

COMMENT DÉTERMINER L'EXPOSITION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES DES ZONES DE PRODUCTION FORESTIÈRE FRANÇAISE ?

Méthodologie utilisée dans le projet ESPERENSE pour cibler les zones d'intérêt pour l'installation d'essais de comparaison d'essences et de provenances

HEDI KEBLI^a – CÉLINE PERRIER^a – PHILIPPE RIOU-NIVERT^a – YVES ROUSSELLE^b –
MYRIAM LEGAY^c – FRANÇOIS MORNEAU^d

La vulnérabilité des forêts face aux changements globaux est une préoccupation majeure pour les forestiers. La répétition d'épisodes de crises comme les tempêtes de grande ampleur (1999, 2009), les canicules et les sécheresses (2003, 2006, 2015, 2018, 2019), ou les attaques importantes de ravageurs et pathogènes ont fortement contribué à cette prise de conscience. Les différents scénarios climatiques produits par le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) font craindre un déclin de la productivité de la forêt française ou un décalage croissant entre les exigences écologiques des essences et les conditions climatiques (Charru, 2012 ; Cheaib *et al.*, 2012).

Le projet ESPERENSE (Kebli *et al.*, 2019) vise à constituer un réseau national multipartenaires d'expérimentation dans le but d'évaluer les ressources génétiques forestières pour le futur. Mené par le RMT AFORCE, il a bénéficié d'un financement du fonds stratégique de la forêt et du bois (appel à projet de 2017). Les résultats des expérimentations mises en place dans ce réseau permettront de proposer aux gestionnaires forestiers des alternatives à explorer en termes de choix d'essences et de provenances pour faire face aux changements climatiques.

L'étude décrite ici a constitué la première étape de ce projet. Elle consiste à définir une méthodologie pour l'identification des secteurs de production de bois présentant un enjeu de production et évalués comme préoccupants vis-à-vis des changements climatiques. Ces secteurs sont appelés « zones à enjeux ». Cette méthodologie structure le réseau d'expérimentation sur le territoire métropolitain, de manière à ce qu'il réponde au mieux aux besoins de la filière. En plus de son application pour le projet ESPERENSE, cette étude participe à renseigner un état des lieux des enjeux de la forêt française face aux changements climatiques. Il est à noter que cette méthodologie s'attache aux enjeux de production, qui entraîne dans son sillage d'autres enjeux (importance dans

a Centre national de la propriété forestière – Institut pour le développement forestier, F-75116 Paris, France

b Office national des forêts - Département Recherche, Développement et Innovation, UMR ONF/INRAE BioForA, F-45000 Orléans, France

c AgroParisTech, F-54000 Nancy, France

d Institut national de l'information géographique et forestière, F-45000 Nogent-sur-Vernisson, France

le paysage, développement territorial, carbone...) qu'il serait intéressant d'intégrer avec plus de précision dans de futurs développements.

DÉFINITION DE L'EMPRISE GÉOGRAPHIQUE DE L'ÉTUDE

Le projet ESPERENSE se concentre sur le territoire métropolitain français. Afin de déterminer les zones à enjeu, le territoire est partitionné en fonction :

- de l'homogénéité des conditions de croissance pour les arbres ;
- de la mise en évidence d'enjeux à la fois locaux et nationaux.

Le découpage utilisé s'appuie sur une partition écologique et forestière proposée par l'Inventaire forestier de l'IGN (<https://inventaire-forestier.ign.fr/spip.php?article773>) : 45 « grandes sylvoécorégions » (GSER) (figure 1, ci-dessous). Ce choix intermédiaire entre les grandes régions écologiques (GRECO) et les sylvoécorégions (SER) se justifie comme suit :

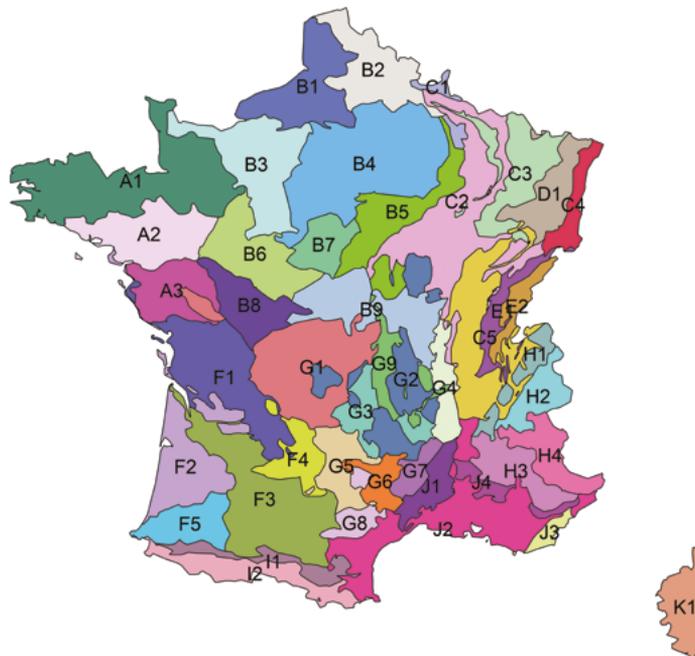
- à l'échelle des GRECO, les approches de modélisation, sur lesquelles s'appuie l'étude, présentent des résultats trop lissés qui ne reflètent pas assez les grandes hétérogénéités forestières ;
- à l'échelle des SER, ces hétérogénéités sont exacerbées et les données disponibles à cette échelle ne sont plus assez significatives pour réaliser une analyse exhaustive pour l'ensemble des essences.

Considérant les contraintes de travail, c'est en définitive le compromis le plus intéressant pour faire apparaître un zonage suffisamment fin pour être utile à la prise de décision, tout en considérant les limites d'utilisation des données.

FIGURE 1 DÉCOUPAGE DU TERRITOIRE MÉTROPOLITAIN EN 45 GSER

(Source : d'après l'IGN)

Pour chaque entité, la lettre indique le code de la GRECO et le chiffre celui des SER regroupées. Par exemple, la GSER F5 se situe dans la GRECO « F : Sud-Ouest océanique », et elle est composée des SER « F51 : Adour atlantique » et « F52 : Collines de l'Adour ».



Les GSER qui découlent de la GRECO L (Alluvions récentes) sont exclues de l'analyse. Il est considéré que l'enjeu du changement climatique y est moins élevé en raison de conditions d'alimentation en eau particulièrement favorables. De plus, les 5 SER composant la GRECO L couvrent la quasi-totalité de la France et posent donc les mêmes problématiques que l'échelle des GRECO.

DÉTERMINATION DES ZONES À ENJEU DE PRODUCTION

Variables utilisées pour caractériser l'enjeu de production

La détermination des zones à enjeu de production de bois s'appuie sur une analyse croisée de variables décrites dans le tableau I (ci-dessous). Elles ont été renseignées à l'échelle des GSER.

TABLEAU I Liste des variables utilisées pour caractériser l'enjeu de production

Type de variable	Variable
Stock de bois sur pied	Volume de bois vivant sur pied (en m ³) Volume de bois vivant sur pied (en m ³ /ha de GSER) : les volumes sont ramenés à l'hectare de GSER (surface boisée et non boisée). Cette variable favorise les GSER ayant un fort taux de boisement. Volume de bois vivant sur pied par classe de diamètre (en m ³)
Flux de bois	Prélèvements en volume (en m ³ /an et en en m ³ /an/ha de GSER) Les volumes prélevés sont mesurés sur 5 ans et sont exprimés en volume bois fort tige sur écorce. Un inventaire est réalisé sur les placettes qui ont été inventoriées cinq ans auparavant et sur lesquelles des arbres vivants recensables avaient été observés.
Valeur économique	Valeur potentielle sur pied par essence (en € et en €/ha de GSER) Valeur théorique et estimée pour l'étude en s'appuyant sur plusieurs sources : prix des bois sur pied provenant des ventes des experts forestiers de France (second semestre 2017), du cabinet Chavet (mai-juin 2018), de France Bois Forêt (2018) et prix moyens des bois sur pied aux ventes d'automne en forêts publiques en 2017 (ONF). Il est à noter que la valeur potentielle sur pied ne prend pas en compte les « crus » régionaux, ni les variations dues aux conditions d'exploitation (pente...), ni la variation des prix d'une année sur l'autre. De plus, les prix des chênes estimés ainsi sont applicables uniquement au sessile et au pédonculé. Les appliquer aux Chênes pubescent, vert ou liège surestime la valeur de ceux-ci.

