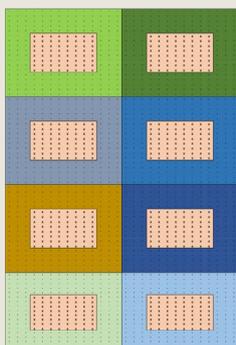
Entre 40 et 60 essences/provenances étudiées
Unités expérimentales de 48 arbres suivis par essence/provenance
Réparties en 3 blocs (3 PU de 16 arbres)
Surface de plus de 2 ha

Suivis :

Survie et croissance juvénile & vigilance sanitaire
Très régulier dans le temps
Pendant 10 ans

Acteurs : INRAE, FCBA, CNPF, ONF

Le test de comportement



Objectif : Évaluer à moyen terme le comportement d'essences/provenances d'intérêt potentiel sur des sols différents

Résultats attendus

Éléments d'autécologie
Comportement / concurrence
Réaction à l'éclaircie

Plan d'expérience

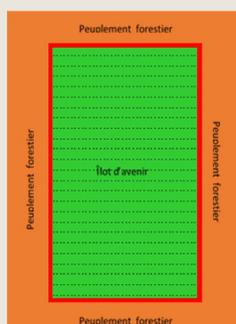
3 à 8 essences/provenances étudiées
252 arbres dont 64 suivis
Pas de répétition
Surface entre 1 et 2 ha

Suivis :

Survie et croissance & vigilance sanitaire
Régulier dans le temps
Pendant 30 ans

Acteurs : CNPF, ONF, Groupes de progrès FP, gestionnaires privés

Les îlots d'avenir



Objectif : Apprivoiser une nouvelle essence/provenance

Résultats attendus

Confirmation de l'intérêt de l'essence
Identification d'adaptations nécessaires par rapport à des gestions classiques

Plan d'expérience

1 essence/provenance étudiée
Nombre d'arbres fonction de la densité x surface
Pas de répétition
Surface entre 0,5 et 2 ha

Suivis :

Survie et croissance & vigilance sanitaire
Peu régulier
Durant la vie du peuplement

Acteurs : ONF, Groupes de progrès FP, gestionnaires privés

↑ **Figure 2.** Les trois niveaux de test d'évaluation

Ce type de test suppose un suivi régulier sur une trentaine d'années, les mesures et observations portant toujours sur des aspects de survie à moyen terme, de croissance et sur la vigilance sanitaire. Pour ce qui est des acteurs, ces tests de comportement relèvent plutôt du CNPF et de l'ONF mais aussi des groupes de progrès de la forêt privée, voire de gestionnaires privés s'ils souhaitent se lancer dans ce type d'expérimentation.

Les îlots d'avenir

Le troisième niveau de test est celui des îlots d'avenir, dont l'objectif est d'approviser une nouvelle essence/provenance. Ce qu'on en attend, c'est la confirmation de l'intérêt de l'essence et l'identification des adaptations sylvicoles nécessaires pour sa gestion. Les îlots d'avenir sont de véritables petits peuplements monospécifiques de 0,5 à 2 ha (on change d'échelle par rapport à l'expérimentation *sensu stricto*) et le nombre d'arbres dépend essentiellement de la densité et de la surface. Le suivi porte toujours sur la survie, mais en visant le stade adulte à très long terme, la croissance en peuplement, et la vigilance sanitaire. L'idée c'est de suivre le peuplement très longtemps. Les acteurs prévus sont l'ONF (équipes de gestion), les groupes de progrès de la forêt privée et aussi des gestionnaires privés.

L'évaluation sur des critères de croissance et survie est-elle suffisante ?

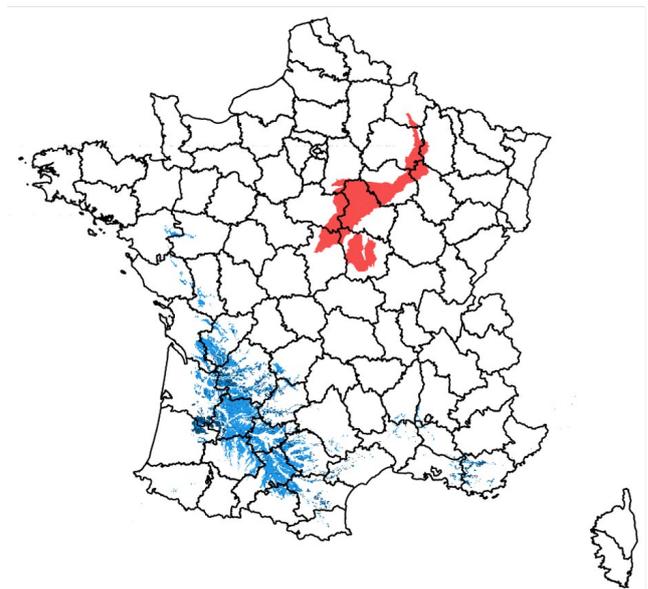
Il faut d'abord rappeler que les essences à tester ont déjà fait l'objet d'une sélection sur la base des ressources bibliographiques, en intégrant de multiples critères dont notamment les qualités d'usage des bois.

Dans le cadre de l'expérimentation, les critères suivis sont nécessairement des critères mesurables, la survie bien sûr et la croissance : ce sont les deux critères essentiels, auxquels peuvent s'ajouter dans un deuxième temps des critères « annexes » comme les critères de forme.

Les sites miroir aujourd'hui et demain

Vu le nombre d'essences/provenances à évaluer pour une zone d'enjeu, vu la disparité des niveaux de connaissance sur ces essences/provenances, on comprend bien l'intérêt pour tous les opérateurs intéressés de joindre leurs efforts et compétences, et d'entreprendre sans tarder les 3 types de tests. Mais le temps presse vraiment, le changement climatique ne va pas nous attendre. D'où l'introduction d'une approche nouvelle pour la conception du réseau d'expérimentation : l'anticipation par analogie climatique, avec la notion de sites miroirs.

De quoi s'agit-il ? À partir d'hypothèses sur le futur (scénario d'émissions, horizon temporel), l'outil ClimEssences permet de localiser où est aujourd'hui notre climat de demain (Fig. 3). Ainsi pour la zone d'enjeu considérée (qui apparaît en rouge) on voit où trouver aujourd'hui un analogue climatique (en bleu sur la carte) de notre situation à tel ou tel horizon temporel. Le principe du site miroir, c'est que pour chaque essai installé dans une zone à enjeu, on installe un essai identique dans la zone analogue climatique, de sorte qu'on a le même essai sous deux climats différents représentant le présent et le futur de la zone d'enjeu. La difficulté majeure de mise en place de ce type de site miroir, c'est d'avoir un sol de qualité proche.



↑ **Figure 3.** Carte d'analogie climatique produite par l'outil ClimEssences pour la zone d'enjeu chêne sessile (GSER B5) pour l'hypothèse RCP 4.5 à l'horizon 2050.

Zone d'enjeu en rouge, analogue climatique en bleu. L'anticipation par analogie climatique consiste à implanter « en miroir » les mêmes dispositifs dans l'une et l'autre zone, sur des sols équivalents.

Mise en pratique

Dans le cadre du projet ESPERENSE, nous nous devons non seulement de définir un cadre méthodologique, mais aussi d'initier le réseau multipartenaire d'évaluation des ressources génétiques forestières pour le futur. Au cours de l'hiver 2020-2021, nous avons donc installé 13 sites d'expérimentation (sur 14 prévus) pour l'enjeu « Chênes », avec les 3 niveaux de test (tests d'élimination, tests de comportement et îlots d'avenir) pris en charge par les différents partenaires du projet et l'aspect miroir entre zone d'enjeu et analogue climatique (Fig. 4).

Avec l'installation concrète de ces premiers dispositifs, nous avons une parfaite illustration du principe du réseau ESPERENSE et de ce qu'on souhaite faire à l'avenir. Souhait qui se résume ainsi : face à l'enjeu majeur du maintien d'une production de bois, ESPERENSE propose une évaluation des essences nouvelles en 3 temps et sous 2 climats à la fois.

Éric Paillassa CNPF-IDF, Patrick Pastuszka INRAE, Alain Berthelot FCBA, Didier François ONF



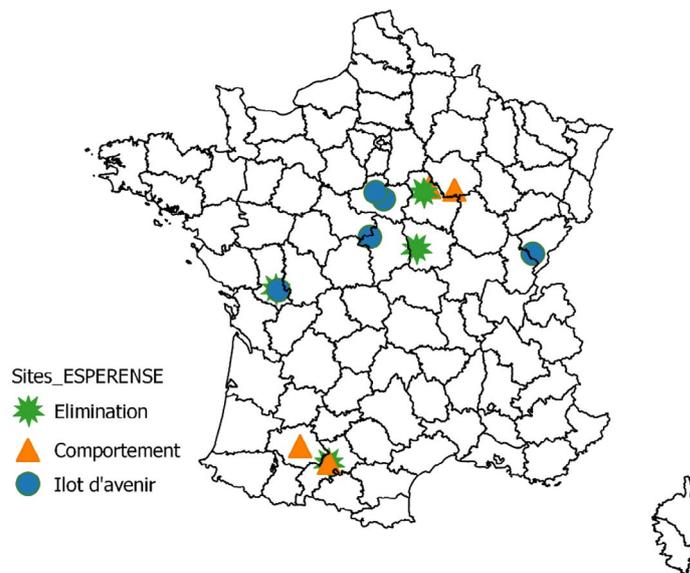
© Sylvain Gaudin / CNPF

↑ Jour de plantation sur le test de comportement de Praslin (10)

Tests d'élimination		Zone à enjeu	Zone analogue climatique
	ONF		
FCBA		FD de Guérgny (58) P85 – ONF	
INRA		Forêt de Joigny (89) – SFCDC	Lherm (31) – propriété privée

Tests de comportement		Zone à enjeu	Zone analogue climatique
	CNPF		Bois de Praslin (10) – SFCDC
Irstea		Forêt de Potence (89) – SFCDC	

Ilots d'avenir		Zone à enjeu	Zone analogue climatique
	ONF		FD Vierzon (36) FD Orléans (45) x 2 FD Levier (25)



↑ **Figure 4.** Les réalisations 2020-2021 pour l'enjeu « chênes » ciblé par le projet ESPERENSE (GSER B7 et B5) pour initier le réseau. Si la symétrie zone à enjeu / zone analogue a pu être respectée pour les tests d'élimination et le comportement, cela n'a pas pu être fait dans les délais du projet sur les îlots d'avenir ONF.



Comment s'approvisionner en nouvelles semences forestières de qualité pour l'élevage de plants expérimentaux ?

L'installation de plantations expérimentales -qui plus est en délai contraint- nécessite d'anticiper toute la logistique amont, de l'approvisionnement en graines jusqu'à la livraison des plants prévus en temps voulu, sur les sites dûment préparés. C'est en soi une tâche complexe, surtout pour des espèces nouvelles.

Pour installer des dispositifs expérimentaux, il faut disposer en temps voulu des plants d'essences et provenances à tester. Cela suppose d'anticiper toute la chaîne d'approvisionnement depuis la récolte des graines qui servent à produire les plants, chaîne qui peut s'avérer complexe pour des essences nouvelles. La question de l'approvisionnement était donc une tâche à part entière du projet ESPERENSE.

Nous présentons ici les différentes étapes qui ont permis d'alimenter les 8 tests d'élimination et de comportement installés dans qui ont été installés au cours de l'hiver 2020-2021 dans le cadre du projet (cf. contribution de Paillassa et al.).

S'approvisionner en semences

Pour mémoire, pour l'enjeu « chênes », nous disposions en septembre 2019 d'une liste d'une cinquantaine d'espèces à expérimenter. La première opération a été de confronter cette liste de souhaits à la disponibilité en semences. Précisons qu'à ce stade très opérationnel on ne peut pas se contenter de raisonner en termes d'espèces : il faut raisonner en termes d'unités génétiques (UG) puisqu'on doit aussi fixer des zones géographiques de provenance pour celles dont l'aire bioclimatique est très étendue.

