



HAL
open science

Caractérisation climatique des conseils d'utilisation de provenances de chêne sessile en France dans un contexte de climat changeant

Mathilde Doucerain

► To cite this version:

Mathilde Doucerain. Caractérisation climatique des conseils d'utilisation de provenances de chêne sessile en France dans un contexte de climat changeant. Sylviculture, foresterie. 2019. hal-03998520

HAL Id: hal-03998520

<https://hal.inrae.fr/hal-03998520>

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.

RAPPORT D'APPRENTISSAGE D'ELEVE-INGENIEURE
M1 Double-cursus – Industries du Bois & Gestion Forestière
ENSTIB/AgroParisTech & UMR ONF-INRA BioForA

Année universitaire 2018-2019

Caractérisation climatique des conseils d'utilisation de provenances de chêne sessile en France dans un contexte de climat changeant

Ingénieure-apprentie : Mathilde Doucerain

Professeur référent à AgroParisTech : Yves Ehrhart

Tuteurs-encadrants à BioForA : Brigitte Musch & Yves Rousselle

Préambule	2
A – Contexte du projet d'apprentissage.....	2
A1 – Aperçu bibliographique du sujet.....	2
A2 – Rapport du sujet aux enjeux actuels.....	3
A3 – Un projet à l'interface de la gestion et de la recherche.....	7
B – Article scientifique présentant les principaux résultats	8
Abstract	9
Résumé	9
Introduction	10
Matériels & Méthodes	11
Les peuplements sélectionnés	11
Les points-forêt	15
Les conseils d'utilisation des MFR	15
L'outil de modélisation pédo-climatique IKS	16
Obtention des distances géographiques et climatiques	18
Résultats	18
Distances latitudinales	18
Distances altitudinales	20
Distances climatiques	22
Discussion	26
Synthèse	26
Préconisations de type « local » et « changement climatique »	26
Vers une redéfinition des découpages	27
Conseils en cas de pénurie de MFR locaux	27
Limites de l'étude	28
Perspectives et conclusion	28
Références	29
C – Zoom sur deux étapes intermédiaires et résultats complémentaires	31
C1 – Extraction des valeurs IKS.....	31
C2 – Discrimination climatique des RP.....	32
Conclusion	33
Remerciements	33

Préambule

Gérer durablement les forêts en anticipant les effets du changement climatique permet de maintenir un fonctionnement optimal de l'écosystème forestier et ainsi d'assurer la pérennité des services écosystémiques -notamment l'approvisionnement en bois. Une telle gestion passe, entre autres, par le choix des essences à planter. En France les chênes blancs représentent un quart de la ressource boisée (IGN, 2013-2017). Le chêne sessile (ou rouvre) est une espèce majeure pour la filière forêt-bois française ; c'est pourquoi une utilisation réfléchie des provenances dans le cadre de reboisements est particulièrement nécessaire : quelles provenances de chêne sessile planter dans quelles forêts aujourd'hui mais surtout demain ?

Le double-cursus ingénieur ENSTIB/AgroParisTech permet d'acquérir un bagage technique solide sur l'ensemble de la filière forêt-bois. La formation ENSTIB (années 1 et 2) a été réalisée dans sa totalité en école. La partie AgroParisTech (années 2 et 3) est menée par apprentissage, c'est-à-dire pour moitié en entreprise. Dans le cas présent il s'agit de l'Unité Mixte de Recherche (UMR) BioForA, née de la fusion du Conservatoire Génétique des Arbres Forestiers (CGAF) de l'Office National des Forêts (ONF) et de l'unité de recherche Amélioration, Génétique et Physiologie des Arbres Forestiers (AGFP) de l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA). BioForA –qui signifie « Biologie Intégrée pour la valorisation de la diversité de la Forêt et des Arbres »– associe ainsi des compétences en génétique, génomique et physiologie. Appliquées à l'étude des arbres forestiers, elles sont mises au profit de la valorisation des ressources génétiques forestières.

Le projet d'apprentissage faisant l'objet du présent rapport traite de la caractérisation climatique des conseils d'utilisation de provenances de Matériels Forestiers de Reproduction (MFR) de chêne sessile (*Quercus petraea*) qui associent les sources de graines à des zones de plantation. Les conseils d'utilisation de MFR reposent actuellement sur des dires d'experts ; le but du projet est de traduire ces préconisations en distances climatiques entre les sources de graines (provenances) et les sites de plantation. Cette « traduction » permettra d'apporter des éléments objectifs et concrets pour mieux comprendre les préconisations actuelles, évaluer leur cohérence et surtout apporter des éléments pour continuer à réfléchir à l'évolution des préconisations en climat changeant.

Le format adopté pour ce rapport est le suivant : un article scientifique présentant les résultats importants du projet constituera le corps du document. Précédé d'une introduction bibliographique, il sera suivi de compléments reprenant certaines étapes subsidiaires ainsi qu'une partie des résultats intermédiaires.

A – Contexte du projet d'apprentissage

A1 – Aperçu bibliographique du sujet

La démarche de recherche d'un lien rationnel entre paroles d'experts et modèles mathématiques concernant l'adéquation des semences forestières entre leurs provenances et sites de plantation est assez novatrice.

Toutefois, une revue bibliographique sur ce sujet a notamment permis de faire émerger deux approches méthodologiques communément adoptées dans les études s’y rattachant. Il s’agit des tests de provenances et de la migration assistée.

Le principe des tests de provenances est de soumettre des MFR dont les provenances sont clairement identifiées à des conditions environnementales variées pouvant aller de conditions proches de celles dans lesquelles elles vivent à des conditions différentes de celles de leurs origines et d’étudier les réponses phénotypiques induites par ces expérimentations. La finesse de l’étude peut aller jusqu’à la pratique de tests de descendance : pour une même provenance c’est l’effet « parents » qui est évalué. Ces deux types de test -provenance et descendance- permettent d’apprécier la variabilité génétique d’une espèce, au sein de son aire naturelle, mais aussi au-delà de celle-ci, dans une perspective d’anticipation du changement climatique (Vallée, 1975). Un exemple dans lequel cette méthode est employée pour le chêne sessile en France sera présenté en partie A3. Un dispositif visant à évaluer à l’échelle européenne la réponse du chêne sessile à différents environnements est par ailleurs décrit dans l’article de SAENZ-ROMERO & al. paru fin 2016 dans *Global Change Biology*. Outre l’appréciation du comportement des MFR de chêne sessile suite à leurs déplacements, c’est l’identification des paramètres environnementaux significativement influents qui est recherchée, comme dans d’autres études telle que celle de CARTER (1996) ou encore de A.O’NEILL (2010), sur diverses espèces forestières européennes. Un des facteurs climatiques communs aux travaux cités est la température minimale annuelle, variable également utilisée dans le présent projet d’apprentissage.

La migration assistée consiste à déplacer des Matériels Forestiers de Reproduction (MFR), qui sont dans le cas du chêne sessile des graines issues de peuplements sélectionnés, c’est-à-dire de provenances géographiquement référencées, et choisies sur des critères d’ordre biologique (vigueur de l’arbre, rectitude, résistance aux parasites, productivité) et technique (accessibilité des peuplements pour les récoltes de glands). Ces déplacements ont une vocation double : conserver les ressources génétiques présentes et les enrichir en allèles de viabilité face au changement climatique. Par exemple, dans le cadre projet Giono lancé par l’ONF en 2011, de jeunes plants de chêne et hêtre provenant du Sud de la France ont été plantés en forêt de Verdun. De cette manière, les provenances exposées aux conditions induites par changement climatique ont été placées dans un environnement moins sévère en terme de sécheresse. La présente étude reprend ce concept de migration assistée.

A2 – Rapport du sujet aux enjeux actuels

Ainsi que le montre l’écogramme présenté en *Figure A*, le chêne sessile est connu pour être une essence à larges amplitudes hydrique et trophique. C’est pourquoi son aire de répartition couvre la majeure partie de la surface forestière française. Toutefois cette espèce se trouve, comme les autres essences de production, menacée par le réchauffement climatique (Cheaib, 2012).

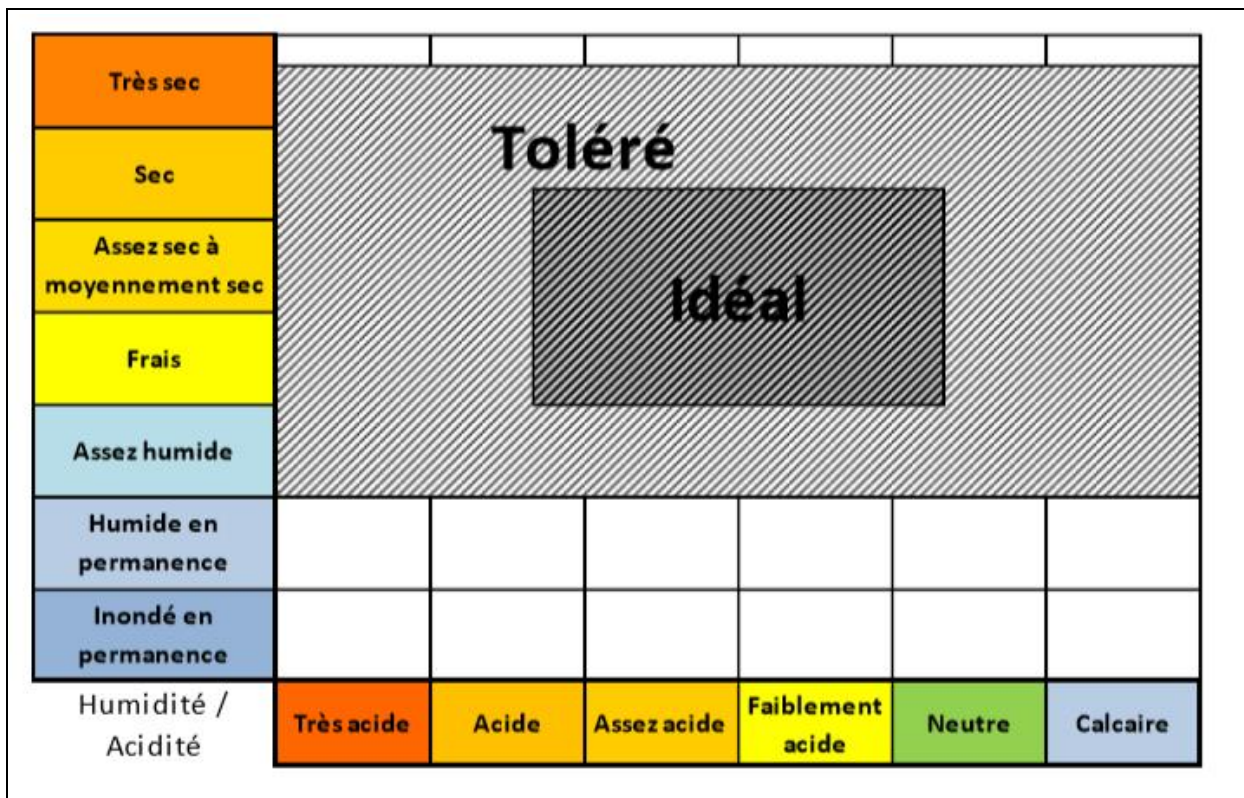


Figure A – Diagramme de répartition du chêne sessile selon les gradients trophiques et hydriques définis dans la Flore forestière française (tome 1, Rameau & al., 1989)

Si la première partie d'apprentissage se fonde sur une modélisation pédo-climatique en contexte actuel, sa poursuite aura recours à des projections de climats futurs. En effet, étant donné que les cycles sylvicoles s'étendent sur plusieurs dizaines d'années, les effets latents du changement climatique ne peuvent être ignorés dans le cadre d'une gestion forestière durable. Les demandes des gestionnaires quant à l'orientation du choix des essences à planter se font de plus en plus importantes.

Le Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat (GIEC, ou IPCC en anglais) a pour rôle principal d'estimer les effets possibles du changement climatique. Il présente dans son rapport de 2013 (Climate Change – The Physical Science Basis) différents scénarii de changement climatique pour chaque zone du globe (Annexe I : Atlas of Global and Regional Climate Projections). Ainsi que le montre la Figure B, la France se trouve entre deux aires : Europe du Nord (AI.36-39) et Méditerranée (AI.40-43).