Source : sauf mention d'une autre source, l'ensemble de ces données provient de l'IGN, campagnes de 2012 à 2016.

Évaluation des essences à enjeu de production sur l'ensemble du territoire

Pour l'étude, seules sont conservées les essences considérées comme ayant un enjeu local important. Il s'agit d'essences dont le volume sur pied dépasse 10 % du volume sur pied total des essences dans au moins une GSER. Cette sélection permet d'éliminer les essences mineures en termes de volume sur pied ou les essences très dispersées sur le territoire comme le Tilleul, par exemple. **Au total, 20 essences sont ainsi sélectionnées. Elles représentent à elles seules environ 84 % du volume total sur pied en France.** Elles ont été classées selon le volume sur pied (figure 2, p. 526), le volume prélevé et la valeur potentielle de bois sur pied, de manière à préciser leur importance d'un point de vue économique. À noter que certaines essences, comme le Pin laricio, peuvent représenter une ressource locale importante, mais ne sont pas pour autant retenues pour l'analyse en raison de la faible significativité de certaines des données concernant l'espèce,

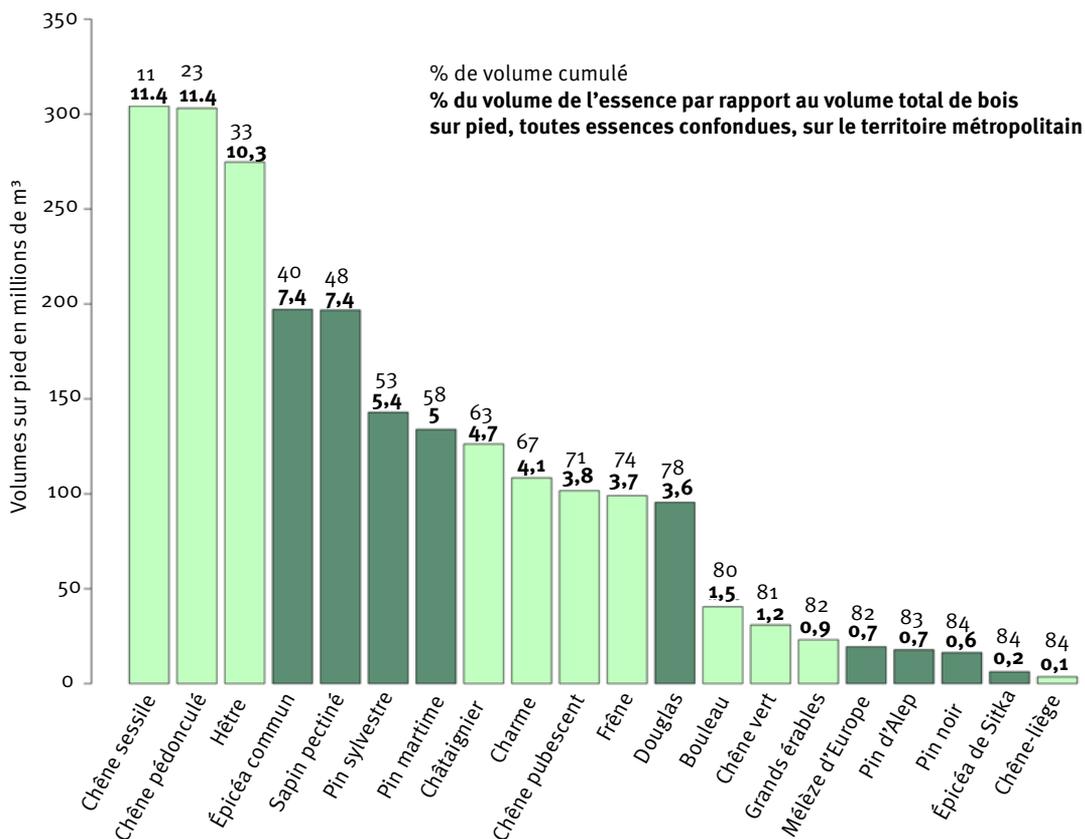
à l'échelle d'analyse de l'étude. C'est le cas aussi du Chêne-liège, du Pin d'Alep, du Mélèze d'Europe et du Chêne vert.

FIGURE 2

**CLASSEMENT DES 20 ESSENCES SÉLECTIONNÉES
EN FONCTION DE LEUR VOLUME TOTAL SUR PIED
COMPTABILISÉ SUR L'ENSEMBLE DU TERRITOIRE MÉTROPOLITAIN**

(Source : IGN, campagnes 2012 à 2016)

En vert foncé sont affichées les essences résineuses et en vert clair les feuillues. Précision sur les essences : Pin noir = Pin noir d'Autriche et grands Érables = Érable sycomore + Érable plane.



Délimitation et représentation spatiale des zones à enjeu de production

Pour déterminer les zones à enjeu de production de bois propres à chaque essence, des variables complémentaires à celles du tableau I (p. 525) ont été calculées. Ces calculs s'appuient sur les données de l'IGN et sont reproduits pour chacune des GSER et pour chacune des 20 essences (figure 3, p. 528) :

- proportion du volume sur pied de l'essence présent dans la GSER par rapport au volume total de l'essence en France : cette variable indique si la GSER accueille un gisement important pour cette essence ;
- proportion du volume sur pied de l'essence dans la GSER par rapport au volume total inventorié dans la GSER : cette variable indique si l'essence est importante à l'échelle de la GSER ;

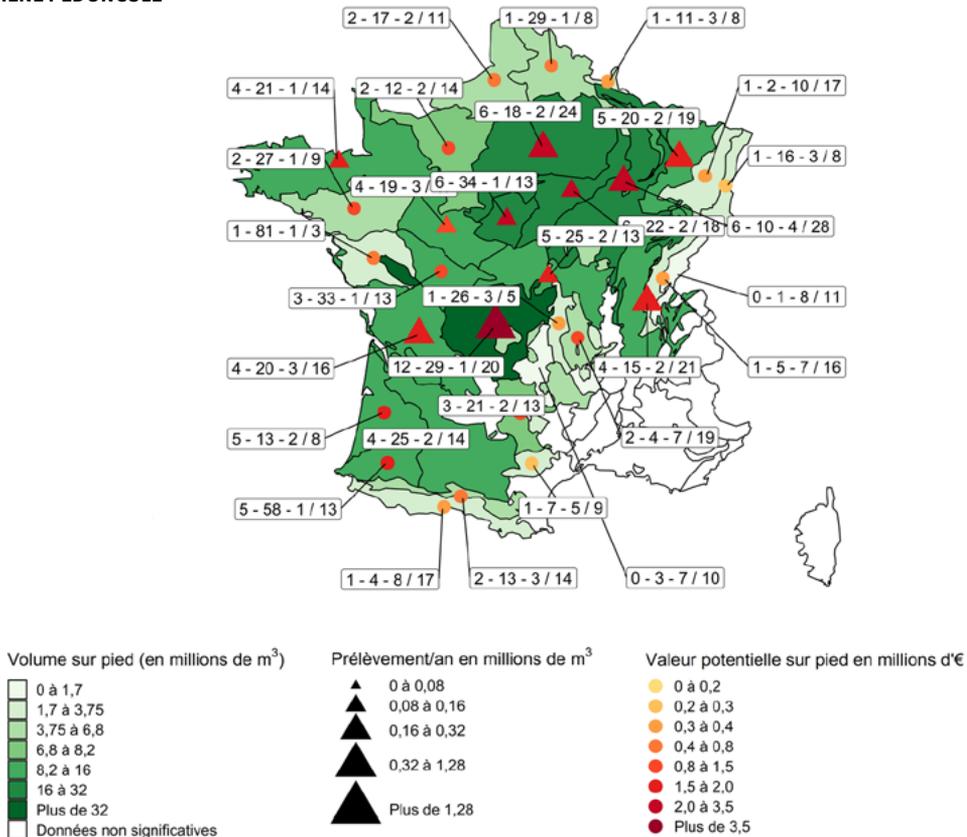
– rang de l’essence en termes de volume sur pied dans la GSER (par rapport au nombre total d’essences inventoriées dans la GSER) : par exemple, 2/13 indique que l’essence occupe le deuxième rang en volume sur 13 essences inventoriées dans la GSER (parmi 43 essences potentielles en France).

