



Les forêts de la Métropole Rouen Normandie face au changement climatique



Groupe interdisciplinaire d'experts locaux sur le climat



métropole
ROUENNORMANDIE

RÉFÉRENT
GIEC LOCAL
Michaël AUBERT

AUTEURS

Léo KAZMIERCZAK, Michaël AUBERT,
Frédéric CHARRIER

EXPERTS SOLLICITÉS

Éric HINCELIN, Cyril RETOUT,
Jean-Baptiste REBOUL
(Centre Régional de la Propriété Forestière de Normandie)
Jean-François CHENY, Pierre MILLER
(Office National des Forêts) ;
Christelle SIMON, Guillaume FRESNEL
(Métropole Rouen Normandie)

Sommaire

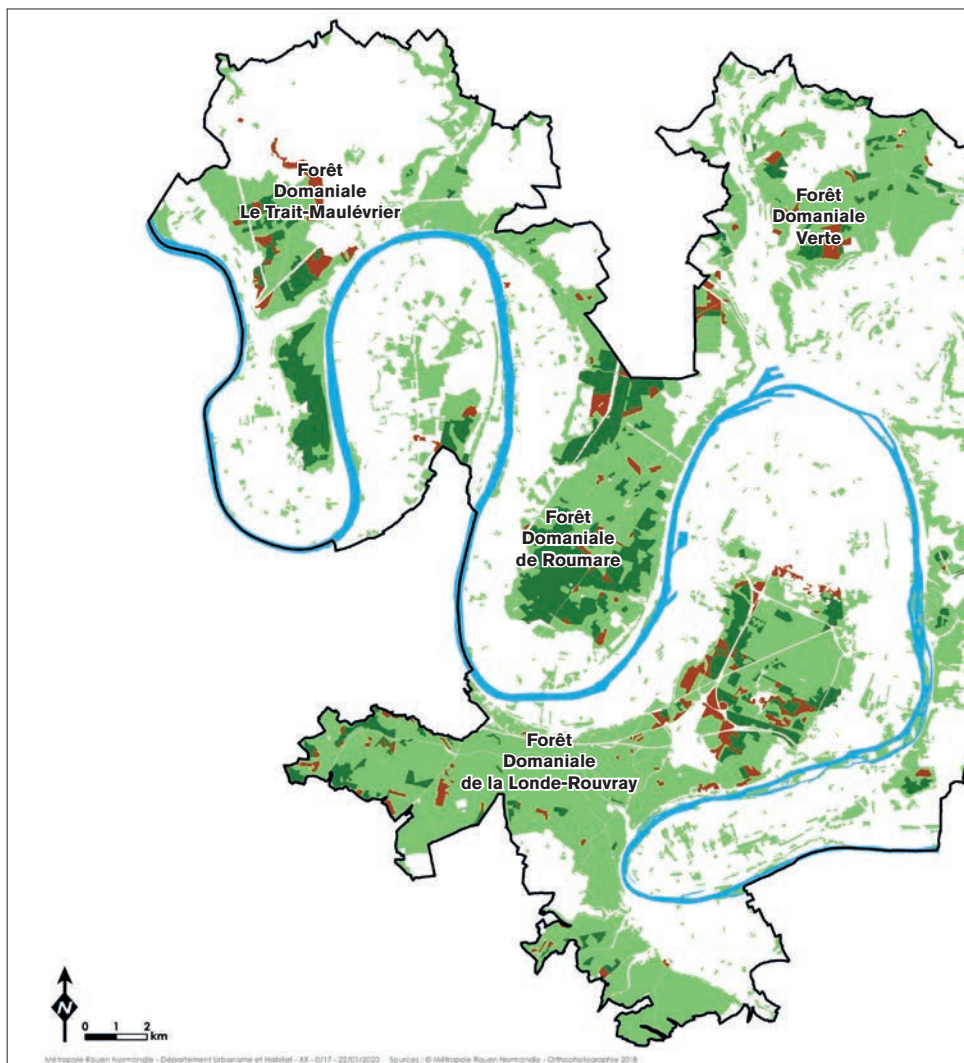
LES FORÊTS DE LA MÉTROPOLE ROUEN NORMANDIE ET LEURS FONCTIONS	6
CHANGEMENT CLIMATIQUE ET DURABILITÉ DE LA PRODUCTION FORESTIÈRE NORMANDE	8
DES PAYSAGES FORESTIERS EN MUTATION	12
PERSPECTIVES PAR ESSENCE : Hêtre, Chênes sessile, pédonculé et pubescent, Pin sylvestre, Sapin Douglas, Robinier faux-acacia	16
CONCLUSION	33
RECOMMANDATIONS POUR L'AMÉLIORATION DES CONNAISSANCES	34
BIBLIOGRAPHIE	35



Les forêts de la Métropole Rouen Normandie

La Métropole Rouen Normandie est composée à part égale de forêts, de zones agricoles et de zones urbaines. La forêt occupe donc une surface relativement importante dans le territoire (24 500 ha) avec notamment 4 grands massifs forestiers domaniaux (Roumare, Forêt Verte, le Trait Maulévrier et La Londe-Rouvray). Les autres forêts sont entretenues par des gestionnaires privés (47 % de la surface forestière totale) ou d'autres gestionnaires publics (5 %). Les peuplements de feuillus sont majoritaires sur le territoire (78% de la surface forestière totale) avec comme essences principales différents chênes (sessile, pédonculé) et le hêtre. Le reste des peuplements est constitué à 20% de conifères dont les principales essences sont des pins (sylvestre et laricio). Les forêts mixtes associant feuillus et conifères ne représentent qu'une part marginale des peuplements (2%) (Figure 1).

FIGURE 1 : Localisation des massifs forestiers sur le territoire de la Métropole Rouen Normandie - Sources : © Métropole Rouen Normandie, Département Urbanisme et Habitat, Orthophotographie, 2018. Carte réalisée en 2020



Les forêts assurent plusieurs fonctions : écologique, économique, sociale et patrimoniale. Ces milieux constituent des réservoirs riches en biodiversité et assurent de nombreux services éco-systémiques contribuant au bien-être des sociétés humaines (« poumon vert », îlots de fraîcheur, production de bois, accueil du public, etc...). Ces atouts renforcent la nécessité de les rendre résilients aux aléas météorologiques et climatiques. Ces écosystèmes jouent notamment un rôle essentiel dans la régulation du climat en absorbant et en stockant le dioxyde de carbone (CO₂) présent dans l'air via la photosynthèse. Ce processus permet en outre de produire de l'oxygène (O₂), gaz vital pour chaque être humain.

En France, la séquestration annuelle de carbone par les forêts est estimée à environ 88 Millions de teqCO₂/an¹ (MteqCO₂/an.). À cela s'ajoutent les effets de substitution dans les filières bois² qui participent à hauteur 42 MteqCO₂/an, avec une part importante de la

substitution bois-matériau (32,8 MteqCO₂/an) (Roux, Dhôte et al., 2017 sur la base des données 2013). À l'échelle de la Métropole Rouen Normandie, la séquestration annuelle du carbone par les forêts est estimée à environ 110 000 teqCO₂ et la séquestration par les effets de substitution des produits bois représente environ 11 900 teqCO₂/an³.

À avec une surface forestière de production de 22 500 ha (5% de la surface de production à l'échelle régionale), le bois prélevé dans les forêts sur le territoire de la Métropole est destiné à trois usages principaux⁴ :

- Le bois d'œuvre pour la construction, à majorité de feuillus (67%), dont la production représente environ 42 000 m³/an. Cela représente 40 à 80 emplois directs et 300 à 400 emplois indirects⁵. Le bois d'œuvre permet le stockage durable du carbone contenu dans le bois.
- Le bois de trituration issu des arbres dont le bois est de moins bonne qualité et transfor-

mé en panneaux de particules au sein de la région. Cette utilisation permet également le stockage durable du carbone contenu dans le bois.

▪ Le bois énergie (bois bûche, bois plaquette, granulés) pour l'alimentation en énergie des industries locales et des foyers également à majorité de feuillus (93%), avec une production maximale s'élevant à environ 87 500 m³/an, soit 25% des besoins du territoire. Pour 1000 tonnes de bois brûlés, la filière bois-énergie/industrie représente 0,8 Equivalent Temps-Plein (ETP) en forêt⁶ et 2,3 ETP en bois bocager. **Si cette utilisation permet de substituer une ressource « verte » renouvelable à l'utilisation des énergies fossiles pour la production d'énergie, le bois énergie reste néanmoins émetteur de carbone dans l'atmosphère au contraire de l'utilisation de bois d'œuvre et de trituration**

die et leurs fonctions



FIGURE 2 : Volumes de bois vendus extraits de la forêt à l'échelle de la Normandie
SOURCE : DRAAF Normandie, 2016 ;
Remarque : Les volumes auto-consommés, le bois de chauffage utilisé par les particuliers, et les autres volumes non déclarés n'ont pas été pris en compte dans l'estimation de la récolte totale.

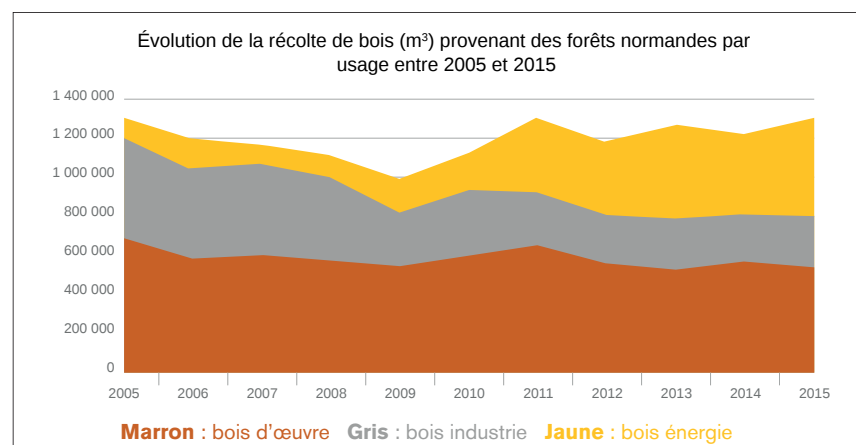
Le rôle de la filière bois dans la transition écologique du territoire et la décarbonation de l'économie est non négligeable. Le bois énergie constitue une alternative locale pour remplacer les énergies fossiles, et le bois d'œuvre est une solution pour stocker le carbone sur le long-terme. Bien que la mobilisation de la ressource en bois reste constante en Normandie depuis 2005, la filière bois-énergie s'est fortement développée en 10 ans (+ 500% de production en bois énergie plaquette, Figure 2). Cette évolution peut s'expliquer par l'arrêt de la consommation de bois des usines de fabrication de pâte à papier, ainsi que par l'entrée en vigueur en 2009 du « paquet énergie-climat 2020 » à l'échelle européenne. Dans ce plan d'action, le bois énergie vise à contribuer à plus de 40% des objectifs de développement des énergies renouvelables des états membres. Cet objectif se retranscrit dans la loi de transition énergétique de 2015 qui prévoit de porter à 32% la part des énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie d'ici à 2030, et dans laquelle le bois énergie constitue un levier. La ressource en bois est donc davantage envisagée comme un moyen de substitution aux énergies fossiles, plutôt que pour le stockage du carbone dans les forêts ou les produits bois (AcclimaTerra et al., 2018). Pourtant, cette promotion importante du bois énergie dans un contexte de transition énergétique ne s'est pas accompagnée d'une étude préalable sur les impacts d'une telle politique. Il n'existe pas d'études suffisamment précises sur l'effet de ces prélèvements sur la durabilité des éco-

systèmes forestiers, ni des effets des résidus de la combustion (fumées, cendres) sur l'environnement.

Enfin, les forêts de la Métropole participent à l'identité paysagère du territoire et le cadre offert aux habitants est propice aux loisirs et aux activités sportives de plein air. Les massifs domaniaux de la Métropole sont notamment labellisés « Forêt d'Exception® » récompensant les actions menées pour mettre en valeur le patrimoine forestier.

Appréhender les impacts du changement climatique sur les forêts du territoire suppose donc de considérer cette multifonctionnalité que revêt la forêt ainsi que les nombreux enjeux qui l'accompagnent : environnementaux (puits de carbone, biodiversité, énergie renouvelable), économiques (production sylvicole, emplois locaux), sociaux (activités récréatives et sportives) et patrimoniaux (identité paysagère et territoriale, support à la biodiversité, accueil d'habitats et d'espèces protégés).

De nombreuses études sur ce sujet ont été menées à l'échelle européenne (Lindner et al., 2008), nationale (Projet CARBOFOR coordonné par Loustau, 2004 ; ECHOES, 2009 ; ONERC, 2014), et régionale (Le Treut, 2013 ; AcclimaTerra, 2018) mais aucune ne renseigne l'échelle plus locale. Cette synthèse vise donc à initier ce type d'approche pour les forêts de la Métropole Rouen Normandie.



¹ Une émission en équivalent CO₂ permet de connaître le potentiel de réchauffement global de chaque gaz à effet de serre et de cumuler leurs émissions.

² Les effets de substitution carbone correspondent aux émissions de CO₂ économisées par l'usage du bois plutôt que le recours à des matériaux (béton, acier, plâtre, etc...) ou des énergies fossiles (fuel, charbon, gaz, ...)

³ Source : PCAET de la Métropole Rouen Normandie, 2019

⁴ Source : Plan d'Approvisionnement Territorial, 2015, Outil ALDO de l'ADEME

⁵ 1 000 m³ de bois récoltés = 1 à 2 emplois directs en sylviculture/exploitation et 8 à 10 emplois dans la filière bois (première et deuxième transformation) – Source : France Bois Forêt

⁶ Source Biomasse Normandie

Changement climatique

et durabilité de la production forestière normande

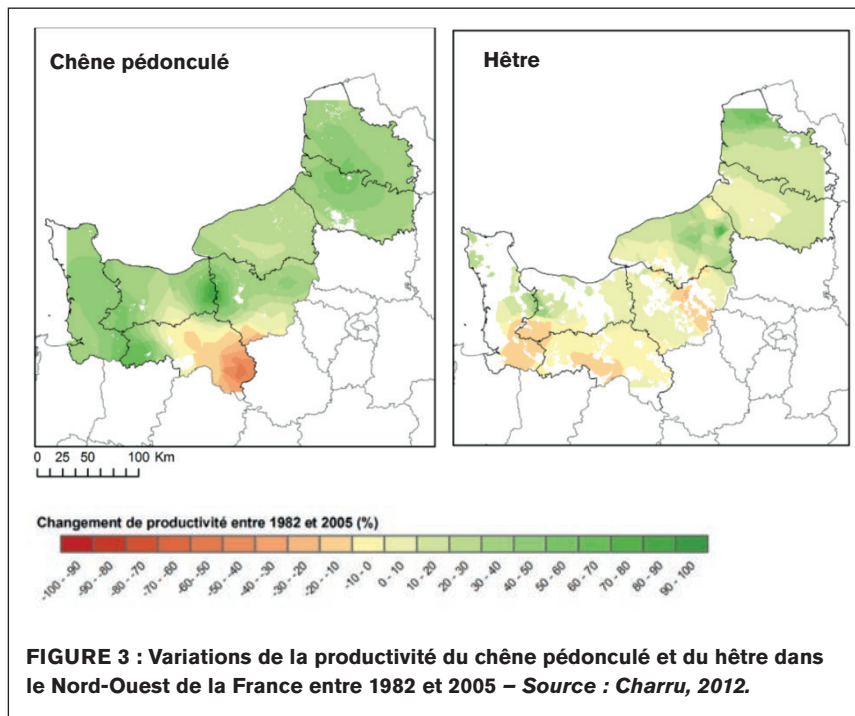
ÉVOLUTION RÉCENTE : CAS DE LA PRODUCTIVITÉ DU HÊTRE ET DU CHÊNE PÉDONCULÉ

Dans sa thèse, Marie Charru a étudié les tendances de productivité de 8 espèces forestières⁶ à plusieurs échelles (nationale, régionale et locale) entre 1982 et 2005. Les résultats ont mis en évidence des variations des tendances de productivité très variables entre les régions et les espèces, dont certaines entraînent en contradiction avec les tendances observées à l'échelle nationale. À titre d'exemple, le hêtre (*Fagus sylvatica*) a connu une augmentation puis une baisse de sa productivité à l'échelle nationale tandis qu'elle a augmenté en moyenne dans le Nord-Ouest pour la même période.

Ce constat suggère la pertinence de combiner les approches spatiales et temporelles pour expliquer les variations de productivité des espèces à une échelle plus fine. Cela implique également un rôle fondamental des conditions environnementales locales (climat, topographie, propriétés du sol, activité humaines, interactions écologiques) dans la réponse des espèces aux changements de l'environnement (Charru, 2012 ; ONERC, 2014). En Normandie, l'approche spatiale montre une augmentation moyenne de la productivité du chêne pédonculé (+0,26 m³/ha/5 ans) et de hêtre (à +0,42 m³/ha/5 ans) entre 1982 et 2005, avec une forte disparité au sud de la région, et plus particulièrement dans le département de l'Orne où la productivité des deux espèces baisse (Charru, 2012 ; Figure 3). Depuis, selon le Centre Régional de la Propriété Forestière (CRPF) de Normandie, les conditions environnementales deviennent de plus en plus limitantes pour ces deux espèces au sud de la région.

EFFETS DU CLIMAT SUR LA PRODUCTIVITÉ DES ARBRES

Des températures plus élevées⁷ notamment en hiver pourraient entraîner des modifications sur les rythmes saisonniers dits « phénologiques » comme un débourrement plus précoce ou un retard du jaunissement des feuilles durant l'automne (Cecchini et Lebourgeois, 2007 ; ONERC, 2014). Selon le CRPF de Normandie, ce phénomène fragilise les espèces forestières aux gels tardifs de printemps et favorise la désynchronisation des stades de développement



des insectes ou des agents pathogènes avec les arbres et leurs prédateurs.

Parmi les autres facteurs climatiques déterminant les changements de productivité, les modifications de températures saisonnières et de bilan hydrique impactent significativement la productivité du chêne pédonculé et du hêtre dans le Nord-Ouest de la France avec des effets parfois antagonistes. Ainsi, Marie Charru a montré que si un réchauffement des températures pouvait avoir un effet positif sur la productivité du hêtre, cette dernière restait fortement tributaire du bilan hydrique annuel, du niveau des dépôts azotés ainsi que du besoin en froid hivernal. Pour le chêne pédonculé (*Quercus robur*), l'effet du réchauffement du climat sur la productivité n'a été suggéré que de manière indirecte suivant l'évolution du bilan hydrique estival.

Le bilan hydrique illustre le besoin en eau des espèces forestières et est très affecté en période de sécheresse et des canicules. La plupart des espèces qui peuplent la Métropole requièrent une quantité d'eau relativement modérée et sont soumises à un nombre de jours maximal de sécheresse compris entre 20 et 40 jours par an et de canicules entre

0 et 10 jours (Lindner et al., 2014 ; Laignel et Nouaceur, 2018) (Figure 4).

À l'instar de l'épisode estival de 2003 (Charru, 2012), il est probable que les épisodes caniculaires et de sécheresse de ces dernières années ont affecté négativement la productivité des espèces de la Métropole. Selon l'Office National des Forêts (ONF) et le CRPF de Normandie, les forêts de la Métropole ont su résister aux canicules de 2019 car aucun dépérissement n'a été relevé suite à ces épisodes. Toutefois, des marques de stress ont été relevées sur le hêtre et le chêne pédonculé, indiquant un risque de dépérissement élevé les années qui suivent surtout si de tels épisodes venaient à se répéter.