■ Une disponibilité assez limitée

En France, nous avons consulté les deux semenciers français (Vilmorin et l'ONF) qui nous ont indiqué leurs disponibilités et, grâce à l'ONF, nous avons pu en outre organiser deux récoltes spécifiques : l'une pour *Sequoia sempervirens* en forêt de Bercé et l'autre pour *Pinus rigida* en forêt de Vouzeron, deux peuplements signalés lors du recensement des peuplements atypiques à l'ONF. Dans les deux cas, la base génétique est assez large et on sait, d'après des études

réalisées pour l'évaluation de la régénération naturelle d'espèces introduites (chêne rouge, Douglas), qu'en une génération il y a déjà un début d'adaptation au territoire d'introduction. De plus, en évitant l'importation de graines depuis l'aire d'origine, on se soustrait au risque d'importation involontaire de pathogènes ou parasites séminiphages.

En ce qui concerne les importations de graines, des programmes antérieurs (REINFFORCE, FORECCAsT et TREK) avaient déjà permis de tester des réseaux d'approvisionnement sur différents continents et un certain nombre de fournisseurs fiables avaient pu être identifiés. Nous les avons contactés pour connaître les provenances qu'ils pouvaient nous fournir. De plus, à l'époque où nous faisons ces recherches, il y avait entre l'ONF et la Turquie une collaboration scientifique qui nous a permis d'avoir accès à des UG très difficiles à trouver. Néanmoins ces pistes d'importation sont fragiles et, par rapport à la cinquantaine d'espèces listées au départ, la consultation de ces différents fournisseurs a fortement limité le choix des UG qu'il a été possible de produire dans le cadre des tests d'ESPERENSE.

■ Réglementation, démarches : des compétences à maîtriser

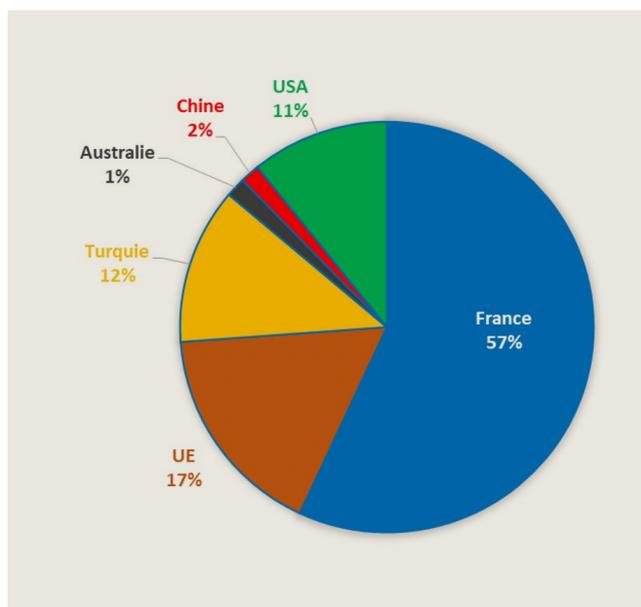
Par ailleurs, s'approvisionner en semences implique de respecter des réglementations complexes. Des réglementations phytosanitaires d'une part, commerciales d'autre part, et à différentes échelles : internationale, européenne et nationale. Concernant la santé des végétaux, il faut savoir en particulier que l'importation de graines du genre *Pinus* en provenance des USA est interdite puisqu'elles peuvent être contaminées par un champignon, le *Fusarium circinatum*, qui est un pathogène de quarantaine en Europe. De son côté le commerce des semences fait l'objet de règles particulières puisque les semences sont elles-mêmes un produit très particulier dans la mesure où on ne peut pas évaluer facilement leur qualité au moment où on les achète.

Ces réglementations exigent d'effectuer un certain nombre de démarches administratives qui ne s'improvisent pas : des démarches différentes selon qu'on s'adresse à des pays de l'Union européenne (UE) ou non. Dans l'UE, il s'agit simplement (si on peut dire) des formalités concernant le passeport sanitaire. Pour les pays hors UE, il s'agit d'obtenir le certificat phytosanitaire exigé en vertu de la Convention internationale pour la protection des végétaux, de produire une déclaration d'importation et de satisfaire aux formalités en douane (+ frais éventuels). Nous ne détaillerons pas plus avant, néanmoins il faut savoir que ces démarches nécessitent des compétences particulières à maîtriser et surtout à actualiser : entre 2019 et 2020 les réglementations avaient changé, dans un sens plus strict.

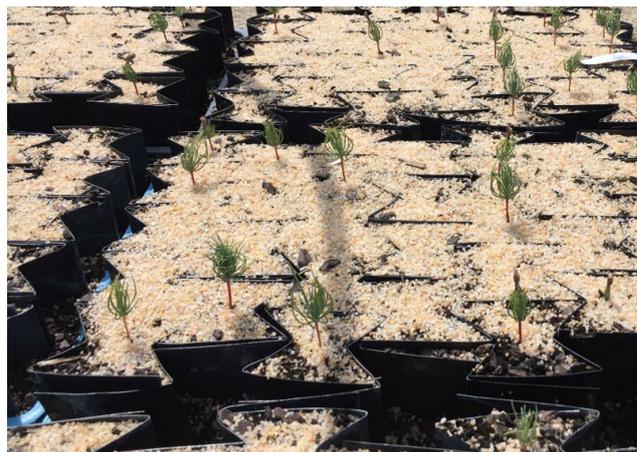
Les graines utilisées pour les tests d'ESPERENSE

Finalement nous avons pu nous procurer 65 unités génétiques qui appartiennent à 36 espèces différentes, avec des origines géographiques plus ou moins bien connues. La plupart, plus de 80 %, viennent d'Europe ou pays proche : France surtout, mais aussi Roumanie, Bulgarie, Espagne, Hongrie... et Turquie (Fig.1).

Pour les tests, le besoin n'était en fait que de 60 UG, mais nous avons gardé une marge de sécurité pour pallier d'éventuels incidents. Sur les 60 UG finalement utilisées dans les dispositifs, 14 étaient disponibles dans des pépinières privées et ont donc été achetées ; pour les 46 autres, et en particulier toutes celles qui concernaient des espèces ou des provenances peu ou pas connues en France, les plants ont été produits par le PNRGF (pôle national de ressources génétiques forestières) sur les sites de Cadarache et Guémené Penfao. Il faut préciser ici que les élevages se sont déroulés en pleine crise sanitaire Covid-19 et que certains semis ont dû se faire pendant le premier confinement, dans des conditions difficiles vu les limitations drastiques d'effectifs à ce moment-là.



↑ **Figure 1.** Origine géographique des 65 Unités Génétiques fournies pour les premiers dispositifs ESPERENSE



© Patrice Brahic / ONF-PNRGF

↑ Levée du semis de Cèdre du Liban (*Cedrus libani*) de provenance turque (Egirdir) à la pépinière de Cadarache, juin 2020.

Élever des plants d'espèces nouvelles pour des expérimentations

La quasi-totalité des plants qui ont été élevés pour les expérimentations d'ESPERENSE l'ont été en conteneur (200, 400, 600 cc voire 1l selon l'espèce), hors sol. Pour ceux qui ont été achetés (espèces classiques), nous avons recueilli auprès des pépiniéristes les informations relatives à l'itinéraire technique utilisé : informations légales à minima, avec éventuellement quelques indications supplémentaires peu détaillées, au bon vouloir de chacun. En revanche, pour les plants d'espèces méconnues qui ont été produits par l'ONF, dans les pépinières expérimentales du PNRGF, il y a eu un suivi quantitatif assez fin de l'élevage de chaque UG (conditionnement, date de semis, levée, aoûttement, etc.) avec bilans à différents stades clés (survie, état sanitaire, photos). Dans tous les cas, des mesures de hauteur et de diamètre au collet ont été réalisées en fin d'élevage sur un échantillon de 200 plants de chacune des 60 UG ; en ce qui concerne les UG du commerce, ces mesures ont eu lieu à Guémené Penfao où tous les plants ont été regroupés avant mise en place. L'objectif était de récolter le maximum d'information et en particulier sur les UG qui étaient peu connues jusqu'alors en France, pour pouvoir assurer une traçabilité indispensable.



© Sabine Girard / CNPF

↑ Production de plants pour ESPERENSE à la pépinière de Guémené, juillet 2010

Itinéraires d'élevage : des observations à consolider

Les élevages réalisés par le PNRGF ont permis de faire un certain nombre d'observations, qui restent évidemment à consolider. On a constaté notamment que pour certaines espèces la durée d'élevage en un an était insuffisante (c'est le cas de *Quercus vulcanica* et *Q. frainetto*) ou que pour d'autres espèces comme *Quercus cerris*, la durée d'élevage variait selon les provenances. Ainsi les provenances française et italienne de *Quercus cerris* ont donné en un an des plants tout à fait utilisables de plus de 20 cm (Fig. 2), tandis qu'en revanche la provenance bulgare aurait nécessité un an d'élevage supplémentaire.

Constitution d'une base de données

Pour archiver l'ensemble des données et des informations qui ont été recueillies au PNRGF et aussi dans les pépinières privées, nous avons entrepris de constituer une base de données qui concerne l'identité de chaque UG ainsi que les caractéristiques des semences et les traitements qui leur ont été appliqués, l'itinéraire d'élevage des plants et enfin la caractérisation des plants produits en un an, d'après les mesures des 200 plants échantillonnés en fin de culture. L'objectif de cette démarche est de conserver, de façon ordonnée, des informations qui pourront être mises ultérieurement à disposition de la filière lorsque ces espèces seront plus demandées.

Organiser la livraison des plants

Après l'approvisionnement en semences et l'élevage des plants, il a fallu organiser l'acheminement des 20350 plants sur les 8 chantiers de plantation correspondant aux 4 tests d'élimination et 4 tests de comportement. Dans un premier temps, tous les plants ont été regroupés sur le site de Guémené pour étiquetage individuel et constitution de lots d'UG par bloc et par site.

Pour cette étape, nous insistons sur l'important travail de coordination et d'organisation qu'il a fallu pour livrer en temps et en heure les chantiers qui étaient préparés et les équipes mobilisées.

Les points de vigilance

Maintenant que les plants sont installés, quels enseignements peut-on tirer de cette expérience, et quels sont notamment les points de vigilance à souligner ?

Le premier c'est la **traçabilité**. Dans ce type d'opération, il faut qu'on puisse tracer l'origine géographique des semences, donc sourcer vraiment le peuplement qui a été récolté, l'idéal étant de pouvoir disposer de ses coordonnées GPS. La traçabilité s'entend aussi sur l'ensemble des opérations techniques qui ont été pratiquées en pépinière, que ça concerne les graines ou les plants, puisqu'un certain nombre d'UG qui ont été élevées dans le cadre d'ESPERENSE l'ont été pour la première fois, et donc il était important de bien archiver les informations recueillies.



↑ **Figure 2.** Elevage des plants de chêne chevelu (*Quercus cerris*) de 3 provenances différentes : hauteur des plants en juillet 2020
Au bout d'un an, les plants de provenance bulgare n'ont pas atteint une hauteur suffisante pour être utilisables.

L'autre point de vigilance, c'est l'**ANTICIPATION**. C'est un mot-clé très important que nous avons en tête dès le départ du projet, et malgré tout il y a encore des progrès à faire. Il est nécessaire de mettre en place un rétroplanning rigoureux, qui prenne bien en compte les contraintes et écueils possibles depuis l'approvisionnement en graines et plants jusqu'à l'installation effective.