Toutes ces informations sont consultables sur des cartes disponibles pour chacune des 20 essences. À titre d’exemple, les cartes obtenues pour le Chêne pédonculé et l’Épicéa sont présentées (figure 3, ci-dessous).

FIGURE 3

REPRÉSENTATION DES ZONES À ENJEU DE PRODUCTION DÉTERMINÉES POUR LE CHÊNE PÉDONCULÉ ET L’ÉPICÉA COMMUN

CHÊNE PÉDONCULÉ



X- Y - Z/Z

X : % du volume de l’essence dans la GSER par rapport au volume total de l’essence en France

Y : % du volume de l’essence dans la GSER par rapport au volume total des essences dans la GSER

Z/Z : rang de l’essence par rapport au nombre total d’essences dans la GSER (en termes de volume)

Rang national (Volume / Prélèvements / euros) = 2 sur 43 / 6 sur 18 / 1 sur 42

Volume total en France = 303 046 154 m³

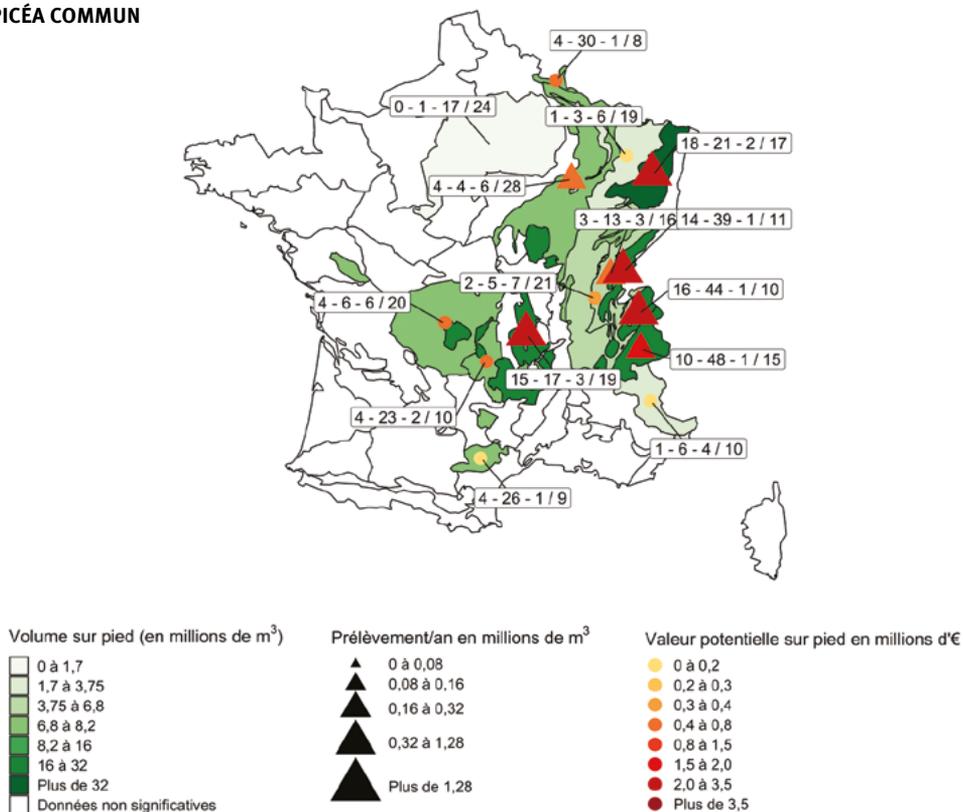
Prélèvement total en France = 2 140 562 m³

Valeur potentielle sur pied en France = 39 798 636 698 euros

FIGURE 3 (SUITE)

REPRÉSENTATION DES ZONES À ENJEU DE PRODUCTION DÉTERMINÉES POUR LE CHÊNE PÉDONCULÉ ET L'ÉPICÉA COMMUN

ÉPICÉA COMMUN



X - Y - Z/Z

X : % du volume de l'essence dans la GSER par rapport au volume total de l'essence en France

Y : % du volume de l'essence dans la GSER par rapport au volume total des essences dans la GSER

Z/Z : rang de l'essence par rapport au nombre total d'essences dans la GSER (en termes de volume)

Rang national (Volume / Prélèvements / euros) = 4 sur 43 / 2 sur 18 / 5 sur 42

Volume total en France = 197 162 506 m³

Prélèvement total en France = 3 886 841 m³

Valeur potentielle sur pied en France = 15 222 575 861 euros

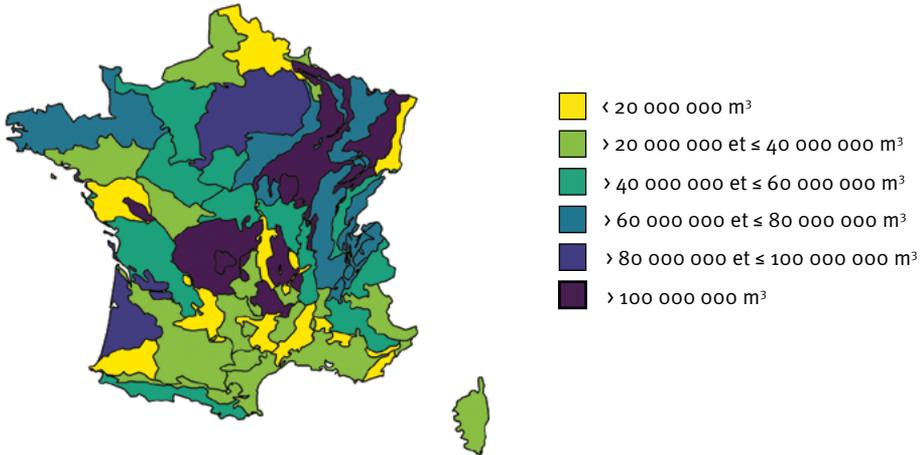
La figure 4 (p. 529) permet de prendre la mesure, à l'échelle de l'ensemble du territoire et pour toutes les essences confondues, de la répartition des volumes sur pied et des prélèvements par GSER. Il apparaît que les GSER F2 (Landes de Gascogne, Dunes atlantiques, Bazadais, Double et Landais), G2 (Plateaux granitiques ouest du Massif central, Plateaux granitiques du centre du Massif central, Morvan et Autunois), C2 (Plateaux calcaires du Nord-Est), et D1 (Massif vosgien central, Collines périvosgienne et Warndt), présentent les taux les plus élevés de volume sur pied et de prélèvement. Ces zones représentent donc des lieux à fort enjeu de production de bois, toutes essences confondues.

FIGURE 4

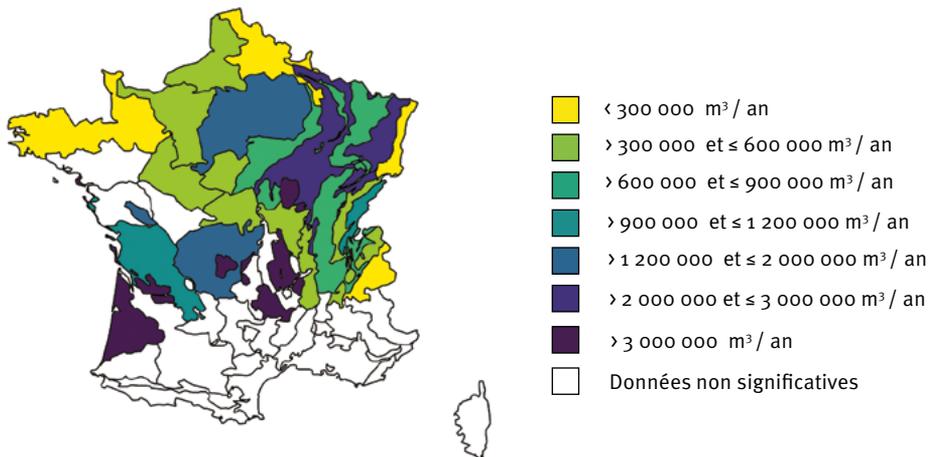
**CARTE DES VOLUMES SUR PIED (en m³)
ET DES VOLUMES PRÉLEVÉS (en m³/an) DANS CHACUNE DES GSER**

Pour les volumes sur pied, la carte a été réalisée avec 20 essences, et 16 pour les volumes prélevés (certaines essences prises en compte pour les volumes sur pied n'ont pas de données de prélèvement significatives comme le Pin d'Alep ou le Mélèze d'Europe par exemple).