Parallèlement, la combinaison des sécheresses et des canicules augmente le risque d'incendies de forêt comme cela s'est produit en 2019 dans une forêt de résineux à Petit-Couronne. **Cet évènement a mis notamment en lumière l'absence de mesures pour gérer le risque incendie de forêt à l'échelle du territoire (bandes pare-feux ou routes forestières pour les pompiers par exemple).**

⁶ Les chênes pédonculé et pubescent, le hêtre, le pin d'Alep, le sapin, l'épicéa, et le pin sylvestre. Le chêne pédonculé et le hêtre ont été étudiés à l'échelle du Nord-Ouest, qui inclut la Normandie, la Somme et le Pas-de-Calais.

⁷ À l'échelle de la Métropole, une augmentation de la température moyenne annuelle entre + 1,2 et + 1,9 °C est observée sur la période de 1970 à 2017 (Laignel et Nouaceur, 2018). Cette tendance à l'augmentation des températures est en relation avec l'augmentation continue des concentrations de dioxyde de carbone (CO₂) qui intervient dans la productivité des espèces forestières en réduisant le besoin potentiel en eau et en optimisant le processus de photosynthèse (ONF, 2007 ; Reyer et al., 2014).

Enfin, les tempêtes peuvent engendrer des dégâts colossaux sur les forêts. D'une part, les excès d'eau résultant d'averses intenses peuvent entraîner une érosion voire potentiellement une saturation du sol en eau, et engendrer des retards phénologiques et des dépérissements (Granier et Bréda in ONF, 2007). D'autre part, la force du vent peut se révéler dévastatrice pour les forêts. Les « tempêtes du siècle » de décembre 1999 en sont un bon exemple. Selon l'Inventaire Forestier National, elles auraient engendré 140 millions de chablis et volis (+/-30 %). La filière forêt-bois à l'échelle nationale en fut profondément marquée puisque trois années de récoltes de bois ont été renversées, contribuant en conséquence à une explosion de l'offre de bois et à une baisse des prix moyens. D'après le CRPF de Normandie, le prix moyen pour chaque catégorie de bois a été divisé par deux après la tempête. De plus, au-delà des simples dégâts économiques, ces tempêtes ont engendré d'autres conséquences sur les paysages et les services écosystémiques

des forêts, comme la fonction du puits de carbone. La séquestration moyenne annuelle de carbone des forêts françaises aurait ainsi diminué respectivement de -31% et -22% en 2000 et 2001, avant un retour à la normale les décennies suivantes (Pignard et al., 2009). À l'échelle de la Seine-Maritime et de l'Eure, l'ONF et le CRPF indiquent que ces tempêtes auraient engendré environ 800 000 m³ chablis en forêt domaniale et entre 1,3 et 1,5 millions en forêt privée avec des dégâts beaucoup plus importants dans l'Eure. En ce qui concerne le territoire de la Métropole, les forêts de la Londe-Rouvray et de Roumare ont été les plus touchées. Quelques disparités sur les dégâts ont pu être observées en fonction du type d'essence (feuillus ou résineux), et de l'âge des espèces (moins hauts, les peuplements plus jeunes ont mieux résisté que les peuplements plus âgés). **L'ampleur des dégâts a mis en évidence la nécessité d'améliorer la résilience de la sylviculture face aux tempêtes.**

EFFETS D'AUTRES FACTEURS EN INTERACTION AVEC LE CLIMAT INFLUENÇANT LA PRODUCTIVITÉ

L'intensité, la durée d'ensoleillement et la qualité du rayonnement (éclairage solaire), influent sur la photosynthèse et le phénomène de floraison. Sur la période 1981-2010, la durée moyenne annuelle d'ensoleillement à Rouen était de 1 557 heures (Source : Infoclimat) variant selon la couverture nuageuse (nébulosité) et les saisons. Une légère baisse de l'éclairement solaire a cependant été observée depuis une vingtaine d'années à l'échelle de la planète (GIEC, 2013).

Les retombées atmosphériques⁸ ont un impact sur le fonctionnement des sols, la santé des forêts et la biodiversité végétale du sous-bois (ADEME, 2017). Étant des milieux pauvres en azote, les forêts peuvent gagner en productivité grâce aux retombées azotées. Néanmoins, au-delà d'un certain seuil (charge critique), l'écosystème arrive en saturation, ce qui engendre en conséquence plusieurs phénomènes : eutrophisation, baisse de biodiversité, perturbation



⁸ Polluants issus de sources naturelles (éruptions volcaniques, érosion aérienne des champs agricoles) ou d'origine anthropique (agriculture, transport, industries, chauffage...), ils sont émis dans l'air puis retombent dans l'environnement soit près de leurs sources d'émission, soit à plusieurs milliers de kilomètres selon la durée de vie du polluant et la force du vent.

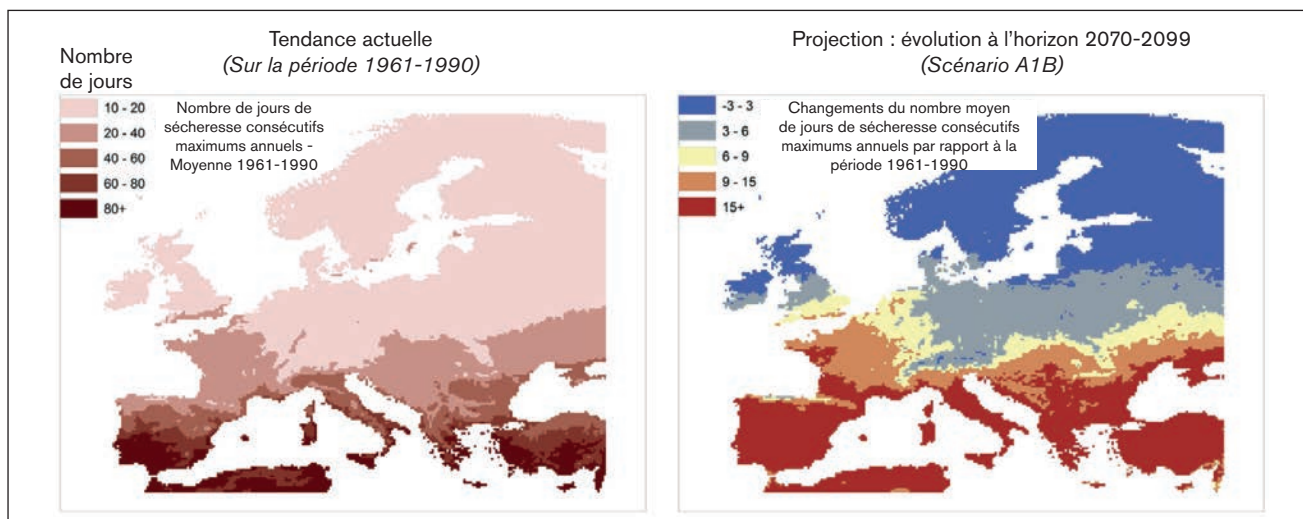


FIGURE 4 : Évolution du nombre de jours de sécheresse consécutifs maximums annuels à l'horizon 2070-2099 par rapport à la période de référence 1961-1990 - Source : Lindner et al., 2014.

bation de la croissance des arbres via des déséquilibres nutritifs, acidification des sols et des eaux (Genermont et Cellier, 2016 ; ADEME, 2017). La quantité et la localisation de ces dépôts restent très variables à l'échelle des forêts européennes (Rizzetto, 2017).

Enfin, l'apparition ou le développement de maladies peuvent résulter de l'action humaine qui favorise l'introduction d'un agent pathogène ou de plants malades via les échanges internationaux et les pratiques forestières (Robin et Desprez-Loustau, 2018, Marçais, 2018). Par exemple, la responsabilité des activités humaines dans l'importation de la chalarose du frêne, maladie présente dans les forêts de la Métropole, est plus probable (Husson, 2018).

Le changement climatique intervient en pérennisant l'installation et l'expansion d'insectes forestiers ou d'agents pathogènes (Robin et Desprez-Loustau, 2018, Marçais, 2018). Selon le CRPF de Normandie, la prolifération des scolytes et de la chenille processionnaire du chêne (*Thaumetopoea processionea*) dans les forêts de la Métropole en témoigne puisqu'un climat plus doux favorise leur développement. Les premiers sont responsables de plusieurs dépérissements dans la forêt de Roumare. La chenille processionnaire a un impact plus faible sur les arbres, mais sa pré-

sence a une forte incidence sur l'accueil du public en forêt en raison de ses poils urticants. Le risque de maladie sur les forêts n'est cependant pas systématiquement renforcé par le changement climatique (Robin et Desprez-Loustau, 2018, Marçais, 2018). Le ralentissement de la maladie des bandes rouges du pin laricio (*Pinus nigra var corsicana*) en France en est un autre exemple.

PROJECTIONS

Le changement climatique s'accompagne de nombreux effets opposés sur le développement et la santé de l'arbre (ONERC, 2014). Les dépôts atmosphériques en azote, combiné avec l'accroissement de la concentration de CO₂, ont contribué à l'augmentation de la productivité des forêts européennes ces dernières décennies. Cette tendance ne pourra se poursuivre que si les précipitations et les éléments nutritifs (phosphore notamment) ne deviennent pas limitants comme le laisse présager les projections récentes (Mathieu Jonard et al., 2009 et 2017).

L'eau disponible pour les arbres serait réduite notamment en raison des sécheresses. Dans un scénario médian (A1B), ces événements extrêmes pourraient s'intensifier sur toute la partie méditerranéenne d'Europe et sur une

grande partie de l'Europe occidentale et centrale (Lindner et al., 2014 ; Figure 4).

Les forêts de Normandie ne seront donc pas épargnées par l'amplification de ces contraintes hydriques, auxquelles viendraient s'ajouter les conséquences supplémentaires d'une augmentation des épisodes caniculaires et des précipitations extrêmes (Laignel et Nouaceur, 2018 ; Kazmierczak, Laignel et Charrier, 2019). Le manque d'eau fragiliserait également leur capacité à faire face à la virulence des agents pathogènes, ou encore aux feux de forêts que ces conditions plus chaudes et plus sèches pourraient accentuer (Seidl et al., 2017 ; Marçais, 2018). D'après l'ONF et le CRPF de Normandie, le risque de feux de forêt va s'accroître sur le long-terme pour le territoire de la Métropole car les sécheresses répétées rendront les peuplements plus secs et plus inflammables. Les projections du DRIAS sur l'Indice Forêt Météo, un indice de danger d'incendie de forêt, vont également dans ce sens (Figure 5). La période estivale deviendra de plus en plus propice à l'éclosion de ce genre de phénomène.

En conséquence, les sécheresses récurrentes durant la saison de végétation combinées à une augmentation trop importante

⁹ Ce-dernier cas peut paraître paradoxal mais l'intensité des précipitations extrêmes (averses orageuses par exemple) favorisent plus le ruissellement que l'infiltration de l'eau dans le sol.

de la température apparaissent comme les facteurs principaux limitant la productivité, et affectant de surcroît la santé et la régénération des forêts à long terme (Walbott et al., 2018). Sachant que l'épisode estival exceptionnel de 2003 a engendré une perte de productivité à court-terme des chênes pédonculé (*Quercus robur*), sessile (*Quercus petraea*) et pubescent (*Quercus pubescens*), du hêtre, de l'épicéa (*Picea abies*), du sapin (*Abies alba*), du pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) et du pin d'Alep (*Pinus halepensis*) à l'échelle nationale, il est probable que la répétition de ces phénomènes années après années engendrent à leur tour une baisse chronique de la productivité des espèces forestières actuellement présentes dans la Métropole et en Normandie (Charru, 2012).

Cette possibilité se vérifie dans une autre étude récente qui a simulé l'effet combiné des

événements extrêmes, de l'action des pathogènes forestiers et du changement climatique sur la productivité en se basant sur un scénario climatique médian (A1). Les projections obtenues montrent que dans la plupart des cas, l'effet des perturbations sur la productivité serait négatif à long terme, et annulerait de surcroît les gains de productivité dus au réchauffement climatique (Reyer et al., 2017). Enfin, l'étude MODYCRIN (2017) a modélisé l'impact du changement climatique et des dépôts azotés sur la biodiversité forestière à travers deux scénarios : l'un tendanciel en l'état des législations actuelles et l'autre selon les scénarios du GIEC (B1 optimiste et A2 pessimiste). Les résultats montrent que le changement climatique et la réduction plus ou moins importante des dépôts atmosphériques azotés affecteront négativement la composition chimique des sols, la composition floristique et la réponse des espèces vé-

gétales pendant tout le XXI^e siècle.

Au regard de l'ensemble de ces éléments et en l'état des connaissances actuelles, la perspective d'un impact négatif du changement climatique sur la productivité et la santé des espèces forestières locales sur le long terme ne fait plus de doute. Toutefois, des incertitudes persistent quant aux modélisations utilisées, ainsi qu'à d'autres facteurs en relation avec la conjoncture socio-économique et les pratiques de gestion. La variabilité interannuelle du climat pourrait devenir une considération importante dans la gestion des forêts à court et long-terme (Lindner et al., 2014).

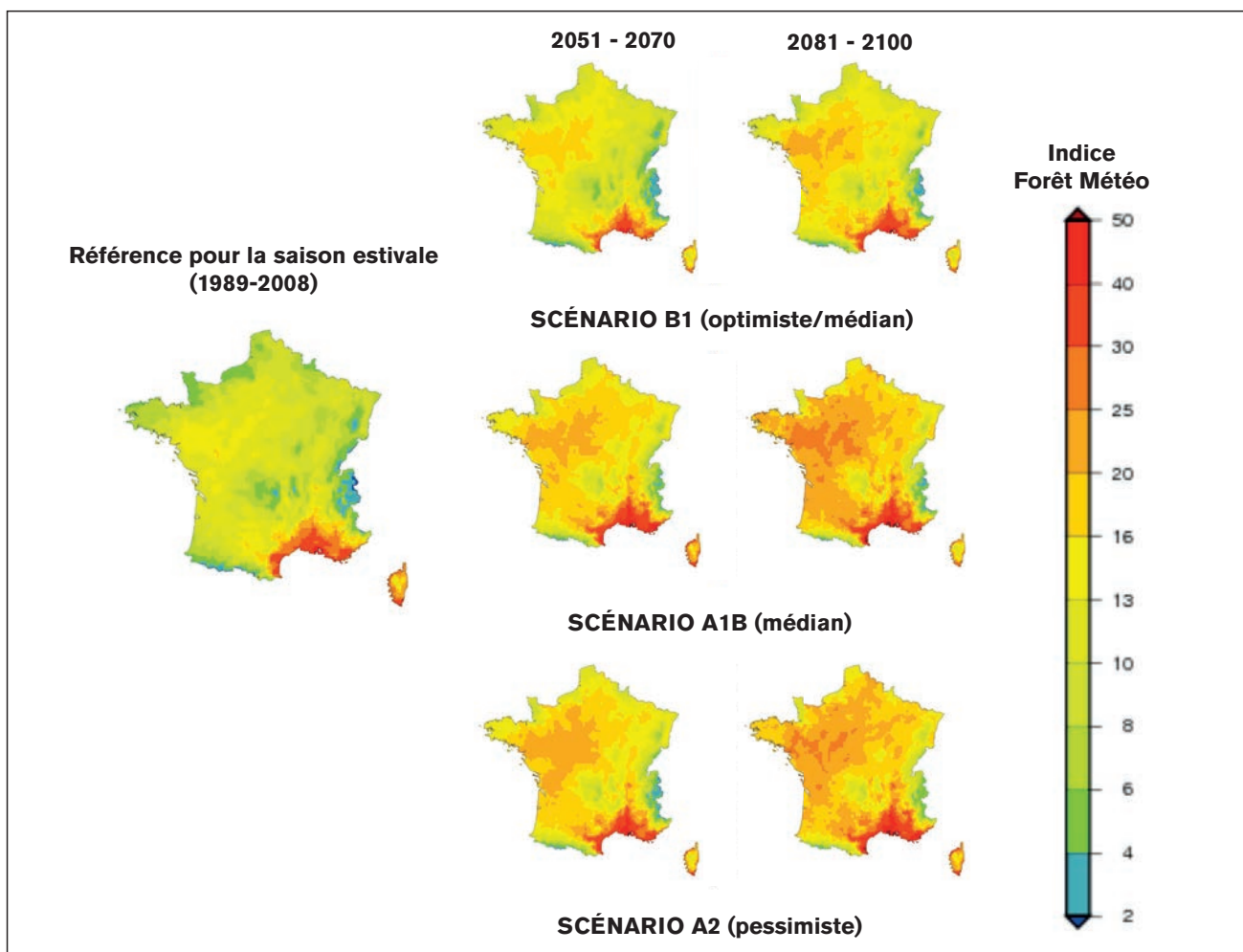


FIGURE 5 : Projections des risques d'incendie de forêt en France métropolitaine selon trois scénarios de changement climatique et à partir du modèle ARPEGE V4.6 étiré de Météo-France.

Des paysages forestiers en mutation

LES RÉPONSES DES ESPÈCES FORESTIÈRES AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Les exigences écologiques et la résistance aux stress varient entre les espèces forestières, si bien que leurs réponses dans un contexte de changement climatique pourraient différer. Ces réponses peuvent être multiples (Bussotti et al., 2015) :

- **La persistance des peuplements** : les organismes vivants possèdent une aptitude plus ou moins importante selon les espèces à supporter des modifications environnementales (i.e. amplitude écologique). Cette amplitude trouve son expression dans la variabilité des phénotype des espèces phénotype se définissant comme les caractéristiques observables d'un organisme (e.g. la couleur d'une fleur, le comportement, la taille des feuilles...) résultant de l'interaction entre l'environnement et le génotype des individus. Cette amplitude écologique variable selon les espèces leur confère une capacité d'accommodation au changement plus ou moins grande et plus ou moins est réversible.
- **L'adaptation locale** par l'apparition de nouvelles caractéristiques sélectionnées par les nouvelles conditions environnementales. Cette adaptation locale nécessite plusieurs générations successives et s'avère le plus souvent irréversible.
- **La migration naturelle** ou assistée par l'Homme.
- **L'extinction des essences** dont la capacité d'adaptation est trop faible et/ou trop lente, notamment celles situées aux limites de leur aire biogéographique, ou dans des peuplements isolés (en montagne par exemple). Il convient néanmoins de distinguer les disparitions dont la cause est d'origine climatique, écologique, ou d'origine humaine.

Le GIEC a montré que le déplacement des isothermes serait plus rapide que la vitesse maximale de migration naturelle des arbres (GIEC, 2014 ; Figure 6). La capacité de migration naturelle des espèces ne suffira vraisemblablement pas, même avec la mise en place de corridors pour les espèces forestières d'intérêt sylvicole (Dupouey, 2012 ; Lefèvre et al., 2014). Par conséquent, l'avenir des forêts dépendra de leur capacité d'acclimatation et d'adaptation au changement climatique, et nécessitera une intervention humaine à travers les modifications des pratiques sylvicoles (Lefèvre et al., 2014).