© Patrice Brahic / ONF-PNRGF

Anticiper la production des UG

Côté approvisionnement, le choix des UG que l'on veut mettre en expérimentation doit être fait très tôt, bien avant que les graines soient récoltées. Cela signifie par exemple que si on a la chance de travailler avec des UG qui sont régulièrement sur le marché des semences, il faut néanmoins se positionner avant la récolte des graines, c'est à dire avant l'été qui précède la date prévue du semis pour des récoltes réalisées à l'automne dans l'hémisphère nord, voire en tout début d'année lorsque ça concerne des graines récoltées dans l'hémisphère sud. C'est encore plus important si l'on doit lancer et organiser des récoltes de graines spécifiques pour avoir des provenances particulières, en France et *a fortiori* à l'étranger. Par ailleurs, il faut dans ce type d'opération prévoir des marges de sécurité, c'est-à-dire prévoir des UG supplémentaires car on n'est pas à l'abri d'un problème de récolte (qui s'avérerait finalement infructueuse), et prévoir un nombre de plants supérieur au besoin réel parce qu'il peut y avoir des accidents de natures diverses au moment de l'élevage. Dans le cadre d'ESPERENSE, nous avons prévu environ 10 % d'UG supplémentaires par rapport à notre besoin, et 20 % de plants supplémentaires par UG. Pour le rétroplanning des opérations, il faut aussi intégrer correctement la durée de production des plants. Si on peut généralement faire des plants en un an, il y a encore beaucoup d'espèces, comme les sapins, qui se produisent en 3 ans, et on peut toujours avoir des surprises en cours de route : ça a été le cas pour certaines espèces qu'il aurait sans doute fallu produire en 2 ans.

Préparer précocement les sites de test et prévoir la logistique

Côté terrain et chantier, il faut absolument avoir identifié les sites sur lesquels seront installées les expérimentations au moins un an avant la plantation. Dans le cadre d'ESPERENSE, les plantations étaient initialement prévues pour l'automne 2019 mais, les sites n'étant pas prêts, on a dû décaler la plantation au printemps 2020. Ce décalage a engendré de gros soucis dans la mesure où il a fallu gérer les quelque 20000 plants qui attendaient en pépinière, c'est-à-dire par exemple prévoir des traitements phytosanitaires supplémentaires pour garantir leur état sanitaire. Tout retard de plantation, surtout de cette amplitude, perturbe sévèrement l'organisation en pépinière et induit un risque de dégradation des plants. Plus précoce est l'identification des sites, meilleure est l'organisation des livraisons, et meilleures aussi sont les conditions pour solliciter les affréteurs ou transporteurs ; il faut vraiment veiller à respecter un délai suffisant. Enfin notre expérience a révélé que, même quand tout se passe bien jusqu'à la livraison, la plantation peut devoir être différée pour diverses raisons et qu'il faut donc impérativement prévoir des solutions de stockage temporaire après réception des plants.

Quelques propositions pour l'avenir

De tout ce travail nous avons tiré quelques propositions pour faciliter l'organisation de ce type d'opération à l'avenir.

Tout d'abord, nous proposons une centralisation des recherches et de l'achat de semences d'UG rares : il n'est pas question que chacun « bricole » dans son coin, c'est très chronophage et compliqué. Sans préjuger des décisions à venir, nous pensons que le PNRGF aurait toute légitimité pour cela, au titre de ses missions d'intérêt général et en vertu de l'expérience acquise dans ce domaine. Nous proposons aussi de constituer des réserves pour certaines UG dont les graines se conservent pour pouvoir les utiliser dans de futurs dispositifs ; constituer une sorte de banque de graines. Par exemple nous avons été informés qu'il y aurait a priori cette année (2021) une bonne récolte de calocèdre aux USA, et l'idéal serait donc que nous soyons armés pour faire quelques réserves sur cette espèce considérée comme prometteuse. Il serait également souhaitable que chaque année soit produite une certaine quantité de plants d'UG à expérimenter, une sorte de fonds de roulement mis à disposition des différents organismes pour installer des dispositifs expérimentaux.

Ces trois éléments nécessitent en fait un pilotage collectif des opérations d'approvisionnement en graines et plants pour l'expérimentation, pilotage pour lequel il nous semble indispensable d'avoir un animateur identifié avec les diverses compétences qui ont été évoquées au fil de cet exposé, compétences techniques ou relatives à la réglementation, la logistique.

Et nul doute qu'avec encore un peu plus de recul, il y a bien d'autres propositions à venir. En attendant, nous tenons à remercier l'ensemble du personnel du PNRGF qui a beaucoup donné, dans des conditions compliquées, pour que les plants soient produits.

Sabine Girard CNPF-IDF, Patrice Brahic ONF-PNRGF,
Joël Conche ONF



Réseau ESPERENSE : une évaluation participative des essences de demain

Le projet ESPERENSE est achevé, vive le réseau ESPERENSE ! Un réseau de sites expérimentaux répondant à la stratégie et aux principes définis dans le projet mais aussi une communauté d'expérimentateurs très investis, chacun à son niveau, de la recherche à la gestion forestière...

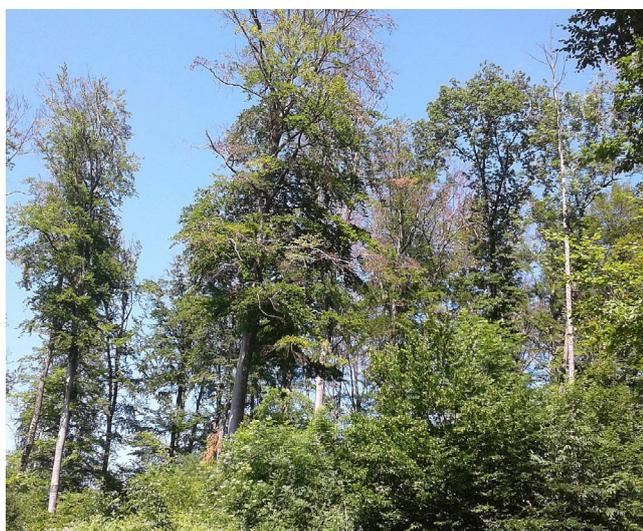
Le projet ESPERENSE a bien posé les principes et méthodes d'un réseau d'expérimentations multipartenaire destiné à évaluer les essences possibles pour demain. Maintenant, en pratique, comment passer du *projet* au *réseau* ESPERENSE pour cette évaluation participative des essences ?

Avant d'aller plus loin, il n'est pas inutile de rappeler l'utilité et même la nécessité d'une démarche participative dans le contexte qui nous préoccupe. Nombreuses sont les publications qui soulignent la rapidité des évolutions actuelles du climat au regard du temps nécessaire à l'adaptation naturelle des essences ; une vitesse qui n'a jamais eu d'équivalent dans le passé. La question de l'adaptation à ces évolutions touche donc toutes les espèces, qu'elles soient natives ou introduites, et nous observons dès maintenant une amplification des dépérissements, non seulement sur de multiples essences mais dans tous types de peuplements forestiers. On ne voit pas actuellement de différence par rapport à la structure de ces peuplements.

Nous sommes donc confrontés à un phénomène inconnu et d'une ampleur inégalée. De mémoire de forestier, et même si on pense à l'épisode des « pluies acides », jamais on n'a connu de dépérissements à l'échelle de ce qui se profile maintenant. C'est pourquoi nous devons avoir une méthode d'acquisition et d'intégration des connaissances en simultané, ce qu'on appelle de la Recherche Action, et travailler tous ensemble. On a besoin de tous pour acquérir et améliorer les connaissances, vu les nombreuses espèces à évaluer en conditions nouvelles et sachant on n'a pas d'information suffisante pour beaucoup d'entre elles.

Pourquoi participer -quel intérêt- et comment ?

L'intérêt de participer à cette évaluation collective, c'est d'agir dans une communauté expérimentale et de partager les questionnements ; qu'on soit en forêt publique ou privée, les questions sont les mêmes. Cette communauté expérimentale permettra aussi d'échanger les connaissances et les compétences, qui vont pouvoir être mieux utilisées, et de capitaliser ensemble sur les réussites mais aussi les échecs. Il ne faut surtout pas passer les échecs sous silence, car ils apportent des éléments de compréhension précieux quand ils sont bien notés et explicités. Dans la masse des plantations d'essences diverses réalisées dans le passé (avec le FFN notamment), il y a eu des échecs sur lesquels nous avons cherché à nous documenter mais nous n'avons hélas trouvé que très peu d'information ; et les informations tacites (donc perdues) font cruellement défaut aujourd'hui. L'intérêt de la communauté expérimentale ESPERENSE, c'est enfin de mettre en commun les résultats des dispositifs afin d'optimiser l'analyse des données et d'accroître la fiabilité de nos connaissances. Il n'y a pas de « bons » dispositifs à opposer à des moins bons, tous les dispositifs du projet ESPERENSE sont importants et c'est comme ça qu'ils ont été voulus : ils sont résolument complémentaires.



© Jacques Nold / ONF

↑ On observe des dépérissements d'une ampleur inégalée (ici la hêtraie en FC de Langensoultzbach, sur les contreforts des Vosges du Nord)

Soulignons aussi l'opportunité de financement offerte par le plan France Relance : l'opportunité de mettre en place des dispositifs expérimentaux répondant à nos protocoles (dûment pris en compte dans une note annexée au volet forestier du plan de relance).

On peut participer en 4 étapes :

- tout d'abord, rejoindre le réseau en signant l'accord de consortium ;
- s'engager sur le cahier des charges ;
- mettre en place des dispositifs suivant ce cahier des charges ;
- et faire remonter l'information sur la plateforme de partage du réseau.

Nous allons voir ces différents points plus en détail.

Déploiement du Réseau ESPERENSE : quels moyens ?

L'idée même du Réseau ESPERENSE est de faire appel à toutes les énergies, à tous les moyens possibles, et de les fédérer dans un cadre parfaitement cohérent. Le plan France Relance est arrivé à point nommé pour financer l'installation des premières expérimentations candidates. Mais parallèlement, les régions peuvent avoir leurs propres programmes de soutien aux initiatives d'adaptation des forêts et aider à la mise en place de dispositifs en forêt privée ou publique.

L'accord de consortium

L'accord de consortium est un document cadre qui décrit l'organisation et le fonctionnement de consortium (groupement d'organismes), avec 2 types de membres : les membres fondateurs, c'est-à-dire les organismes qui ont participé au projet ESPERENSE, et des membres associés qui permettront d'élargir la portée du consortium. Les membres sont des « expérimentateurs », au moins dans un premier temps, de façon à lancer ce réseau participatif et commencer au plus vite à installer un certain nombre de dispositifs. L'accord de consortium exige expressément l'engagement de ses membres vis-à-vis du suivi des sites et de la remontée des données.

La gouvernance du réseau repose sur un bureau exécutif émanant du « comité des membres » qui représentera l'ensemble des membres, avec deux conseils en appui pour éclairer les décisions : un conseil scientifique et un conseil d'orientation. Le conseil scientifique veillera à une ligne rigoureuse d'acquisition de données correspondant aux objectifs scientifiques mais aussi aux objectifs pratiques qui, eux, relèveront du conseil d'orientation.

L'accord positionne enfin le Réseau ESPERENSE dans la réflexion sur la mise en commun des dispositifs expérimentaux au niveau national. Les dispositifs ESPERENSE feront donc partie de l'infrastructure **IN-SYLVA France** dont l'objectif est de fédérer l'ensemble des réseaux d'expérimentation forestière au niveau français.

Le cahier des charges

Le cahier des charges est évidemment conçu pour que l'ensemble des dispositifs du réseau contribue à œuvrer dans la même direction. Il y a donc tout d'abord des **conditions minimales** à observer pour l'intégration d'un site dans le réseau, et elles font écho aux principes et méthodologies établis dans le cadre du projet ESPERENSE.

La première condition, c'est donc d'être situé dans une zone à enjeu climatique identifiée ou dans un analogue climatique de ces zones à enjeu conformément au principe des sites miroir *aujourd'hui* et *demain*. Deuxièmement, il faut que l'expérimentation soit mise en place et suivie selon un des 3 protocoles expérimentaux définis par le projet ESPERENSE ; suivie pour les variables prévues dans le timing prévu. La troisième condition est bien sûr d'étudier des essences qui figurent dans les listes ESPERENSE établies en fonction des enjeux. Il s'agit de concentrer les efforts sur les essences qui sont déjà bien identifiées comme étant potentiellement intéressantes. Le quatrième point concerne l'identification précise des provenances génétiques du matériel étudié. Il est indispensable de connaître avec certitude la provenance des graines dont sont issus les plants expérimentés, pour pouvoir faire des analyses et des traitements de données pertinents, et aboutir à des conclusions crédibles. La dernière condition est très basique mais fondamentale : chacun des sites doit être localisé de façon très précise.

