



HAL
open science

Etude des conseils d'utilisation de provenances du chêne pédonculé (*Quercus robur*) en France dans le cadre du changement climatique

Mélanie Romanet

► **To cite this version:**

Mélanie Romanet. Etude des conseils d'utilisation de provenances du chêne pédonculé (*Quercus robur*) en France dans le cadre du changement climatique. Sylviculture, foresterie. 2021. hal-03998545

HAL Id: hal-03998545

<https://hal.inrae.fr/hal-03998545>

Submitted on 21 Feb 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Master Agrosociétés, Environnement, Territoires, Paysage, Forêt (AETPF)
Biologie Intégrative et Changements Globaux (BICG)
Université d'Orléans
Année universitaire 2020 – 2021

Etude des conseils d'utilisation de provenances du Chêne pédonculé (*Quercus robur*) en France dans le cadre du changement climatique

Présenté par **Mélanie Romanet** – Stagiaire chez UNISYLVA

Sous l'encadrement de **Monsieur Yves Rousselle** - Chargé de R&D en génétique
UMR ONF/INRAE BioForA

Maître de stage **Monsieur Emmanuel Cacot** - Directeur technique
Chez UNISYLVA

Résumé : Afin d'assurer de la bonne utilisation du Matériel Forestier de Reproduction (MFR) du chêne pédonculé (*Quercus robur*), des conseils sont mis à disposition par zones de plantations et structurées par Régions de provenances (RP). Effectuées par des experts, ces préconisations ont été traduites en distances climatiques entre sites de provenances et sites de plantation selon les trois variables IKS (DHYa, SDJa et TMla). Cette étude révèle pour toutes ces variables que les préconisations utilisant des MFR locales conduisent à des distances climatiques considérées comme nulles, hormis pour la variable TMla. Ces compatibilités climatiques traduisent des conseils répondant aux attentes et adaptés à leurs conditions pédoclimatiques. En revanche, pour ceux visant à anticiper le changement climatique, les distances ne sont majoritairement pas égales à zéro et traduisent des prises de risque évidentes. Cela amène à remettre en question les préconisations effectuées. Le postulat qui consiste à planter des provenances plus sudistes ne semble donc pas concluant malgré la gamme de tolérance déterminée. Cette dernière ne semble pas être la plus adaptée et ne permet pas d'interpréter au mieux ce type de déplacements. Des informations pédoclimatiques sur les RP sont apportées ainsi que des propositions de révisions sur les conseils de plantation.

Mots-clés : distances climatiques, Matériels Forestiers de Reproduction (MFR), migration assistée.



Master Agrosociétés, Environnement, Territoires, Paysage, Forêt (AETPF)
Biologie Intégrative et Changements Globaux (BICG)
Université d'Orléans
Année universitaire 2020 – 2021

Etude des conseils d'utilisation de provenances du Chêne pédonculé (*Quercus robur*) en France dans le cadre du changement climatique

Présenté par **Mélanie Romanet** – Stagiaire chez UNISYLVA

Sous l'encadrement de **Monsieur Yves Rousselle** - Chargé de R&D en génétique
UMR ONF/INRAE BioForA

Maître de stage **Monsieur Emmanuel Cacot** - Directeur technique
Chez UNISYLVA

Résumé : Afin d'assurer de la bonne utilisation du Matériel Forestier de Reproduction (MFR) du chêne pédonculé (*Quercus robur*), des conseils sont mis à disposition par zones de plantations et structurées par Régions de provenances (RP). Effectuées par des experts, ces préconisations ont été traduites en distances climatiques entre sites de provenances et sites de plantation selon les trois variables IKS (DHYa, SDJa et TMla). Cette étude révèle pour toutes ces variables que les préconisations utilisant des MFR locales conduisent à des distances climatiques considérées comme nulles, hormis pour la variable TMla. Ces compatibilités climatiques traduisent des conseils répondant aux attentes et adaptés à leurs conditions pédoclimatiques. En revanche, pour ceux visant à anticiper le changement climatique, les distances ne sont majoritairement pas égales à zéro et traduisent des prises de risque évidentes. Cela amène à remettre en question les préconisations effectuées. Le postulat qui consiste à planter des provenances plus sudistes ne semble donc pas concluant malgré la gamme de tolérance déterminée. Cette dernière ne semble pas être la plus adaptée et ne permet pas d'interpréter au mieux ce type de déplacements. Des informations pédoclimatiques sur les RP sont apportées ainsi que des propositions de révisions sur les conseils de plantation.

Mots-clés : distances climatiques, Matériels Forestiers de Reproduction (MFR), migration assistée.

Abstract: By assuring the well using of Forestry Reproduction Materials (FRM) of pedunculate oak (*Quercus robur*), some advice is available by planting areas, divided in provenance's regions (RP). Made by experts, these advice were translated into climatic distances calculation between provenance's sites and plantation's sites for the three IKS variables (DHYa, SDJa and TMIa). This study reveals for all these ones that the recommendations by using local FRM lead to climatic compatibilities considered to be zero, except for the TMIa variable. These climatic compatibilities reflect advice which respond to expectations and adapted to their pedoclimatic conditions. Otherwise, for those aimed at anticipating climate change, distances are mostly not equal to zero and reflect obvious risk-taking. This lead to question these recommendations. The postulate which consists of planting more Southern provenances, is therefore not efficient enough despite the tolerance range determined. This doesn't seem to be the most adapted and doesn't allow to describe the best way this type of migration. Pedoclimatic information about RP are proposed and some recommendations to improve these plantation advice.

Keywords: assisted migration, climatic distances, Forestry Reproduction Materials (FRM).

Introduction

Le changement climatique est aujourd'hui un enjeu majeur lié à l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dont le CO₂ atmosphérique, responsable de l'élévation globale des températures. Les activités anthropiques sont à l'origine d'émissions supplémentaires de gaz à effet de serre depuis l'époque préindustrielle (IPCC, 2014). Ce surplus, confronté aux causes naturelles et aux modifications climatiques globales, représente des risques pour les sociétés humaines ainsi que pour les écosystèmes (Valade Marie et al., 2020). Le dioxyde de carbone n'est pas l'unique gaz émis par l'Homme puisque nos modes de consommation ont aussi favorisé l'utilisation du méthane, de l'ozone ou du protoxyde d'azote, etc. Le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) a fourni des modèles climatiques selon différents scénarios socio-économiques. Ils sont le résultat d'analyses de données mondiales afin de tenter de prédire le climat futur. Malgré les incertitudes, tous mettent en évidence une élévation plus ou moins drastique des températures, une hausse du cumul pluviométrique accompagné d'une baisse des précipitations notable en été. A cela s'ajoute une augmentation de la fréquence en éléments climatiques extrêmes tels que les fortes chaleurs (Allen et al, 2010 ; IPCC, 2014 ; Bouget et al., 2020). Dans le Sud de l'Europe, les prévisions concernant l'humidité moyenne du sol à long terme mettent en évidence sa considérable diminution à toutes les saisons, là où seulement certaines saisons seraient touchées dans le reste de l'Europe (Ruostenoja et al., 2018). Ces combinaisons de modifications climatiques vont être à l'origine de déficit hydrique, qui répétés, vont perturber le

fonctionnement physiologique des arbres. En effet, si ces périodes de sécheresses deviennent aussi fréquentes que prévues, la récupération entre chaque évènement perturbateur sera réduite, les écosystèmes seront alors endommagés de façon permanente entraînant une dégradation généralisée des puits de carbone terrestre (Schwalm et al., 2017 ; Breashears et al., 2005 ; Allen et al., 2010). La santé de nos forêts se dégrade et certaines essences semblent déjà fragilisées notamment par des phénomènes de dépérissements de plus en plus fréquents (Buras et al, 2019). Ce processus se traduit par une réduction de la vigueur d'une essence et concerne différents organes de l'arbre (houppier, tronc).

Les écosystèmes forestiers concentrent une grande biodiversité et occupent 30,8% de la superficie terrestre mondiale, dont 25 % en Europe pour 16,9 millions d'hectares en France (ONU, 2020 ; IGN, 2020). Les chênes (pédonculé, sessile, pubescent et vert) représentent 44% du volume de bois sur pieds des feuillus et ce depuis les années 1990, faisant d'eux les essences les plus présentes des forêts françaises (Becker et Levy et al., 1990 ; IGN, 2020). La France est aujourd'hui le troisième producteur de chêne et le premier en Europe (FNB, 2020). Les exigences écologiques des essences conditionnent incontestablement leur distribution et leur croissance. Le Chêne vert et le Chêne pubescent se retrouvent majoritairement dans le Sud de la France mais en faible densité, c'est pourquoi, en France les deux espèces de chênes les plus courantes restent tout de même le chêne sessile (*Quercus petrae*) et le chêne pédonculé (*Quercus robur*). Ces derniers constituent à eux-seuls, 23% du volume de bois sur pieds des forêts françaises (IGN, 2020). Face à l'ampleur des changements climatiques actuels et de l'évolution des aires de compatibilité, plusieurs possibilités émergent : le changement d'espèces ou la migration assistée (Legay, 2020). Cette dernière est un moyen de réduire l'impact paysagé en conservant l'espèce déjà présente. L'utilisation d'autres provenances d'une même essence évite un changement de la matière première et permet la conservation de la filière en aval que sont les scieries et les industries de la transformation et de la valorisation du bois. La migration assistée consiste en des déplacements anticipés de graines de peuplements sélectionnés de provenances dites « non locales », afin de répondre aux problématiques du changement climatique. Ces mouvements migratoires ont pour but de planter des provenances ayant évolué dans des climats comparables au climat futur de la zone de plantation afin d'anticiper l'évolution du climat dans ces zones. L'hypothèse sous-jacente est que les provenances se sont adaptées à leur climat local. Telle une course contre la montre, l'objectif est de réduire l'écart entre leur capacité de migration et la vitesse du changement climatique. Le Ministère chargé

des Forêts réglemente ces déplacements de graines sous forme de fiches où sont exposés des conseils d'utilisation issus de préconisations d'experts. Elles sont structurées selon différentes échelles géographiques mais restent, le plus souvent, définies par Régions de Provenances (RP). Dans la plupart des cas, les provenances conseillées sont celles dites locales puisque l'hypothèse de ces experts repose sur une adaptation des provenances à leur station. Dans le contexte actuel de changement climatique, les experts ont choisi de conseiller des provenances plus sudistes que les locales afin d'aider le gestionnaire dans sa démarche de migration assistée.

L'objectif du présent travail s'inscrit dans la poursuite de celui sur les conseils d'utilisation des provenances de chêne sessile en France et de leurs évolutions dans le cadre du changement climatique (Doucerain, 2019 ; Doucerain, 2020). Cette étude a pour objectif de mener la même approche sur le chêne pédonculé : les conseils d'utilisation mis en place pour anticiper le changement climatique semblent-ils pertinents au vu des évolutions futures du climat ? En traduisant les préconisations en distances climatiques entre une source de graines et un site de plantation, nous souhaitons répondre aux questions suivantes :

- i. Les sources de graines locales sont-elles adaptées à leur propre station climatique ? Les préconisations locales sont-elles bien représentatives de leur Région de provenances ?
- ii. Les déplacements climatiques induits par les préconisations cherchant à anticiper le changement climatique sont-ils suffisants comparés aux évolutions de celui-ci ?

Pour qu'un conseil d'utilisation propose une source de graines compatible climatiquement avec la zone de plantation, il faudrait que la distance climatique entre la source de graines et la zone de plantation soit nulle. En effet, une distance nulle traduit une adéquation climatique parfaite. En plus de ce critère, une gamme de tolérance climatique établie pour les distances d'un type de conseil va être étudiée tout en vérifiant qu'elle ne soit pas trop étendue. Nous émettons donc l'hypothèse que les distances climatiques calculées quel que soit le type de conseils traduiront une compatibilité climatique. Les conseils dans le cadre du changement climatique, seront alors adaptés tout comme la gamme de tolérance des distances proposées.