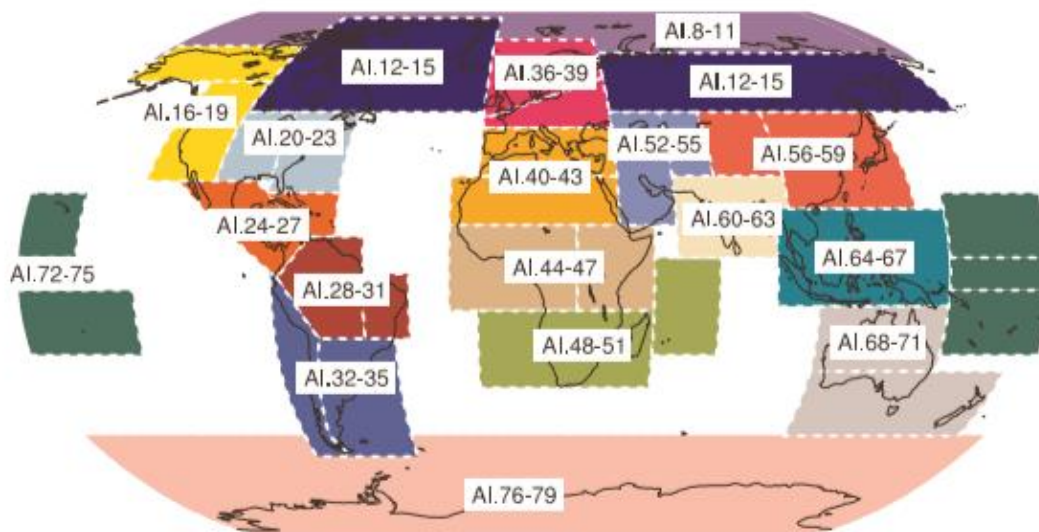


Figure AI.3 | Overview of the SREX, ocean and polar regions used.

Figures AI.4 to AI.7: World

Figures AI.8 to AI.11: Arctic

Figures AI.12 to AI.15: High latitudes

Figures AI.16 to AI.19: North America (West)

Figures AI.20 to AI.23: North America (East)

Figures AI.24 to AI.27: Central America and Caribbean

Figures AI.28 to AI.31: Northern South America

Figures AI.32 to AI.35: Southern South America

Figures AI.36 to AI.39: North and Central Europe

Figures AI.40 to AI.43: Mediterranean and Sahara

Figures AI.44 to AI.47: West and East Africa

Figures AI.48 to AI.51: Southern Africa and West Indian Ocean

Figures AI.52 to AI.55: West and Central Asia

Figures AI.56 to AI.59: Eastern Asia and Tibetan Plateau

Figures AI.60 to AI.63: South Asia

Figures AI.64 to AI.67: Southeast Asia

Figures AI.68 to AI.71: Australia and New Zealand

Figures AI.72 to AI.75: Pacific Islands region

Figures AI.76 to AI.79: Antarctica

Figure B – Atlas des zones de projections climatiques définies par le GIEC

La Figure C montre les différents scénarii associés à la France (**a, b, e et f** pour le Nord et **c, d, g et h** pour le Sud). Ces scénarii ont été établis d'après des estimations prévisionnelles d'émissions de gaz à effet de serre (« RCP » signifie « Representative Concentration Pathway »), croissantes de *RCP2.6* à *RCP8.5*. Ils sont présentés en termes de changement de précipitation (**a, b, c et d**) et en termes de changement de température (**e, f, g et h**).

Ainsi, que quels que soient les scénarii considérés (une couleur = un scénario) et quelle que soit la période de l'année, la partie Nord de la France serait selon le GIEC sujette à une hausse des précipitations et des températures, alors que la partie Sud seraient soumise à une baisse des précipitations et une augmentation des températures.

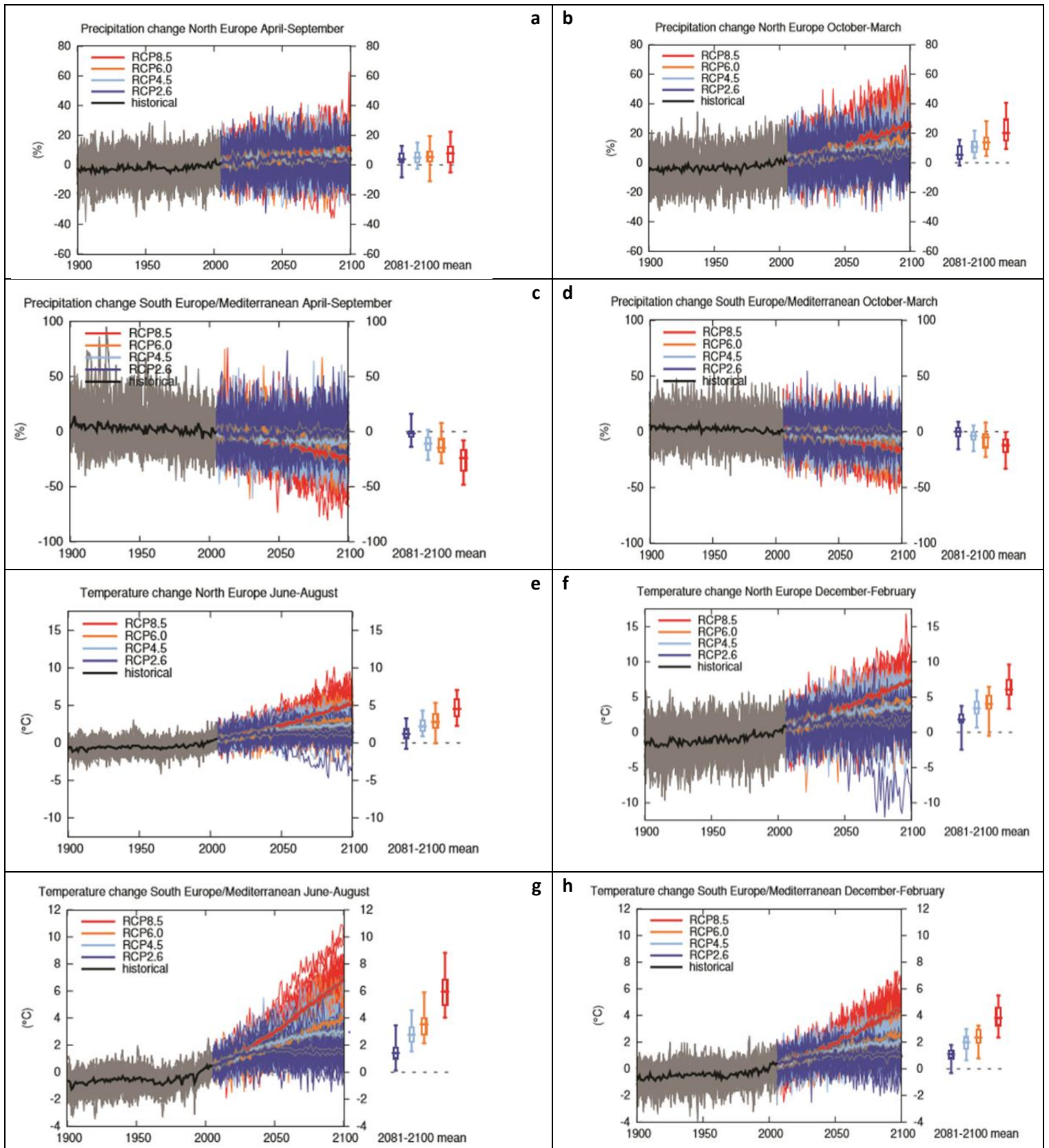


Figure C – Scenarii climatiques (précipitations et températures) prévus par le GIEC pour la France

A3 – Un projet à l'interface de la gestion et de la recherche

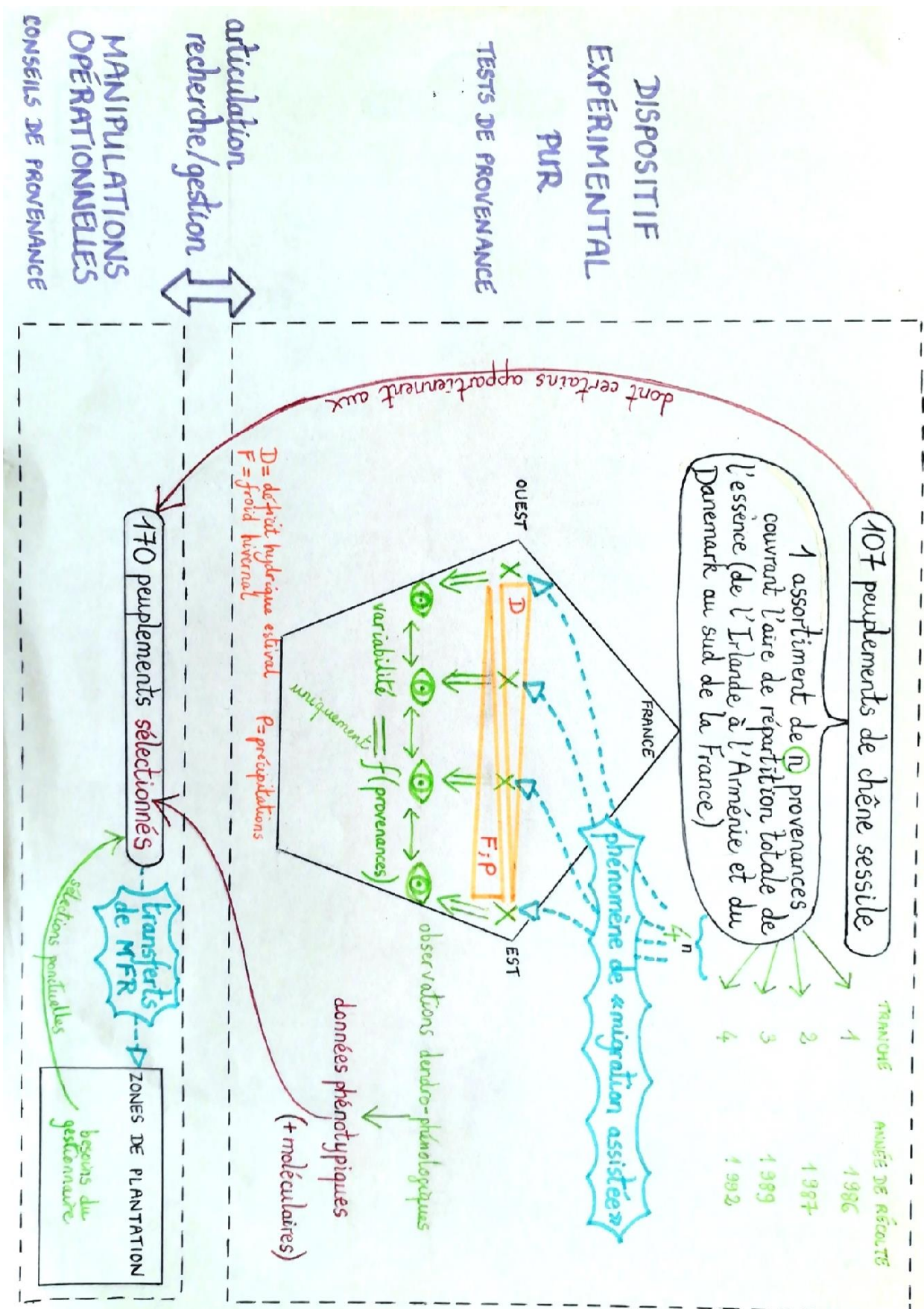


Figure D – Schématisation du lien entre théorie et pratique assuré par le projet d'apprentissage

La formation dispensée à AgroParisTech vise à construire des compétences pratiques en Gestion Forestière. Or la partie apprentissage du cursus est menée en UMR. L'apprentissage constitue donc un lien de continuité entre le cursus de sciences forestières appliquées de l'école et la recherche théorique de l'UMR. De ce fait il permet de mettre en application et de compléter les notions abordées en cours, tout en ouvrant la formation sur un l'activité de recherche scientifique.

En outre, la *Figure D* montre dans quelle mesure le projet d'apprentissage se situe à l'interface entre gestion et recherche au sein de l'UMR elle-même.

L'encadré « Dispositif expérimental pur » correspond à un des projets de recherche de BioForA, portant sur des tests de provenance de chêne sessile en collaboration étroite avec l'UMR BIOGECO de l'INRA de Bordeaux. Attention toutefois, du fait de la complexité de la structuration du climat en France, le gradient Est-Ouest ne correspond pas partout à une gradation absolue et linéaire du déficit hydrique et des précipitations. En outre, la variabilité phénotypique n'est pas uniquement fonction des provenances mais aussi de l'environnement, l'objectif de l'analyse des tests étant de séparer ces deux effets.

L'encadré « Manipulations opérationnelles » illustre l'emploi des MFR dans le cadre de plantations de chêne sessile. La problématique de conseil d'utilisation de MFR de chêne sessile se trouve donc entre ces deux sphères, théorique pour la première (tests de réponse physiologique des MFR à un changement d'environnement), appliquée pour la seconde (transferts de MFR de provenance vers zone de plantation pour un reboisement).

B – Article scientifique présentant les principaux résultats

Les principaux résultats obtenus sont reportés dans l'article scientifique produit dans le cadre de la première des deux années d'apprentissage, qui a vocation à être publié dans la *Revue Forestière Française (RFF)*.