Le cahier des charges porte aussi sur la mise en commun de l'information via la plateforme de partage qui va se mettre en place (voir ci-après). Enfin il y a une clause concernant l'accès aux sites : chaque dispositif d'essai doit être rendu accessible, soit pour des expérimentations complémentaires à celles du réseau ESPERENSE, soit pour des réunions de vulgarisation ou d'information à l'intention des acteurs de la filière forêt-bois : montrer des réalisations, commencer à présenter certaines essences et leur comportement dans le cadre de ces expérimentations...

La plateforme de partage

Le réseau ESPERENSE a besoin d'un outil d'animation multipartenaire pour faciliter l'accès aux connaissances et compétences mutualisées. L'idée est de mettre en place une plateforme informatique d'échange et de partage de façon à bien identifier ce réseau et le doter d'un lieu de concertation.

Le premier objectif est d'organiser la remontée des métadonnées caractérisant chacun des dispositifs du réseau dans une base, associée à un outil de cartographie qui facilitera la consultation et permettra de faire des requêtes (sur telle ou telle essence, par exemple). On pourra ainsi voir ce qui est mis en place (les essais, les essences) et, plus tard, l'affichage de résultats synthétiques par site. Cette base permettra aussi d'organiser les échanges de données entre les membres du consortium, et de mobiliser toute la puissance du réseau pour les analyses.

Un autre objectif de la plateforme est d'apporter une aide logistique pour l'approvisionnement en matériel végétal. L'idée est d'abord de regrouper via cet outil les besoins en termes de semences pour les essences et provenances qu'on prévoit d'installer dans des tests planifiés à court terme, moyen terme ou long terme. Il s'agit ensuite de mutualiser les besoins en plants qui découleront de ces projets de tests pour organiser la production, surtout pour les unités génétiques peu courantes et qui ne sont pas disponibles dans les pépinières commerciales. Ainsi les pépinières expérimentales du PNRGF vont pouvoir mettre en place une sorte de fonds de roulement pour les espèces candidates de niveau 0 ou 1 (cf. contribution de Musch *et al.*) Et l'appui logistique va jusqu'à la rationalisation des approvisionnements et des livraisons de plants sur les chantiers d'installation.

Enfin la plateforme doit être un lieu d'échange de savoirs et de compétences, une sorte d'agora qui offre un espace de partage et de discussion à tous ceux qui sont intéressés par l'évaluation des essences/provenances de demain.



© Quentin Merceron / ONF

↑ L'installation d'un dispositif ESPERENSE suppose une logistique rigoureuse (ici en FD de l'Hermitain, hiver 2020-2021)

Le réseau ESPERENSE peut-il s'étendre aux pays voisins ?

La question se pose forcément. Le projet ESPERENSE a été lancé à l'échelle du territoire français et avec un financement français, mais les espèces ignorent les frontières et il est indispensable de travailler avec nos collègues européens pour bien articuler les efforts d'adaptation des forêts.

Il est clair, par exemple, que l'Espagne ou le Portugal pourraient offrir des sites miroir intéressants. Le projet FuturForEst de la région Grand-Est a prévu la mise en place d'îlots d'avenir en Belgique. Nous avons aussi des discussions avec des collègues suisses... Si l'idée du réseau ESPERENSE est partagée au niveau européen, il ne faut surtout pas se priver de ces contributions. Mais il va y avoir des questions pratiques à régler.

Quelles perspectives à court et moyen terme ?

Dans l'immédiat, nous allons procéder à la signature de l'accord de consortium par les membres fondateurs, puis ouvrir l'accord à la signature des membres associés. Parallèlement, nous travaillons à la planification des prochains dispositifs et des besoins associés en semences et en plants : l'anticipation, rappelons-le, est un élément essentiel. Nous entreprenons aussi la construction et la mise en place de la plateforme de partage et d'échange.

À moyen terme, nous allons travailler à la structuration d'un réseau multipartenaire permettant de tester de nombreuses espèces et provenances dans les différentes conditions de sol et climat des zones à enjeu. Nous visons ainsi l'accroissement des connaissances et des compétences, de la recherche aux gestionnaires forestiers, dans le domaine des essences forestières pour l'avenir. Car nous avons besoin les uns des autres pour progresser rapidement, face aux évolutions du climat. La recherche apporte des éléments de compréhension, des éléments de connaissance, tandis que nous avons sur le terrain un certain nombre d'informations qui vont enrichir les questions scientifiques des chercheurs. Nous visons aussi la mise en place de solutions simples et efficaces pour l'adaptation des forêts au changement climatique. Nous sommes bien conscients de ce que le projet ESPERENSE ne traite qu'une petite partie des solutions à mettre en œuvre mais il ne faut surtout pas les négliger ; elles s'articuleront avec d'autres options présentes sur le territoire. En particulier l'amélioration des trames vertes, qui devrait favoriser l'efficacité des processus naturels de migration des espèces (voir la contribution de Ducouso et Musch).

Éric Paillassa CNPF-IDF, Brigitte Musch ONF, Myriam Legay AgroParisTech, Christophe Orazio IEF, Christian Pichot INRAE



Comment concilier plantation et conservation de ressources génétiques ?

L'idée de planter des essences ou même des provenances nouvelles pour adapter les forêts au changement climatique soulève un certain nombre de craintes, dont celle d'une possible contradiction avec la conservation des ressources génétiques locales. François Lefèvre propose une réflexion et des clés pour une démarche de précaution.

Pour qui se préoccupe de l'adaptation des forêts au changement climatique, la nécessité de la plantation et celle de la conservation des ressources génétiques forestières sont deux évidences et pas des alternatives : on ne pourra se passer ni de l'une ni de l'autre. Il y a donc bien une question : « comment concilier plantation et conservation de ressources génétiques » ?

Cependant cette formulation laisse planer beaucoup de sous-entendus. Elle porte en soi l'idée que la plantation peut être un risque pour la conservation des ressources génétiques. Mais en réalité il n'y a pas que des risques, il y a aussi des bénéfices possibles. Par conséquent, la réponse à la question passe par la description et l'analyse des mécanismes d'interaction.

Par ailleurs, la question n'est pas la même suivant qu'on se la pose localement ou au niveau plus global d'un programme de conservation. De fait, la plantation est un des moyens de la conservation, on parle même de plantations conservatoires... Mais ce n'est pas le propos ici. Nous allons nous focaliser sur l'enjeu local.

Rappelons le principe schématique de la conservation des ressources génétiques forestières : l'objectif est de préserver la diversité génétique d'arbres en France, et de le faire de façon dynamique dans des populations en évolution ou, lorsque c'est impossible, en collection.

Les 3 voies d'interaction entre plantation et ressources génétiques locales

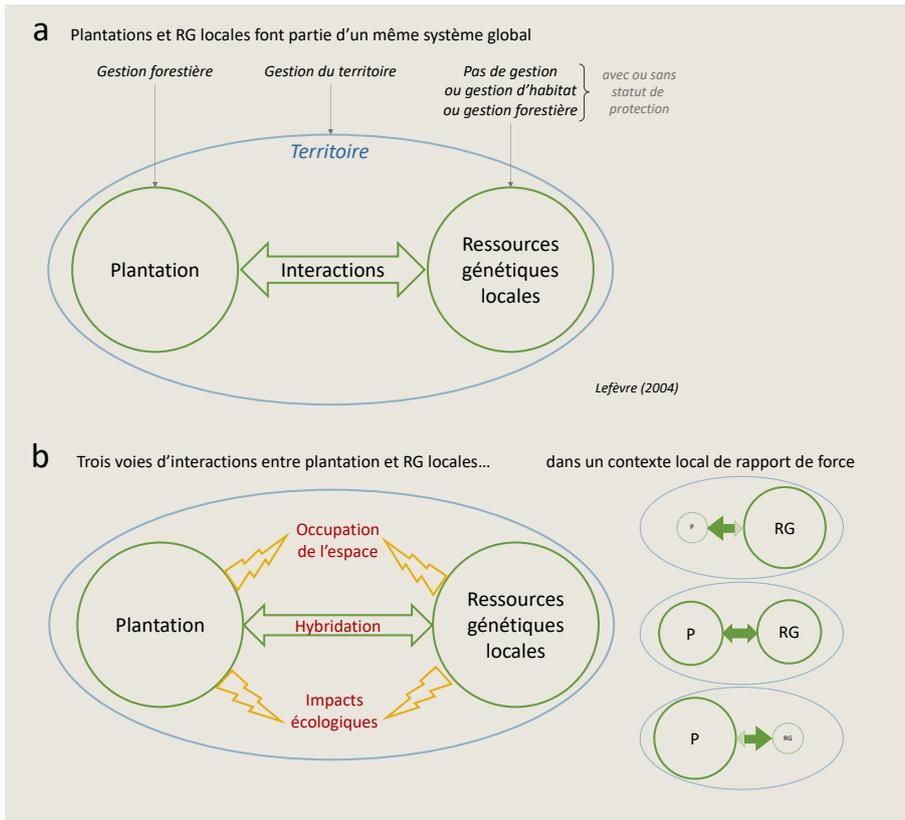
On peut poser le cadre de façon schématique (Fig. 1a) avec d'un côté des plantations et de l'autre des ressources génétiques (RG) locales, les unes et les autres étant en interaction au sein d'un territoire. La plantation est soumise à la gestion forestière, tandis que les RG locales peuvent appar-

tenir à différents types de forêts : soit des forêts qui ne sont pas du tout gérées, soit des forêts qui ne sont pas gérées en tant que forêts mais en tant qu'habitats, soit des forêts relevant de la gestion forestière mais non plantées. Et ces ressources génétiques locales peuvent avoir ou non un statut de protection. Tout cela, enfin, se situe dans un territoire, qui lui-même fait l'objet de gestion.

En quoi consistent les interactions ? Elles sont de 3 types (Fig. 1b). Il y a des interactions liées à l'**occupation de l'espace** : l'espace occupé par la plantation ne l'est pas par les RG locales et réciproquement. Il y a des **impacts écologiques** : par exemple, une espèce plantée qui a un comportement envahissant va perturber l'écosystème qui peut en retour avoir un effet sur les RG locales. Ou il peut y avoir des flux de pathogènes entre un compartiment et l'autre. Ces deux types d'interaction concernent a priori toutes les espèces possibles. Le troisième type est un cas particulier, celui où il peut y avoir **hybridation** entre plantation et RG locales ; nous allons y revenir plus en détail.

Voilà pour le schéma général, mais il faut y ajouter un élément important du contexte local : le rapport de force (Fig. 1b). La force, en l'occurrence, peut être la surface ou bien un nombre d'arbres, un nombre d'arbres reproducteurs... ça dépend de ce qu'on considère. Mais quoi qu'il en soit, les rapports ne sont pas toujours équilibrés. À l'échelle nationale, la forêt de plantation représente actuellement un peu moins de 15% des forêts, mais en Aquitaine, dans le massif landais, la proportion est complètement différente. Autrement dit le contexte local de rapport de force est différent selon les territoires et, suivant le rapport de force, l'impact est plutôt d'un côté ou de l'autre.

Voyons maintenant de plus près les interactions d'hybridation.



← **Figure 1.** Les voies d'interaction entre plantation et ressources génétiques locales.

Focus sur l'hybridation entre plantation et RG locales

Conditions d'hybridation entre plantation et RG locales

Pour que l'hybridation ait un impact, il faut toute une chaîne de processus, qu'on peut énoncer en 7 conditions.