Volume sur pied en m³ par GSER
20 essences



Prélèvements en m³/ an dans chaque GSER
16 essences



ÉVALUATION DES SITUATIONS CLIMATIQUES PRÉOCCUPANTES

Les situations climatiques préoccupantes sont évaluées en s'appuyant sur les résultats croisés de trois modélisations : IKS (Legay, 2015), BioClimSol (Lemaire, 2014) et un modèle d'AgroParisTech traduisant la surmortalité liée aux changements climatiques (Taccoen, 2019 ; Taccoen *et al.*, 2019).

Le modèle IKS

Le modèle IKS, créé par Hervé Le Bouler (2014) et développé par l'ONF dans le cadre de projets du RMT AFORCE, est un modèle corrélatif par facteurs limitants indépendants. Il indique, selon la projection climatique choisie, l'évolution de l'aire de compatibilité climatique d'une sélection d'essences. Ce modèle repose sur trois indicateurs calculés à partir des variables climatiques spatialisées :

- la moyenne des températures journalières minimales du mois le plus froid ;
- la somme annuelle des degrés-jours au seuil de 5 °C (= somme des moyennes journalières lorsque la température moyenne journalière est supérieure à + 5 °C) ;
- la somme des déficits hydriques annuels, qui correspond au cumul annuel mois par mois de la différence entre l'eau apportée par les précipitations et le besoin en eau, mesuré par l'évapotranspiration potentielle (ETP, calculée selon la formule de Hargreaves), avec prise en compte des variations de la réserve en eau du sol. Pour un mois donné, si les besoins en eau sont satisfaits par les précipitations ou la réserve en eau du sol, le déficit est nul.

Les données climatiques (normales mensuelles, période de référence 1961-1990) proviennent du jeu de données ClimateEU [<http://tinyurl.com/ClimateEU>, Hamann *et al.* (2013)]. Les données utilisées pour modéliser la compatibilité climatique des essences sont de type présence/absence pour chaque pixel (1 km x 1 km). Le choix a été fait de retenir la projection climatique correspondant à « la moyenne des projections des modèles climatiques » (variable agrégée issue de 18 modèles, cf. <https://climessences.fr/>) pour le scénario plutôt optimiste du GIEC RCP 4.5, à l'horizon 2080.

À partir des données brutes des points d'inventaire de l'IGN (période 2012-2016 (<https://inventaire-forestier.ign.fr/spip/spip.php?rubrique153>), à chaque point d'inventaire indiquant une présence actuelle de l'espèce considérée, le modèle IKS attribue une valeur de présence ou d'absence pour le futur choisi. Pour une GSER donnée, la proportion de points de présence constatée qui se trouve hors de la zone de compatibilité climatique dans le futur fournit un estimateur de la proportion de la ressource considérée comme étant dans une situation climatique préoccupante.

ATTENTION : Ce calcul est une approximation par les auteurs de la part de la ressource se trouvant en dehors de son aire climatique projetée en 2080 dans cette GSER. Ce n'est pas une estimation précise car les points IFN sur lesquels ont été extraites les valeurs ne représentent pas le même volume, et n'ont pas non plus le même poids dans l'échantillonnage. Il est également à noter que les points sont issus des inventaires de 2012 à 2016 et les points d'une année sur l'autre n'ont pas nécessairement le même poids non plus.

Le modèle BioClimSol

BioClimSol est un modèle créé par Jean Lemaire et développé au Centre national de la propriété forestière. Il vise à aider le forestier dans la gestion des peuplements sur pied ou dans le choix des essences lors d'un renouvellement dans un contexte de changement du climat (<https://www.foretriveefrancaise.com/n/bioclimsol/n:558#p507>, numéro 218 de *Forêt-entreprise*).

Un indice spécifique à chaque essence est déterminé en un lieu à partir des variables climatiques, édaphiques et biotiques. Cet indice précise si l'essence est en adéquation stationnelle ou non lorsque les températures auront augmenté de + 1 °C soit un horizon d'environ 2040. Précisément, selon Ouzeau *et al.* (2014), la hausse des températures moyennes serait entre 0,6 et 1,3 °C dans un horizon proche (2021-2050) en fonction des scénarios et des modèles. L'indice fourni pour cette étude a été calculé en prenant des valeurs moyennes pour certaines variables édaphiques et biotiques à l'échelle de la France. Ces valeurs moyennes sont la réserve utile (fixée ici à 130 mm pour les 150 premiers centimètres de sol) et le gui (plante parasite) pour le Sapin (fixé à 2 %). Le pH et les conditions d'engorgement du sol n'ont pas été pris en compte, on travaille donc à sol « constant ».

L'indice climat ainsi obtenu (et prenant en compte la topographie) a été cartographié à la résolution de 1 km x 1 km. À partir de l'indice, des classes de vigilance ont été établies à dire d'expert entre 0 et 10. Ces classes n'ont pas été calculées pour l'Épicéa qui a un indice particulier (basé uniquement sur le risque scolytes) et qui est déjà normé entre 0 et 10.

En utilisant les données IFN de présence de l'essence, la valeur de l'indice est extraite sur chaque point géoréférencé (période 2012-2016). Pour une GSER et pour une essence donnée, la moyenne de ces valeurs de l'indice est calculée. Pour ce modèle, la situation climatique préoccupante est représentée par cette valeur d'indice moyen qui traduit un risque de dépérissement lié au climat.

Le modèle de surmortalité liée aux changements climatiques

Des modèles de surmortalité liée aux changements climatiques ont été développés par AgroParisTech dans le cadre d'une thèse de doctorat (Taccoen, 2019 ; Taccoen *et al.*, 2019). Les données utilisées sont les données de mortalité sur les points de relevés de l'IFN entre 2009 et 2015 (relevé d'arbres morts depuis moins de 5 ans). Le jeu de données a d'abord été filtré pour enlever les mortalités dues aux événements catastrophiques naturels ou non (sites touchés par les tempêtes, ouverture de lignes électriques...). Cela permet d'observer uniquement la mortalité des arbres de diamètre supérieur à 7,5 cm, qui peut être due aux caractéristiques de l'arbre ou du peuplement, ou aux changements de conditions climatiques. Une régression logistique est utilisée pour étudier le lien entre la mortalité et une trentaine de variables liées à la compétition (circonférence relative, nombre de tiges/ha...), à l'intensité de la gestion forestière, au climat (température, précipitations), et au changement climatique. Pour prendre en compte le changement climatique, des anomalies de températures et de précipitations ont été calculées entre une période de référence (1961-1987) et une période contemporaine (les 15 années précédant le relevé de placette par l'IGN). Ce modèle permet d'identifier les facteurs associés à la mortalité des arbres et d'évaluer l'importance des effets liés aux changements climatiques par rapport aux autres. Il est à noter, sans surprise, qu'une part très majoritaire de la mortalité est expliquée par les variables de compétition.

Dans le cas où un effet significatif des variables liées aux changements climatiques est observé sur la mortalité, les auteurs ont comparé la mortalité, toutes tiges confondues (jeunes + adultes), indiquée par le modèle comprenant toutes les variables, à la mortalité selon le modèle avec toutes les variables sauf celles liées aux changements climatiques. La valeur de surmortalité due aux variables liées aux changements climatiques est ainsi obtenue.

Cette surmortalité est mesurée en pourcentage sur 5 ans par rapport au taux de mortalité de base observé sans changement climatique. L'horizon temporel est donc actuel.

Comme précédemment, pour chaque essence et pour chaque GSER, une moyenne de surmortalité est calculée pour définir une situation climatique préoccupante.

Ces trois modélisations s'inscrivent dans la lignée de précédents indices climatiques, notamment de sécheresse avec les travaux de Pardé, Thornthwaite ou Patterson dans les années 1960-1970. Des cartes de déficit hydrique ont été réalisées afin de connaître l'adaptation d'une essence à un territoire, mais aussi pour déterminer des zones de production potentielle (Riou-Nivert, 2005).

Les modélisations utilisées dans l'étude permettent une prise en compte plus ciblée des effets du changement climatique par rapport à ces études antérieures.