Caractérisation climatique des conseils d'utilisation des provenances de chêne sessile en France et évolution dans le contexte du changement climatique

Mathilde Doucerain . UMR BioForA (ONF-INRA) . août 2019

Abstract

Nowadays, the recommendations about the plantation of Forestrial Reproduction Materials (FRM) of sessile oak (*Quercus petraea*) in France are established after the hypothesis of experts from the National Institute of Agronomy Research (INRA) and the (IRSTEA). In order to translate those predictions into climatic distances, a set of three climatic variables is used to describe both provenance and plantation sites. The analysis reveal that for all the three variables, all the recommendations's distances (local and climate change) are around zero. That means that the experts do not really take risks in their recommendations. The study also analyses the cases of some regions of provenance that are particular regarding to their sampling of oak populations or the conditions of their soil and climate. Thus, at its end, some ways to improve the recommendations are suggested to the experts.

Résumé

Actuellement les conseils de plantation de Matériau Forestiers de Reproduction (MFR) de chêne sessile (*Quercus petraea*) en France sont élaborés à partir de dires d'experts de l'INRA et l'IRSTEA. Pour les traduire en distances climatiques entre sites de provenance et plantation, un jeu de trois variables pédo-climatiques est utilisé. L'étude révèle que pour l'ensemble des trois variables, les distances de préconisations sont toutes centrées sur zéro, qu'elles soient de type « local » ou fondées sur les effets supposés du changement climatique. Ceci signifie que les experts ne prennent que peu de risques dans leurs recommandations. L'étude traite par ailleurs à part les cas de certaines régions de provenances singulières par leur échantillonnage et/ou leurs conditions édaphiques et climatiques ; elle aboutit ainsi à des propositions de révisions qui seront soumises aux experts à l'origine des conseils de plantation.

Keywords : assisted migration, climate change, climatic distances, Forestrial Reproduction Materials (FRM), recommendations about seed use, reforestation, Regions of Provenance (RP), seed transfer, sessile oak (*Quercus petraea*)

Mots-clés : changement climatique, chêne sessile (*Quercus petraea*), distances climatiques, fiches de conseils d'utilisation de MFR, migration assistée, Matériels Forestiers de Reproduction (MFR), reboisement, Régions de Provenance (RP), transferts de graines

Introduction

En France les sources de graines de chêne sessile sont des peuplements sélectionnés structurés en Régions de Provenances (RP) définies selon des critères génétiques, phénotypiques, écologiques et/ou climatiques. Le Ministère chargé des Forêts met à disposition des reboiseurs une fiche de conseils d'utilisation des MFR qui contient, entre autres, des préconisations associant des Régions de Provenances à des zones de plantation. Ces préconisations sont basées sur des dires d'experts. Dans une perspective d'adaptation de la forêt au changement climatique, certaines fiches de conseils d'utilisation des MFR, dont celle du chêne sessile, ont été actualisées à partir de 2015. La fiche du chêne sessile contient des préconisations spécifiquement indiquées pour une démarche d'anticipation du changement climatique. L'introduction de nouvelles provenances par plantation fait en effet partie des voies permettant d'adapter les forêts au changement climatique. Au-delà du conseil technique diffusé par ces fiches, elles ont aussi un aspect réglementaire ; en effet, si le choix des provenances de MFR ne respecte pas les fiches de conseils d'utilisation des MFR, les plantations ne peuvent pas bénéficier d'aides financières.

Généralement, pour les espèces forestières autochtones comme le chêne sessile en France, les experts font l'hypothèse que les peuplements en place depuis plusieurs générations se sont adaptés localement à leur station par sélection naturelle et donc que les peuplements locaux sont la meilleure source de graines adaptées localement. C'est exactement ce qu'on constate dans les conseils d'utilisation des MFR de chêne sessile puisque les préconisations classiques reviennent à préconiser les peuplements de la région de provenance dans laquelle se trouve le site de plantation. Ainsi, actuellement il est recommandé de planter les MFR locaux. Cependant, à cause du changement climatique, le climat ne peut pas être considéré comme constant à l'échelle d'une révolution forestière (150 ans pour le chêne) : les températures sont en hausse et les précipitations tendent à évoluer vers des conditions défavorables à la végétation forestière actuelle, avec notamment des sécheresses plus fréquentes durant la période de croissance des arbres. Dans ce contexte et dans une perspective d'anticipation des effets du changement climatique, ce sont les MFR de provenances un peu plus au sud des zones de plantation qui sont conseillées. En effet, celles-ci sont supposées adaptées aux conditions dans lesquelles elles vivent depuis plusieurs générations et qui miment le climat futur des zones actuelles plus au nord. Ce raisonnement est basé sur une structuration latitudinale du climat. Nous pouvons nous poser la question de la validité de cette structuration en France.

Les préconisations peuvent être vues comme des déplacements de graines entre les sources conseillées et les sites de plantation. Nous nous proposons de les traduire en distances climatiques afin de les caractériser de façon plus objective et de pouvoir évaluer le dire d'expert. Ces traductions des préconisations en distances climatiques nous permettront de tester les deux hypothèses suivantes :

- i. Les distances des couples (provenance;plantation) issues des conseils de premier type (local) sont centrées sur zéro. Cette première hypothèse suppose que les moyennes des points-forêt et des peuplements sont comparables. Les préconisations « classiques » qui ne prennent pas en compte le changement climatique reviennent à conseiller les sources de graines locales donc proches climatiquement de la station où la plantation est réalisée. Les distances correspondantes devraient donc être nulles en moyenne.

- ii. Les distances correspondant aux préconisations permettant d’anticiper le changement climatique indiquent un déplacement de graines de climats chauds et secs vers des sites de plantations plus froids et humides. Selon cette seconde hypothèse, les provenances se trouvant déjà dans des conditions qui seront induites par le changement climatique dans les zones actuellement fraîches et humides sont déjà adaptées au changement climatique. Un apport de matériel génétique *a priori* peu sensible au changement climatique dans des populations menacées permettent un enrichissement des ressources génétiques locales.

Matériels & Méthodes

Les données utilisées dans ce travail sont de différentes natures : d’une part les tableaux de données, d’autre part deux types de données SIG (Système d’Information Géographique), les couches de pixels (*rasters*) et les couches de contours (*shapes*). Les outils employés sont eux-aussi variés : modèle pédo-climatique, logiciel de SIG et logiciel de programmation.

Le tableau ci-dessous récapitule les caractéristiques de l’ensemble des informations prises en entrée :

Source	Nature	Contenu
IFN ¹	Tableau	Coordonnées des points-forêts en France
IGN ²	Couche de pixels	Altitude en France tous les 250m
INRA-IRSTEA ³	Couche de contours	Découpage de la France en Régions de Provenance (RP)
INRA-IRSTEA ³	Tableau	Conseils d’utilisation des MFR de chêne sessile par RP
ONF ⁴	Couches de pixels (3)	Valeurs prises par les trois variables de l’outil pédo-climatique IKS

¹ Inventaire Forestier National

² Inventaire Géographique National

³ Institut National de la Recherche Agronomique – Institut de Recherche en Sciences et Technologies de l’Environnement

⁴ Office National des Forêts

Les peuplements sélectionnés

Toutes les provenances d’essences faisant l’objet de fiche de conseils d’utilisation de MFR sont structurées en Régions de Provenance (RP) selon une codification commune définie dans le document accompagnant les fiches espèces (*Fig.1*).



Figure 1 – Mode de structuration des Régions de Provenance (RP)

Le découpage par Régions de Provenance (RP) définit ainsi pour le chêne sessile 21 zones : 19 RP et trois « zones neutres » -les Landes de Gascogne, l'arcade méditerranéenne et la Corse (Fig.2).



Figure 2 – Carte des Régions de Provenance (RP) de chêne sessile

Toutes les RP ne sont pas représentées par le même nombre de peuplements sélectionnés et les surfaces de ces derniers ne sont pas toutes équivalentes (Fig.3). A noter que le nombre et la surface des peuplements est susceptible d'être révisée chaque semestre. Cette disparité de distribution des peuplements est liée à l'hétérogénéité de la répartition de l'essence elle-même (Fig.4).

Code de la RP	Nom de la RP	Nombre de peuplements	Surface totale des peuplements arrondie à l'unité (ha)
QPE101	Bordure Manche	5	67
QPE102	Picardie	8	351
QPE103	Massif armoricain	7	106
QPE104	Perche	5	1181
QPE 105	Sud Bassin parisien	12	1502
QPE 106	Secteur ligérien	7	2096
QPE 107	Berry-Sologne	8	897
QPE 201	Ardennes	3	61
QPE 203	Nord-Est limons et argiles	33	671
QPE 204	Nord-Est gréseux	16	713
QPE 205	Vallée de la Saône	7	173
QPE 212	Est Bassin parisien	18	471
QPE 311	Charente-Poitou	6	452
QPE 362	Gascogne	10	248
QPE 403	Rouergue-Massif central	2	27
QPE 411	Allier	10	1142
QPE 422	Morvan-Nivernais	9	578
QPE 500	Alpes et Jura	1	12
QPE 601	Pyrénées	1	23

Figure 3 – Importances quantitatives des différents peuplements sélectionnés

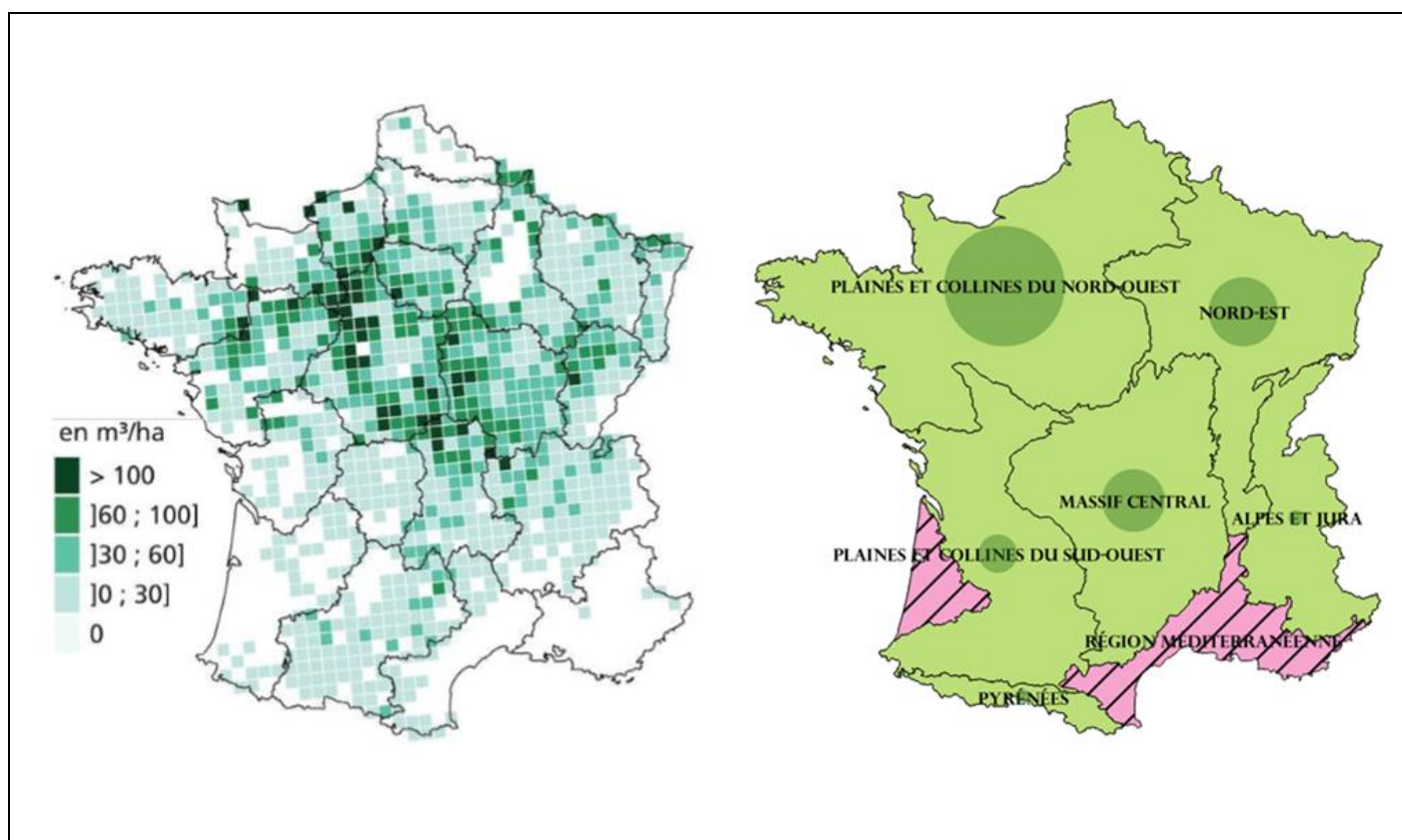


Figure 4 – Volume sur pied de chêne sessile en France, en m³/ha (IGN 2009-2013) à gauche et importances surfaciques relatives des peuplements sélectionnés de chêne sessile à droite

Les points-forêt

Chaque année depuis 2005, des synthèses statistiques compilant les données issues des cinq années précédentes sont produites par l'IFN aux échelles nationale et régionale. Ces données permettent entre autres d'estimer le couvert forestier actuel. Les arbres vivants sur pied sont inventoriés par placettes circulaires. Un point-forêt est donc une placette sur laquelle un certain nombre d'arbres ont été comptabilisés. Tous les arbres sont recensés, sans aucune prise en compte de la qualité du bois qu'ils sont susceptibles de fournir.