D'abord, il faut que la plantation soit ce qu'on appelle hybridogène, c'est-à-dire qu'elle soit de la même espèce que celle des ressources locales ou d'une espèce qui peut s'hybrider, appartenant au même complexe d'espèces. Deuxièmement, il faut que le contenu génétique soit un peu différencié, sinon il n'y aura pas d'impact, et troisièmement que la plantation soit conduite jusqu'à la maturité sexuelle. Si on fait du taillis à courte rotation, par exemple, les arbres plantés n'iront probablement pas jusqu'à maturité sexuelle donc il n'y aura pas d'hybridation.

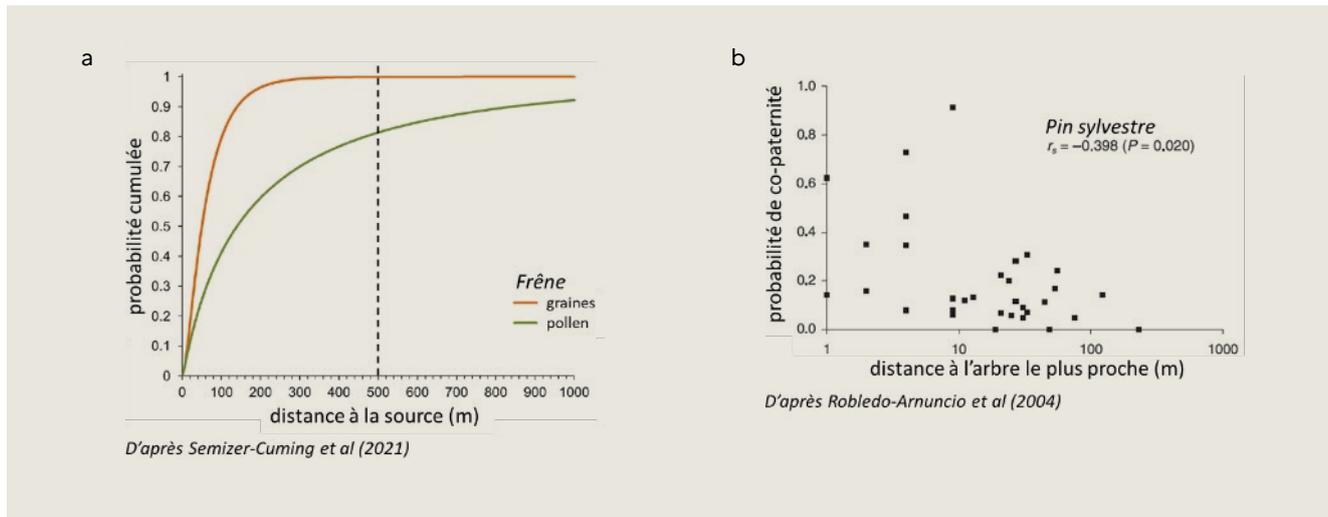
La quatrième condition, c'est la nécessaire concordance phénologique entre réceptivité femelle de l'un des deux compartiments et émission de pollen par l'autre, et la cinquième, c'est une dispersion de pollen en quantité significative dans un sens ou dans l'autre. On imagine bien que si un grain de pollen hybridogène arrive parmi des millions de grains de pollen d'origine locale dans une forêt, l'impact peut être négligeable ; il y a là un effet du rapport de force évoqué précédemment. Sixièmement, il faut encore que la fécondation ait lieu et que la graine et la plantule hybride soient viables ; l'hybridation peut échouer pour des problèmes de « tare génétique », pour le dire rapidement. Et

pour que le processus d'hybridation aille au bout, il faut enfin que les plantules qui ont survécu aient aussi l'opportunité d'arriver au stade adulte pour se reproduire et continuer le cycle. Ces deux dernières conditions impliquent que les graines non viables ou les semis mal adaptés, qui seront éliminés par la sélection naturelle, n'auront pas d'impact ni écologique ni évolutif sauf si la proportion de graines hybrides est très élevée. Dans ce cas, en effet, toutes les graines sont « occupées » par l'hybridation et, si cette hybridation est vouée à l'échec, c'est toute la reproduction qui est vouée à l'échec.

La question majeure de la dispersion

Chez les arbres, la dispersion du pollen et des graines peut se faire à très longue distance. Dans une synthèse bibliographique publiée en 2012, Kremer *et al.* ont relevé par exemple une dispersion du pollen de pins observée sur plusieurs milliers de kilomètres (3000 km) : simple dispersion physique dans ce cas, indépendamment de la viabilité. Cependant les distances maximales de dispersion de pollen viable observées sont quand même de plusieurs centaines de kilomètres (600 km). Quant à la dispersion observée de pollen efficace, c'est-à-dire du pollen qui a donné lieu à une reproduction, à un descendant, elle va jusqu'à 100 km. Pour les graines, la dispersion maximale relevée est de 20 km.

Il existe donc des événements de dispersion à très longue distance. Mais l'essentiel de la dispersion se fait à relativement courte distance. Dans le cas du frêne, par exemple, une étude récente a évalué la probabilité cumulée de dispersion des graines et du pollen en fonction de la distance à la source (Fig. 2a) : il en ressort qu'à 600 m de la source on a 80% du pollen dispersé, et que quasiment 100% des graines



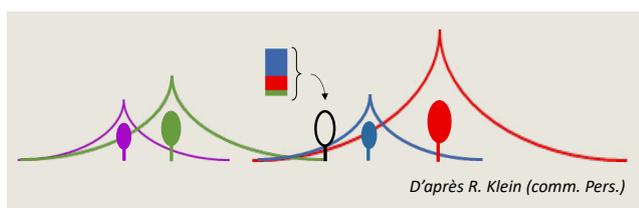
↑ **Figure 2.** Dispersion du pollen : (a) l'essentiel se fait à proximité, exemple chez le frêne ; (b) la proportion de pollen « lointain » reçue par un arbre dépend de la densité locale (plus les arbres sont proches les uns des autres, plus un arbre a une forte probabilité d'être pollinisé par ses quelques voisins), exemple chez le pin sylvestre.

sont dispersées à moins de 300 m. On voit aussi que la moitié du pollen est émis à moins de 200 m tandis que la moitié des graines se disperse à moins de 50 m.

Cela dit, la quantité de pollen reçue par un arbre « femelle » dépend aussi de la densité de pollinisateurs qu'il a autour de lui. C'est ce qu'illustre chez le pin sylvestre le graphique (Fig. 2b) qui représente la probabilité de co-paternité, c'est-à-dire la probabilité que deux graines du même arbre aient le même père, en fonction de la distance de cet arbre à ses plus proches voisins. Quand un arbre est entouré de voisins proches, ces voisins proches ont une grande probabilité d'être les pères, et cela fait donc une sorte de barrière à la dispersion à longue distance.

Ce qu'il faut retenir, c'est que la dispersion est possible à très longue distance, mais que l'essentiel des émissions se fait à proximité et que la densité locale fait diminuer la proportion de pollen reçu de plus loin.

On peut résumer ce qui se passe par un schéma (Fig. 3) : un arbre, représenté en noir sur ce schéma, est entouré d'autres arbres, représentés en couleurs, qui sont plus ou moins proches et qui émettent du pollen de façon plus ou moins importante (c'est la hauteur de la vague qui figure la courbe de dispersion correspondant à chacun). Cet arbre noir



↑ **Figure 3.** Schéma de la pollinisation d'un arbre (en noir) par ses voisins (en couleurs).

reçoit essentiellement le pollen des individus proches, en l'occurrence le bleu ou, un peu plus loin, le rouge parce qu'il produit beaucoup de pollen ; les arbres plus éloignés contribuent très peu au nuage pollinique que reçoit cet arbre noir. Donc la dispersion efficace du pollen est possible à très longue distance mais la part relative de l'hybridation diminue rapidement avec la distance, et avec le fameux rapport de force. Ce qui fait penser, quand il est question d'hybridation, qu'il y a sûrement plus d'hybridation dans la plantation que dans le peuplement local, du moins lorsque le peuplement local est de surface plus importante.

Évidemment, il ne s'agit pas d'empêcher tous les flux de gènes à longue distance : il en arrivera toujours, et même de très loin, bien au-delà des plantations de proximité. En réalité, il s'agit d'éviter les contaminations massives de proximité... si ces contaminations sont jugées indésirables. Mais elles peuvent aussi être souhaitables, comme on va le voir.

Évaluation des risques et bénéfices pour les RG locales

Il y a bien des bénéfices d'un côté et des risques de l'autre (Fig. 4). Et ce qui compte pour l'évaluation, ce n'est pas le nombre d'éléments indiqués de part et d'autre, mais plutôt le poids de ces éléments.

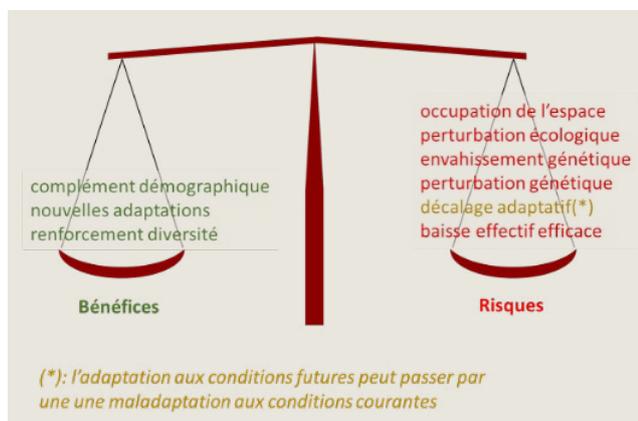
Au titre des bénéfices possibles, la plantation peut apporter un **complément démographique** pour des populations de très faible effectif ; c'est un moyen de renforcer des populations en déficit démographique. La plantation peut aussi être un moyen d'apporter de **nouvelles adaptations**. Au Danemark, par exemple, les chercheurs (Semizer-Cuming et al., 2021) étudient la possibilité de planter des frênes résistants à la chalarose à proximité de peuplements soumis à cette maladie pour renforcer leur résistance et permettre

une survie de la diversité locale. Et puis, au-delà des adaptations, le bénéfice peut être un **renforcement de la diversité génétique** locale quand celle-ci est appauvrie.

Du côté des risques, citons d'abord **l'occupation de l'espace** : l'espace occupé par la plantation n'est plus disponible pour les ressources naturelles. Il peut y avoir un risque de **perturbation écologique** en cas de comportement envahissant, flux de pathogènes, etc. Chez les peupliers, par exemple, il y a des rouilles qui évoluent de façon spécifique dans la peupleraie cultivée, donnant des « races » particulières dont certaines se sont retrouvées dans les peupleraies sauvages sans qu'on sache encore si ça a un impact ou pas. Au titre des risques, encore, il peut y avoir ce qu'on appelle **l'envahissement génétique**, c'est-à-dire une sorte de disparition des spécificités génétiques locales en cas de rapport de force avec beaucoup de plantations et peu de RG locales. Rappelons aussi le risque de perturbation génétique liée à l'hybridation, dans le cas où une forte proportion de graines hybrides se combine au fait que les hybrides ne sont pas viables (pour diverses raisons) et en arrive à provoquer un déficit dans la régénération. Il peut enfin y avoir un **décalage adaptatif** lorsque la plantation introduit une maladaptation aux conditions courantes ; mais ici la notion de risque est à moduler car une adaptation à des conditions futures peut dans certains cas correspondre à un décalage adaptatif aux conditions actuelles. Et puis, dans certains cas très particuliers (et trop compliqués pour les détailler ici), il peut y avoir une baisse des effectifs efficaces.

L'important, c'est de bien expliciter les enjeux spécifiques de conservation des RG locales. C'est à dire :

- identifier les éventuels statuts des RG locales dans les programmes de conservation (y a-t-il un enjeu à ce niveau-là ?) ;
- identifier les facteurs de vulnérabilité des RG locales à court terme et à long terme ;
- expliciter les bénéfices et risques à court terme et à long terme ;
- identifier les risques d'impacts démographiques, écologiques ou évolutifs qui seraient non négligeables ;



↑ **Figure 4.** Évaluation des risques et bénéfices de la plantation pour les ressources génétiques locales.