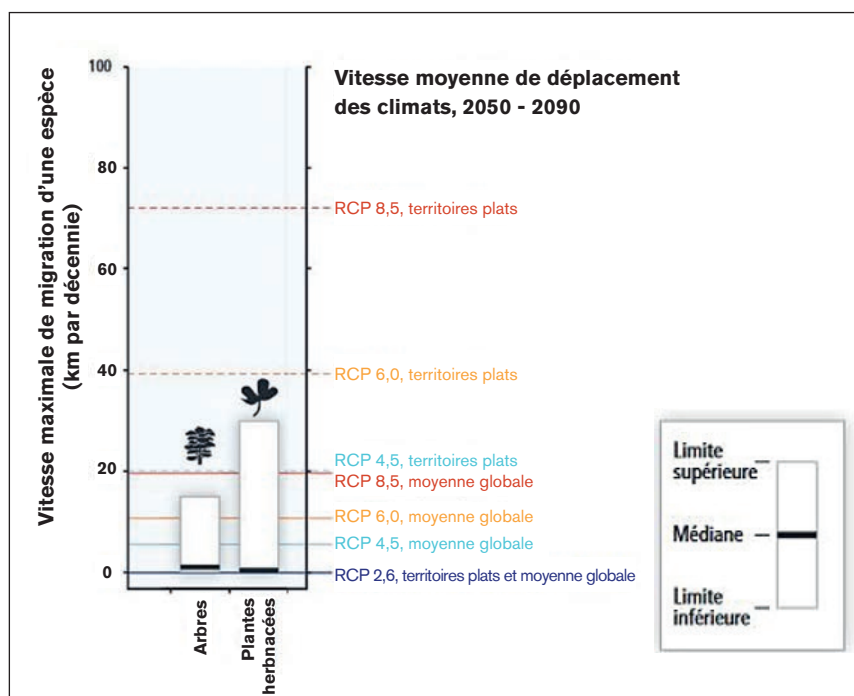


FIGURE 6 : Estimation de la capacité de migration des arbres et des plantes herbacées comparée à la vitesse moyenne de déplacement des climats selon les scénarios RCP du GIEC et pour la seconde moitié du XXI^e siècle – Source : GIEC, 2014

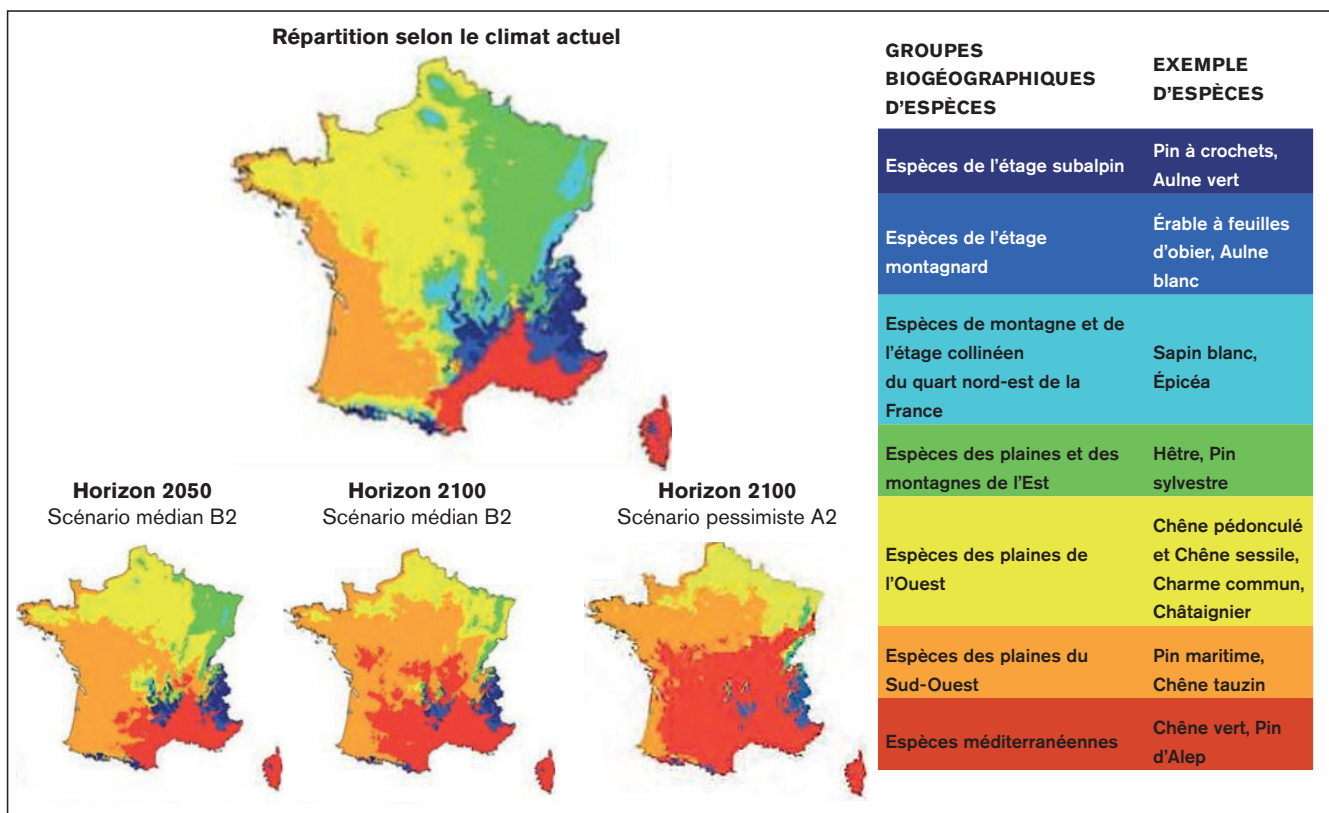
DÉPLACEMENT DES AIRES BIOGÉOGRAPHIQUES EN FRANCE

Mieux comprendre la répartition actuelle des espèces forestières en France et en Europe et leur(s) trajectoire(s) spatiale(s) face au changement climatique se révèle déterminant pour prédire leur probabilité de survie et de croissance future.

Évolution récente :

À partir des données de l'Inventaire Forestier National (IFN), 7 aires de répartition géographique des espèces forestières ont été identifiées en France métropolitaine pour le climat actuel (Figure 7). À l'échelle de la Métropole Rouen Normandie, les espèces forestières correspondent principalement à un mélange entre les espèces des plaines et des montagnes de l'Est (catégorie verte) et les espèces des plaines de l'Ouest (catégorie jaune).

FIGURE 7 : Modélisation de la répartition des espèces forestières selon le climat actuel et projections des aires de distribution des différentes espèces forestières en France simulées pour 2050 et 2100 à partir des scénarios du GIEC. Les modèles ont été adaptés selon les prévisions du modèle ARPEGE de Météo-France. – Sources : Badeau et al., 2007 in Rendez-vous Techniques de l'ONF, 2007 et Dupouey, 2012



Projections

Les modèles à l'échelle nationale prédisent une remontée vers le Nord des espèces, notamment celles des plaines du Sud-Ouest pour un scénario optimiste (17% du territoire actuellement contre 46% en 2100), et méditerranéennes dont l'extension est plus prononcée pour un scénario pessimiste. Cette extension se ferait au détriment des autres groupes d'espèces dont la surface viendrait à régresser, notamment les essences de montagnes, tels que le pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) et le hêtre (*Fagus sylvatica*), dont la superficie forestière nationale totale représenterait seulement 6% en 2100 pour un scénario optimiste (contre 16 % actuellement) (Badeau et al., 2007 ; Lenoir et al., 2008 ; Cheiab et al., 2012 ; Dupouey, 2013 ; Figure 7) Des modélisations récentes,

réalisées à l'échelle européenne avec les scénarios climatiques médian (RCP 4,5) et pessimiste (RCP 8,5), confirment ces tendances (Thurm et al., 2018). Les plus grandes diminutions de surface - pour le scénario médian et en France - concernent notamment l'épicéa (*Picea abies*) et le hêtre (*Fagus sylvatica*), et s'accroissent dans un scénario pessimiste.

Conséquences

Plus généralement, ces modèles nous montrent que les paysages forestiers que nous connaissons actuellement subiraient des changements profonds dans un climat plus chaud et sec. Ces changements pourraient être accélérés par les choix des sylviculteurs pour l'adaptation de leurs peuplements car bien que les projections pré-

cédentes ne signifient pas forcément la disparition écologique des espèces considérées, leur intérêt pour la sylviculture en termes de productivité et de rentabilité économique pourrait devenir moins évidente. Ainsi, la pertinence de planter certaines espèces sylvicoles dont les modèles prévoient une régression de la surface peut être interrogée, mais les sylviculteurs et les gestionnaires forestiers ont aussi un rôle à jouer sur la préservation des espèces d'un point de vue écologique.

En effet, l'évolution de la biodiversité forestière sera fortement dépendante des choix en termes d'exploitation et de prélèvement (en volume et en méthode d'exploitation), et en termes de composition et de gestion des peuplements forestiers, pour adapter les forêts au changement climatique.



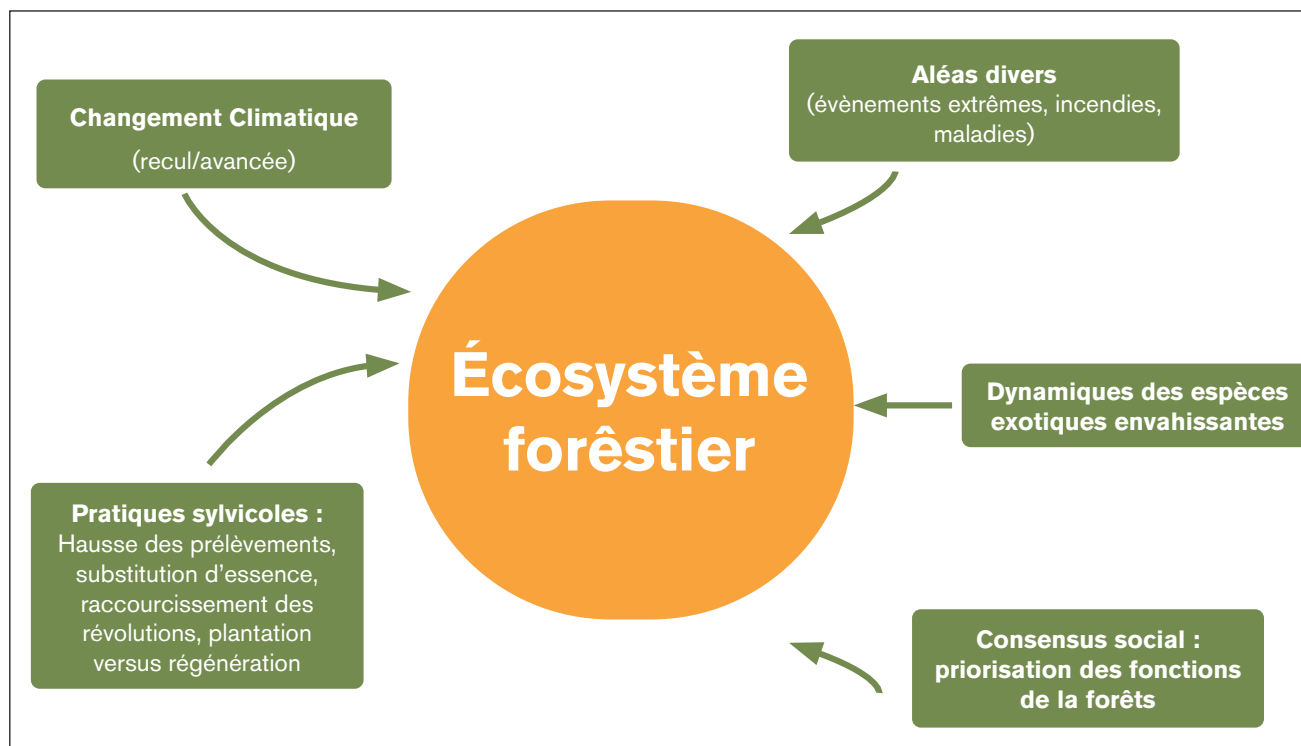


FIGURE 8 : Synthèse des contraintes environnementales susceptibles de modifier la structure et le fonctionnement de l'écosystème forestier

D'après le CRPF de Normandie, deux stratégies principales sont retenues par les forestiers :

- L'implantation d'espèces résistantes à des conditions climatiques plus chaudes et sèches. Cette stratégie requiert au moins 30 ans pour savoir si une espèce est bien adaptée. Le projet Raison mené par le CRPF de Normandie, le Centre d'Études Techniques et Économiques Forestières (CETEF) de Normandie Sud, et les partenaires de la forêt privée, a pour but d'étudier l'adaptabilité au climat normand d'essences atypiques au territoire comme le chêne pubescent (*Quercus pubescens*) ou le cèdre Atlas (*Cedrus atlantica*). L'ONF suit également l'évolution d'espèces non indigènes dans le cadre de l'arboretum de Roumare.
- L'adaptation des espèces au changement climatique malgré les incertitudes importantes qu'implique cette stratégie.

L'accommodation des espèces reste également possible. Selon le CRPF de Normandie, presque 100% des chênes sont « hybrides », c'est-à-dire qu'il y a eu des échanges de gènes entre chaque espèce mais chacune conserve des caractéristiques qui lui est propre (les propriétés du bois par exemple).

Changer de pratique aujourd'hui revient à sélectionner un ensemble d'espèce qui devra s'accommoder des changements climatiques sans que les futures exigences écologiques de ces espèces soient bien connues. Or, celles-ci sont sélectionnées en fonction des pratiques forestières et des débouchés de la filière, et pas forcément dans une logique d'adaptation au changement climatique.

Actuellement, nous n'avons pas une visibilité et un recul suffisants sur l'évolution de l'en-

semble des espèces forestières en raison des multiples effets résultant du changement climatique et des pratiques sylvicoles (modifications des pratiques de gestion, intensification de prélèvements, changement d'occupation des sols, dynamique des espèces exotiques envahissantes, etc...) qui contribuent à modifier la structure et le fonctionnement de l'écosystème forestier (Figure 8).

La problématique du changement climatique interroge donc le consensus social à (re)créer sur le territoire en ce qui concerne le rôle de la forêt et la priorisation des fonctions qu'elle assure (production de bois, conservation de la biodiversité, fonctions sociales et culturelles) qui ne peuvent être maximisées toutes à la fois. Ce consensus social a une influence déterminante sur la présence ou l'absence d'une espèce sur le territoire.

Perspectives par espèce forestière :

Hêtre, Chênes sessile, pédonculé et pubescent, Pin sylvestre, Sapin Douglas, Robinier faux-acacia

À fin d'approfondir la réflexion évoquée précédemment, l'évolution des forêts en termes de présence écologique (dépendante des conditions de milieux) et de gestion forestière (dépendante des conditions de milieux et de l'action des forestiers) a été étudiée pour plusieurs espèces de feuillus et de conifères dans plusieurs scénarios de changement climatique. Il s'agit des espèces suivantes :

FEUILLUS

- Hêtre (*Fagus sylvatica*)
- Chêne pédonculé (*Quercus robur*), chêne sessile (*Quercus petraea*), chêne pubescent (*Quercus pubescens*)
- Robinier faux-acacia (*Robinia pseudoacacia*)

CONIFÈRES

- Pin sylvestre (*Pinus sylvestris*)
- Sapin Douglas (*Pseudotsuga menziesii*)

Les objectifs de cette étude sont d'appréhender les probables réponses à un climat plus chaud et sec des espèces indigènes sur le territoire de la Métropole Rouen Normandie dont les peuplements sont actuellement majoritaires et qui sont utilisées principalement en sylviculture (hêtre, chêne pédonculé et sessile, pin sylvestre) ; et d'étudier d'autres espèces dont les populations sont actuellement moindres mais qui semblent montrer des affinités à la chaleur et dont les propriétés du bois sont appréciées (sapin Douglas, chêne pubescent et robinier faux-acacia).

Pour chaque espèce, un avis sera formulé sur sa capacité à survivre d'un point de vue écologique et sur sa gestion en sylviculture à long-terme.

MÉTHODOLOGIE DES SOURCES MOBILISÉES

Plusieurs sources sont mobilisées dans cette étude pour illustrer les différences en termes de présence écologique (Dyderski et al., 2017, Thurm et al., 2018) ou de présence productive (cartes prédictives de la région normande du CRPF de Normandie (2018)).

Dans un premier temps, les modélisations à l'échelle européenne de Dyderski et al. (2017) montrent la présence écologique de l'espèce suivant plusieurs scénarios d'évolutions du climat pour la période 2061-2080 (RCP 2,6 – optimiste, RCP 4,5 – médian, RCP8,5 – pessimiste), trois modèles de circulation générale (GCM), et 19 variables bioclimatiques. Ces modélisations ne prennent pas en compte les propriétés du sol pourtant déterminantes pour l'implantation durable d'une espèce dans une région donnée. Parmi les espèces étudiées, seul le chêne pubescent n'a pas fait l'objet d'une modélisation européenne dans la publication de Dyderski et al.. Néanmoins, un travail de modélisation a été réalisé par Thurm et al. (2018) qui, en plus de variables climatiques, a pris en compte les données du sol. Cette dernière étude a pris en compte deux scénarios d'augmentation de la température de +2,9°C (RCP 4,5) et de +4,5°C (RCP 8,5) pour la période 2060-2080.

D'autres part, les cartes prédictives du CRPF indiquent la capacité à maintenir des peuplements d'une espèce considérée dans une gestion sylvicole rentable d'un point de vue économique dans un climat à +2°C. Ces cartes ont été construites à partir d'une analyse bibliographique de l'autoécologie des espèces et d'une analyse de l'aire de répartition en termes de limites climatiques (Tableau 1). Ces critères ont été confrontés pour validation (1) à leurs évolutions dans les zones géographiques où un dépérissement est observé, et (2) dans les zones géographiques où une analyse de l'état sanitaire des arbres a été effectuée. La validation a été réalisée pour le hêtre, les chênes, le douglas et le pin sylvestre.

Ces cartes présentent la notion de « dépérissement » suite à la succession d'années difficiles.. Selon le Département de la Santé des Forêts, le terme « dépérissement » désigne un peuplement ayant plus de 20% de tiges dominantes (ou co-dominantes) avec des pertes de ramification ou des branches mortes à hauteur de 50%. Sur une période donnée, le risque de dépérissement est défini selon un pourcentage d'années qualifiées de difficiles (Tableau 2) :

- Entre 0 et 25% d'années difficiles : vigilance modérée
- Entre 26% et 40% : vigilance élevée
- Entre 40% et 100% : vigilance maximale

¹¹ L'autoécologie étudie les exigences des espèces (par individu) vis-à-vis du milieu dans lequel elles se développent.

	Bilan hydrique saison de végétation <i>P-ETP (avril-octobre) en mm</i>	Bilan hydrique les mois les plus chauds <i>P-ETP (juin-août) en mm</i>	Température moyenne minimale de Mars <i>en °C</i>	Température moyenne des mois les plus chauds <i>(juin-août) en °C</i>
Hêtre	-200	-180	-3	25
Chêne sessile	-280	-240	-2	27
Chêne pédonculé	-250	-210	-7	26
Chêne pubescent	-340	-270	-2	28
Pin sylvestre	-210	-200	-21	25
Sapin douglas	-250	-210	-5	24
Robinier	-270	-210	-2	27

TABEAU 1 : Limites autoécologiques pour le développement des espèces forestières étudiées (définissant leur aire de répartition en Europe). Au-delà de ces limites, l'espèce se retrouve en difficulté pour l'année considérée. Ces limites ne prennent pas en compte les formes d'adaptation locales. – Sources : d'après Jean LEMAIRE, IDF-CNPF, outils BIOCLIMSOL, données fournies par le CRPF de Normandie.