Les données sur les points-forêts utilisées correspondent à l'inventaire 2012-2017 (Fig.5).

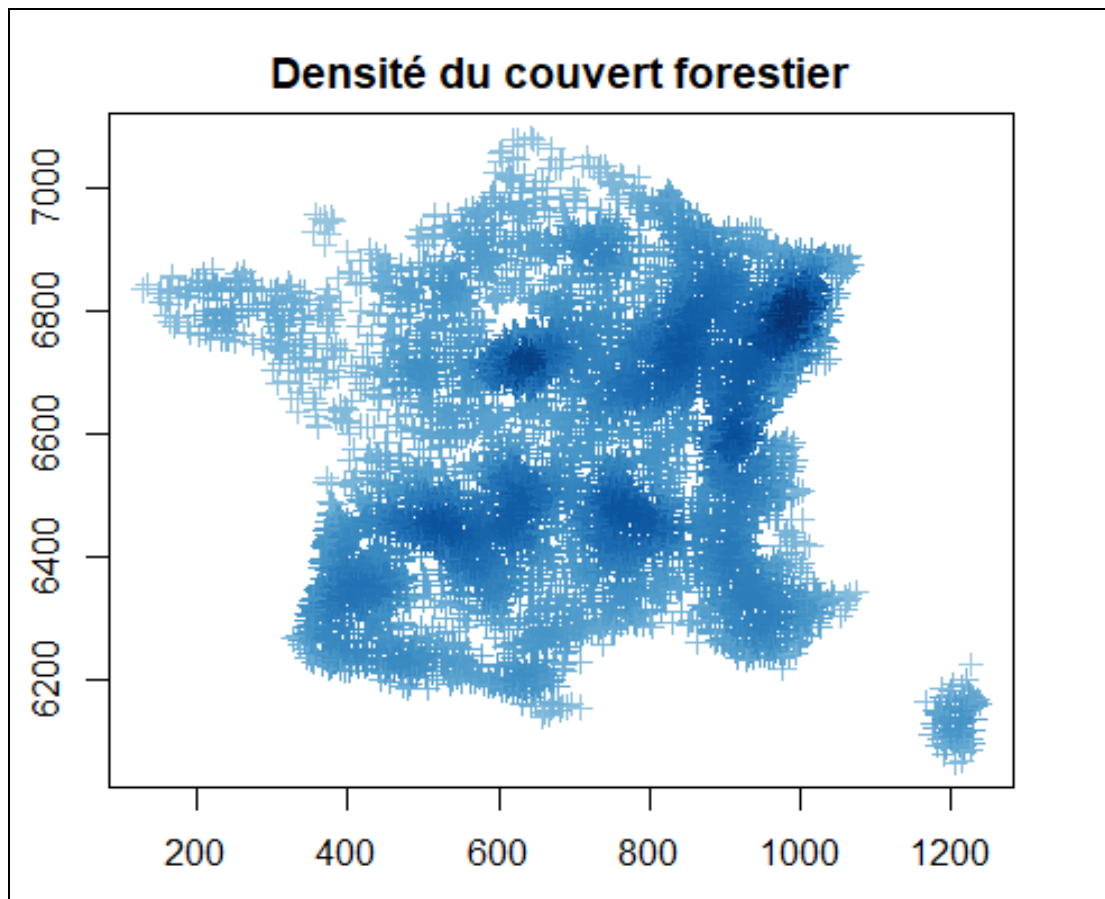


Figure 5 – Positions géographiques des points-forêt (IFN, 2017) en km

Les conseils d'utilisation des MFR

Dans les fiches de conseils d'utilisation des MFR officielles, les zones d'utilisation ne sont pas définies par les Régions de Provenances mais par un découpage composé des GRECO (Grandes Régions ECOlogiques), SER (SylvoEcoRégions), et parfois même des régions forestières si besoin.

C'est une version provisoire dans laquelle les conseils sont structurés par RP qui est utilisée ici. Cette structuration par RP permet en effet une lecture plus simple des fiches.

Les fiches de conseils d'utilisation des MFR de chêne sessile utilisées proposent donc, pour chaque Région de Provenance (RP) de plantation (« zone d'utilisation »), différentes RP utilisables (« matériels conseillés ») (Fig.6). Les « matériels conseillés » reprennent les provenances locales. Deux autres types de MFR sont également proposés (« autres matériels utilisables ») : des provenances à utiliser en cas de pénurie des MFR locaux et des provenances recommandées dans une perspective

d'anticipation des effets supposés du changement climatique (codes de RP assortis d'un astérisque). Dans le présent travail, les préconisations de type « pénurie » ne sont pas étudiées.

Zones d'utilisation		Matériels conseillés		Autres matériels utilisables	
Région de provenance		Nom	Cat.	Nom	Cat.
code	nom				
QPE101	Bordure Manche	QPE101	S	QPE102, QPE103*, QPE104*, QPE105*, QPE106*	S
QPE102	Picardie	QPE102	S	QPE101, QPE103*, QPE104*, QPE105*, QPE106*	S
QPE103	Massif armoricain	QPE103	S	QPE104, QPE106, QPE311*	S

PLANTATION **PROVENANCE**

Figure 6 – Architecture des fiches de préconisation par RP

L'outil de modélisation pédo-climatique IKS

IKS est un outil développé par le département RDI (Recherche, Développement et Innovation) de l'ONF (Office National des Forêts) qui a pour objectif de modéliser les compatibilités climatiques des espèces forestières dans le présent et dans l'avenir. Les données d'entrée de cet outil sont 3 variables climatiques calculées d'une part et des données de présence/absence d'espèces d'autre part. En associant les deux, l'outil détermine les valeurs limitantes pour chaque variable et chaque espèce. Les trois variables sont : le déficit hydrique (SDEF), la somme des degrés-jour supérieurs à 5°C sur un an (GDD) et la température minimale annuelle (TMIA). Ces variables ont été identifiées par les experts comme étant physiologiquement limitantes pour les essences et les analyses des présences/absences actuelles des différentes espèces ont confirmé cette hypothèse.

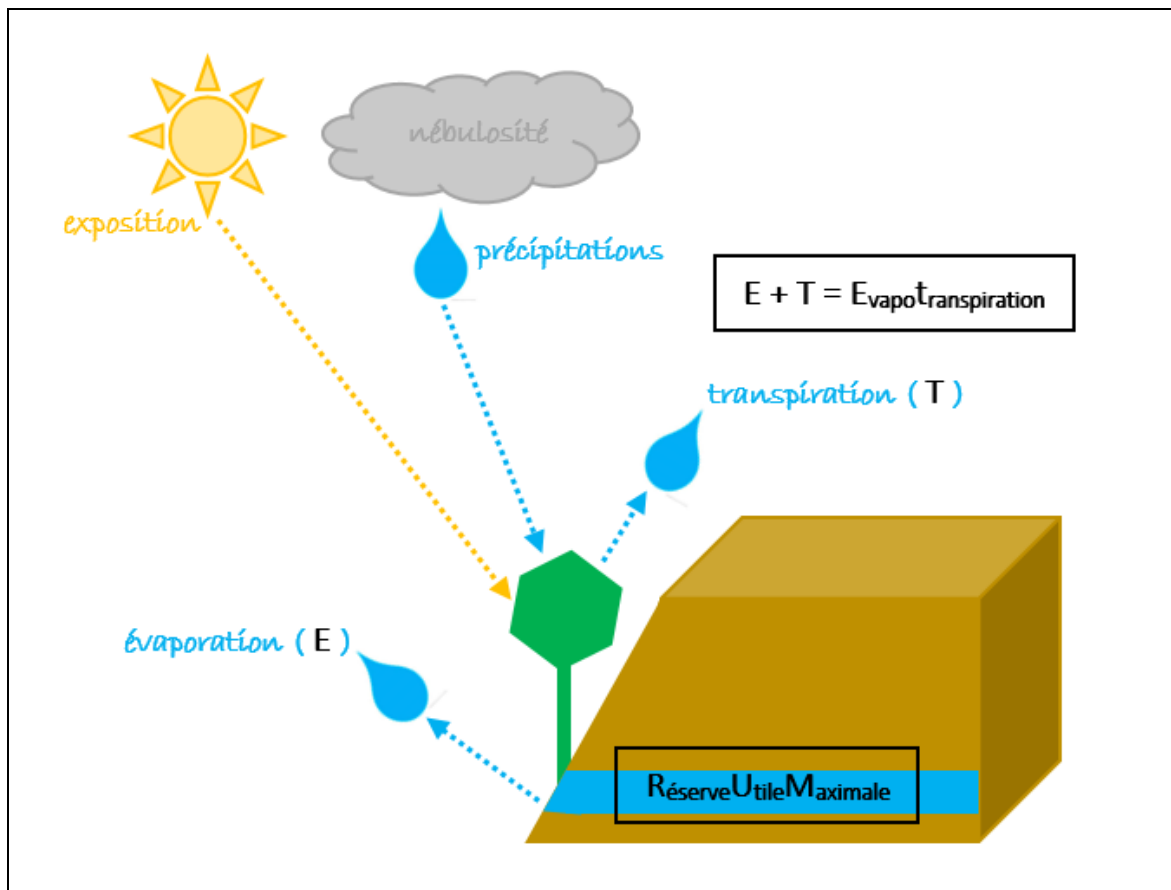


Figure 7 – Paramètres forestiers sur lesquels s'appuie IKS

Le modèle IKS est construit de la manière suivante : des données climatiques mensuelles issues des bases de données ClimateEU pour les précipitations et température. Les données sont acquises sur 30 ans. L'évapotranspiration (ETP Hargreaves) est calculée à partir des variables ClimateEU. Le Réservoir Utilisable (RU) est quant à lui issu de d'autres jeux de données. A partir de l'ensemble de ces données, le modèle IKS calcule des variables pédo-climatiques : somme annuelle des degrés-jour, Growing Degree Days (GDD), Température Minimale Annuelle (TMIA) et somme annuelle des déficits hydriques (SDEF_HV).

La température moyenne mensuelle selon IKS est égale à la moitié de la somme des températures minimale et maximale pour le mois considéré. Par hypothèse, cette température est atteinte au 15^{ème} jour de chaque mois. Les températures moyennes journalières des autres jours sont ainsi calculées par interpolation linéaire d'un mois à l'autre. Le GDD de chaque mois se calcule alors en sommant les températures journalières moyennes ainsi obtenues qui sont supérieures à 5°C.

La température minimale annuelle est égale au minimum de la température moyenne pour un mois donné, moyenne calculée sur 30ans.

Enfin le déficit hydrique SDEF_HV est la somme annuelle des déficits hydriques : c'est une fonction des précipitations, de l'évapotranspiration et du Réservoir Utile.

Obtention des distances géographiques et climatiques

La démarche suivie pour l'obtention des distances climatiques peut être résumée en deux grandes étapes. La première consiste à extraire les valeurs prises par les variables IKS au niveau, d'une part des peuplements sélectionnés, d'autre part des points-forêt. Cette extraction se fait essentiellement au moyen de la commande « extract » du logiciel de programmation R. La seconde étape est celle du calcul des distances, selon la formule générale suivante :

$$\text{Distance} = \text{Plantation} - \text{Provenance}$$

Les distances sont calculées en déplacements réels des MFR selon le système de projection Lambert93, dans lequel les coordonnées sont en mètres, et en différences de variables climatiques entre sites de provenance et points-forêt. Les distances climatiques sont évaluées pour chacune des trois variables fournies par IKS (SDEF_HV, GDD et TMIA) ainsi que sur l'altitude.