Liste des essences étudiées

Compte tenu de la disponibilité limitée des expériences de modélisation au moment de l'étude, seules 10 essences ont pu faire l'objet d'une évaluation de leur niveau de préoccupation climatique : le Charme, le Chêne pédonculé, le Chêne pubescent, le Chêne sessile, le Douglas, l'Épicéa commun, le Hêtre, le Pin maritime, le Pin sylvestre, le Sapin pectiné. Elles représentent 72 % du volume total sur pied de la forêt en France.

MÉTHODE D'IDENTIFICATION DES ZONES À ENJEUX

Les zones à enjeux sont des zones géographiques combinant à la fois un enjeu de production et une situation climatique préoccupante, tels que définis précédemment. Pour définir ces zones, les variables sont recueillies par essence (§ p. 534) ou pour toutes les essences confondues (§ p. 535), selon l'analyse souhaitée. Pour chaque zone à enjeu de production, les variables de production représentative de la ressource (§ p. 525) sont d'abord croisées avec les indices issus des trois modèles (§ p. 530). On obtient pour chaque variable de production d'une GSER (et d'une ou de plusieurs essences, selon le cas) une estimation de la ressource (représentée par ces variables) en situation climatique préoccupante, c'est-à-dire pouvant être exposée aux changements climatiques. Par simplification, seul le terme « exposé » sera utilisé par la suite. Ce résultat est décliné pour chacune des trois modélisations (figure 5, p. 533).

Toutes les variables pour les trois modèles sont ensuite combinées pour chaque GSER en utilisant la méthode d'aide à la décision Prométhée-Gaia (<http://www.promethee-gaia.net/FR/>). Il s'agit d'une analyse multicritère basée sur les travaux de Brans *et al.* (1986) et Brans & Mareschal (2002). Pour mener cette analyse, il est décidé que lorsque les trois modèles convergent, le niveau de préoccupation climatique est considéré comme important.

Par simplification dans cette analyse, il est donné aux niveaux de préoccupation climatique produits par les trois modèles le même poids, même si leurs modes de construction et les horizons temporels modélisés sont différents. Par contre, des poids différents ont été attribués aux variables de production selon leur importance estimée à dire d'experts et la fiabilité de la donnée (tableau II, ci-dessous). À noter que ces 6 variables donnent des informations différentes et complémentaires mais sont interdépendantes.

TABLEAU II **Poids attribué aux différentes variables dans l'approche Prométhée-Gaia**

Variabiles	Poids attribué
Volumes exposés sur pied	4
Volumes exposés sur pied / ha	3
Volumes prélevés exposés	2
Volumes prélevés exposés / ha	1
Valeur potentielle exposée	4
Valeur potentielle exposée / ha	3

Cette méthode peut être mise en œuvre de deux manières : *via* une approche par essence pour identifier les zones à enjeux propres à chaque essence et *via* une approche multi-essences.

SCHEMA THEORIQUE DE LA METHODOLOGIE UTILISEE POUR EVALUER LES ZONES A ENJEUX

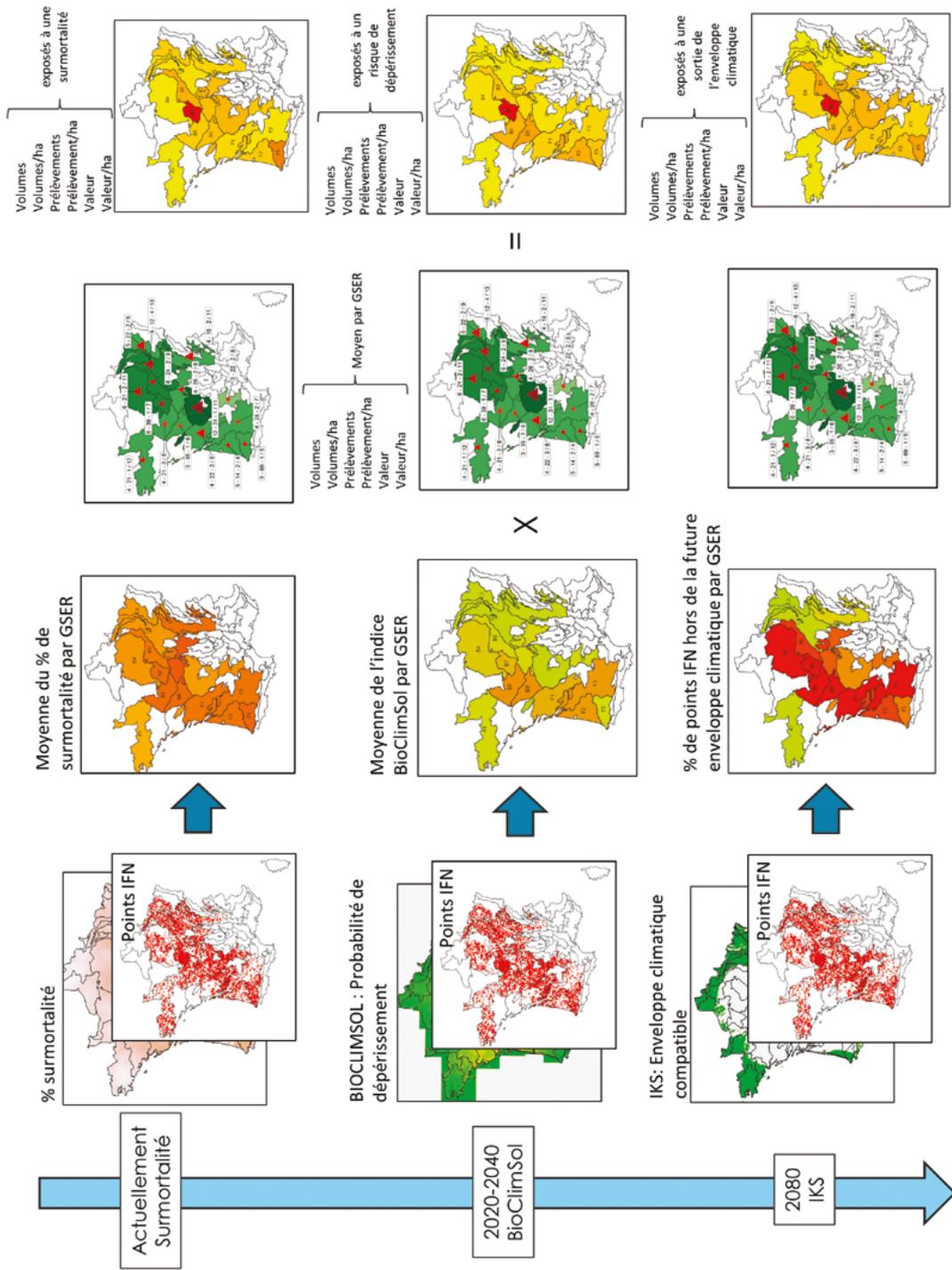


FIGURE 5

Approche par essence

- *Identification des essences pour lesquelles l'enjeu est le plus fort à l'échelle nationale*

Pour cette analyse, les variables de production exposées ramenées à l'hectare de GSER ne sont pas considérées. Les autres variables absolues de production exposée (volumes sur pied, volumes prélevés, valeur potentielle) sont additionnées pour tout le territoire. On obtient donc des variables de production exposées pour chaque espèce (parmi les 10 étudiées), à l'échelle de l'ensemble du territoire.

Les essences pour lesquelles le niveau de préoccupation climatique combiné à l'enjeu de production est le plus élevé à l'échelle nationale sont (méthode Prométhée-Gaïa, ordre décroissant d'enjeu) : le Chêne pédonculé, le Sapin, le Chêne sessile, l'Épicéa, le Hêtre et enfin le Douglas qui a un enjeu moindre que les essences précédentes.

- *Identification des GSER où l'enjeu par essence est le plus fort*

La méthode Prométhée-Gaïa permet de calculer un estimateur d'exposition de la ressource pour l'essence considérée pour chacune des GSER. Les GSER sont alors cartographiées selon l'importance des estimateurs d'exposition de la ressource (figure 6, ci-dessous).

FIGURE 6 REPRÉSENTATION DES ZONES À ENJEUX POUR 6 ESSENCES

Le dégradé de couleur du rouge au jaune indique un enjeu décroissant. Par exemple la GSER à plus fort enjeu pour le Sapin est la GSER D1, puis la G2, puis I1 et E2 qui sont équivalentes et enfin G4.