Niveau de vigilance	Indice de vigilance	Risque = Probabilité de présence d'au moins 20% des tiges avec plus de 50% de perte des feuilles ou de ramification	Adéquation aux stations
MAXIMAL	8-10	40-100 %	Hors station / À ne pas introduire (risque = 100 %)
ÉLEVÉ	4-7	26-40 %	Limite de station
MODÉRÉ	0-3	1-25 %	Bien adapté mais pas en condition optimale
FAIBLE	0	0 %	Condition optimale

**TABEAU 2 : Niveau de vigilance attribué à un risque de dépérissement –
Sources : d'après Jean LEMAIRE, IDF-CNPF, outils BIOCLIMSOL, données fournies par le CRPF de Normandie**

LE HÊTRE

(*Fagus sylvatica*)



RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE ET USAGES DU BOIS :

Le hêtre (*Fagus sylvatica*) occupe environ 2700 hectares dans les forêts de la Métropole. Il s'agit d'une espèce commune des régions boréales et tempérées de l'Europe (Figure 9a). Le hêtre représente un intérêt économique élevé pour l'industrie du bois (Eurostat, 2018 ; Thurm et al., 2018). La polyvalence de son bois est très appréciée car il peut être utilisé aussi bien dans la construction, que comme combustible pour le chauffage, et pour l'industrie. La sylviculture de cette espèce est actuellement bien adaptée sur les zones de plateaux qui entourent la Métropole Rouen Normandie, à l'inverse du fond de la vallée de la Seine qui n'y semble pas favorable (Figure 10).

ÉVOLUTION À LONG-TERME

Les projections de Dyderski et al. (Figure 9a) montrent que le hêtre pourrait se maintenir en Normandie du point de vue écologique dans le cas d'un scénario optimiste à médian à l'horizon 2061-2080. En revanche, son aire de répartition sera fortement réduite en France avec une remontée de l'espèce vers les régions boréales de l'Europe dans le cas d'un scénario pessimiste. Ces contractions semblent également plus prononcées dans les projections de Thurm et al. (2018) dans lesquelles l'aire de répartition du hêtre serait réduite en Europe de moitié (- 56%) pour un scénario climatique médian (RCP 4,5), et de plus de deux tiers (-70%) pour le scénario pessimiste (RCP 8,5) (Figure 9b). D'un point de vue de sa gestion forestière (Figure 10), un climat plus chaud serait défavorable à la sylviculture du hêtre sur le territoire de la Métropole, car le risque de dépérissement y serait maximal. Autrement dit, le hêtre connaîtrait une récurrence à haute fréquence d'années défavorable climatiquement à sa croissance.

AVIS SUR LA PRÉSENCE À LONG-TERME DU HÊTRE DANS LA MÉTROPOLE ROUEN NORMANDIE ET EN NORMANDIE

En plus de craindre les gelées tardives de printemps, le hêtre ne supporte pas les fortes chaleurs et les sécheresses estivales comme le montre les données sur le bilan hydrique et les températures du Tableau 1. Il ne tolère pas également les sols engorgés et nécessite un sol drainé. L'intensité des canicules et des sécheresses futures pourraient également agir très négativement sur la santé et la régénération des hêtraies sur le long terme (Walbott et al., 2018). Cette hypothèse pourrait ainsi expliquer les contractions des surfaces observées pour le scénario pessimiste (RCP 8,5), où le réchauffement est le plus important.

D'un point de vue écologique, le hêtre pourrait probablement se maintenir en Normandie et dans la Métropole pour des scénarios optimiste (RCP 2,6) et médian (RCP 4,5). En revanche, les chances pour qu'ils s'y maintiennent naturellement sont beaucoup plus faibles dans un scénario pessimiste (RCP 8,5).

Du point de vue de la gestion du hêtre, deux hypothèses peuvent être proposées, bien que dans ces deux cas, la surface qu'il occupera sera réduite en conséquence directe du réchauffement climatique :

- Dans le cas d'une stratégie de développement de la production de bois, d'autres espèces plus productives seraient privilégiées par les forestiers dans l'étage dominant (pour la production de bois d'œuvre). Le hêtre ne deviendrait plus qu'une essence en accompagnement dans le sous-étage.
- Dans le cas d'une stratégie de maintien de la biodiversité initiale et du paysage, sa présence pourrait être maintenue par les forestiers au moins sur les stations à fort enjeux patrimoniaux. Il pourrait être présent dans les deux étages (s'il arrive à y survivre).

ANNEXES CARTOGRAPHIQUES

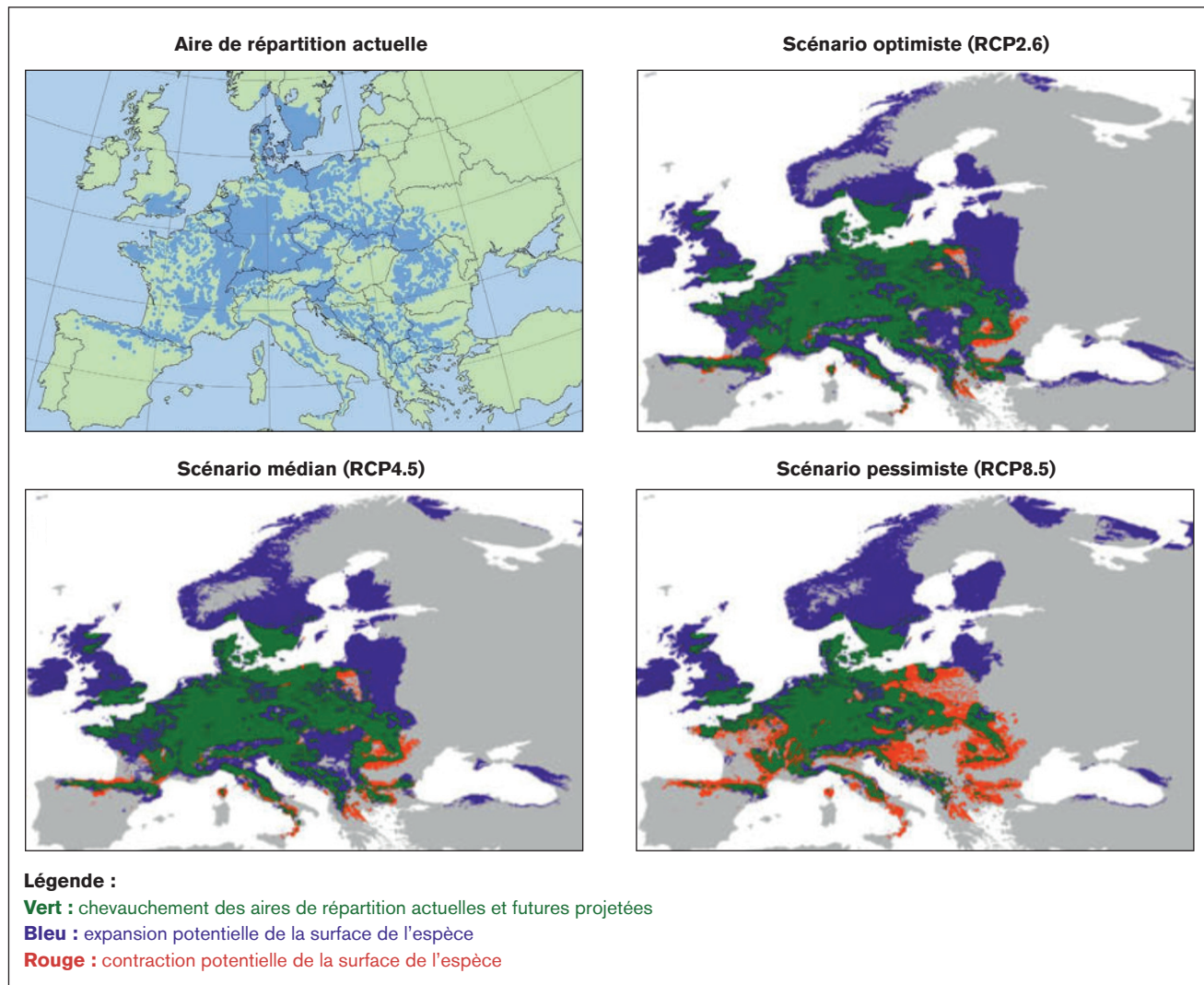


FIGURE 9a : Évolution des aires de répartition du hêtre (*Fagus sylvatica*) à l'horizon 2061-2080 selon trois scénarios de changement climatique et trois modèles de circulation générale. – Sources : EUFORGEN, 2008, www.euforgen.org, Dyderski et al., 2017.

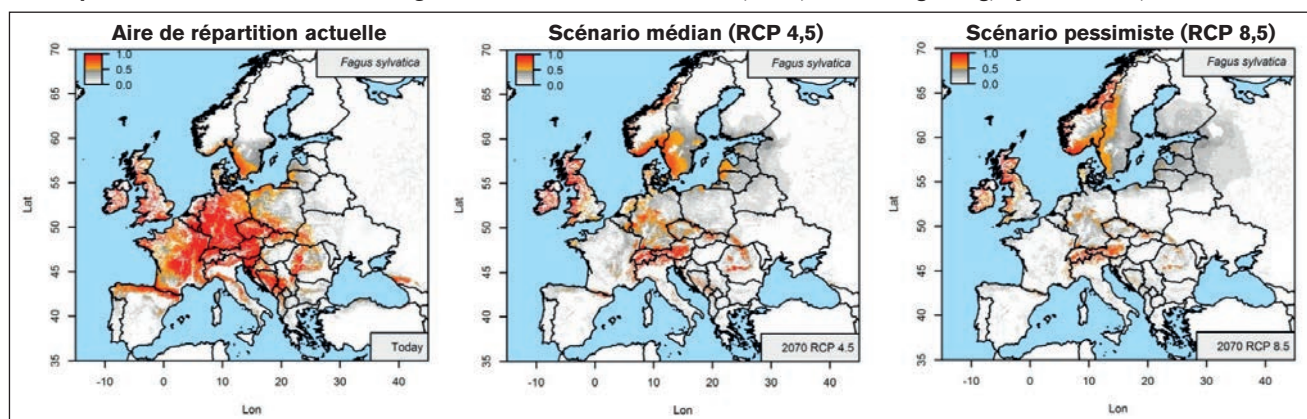
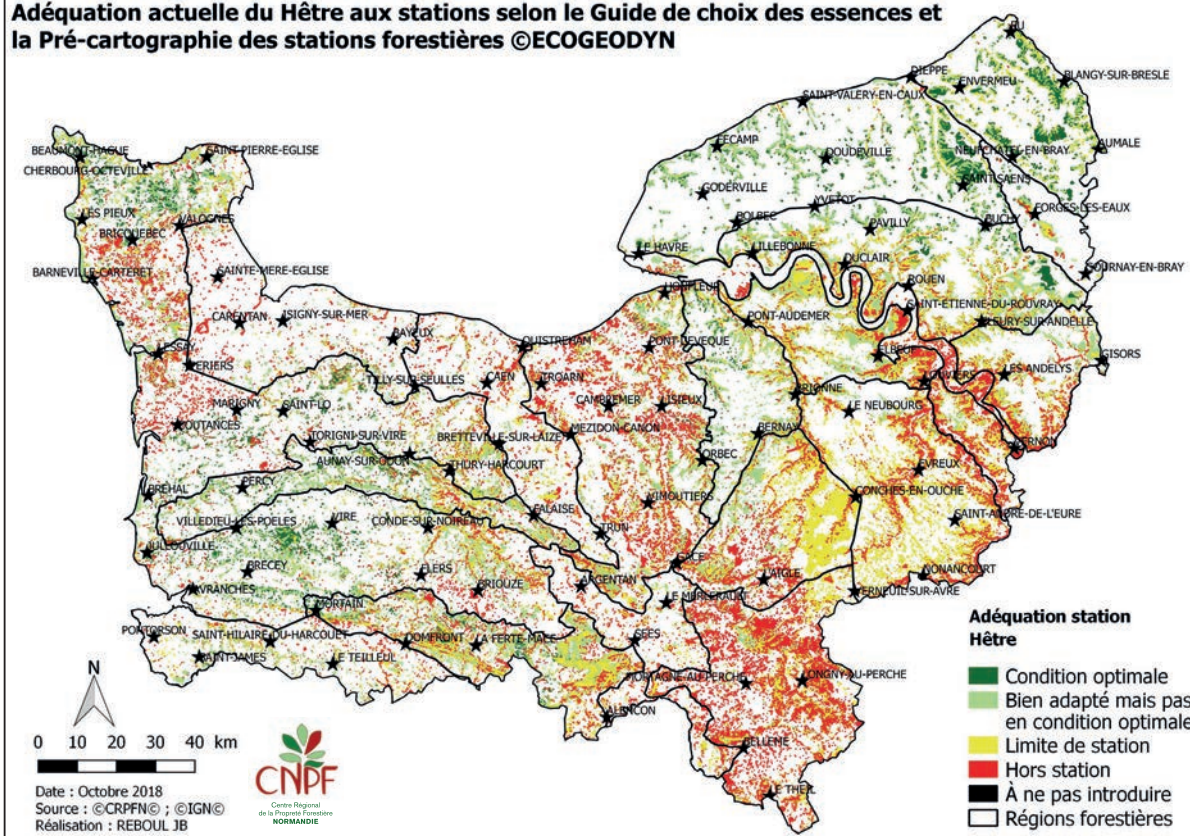


FIGURE 9b : Projections de la répartition du hêtre aujourd'hui et en 2070 selon un scénario médian (RCP 4,5) et pessimiste (RCP 8,5). Plus la couleur de la zone tend de l'orange au rouge, plus les conditions seront favorables à l'implantation et la croissance du hêtre (probabilité > 0,5). Plus cette couleur tend du gris au blanc, moins ces conditions seront propices à son développement (probabilité < 0,5). – Source : Thurm et al., 2018.

Adéquation actuelle du Hêtre aux stations selon le Guide de choix des essences et la Pré-cartographie des stations forestières ©ECOGEDYN



Adéquation à long terme (2071 -2100) du Hêtre aux stations selon le Guide de choix des essences et la Pré-cartographie des stations forestières ©ECOGEDYN

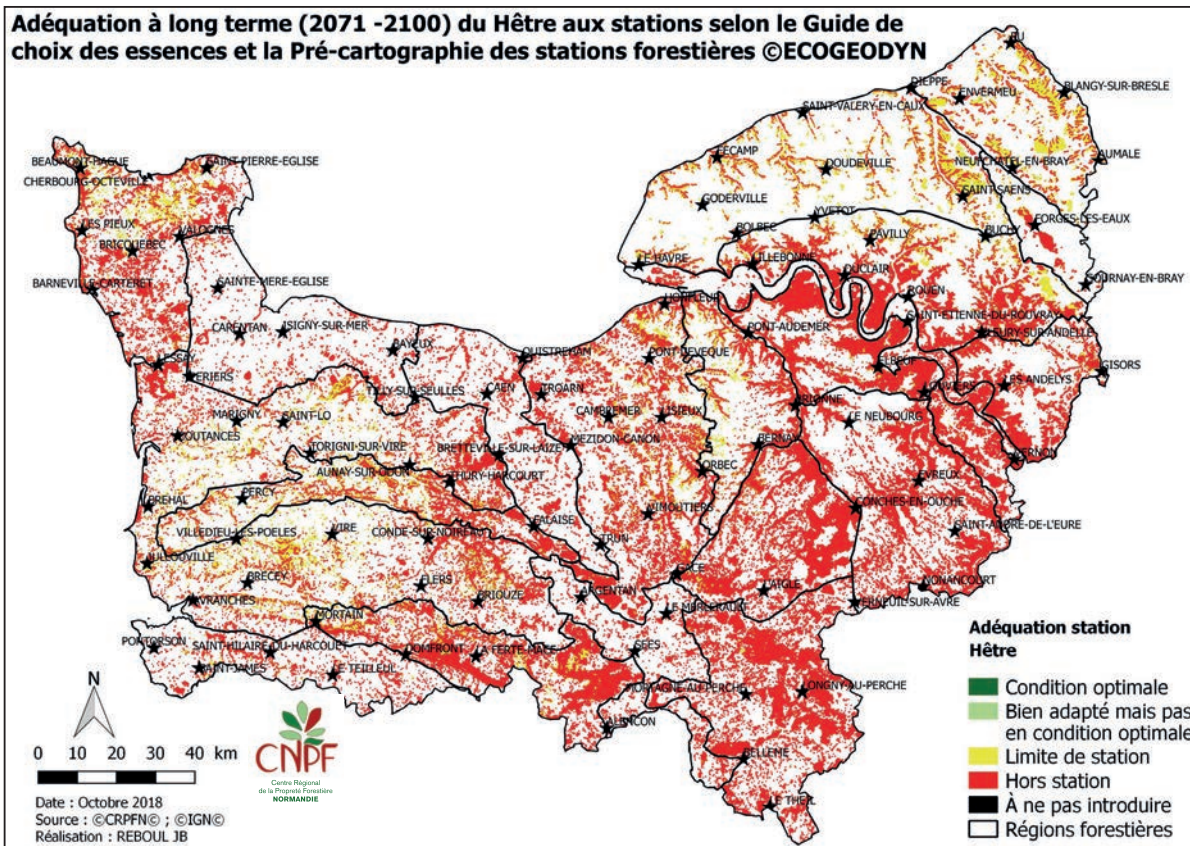


FIGURE 10 : Perspectives de maintien actuelles et à long-terme du hêtre dans une gestion sylvicole rentable économiquement à l'échelle régionale - Sources : © CRPFN ©IGN, CRPF Normandie, 2018

LES CHÊNES

Pédonculé (*Quercus robur*), Sessile (*Q. petraea*), et Pubescent (*Q. pubescens*)

Chêne pédonculé



Chêne sessile



Chêne pubescent



RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE ET USAGES DU BOIS :

Parmi les espèces de chênes peuplant la Métropole Rouen Normandie (environ 4 330 hectares), trois sont ici étudiées : le chêne sessile (*Quercus petraea*), le chêne pédonculé (*Quercus robur*) et le chêne pubescent (*Quercus pubescens*).

Leur répartition varie en Europe. Le chêne sessile est présent sur presque la totalité de la France, de la Grande-Bretagne, de l'Europe centrale, et atteint les marges sud de la Mer Noire et de la Mer Caspienne (Figure 11). Actuellement, les conditions environnementales sont favorables pour la sylviculture du chêne sessile dans la Métropole (Figure 12). Le chêne pédonculé s'étend également sur une grande partie de la France mais s'étend davantage sur l'Europe orientale et l'Asie (Figure 13). Les

conditions sont plus contrastées même si sa sylviculture est possible sur le territoire de la Métropole et en Normandie (Figure 14). Le chêne pubescent se répartit dans plusieurs régions françaises, notamment dans le sud de la France et mais quelques peuplements sont présents en Normandie (Figure 15). Cependant, sa présence est moindre en comparaison des chênes sessile et pédonculé. La sylviculture du chêne pubescent est testée à titre expérimental sur de petites surfaces en Normandie dans le cadre du projet RAISON. Les bois du chêne sessile et du chêne pédonculé sont très similaires. Ils sont principalement utilisés pour le bois d'œuvre, mais ils peuvent également servir comme source de bois énergie. Quant au chêne pubescent, son bois est surtout utilisé comme combustible mais il aurait les mêmes propriétés que les autres chênes.