- définir des mesures de prévention des risques pour ces risques non négligeables identifiés ; sans oublier, le cas échéant, de définir des mesures de renforcement des impacts positifs recherchés.

Clefs pour une démarche de précaution

En guise de conclusion, voici quelques clefs pour une démarche de précaution. Précisons d'abord que les précautions, par rapport à la prévention, concernent les cas où on envisage des risques qu'on peut pressentir mais qui ne sont pas clairement identifiés.

Précautions a priori, questions à résoudre :

1. Quels sont les enjeux spécifiques de conservation des RG locales et quelles sont les mesures associées ?
2. Quel est le « rapport de force » entre plantation et RG locales (surface, taille de population) ?
3. Y a-t-il un risque connu de dynamique envahissante ? Si oui, quelles mesures de prévention ? (Il y a des espèces comme le robinier dont on sait que leur dynamique peut être problématique).
4. Y a-t-il un autre risque connu de perturbation écologique (d'ordre sanitaire ou autre) ? Si oui, quelles mesures de prévention (si le risque est identifié) ?
5. La plantation est-elle hybridogène ?

Précautions de mise en place :

6. Assurer une traçabilité précise et à long terme du contenu génétique de la plantation
7. Planter une base génétique aussi diversifiée que possible (Cet aspect n'a pas été traité ici, mais on prend d'autant plus de risques que la base génétique plantée est étroite)
8. Respecter les préconisations éventuelles existantes si les RG locales ont un statut de protection.

Précautions pour le suivi :

9. Suivre la dynamique spontanée autour de la plantation
10. En cas de probabilité non négligeable d'hybridation, en rechercher éventuellement des traces dans les RG locales
11. En cas de crise sanitaire sur la plantation, surveiller les RG locales



↑ Exemple de plantation au bénéfice d'une ressource locale menacée : après incendie en FC de Banne (07), le choix a été fait de planter du pin de Salzmann, essence typiquement cévenole menacée d'extinction... notamment à cause du risque d'hybridation avec les autres pins noirs.

RÉFÉRENCES

- Lefèvre F., 2004. Human impacts on forest genetic resources in the temperate zone: an updated review. *Forest Ecology and Management*, vol. 197 pp. 257-271
- Kremer A., Ronce O., Robledo-Arnuncio J. J., Guillaume F., Bohrer G., Nathan R., Bridle J. R., Gomulkiewicz R., Klein E. K., Ritland K., Kuparinen A., Gerber S., Schueler S., 2012. Long-distance gene flow and adaptation of forest trees to rapid climate change. *Ecology Letters*, vol. 15(4) pp. 378-392
- Robledo-Arnuncio J. J., Alía R., Gil L., 2004. Increased selfing and correlated paternity in a small population of a predominantly outcrossing conifer, *Pinus sylvestris*. *Molecular Ecology* vol. 13(9) pp. 2567-2577
- Semizer-Cuming D., Chybicki I. J., Finkeldey R., Kjær E.D., 2021. Gene flow and reproductive success in ash (*Fraxinus excelsior* L.) in the face of ash dieback: restoration and conservation. *Annals of Forest Science* 78 art 14. <https://doi.org/10.1007/s13595-020-01025-0>



Comment les dispositifs îlots d'avenir peuvent faciliter les processus évolutifs

Les îlots d'avenir ont une fonction d'expérimentation dans le réseau ESPERENSE, mais dans certains cas ils peuvent avoir aussi un rôle direct dans l'adaptation de nos écosystèmes forestiers au changement climatique, via les processus évolutifs génétiques. On va voir comment dans cet exposé.

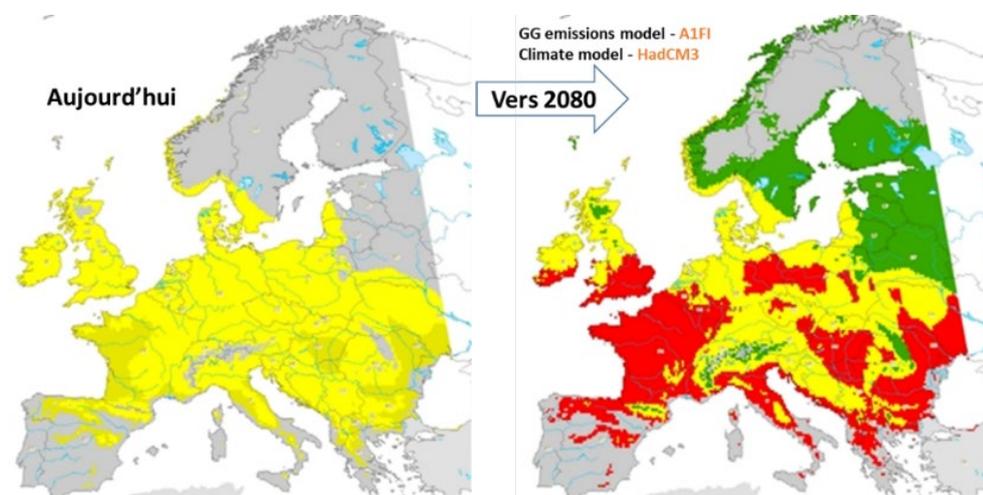
L'idée des îlots d'avenir comme solution fondée sur la nature

Contexte général

Pour prendre la mesure de ce qui attend les arbres forestiers et appréhender les enjeux de migration, on peut prendre l'exemple du chêne sessile et comparer son aire de répartition actuelle et son enveloppe bioclimatique attendue vers 2080, selon l'un des modèles développés par Wilfrid Thuiller (Fig. 1). Sur la carte de projection à l'horizon 2080, on voit en rouge les zones où le chêne sessile est sorti de l'enveloppe bioclimatique, en jaune celles où il reste dans son enveloppe et en vert les nouvelles zones qui vont lui convenir, qu'il peut coloniser... en principe ! Parce qu'en 60 ans il va devoir couvrir une grande distance. Il pourrait par exemple se développer au Cap Nord, mais il lui faudrait pour cela faire en quelques décennies un bond de plus de 1000 km par rapport à son aire de répartition actuelle en traversant des espaces déjà occupés par l'homme et d'autres espèces.

L'image est un peu extrême, et la carte montre aussi des espaces plus accessibles ; mais de là à imaginer que la forêt du futur pourrait s'installer toute seule...

Nous avons cherché à savoir si les espèces pourraient migrer suffisamment vite, en revenant d'abord sur les études de la recolonisation post glaciaire dans les îles britanniques et en Europe de l'Ouest (Tab. 1). Les vitesses de cette recolonisation varient selon les espèces et vont de 200 m/an pour le hêtre jusqu'à 2000 m/an pour les bouleaux. Or, au rythme des changements actuels, il faudrait plusieurs dizaines de kilomètres par an pour suivre le décalage probable des enveloppes bioclimatiques. Nous nous sommes penchés aussi sur les vitesses de migration contemporaines, avec par exemple la colonisation du littoral atlantique par le chêne vert (Fig. 2) : on s'aperçoit que les vitesses de migration, reconstituées d'après les inventaires successifs réalisés pour l'aménagement des forêts littorales varient de 21 à 56,7 m/an.



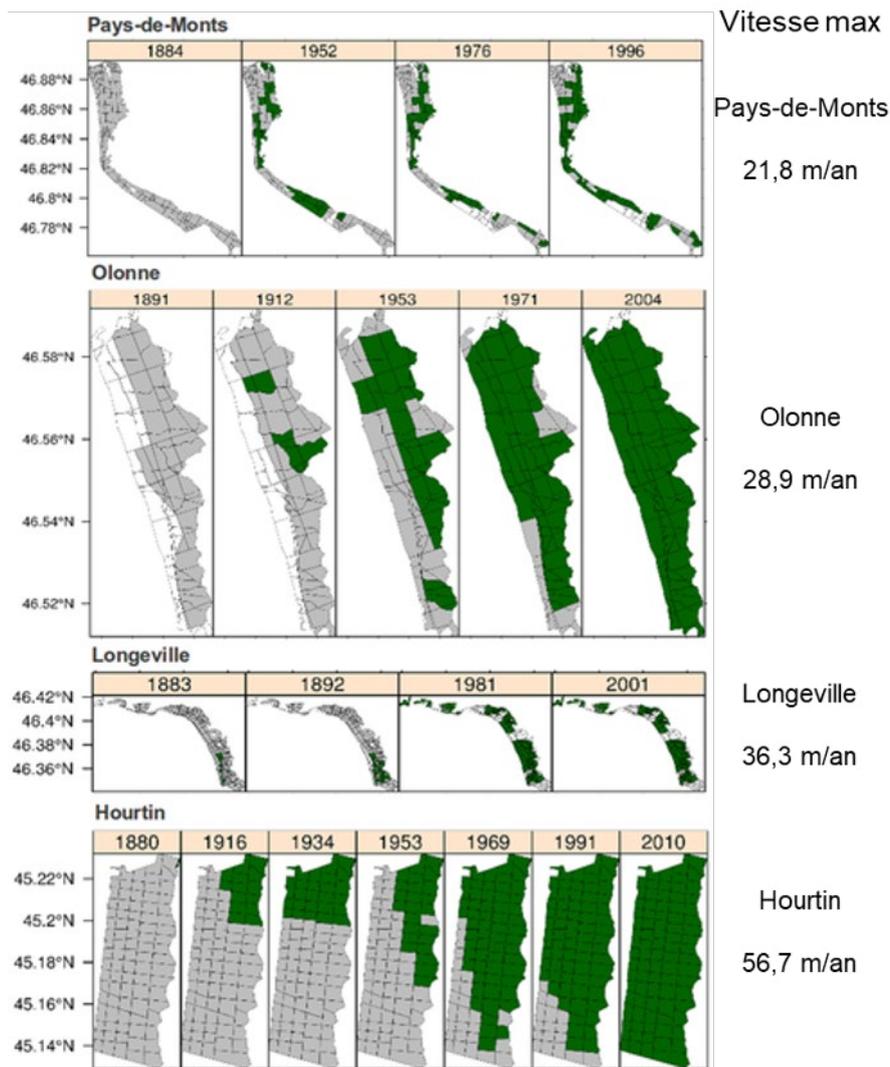
← Figure 1. Évolution simulée de l'enveloppe Bioclimatique du chêne sessile en 2080 (d'après Thuiller GCB 2003, Thuiller et al. PNAS 2005)

On est donc très loin du compte, notamment parce que le milieu est anthropisé : le territoire est très fragmenté, la biodiversité propice à la dissémination est en déclin... Autant d'entraves à la migration naturelle, sans compter le fait que l'espace forestier est déjà occupé par d'autres espèces.

Une des solutions, c'est le renouvellement par plantation ; mais ce n'est qu'une des possibilités, ne serait-ce qu'en raison de l'énormité de la tâche. Plus généralement, il va falloir **s'orienter vers des solutions fondées sur la nature** pour adapter rapidement la forêt française par migration assistée. Et les îlots d'avenir (tels que décrits par Paillassa *et al.*) en offrent une, inspirée par les processus naturels de migration et en particulier ceux de grande ampleur comme ceux qui ont permis la recolonisation post-glaciaire des espèces européennes.