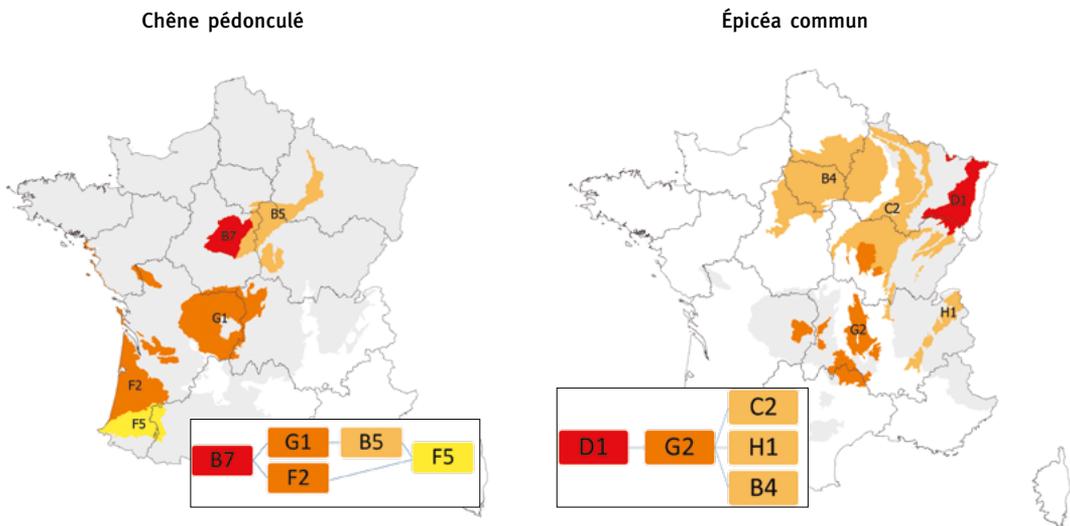
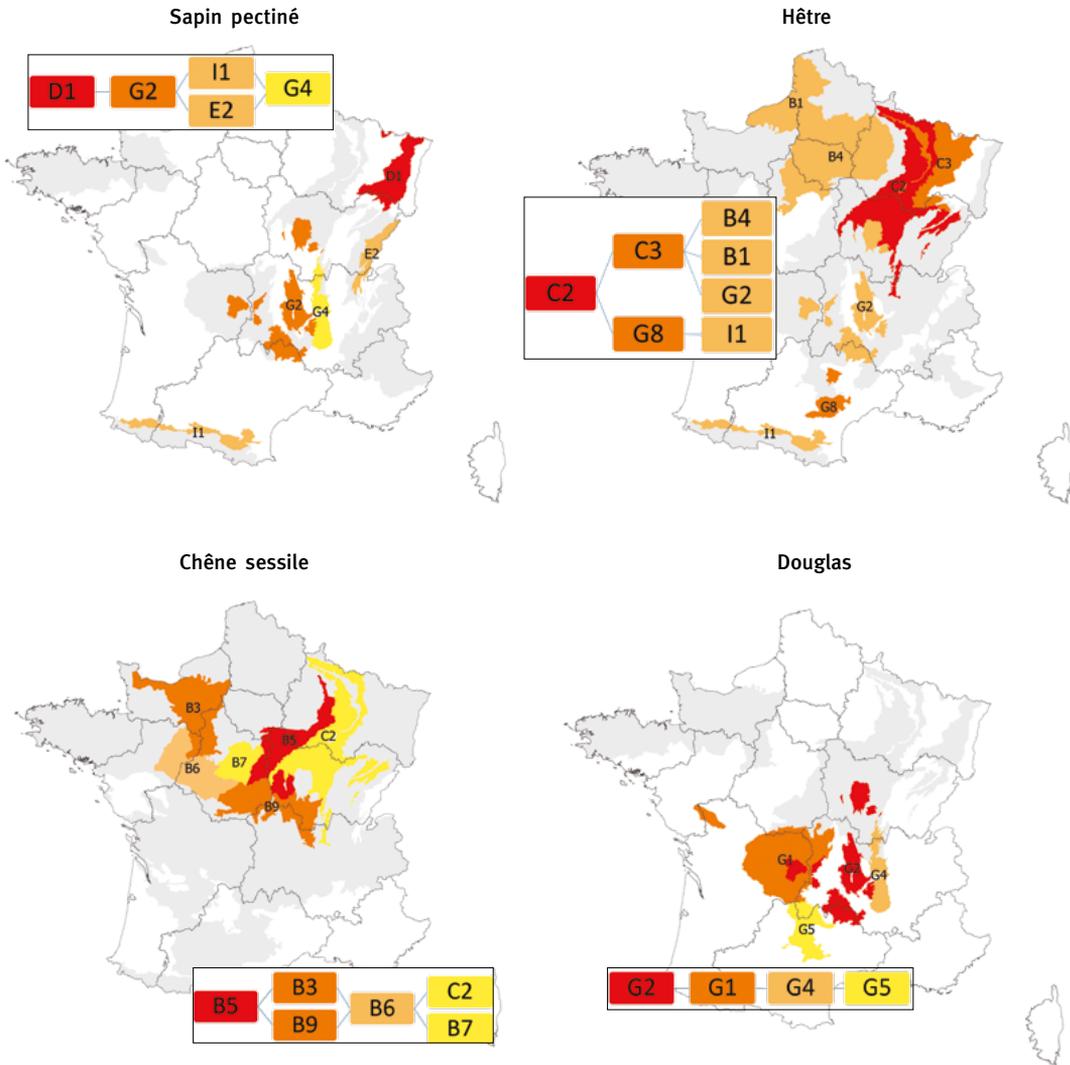


FIGURE 6 (SUITE) REPRÉSENTATION DES ZONES À ENJEUX POUR 6 ESSENCES



Approche multi-essences

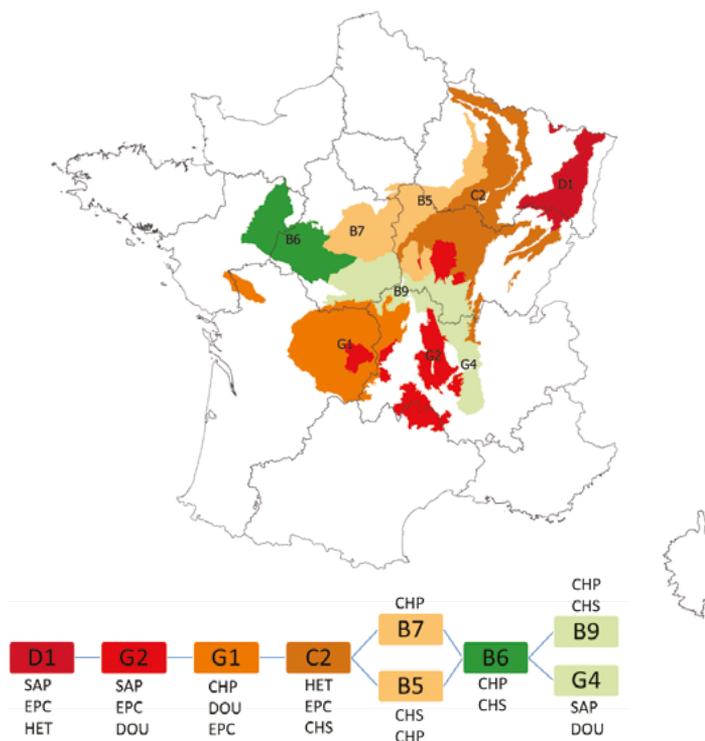
L'approche multi-essences permet de mettre en évidence une préoccupation globale concernant un territoire donné, c'est-à-dire les zones à forts enjeux pour les 10 essences étudiées confondues.

Cette approche est complémentaire de l'approche par essence. Elle permet d'intégrer certaines zones pour lesquelles les volumes sur pied exposés pour une ou plusieurs essences prises individuellement sont faibles (parce que les volumes ou le niveau de la préoccupation climatique est faible) mais qui se révèle être des zones à forts enjeux si on considère l'ensemble des essences en place. Pour chaque GSER, les variables d'exposition des essences présentes (parmi les 10 étudiées)

ont été additionnées. Celles pour lesquelles l'enjeu est le plus fort, toutes essences confondues, sont révélées par la méthode Prométhée-Gaïa (figure 7, ci-dessous).