ÉVOLUTION À LONG-TERME

Les chênes sessile et pédonculé pourraient persister sous un scénario optimiste (RCP 2,6) à l'échelle de la Métropole. Les projections pour le chêne sessile indiquent quelques contractions de surface dans le Sud-Ouest de la France pour le scénarios médian (RCP 4,5), et dans toute la partie Ouest dans un scénario pessimiste (RCP 8,5). Cependant, la Normandie semble relativement épargnée (Figure 11). Les conditions resteraient également favorables pour la sylviculture de l'espèce dans un climat à +2°C (Figure 12).

En revanche, les projections pour le chêne pédonculé montrent une contraction importante de sa surface en Europe, et dans le sud-ouest de la France pour un scénario médian (RCP 4,5). Ces contractions seraient amplifiées dans un scénario pessimiste (RCP 8,5). La résolution du modèle prédictif à l'échelle européenne réalisée par Dyderski et al. (2017) ne permet pas de conclure si ces tendances débordent sur une grande partie de la Normandie et la région pourrait constituer la limite sud de son aire de répartition (Figure 13). **En outre, dans un scénario climatique à +2°C, les conditions pour le maintien de la sylviculture de l'espèce semblent contrastées entre les départements de la région normande. Pour le territoire de la Métropole, le risque de dépérissement de l'espèce semble être**

très élevé (Figure 14).

Concernant le chêne pubescent, les projections de Thurm et al. (2018) à l'horizon 2070 montrent un gain de surface en Europe de 70 % avec un scénario médian (RCP 4,5) et de 120% avec un scénario pessimiste (RCP 8,5). Il est donc probable que cette espèce trouve en Normandie des conditions favorables à sa croissance (Figure 15).

AVIS SUR LA PRÉSENCE À LONG-TERME DE CES ESPÈCES DANS LA MÉTROPOLE ROUEN NORMANDIE ET EN NORMANDIE

Le chêne sessile supporte mieux les sécheresses estivales que le chêne pédonculé (Tableau 1). Cependant, cette espèce reste sensible aux gels tardifs aux canicules, et ne tolère pas un engorgement du sol sur une longue durée. Il s'accommode également de terrain moyennement acides et plus secs. De son côté, le chêne pédonculé craint les sécheresses estivales car il requiert notamment une alimentation en eau régulière durant toute la période de végétation. Les canicules ne joueraient pas en sa faveur non plus. En revanche, il peut accepter que son sol soit engorgé en permanence. Parmi ces trois espèces, le chêne pubescent semble le mieux résister à la sécheresse et à des températures élevées que les deux précédents chênes, ainsi qu'à des températures relativement froides (Tableau 1). Selon le CRPF, il pourrait également s'implanter sur une large gamme de sol.

¹³ Source : Fiche technique du CRPF de Normandie sur les chênes

D'un point de vue écologique, le maintien du chêne sessile dans la Métropole Rouen Normandie est possible pour les scénarios étudiés, même si quelques réserves peuvent être émises pour un scénario pessimiste (RCP 8,5). Pour ce qui est du chêne pédonculé, la perspective de son maintien est beaucoup moins optimiste. Enfin, même si les peuplements de chêne pubescent sont actuellement minoritaires dans le territoire, les conditions environnementales pourraient devenir plus favorables à son développement dans un futur proche. L'alimentation en eau du sol pourrait apparaître comme déterminante dans la survie de ces espèces. La possibilité d'une hybridation entre ces

trois espèces pourrait potentiellement autoriser la diffusion inter-spécifique de gènes permettant une plus grande résistance aux modifications climatiques, diminuant (relativement) en conséquence leur vulnérabilité au changement climatique.

Du point de vue de la gestion de ces espèces :

- Dans le cas d'une stratégie de développement de la production de bois, la sylviculture du chêne sessile pourrait être privilégiée dans l'étage dominant au détriment du chêne pédonculé. Néanmoins le maintien de chêne pédonculé dans l'étage dominant pourrait être possible si une stratégie de mixité des peuplements

est choisie et seulement sur les sols avec de très bonnes réserves utiles en eau. Actuellement, le chêne pubescent est étudié à travers le projet RAISON. D'autres variétés de chênes sessiles présentes dans le Sud-Ouest ayant la même origine de recolonisation post-glaciaire (Espagne, Bordeaux, Poitou-Charentes) pourraient également être testées au climat normand.

- Dans le cas d'une stratégie de conservation de la biodiversité, la conservation des espèces indigènes serait prioritaire et les trois espèces pourraient se maintenir dans l'étage dominant et le sous-étage. Cependant, le risque de dépérissement pour le chêne pédonculé resterait élevé.

ANNEXES CARTOGRAPHIQUES

Chêne sessile

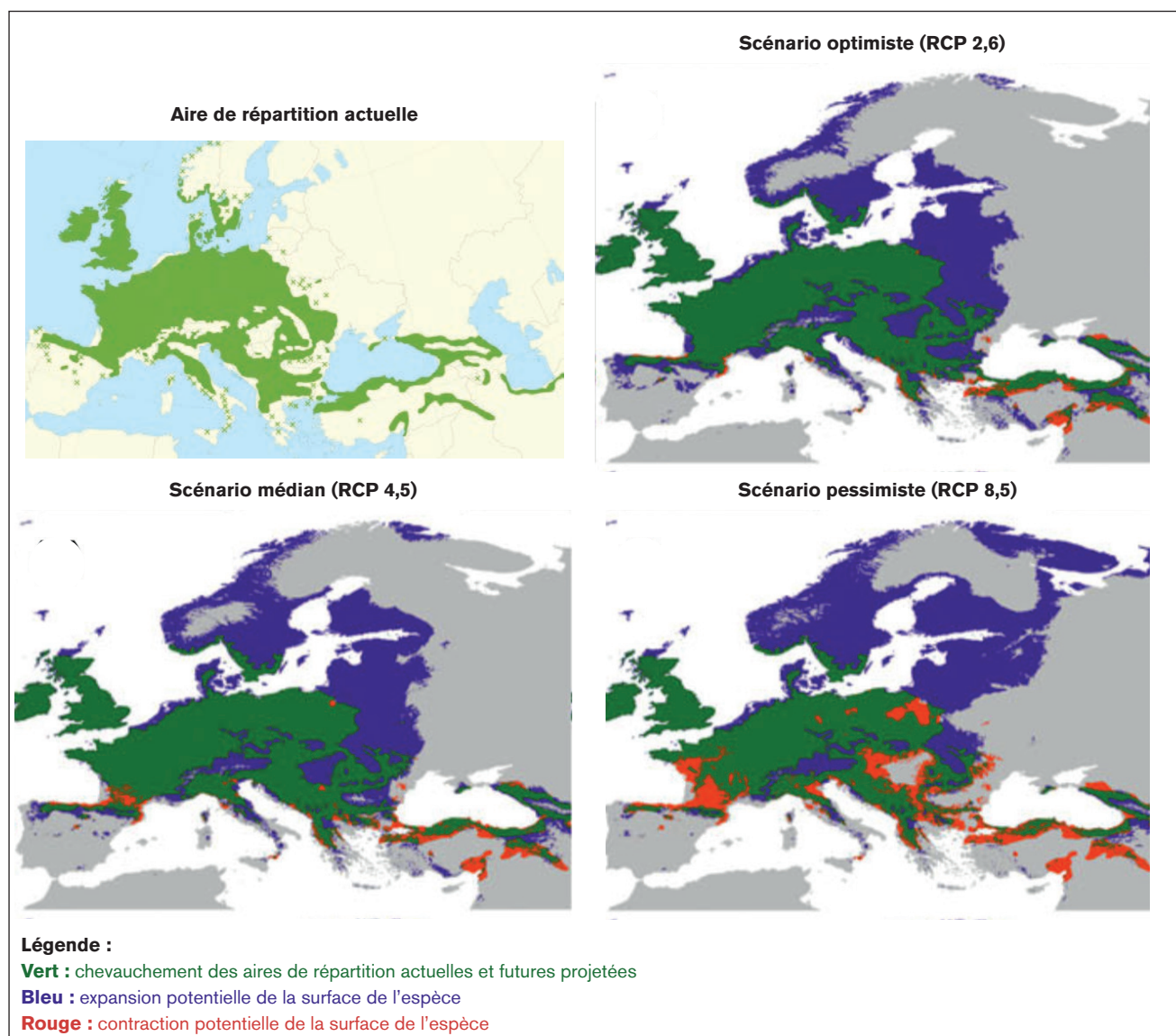


FIGURE 11 : Projections des aires de répartition du chêne sessile (*Quercus petraea*) à l'horizon 2061-2080 simulées à partir de trois modèles de circulation générale et de trois scénarios de changement climatique – Sources : Dyderski et al., 2017, Caudullo, G., Welk, E., San-Miguel-Ayanz, J., 2017. Chorological maps for the main European woody species.

¹⁴ Source pour ces trois espèces : fiches techniques des CRPF de Normandie et d'Ile-de-France sur ces espèces

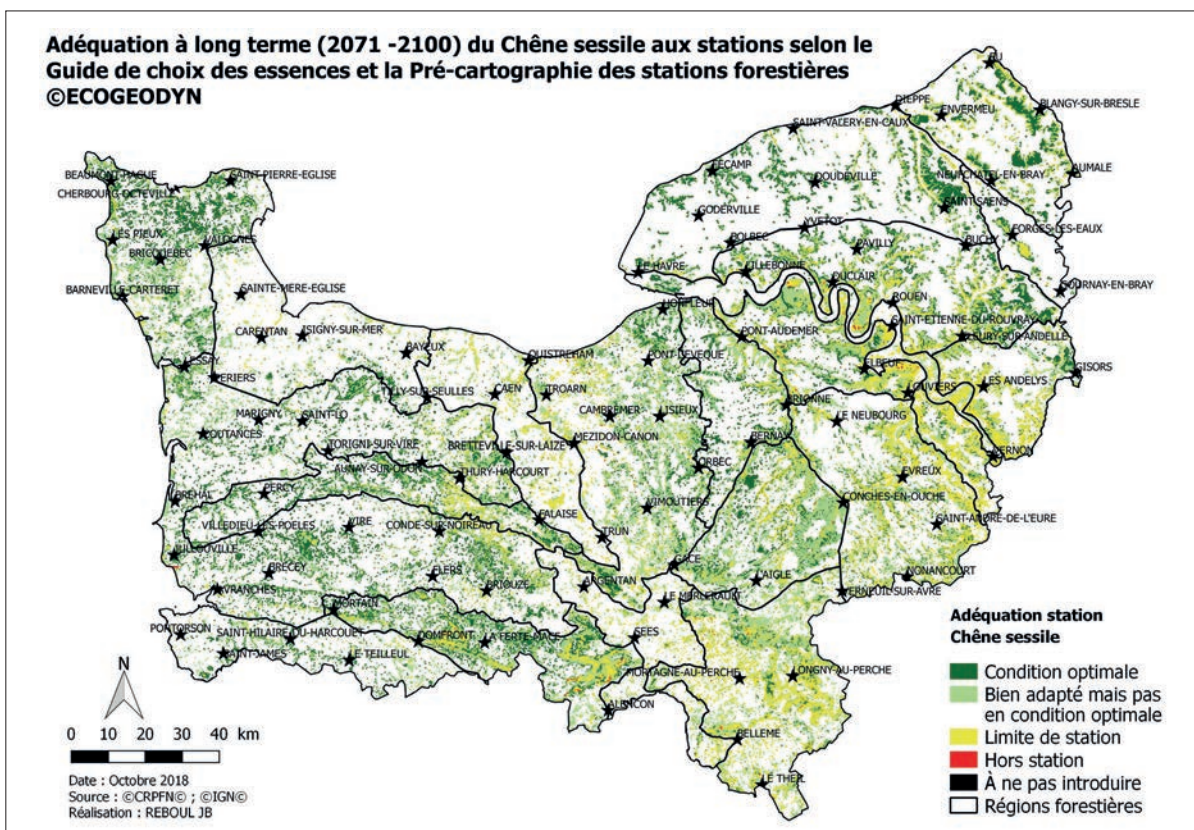
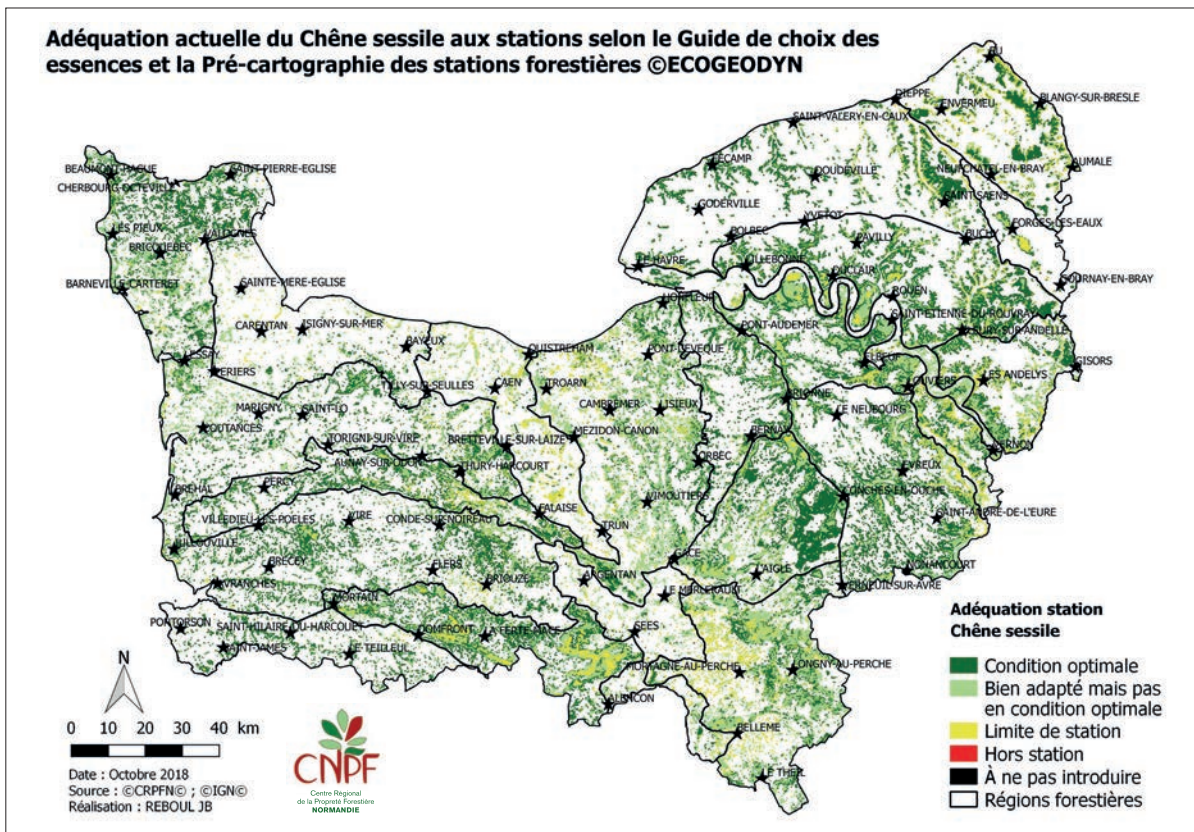


FIGURE 12 : Perspectives de maintien actuelles et à long-terme du chêne sessile dans une gestion sylvicole rentable économiquement à l'échelle régionale - Sources : © CRPFN ©IGN, CRPF Normandie, 2018

Chêne pédonculé

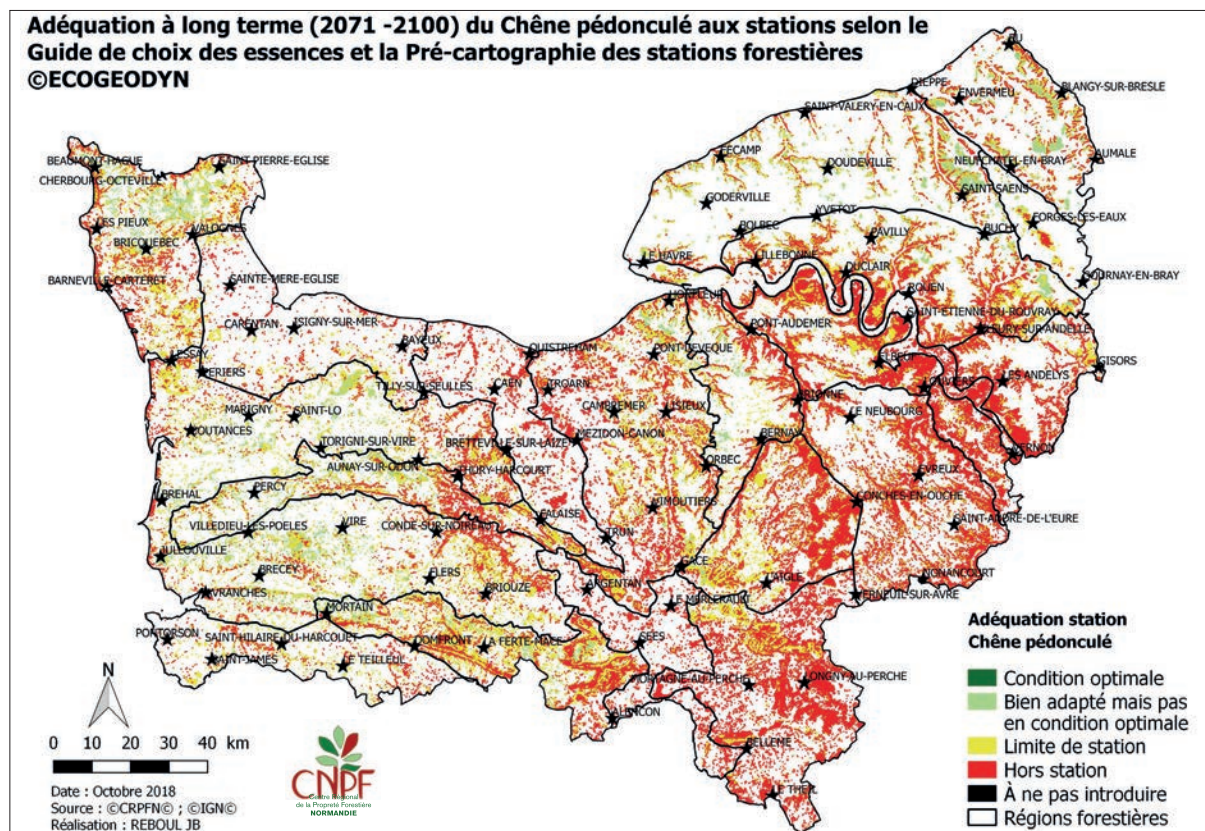
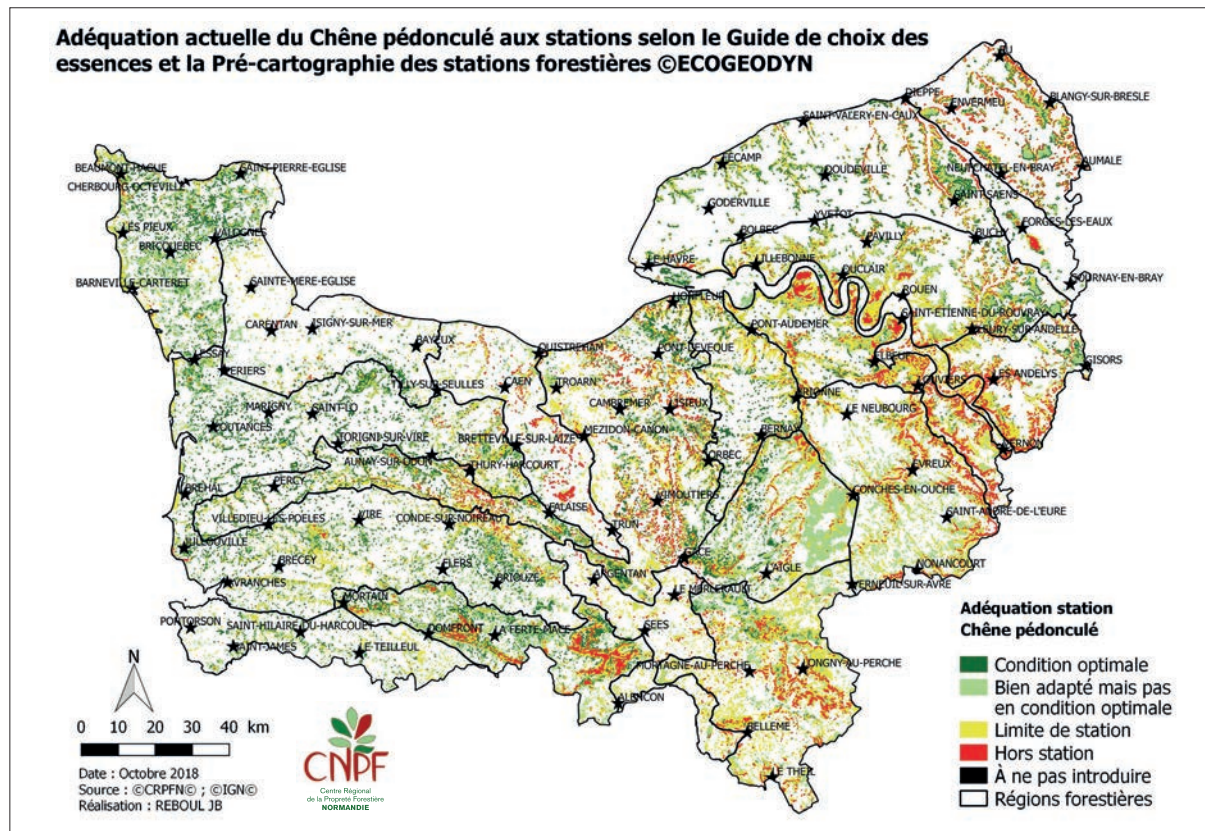