Matériels et Méthodes

1. Le Chêne pédonculé

Le chêne pédonculé (*Quercus robur*) est une essence supportant bien les excès d'eau dans le sol mais il est aussi connu pour être peu résistant à la sécheresse (Becker M., 1984). Il occupe la plus grande partie de l'Europe tempérée et la ressource française en chêne pédonculé s'élève environ à 300 millions de m³ de bois sur pieds, soit 11% du volume de bois vivant (MMA, 2021 ; IGN, 2020). Bien que le chêne pédonculé soit réparti dans toute la France grâce à sa particularité d'essence « pionnière » (Fig. 1), c'est une essence de grandes plaines, plateaux, riches vallées ou alluvions que l'on ne retrouve guère dans la région méditerranéenne. Elle reste exigeante en eau, en lumière et ne tolère que très peu la concurrence (Camus A., 1945 ; Lemaire J., 2011). Sa qualité de bois est voisine de celle du chêne sessile, son bois est facile à travailler et excellent, il a donc de grands intérêts économiques (RMT AFORCE, 2020).

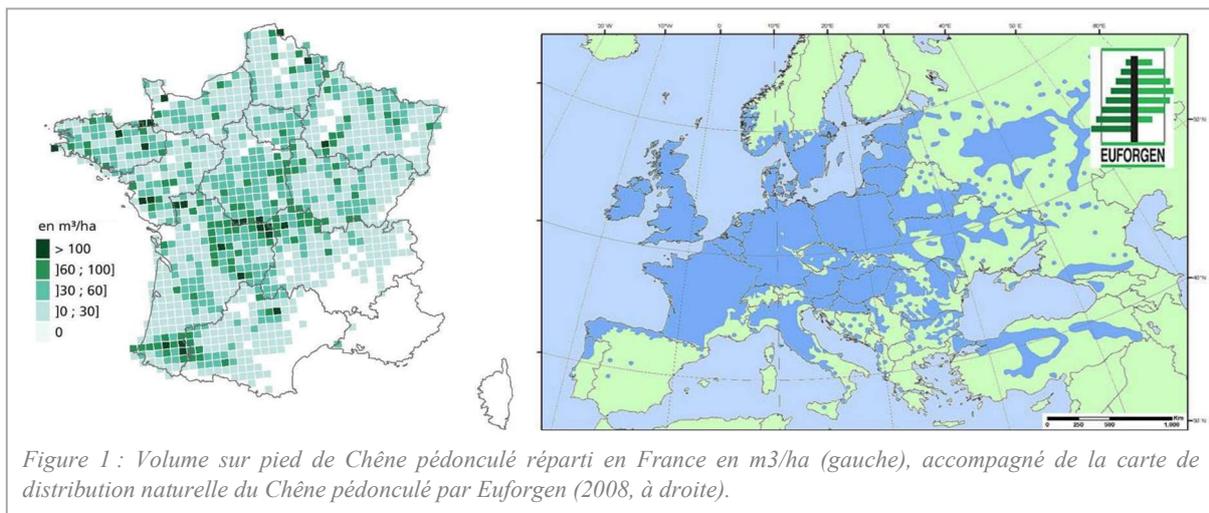
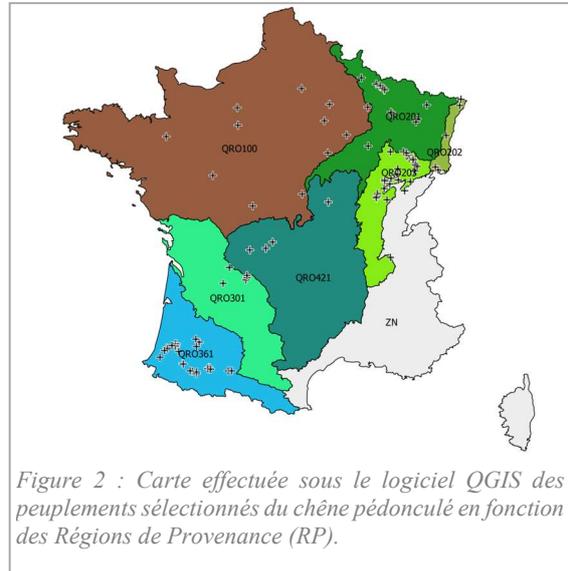


Figure 1 : Volume sur pied de Chêne pédonculé réparti en France en m³/ha (gauche), accompagné de la carte de distribution naturelle du Chêne pédonculé par Euforgen (2008, à droite).

2. Jeux de données

i. Peuplements sélectionnés

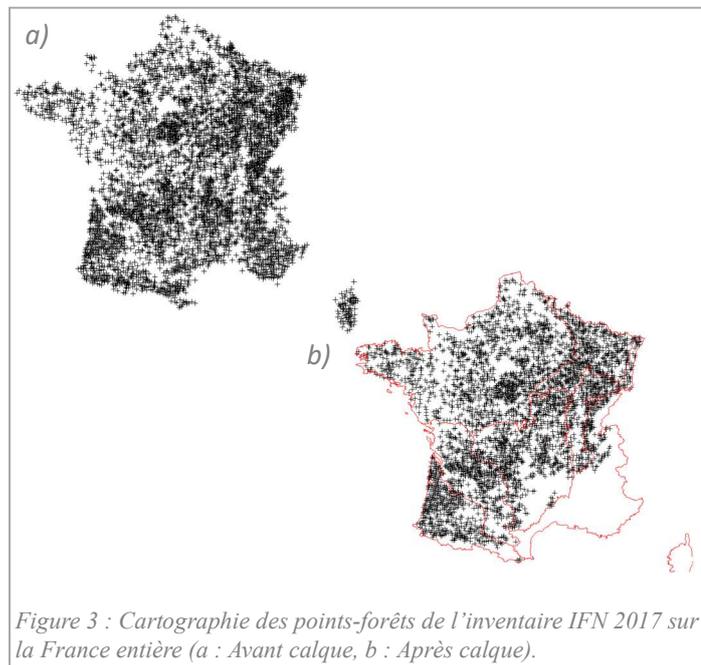
A partir de 1971, des mesures réglementaires ont vu le jour afin d'éviter les erreurs de plantations et ainsi, assurer des boisements de qualité la plus optimale possible. Des peuplements dits « porte-graines » ont été sélectionnés pour ces mêmes raisons et recensés par régions de provenances (RP). Des caractéristiques phénotypiques (exemple : qualité de tiges, forme, bonne croissance) et une génétique similaire sont les critères de sélection de ces peuplements (Girard S., 2002).



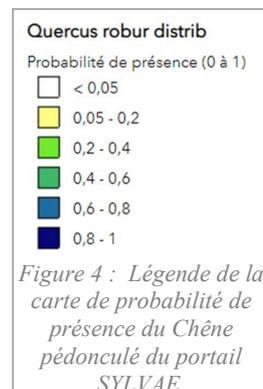
Les fiches des Matériels Forestiers de Reproduction (MFR) (MAA, 2021) présentent un découpage de la France en RP. Ces dernières ont été structurées selon leurs facteurs pédoclimatiques. L'objectif étant qu'elles représentent des zones aux conditions écologiques uniformes au sein desquelles les espèces sont supposées présenter des caractéristiques phénotypiques ou génétiques similaires (Girard S., 2002). Ces RP servent de références et sont affinées par les experts selon l'essence. Les MFR de chêne pédonculé sont structurées en 7 RP. Une « zone neutre » (ZN) est aussi définie, dans laquelle aucun peuplement sélectionné n'est identifié et pour laquelle aucun conseil n'est produit. Cette zone neutre comprend la région méditerranéenne, les Alpes ainsi que la Corse (Fig. 2). Les peuplements sélectionnés ne sont répartis ni uniformément entre les RP ni géographiquement au sein de chaque RP (Fig. 2). La liste peut par ailleurs être révisée par la suppression ou l'ajout de nouveaux peuplements pour permettre de choisir une nouvelle origine plus adéquate ou pour tenir compte du renouvellement des peuplements. L'équipe INRAE GeeDAAF-EFNO (Diversité Adaptative des Arbres Forestiers des Ecosystèmes Forestiers de Nogent-sur-Vernisson) travaille sur la conservation et la valorisation de la diversité génétique des arbres. Chaque peuplement sélectionné du chêne pédonculé est référencé, géolocalisé par cette équipe pour le MAA. Dans notre approche, nous avons utilisé ces peuplements comme sources de graines possibles pour la migration assistée.

ii. Les points forêts de l'IFN

Ce jeu de données est le résultat de collectes de terrain par l'IGN. Ces points appelés « points-forêts » nous permettent un échantillonnage du couvert forestier actuel. Ils correspondent à des placettes circulaires sur lesquelles un nombre d'arbres vivants sur pieds a été recensé. Pour notre étude, nous avons utilisé l'ensemble de ces points (environ 5 000) comme un maillage de sites de plantation possibles (Fig. 3, a).



Un calque de la distribution du chêne pédonculé a été ajouté selon les études et les données mises à disposition par le Système d'Informations Localisées sur la Végétation, les Arbres et leur Environnement (SYLVAE). Cette couche SIG permet d'exclure les zones où les conditions environnementales (aération du sol, déficit hydrique, disponibilité en azote, acidité et température) ne semblent pas adaptées à l'essence forestière sélectionnée (Piedallu et al., 2016). Elle s'exprime en probabilité de présence (0 à 1). Afin d'utiliser un calque excluant ces zones peu favorables, nous avons décidé d'établir notre limite à 0,2. Plusieurs tests ont été effectués sur QGIS afin de déterminer la valeur la plus adéquate. L'objectif était d'exclure la ZN et les régions montagneuses où les altitudes et les conditions ne sont pas propices à la présence du chêne pédonculé. La limite 0,2 était mise en avant dans leurs représentations puisqu'elle constitue un palier (0,05 à 0,2) aux couleurs jaunes (Fig. 4), signifiant une faible présence de l'essence. Il nous reste donc environ 4 000 points IFN après l'utilisation de ce calque (Fig. 3, b).



iii. Les fiches de conseils d'utilisation

Ces fiches, proposées par le MAA, mettent à disposition des conseils d'utilisations des Matériels Forestiers de Reproduction (MFR). Elles visent à s'assurer de la bonne utilisation des MFR par zones de plantations. En effet, elles apportent des informations issues d'experts concernant la niche écologique de l'essence mais aussi des conseils sylvicoles permettant d'orienter les gestionnaires dans leur rôle de reboiseurs. Pour le chêne pédonculé, les MFR sont des peuplements sélectionnés structurés en Régions de Provenance (RP).

Zones d'utilisation		Matériels conseillés		Autres matériels utilisables			
GRECO	SER						
code	Nom	code	Nom	Nom	Cat.		
A	Grand Ouest cristallin et océanique	-	Toutes les SER	QRO100	S	QRO301*	S
		B23	Mosan, Thiérache et Hainaut	QRO100, QRO201	S		
B	Centre-Nord semi-océanique	B51	Champagne humide	QRO100, QRO421	S		
		B53	Pays-Fort, Nivernais et plaines pré-morvandelles	QRO100, QRO421	S		
		B61	Baugeois-Maine				
		B62	Champagne-Gâtine tourangelle				
		B70	Sologne-Orléanais				
		B81	Loudunais et Saumurois	QRO100	S	QRO301*, QRO421*	S
		B82	Brenne et Brandes				
		B91	Boischaud et Champagne berrichonne				
		B92	Bourbonnais et Charolais	QRO421	S	QRO203	S
		-	Autres SER	QRO100	S		
C	Grand Est semi-continental	C20	Plateaux calcaires du Nord-Est	Avant-Monts Jurassiens, Côteaux pré-jurassiens, Beaujolais viticole et côtes de Bourgogne, Plateau Haut-Saônois : QRO203 Plaines pré-morvandelles : QRO421 Autres régions forestières nationales : QRO201	S S S	Avant-Monts Jurassiens, Côteaux pré-jurassiens, Beaujolais viticole et côtes de Bourgogne, Plateau Haut-Saônois : QRO421* Plaines pré-morvandelles : QRO201 Autres régions forestières nationales : QRO203, QRO421, QRO100	S S S
		C30	Plaines et dépressions argileuses du Nord-Est	Bassigny Amance et annexes : QRO203 Autres régions forestières nationales : QRO201	S S	Bassigny Amance et annexes : QRO421* Autres régions forestières nationales : QRO203, QRO421*, QRO100	S S
		C41	Plaine d'Alsace	QRO202	S	QRO203* 817-07 Oberheingraben	S S
		C42	Sundgau alsacien et belfortain	Sundgau : QRO202 Autres régions forestières nationales : QRO203	S S	Sundgau : QRO203* 817-07 Oberheingraben Autres régions forestières nationales : QRO421*	S S S
		C51	Saône, Bresse et Dombes	QRO203	S	QRO421*	S
		C52	Plaines et piémonts alpins	Plateaux et collines du bas Dauphiné, Basse vallée de l'Ain et plaine du Bas Dauphiné, Agglomération lyonnaise : QRO203 Autres régions forestières nationales : néant	S .	Plateaux et collines du bas Dauphiné, Basse vallée de l'Ain et plaine du Bas Dauphiné, Agglomération lyonnaise : QRO421* Autres régions forestières nationales : QRO203	S S
		-	Autres SER	QRO201	S	QRO100	S

Figure 5 : Exemple de la fiche de conseils MFR du chêne pédonculé à différentes échelles (GRECO, SER et RFN) (Source : MAA, 2021). (MC : Matériels Conseillés et CC (avec astérisque) : Changement Climatique).