FIGURE 7 **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



Les zones déterminées avec l'approche multi-essences sont globalement cohérentes avec celles de l'approche par essence. La GSER D1 composée du massif vosgien central, des collines périvosiennes et Warndt est celle pour lesquelles les enjeux sont les plus importants. Les essences les plus préoccupantes dans ce territoire sont le Sapin et l'Épicéa (puis le Hêtre). La GSER G2 (plateaux granitiques du centre et ouest du Massif central, Morvan et Autunois) arrive en seconde position après la GSER D1 du Grand-Est. Cela signifie que, en termes de bois total (10 essences combinées), il y a un risque élevé dans la GSER G2, même si, en considérant les essences séparément, la GSER G2 peut sembler moins prioritaire. Ce sont principalement des essences résineuses qui sont préoccupantes dans ce territoire (Sapin, Épicéa et Douglas). Le Chêne pédonculé est la principale essence préoccupante de la GSER G1 (châtaigneraie du Centre et de l'Ouest, marches du Massif central et plateaux limousins). Par ailleurs, les plateaux calcaires du Nord-Est (GSER C2) sont à enjeu à cause du Hêtre, de l'Épicéa et du Chêne sessile. Les Chênes sessile et pédonculé sont aussi les principales essences préoccupantes des GSER B7, B5 et B6.

LIMITES ET PERSPECTIVES

Limites de l'étude

La méthode proposée pour déterminer les zones à enjeux permet une approche nouvelle de la question. Les résultats semblent cohérents avec l'expérience de terrain, tout en proposant une approche formalisée pour l'expliquer. Par cette méthode, les territoires avec de forts volumes, prélèvements et valeur potentielle considérés comme exposés à un risque climatique sont mis en évidence. Ainsi, des zones de production de bois marginales n'apparaissent pas comme zones à enjeux même si elles sont très exposées au changement climatique (forêt méditerranéenne par exemple). Évidemment, au niveau local, la vulnérabilité de cette forêt représente un enjeu non négligeable pour la filière. Pour pallier ce biais, notre analyse pourrait être ajustée à l'échelle d'une région administrative. Elle permettrait la prise en compte de cet enjeu local. Il faudrait alors sans doute passer de l'échelle de la GSER à celle de la SER.

L'étude présentée ici ne tient pas compte du risque phytosanitaire ou tempête. Bien que complexe, c'est une question fondamentale car une partie des risques biotiques est accentuée par le changement climatique. En effet, de nombreux parasites sont favorisés par des températures hivernales plus douces (processionnaire du pin, phytophthora...) ou par des températures estivales plus élevées (scolytes, pucerons...), ou encore se développeront plus facilement sur des arbres stressés par la sécheresse (parasites de faiblesse). Le risque phytosanitaire est cependant peu cartographiable et son évolution dans le temps n'est que peu prévisible (notamment en ce qui concerne les parasites invasifs). Le risque tempête est également très important par les volumes touchés (Biro *et al.*, 2009). Cependant, il n'a pas pu être clairement relié au changement climatique. Enfin, cartographier cet aléa et son évolution s'avère difficile. Cela a été tenté précédemment (Riou-Nivert *et al.*, 2005) mais une telle analyse n'est pour l'instant pas disponible en routine. Ce risque dépend en priorité de l'essence et de la hauteur des peuplements et secondairement de la sylviculture. Il sera intéressant de confronter les cartes de zones à enjeux avec des cartes de sensibilité à la tempête lors de prolongements ultérieurs, les forêts landaises pourraient peut-être ressortir ainsi.

Une autre limite concernant ces enjeux locaux tient au fait que l'étude présentée ici ne repose actuellement que sur 10 essences. Certaines ne sont donc pas prises en compte par les modèles (IKS, BioClimSol et Surmortalité) même si elles représentent des volumes importants dans plusieurs GSER. Pour 34 GSER (cas 1), les 10 essences étudiées représentent au moins 60 % du volume sur pied de la GSER et le volume sur pied restant dans chacune de ces GSER (autres essences) est inférieur à 20 millions de m³, de sorte que cette sélection de 10 essences reste assez représentative de la situation locale. Pour les 11 autres GSER, trois autres cas de figure sont possibles (cas 2, 3 et 4, tableau III, ci-dessous). Pour les cas 2 et 3, la limitation de l'étude à 10 essences a une

TABLEAU III Représentativité des 10 essences étudiées : typologie des cas de figure selon les GSER

Cas de figure	Part du volume sur pied occupée, par les 10 essences dans la GSER	Volumes restant
Cas 1 (34 GSER concernées)	≥ 60 % du volume total	≤ 20 millions de m ³
Cas 2 (B4, C2, G1 et F1)		≥ 20 millions de m ³
Cas 3 (J3, J1, G7 et H4)	≤ 60 % du volume total	≤ 20 millions de m ³
Cas 4 (K1, J2 et C5)		≥ 20 millions de m ³

incidence réduite puisque, pour le cas 3, les GSER concernées présentent de faibles volumes forestiers et, pour le cas 2, les volumes manquants ne représentent pas une forte proportion des GSER. Le cas 4 regroupe des GSER dans lesquelles des études spécifiques pourraient être engagées. Les espèces principales qui forment les volumes manquants sont le Châtaignier et le Frêne, ce qui est attendu vu leur classement à l'échelle nationale, mais aussi le Chêne vert et, dans une moindre mesure, le Mélèze d'Europe, le Pin d'Alep et le Pin noir.

Perspectives d'amélioration de la méthode

L'étude présentée ici est uniquement basée sur des variables permettant d'évaluer la fonction de production de bois, c'est un parti pris du projet ESPERENSE auquel elle se rattache. Les autres fonctions et services écosystémiques de la forêt ne sont pas pris en compte. Il serait intéressant de faire évoluer la méthode en intégrant d'autres variables indicatrices de ces fonctions pour révéler par exemple des forêts ayant des fonctions de protection fortement exposées.

La détermination des zones à enjeu s'est appuyée, d'une part sur les données actuelles de l'IGN qui sont d'une bonne fiabilité, et d'autre part, sur trois modélisations en cours de développement. Ces modèles sont basés sur des principes, des hypothèses, des scénarios, des modèles climatiques et des horizons temporels très différents. Ces modélisations abordent donc la préoccupation climatique de différente manière et ne peuvent être comparées les unes aux autres. Elles constituent des briques de notre compréhension de l'exposition possible des peuplements. L'incertitude autour des conclusions de cette étude reste très forte et peut difficilement être appréciée étant donné l'impossibilité (dans le cadre de l'étude) de faire varier les scénarios utilisés dans chacune de ces expériences de modélisation. La méthode est cependant suffisamment souple, grâce à l'utilisation du logiciel Prométhée-Gaia, pour envisager ces développements dans le cadre d'études complémentaires. Un élargissement à d'autres essences et à d'autres expériences de modélisation est aussi possible.

Perspectives de valorisation des résultats

La définition de zones à enjeux permet par exemple d'orienter le test de nouvelles essences et provenances qui pourraient, si nécessaire, être substituées aux essences en place potentiellement vulnérables aux évolutions climatiques. Dans le cadre du projet ESPERENSE, la mise en place des premiers dispositifs du réseau expérimental s'est appuyée sur les conclusions de cette étude (Paillassa & Berthelot, 2021). La priorité s'est portée sur les Chênes (sessile et pédonculé). Des dispositifs expérimentaux ont été installés dans les zones à enjeux pour ces espèces (GSER B7 et B5, figure 6) qui correspondent aux SER Sologne-Orléanais, Champagne humide, Pays d'Othe et Gâtinais oriental, Pays-Fort, Nivernais et plaines prémorvandelles. Ces dispositifs permettent d'évaluer des alternatives plus méridionales aux essences en place. Les chênes sont aussi testés dans des GSER septentrionales, où leur chance de survie et de croissance dans le futur sont estimées plus grandes. L'identification de ces zones méridionales (avec climat actuel comparable à celui du futur de la zone à enjeux) ou septentrionales (avec climat futur comparable au climat actuel de la zone à enjeux) s'appuie sur une recherche d'analogues climatiques (<https://climessences.fr>). Le réseau a vocation à s'étendre avec la mise en place de dispositifs pour d'autres essences, dans les zones à enjeux identifiées dans l'étude.