Résultats

Distances latitudinales

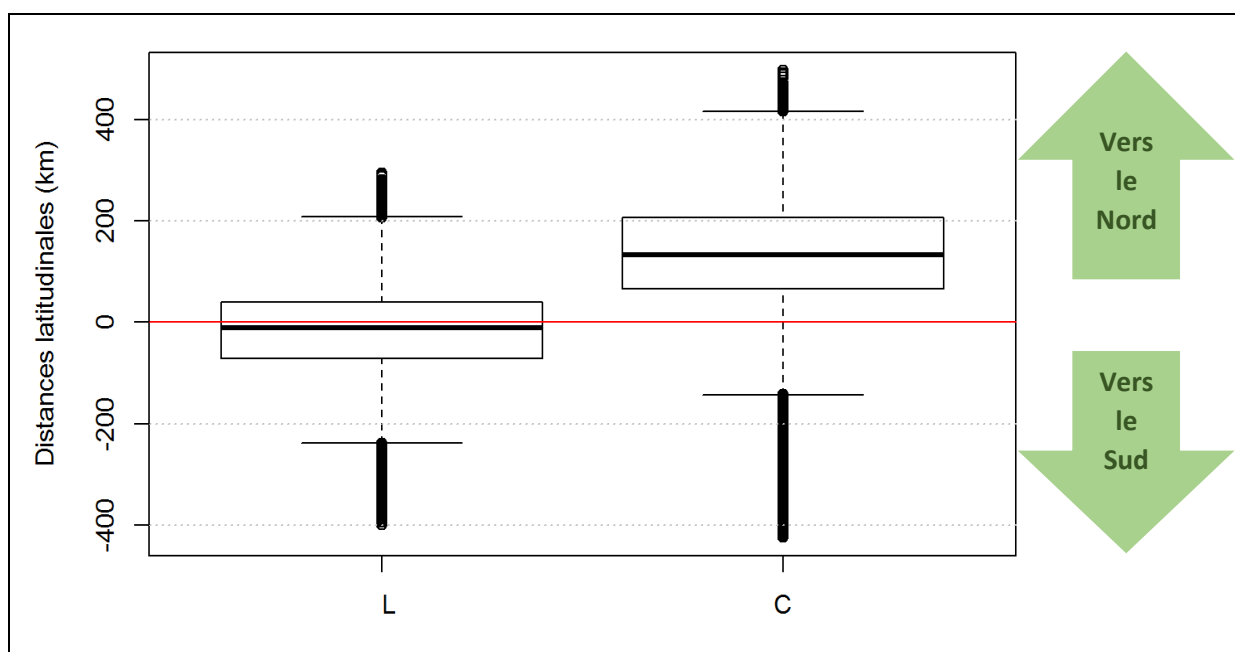


Figure 8 – Distances latitudinales de types L et C toutes RP confondues

En moyenne, les préconisations locales (L) n'induisent aucun mouvement Nord/Sud et celles pensées dans un contexte de changement climatique (C) se traduisent par un déplacement vers le Nord, à la manière d'une migration assistée (Fig.8).

La médiane des distances de type C est de 133km vers le Nord. Ainsi, si la distribution des distances de type C montre globalement un mouvement du Sud vers le Nord, elle révèle également que 8,8% des préconisations de type C impliquent des déplacements Nord-Sud.

Le détail des distributions des distances latitudinales par Régions de Provenance de plantation (Fig. 8bis) permet de comprendre l'origine de ces préconisations du Nord vers le Sud. En effet, dans la majorité des cas (13 RP sur les 18 pour lesquelles il existe des préconisations de type C), les distances de type C sont positives. Cependant, pour les 5 autres, les distributions des distances sont soit plus ou moins centrées sur 0 (QPE205, QPE411 et QPE422) soit négatives pour les 2 RP montagnardes (QPE500 et QPE601). Pour les RP préconisées dans les 3 premières en contexte de changement climatique, ce sont plutôt des transferts de l'Ouest vers l'Est qui sont préconisés mais à latitude stable. Le cas de la RP QPE500 est plus complexe, la RP conseillée en contexte de changement climatique est bien une RP à l'Ouest (QPE205) mais la QPE500 est tellement étendue latitudinalement qu'une importante partie est plus au Sud que la RP conseillée. Enfin, la RP QPE601 (Pyrénées) est la plus au Sud en France donc il n'était pas possible d'en conseiller une plus au Sud.

Même si les distances de type « local » sont centrées sur 0, leur distribution est assez étendue avec une valeur minimum de -397 km (Nord vers le Sud) et une valeur maximum de 293 km (Sud vers le Nord). Les valeurs minimales des 2 types de préconisations sont comparables (423 km pour le type C). A l'inverse, le maximum des distances de type C est supérieur à celui des distances de type L à raison de 200 km. La distribution des distances de type C est bien décalée vers les valeurs positives qui traduisent des transferts de matériel du Sud vers le Nord.

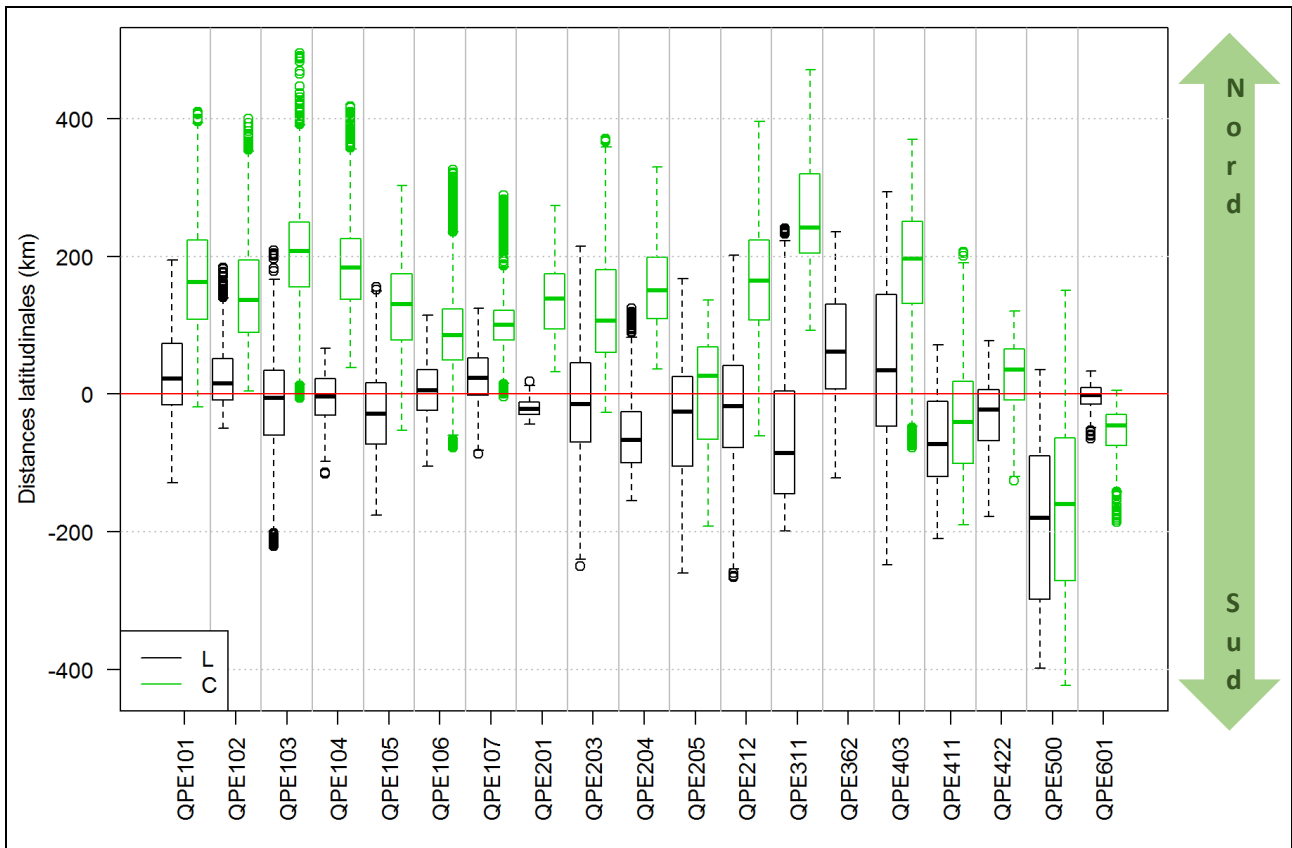


Figure 8bis – Distances latitudinales de types L et C par RP

Distances altitudinales

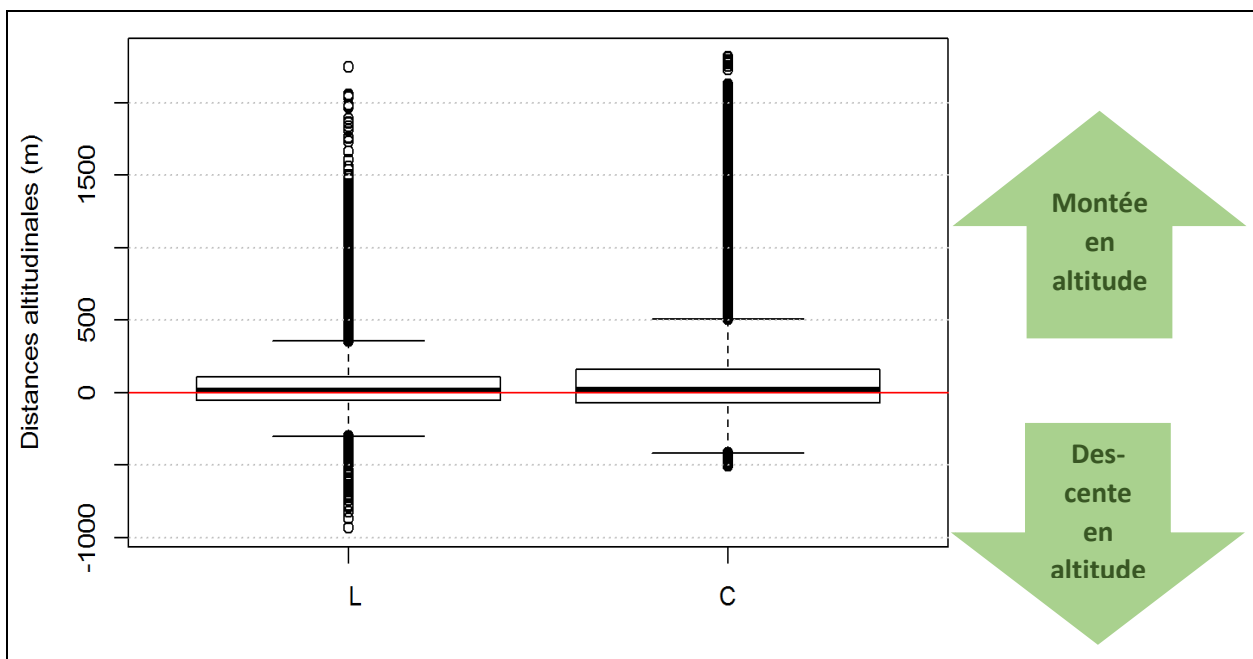


Figure 9 – Distances altitudinales de types L et C toutes RP confondues

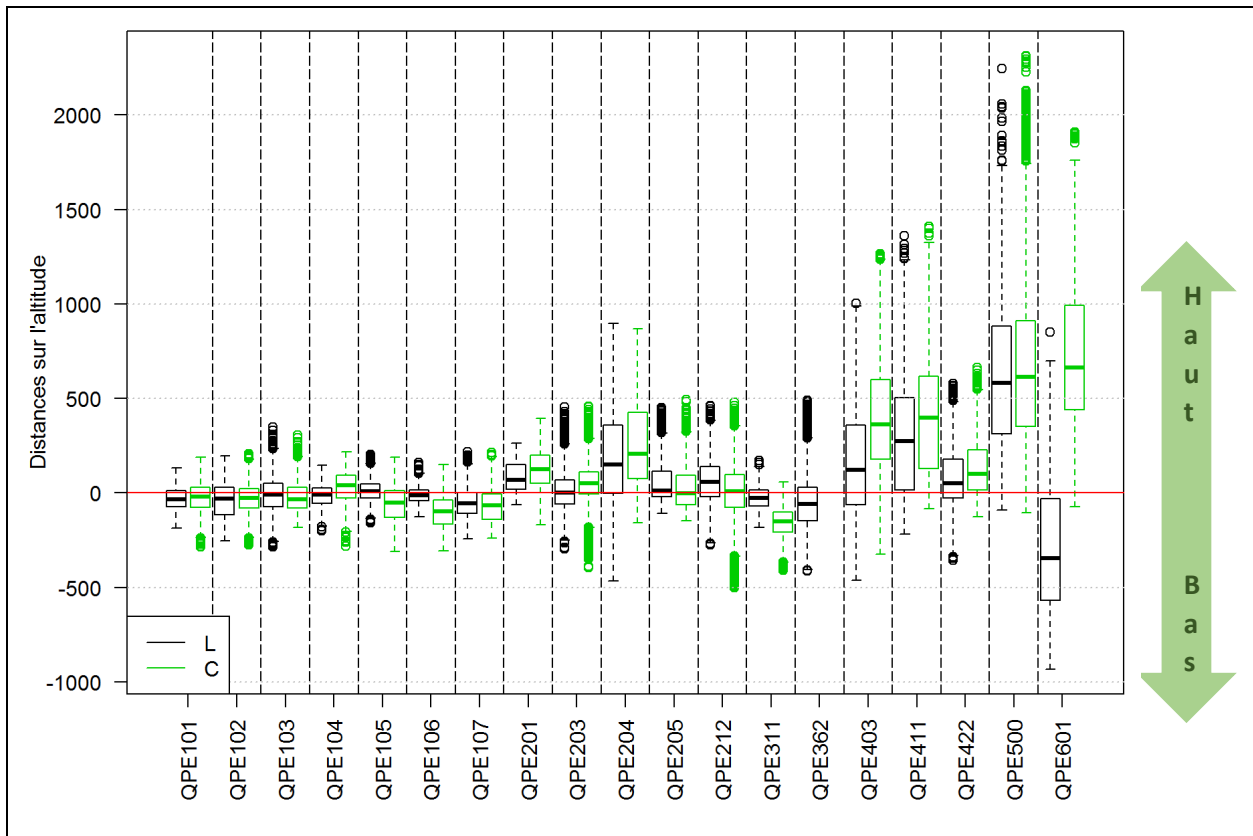


Figure 9bis – Distances altitudinales (m) de types L et C par RP

Globalement, sur l'ensemble des RP, les deux distributions sont centrées sur 0 mais assez étendues (Fig.9). Les distances de type L sont comprises entre -963 m (plantation de matériel plus bas) et +2245 m (plantation de matériel plus haut). Les médianes des distances altitudinales de types L et C sont proches (Tab.1).