Les conseils d'utilisations apportés par ces fiches se font par découpages géographiques à des échelles plus ou moins fines. Ils peuvent en effet, être délivrés par GRECO (Grandes Régions ECOlogiques), par SER (SylvoEcoRégions) mais aussi par RFN (Régions Nationales Forestières), c'est d'ailleurs le cas pour le chêne pédonculé. Ils sont par ailleurs divisés en deux groupes, les « matériels conseillés » qui reprennent dans la plupart des cas les provenances dites locales ou les « Autres matériels utilisables ». Ces derniers peuvent correspondre à des alternatives en cas de pénuries ou encore à des matériels susceptibles de répondre au changement climatique. Ces conseils ont été traduits sous forme de tableau où l'on distingue les zones d'utilisation potentielles (GRECO, SER ou RFN) et leurs conseils associés ainsi que

les caractéristiques de ces derniers (*Fig. 5*) Dans notre approche, nous avons utilisé ce tableau pour mettre en relation les sources de graines (peuplements sélectionnés) et les sites potentiels de plantation (points forêts IFN).

iv. Les données climatiques

Les données climatiques que nous avons utilisées sont issues de l'outil IKS disponible sur le site ClimEssences (RMT AFORCE, 2020). Mis en ligne en 2020 et développé par le Réseau Mixte Technologique (RMT) AFORCE (Adaptation des FORêts au Changement climatique), cet outil met à disposition de multiples informations sur les essences forestières dans le cadre du changement climatique sous forme de fiches espèces. Il décrit leurs exigences écologiques et propose un outil de modélisation de leur répartition grâce aux facteurs climatiques limitants du modèle IKS (Indicateur Klimat Struz), préalablement conçu par le projet NOMADES (Le Bouler et al., 2014). ClimEssences résulte de la fusion du projet Caravanes, pour les fiches espèces, d'IKSMAP1 et IKSMAP2 pour les modèles de compatibilité climatique. IKSMAP repose sur l'évaluation et la consolidation du modèle IKS, afin de mettre à disposition un outil d'aide à la décision sur les choix d'essences. Ce modèle a été conçu par Hervé Le Bouler et s'appuie sur trois variables connues pour être physiologiquement limitantes :

- **DHYa** : le Déficit HYdrique annuel correspondant au facteur limitant qu'est le manque d'eau ;
- **SDJa** : la Somme des Degrés Jours annuelle dépassant 5°C correspondant au facteur limitant qu'est le manque de chaleur et donc d'énergie ;
- **TMIa** : la Température MInimale annuelle correspondant au facteur limitant qu'est l'excès de froid ;

Ces variables de bases proviennent des données Chelsa (Karger et al., 2017) à une résolution spatiale d'environ 1km². Les variables climatiques utilisées proviennent de données mensuelles sur vingt ans. Ces trois variables climatiques exploitées ont été récupérées sous forme de fichiers raster dans un premier temps pour le climat actuel, qui concerne les observations des années 1979 à 2013, puis dans un second temps, pour le climat futur selon un scénario 4.5 médian. Ce dernier suppose une prise de conscience avec une stabilisation des

émissions avant 2100 accompagné de la mise en place de mesures. L'objectif de ce scénario est de rester sous les +2°C à l'horizon 2100.

3. *Analyses des données*

i. *Distances climatiques*

L'extraction des données climatiques des raster par peuplements sélectionnés et points-forêts, effectué avec R (R Core Team, 2020), permet de pouvoir obtenir des distances climatiques grâce à la formule suivante :

$$\text{Distances climatiques} = \text{variable climatique du } \underline{\text{site de plantation}} - \text{variable climatique de la } \underline{\text{provenance}}$$

Les sites de plantation sont les points forêts IFN et les provenances sont les peuplements sélectionnés. Les distances climatiques ont été calculées pour chacune des variables climatiques disponibles par IKS dans ClimEssences.

Les distances sont calculées différemment selon le type de conseils. Lorsque le matériel local (conseils de type Matériels Conseillés, « MC ») est préconisé, sans prendre en compte le changement climatique, les distances sont déterminées dans le climat actuel avec les valeurs des variables climatiques par provenance. En revanche, lorsque l'on décide de prendre en compte le changement climatique (CC), il est nécessaire de réaliser une projection des conditions climatiques futures dans le but de les appréhender au mieux. C'est pourquoi, on utilise le raster de scénario climatique considéré comme médian (RCP 4.5 moyen du GIEC) à l'horizon 2070 pour caractériser les zones de plantations futures et vérifier si les conseils de type CC sont adaptés à ces conditions futures.

ii. *Détermination d'un seuil acceptable*

Afin d'interpréter au mieux nos valeurs, nous avons tenté d'établir des seuils acceptables autour desquels on considérerait les distances climatiques comme climatiquement compatibles et acceptables. Nous nous sommes appuyés sur les données de distribution du

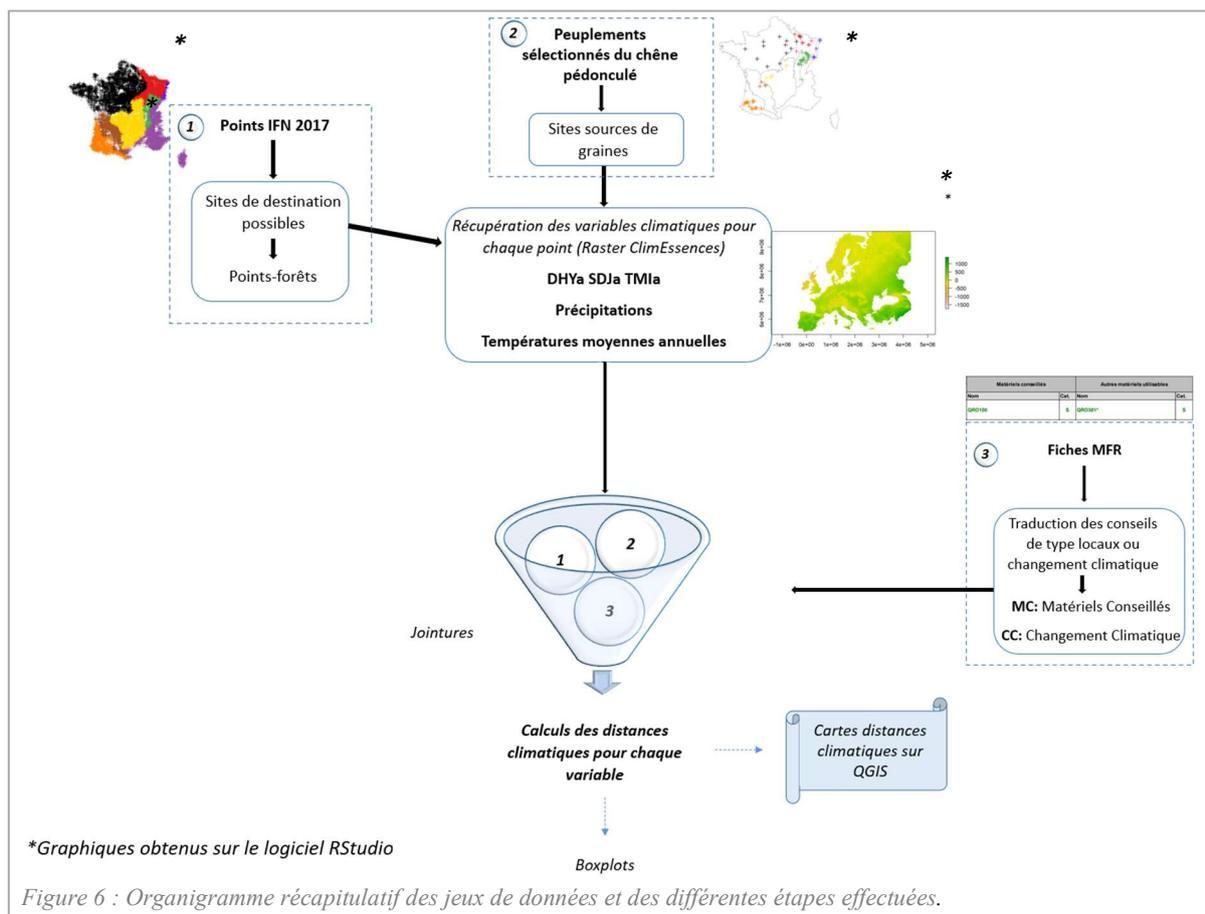
chêne pédonculé de ClimEssences, calculées à partir des points de présence en France affichés à l'ensemble des surfaces forestières françaises. On peut y trouver cette information pour les trois variables d'intérêts (DHYa, SDJa, TMJa). Nous avons cherché à trouver les valeurs encadrant 75% de la majorité de cette distribution. Ce seuil déterminé à 75% nous permet de prendre en compte une plage de valeurs ni trop étroite, ni trop large de présence du Chêne pédonculé. Les deux valeurs encadrantes de cette distribution ont été soustraites pour en calculer un intervalle et établir une gamme acceptable de déplacements. On obtient une tolérance de migration de +/-188 mm pour le DHYa, de +/- 1400°C pour le SDJa et de +/- 3,8 °C pour TMJa, que l'on arrondira à 4°C. N'ayant que peu d'informations sur la réaction que peut avoir le chêne pédonculé lors de transferts climatiques, nous avons décidé d'utiliser cette méthode afin de pouvoir interpréter nos résultats.

iii. Cartes de distances climatiques

Pour ce faire, le logiciel QGIS 3.16 Hannover a été utilisé. L'objectif réside dans la spatialisation des variables par RP ainsi que des distances climatiques en utilisant les rasters disponibles sur ClimEssences. La formule effectuée sous QGIS pour les cartes de distances climatiques reste la même que celle décrite dans la partie v mais cette fois, l'échelle a été réduite à celle de la provenance. Elles ont été réalisées selon la même démarche que présentée dans la partie précédente. La formule ci-dessous a donc été utilisée et consiste à calculer la différence entre la variable climatique (DHYa) du site de plantation et la moyenne des peuplements sélectionnés par RP (calculées sous R (R Core Team, 2020)).

$$\text{Distances climatiques} = \text{DHYa des sites de plantation de tous les points du raster} - \text{Moyenne DHYa d'une provenance}$$

Les légendes et leurs échelles de valeurs ont été déterminées pour les variables climatiques en se référant aux cartes disponibles sur ClimEssences. Le calque de la non distribution du chêne pédonculé a été ajouté à ces cartes par un raster grisé (des valeurs inférieures à 0,2).