Hedi KEBLI – Céline PERRIER – Philippe RIOU-NIVERT
 CENTRE NATIONAL DE LA PROPRIÉTÉ FORESTIÈRE
 INSTITUT POUR LE DÉVELOPPEMENT FORESTIER
 47 rue de Chaillot
 F-75116 PARIS
 (hedi.kebli@cnpf.fr)
 (celine.perrier@cnpf.fr)
 (philippe.riounivert@cnpf.fr)

Yves ROUSSELLE
 OFFICE NATIONAL DES FORÊTS
 Département Recherche, Développement et Innovation
 UMR ONF/INRAE BioForA
 2163 Avenue de la Pomme de Pin
 CS 40001 ARDON
 45075 ORLÉANS CEDEX 2
 (yves.rouselle@onf.fr)

Myriam LEGAY
 AgroParisTech
 14 rue Girardet
 CS 14216
 F-54042 NANCY CEDEX
 (myriam.legay@agroparistech.fr)

François MORNEAU
 INSTITUT NATIONAL DE L'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE
 ET FORESTIÈRE (IGN)
 Château des Barres
 F-45290 NOGENT-SUR-VERNISSON
 (francois.morneau@ign.fr)

Remerciements

Cette étude a été menée dans le cadre du projet ESPERENSE porté par le RMT AFORCE et financé par le fond stratégique de la forêt et du bois. Éric Paillassa, Brigitte Musch, Alexandre Piboule, Hervé Le Bouler, Jean Lemaire, Christian Piedallu, Adrien Taccoen, Jean-Pierre Renaud, François Morneau et Florence Gohon sont remerciés pour leur participation et leur aide dans ce projet.

RÉFÉRENCES

- Birot, Y., Landmann, G., & Bonhême, I. (2009). *La Forêt face aux tempêtes*. Éditions Quæ. 433 p.
- Brans, J.-P., & Mareschal, B. (2002). *Prométhée-Gaia : Une méthodologie d'aide à la décision en présence de critères multiples*. Bruxelles : Éditions de l'Université de Bruxelles (Statistiques et mathématiques appliquées).
- Brans, J.-P., Vincke, P., & Mareschal, B. (1986). How to select and how to rank projects : The PROMETHEE method. *European journal of operational research*, 24(2), 228-238.
- Charru, M. (2012). *Diagnostic et origine environnementale des évolutions récentes de la productivité forestière en France à partir des données de l'Inventaire Forestier National (IFN)*. Thèse AgroParisTech. UMR LERFOB.
- Cheuib, A., Badeau, V., Boe, J., Chuine, I., Delire, C., Dufrière, E., François, C., Gritti, E.S., Legay, M., Page, C., Thuiller, W., Viovy, N., & Leadley, P. (2012). Climate change impacts on tree ranges: model intercomparison facilitates understanding and quantification of uncertainty. *Ecology Letters*, 15, 533-544.
- Hamann, A., Wang, T., Spittlehouse, D.L., & Murdock, T.Q. (2013). A comprehensive, high-resolution database of historical and projected climate surfaces for western North America. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(9), 1307-1309.
- Kebli, H., Perrier, C., Brahic, P., Paillassa, E., & Girard, S. (2019). Un réseau collectif d'évaluation du potentiel d'adaptation des essences et provenances pour le futur. *Forêt entreprise*, (249), 24-26.
- Le Bouler, H., Legay, M., & Riou-Nivert, P. (2014). Le Climat change, vite, trop vite : Comment aider les arbres à le suivre? *Forêt Entreprise*, (127), 26-29.
- Legay, M. (2015). *IKSMAPS1 : Production de cartes précalculées d'évolution des aires climatiques des principales essences de la foresterie française à l'aide du modèle IKS – Volet 1 : Évaluation du modèle et cahier des charges de l'outil d'aide à la décision*. Projet du RMT AFORCE. 136 p.
- Lemaire, J. (2014). BIOCLIMSOL, un outil d'aide à la décision en développement pour réagir face au changement climatique. *Forêt entreprise*, (218).

- Ouzeau, G., Déqué, M., Jouini, M., Planton, S., & Vautard, R. (2014). *Le Climat de la France au XXI^e siècle*. Rapport de la Direction générale de l'énergie et du climat. www.developpement-durable.gouv.fr.
- Paillassa, E., & Berthelot, A. (2021). Premiers essais du réseau Esperense. *Forêt entreprise*, (260), 40-45.
- Riou-Nivert, P. (2005). *Les résineux. Tome 2 : Écologie et pathologie*. Paris : CNPF-IDF.
- Riou-Nivert, P., Hervé, J., Belouard, T., Renaud, J., Paillassa, E., Rosa, J., Piton, B., & Mathevet, A. (2005). *Évaluation des facteurs de résistance au vent à l'aide des données de l'IFN. Application aux diagnostics de stabilité régionaux*. Rapport final d'étude financée par le GIP ECOFOR (convention 2001.45 et avenant 2004.55) juillet. 58 p.
- Taccoen, A. (2019). *Détermination de l'impact potentiel du changement climatique sur la mortalité des principales essences forestières européennes*. AgroParisTech. Thèse de doctorat.
- Taccoen, A., Piedallu, C., Seynave, I., Perez, V., Gégout-Petit, A., Nageleisen, L.-M., Bontemps, J.-D., & Gégout, J.-C. (2019). Background mortality drivers of European tree species : Climate change matters. *Proceedings of the Royal Society B*, 286(1900), 20190386.

COMMENT DÉTERMINER L'EXPOSITION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES DES ZONES DE PRODUCTION FORESTIÈRE FRANÇAISE ? Méthodologie utilisée dans le projet ESPERENSE pour cibler les zones d'intérêt pour l'installation d'essais de comparaison d'essences et de provenances (Résumé)

Les dernières observations de dépérissements et l'analyse de leurs causes tendent à confirmer la vulnérabilité de certaines des principales essences forestières françaises vis-à-vis des changements climatiques. Conscients de ces enjeux, les gestionnaires s'interrogent sur la conduite et le renouvellement de leurs peuplements. Le réseau multi-organismes ESPERENSE se met en place pour rechercher des réponses à ces interrogations via l'organisation d'un réseau d'essais de comparaison d'essences et de provenances. Afin de rationaliser l'effort expérimental, une méthodologie a été établie pour prioriser les zones du territoire métropolitain dans lesquelles une recherche des alternatives aux essences en place doit être menée. Elle consiste à sélectionner les zones à fort enjeu de production de bois, et qui sont en même temps déjà en situation préoccupante ou qui le seront à l'avenir du fait des évolutions du climat en s'appuyant sur trois différentes approches de modélisation. Le principe consiste donc à évaluer le risque par la combinaison des enjeux et de leur exposition. La démarche de construction de ce zonage est détaillée. Les cartes résultant de ce travail sont mises à disposition pour les principales essences françaises.

DETERMINING THE EXPOSURE OF FOREST PRODUCTION ZONES TO CLIMATE CHANGE IN FRANCE. Methodology used in the ESPERENSE project to target zones of interest and set up trials to compare species and provenances (Abstract)

The latest observations of diebacks and the analysis of their causes tend to confirm the vulnerability of some of the main French forest species to climate change. Aware of these stakes, managers are pondering about stand management and renewal. The multi-organisation network ESPERENSE is being set up to search for answers to these questions via a network of trials aimed at comparing species and provenances. In order to rationalise the experimental effort, a methodology has been developed to prioritise the zones of mainland France where alternatives to current local species have to be investigated. The approach consists in selecting zones strongly involved in timber production that are already of concern or will be of concern in the future because of climate change, based on 3 modelling approaches. The risk is evaluated by combining stakes and exposure. The zoning approach is detailed. The resulting maps are made available for the main species found in France.

Citation de l'article :

Kebli, H., Perrier, C., Riou-Nivert, P., Rousselle, Y., Legay, M., & Morneau, F. (2021). Comment déterminer l'exposition aux changements climatiques des zones de production forestière française ? *Revue forestière française*, 73(5), 523-540. <https://doi.org/10.20870/revforfr.2021.7104>



Licence Creative Commons

Attribution + Pas de Modification + Pas d'Utilisation Commerciale (BY ND NC)