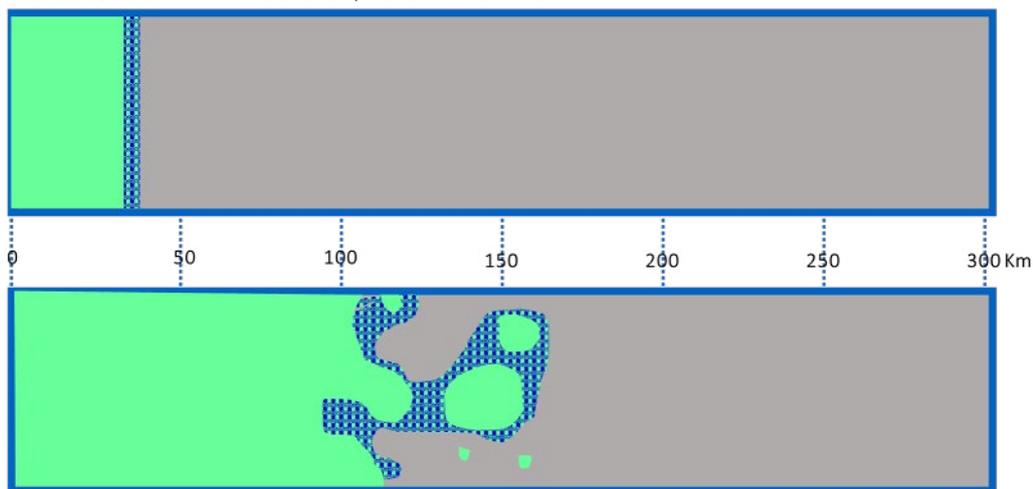
→ **Tableau 1.** Recolonisation postglaciaire : vitesses de migration observées pour différentes espèces dans les îles britanniques et en Europe de l'Ouest (d'après Huntley & Birks 1983 et Birks 1989)

ESPÈCES	Vitesse de migration postglaciaire (m/an)	
	Îles britanniques	Europe de l'Ouest
Bouleaux	250	2000
Noisetier	500	1500
Ormes	550	500-1000
Chênes	350-500	150-500
Pins	100-700	1500
Aulnes	500-600	500-2000
Tilleul	450-500	300-500
Frêne	50-200	200-500
Hêtre	100-200	200-300



← **Figure 2.** Migration contemporaine : exemple du chêne vert sur le littoral atlantique (d'après Delzon *et al.*, 2013)

A - Colonisation suivant un front de transport à courte distance



B - Colonisation de type mixte avec des événements rares de fondation en avant du front

← **Figure 3.** Modèles de recolonisation des espèces par graines : simulation sur 20 générations (d'après Le Corre et al., 1997)
 (A) la loi de dispersion est une loi normale d'écart-type de 250 m
 (B) la loi de dispersion est une somme pondérée de deux lois normales, la première est d'écart-type de 250m et la deuxième d'écart-type de 50 km

Migration par saut de puce

Dans un travail qui a été publié en 1997, Valérie Le Corre a cherché à reconstituer par simulation le processus de recolonisation postglaciaire de l'Europe par le chêne en s'appuyant sur les données palynologiques et les macrofossiles pour calibrer son modèle dans l'espace et le temps. Considérant que les espèces nécessitent pour s'établir la dispersion de leurs graines, elle a d'abord construit un modèle de simple diffusion des glands par barychorie (c. à d. sous l'effet du poids), que l'on voit schématisé sur la figure 3A : à partir du refuge glaciaire (à gauche) ce modèle aboutit à un front de recolonisation linéaire et une avancée très lente, qui ne permet pas de « remplir » l'espace de la colonisation effective dans les durées observées. Autrement dit, cela ne rend pas compte de la réalité attestée par les données historiques. Elle a donc repris le même modèle mais en y ajoutant des effets de fondation à longue distance (dispersion de quelques graines à une distance de 50 km), et ça change tout. Avec cet effet de fondation à longue distance, la progression est bien plus rapide (Fig. 3B) : les foyers avancés s'étendent par diffusion et finissent par devenir coalescents, formant un nouveau front. Cela permet d'expliquer non seulement la vitesse de recolonisation post-glaciaire chez les chênes mais aussi la structuration génétique observée. On sait donc maintenant que les chênes ont recolonisé l'Europe en combinant des effets de fondation à longue distance avec une diffusion de proche en proche.

Migration par hybridation

D'autre part, les espèces ont pu recoloniser l'Europe par le pollen. Dans le cas du couple chêne sessile chêne pédonculé, par exemple, on sait que c'est le chêne pédonculé qui a recolonisé l'Europe en premier et que la sylvigénèse a conduit à le remplacer par le sessile. Le chêne pédonculé est une espèce pionnière dont le geai des chênes préfère les glands à ceux du sessile, et c'est le geai qui permet les effets de fondation à longue distance. Le chêne sessile, qui est une espèce de forêt plus établie, a hybridé avec son pollen le front de colonisation constitué par les chênes pédonculés. Le pollen de sessile peut féconder le pédonculé, tandis que

l'événement inverse est beaucoup plus rare. Les hybrides ainsi formés ont continué à se croiser avec les chênes sessiles, préférentiellement, permettant de retrouver par rétro-croisements successifs le phénotype de chêne sessile. Les analyses de diversité génétique montrent par ailleurs que toutes les espèces de chênes blancs européens d'une même forêt partagent le même cytotype (= ADN chloroplastique), ce qui signifie qu'elles ont un ancêtre maternel commun. Chez les chênes, en effet, l'ADN chloroplastique ne se transmet que par la mère, et ne se disperse donc que par graine. Cela confirme que le chêne pédonculé a recolonisé l'Europe et que le chêne sessile, lui, s'est propagé uniquement par le pollen.

Ainsi, dans le cas des chênes, le principe des îlots d'avenir est une bonne idée qui va permettre de combiner ces différents facteurs : migration par sauts de puce, les îlots formant des foyers avancés équivalents à ceux d'une dispersion par graine à longue distance, qui va permettre la migration par le pollen d'espèces plus thermophiles. Ce modèle s'applique aux chênes blancs européens, qui sont très nombreux, mais aussi potentiellement à bien d'autres genres au sein desquels les espèces peuvent s'hybrider entre elles (voir plus loin la notion de complexe d'espèces).

Migration de la diversité génétique

Voyons maintenant plus précisément comment migre la diversité génétique, en commençant par des rappels de génétique évolutive.

Le paradoxe de la reine rouge

Parmi les différents processus de génétique évolutive, il en est un d'essentiel : le paradoxe (ou hypothèse) de la reine rouge (en référence à un fameux personnage du non moins fameux conte de Lewis Carroll *Alice au pays des merveilles*). C'est au départ une théorie de biologie évolutive proposée par Van Valen dans un article paru en 1970 : dans sa théorie et son modèle, il montre que les espèces doivent évoluer en permanence pour se maintenir adaptées à leur



© Alexis Ducouso / INRAE

↑ Exemple de dispersion par les petits rongeurs

environnement. Il a particulièrement travaillé sur la co-évolution entre les hôtes et les parasites : l'hôte essaie de se défendre de son parasite évolutivement et les génotypes les plus résistants se révèlent, tandis qu'inversement le parasite évolue de façon à pouvoir contourner ces résistances. Donc pour rester sur place il faut courir, autrement dit évoluer, en permanence.

Et c'est aussi le cas avec l'évolution due au changement climatique. La diversité génétique adaptée aux conditions climatiques du futur n'existe pas. Ou plus exactement elle existe globalement chez les arbres forestiers, les gènes existent mais les forêts n'ont pas localement les combinaisons nécessaires pour l'avenir. Il va donc falloir les créer.

Les îlots d'avenir avec des provenances ou des espèces plus thermophiles et mieux adaptées au déficit hydrique **sont une des stratégies à mettre en place pour faire émerger cette diversité génétique** en instillant les gènes d'adaptation aux conditions du futur, pour créer de nouvelles combinaisons génétiques qui permettront d'avoir des individus adaptés aux nouvelles conditions.

▲ Rappel sur les mécanismes évolutifs

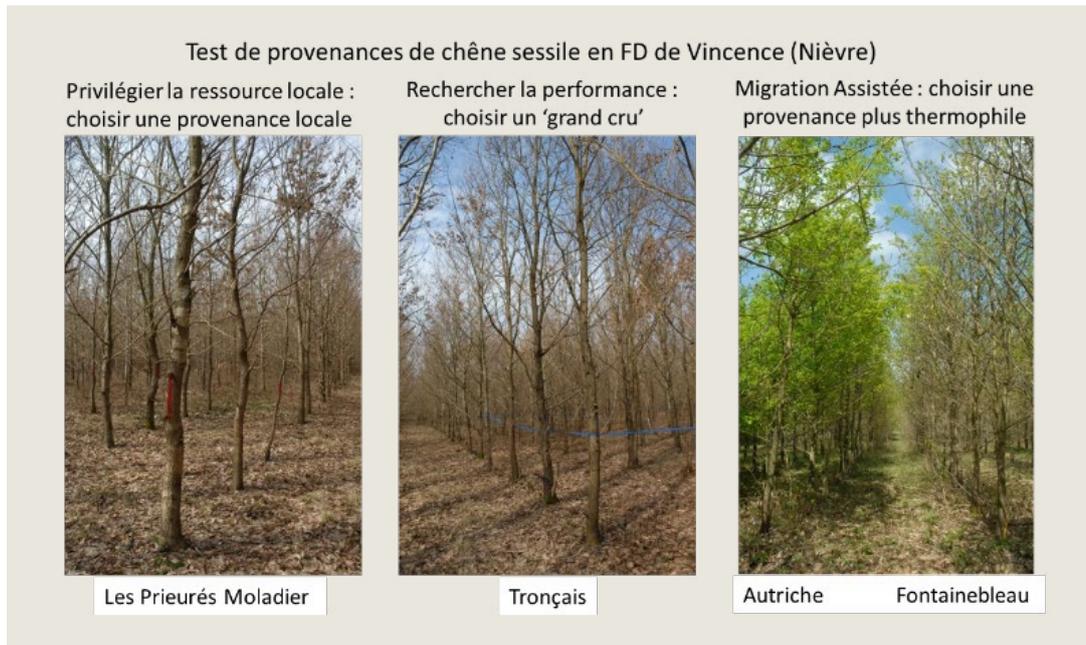
Rappelons d'abord qu'il y a 5 processus évolutifs : la mutation, l'épigénétique, la dérive génétique, les flux de gènes (et migration), et les sélections naturelles. Les îlots d'avenir n'auront pas d'effet sur les 3 premiers, que nous ne détaillerons pas ici. En revanche, ils peuvent influencer très efficacement sur le processus « flux de gènes et migration » et sur celui des « sélections naturelles », et accélérer ainsi les mécanismes d'adaptation des forêts au changement climatique.

▲ Flux de gènes et migration

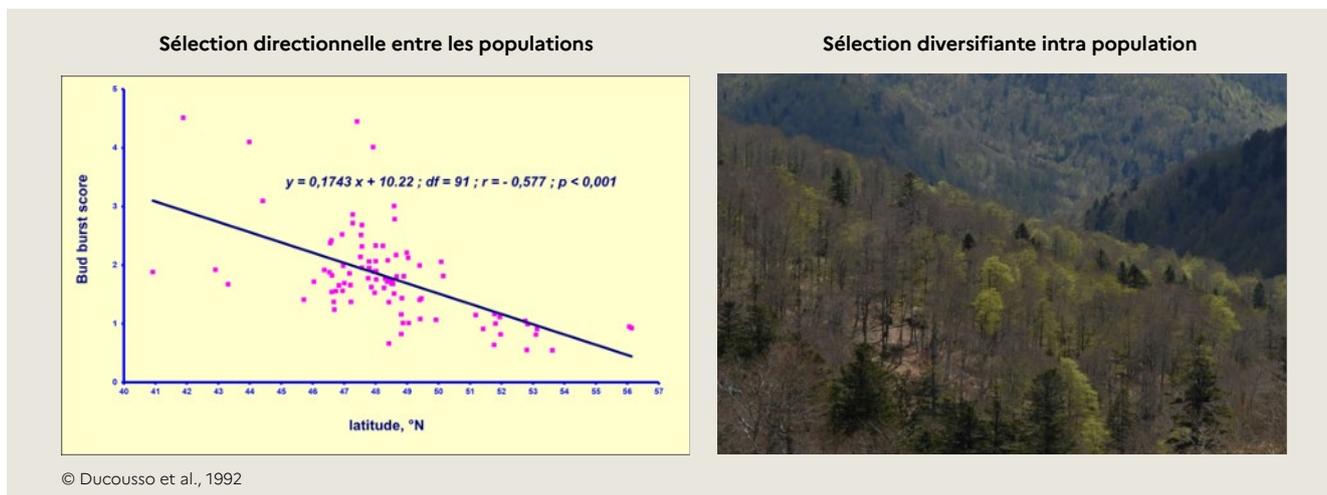
La migration par dispersion des graines est le fait de différents agents : petits rongeurs, oiseaux (le geai des chênes, par exemple)... et l'homme, évidemment. Notamment le forestier, qui peut disperser la diversité génétique par plantation ; d'où la nécessité de l'adaptation des conseils d'utilisation des matériels forestiers de reproduction pour faire migrer ces ressources génétiques et ces espèces au-delà des zones de provenances préconisées dans le passé. Dans le même temps, il convient de protéger les disperseurs des graines qui sont souvent considérés comme des nuisibles (corvidés, grives, renard...).