FIGURE 14 : Perspectives de maintien actuelles et à long-terme du chêne pédonculé dans une gestion sylvicole rentable économiquement à l'échelle régionale - Sources : © CRPFN ©IGN, CRPF Normandie, 2018

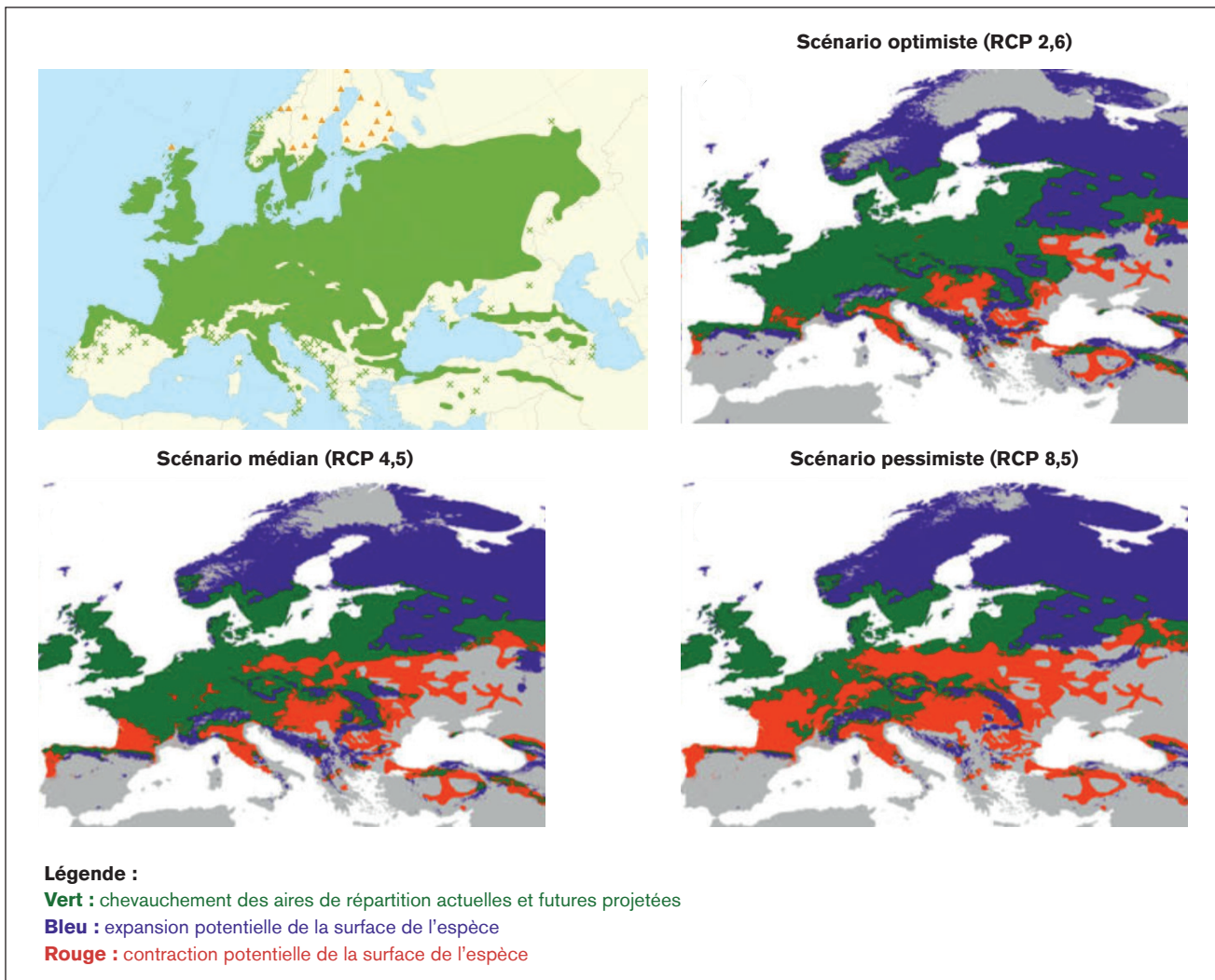


FIGURE 13 : Projections des aires de répartition du chêne pédonculé (*Quercus robur*) à l'horizon 2061-2080 simulées à partir de trois modèles de circulation générale et de trois scénarios de changement climatique – Sources : Dyderski et al., 2017, Cauldullo, G., Welk, E., San-Miguel-Ayanz, J., 2017. Chorological maps for the main European woody species.

Chêne pubescent

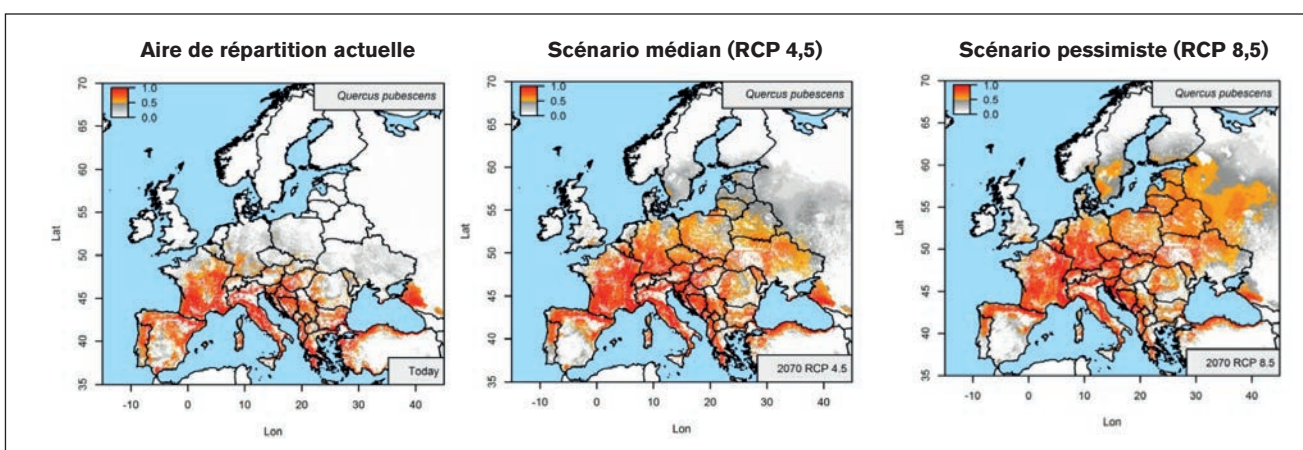


FIGURE 15 : Projections de la répartition du chêne pubescent (*Quercus pubescens*) aujourd'hui et en 2070 selon un scénario médian (RCP 4,5) et pessimiste (RCP 8,5). Plus la couleur de la zone tend de l'orange au rouge, plus les conditions seront favorables à l'implantation et la croissance du chêne pubescent (probabilité > 0,5). Plus cette couleur tend du gris au blanc, moins ces conditions seront propices à son développement (probabilité < 0,5). – Source : Thurm et al., 2018.

LE PIN SYLVESTRE

(*Pinus sylvestris*)



RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE ET USAGES DU BOIS :

Cette espèce a été introduite dans l'ouest de la France au milieu du XVIII^e siècle, et son extension a été favorisée par la déprise agricole. Le pin sylvestre occupe actuellement environ 1 880 hectares dans la Métropole Rouen Normandie et représente la première essence de résineux en Normandie devant le sapin douglas en termes de surface. Son aire de répartition naturelle s'étend de la péninsule ibérique à la Chine, en passant par l'Europe centrale, la Scandinavie et une grande partie de l'Asie (Figure 16). Sa présence dans le territoire signifie que les conditions environnementales locales sont favorables à son cycle biologique. Le pin sylvestre est utilisé comme bois d'œuvre dans la construction, et pour la fabrication de pâte à papier¹⁵.

ÉVOLUTION À LONG-TERME

Le pin sylvestre est une des deux espèces (avec l'épicéa commun) pour lesquelles les modèles prédictifs d'évolution de l'aire de répartition anticipent le plus de changement dans les décennies à venir Dyderski et al. (2017). Pour les scénarios optimiste (RCP 2,6) et médian (RCP 4,5), des larges contractions potentielles se produiraient sur de la péninsule ibérique à l'Asie. En France, seules les côtes de la Manche et quelques zones de montagnes pourraient s'avérer encore propices au développement de l'espèce à l'horizon 2061-2080. Dans le cas d'un scénario pessimiste (RCP 8,5), ces contractions s'amplifieraient, notamment dans le nord de la France où l'espèce pourraient potentiellement se maintenir dans quelques départements. La résolution des modèles élaborés à l'échelle européenne ne permet pas de déterminer si les contractions potentielles seraient susceptibles d'atteindre le territoire de la Métropole Rouen Normandie pour ces trois scénarios (Figure 16).

AVIS SUR LA PRÉSENCE À LONG-TERME DU PIN SYLVESTRE DANS LA MÉTROPOLE ROUEN NORMANDIE ET EN NORMANDIE

L'amplitude thermique que peut supporter cette espèce est assez large lui permettant de résister à la fois aux grands froids hivernaux et à des températures relativement élevées durant la saison de végétation. Selon le CRPF, le pin sylvestre résisterait plutôt bien aux sécheresses estivales, ainsi qu'aux gels de printemps puisque son débourrement intervient plus tardivement. Néanmoins, elle semblerait craindre les canicules. Le pin sylvestre préfère les sols profonds, modérément et régulièrement alimentés en eau. Il s'agit d'une espèce frugale qui peut tolérer les milieux pauvres, mais elle ne supporte pas les sols calcaires¹⁶. Par précaution, il convient de retenir que l'augmentation de la température moyenne annuelle et de la fréquence des canicules l'exposerait à des risques sanitaires plus importants en Normandie et en Europe.

D'un point de vue écologique, la survie du pin sylvestre paraît donc possible si l'ampleur du réchauffement est contenue. Dans le cas d'un réchauffement plus important prévu par le scénario pessimiste, son maintien semble plus difficile.

Du point de vue de sa gestion :

- Dans le cas d'une stratégie de développement de la production de bois, le pin sylvestre pourrait être délaissé dans l'étage dominant au profit d'autres espèces plus productives et plus résistantes à la sécheresse.
- Dans le cas d'une stratégie de conservation de la biodiversité, il serait préférable de privilégier les espèces de feuillues locales.

¹⁵ Sources : agriculture.gouv.fr et fiche technique du CRPF de Normandie sur le pin sylvestre

¹⁶ Source : Fiche technique du CRPF de Normandie sur le pin sylvestre

ANNEXES CARTOGRAPHIQUES

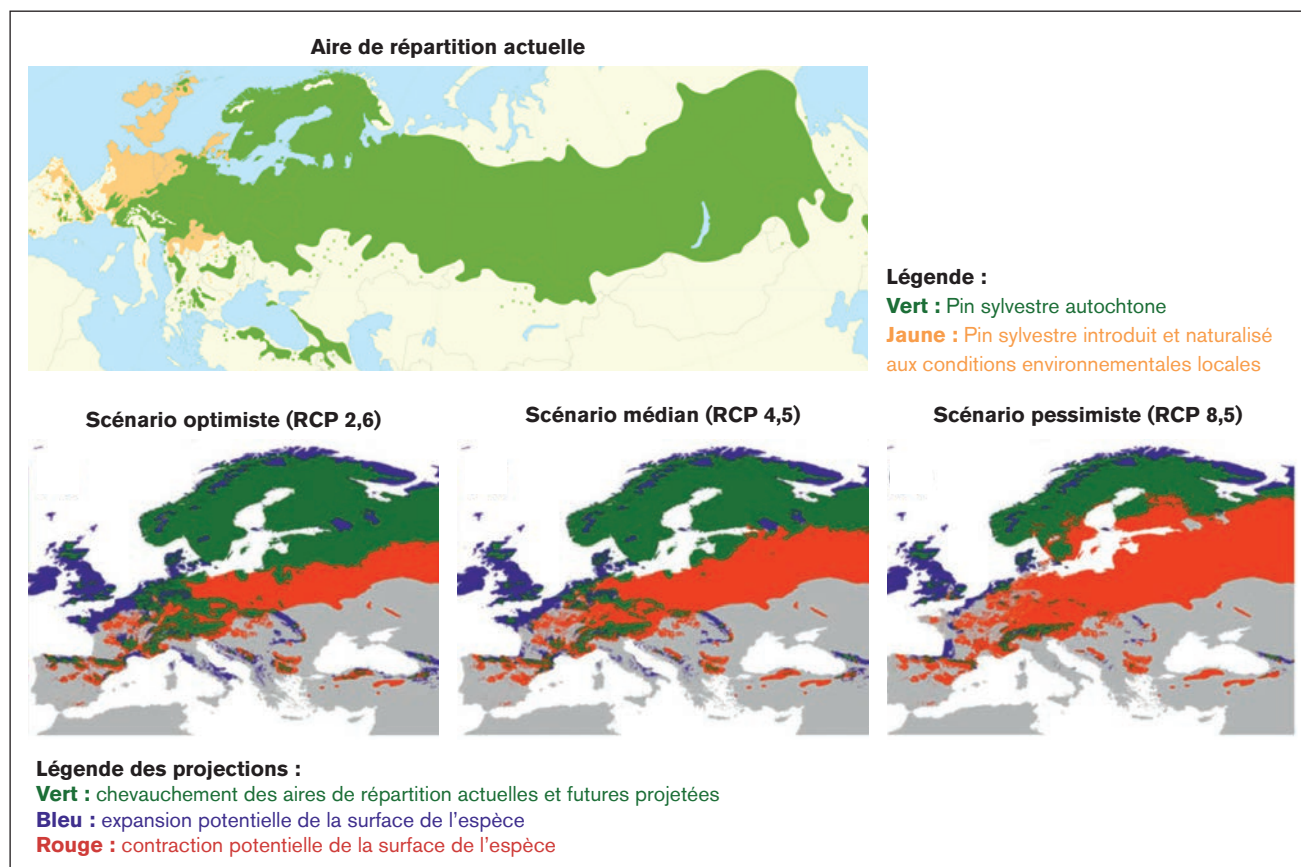


FIGURE 16 : Évolution des aires de répartition du pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) à l'horizon 2061-2080 simulées à partir de trois modèles de circulation générale et de trois scénarios de changement climatique. – Sources : Dyderski et al., 2017 ; Caudullo, G., Welk, E., San-Miguel-Ayanz, J., 2017. Chorological maps for the main European woody species.

SAPIN DE DOUGLAS

(*Pseudotsuga menziesii*)



RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE ET USAGES DU BOIS :

Le sapin Douglas (*Pseudotsuga menziesii*) est une essence originaire de l'Ouest de l'Amérique du Nord qui a été introduite en France en 1842. Les principaux peuplements y sont localisés dans la Massif Central, le Morvan et les Vosges (Figure 17) et cette espèce représente de la deuxième essence la plus plantée en France (Du Puy et al., 2017). Le douglas occupe environ 200 hectares dans la Métropole. En Normandie, les conditions pour sa sylviculture sont optimales dans de nombreux peuplements, dont ceux de la Métropole (Figure 18). La croissance de cet arbre est très rapide et son bois est apprécié pour la construction et la menuiserie.

ÉVOLUTION À LONG-TERME

Dans un scénario optimiste (RCP 2,6), son expansion potentielle se limiterait principalement à l'Europe du Nord, aux littoraux de la Manche, au nord de la péninsule ibérique, et en Europe Centrale. Pour un scénario médian (RCP 4,5), les conditions pour cette expansion se réduisent dans les marges nord de la France, dont la Normandie. Enfin, aucune trace de sa présence ou de son expansion potentielle n'apparaît en Normandie dans le cas d'un scénario pessimiste (RCP 8,5) (Figure 17). Le risque de dépérissement du douglas varierait selon les départements de Normandie : très fort dans l'Eure et l'Orne, ce risque serait moins important dans le sud de la Manche et le nord de la Seine-Maritime. Pour ce qui est du territoire de la Métropole, le risque y serait élevé (Figure 18).

AVIS SUR LA PRÉSENCE À LONG-TERME DU DOUGLAS DANS LA MÉTROPOLE ROUEN NORMANDIE ET EN NORMANDIE

Le comportement du douglas est proche du chêne pédonculé (Tableau 1). Le douglas semble bien supporter les sécheresses estivales. Cependant, cela ne vaut que sur une période limitée car il s'agit d'une espèce peu économe en eau. Des fentes peuvent apparaître sur le tronc de l'arbre (partie avec la plus forte valeur commerciale) lors de sécheresses, le fragilisant aux attaques d'insectes ou d'agents pathogènes. Sa présence dans certaines régions chaudes comme la Californie et l'Espagne ou dans le Sud de la France suggérerait que certaines variétés de douglas seraient plus adaptées à des conditions climatiques plus sèches et chaudes. En outre, le douglas résiste aussi bien au froid hivernal et aux gelées tardives mais est sensible au vent et à la neige¹⁷.