Les RP 403 et 411 et surtout de la RP 500 et de façon inversée dans la 601 s'éloignent de la tendance générale (Fig.9bis). Pour la 500, le peuplement sélectionné est à 264 m d'altitude alors que 75% des points forêts sont au-dessus de 578 m et 25 % au-dessus de 1147. Pour la 601, c'est presque l'inverse, le peuplement sélectionné est à 1275 m d'altitude, soit à une altitude supérieure à plus de 75 % des points-forêt de cette RP.

La distance minimale des distances de type C est de -501 m soit 400 m en moins que le minimum des distances de type L, donc les conseils amenant à planter plus bas ont été limités. Les RP ayant une altitude supérieure à la moyenne ont légèrement tendance à avoir des distances C positives, donc les conseils indiquent de planter plus haut en altitude. Le cas assez significatif pour la QPE601 parce la RP conseillée en C est la 362 -donc une RP de plaine- et en plus le local est dans les distances négatives. La RP conseillée pour la 500 est aussi une RP plus basse en altitude (la RP 205, où les altitudes des peuplements sélectionnés sont comprises entre 195 et 280 m) mais comme les distances de type L vont déjà vers une descente en altitude du fait de la basse altitude du peuplement sélectionné, cela n'apporte aucun changement.

Type	Variable	Altitude (m)
L		15
C		22

Tableau 1 – Altitudes médianes

Distances climatiques

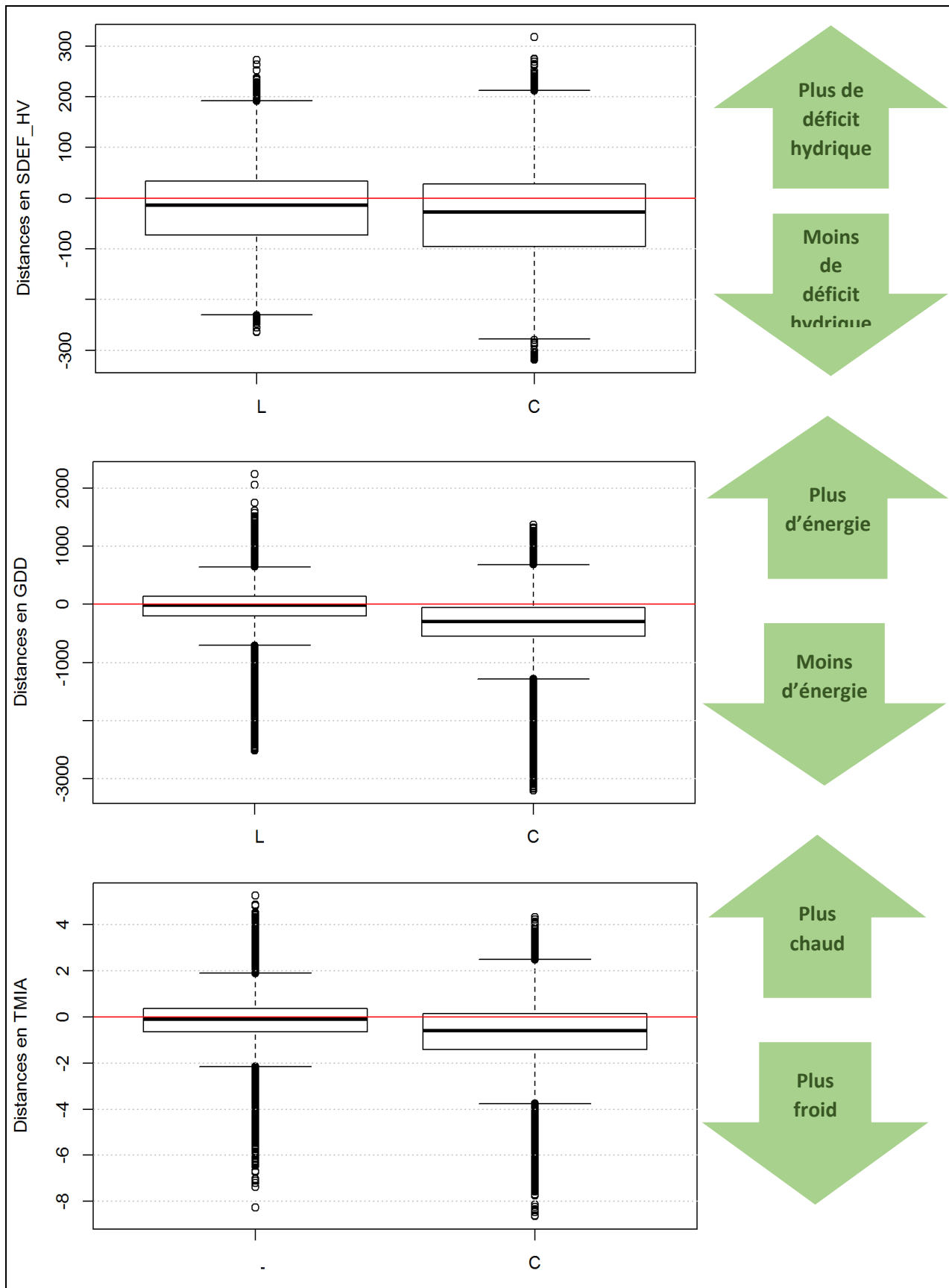
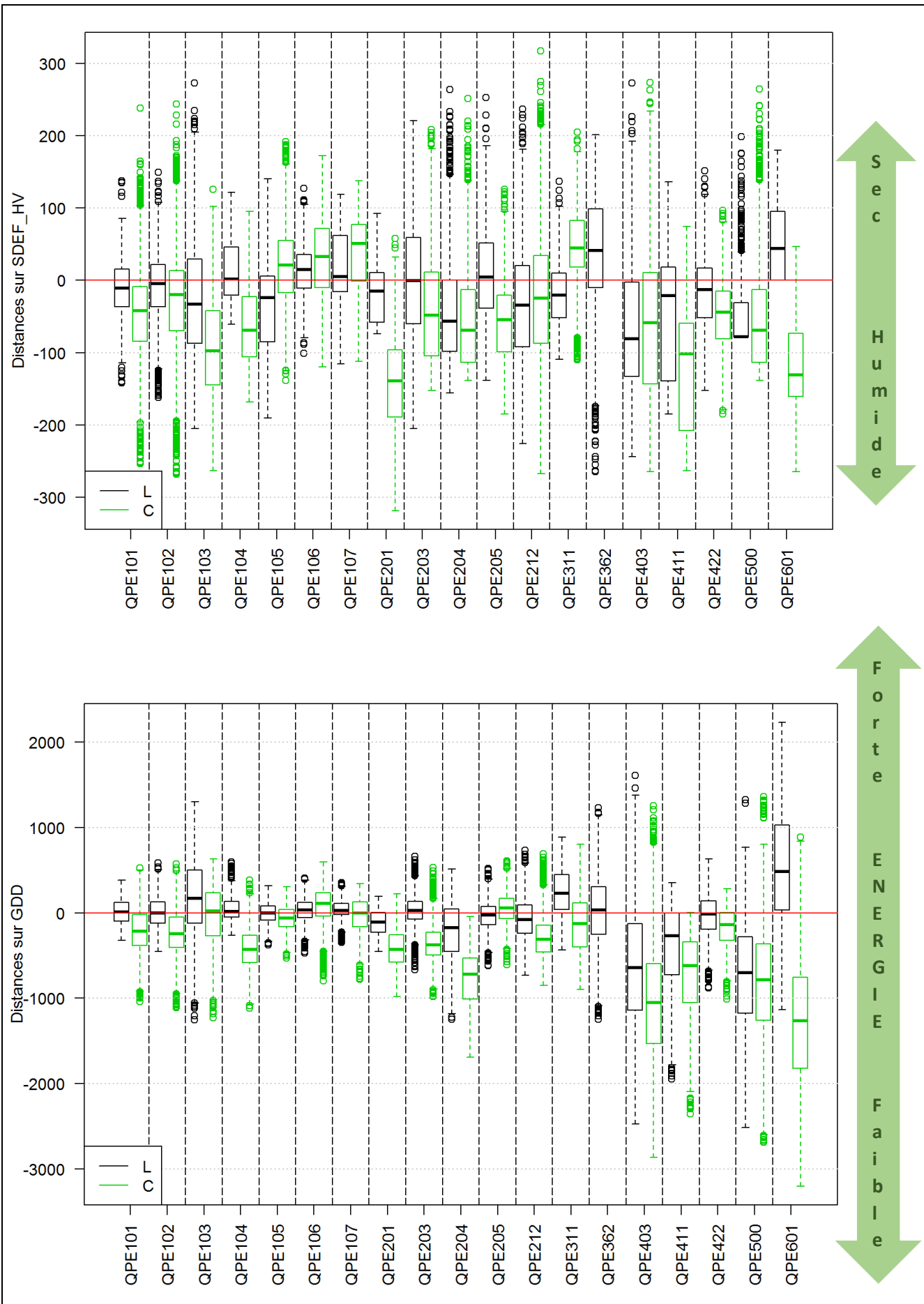


Figure 10 – Distances climatiques de types L et C toutes RP confondues



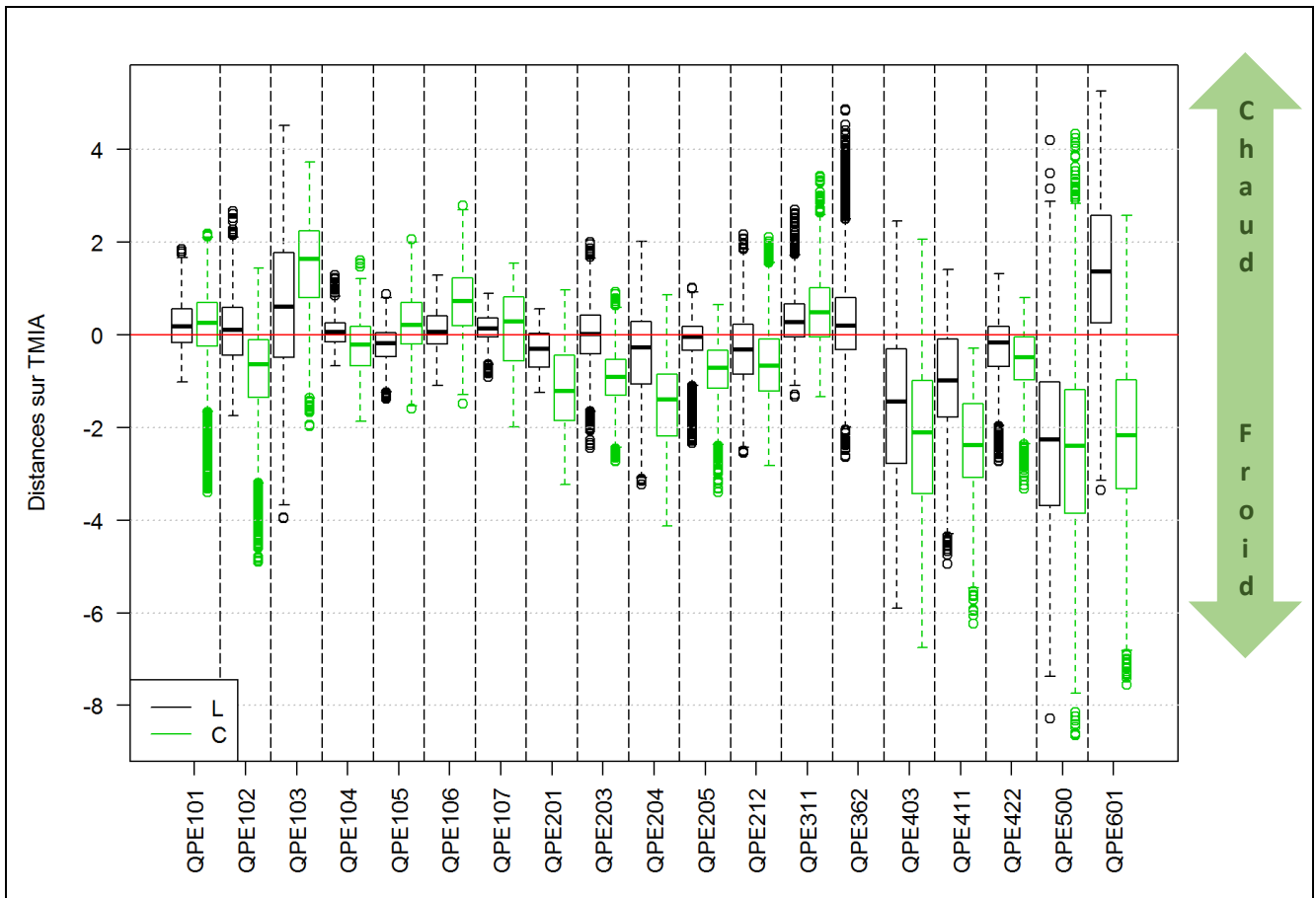


Figure 10bis – Distances climatiques de types L et C par RP

Les distances locales sont centrées sur 0 pour l'ensemble des trois variables (Fig.10). Les distances de changement climatique sont quant à elles légèrement décentrées vers les valeurs négatives, pour l'ensemble des trois variables (Tab.2).

