Comment mieux appréhender les effets du changement climatique à partir d'un réseau d'expérimentation : exemple du CRPF Rhône-Alpes en Drôme et Ardèche

Dominante d'approfondissement

Gestion forestière

Manon DESALME

Année 2014-2015

FICHE SIGNALÉTIQUE D'UN TRAVAIL D'ÉLÈVE AgroParisTech

Formation des ingénieurs forestiers d'AgroParisTech	**TRAVAUX D'ÉLÈVES**
TITRE : Comment mieux appréhender les effets du changement climatique à partir d'un réseau d'expérimentation : exemple du CRPF Rhône-Alpes en Drôme et Ardèche	**Mots clés : changement climatique ; réseau de placettes ; sapin pectiné ; châtaignier**
AUTEUR(S) : Manon Désalme	**Promotion : 2015**
Caractéristiques : 1 volume ; 55 pages ; 45 figures ; 14 annexes ; 52 cartes ; bibliographie.	

CADRE DU TRAVAIL

ORGANISME PILOTE OU CONTRACTANT : Centre Régional de la Propriété Forestière de Rhône-Alpes

Nom du responsable : Christophe Barbe
Fonction : Ingénieur forestier, antenne Drôme-Ardèche du CRPF Rhône-Alpes

Nom du correspondant AgroParisTech : Eric Lacombe

Option ☐ **D. d'approfondissement** ☐ **CEI** ☐	**Stage 2A** ☐ **Stage fin d'études** ■ **Date de remise : 27/10/2015**	**Autre** ☐

SUITE À DONNER (réservé à la Direction des études)

☐ **Consultable et diffusable**
☐ **Confidentiel de façon permanente**
☐ **Confidentiel jusqu'au / / , puis diffusable**

Illustration : CRPF Rhône-Alpes

AgroParisTech

CNPF-IDF

CRPF Rhône-Alpes

Comment mieux appréhender les effets du changement climatique à partir d'un réseau d'expérimentation : exemple du CRPF Rhône-Alpes en Drôme et Ardèche

Résumé

Le contexte climatique en Ardèche et en Drôme, ainsi que le contexte forestier, sont décrits dans le but d'identifier les enjeux forts sur ce territoire. L'état des lieux des sites expérimentaux du Centre Régional de la Propriété Forestière de Rhône-Alpes en Drôme et Ardèche est effectué pour évaluer s'il est adapté à la mise en place d'un réseau expérimental sur la thématique du changement climatique. Puis, trois modèles de zones bioclimatiques plus ou moins propices à la présence de différentes essences forestières sont comparés, et testés sur le secteur Drôme-Ardèche pour le sapin pectiné et le châtaignier, dans le but de voir si ces modèles sont utilisables pour la mise en place d'un réseau d'expérimentation sur le changement climatique. Des projections climatiques sont utilisées pour situer les futures zones à risque pour le sapin pectiné, le hêtre, le châtaignier et le pin sylvestre. Une clé de détermination de ces zones est élaborée et une proposition d'un nouveau réseau « changement climatique » est faite. Enfin, le coût de l'élaboration de ce nouveau réseau est évalué.

We describe climatic and forest context in Drôme and Ardèche in order to identify the main stakes of the land. The experimental network of the Rhône-Alpes Centre Régional de la Propriété Forestière inventory of fixtures is made in Drôme and Ardèche, to see if it fits to and experimental network for climate change study. Then, three bioclimatic zones (which fit more or less with different trees species) models are compared and tested in Ardèche and Drôme for *Abies Alba* and *Castanea Sativa,* to evaluate the capacity of these models to help to create a climate change study network. Climatic projection are used to situate future dangerous areas for fir tree (*Abies Alba),* Beech (*Fagus Sylvatica),* chestnut tree (*Castanea Sativa)* and scots pine (*Pinus Sylestris)*. We made a key to identify these areas, and propose a new "climate change" experimental network. Finally, we evaluated the network cost.

Remerciements

Je tiens à remercier Jean Lemaire, qui m'a épaulée et guidée tout au long de ce stage, et dont l'aide m'a été très précieuse tout au long de ce travail.

Merci à Christophe Barbe, pour m'avoir soutenue à chaque rebondissement de ce stage, en me rappelant toujours qu' « il faut savoir se perdre pour trouver son chemin », et pour toutes les relectures de mon rapport.