Des sols profonds, filtrants, moyennement acides et bien alimentés en eau toute l'année lui seront favorables, donc des sols également favorables à l'implantation d'espèces locales. À l'inverse, il ne tolère pas les sols gorgés d'eau et les sols compacts et calcaires¹⁸. Toutefois, le Douglas a récemment été reconnu comme un stimulant fort de la nitrification de l'azote dans les sols conduisant une accumulation de nitrate dans ces derniers. Les nitrates étant des éléments très mobiles dans les sols, ils sont susceptibles d'être perdus par lessivage entraînant avec eux d'autres éléments minéraux des sols (calcium et aluminium par exemple). Ces « fuites » de nitrate peuvent donc réduire la fertilité chimique des sols et impacter la qualité des eaux de surface et de nappes (Zeller et al. 2019).

L'augmentation de la température moyenne annuelle pourrait jouer en défaveur du développement du douglas, ce qui pourrait expliquer en partie les projections précédentes. Si les recharges en eau du sol s'avèrent insuffisantes, le douglas serait exposé à des risques de dépérissement plus importants lors d'une sécheresse ou via l'attaque d'agents pathogènes.

D'un point de vue écologique, le douglas pourrait se maintenir en Normandie pour des scénarios optimiste et médian, et plus généralement dans un climat à +2°C. Cette possibilité est moins certaine pour le territoire de la Métropole. Dans le cas d'un réchauffement de grande ampleur, sa survie semble beaucoup plus hypothétique dans la région.

À propos de sa gestion :

- dans le cas d'une stratégie de développement de la production de bois, le douglas pourrait être retenue dans quelques peuplements dans l'étage dominant. Néanmoins, les risques pour sa sylviculture deviendront plus importants si le réchauffement du climat se poursuit.
- dans le cas d'une stratégie de conservation de la biodiversité, le douglas est déconseillé au regard de ses impacts sur le sol.

ANNEXES CARTOGRAPHIQUES

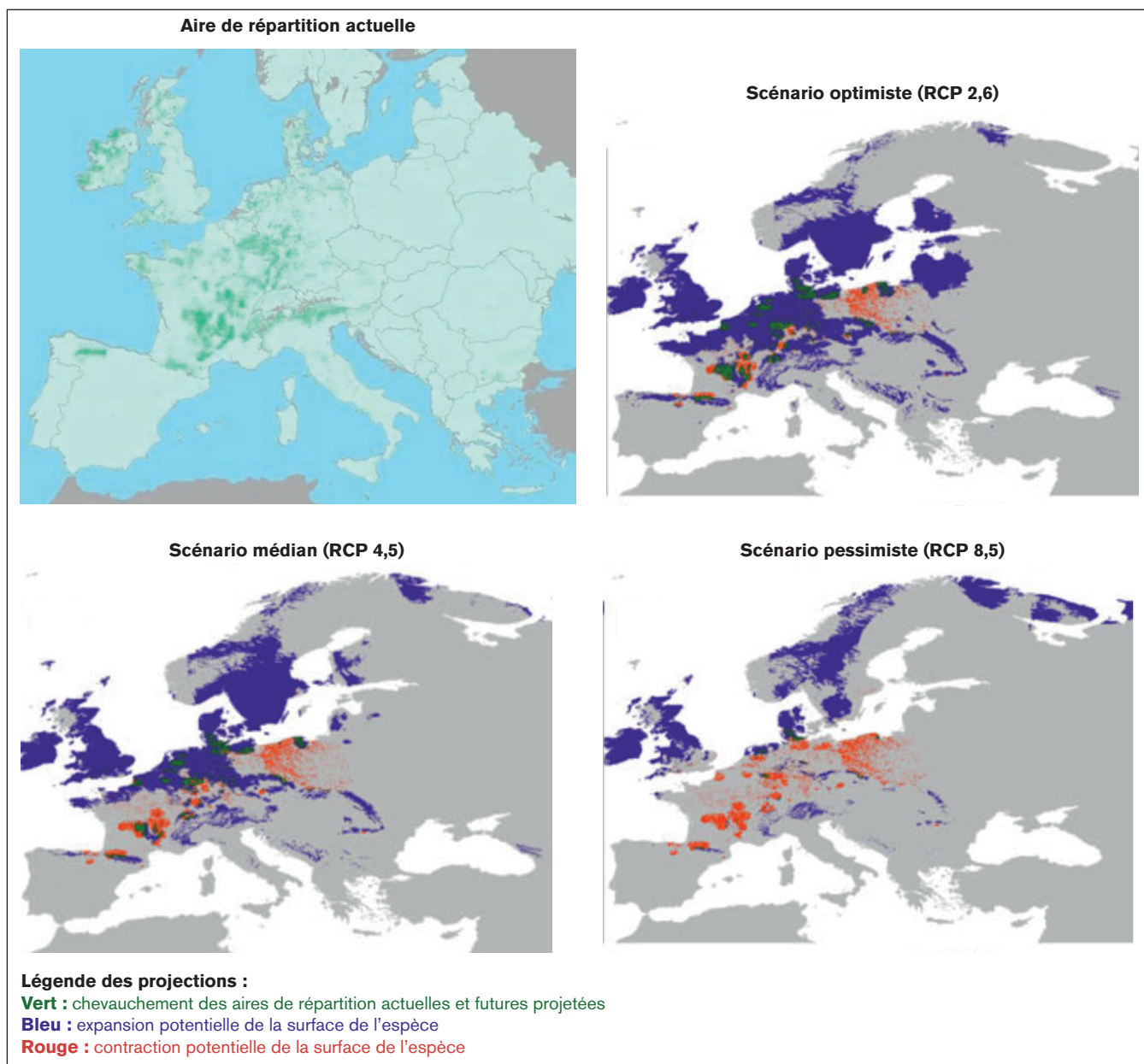
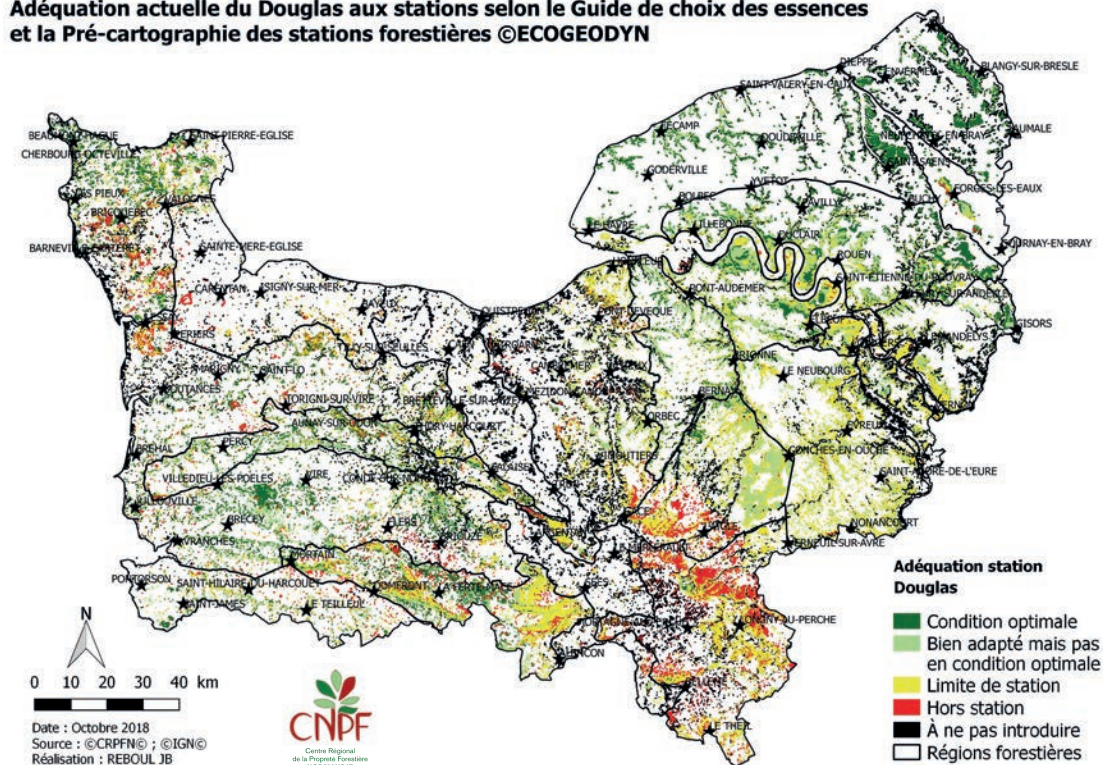


FIGURE 17 : Évolution des aires de répartition du douglas (*Pseudotsuga menziesii*) à l'horizon 2061-2080 selon trois scénarios de changement climatique et trois modèles de circulation générale. – Sources : Brus, et al., 2011, Dyderski et al., 2017

¹⁷ Sources : Agriculture.gouv.fr et Fiche technique du CRPF de Normandie sur le sapin Douglas.

¹⁸ Source : Fiche technique du CRPF de Normandie et d'Ile-de-France-Centre-Val-de-Loire sur le sapin Douglas.

Adéquation actuelle du Douglas aux stations selon le Guide de choix des essences et la Pré-cartographie des stations forestières ©ECOGEDYN



Adéquation à long terme (2071 -2100) du Douglas aux stations selon le Guide de choix des essences et la Pré-cartographie des stations forestières ©ECOGEDYN

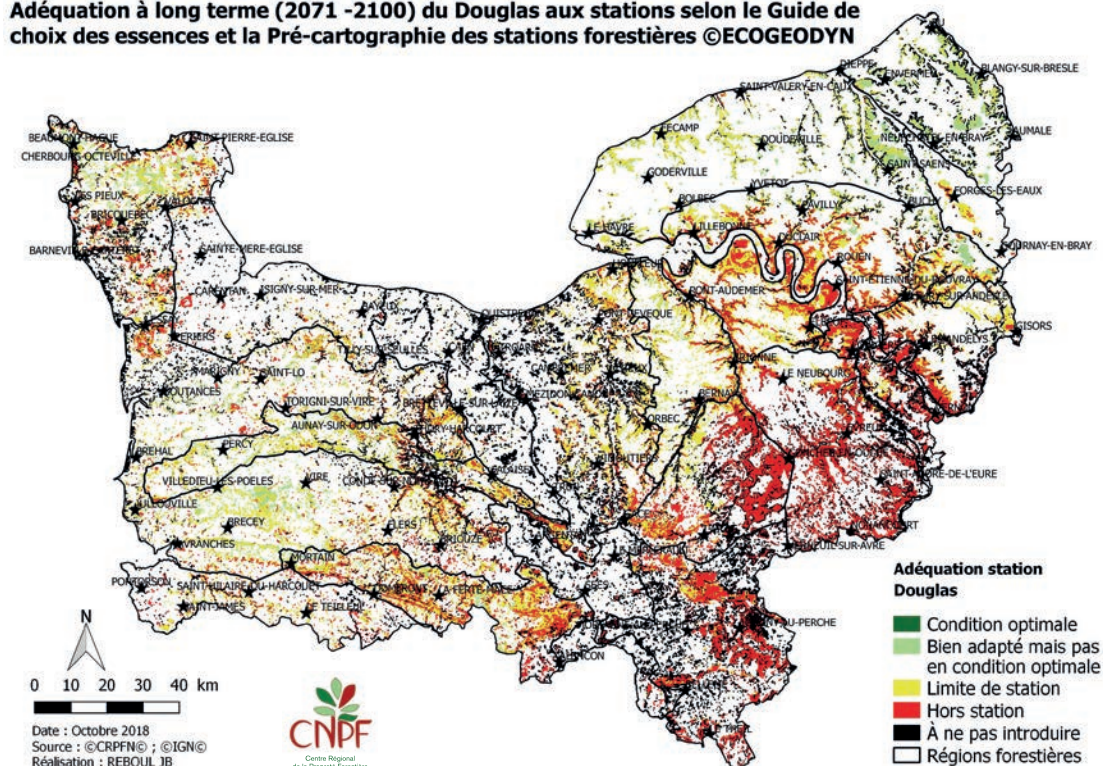


FIGURE 18 : Perspectives de maintien actuelles et à long-terme du douglas dans une gestion sylvicole rentable économiquement à l'échelle régionale – © CRPFN ©IGN, CRPF Normandie, 2018

ROBINIER FAUX-ACACIA

(*Robinia pseudoacacia*)



RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE ET USAGES DU BOIS :

Le robinier (*Robinia pseudoacacia*) est une essence originaire de l'Ouest de l'Amérique du Nord et a été introduite en France en 1601 par le botaniste Jean Robin qui a donné son nom à l'espèce¹⁹. Il occupe environ 32 hectares dans les forêts de la Métropole. Puisqu'il ne s'agit pas d'une espèce native d'Europe, elle ne s'étend pas aussi largement que les autres espèces étudiées précédemment mais elle peut être trouvée un peu partout en France (Figure 19). Sa capacité à se développer rapidement en peuplements denses et monospécifiques font d'elle une espèce exotique envahissante avérée dans l'ancienne Haute-Normandie (Douville et Housset, 2013 ; Douville et Waymel, 2019). Toutefois, le bois de cette espèce représente une alternative aux bois tropicaux. Sa dureté et sa durabilité – il est notamment imputrescible – font de lui un bois d'œuvre apprécié dans la construction.

ÉVOLUTION À LONG-TERME

Dans les trois scénarios, le robinier aurait la capacité de s'étendre sur une grande partie de l'Europe tandis que les zones de contraction potentielles seraient minoritaires, même dans le scénario pessimiste (RCP 8,5) (Figure 19). Ces projections sont confirmées par celles de Thurm et al. (2018) dans lesquelles l'extension d'aire de répartition du robinier en Europe pour l'horizon 2070 serait de 129% dans le cas d'un scénario médian (RCP 4,5), et de 137% sous un scénario pessimiste (RCP 8,5), soit un gain de surface d'environ 1,70 millions de km² en Europe. Ces modélisations montrent cependant des perspectives moins évidentes concernant la Normandie et le quart nord-ouest de la France en général (Figure 20).

AVIS SUR LA PRÉSENCE À LONG-TERME DU ROBINIER DANS LA MÉTROPOLE ROUEN NORMANDIE ET EN NORMANDIE

Le robinier semble bien supporter les sécheresses (Tableau 1) mais cette résistance s'affaiblit si la sécheresse en question est brutale et intense, et pour laquelle la production de bois peut s'arrêter. Il craint également les vents forts et les gelées tardives sur les pousses annuelles. De plus, il préfère se déployer sur des sols sableux et bien aérés même s'il peut s'accommoder de plusieurs types de sols, ce qui en fait une espèce frugale. Il a aussi la particularité de fixer l'azote dans le sol via ses racines et donc de favoriser une flore nitrophile du fait de sa capacité à fixer dans le sol l'azote atmosphérique.

D'un point de vue écologique, cette espèce semble montrer moins de difficultés à survivre comparée aux autres espèces étudiées précédemment. Sa capacité à s'accommoder de plusieurs types de sols pourrait également être un avantage pour sa survie. Néanmoins, des questions pourraient se poser à propos des conséquences de son déploiement sur l'acidité du sol et le développement d'une flore nitrophile. De plus, parce qu'elle trouvera en Normandie des conditions environnementales à son optimum écologique, elle pourrait supplanter des espèces locales plus en difficulté face à la rudesse d'un climat plus chaud.

D'un point de vue de la gestion forestière, un compromis doit être trouvé entre l'intérêt économique de son bois qui pourrait représenter une alternative aux bois tropicaux, et son caractère invasif.

- Dans le cas d'une stratégie de développement de la production de bois, le robinier pourrait être planté par les forestiers dans l'étage dominant.
- Dans le cas d'une stratégie de conservation de la biodiversité, il est à exclure du fait de sa capacité à faire varier les niveaux trophiques des sols.

¹⁹ Source : Fiche technique du CRPF Rhône-Alpes sur le Robinier faux-acacia

ANNEXES CARTOGRAPHIQUES

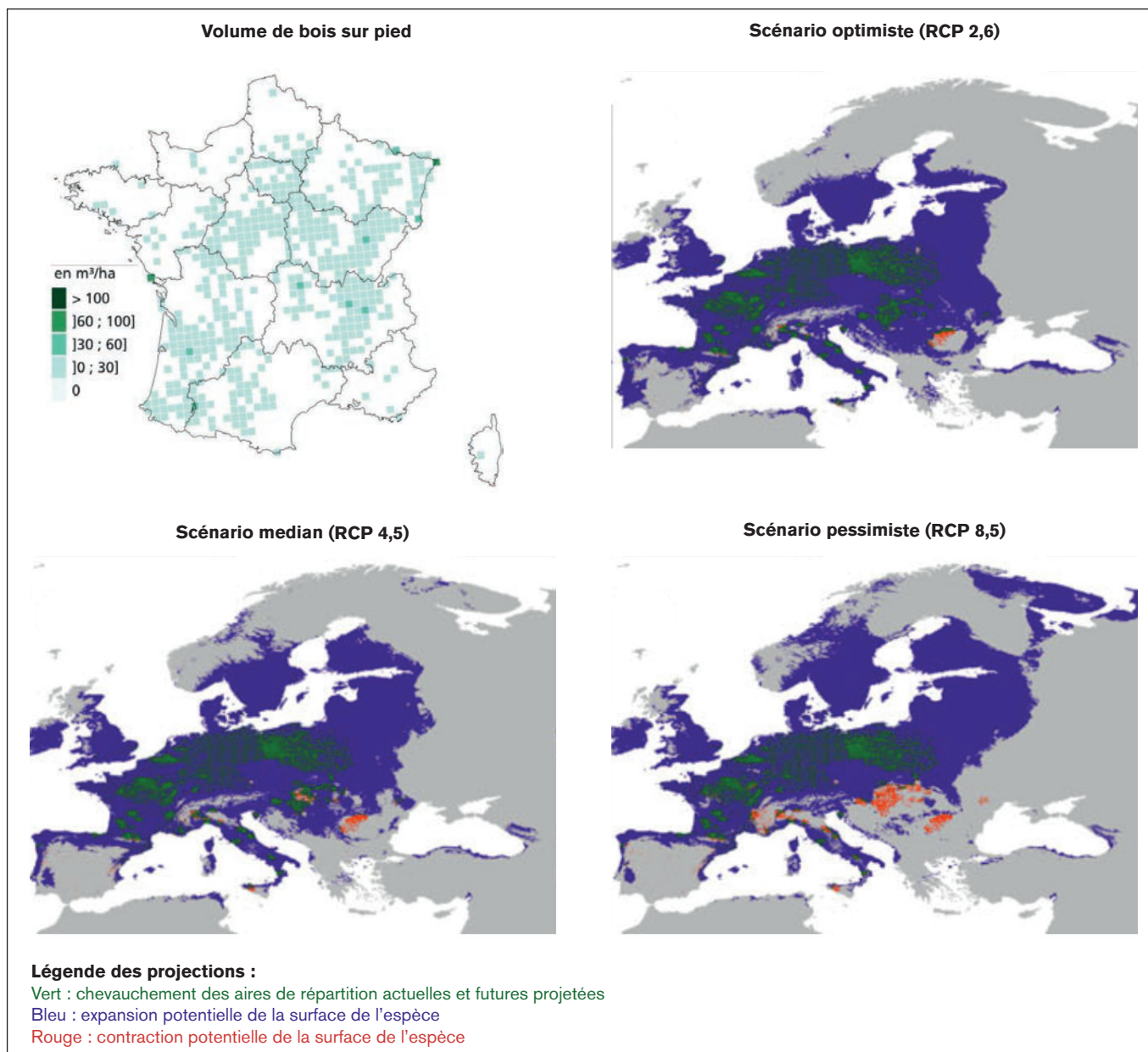


FIGURE 19 : Évolution des aires de répartition du robinier (*Robinia pseudoacacia*) simulées à partir de trois modèles de circulation générale et trois scénarios de changement climatique à l'horizon 2061-2080. – Sources : IGN ; Dyderski et al., 2017