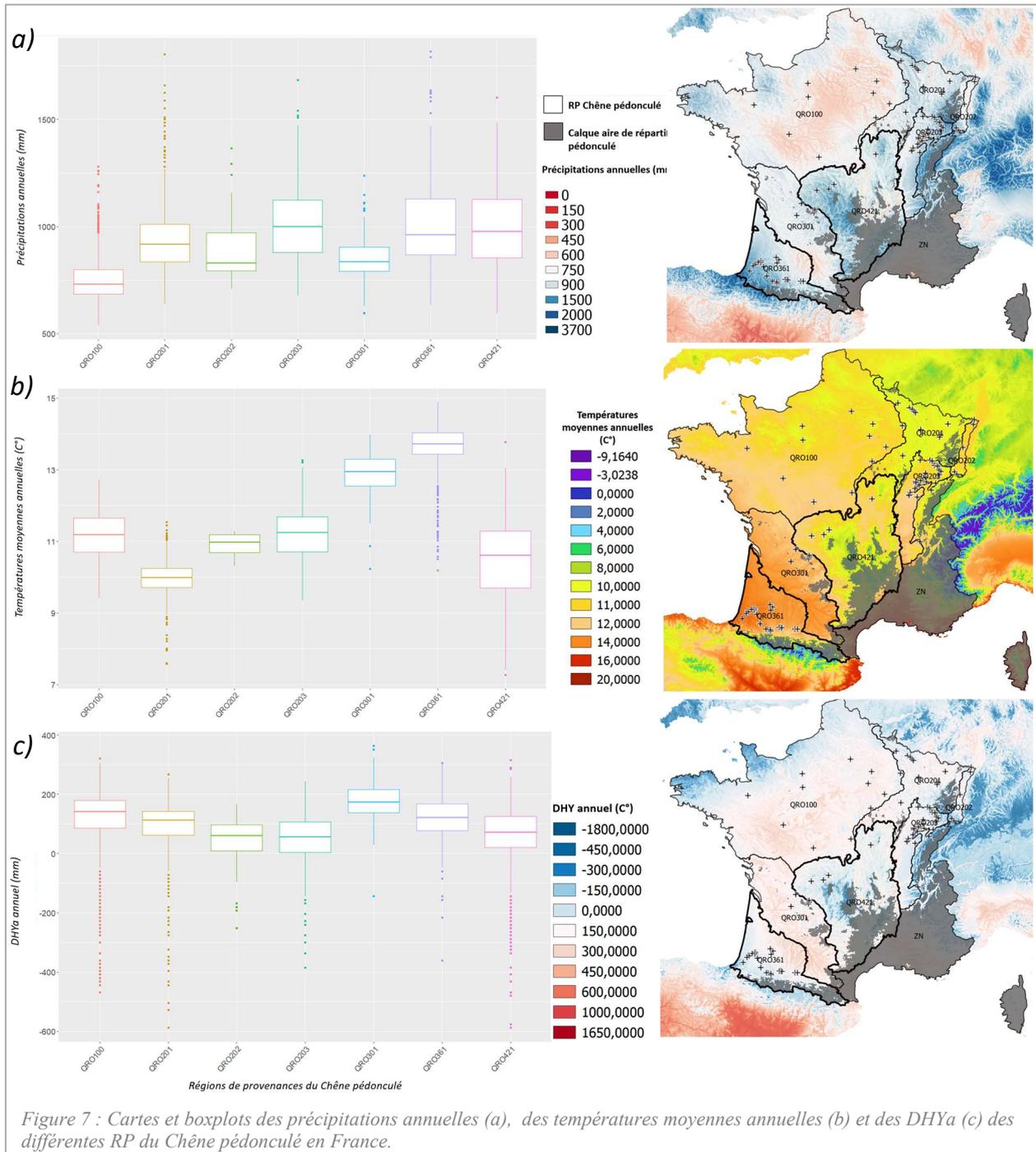


Résultats

1. Visualisation de la distribution du climat au sein des Régions de Provenance

La distribution des précipitations semble très comparable entre les régions de provenances QRO202 et QRO301, QRO361 et QRO421. En effet, les médianes de ces RP sont très proches entre elles (QRO202 : 830 mm et QRO301 : 836 mm, QRO361 : 962 mm et QRO421 : 976 mm et *Fig. 7*). Elles diffèrent toutefois par leur Températures moyennes annuelles mais aussi par leur DHYa puisque les RP QRO301 et 361 (respectivement médianes : 12,9°C et 13,1°C ; 173 mm et 121 mm) sont les RP les plus chaudes et sèches. A l'inverse, QRO202 et 421 ont des températures moyennes annuelles plus basses (respectivement : 11°C et 10,6°C). Ainsi, malgré leurs précipitations annuelles identiques, celles-ci ne sont pas réparties de la même manière durant l'année et les Régions de Provenances ne subissent pas des périodes de sécheresses identiques. En effet, les RP du sud des côtes atlantiques (QRO301 et QRO361) ont des périodes estivales sèches et des hivers très pluvieux (METEO-France, 2016). On constate une tendance inverse pour les RP QRO202 et 421, avec un mois de mai très

pluvieux et un mois de février très sec (METEO-France, 2016). Ces RP sont humides avec des températures moyennes peu élevées (Fig. 7).



La RP QRO100 reçoit par an le moins de précipitations et semble avoir des températures moyennes annuelles équivalentes à la RP QRO202, mais avec 100 mm en moins par an et des sécheresses particulièrement estivales (METEO-France, 2016). Le climat de cette RP est hétérogène puisqu'il est plutôt sec, avec des pluies faibles et des températures moyennes assez

élevées en son centre, et à l'inverse, plus humide sur les littoraux. La Sologne ressort par ses faibles précipitations et son fort DHYa (*Fig. 7*).

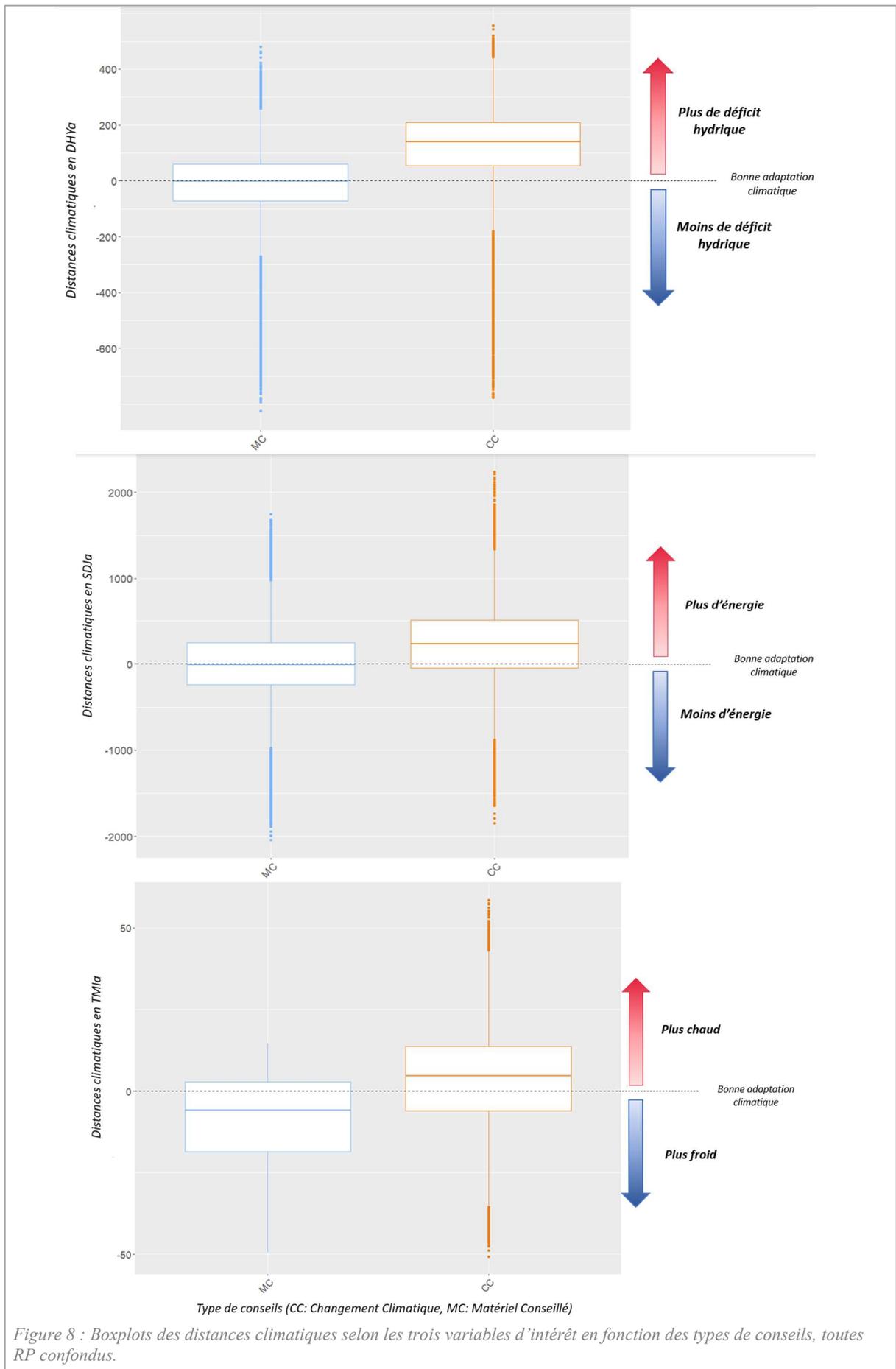
2. Distances climatiques

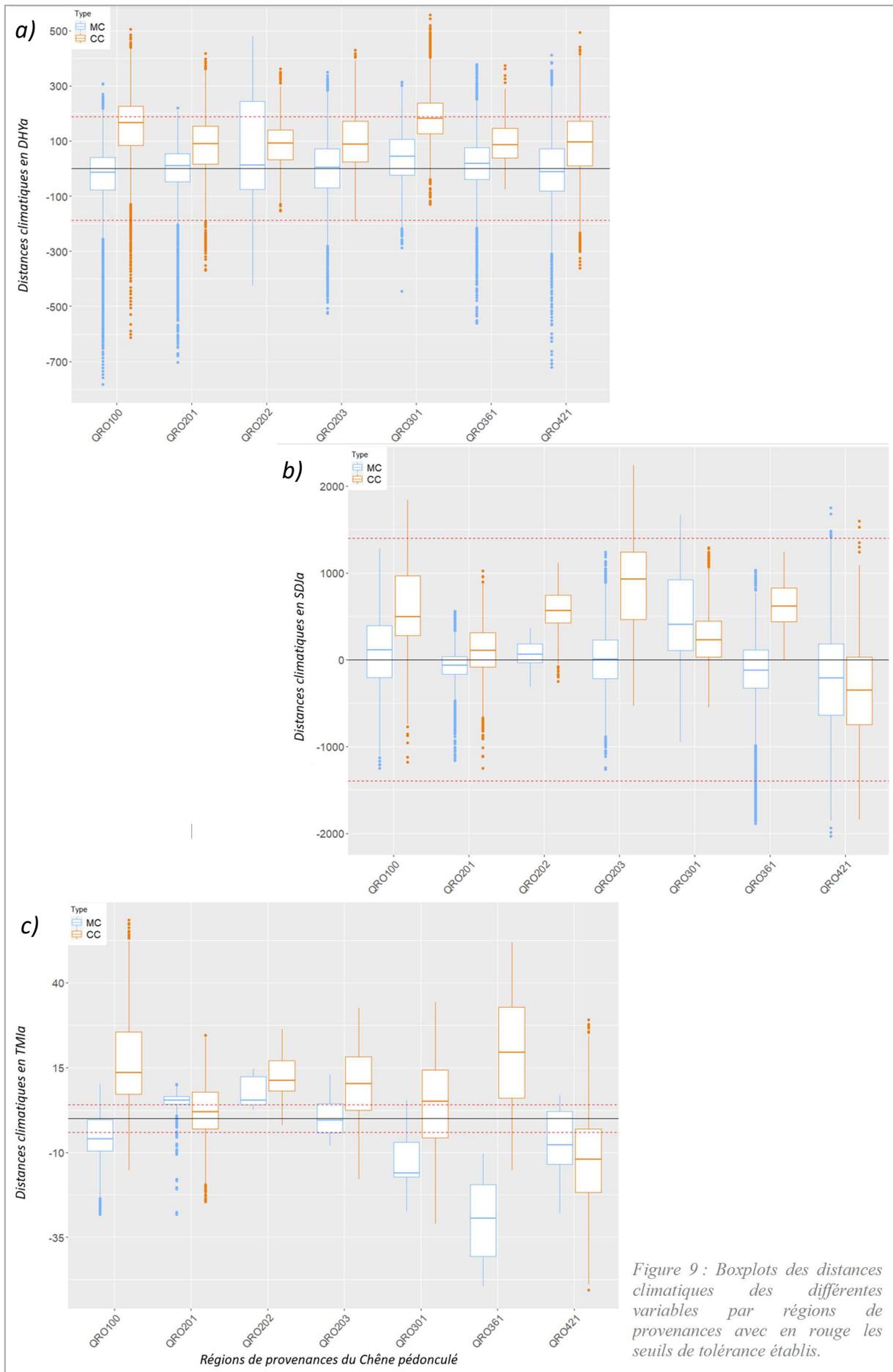
Pour les trois variables IKS, les médianes des distances climatiques de type MC sont globalement centrées sur zéro (*Fig. 8*), hormis pour la variable TMla dont la médiane des distances est égale à $-5,96^{\circ}\text{C}$, valeur qui ne rentre pas dans la gamme de compatibilité climatique établie ($\pm 4^{\circ}\text{C}$). En revanche, les distances climatiques pour les conseils dans le cadre du changement climatique (CC) sont toutes décentrées vers des valeurs positives (*Fig. 8*). Cela signifie que les conseils d'utilisation correspondant ont tendance à préconiser des MFR dans des sites avec des valeurs de DHYa, SDJa et TMla plus élevées dans le futur que celles dans lesquelles ces MFR sont présentes actuellement. En ce qui concerne le déficit hydrique (DHYa), cette distance positive indique que les conseils d'utilisation conduisent à une augmentation du déficit hydrique et donc du stress subi par les MFR ainsi déplacés. Pour SDJa et TMla, ces distances positives peuvent sembler moins préoccupantes puisqu'elles signifient qu'on déplace les MFR dans des climats fournissant plus d'énergie (SDJa) et plus doux l'hiver (TMla) donc, à priori, moins stressants. Les médianes des distances de type CC valent respectivement pour les variables DHYa, SDJa et TMla $+149\text{ mm}$, $+232\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $4,72^{\circ}\text{C}$. La gamme établie dans cette étude, suppose que ces distances climatiques positives pour DHYa ($\pm 188\text{ mm}$) et SDJa ($1400\text{ }^{\circ}\text{C}$) sont considérées tolérables.