Mais plus généralement, pour appréhender le processus des flux de gènes, il faut s'intéresser aux complexes d'espèces. Ce sont des groupes d'espèces distinctes mais qui échangent des gènes (via le pollen) et ces échanges sont évolutivement stables c'est-à-dire qu'il existe des hybrides et des espèces pures. Il faut savoir que **la majorité de nos arbres forestiers appartient à des complexes d'espèces**. Par exemple, le complexe des « chênes blancs » avec les chênes pédonculé, sessile, pubescent, tauzin... (au total 28 espèces en Europe) ; mais il y a aussi des complexes d'espèces chez les érables (châmpêtre, de Montpellier), les alisiers (torminal, blanc), les peupliers (tremble, blanc), les frênes (commun, oxyphylle), les hêtres (commun, d'Orient) les charmes (commun, d'Orient), les sapins (pectiné, ensemble des sapins méditerranéens), etc.

Chez les chênes, on sait maintenant que le pollen, qui a une dispersion très efficace notamment à longue distance, peut permettre l'arrivée des espèces dans un territoire. Des espèces thermophiles peuvent donc arriver dans des



← **Figure 4.** Flux de gènes et migration : illustration des stratégies de choix de provenance sur un site de test de provenances de chêne sessile. Le caractère thermophile, manifesté par un débourrement plus précoce, est illustré ici par une provenance continentale (Autriche), installée à côté d'une provenance de la moitié nord de la France (Fontainebleau)



↑ **Figure 5.** Sélections naturelles directionnelle et diversifiante à gauche, effet de la sélection directionnelle : la précocité des provenances européennes de chêne sessile est liée à la latitude du peuplement d'origine ; à droite, l'effet de sélection diversifiante induit une variabilité de date de débourrement au sein d'un même peuplement.

chênaies du nord uniquement par le pollen et se disperser de manière très efficace. Et donc on peut, avec les îlots d'avenir comme foyers avancés, accélérer le processus et disperser à la fois par les graines mais aussi par le pollen.

Sans le savoir, le forestier participe déjà aux flux de gènes puisqu'il va prendre dans une forêt les graines (donc les gènes) d'un peuplement sélectionné pour les installer par plantation dans une autre forêt. Donc le forestier fait de la migration, selon différentes stratégies qu'on peut organiser et maîtriser. On peut ainsi vouloir privilégier une provenance locale, ou bien rechercher un « grand cru » et dans ce cas le flux de gènes vise à obtenir une meilleure performance en termes de croissance ou de forme ; et désormais, avec les changements climatiques on va aussi rechercher des provenances plus thermophiles pour faire expressément de la migration assistée (Fig. 4).

■ Sélection naturelle

On peut donc injecter de la diversité génétique avec des combinaisons génétiques plus favorables en faisant de la plantation et de la migration assistée (plantation d'un îlot de provenance méridionale dans une forêt du nord). Ce faisant, on va modifier les processus de sélection naturelle car, avec les changements climatiques, la pression de sélection naturelle pourra trier de nouveau des gènes de précocité/thermophilie, gènes qui pourront se disperser par graines et par pollen dans les populations voisines. En outre, sur ce caractère de phénologie, on va redonner « du grain à moudre » pour la sélection diversifiante qui s'exerce à l'intérieur de la population d'accueil. Ainsi, en faisant de la migration assistée, on favorise à la fois la sélection directionnelle et la sélection diversifiante pour la phénologie (Fig. 5).

Conclusion et discussion

En conclusion, les îlots d'avenir sont un outil qui peut permettre d'accélérer les processus naturels de migration des espèces (par effet de fondation à longue distance) et c'est très efficace. Il faut savoir que la recolonisation postglaciaire des chênes s'est faite grâce à quelque 300 foyers de dispersion (îlots) seulement, et ça a permis à la France d'être couverte de chênes. En outre, c'est un outil qui permet d'accélérer les processus évolutifs.

Il y a cependant plusieurs points auxquels il faut faire attention. Avec les îlots d'avenir, on va créer de nouveaux écosystèmes, donc il faut porter une grande attention à la biodiversité associée. D'autre part il va falloir restaurer et promouvoir l'ensemble des processus évolutifs autour des îlots d'avenir. Cela suppose de conserver et restaurer les populations de pollinisateurs et disperseurs des graines, et de rétablir des continuités écologiques (trames vertes).

Alexis Ducouso INRAE, Brigitte Musch ONF



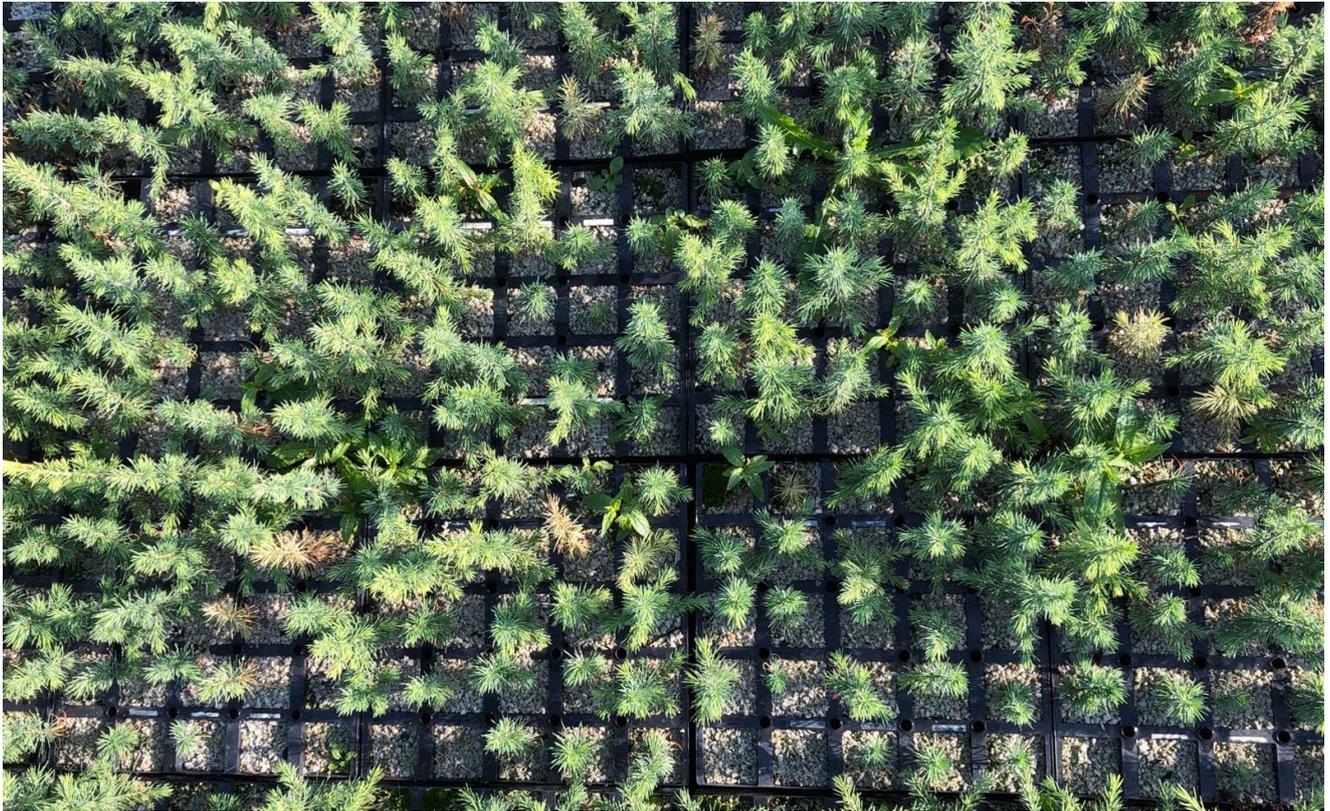
© Henri-Pierre Savier / ONF

↑ Le gai des chênes, agent de migration par dispersion des graines

RÉFÉRENCES

- Birks H.J.B., 1989. Holocene Isochrone Maps and Patterns of Tree-Spreading in the British Isles. *Journal of Biogeography* Vol. 16, No. 6, pp. 503-540
- Delzon S., Urli M., Samalens J.-C., Lamy J.-B., Lischke H., Sin F., Zimmerman N.E., Porté A.J., 2013. Field Evidence of Colonisation by Holm Oak, at the Northern Margin of Its Distribution Range, during the Anthropocene Period. *Plos one* vol. 8(11)
- <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0080443>
- Ducouso A., Bacilieri R., Demesure B., Dumolin-Lapègue S., Kremer A., Petit R., Zanetto A., 1992. Structuration géographique de la diversité génétique chez les chênes à feuilles caduques européens. *ONF-Bulletin Technique* n° 33, pp.7-19
- Huntley B., Birks H.J.B., 1983. *An atlas of past and present pollen maps for Europe: 0–13,000 years ago*. Cambridge, England: Cambridge University Press. 650 p.
- Le Corre V., Machon N., Petit R., Kremer A., 1997. Colonization with long-distance seed dispersal and genetic structure of maternally inherited genes in forest trees: a simulation study. *Genetics Research* vol. 69(2), pp. 117–125
- Thuiller W., 2003. BIOMOD: optimising predictions of species distributions and projecting potential future shifts under global change. *Global Change Biology* vol. 9(10) pp. 1353–1362
- <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1046/j.1365-2486.2003.00666.x>
- Thuiller W., Lavorel S., Araújo M.B., Sykes M.T., Prentice I.C., 2005. Climate change threats to plant diversity in Europe. *PNAS-Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* vol. 102(23), pp.8245–8250
- <https://www.pnas.org/doi/epdf/10.1073/pnas.0409902102>





OURS

La revue *RenDez-Vous techniques* est destinée au personnel technique de l'ONF, quoique ouverte à tous les lecteurs (étudiants, établissements de recherche et autres instances forestières et environnementales, notamment). Revue R&D et de progrès technique, elle vise à étoffer la culture technique au-delà des outils ordinaires de la gestion (guides sylvicoles, outils de diagnostic, etc.). Son esprit est celui de la gestion durable et « multifonctionnelle » qui, face aux défis des changements globaux, doit aussi s'adapter en contexte d'incertitudes. Son contenu : état de l'art et résultats de la recherche dans les domaines de R&D prioritaires, mais aussi porté à connaissance de méthodes et savoir-faire, émergents ou éprouvés, clairement situés vis-à-vis des enjeux de l'établissement ; le progrès technique concerne toutes les activités de l'ONF en milieu naturel et forestier, en relation avec le cadre juridique et les questionnements de la société.

Directeur de publication
Albert Maillet

Rédactrice en chef
Christine Micheneau

Comité éditorial
Xavier Rousset, Dominique de Villebonne, Xavier Bartet, Éric Dubois, Didier Pischedda, Stéphanie Prieur

Conception graphique
Pollen Studio

Réalisation
Pollen Studio

Crédit photographique page de couverture
Giada Connestari / ONF

Périodicité
4 numéros ordinaires par an

Accès en ligne
www.onf.fr
Accès à l'ensemble de la collection : via la notice d'un numéro quelconque (Détails/collection)

Renseignements
ONF - documentation technique et générale,
boulevard de Constance, 77300 Fontainebleau
Contact :
documentalistes@onf.fr

Pour soumettre un article
Contacter la rédaction : rdvt@onf.fr

Dépôt légal
Juillet 2022