Type	Variable	SDEF_HV (mm d'eau)	TMIA (°C)	GDD (°C)
L		-14	-0.9	-16
C		-27	6	-294

Tableau 2 – Médianes des trois variables IKS

Ainsi, quelle que soit la variable climatique et le type de préconisation, les distances sont soit centrées sur zéro, soit négatives, c'est-à-dire décalées dans le sens d'un abaissement du stress hydrique, de la température minimale annuelle et de la somme annuelle des degrés-jour d'une part et augmentation de l'altitude d'autre part (Tab.2). Pour les préconisations de type C, le décalage vers le bas est un peu plus marqué, et les abaissements maximaux se rapprochent de ceux qu'il est possible d'atteindre hors préconisations, voire les atteignent, comme c'est le cas pour SDEF_HV (Tab.3).

Type	Variable	SDEF_HV (mm d'eau)	TMIA (°C)	GDD (°C)
L		-265	-8	-2514
C		-319	-9	-3204
HP		-319	-13	-3549

Tableau 3 – Amplitudes maximales entre le minimum du site de plantation et le maximum du site de provenance, pour les préconisations locale (L), de changement climatique (C) et hors préconisations (HP)

Il y a néanmoins aussi des distances de SDEF_HV, GDD et TMIA positives (RP 105, 106, 107 et 311), et les amplitudes d'augmentation des valeurs de ces trois variables ne sont pas négligeables (Tab.4). Les préconisations associées à ces distances amènent à planter des sources de graines de stations humides dans des stations plus sèches ! Ceci est déjà assez problématique pour les conseils de type L, mais le devient plus encore pour les préconisations de type C. En outre, les amplitudes maximales de gain de valeur pour GDD et TMIA sont plus importantes pour les préconisations de type L que pour celles de type C (Tab.4) ! Ces observations s'expliquent par le fait que le déficit hydrique n'est pas structuré selon un gradient Nord/Sud en France. Les peuplements sélectionnés concernés, QPE 105, 106, 107 et 311, sont des peuplements dans lesquels le déficit hydrique est plus important que la moyenne.

Type	Variable	SDEF_HV (mm d'eau)	TMIA (°C)	GDD (°C)
L		285	6	2400
C		310	4	1500
HP		499	99	3186

Tableau 4 – Amplitudes maximales entre le maximum du site de plantation et le minimum du site de provenance, pour les préconisations locale (L), de changement climatique (C) et hors préconisations (HP)

La RP 411 ressort par ailleurs au niveau de toutes les variables et pour les deux types de conseils, avec une baisse de SDEF_HV, TMIA et GDD et une hausse de l'altitude (Fig.10bis). Cette RP a un comportement particulier marqué : aucune de ses distances climatiques n'est vraiment centrée sur zéro. Il s'agit de la RP de l'Allier, dont tous les peuplements sélectionnés sont concentrés dans le Nord de la RP. Or cette RP s'étend surtout latitudinalement, donc le fait que tous les peuplements soient situés au nord de la RP peut avoir une influence non négligeable sur les distances climatiques.

Discussion

Synthèse

Les préconisations locales se traduisent par des distances centrées sur zéro mais autorisant de larges amplitudes ; ces dernières restent néanmoins inférieures à celles qui peuvent être atteintes hors préconisations. Cette variabilité de valeurs des distances locales est plus ou moins marquée selon les RP, qui ne sont pas toutes échantillonnées par la même répartition ni la même densité de peuplements sélectionnés. Les conseils de changement climatique se traduisent globalement par une migration des MFR des zones sèches et chaudes vers les zones humides et fraîches, mais cette tendance est très légère.

Préconisations de type « local » et « changement climatique »

Les hypothèses concernant les distances locales et en changement climatique sont donc validées. Toutefois, les gammes de variation des conditions pédo-climatiques au sein d'une même RP sont supérieures à celles qui étaient attendues. Or si rien qu'au sein d'une RP toute l'amplitude possible est couverte, la marge de différence de conditions entre sources de graines et zones de plantation est étroite.

Les résultats concernant les distances latitudinales sont conformes aux attendus : ils traduisent un apport de provenances adaptées au changement climatique vers des zones de plantation vulnérables. Mais les conditions pédo-climatiques françaises ne s'alignant pas sur un gradient latitudinal, il conviendrait d'analyser plus avant ces observations. En effet, le relief de la France n'est pas linéaire du Nord vers le Sud et les stations forestières ne progressent pas non plus linéairement selon cet axe.

Les distributions d'altitudes sont centrées sur 0, ceci était attendu compte-tenu du fait que le chêne sessile est plutôt une espèce de plaine. Dans les résultats, les augmentations d'altitude et diminution de la température minimale annuelle sont toujours conjointes. Ce constat témoigne de la cohérence des données altitudinales avec la variable modélisée TMIA : plus l'altitude est élevée, plus les températures sont basses.

Un site de plantation actuellement dans une zone humide et froide va subir les effets du changement climatique et donc devenir plus sec et chaud. Les préconisations de type « changement climatique » y semblent conseiller des provenances qui sont adaptées à ces futures conditions parce qu'elles se trouvent dans des conditions actuelles plus sèches et chaudes. Les provenances vont en effet être plantées dans des zones moins sèches et moins chaudes que leurs conditions d'origine –du moins maintenant, car quand le changement climatique opérera, elles retrouveront leurs conditions actuelles.

Des distances climatiques positives ont toutefois été trouvées ; ceci est dû aux conditions climatiques des RP elles-mêmes, mais déplacer des graines vulnérables au changement climatique vers des zones où elles y seront encore plus menacées ne semble pas viable.

Par ailleurs, pour TMIA, les cas où les graines sont transférées vers des climats plus froids en remontant du Sud vers le Nord (distances négatives) représentent des migrations à risques : l'adaptation pour le futur peut compromettre la viabilité immédiate en climat présent. Tout l'enjeu est de concilier viabilité présente et pérennité future.

Concernant GDD, une migration des graines du Sud vers le Nord -donc du plus chaud vers le plus froid-, va amener vers moins d'énergie (distances négatives). Un risque éventuel serait d'arriver à des cas où la somme des degrés-jours pourrait ne pas être suffisante pour le développement des arbres.

Vers une redéfinition des découpages

Les RP 500 et 601 correspondent respectivement aux Alpes&Jura et Pyrénées. Elles ont donc la particularité d'être situées en région montagneuse. En outre, elles ne sont chacune représentées que par un seul peuplement, et ce sont les deux seules dans ce cas-là.

Les Alpes et Jura sont décrites par deux Grandes Régions ECOlogiques (GRECO) différentes alors qu'elles ne forment qu'une seule RP. Les GRECO correspondent à un découpage de la France métropolitaine en 11 zones (plus une d'alluvion récente) fondé, d'une part sur les facteurs biogéographiques déterminants pour la production forestière, d'autre part sur la répartition des grands types d'habitat forestier. L'unique peuplement sélectionné de la RP 500 ne se trouve ainsi en réalité que dans la GRECO du Jura (GRECO E). Cette dernière est subdivisée en deux SER toutes deux boisées à 50% (IGN, 2012) une à l'Ouest (E10 : Premier plateau du Jura) et l'autre à l'Est (E20 : Deuxième plateau et Haut-Jura). Le peuplement se trouve dans la SER E10, peuplée de hêtraies et chênaies surtout sessiliflores, alors que le couvert forestier de la SER E20 est plutôt constitué de hêtraies, pessières et sapinières. Ainsi, serait-il envisageable de réduire QPE 500 à la SER E10, voire d'intégrer ce peuplement dans la RP 205 et transformer la RP 500 en zone neutre ? Par ailleurs, étant donné qu'il y a des chênaies sessiliflores dans l'étage collinéen de la GRECO des Alpes (GRECO H), ne serait-il pas judicieux de chercher à sélectionner des peuplements de chêne sessile dans cette zone, puis d'en faire une RP à part entière ? Les recommandations associées à la RP 500, qu'elles soient de type L ou C, vont dans le sens de la logique adoptée pour préserver les MFR de chêne sessile des conditions climatiques à venir compte-tenu du changement climatique : baisse de SDEF_HV, TMIA et GDD et augmentation de l'altitude. Ceci signifie que le peuplement sélectionné de cette RP se trouve en conditions plus arides que le reste des forêts la peuplant et qu'ainsi la priorité y est de conserver les ressources génétiques de chêne sessile. Qu'en est-il de la récoltabilité de cet unique peuplement ?

La RP 601 correspond à la GRECO des Pyrénées (GRECO I), qui a un taux de boisement supérieur à 50%, et son unique peuplement sélectionné de chêne sessile se trouve à son centre, au beau milieu des Hautes-Pyrénées. Pour cette RP, seuls les conseils d'utilisation de MFR de type C suivent la même tendance que ceux de la RP du Jura, cohérente avec l'approche anticipative du changement climatique. Les recommandations locales se traduisent par une migration inverse par rapport à celle induite par le type C : augmentation de SDEF_HV, TMIA et GDD et abaissement de l'altitude. Ainsi, localement, le peuplement des Pyrénées se trouve dans des conditions pédo-climatiques plus clémentes que celles du reste du couvert forestier pyrénéen.

Conseils en cas de pénurie de MFR locaux

Outre le cas du changement climatique, les fiches de conseils d'utilisation de MFR prévoient également, dans la colonne « autres matériels utilisables », des préconisations en cas de pénurie de MFR locaux. Celles-ci n'ont pas été incluses dans la présente étude. Etant donné que les conseils de type P ont *a priori* vocation à mimer les recommandations locales, ne pourrait-on pas imaginer, dans le cas où les préconisations locales ne seraient pas centrées sur zéro, des conseils de types P proches de ceux de type C mais avec une plus faible amplitude ? Cela permettrait en effet, les MFR locaux

venant à manquer, d'anticiper systématiquement, lors des plantations, les effets supposés du changement climatique. Ainsi, cela revient à ne proposer que les deux types de conseils étudiés ici : L, à privilégier, et C, soit par pénurie de L, soit par volonté délibérée d'anticiper le changement climatique.

Limites de l'étude

Une des limites de l'étude est que par souci de simplicité, les peuplements sélectionnés ont été assimilés à des points dont les coordonnées se situent au barycentre de l'ensemble des parcelles constituant ces peuplements, alors que parfois celui-ci se situe hors-forêt.

Par ailleurs, le postulat sur lequel repose le présent travail est que les provenances locales sont les plus adaptées. Or ceci n'est pas toujours vrai, en raison du phénomène de « décalage d'adaptation » (Matyas, 2002).

Perspectives et conclusion

Adéquation des préconisations avec le changement climatique prévu

Les amplitudes de distances, bien qu'*a priori* relativement importantes à l'échelle des RP, sont-elles pertinentes par rapport aux scénarii de changement climatique envisagés ? Notamment, les distances de changement climatique sont-elles suffisantes par rapport à ce qui est prévu ? Cette problématique est à traiter de concert avec une estimation de la vitesse de migration naturelle du chêne sessile dans son aire de répartition.

Adapter les zones de plantation et élargir les provenances

Les distances ont été calculées avec l'intégralité des points-forêt de France ; or bien que le chêne sessile y soit très répandu, certaines zones de plantation sont plus adaptées à son autécologie que d'autres. Filtrer les points-forêts pourrait à cet égard permettre de donner plus de poids aux distances calculées avec des points sur lesquels le chêne sessile est le plus susceptible de se trouver.

Il pourrait aussi être envisageable d'inclure les Unités Conservatoires (UC) de chêne sessile dans le champ des provenances possibles, en plus des Régions de Provenances déjà établies. Ceci impliquerait de prendre en compte le second aspect des mouvements de MFR évoqué en introduction, selon lequel la migration assistée de MFR correspond davantage à une mise en sécurité des MFR vulnérables qu'à un enrichissement des allèles locaux exposés au changement climatique. La plupart des UC de chêne sessile se trouvant dans des zones de production (ONF, 2012), il semble justifier de supposer que des peuplements peuvent y être sélectionnés, au moins pour le critère de productivité.