Tableau I : Tableau récapitulatif des quantiles qui encadrent 50 % de la distribution autour de la médiane.

Type	Variables	DHYa (mm)		SDJa (°C)		TMla (°C)	
	Quantiles	Q1	Q3	Q1	Q3	Q1	Q3
MC		-61	61	-243	245	-19	3
CC		75	213	-43	506	-6	14

Les distributions de distances sont étendues et l'on observe des queues de distributions lourdes, significatives d'un nombre non négligeable de valeurs extrêmes. Pour les conseils de type CC, le fait que les médianes ne soient pas nulles implique que 50% de la distribution centrale a tendance à plus sortir de la gamme fixée par les seuils initialement établis (*Tab. I*).





Lorsque l'on regarde à l'échelle des RP, on remarque que les médianes des distances climatiques de DHYa de type MC (Fig. 9, a) sont généralement centrées sur zéro et dans la gamme de tolérance. Pour cette même variable, dans le cas des préconisations de type CC, les médianes sont cette fois largement supérieures à zéro pour toutes les RP. Ces résultats sont conformes au comportement global observé précédemment (Fig. 8). En observant les médianes, la gamme de tolérance ne permet toutefois pas de considérer que les déplacements soient intolérables. Toutefois, les RP QRO100 et QRO301 s'en approchent avec des médianes respectivement égales à 166 mm et 182 mm, là où les autres restent autour de 90 mm. Les distributions des distances calculées sur SDJa et TMJa sont plus variables selon les régions de provenances, quel que soit le type de distances (MC ou CC) (Fig. 8, 9 b et c). En effet, les médianes des distances climatiques de SDJa de type MC sont beaucoup moins proches de zéro et s'approchent de valeurs plus négatives pour les RP QRO201, 361 et 421. Cela signifie que les MFR sont conseillées dans des sites fournissant moins d'énergie. A l'inverse, les distributions sont décalées vers des valeurs très positives pour QRO100 et surtout pour QRO301 (médianes respectivement égales à 114°C et 409°C) (Fig. 9, b) ce qui correspond à des déplacements de MFR vers des climats avec des sommes de températures plus importantes. Pour les conseils de type CC, les médianes sont très positives notamment dans les RP QRO203 avec une distance égale à 928 °C. La médiane a environ doublé, l'essence recevra donc une quantité d'énergie plus importante.

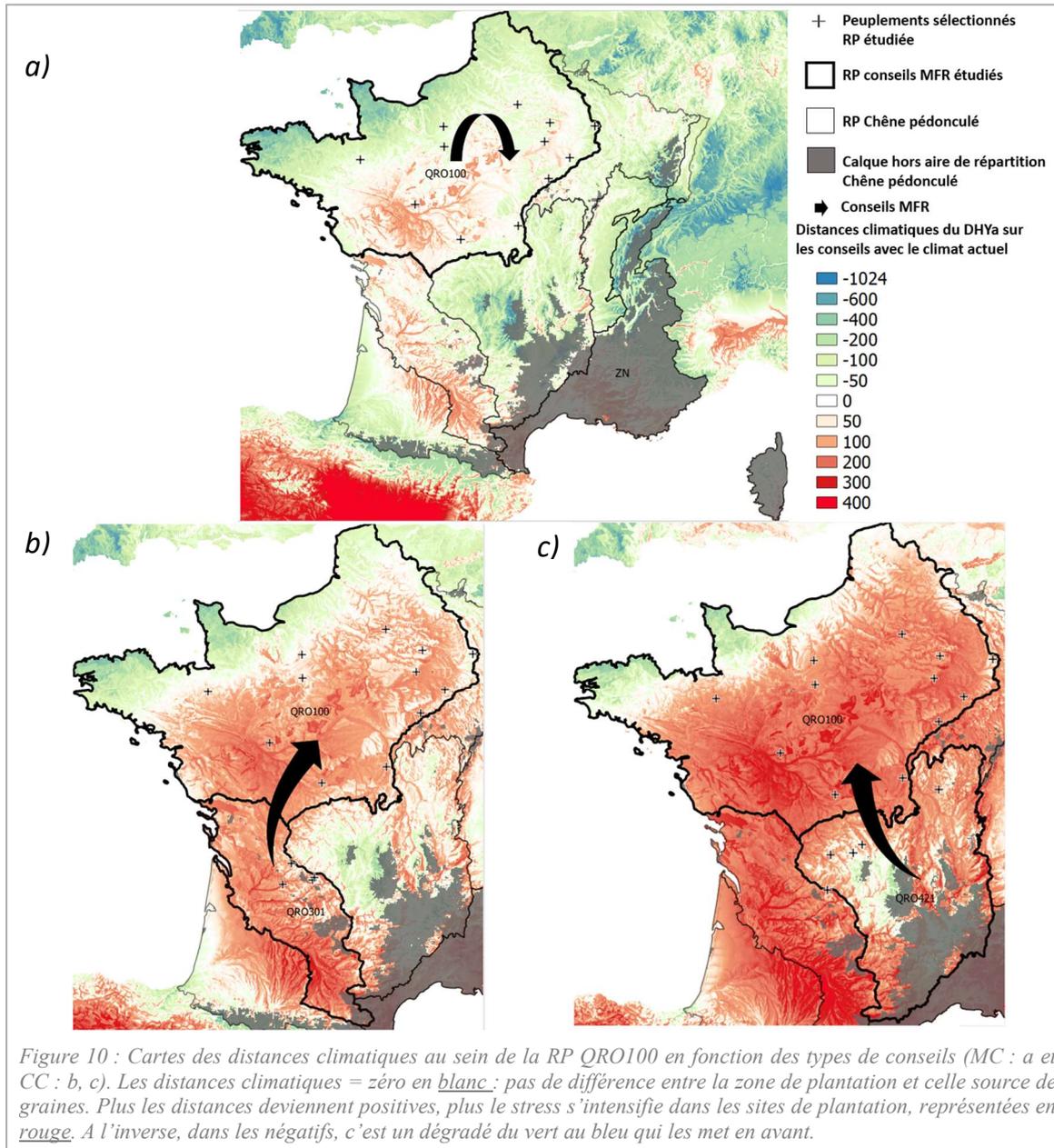
Enfin, les distances climatiques des TMJa de type MC sortent toutes de la gamme de compatibilité déterminée (Fig. 9, c). Les médianes de toutes les RP hormis pour QRO201, 202 et 203, sont négatives et notamment pour les RP QRO361 et QRO301. Pour les conseils CC, les distances sont extrêmement positives sortant de notre gamme de tolérance, hormis pour la RP QRO201 avec une médiane égale à 1,90 C° et où elles restent négatives dans la QRO421. A cette échelle intra-régions de provenances, nous retrouvons aussi les larges distributions de valeurs. Une part des cas pour lesquels les préconisations dépassent la zone de compatibilité, amène à des déplacements vers des climats plus secs. C'est le cas pour les conseils d'utilisations de type MC pour la RP QRO202, qui présente une large distribution de distances dont moins de la moitié peut atteindre plus de 200 mm en plus, sortant ainsi de la gamme de compatibilité. Ces larges distributions mettent donc en avant que malgré tout, une partie de graines vont être placées dans des conditions considérées comme non compatibles. La variable DHYa présente donc beaucoup de RP avec des valeurs hors des seuils de tolérance.

3. Cartes des distances climatiques de DHYa en fonction des Régions de provenance

Pour l'étude spatiale des distances climatiques, une seule des trois variables a été retenue, soit le Déficit HYdrique annuel (DHYa). Cette dernière s'est avérée être la plus pertinente dans l'étude du changement climatique et de ces effets (Doucerain, 2020). Nous avons pris l'exemple de la RP QRO100 et des conseils MFR la concernant. Les conseils de type « MC » consistent à préconiser le matériel local, c'est-à-dire la RP QRO100. La plupart de la RP QRO100 est en blanc ou avec des couleurs très claires, ce qui signifie que les distances climatiques associées au type MC sont proches de 0 (*Fig. 10, a*). Cependant, cette représentation cartographique montre bien l'hétérogénéité géographique des distances climatiques. En effet, d'une part, une large frange allant de la Bretagne jusqu'au nord de la France présente des distances négatives de l'ordre de -200 à -400 mm, ce qui correspond à des déplacements de MFR vers des sites avec des déficits hydriques beaucoup plus faibles. D'autre part, tout le bassin Ligérien présente des distances positives de l'ordre de 200 voire 300 mm, ce qui correspond à des déplacements vers des déficits hydriques notablement plus élevés et donc des situations de stress potentiel pour ces plantations. Dans le cadre du changement climatique, on conseille dans cette RP les provenances QRO301 (*Fig. 10, b*) et QRO421 (*Fig. 10, c*). Cette fois, les distances climatiques confirment les résultats précédemment obtenus (*Fig. 9, a*) et mettent en évidence des distances climatiques positives, témoin d'une augmentation du stress hydrique. Ainsi, que ce soit lorsque l'on préconise QRO301, ou 421 dans la RP QRO100, les distances climatiques sont positives sauf sur les littoraux. Néanmoins, les distances climatiques des conseils de QRO421 sont nettement plus importantes, autant sur l'étendue que sur l'augmentation du stress hydrique, comparés à QRO301.

La même étude a été effectuée sur les autres RP. Un constat similaire à l'étude de QRO100 a pu être fait : des distances climatiques de type MC globalement égales à zéro pour des distances climatiques de type CC nettement positives (*Annexe 1*). Ces observations sont valables pour les RP QRO201, 203 et 301 (*Annexe 1*). La QRO361 est plus intermédiaire puisqu'il existe une zone de distances très positives aux frontières de la RP QRO301 qui s'estompent lorsque l'on se rapproche des côtes atlantiques. Pour la RP QRO202, les distances climatiques pour les deux types de conseils sont positives (*Annexe 1*). En effet, c'est ce que nous avons pu déjà observer dans la *Figure 9, a* où la distribution très large des valeurs mettait en évidence des peuplements locaux déjà à des distances positives. La RP QR421, présentent

des distances climatiques très hétérogènes quels que soient les types de conseils. Aux frontières des autres RP, elles sont très positives. Cependant, au centre de la RP QRO421 du Massif central, une zone aux distances climatiques neutres ou négatives persiste. N'étant pas grisée par le calque d'exclusion d'absence, cette zone est une zone dans laquelle les matériels conseillés quel que soit le type de conseils, seraient adaptés.