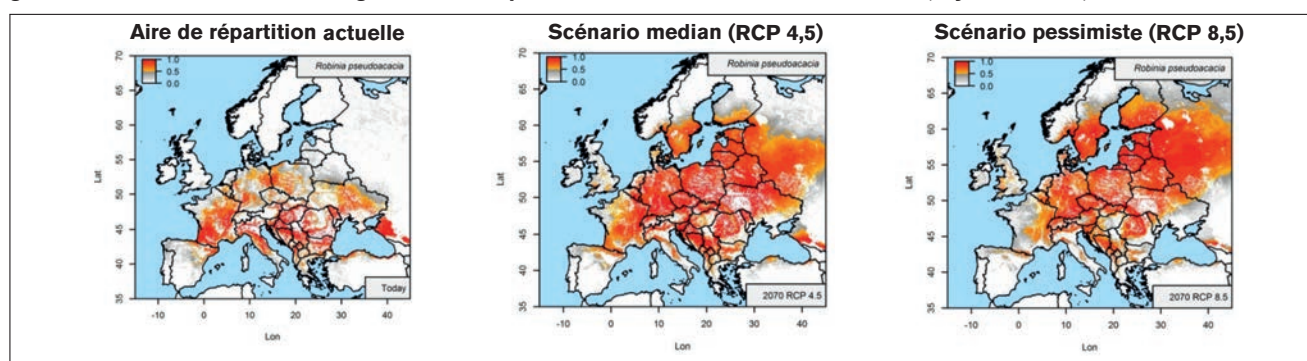
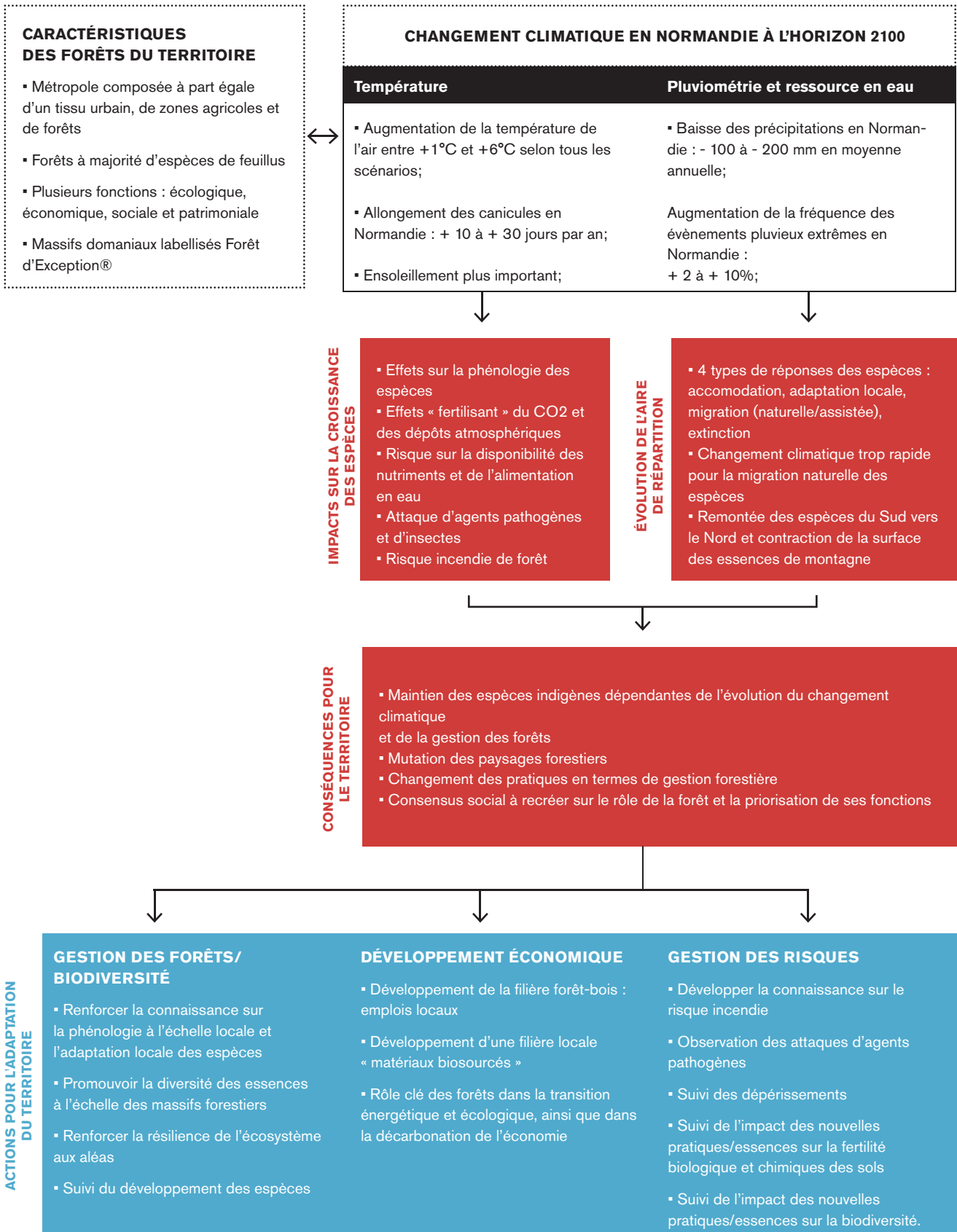


FIGURE 20 : Projections de la répartition du robinier faux-acacia aujourd'hui et en 2070 selon un scénario médian (RCP 4,5) et pessimiste (RCP 8,5). Plus la couleur de la zone tend de l'orange au rouge, plus les conditions seront favorables à l'implantation et la croissance du robinier faux-acacia (probabilité > 0,5). Plus cette couleur tend du gris au blanc, moins ces conditions seront propices à son développement (probabilité < 0,5). – Source : Thurm et al., 2018.

Conclusion :

les voies d'impact du changement climatique sur les forêts normandes



Recommandations pour l'amélioration des connaissances

1 La collecte de données sur les rythmes phénologiques à l'échelle de la Métropole permettrait de mieux comprendre le comportement des arbres et des espèces avec lesquels ils interagissent (insectes et prédateurs, agents pathogènes) au fil des saisons et les effets du changement climatique sur la synchronisation de ces rythmes. Un protocole accessible à chacun(e) pour effectuer des observations phénologiques a notamment été formalisé par l'Observatoire des Saisons. Cette initiative s'inscrirait dans le cadre des sciences participatives en permettant à chaque citoyenne et citoyen d'apporter sa contribution dans l'amélioration des connaissances à l'échelle locale.

2 Dans un futur proche, le risque d'incendie de forêt viendra vraisemblablement s'ajouter à la liste des risques naturels contre lesquels le territoire devra se préparer. Plusieurs scénarios pourraient être envisagés à l'échelle de la Métropole et de la Normandie pour essayer d'entrevoir les conséquences socio-économiques et environnementales de ce risque. De même, il paraît nécessaire d'estimer les moyens à mettre en œuvre pour assurer sa gestion.

3 Les changements dans les pratiques de gestion pour (i) adapter les forêts au changement climatique (substitution d'essence, réduction de la densité des arbres, mélanges des essences, préparation mécanique des sols en phase de plantation) et pour (ii) utiliser les forêts pour atténuer le changement climatique (augmentation des prélèvements de biomasse pour l'énergie ou la construction) ont des impacts insuffisamment évalués sur la biodiversité et le fonctionnement des forêts. La capacité de ces écosystèmes à durablement fournir les services écosystémiques en lien avec les exemples ci-avant (capacité à stocker du carbone, capacité de production de biomasse, support à la biodiversité) n'est pas assurée et nécessite des investigations poussées.

Bibliographie :

- AcclimaTerra, Le Treut, H. (dir). Anticiper les changements climatiques en Nouvelle-Aquitaine. Pour agir dans les territoires. Éditions Région Nouvelle-Aquitaine, 2018, 488 p.
- ADEME. PROBST Anne, RIZZETTO Simon, BELYAZID Salim, GEGOUT Jean-Claude, ALARD Didier, CORCKET Emmanuel, MANSAT Arnaud, SVERDRUP Harald. 2017. Prévion de l'impact des dépôts atmosphériques azotés et du changement climatique sur la biodiversité forestière en France – Apport de la modélisation dynamique des charges critiques azotées. Rapport ADEME, 50 pages.
- Badeau, V., Dupouey, J. L., Cluzeau, C., & Drappier, J. (2007). Aires potentielles de répartition des essences forestières d'ici 2100. *Rendez-vous Techniques de l'ONF* 3, 62-66.
- Boé, J., Radojevic, M., Bonnet, R., Dayon, G., de France, I., & Habets, F. 2018. Scénarios sécheresse sur le bassin Seine-Normandie. 36 p.
- Brus, D.J., G.M. Hengeveld, D.J.J. Walvoort, P.W. Goedhart, A.H. Heidema, G.J. Nabuurs, K. 2011. Statistical mapping of tree species over Europe. *European Journal of Forest Research* 145-157
- Bussotti, F., Pollastrini, M., Holland, V., & Brueggemann, W. (2015). Functional traits and adaptive capacity of European forests to climate change. *Environmental and Experimental Botany*, 111, 91-113
- Cecchini S., et Lebourgeois F. (2007). Phénologie des peuplements du réseau RENECOFOR : variations entre les espèces et les zones climatiques.
- Charru, M. (2012). La productivité forestière dans un environnement changeant: caractérisation multi-échelle de ses variations récentes à partir des données de l'Inventaire Forestier National (IFN) et interprétation environnementale (Doctoral dissertation).
- Cheab, A., Badeau, V., Boe, J., Chuine, I., Delire, C., Dufrene, E., ... & Thuiller, W. (2012). Climate change impacts on tree ranges: model intercomparison facilitates understanding and quantification of uncertainty. *Ecology letters*, 15(6), 533-544.
- Coddeville, P., Pascaud, A., Sauvage, S., Nicolas, M., Mathias, E., & Probst, A. (2016). Évolution des émissions, de la qualité de l'air et des dépôts atmosphériques dans les espaces ruraux, notamment forestiers. Changes in atmospheric emissions, air quality and deposition in rural areas, especially in forests. *Pollution Atmosphérique*, (229-230).
- Dupouey, J. L. (2012). Forêts et changement climatique, quelques éléments issus de la recherche. *Forêt Entreprises*, (211), 24-29.
- Du Puy S., Derrière N., Wurrpillot S. (2017). La forêt plantée en France : état des lieux. La feuille de l'Inventaire Forestier [en ligne], n°40, (consulté le 24 juin 2020) : https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/if40_plantations.pdf
- DOUVILLE, C & HOUSSET, P. 2013 – Indicateur n°13 : Nombre d'espèces exotiques envahissantes (EEE) végétales en Haute- Normandie, Indicateurs floristiques de Haute-Normandie, pour l'Observatoire de la Biodiversité de Haute-Normandie, Conservatoire botanique national de Bailleul. 10 p. Bailleul.
- DOUVILLE C., WAYMEL J., 2019 – Observatoire des plantes vasculaires exotiques envahissantes de Normandie. Liste des plantes vasculaires exotiques envahissantes de Normandie pour la priorisation des actions de contrôle, de connaissance et d'information/sensibilisation & bilan des actions 2018. DREAL Normandie / Région Normandie. Conservatoire botanique national de Bailleul / Conservatoire botanique national de Brest, 20p + annexes.
- Dyderski, M. K., Pał, S., Frelich, L. E., & Jagodzinski, A. M. (2018). How much does climate change threaten European forest tree species distributions?. *Global change biology*, 24(3), 1150-1163.
- Eurostat, 2018. Industrial roundwood by species : Export in Euro.
- Genermont, S., & Cellier, P. (2017). L'azote, si cher à nos campagnes. 2268-3798.
- IPCC/GIEC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2013. Changements climatiques 2013. Les éléments scientifiques. Résumé à l'intention des décideurs. 34 p.
- Granier, A., & Breda, N. (2007). Ecophysiologie et fonctionnement des écosystèmes forestiers.
- GIEC, 2014: Annexe II: Glossaire [Mach, K. J., S. Planton et C. von Stechow (dir. publ.)], Changements climatiques 2014: Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, R. K. Pachauri et L. A. Meyer (dir. publ.)]. GIEC, Genève, Suisse, p. 131-145.
- GIEC, 2014: Changements climatiques 2014: Incidences, adaptation et vulnérabilité – Résumé à l'intention des décideurs. Contribution du Groupe de travail II au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [sous la direction de Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea et L.L. White]. Organisation météorologique mondiale, Genève (Suisse), 34 pages.
- Husson, C. (2018). L'émergence de la chalarose en France. *Revue Forestière Française*.
- Jonard M., André F., Dambrine E., Ponette Q., Ulrich E., 2009. Temporal trends in the foliar nutrition status of the French, Wallon and Luxembourg broad-leaved plots of forest monitoring. *Annals of Forest Science*, 66(4):412 – 412, DOI: 10.1051/forest/2009014.
- Jonard M., Fürst Alfred, Verstraeten A., Thimonier A., Timmerman V., et al. Dégradation de la nutrition des arbres en phosphore : un signal confirmé à l'échelle européenne. *Renecofor* : 25 ans de suivi des écosystèmes forestiers (Beaune, France, 25/09/2017).
- Kazmierczak L., Laignel B., et Charrier F. (2019). La ressource en eau et le risque inondation dans la Métropole rouennaise : constat et analyse prospective dans un contexte de changement climatique. Rapport du GIEC local pour la Métropole Rouen Normandie, 24 p.
- Laignel B., Nouaceur Z., 2018. Évolution du climat à l'échelle de la Métropole Rouen Normandie. Rapport du GIEC local pour la Métropole Rouen Normandie, 24 p.
- Lindner, Marcus, et al. «Climate change and European forests: What do we know, what are the uncertainties, and what are the implications for forest management?» *Journal of Environmental Management* 146 (Décembre 2014): 69-83.
- Lefèvre, F., Loustau, D., Marçais, B., & Rantien, C. (2014). Vers une gestion adaptative des forêts. Pour la science, 437, 78-81.
- Lenoir, J., Gégout, J. C., Marquet, P. A., De Ruffray, P., & Brisse, H. (2008). A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. *science*, 320(5884), 1768-1771.
- Le Treut, H. Les impacts du changement climatique en Aquitaine : un état des lieux scientifique. Pessac : Presses Universitaires de Bordeaux : LGPA-Editions, 2013, 365 p. (Dynamiques environnementales, HS 2013).
- Lindner, M., Garcia-Gonzalo, J., Kolström, M., Green, T., Reguera, R., Maroschek, M., et al.. (2008). Impacts of climate change on European forests and options for adaptation. Report to the European Commission Directorate-General for Agriculture and Rural Development, 173.
- Lindner, M., Fitzgerald, J. B., Zimmermann, N. E., Rey, C., Delzon, S., van der Maaten, E., ... & Suckow, F. (2014). Climate change and European forests: what do we know, what are the uncertainties, and what are the implications for forest management?. *Journal of environmental management*, 146, 69-83.

Loustau, D. (2004). Rapport final du projet CARBOFOR. Séquestration de Carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France. Quantification, spatialisation, vulnérabilité et impacts des différents scénarios climatiques et sylvicoles. Bordeaux.

ONERC, L'arbre et la forêt à l'épreuve d'un climat qui change, Rapport de l'ONERC au premier ministre et au Parlement, La documentation française, Paris, 2014.

Pignard, G., Dupouey, J.-L., Granier, A., Morel, M. (2009). Impact des tempêtes de 1999 sur le bilan de carbone des forêts françaises. In: Yves Birot (Coordinateur), Guy Landmann (Coordinateur), Ingrid Bonhème (Coordinateur), La forêt face aux tempêtes (p. 143-151). Synthèses (Quae). Versailles, FRA : Editions Quae.

<https://prodinra.inra.fr/record/45122>

Reyer, C., Lasch-Born, P., Suckow, F., Gutsch, M., Murawski, A., & Pilz, T. (2014). Projections of regional changes in forest net primary productivity for different tree species in Europe driven by climate change and carbon dioxide. *Annals of forest science*, 71(2), 211-225.

Reyer, C. P., Bathgate, S., Blennow, K., Borges, J. G., Bugmann, H., Delzon, S., ... & Gracia, C. (2017). Are forest disturbances amplifying or canceling out climate change-induced productivity changes in European forests?. *Environmental Research Letters*, 12(3), 034027.

Rizzetto, S. (2017). Prédiction de la sensibilité biogéochimique et écologique des écosystèmes forestiers français aux dépôts atmosphériques azotés dans un contexte de changement global (Doctoral dissertation).

Robin, C., & Desprez-Loustau, M. L. (2018). Émergences de maladies chez les arbres forestiers: Définitions, concepts et recommandations. *Revue Forestière Française*.

Seidl, R., Thom, D., Kautz, M., Martin-Benito, D., Peltoniemi, M., Vacchiano, G., ... & Lexer, M. J. (2017). Forest disturbances under climate change. *Nature climate change*, 7(6), 395-402.

Thurm, E. A., Hernandez, L., Baltensweiler, A., Ayan, S., Rasztovits, E., Bielik, K., ... & Büchsenmeister, R. (2018). Alternative tree species under climate warming in managed European forests. *Forest ecology and management*, 430, 485-497.

Walbott, M., Gallet, C., & Corcket, E. (2018). Germination et croissance des plantules de hêtre (*Fagus sylvatica*) sous contraintes climatiques et allélopathiques. *Comptes Rendus Biologies*, 341(9-10), 444-453.

Zeller, B., Legout, A., Bienaimé, S., Gratia, B., Sante-noise, P., Bonnaud, P., Ranger, J., (2019). Douglas fir stimulates nitrification in French forest soils. *Scientific Reports* 9, 10687.

Notes

[illegible]

[illegible]

En cas d'utilisation de données ou d'éléments de ce rapport, il doit être cité selon la forme suivante :

Kazmierczak L., Aubert M., Charrier F., et al. (2020). Les forêts de la Métropole Rouen Normandie face au changement climatique. Rapport du GIEC local pour la Métropole Rouen Normandie, 40 p.

Le GIEC local ne serait en aucune façon responsable des interprétations, productions intellectuelles, et publications diverses résultant des résultats de leurs travaux et pour lesquelles il n'aurait pas donné d'accord préalable.

Le GIEC local est un groupe d'experts créé dans le cadre de la COP21 Rouen Normandie et financé par la Métropole Rouen Normandie. Les experts proviennent des structures suivantes :



CONTACT

Léo KAZMIERCZAK - Chargé de projet climat
leo.kazmierczak@metropole-rouen-normandie.fr
Tél : 02 76 30 30 35