Etendre les provenances de chêne sessile à l'étranger, chercher des peuplements hors France est également une perspective possible.

Du caractère opérationnel des préconisations

Ce travail a vocation à être soumis aux experts à l'origine des conseils d'utilisation de MFR de chêne sessile : un dialogue entre expertise et modélisation permettra d'affiner les préconisations.

A terme, l'étude pourra si elle aboutit servir de support de décision aux gestionnaires forestiers lors de leurs entreprises de boisement. Le succès pourrait même évoluer vers le développement d'une interface automatique de conseil, qui prendrait en entrée les caractéristiques de la station à planter et l'essence souhaitée, et renverrait les provenances les plus pertinentes à utiliser.

Références

ANDRE (K.), CHAKRABORTY (D.), J.LEXER (M.), KONNERT (M.), MATULLA (C.), SCHUELER (S.), WANG (T.), WEISSENBACHER (L.) – Adapting Douglas-fir forestry in Central Europe : evaluation, application and uncertainty analysis of a genetically based model, *Eur J Forest Res*, 2016

A.O'NEILL (G.), N.AITKEN (S.), WANG (T.). – Integrating environmental and genetic effects to predict responses of tree populations to climate, *Ecological Applications*, 2010

BADEAU (V.), BOE (J.), CHEAIB (A.), CHUINE (I.), DELIRE (C.), DUFRENE (E.), FRANCOIS (C.), LEADLEY (P.), LEGAY (M.), PAGE (C.), S.GRITTI (E.), THUILLER (W.), VIOVY (N.). – Climate change impacts on tree ranges : model intercomparison facilitates understanding and quantification of uncertainty, *Ecology Letters*, 2012

BARBOSA (P.), SPINONI (J.), VOGT (J.). – European degree-day climatologies and trends for the period 1951-2011, *International Journal of Climatology*, 2-2014

BAUDOIN (R.). – Utiliser des données géographiques sous R, *Ecole doctorale 227 Sciences de la Nature et de l'Homme*, 27 avril 2012

BERGES (L.), MERIAN (P.), LEBOURGEOIS (F.). – Variabilité spatiale de la réponse au climat du chêne sessile dans la moitié Nord de la France. – *Rev. For. Fr.* LXVI, 2-2014

BOLIS (A.). – Les arbres de Verdun, déplacés pour le climat, *Le Monde*, 2016

BOUILLON (P.), BRANDO (J.), CHAUVIN (J.), DESPREZ-LOUSTAU (M-L.), GIRARD (S.), GUIBERT (M.), PIERANGELO (A.), PORQUET (I.), RICODEAU (N.), RIOU-NIVERT (P.), ROMAN-AMAT (B.). – Ressources génétiques forestières : conseils d'utilisation des matériels forestiers de reproduction – Document d'accompagnement des fiches espèces, Octobre 2017

CARTER (K.K.). – Provenance tests as indicators of growth response to climate change in 10 north temperate tree species. – *Con. J. For. Res.* Vol. 26, 2-1996

CAVERS (S.), CHALUPKA (W.), DELZON (S.), DAGDAS (S.), DUCOUSSO (A.), EHRENMANN (F.), E. ZIMMERMANN (N.), J. LEE (S.), K. HANSEN (J.), KREMER (A.), LAMY (J-B.), LIESEBACH (M.), MUSCH (B.), PSOMAS (A.), RAU (H-M.), SAENZ-ROMERO (C.), SCHNECK (V.), STEINER (W.) – Adaptive and plastic

responses of *Quercus petraea* populations to climate across Europe, *Global Change Biology*, novembre 2016

COLLINS (E.), DUCOSSO (A.), RICODEAU (N.). – Fiche de conseils d'utilisation des MFR de chêne sessile par GRECO et SER. – Version du 20/02/2017

COLLINS (E.), DUCOSSO (A.), RICODEAU (N.). – Fiche de conseils d'utilisation des MFR de chêne sessile par régions de provenance. – Version du 12/07/2017

DE FREITAS (C.R.), GRIGORIEVAL (E.A.), MATZARAKIS (A.). – Analysis of growing degree-days as a climate impact indicator in a region with extreme annual air temperature amplitude, *Climate Research*, 2010

Direction générale de la performance économique et environnementale des entreprises, Service Développement des filières et de l'emploi, Sous-direction Filières forêt-bois, cheval et bioéconomie – Instruction technique sur les matériels forestiers de reproduction éligibles aux aides de l'Etat., 02/11/2016

DUCOUSSO (A.), VERGER (S.). – Conserver les ressources génétiques du chêne sessile en France : Pourquoi, comment? – RDV techniques de l'ONF, n°23-24 (hiver-printemps 2009)

Fédération des Tonneliers de France. – Communiqué de presse du 4 juin 2015 à Paris sur l'état et les perspectives de la ressource en chêne merrain

FERNANDEZ (R.). – Les matériels forestiers de reproduction sélectionnés : analyse critique et bilan, ONF - BULLETIN TECHNIQUE n° 25 - Mars 1993 - pp. 23-34

Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat. – *Climate Change, The Physical Science Basis, 2013 – Annexe I : Atlas of Global and Regional Climate Projections*

H.PEDLAR (J.), LAWRENCE (G.), W.McKENNEY (D.), WEERSINK (A.), YANG (J.) – An economic analysis of seed source options under a changing climate for black spruce and white pine in Ontario, Canada, NRC Research Press, 2015

Institut Géographique National (IGN). – Fiches GRECO des Alpes, du Jura et des Pyrénées, versions de 2012

Institut Géographique National (IGN). – Un inventaire forestier annuel sur l'ensemble de la France métropolitaine, Juillet 2018

LEBOURGEOIS (F.). – Effet des conditions écologiques et de la nature du couvert sur la contrainte hydrique (AgroParisTech, TD_GestionEauForet_Lebourgeois_Sujet_2017)

LEVY-LEDUC (C.). – Notes de cours sur les bases statistiques du modèle linéaire, AgroParisTech

MICHAEL (C.), N.AITKEN (S.), WHITLOCK (C.). – Assisted Gene Flow to Facilitate Local Adaptation to Climate Change, *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, 2013

MOINARD (V.). – Outils de caractérisation des stations forestières en contexte de changement climatique, à destination des gestionnaires forestiers, septembre 2016-août 2017

NANSON (A.) – Génétique et amélioration des arbres forestiers, Les presses agronomiques de Gembloux, 2004

VALLEE (G.). – L'amélioration des arbres Forestiers au Ministère des Terres et Forêts du Québec, *The Forestry Chronicle*, décembre 1975

C – Zoom sur deux étapes intermédiaires et résultats complémentaires

L'article ne présentant que les principales conclusions du travail effectué, omet la description de certains résultats subsidiaires. Cette section en présente deux d'entre eux.

C1 – Extraction des valeurs IKS

L'extraction des valeurs prises par les variables IKS au niveau des peuplements sélectionnés et des points-forêt fait à elle seule l'objet d'un script R dont l'exécution demande une quarantaine de minutes. Cet algorithme produit des données intermédiaires qui sont ensuite prises en entrée dans d'autres algorithmes. En voici les principales étapes et fonctions associées (les commandes générant les données intermédiaires figurent en gras) :

PARTIE GRECO/SER :

```
# Import des rasters d'une part de SDEF_HV, GDD et TMIA (grilles de pixels de données climatiques couvrant la France km2 par km2), d'autre part de l'altitude en mètres (pixels de 250m2)
```

```
➤ fonction raster
```

```
# Import du shape des GRECO/SERs (contours des polygones des GRECO/SERs)
```

```
➤ fonction readOgr
```

```
# Refaçonnage des couches des GRECOs/SERs pour une manipulation facilitée de celles-ci
```

```
# Association des données climatiques IKS aux GRECO/SERs correspondantes
```

```
➤ fonction extract
```

```
# Sauvegarde RData des GRECOs/SERs dotées de leurs valeurs IKS
```

```
➤ fonction save
```

PARTIE PROVENANCES :

```
# Chargement des coordonnées des peuplements sélectionnés de chêne sessile
```

```
➤ fonction fread
```

```
# Ajout de l'information « altitude » aux peuplements
```

```
➤ fonction extract
```

```
# Chargement des shapes de provenance
```

```
➤ fonction readOGR
```

```
# Vérification de la cohérence entre les fichiers points et shapes des Régions de Provenance
```

```
➤ fonction over
```

```
# Association des données IKS aux points-peuplements
```

```
➤ fonction extract
```


Export csv et rdata des peuplements dotés de leurs valeurs IKS et altitudes

- fonction `write.table`

PARTIE PLANTATION :

Chargement des points-forêt

- fonction `fread`

Association des valeurs IKS et altitudes

- fonction `extract`

Export csv des points-forêt dotés de leurs valeurs IKS et altitude

- fonction `write.table`

C2 – Discrimination climatique des RP

Dans quelle mesure les variables IKS et l'altitude reflètent-elles les conditions pédo-climatiques des Régions de Provenance (RP) ?

Des modèles d'analyse de la variance (ANOVA) testant l'effet du découpage par Régions de Provenance (RP) sur les valeurs prises par les variables IKS (SDEF_HV, GDD et TMIA) ainsi que par l'altitude au niveau des points-forêts ont été réalisés.

En notant $Y_{i,k}$ les valeurs prises par les variables climatiques, μ leurs valeurs moyennes, α_i l'« effet RP » et $E_{i,k}$ des résidus aléatoires inhérents à la modélisation, le modèle linéaire s'écrit comme suit :

$$Y_{i,k} = \mu + \alpha_i + E_{i,k}$$

Où l'indice i balaye les niveaux du « facteur RP » et k les points-forêt : $i \in \llbracket 1, 19 \rrbracket$ et $k \in \llbracket 1, 4711 \rrbracket$ car il y a 4711 points-forêt susceptibles d'accueillir une plantation de chêne sessile.

Le tableau ci-dessous présente une synthèse des résultats obtenus après validation des hypothèses de normalité des distributions et de non-structuration des résidus dans celle-ci. Les valeurs indiquées sont des coefficients de détermination, $R^2 \times 100$ arrondis à l'unité, évaluant la part de la variance expliquée par le découpage (la P-value est inférieure à $2,2 \cdot 10^{-16}$ pour l'ensemble des modèles) :

SDEF_HV	Altitude	GDD	TMIA
67	76	84	87

Sensibilité de la variable au découpage



Ainsi, plus de la moitié de la variabilité des valeurs prises par les variables climatiques est inter-régions de provenances donc il y a bien une structuration climatique en fonction de ces Régions de Provenance.

Conclusion

La traduction des conseils d'utilisation des MFR établis par les experts en distances climatiques grâce à une modélisation pédo-climatique est une initiative novatrice qui semble particulièrement pertinente dans le cadre du réchauffement climatique. En effet, il existe aujourd'hui peu de travaux sur l'adéquation des provenances de chêne sessile avec leurs zones de plantation mariant dires d'experts et modélisation. Cette première session d'apprentissage a permis de montrer que ces deux approches n'étaient pas toujours cohérentes. Si planter des MFR qui soient les plus locaux possible reste la règle de vigueur, l'étude édaphique et climatique des régions de provenances de chêne sessile trahit des variations locales parfois supérieures aux différences de conditions d'une région à l'autre. Les résultats obtenus sur les conseils de type « changement climatique » ont permis de montrer que suivre ces préconisations n'impliquait pas une grande prise de risque, du moins avec les variables modélisées : les écarts climatiques estimés avec les trois variables IKS et l'altitude ne semblent pas significativement importants par rapport à utilisation locale des MFR. Les conseils de type « pénurie » mériteraient eux aussi d'être étudiés : vont-ils vraiment exactement dans le même sens que les préconisations locales ? Se rapprochent-ils des conseils de type « changement climatique » ? Ou bien ont-ils une toute autre tendance ? Le découpage des régions de provenance pourrait quant à lui également faire l'objet de modifications, à l'instar de leurs échantillonnages par les peuplements sélectionnés les constituant. La seconde partie de l'apprentissage explorera certains de ces aspects, et affinera l'étude notamment grâce au filtrage des points-forêt par une probabilité de présence de chêne sessile.

Remerciements

Je remercie Brigitte Musch et Yves Rousselle pour avoir encadré cette première session d'apprentissage ; leur précieux accompagnement m'a permis d'atteindre les objectifs qui ont été fixés au commencement de celle-ci.

Je suis également très reconnaissante envers l'aide dispensée par Valentin Bouttier, Quentin Girard et Noémie Pousse.

Monique Guibert, Cécile Joyeux, Jean-Pierre Renaud et Nicolas Ricodeau m'ont par ailleurs fourni des données indispensables à la réalisation de mon projet et je leur en remercie.

Enfin, c'est à l'ensemble des collègues (permanents et non-permanents) que j'ai cotoyés quotidiennement durant cette période que vont mes plus chaleureux remerciements : ils ont contribué à la qualité de l'ambiance de travail.