Discussion

Pour toutes les variables climatiques étudiées, une majeure partie des préconisations de type locale (MC) conduisent à des distances climatiques considérées comme nulles, hormis

pour la variable TMIa. Ces compatibilités climatiques traduisent des conseils en moyenne adaptés à leurs conditions pédoclimatiques. Notre première hypothèse est donc validée pour les variables DHYa et SDJa malgré les gammes de variations étendues au sein d'une même Régions de Provenances (RP) et entre les RP. Ces larges distributions des distances climatiques mettent en évidence l'hétérogénéité climatique qu'il existe entre les sources de graines (Régions de Provenances) et les zones de destinations. La différence en nombre mais aussi la répartition des peuplements sélectionnés au sein même de ces RP peuvent expliquer ces larges distributions. En effet, pour la variable TMIa, on remarque que pour toutes les RP, le matériel local conseillé de type « Matériels Conseillés » (MC), n'est pas compatible climatiquement parlant. C'est-à-dire que l'on plante du matériel local déjà dans des conditions soient trop chaudes (QRO201 et QRO202), soit trop froides pour toutes les autres RP.

Les préconisations effectuées dans le cadre du changement climatique (CC) se traduisent par des distances positives pour chacune des variables étudiées. Les impacts des déplacements positifs en SDJa et TMIa pourraient sembler minimales à première vue. Signifiant un déplacement de MFR dans des climats fournissant plus d'énergie (SDJa) et où l'on trouve des hivers plus doux l'hiver (TMIa) donc, à priori, moins stressants. Cela induit toutefois un déplacement vers des climats plus chauds, parfois plus froids, ces variables étant étroitement liées aux températures moyennes annuelles. Or, il se peut que ces changements de températures induisent un stress en plus du stress hydrique. La migration de matériels de zones chaudes avec des TMIa élevées et des hivers « doux » vers des stations aux climats plus froids représente tout de même un risque pour les essences. Cela peut se traduire par des pertes sur la première année de plantation, ou par exemple par des gélivures si les températures descendent trop bas pour la provenance installée. Bien que les seuils de tolérance établis ne permettent pas d'affirmer une différence de déplacement intolérable pour l'essence, les distances des variables SDJa et DHYa peuvent quand même traduire un problème dans la migration proposée.

Cette tendance très marquée témoigne de l'implantations de matériels forestiers dans des stations plus chaudes et donc plus sèches. Avec l'évolution du climat, les sites de plantations deviendront des zones plus sèches que les stations des peuplements sélectionnés, sources de graines. La migration proposée par les fiches MFR, censée se produire de zones sèches et chaudes vers des zones plus fraîches et humides s'avère compromise et ce sont finalement des

déplacements inverses qui sont conseillés. Il est par ailleurs à noter que les conditions du site de plantation peuvent accentuer les performances de croissances entre provenances sur ce même site (Matyas et al., 1994 ; Sáenz-Romero et al., 2017). Notre deuxième hypothèse n'est donc pas validée puisque les déplacements climatiques induits par les conseils d'utilisation de type « Changements Climatiques » (CC) ne sont pas suffisamment centrés sur zéro et donc ne répondent pas à ceux induits par le changement climatique. De même que pour les conseils MC, une large gamme de variations est observable et amènent à un dépassement de la gamme de tolérance des déplacements établie. Ces différences de conditions pédoclimatiques mettent en évidence une variabilité inter-RP aussi importante que celle intra-RP.

Les migrations proposées présentent donc des risques. Cette conclusion met en lumière plusieurs problèmes dans le cas du chêne pédonculé. Les RP de cette essence sont peut-être trop vastes pour prendre en compte les variations climatiques. En effet, la RP QRO100 s'étend de Lille, à Brest, descendant jusqu'à la Roche-Sur-Yon pour finir dans l'Est à Troyes, englobant ainsi la Sologne et une partie du bassin ligérien. Dans l'étude effectuée sur le chêne sessile, des redécoupages des RP ont été suggérés or, pour cette essence, les provenances sont réparties en 19 RP pour seulement 7 pour le chêne pédonculé. Le chêne sessile compte 170 peuplements sélectionnés contre seulement 97 pour le chêne pédonculé. Un redécoupage des RP en intégrant le critère DHYa pourrait permettre de mieux choisir les provenances dans le cadre du changement climatique. La RP QRO100 serait alors divisée par exemple, en fonction du secteur ligérien et le reste, un redécoupage des RP QRO202 et 201 moins étendue en latitude pourrait permettre de réduire les hétérogénéités intra RP.

La répartition des peuplements sélectionnés pose aussi des problèmes. En effet, elle n'est pas homogène sur le territoire et certains d'entre eux se trouvent à proximité d'autres peuplements d'une autre RP. C'est le cas de la QRO421, qui ne présente dans un premier temps que cinq peuplements sélectionnés en 2021 dont l'un d'entre eux se trouvent à la frontière de QRO301. Dans cette même RP, on trouve quatre peuplements parfois qu'à une soixantaine de kilomètres de ceux de la QRO421. Or on conseille dans cette dernière la provenance QRO301 afin de répondre au changement climatique. Leurs peuplements sélectionnés sont donc assez proches géographiquement. On peut donc finalement se demander si ces peuplements sont différents et si leur diversité climatique dépasse celle intra RP de certaines Régions de

provenance. En effet, des hétérogénéités intra RP sont notables, c'est ainsi le cas dans la RP QRO100 où l'on observe un peuplement en Sologne, région sèche, et d'autres à des centaines de kilomètres plus au Nord ou sur les côtes de la Manche, régions plus humides (*Fig. 10*). La Sologne est par ailleurs connue pour ses sols hydromorphes, ce facteur pourrait influencer la sensibilité à la sécheresse du chêne pédonculé par son impact sur la croissance des racines (Tomas et al, 2002). Dans ces conditions, établir des conseils d'utilisation à l'échelle d'une RP semble illusoire et risque de conduire à des installations de provenances mal adaptées au site de plantation. Dans le cadre du changement climatique, on conseille dans cette RP QRO100, de reboiser avec du matériel de QRO421. Or, cette RP du Massif central présente des conditions climatiques bien plus fraîches que la QRO100. Malgré sa situation plus sudiste, elle n'héberge pas des sources de graines adaptées à des conditions plus sèches puisque le climat n'est pas défini selon la latitude (*Fig. 10*). Nous avons par ailleurs pu constater que la QRO202 présentait des distances climatiques à large distribution (*Fig. 9*). Cette RP située en Alsace est très étendue en latitude. Son faible nombre de peuplements sélectionnés (5) ainsi que sa forme et sa différence de climat peut expliquer cela puisque deux de ces peuplements sont situés très au Sud et deux autres très au Nord de la RP. Cette hétérogénéité intra RP peut amener à se demander si les peuplements sélectionnés sont bien représentatifs du climat de leur RP locale. L'étude sur les chênes pédonculés par Buras et al en 2020, mettait en évidence, sur des sites aux climats similaires, une variation considérable de la productivité due à des conditions du sol et à une disponibilité en eau différente. Ceci peut nous amener à penser que, en plus de l'hétérogénéité climatique que nous avons mise en évidence, il peut exister une hétérogénéité pédologique intra RP pouvant amplifier la question des conseils d'utilisation effectués à cette échelle.

Les cartes de distances climatiques calculées à partir des projections en climat futur, mettent en évidence la disparition de compatibilité de certaines provenances sur toute la France. En revanche, la QRO100, une des RP la plus sèche, semblerait être celle la plus appropriée dans un objectif d'adaptation au changement climatique. C'est ainsi que la migration de matériels supposée du Sud vers le Nord semble erronée dans le cas du chêne pédonculé. En effet, la provenance aux distances climatiques majoritairement égales à zéro se trouve être QRO100, présente dans le Nord de la France (*Annexe 2*).

Limites et perspectives

Notre étude présente en effet des limites et quelques axes d'amélioration peuvent être évoqués à l'issue de ce travail. La première limite concerne le postulat que les provenances locales sont censées être les plus adaptées à leur RP. D'autres matériels ont été conseillés de type « Autres Matériels Conseillés » dans les MFR et pour lesquels aucune information n'avait été transmise concernant la démarche que l'expert avait mise en place pour ces préconisations : Pénuries ? Ressemblant aux conseils CC ou MC ?

La détermination de la gamme de tolérance climatique représente une deuxième limite. Cette dernière semble, au vu de nos résultats, très large et peut amener à une recalibration de celle-ci par des études plus approfondies concernant la tolérance de tels déplacements pour le chêne pédonculé. Il est possible d'utiliser d'autres données ou de mener des études sur les déplacements climatiques impactant cette même essence. Le nombre de points IFN utilisé sur seulement l'année 2017 peut être une limite, or ce choix a été fait dans le but de s'inscrire dans la lignée du travail effectué sur le chêne sessile par Mathilde Doucerain et ainsi, en comparer les résultats avec la même méthode. Utiliser les points forêts relevés sur plusieurs années et sur des dates plus récentes peut être possible et ainsi en comparer les résultats avec ceux présentés.

Conclusion

Cette étude avait pour objectif d'évaluer la capacité d'anticipation des conseils d'utilisation des MFR dans le cadre du changement climatique par leur traduction en distances climatiques pour le chêne pédonculé mais aussi d'apporter une vision critique sur la méthode utilisée. Peu de travaux existent actuellement sur les correspondances climatiques entre l'origine des sources de graines et les sites de plantation notamment concernant le chêne pédonculé. Les conseils d'experts des fiches MFR mettent en avant une démarche de plantation de matériel local autant que cela se peut. Toutefois, nous avons pu observer que ces préconisations pouvaient être justes en moyenne mais trahissant une variation climatique intra RP parfois supérieure à celle entre RP. Les résultats des conseils d'utilisation visant à anticiper le changement climatique ont mis en évidence des distances de déplacement non nuls et très

positifs pour les trois variables IKS. Cela amène à des prises de risque évidentes malgré la gamme de déplacements supposés acceptables que nous avons fixée qui n'était en moyenne que très peu dépassée. Les amplitudes de valeurs mettaient tout de même en évidence qu'une partie importante des graines se trouvaient hors de cette gamme et donc dans des stress hydriques et climatiques importants. Quelle que soit la pertinence de notre gamme de déplacements climatiquement acceptables, les distances de type CC ne sont en majorité pas égales à zéro et traduisent un objectif non atteint amenant à remettre en question ces conseils. Chercher et classer de nouveaux peuplements dans des zones climatiquement intéressantes peut être une possibilité afin de les améliorer. Le climat français n'est pas déterminé par la latitude, notamment du fait des massifs montagneux. En effet, la QRO421 est une RP au climat plus frais et humide que la RP QRO100 alors que la première est située plus au sud que la deuxième. Une « vague » de sécheresse se distingue sur nos cartes partant du sud de QRO301 et remontant au niveau de QRO100 en Sologne. Cela remet donc en question le postulat de départ qui consiste à déplacer du matériel de régions sudistes vers le Nord. Enfin, cette étude a permis d'apporter une autre dimension à la méthode des distances climatiques effectuée précédemment sur le chêne sessile. Nous pouvons donc en conclure qu'elle apporte des réponses ainsi que des conseils sur la logique à avoir mais peut être améliorée par différents moyens.

Remerciements

Je tiens à remercier tout particulièrement Yves Rousselle de m'avoir encadrée et permis de travailler sur ce projet, pour tout le temps qu'il m'a consacré ainsi que les conseils et encouragements qu'il a pu me faire. Je souhaite également remercier Emmanuel Cacot pour m'avoir permis d'effectuer un stage dans la coopérative UNISYLVA où j'ai pu confirmer mes envies professionnelles et y peaufiner mon parcours.

Je suis également très reconnaissante envers Isabelle Bilger, Brigitte Musch et Eric Paillassa pour m'avoir aiguillée vers un sujet type recherche et donné l'opportunité de travailler avec Yves Rousselle sur ce projet.

Un grand merci à Grégoire Thauvin qui m'a permis d'en apprendre davantage sur le métier d'ingénieur forestier et qui m'a apporté une aide précieuse sur certaines dimensions de

mon travail. Enfin, je souhaiterais remercier tout l'ensemble de mes collègues situés à Limoges avec qui j'ai pu nouer des liens et apprécier passer ces six mois. Merci aux techniciens qui m'ont partagé leurs savoirs en m'emmenant sur le terrain ainsi qu'à mes collègues des ressources humaines pour m'avoir si bien accueillie !

Références

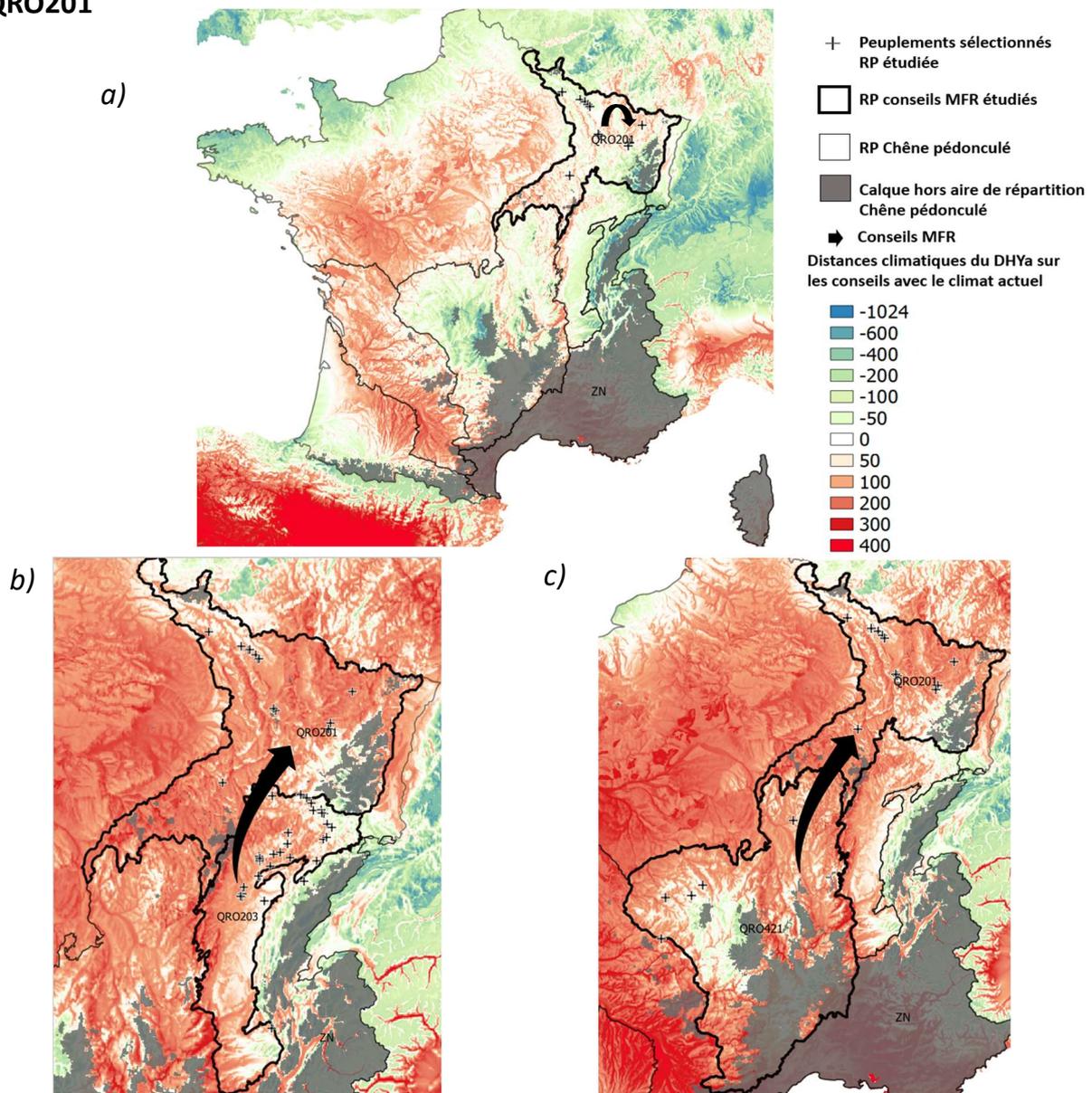
- Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D. D., Hogg, E. T., Gonzalez, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J. H., Allard, G., Running, S. W., Semerci, A., & Cobb, N. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259(4), 660-684.
- Becker, M. (1984). A propos du dépérissement du chêne : réflexion sur la place actuelle de cette espèce dans la forêt française. *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, 55(2), 173-180.
- Bouget, C., Gosselin, M., & Laroche, F. (2020). Changement climatique : la biodiversité forestière à la croisée des enjeux de conservation et d'atténuation. *Sciences Eaux & Territoires, Numéro 33(3)*, 84-89.
- Breshears, D. D., Cobb, N. S., Rich, P. M., Price, K. P., Allen, C. D., Balice, R. G., Romme, W. H., Kastens, J. H., Floyd, M. L., Belnap, J., Anderson, J. J., Myers, O. B., & Meyer, C. W. (2005). Regional vegetation die-off in response to global-change-type drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(42), 15144-15148.
- Buras, A., & Menzel, A. (2019). Projecting Tree Species Composition Changes of European Forests for 2061–2090 Under RCP 4.5 and RCP 8.5 Scenarios. *Frontiers in Plant Science*, 9.
- Buras, A., Sass-Klaassen, U., Verbeek, I., & Copini, P. (2020). Provenance selection and site conditions determine growth performance of pedunculate oak. *Dendrochronologia*, 61, 125705.
- Camus, A. (1945). Produits des Chênes. *Revue de botanique appliquée et d'agriculture coloniale*, 25(275), 24-37.
- Doucerain. (2019). Caractérisation climatique des conseils d'utilisation de provenances de chêne sessile en France dans un contexte de climat changeant (*Rapport étudiant*).
- Doucerain. (2020). Chêne sessile : quelles provenances pour l'avenir ? (*Rapport étudiant*).
- Fédération Nationale du Bois (FNB). (2020). *Dossier - crise du chêne*. <https://www.fnbois.com/la-voix-de-la-fnb/dossier-dactualite/>
- Girard S., Héois B., Bilger I., & Rousselet Ch. (2002). Un découpage en région de provenance : pourquoi ? *Forêt-entreprise*, 147.
- IGN. (2020). Le mémento inventaire forestier.
- IPCC, 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

- Karger, D.N., Conrad, O., Böhrer, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R.W., Zimmermann, N.E., Linder, P., Kessler, M. (2017). Climatologies at high resolution for the Earth land surface areas. *Scientific Data*, 4 170122.
- Le Bouler, H.. 2014. Forêt et changements climatiques : Associer les concepts de niche écologique et de station forestière pour comprendre et préparer l'avenir, *Innovations Agronomiques*, p.129-139.
- Legay, M., Musch, B., Pousse, N., Jolly, A., Ladier, J., Boulanger, V., Deleuze, C., Mengin-Lecreuxl, P., Piboule, A., Rousselle, Y., & Richter, C. (2020). Comment l'Office national des forêts anticipe les effets du changement climatique ? *Sciences Eaux & Territoires*, Numéro 33(3), 28-35.
- Lemaire, J. (2011). Bois énergie : comment s'impliquer ? *Forêt-entreprise*, 201.
- Matyas, C. (1994). Modeling climate change effects with provenance test data. *Tree Physiology*, 14(7–8-9), 797-804.
- Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (MAA). (2021, 18 mars). Graines et plants forestiers : conseils d'utilisation des ressources génétiques forestières. <https://agriculture.gouv.fr/graines-et-plants-forestiers-conseils-dutilisation-des-provenances-et-varietes-forestieres>
- METEO FRANCE. (2016, 21 janvier). *Pluviométrie selon le mois - Pluies extrêmes en France métropolitaine*. <http://pluiesextremes.meteo.fr/france-metropole/Pluviometrie-selon-le-mois.html>
- ONU. (2020). *La Situation Des Forêts Du Monde 2020*. FAO. http://www.fao.org/3/ca8642fr/online/ca8642fr.html#chapter-2_1
- Piedallu, C., Gégout, J. C., Lebourgeois, F., & Seynave, I. (2016). Soil aeration, water deficit, nitrogen availability, acidity and temperature all contribute to shaping tree species distribution in temperate forests. *Journal of Vegetation Science*, 27(2), 387-399.
- R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- RMT AFORCE. (2020). ClimEssences. <https://climessences.fr/documentation>
- Ruosteenoja, K., Markkanen, T., Venäläinen, A., Räisänen, P., & Peltola, H. (2017). Seasonal soil moisture and drought occurrence in Europe in CMIP5 projections for the 21st century. *Climate Dynamics*, 50(3-4), 1177-1192.
- Sáenz-Romero, C., Lamy, J. B., Ducousso, A., Musch, B., Ehrenmann, F., Delzon, S., Cavers, S., Chałupka, W., Dağdaş, S., Hansen, J. K., Lee, S. J., Liesebach, M., Rau, H. M., Psomas, A., Schneck, V., Steiner, W., Zimmermann, N. E., & Kremer, A. (2017). Adaptive and plastic responses of *Quercus petraea* populations to climate across Europe. *Global Change Biology*, 23(7), 2831-2847.
- Schwalm, C. R., Anderegg, W. R. L., Michalak, A. M., Fisher, J. B., Biondi, F., Koch, G., Litvak, M., Ogle, K., Shaw, J. D., Wolf, A., Huntzinger, D. N., Schaefer, K., Cook, R., Wei, Y., Fang, Y., Hayes, D., Huang, M., Jain, A., & Tian, H. (2017). Global patterns of drought recovery. *Nature*, 548(7666), 202-205.
- Thomas, F. M., Blank, R., & Hartmann, G. (2002). Abiotic and biotic factors and their interactions as causes of oak decline in Central Europe. *Forest Pathology*, 32(4-5), 277-307.
- Valade, A., & Marie, G. (2020). Gérer les forêts pour atteindre les objectifs climatiques : des compromis à trouver. *Sciences Eaux & Territoires*, Numéro 33(3), 78-81.

Annexes

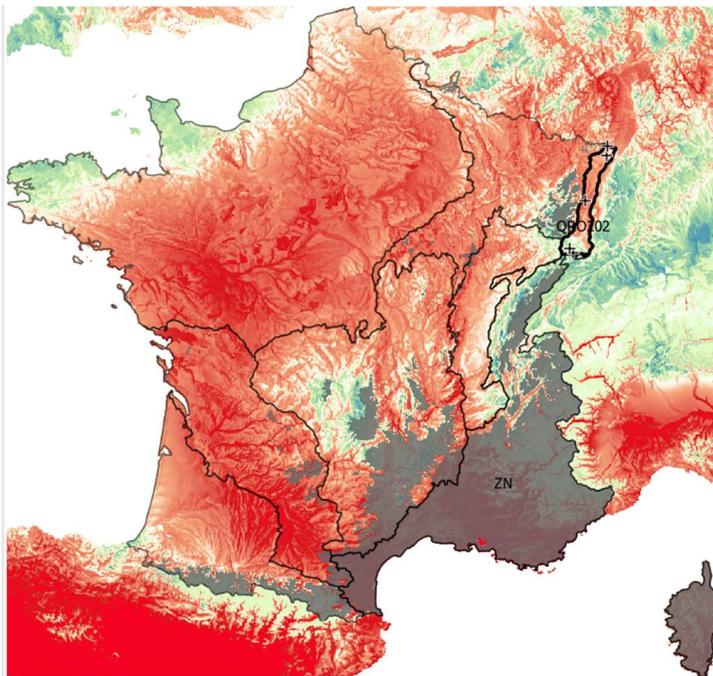
Annexe 1 : Cartes des distances climatiques au sein des différentes RP du chêne pédonculé en fonction des types de conseils (MC : a et CC : b, c). Les distances climatiques = zéro en blanc : pas de différence entre la zone de plantation et celle source de graine. Plus les distances deviennent positives, plus le stress s'intensifie dans les sites de plantation, représentées en rouge. A l'inverse, dans les négatifs, c'est un dégradé du vert au bleu qui les met en avant.

QRO201

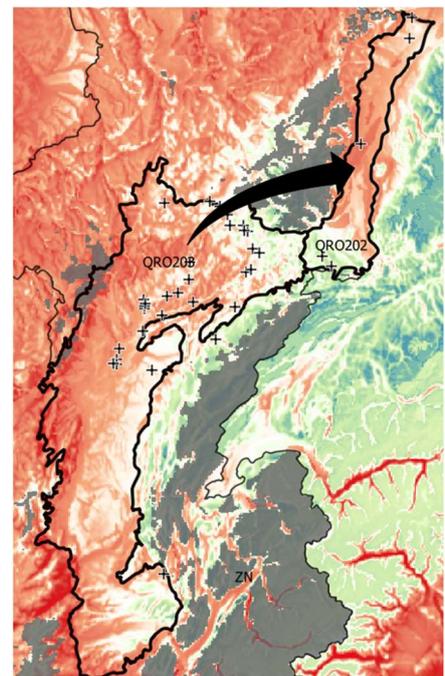


QRO202

a)

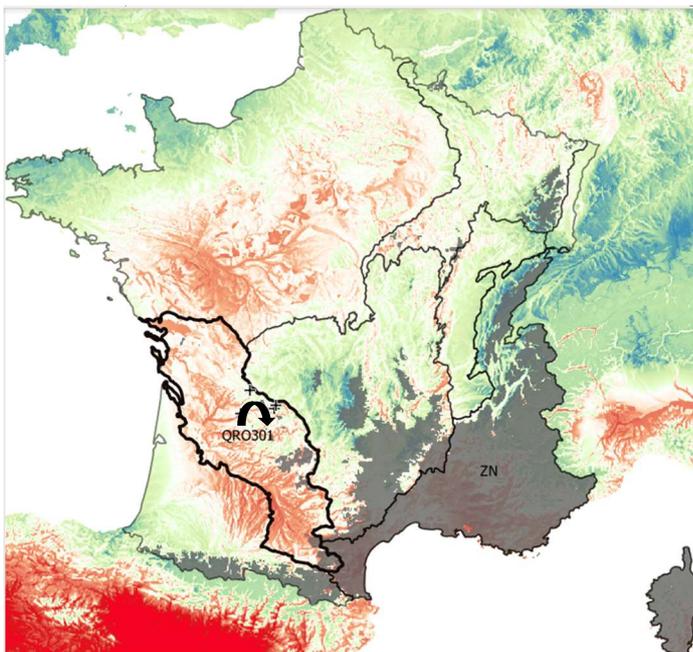


b)

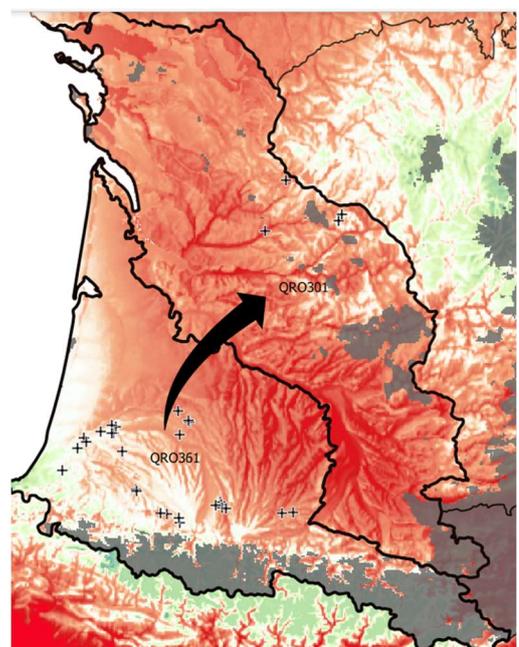


QRO301

a)

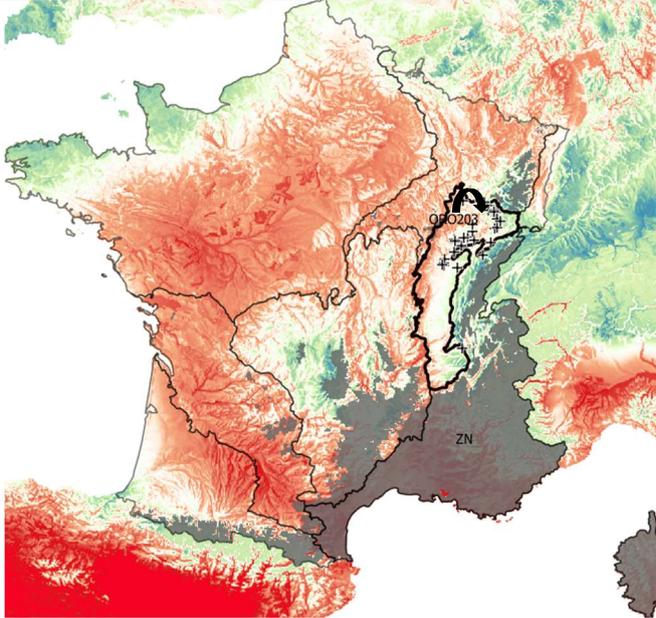


b)

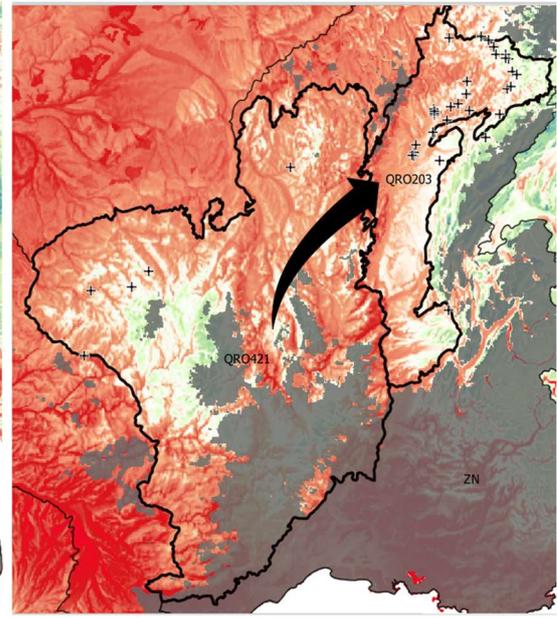


QRO203

a)

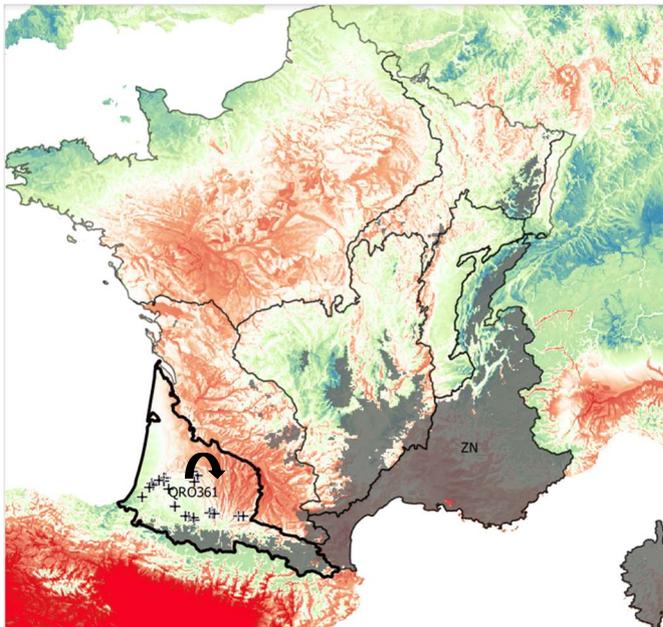


b)

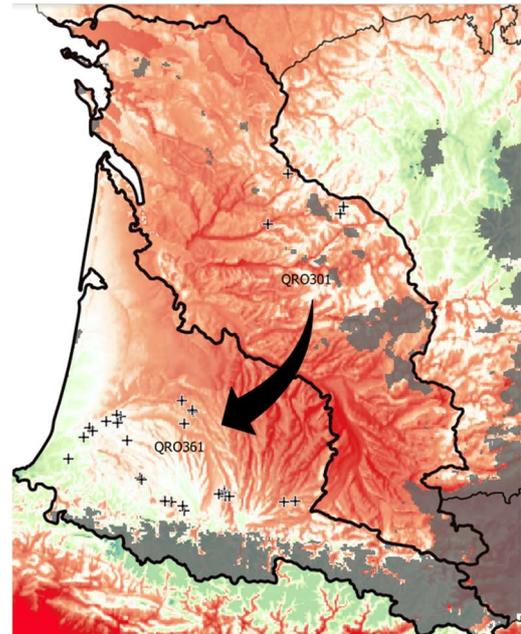


QRO361

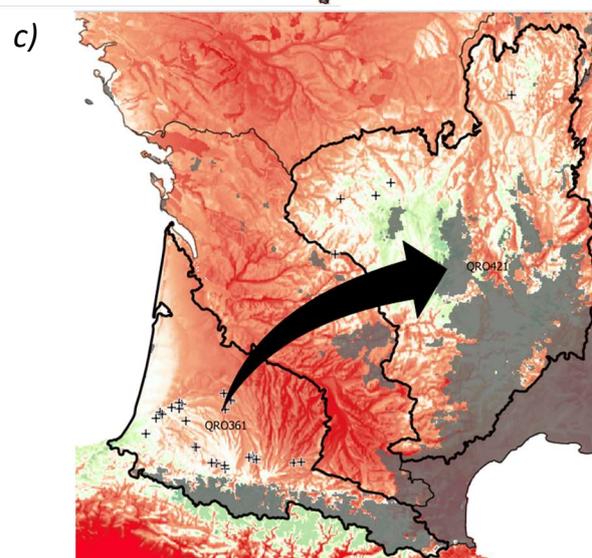
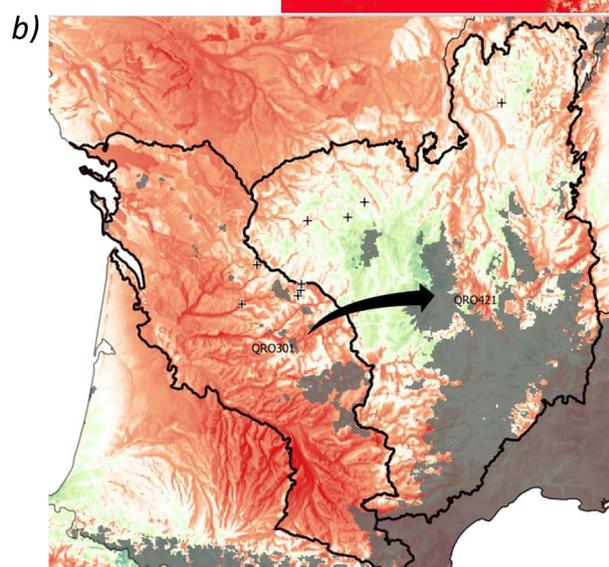
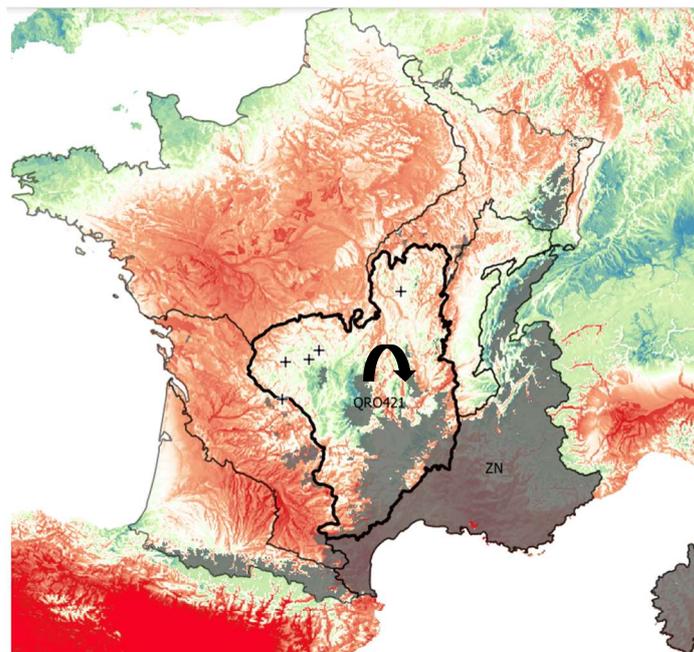
a)



b)



QRO421 a)



Annexe 2 : Cartes des distances climatiques de QRO100 à l'horizon 2070 du chêne pédonculé.