Je remercie également toute l'équipe de techniciens de Drôme-Ardèche, qui m'a sans problème accordé le temps nécessaire pour me montrer les phénomènes de dépérissement des peuplements, et pour la préparation et la réalisation de la phase terrain.

Merci à Hervé le Bouler, pour avoir pris le temps de m'expliquer le fonctionnement d'IKS.

Merci à Christian Piedallu et Vincent Perez pour m'avoir donné les renseignements nécessaires sur les modèles du LERFoB.

Merci à Eric Lacombe pour son aide précieuse pour la réalisation de ce travail.

Merci également à Sabine Girard pour ses conseils et la relecture de mon rapport.

Enfin, merci à Marie Genthon pour sa gentillesse, ses pauses café, et pour son ventilateur qui aura rendu les semaines de canicule plus supportables.

Sommaire

Introduction 1
1. Contexte et objectifs 1
1.1. La forêt en Drôme-Ardèche 1
1.1.1. La forêt 1
1.1.2. Les entreprises 1
1.1.3. La récolte des bois 2
1.2. Le changement climatique 3
1.3. Le climat en Drôme et Ardèche, aujourd'hui et demain 5
1.4. Les activités du CRPF Rhône-Alpes 7
1.4.1. Les missions du CNPF 7
1.4.2. Le CNPF, un organisme de conseil 7
1.4.3 La délégation régionale du CRPF Rhône-Alpes 8
1.4.4. L'antenne Drôme-Ardèche 8
1.5. Objectifs 9
2. Analyse du réseau existant dans un contexte de recyclage de placettes pour une étude sur le changement climatique 10
1.1. Les essences 13
1.2 Les thèmes 13
1.3 Les âges 14
1.4. Le suivi des placettes 15
1.5. Bilan et objectifs revus, la démarche adoptée 16
3. Construction d'un réseau de substitution 18
3.1. Méthode utilisée pour cibler les peuplements intéressants dans un contexte de changement du climat 18
3.2. Les modèles IKS, LERFoB et BioClimSol 18
3.2.1 La notion de modèle de niche 18
3.2.2. Le modèle IKS 19
3.2.3 Les modèles du LERFoB 22
3.2.4 Les modèles BioClimSol 23
3.2.5 Une première lecture croisées des trois modèles 27
3.3. Une campagne de terrain pour valider localement les modèles 28
3.3.1 Matériel et méthode 28
3.3.2. Résultats 30
3.3 Analyse et comparaison des différents modèles 34

3.3.1 Les données utilisées 34
3.3.2 Le projet ASTEC : comparaison de l'efficacité deux modèles 35
3.3.3 Les tests sur le territoire Drôme-Ardèche 35
3.4 L'utilisation de données climatiques du portail Drias 36
3.4.1 Le déplacement des aires climatiques au cours du temps 36
3.4.2 L'élaboration d'une clé de détermination de terrain pour cibler les peuplements utiles à la constitution d'un réseau « changement climatique » 40
4. Proposition d'un réseau « changement climatique » et évaluation de sa faisabilité 43
4.1. Le nombre de dispositifs expérimentaux nécessaires 43
4.2 La répartition des dispositifs expérimentaux du réseau « changement climatique » 43
4.3 Un positionnement possible des placettes vigies 45
4.4 Le suivi des réseaux 46
4.4.1 Les mesures à effectuer et la fréquence des visites 46
4.4.2 Le nombre d'arbres mesurés 47
4.5 Les coûts des différents réseaux 47
4.5.1 L'évaluation du coût d'un réseau 47
4.5.2 Une proposition de planification de l'installation des réseaux 49
5. Les limites et perspectives 51
5.1 Les limites de l'étude 51
5.2 Les perspectives 51
5.3 Discussion 54
Conclusion 54

Abréviations utilisées

ASTEC : Analyse Spatiale et Temporelle des Espèces et des Communautés

BD : Base de données

CNPF : Centre National de la Propriété Forestière

CNRM : Centre National de Recherches Météorologiques

COP21 : Conférence des parties de la Convention-cadre des Nations unies

CRPF : Centre Régional de la Propriété Forestière

DGAL : Direction Générale de l'Alimentation

DRAAF : Direction Régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt

ENGREF : Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts

ETP : Evapotranspiration Potentielle

FCBA: institut technologique des Forêt, Cellulose, Bois-construction et Aménagement

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

IDF : Institut pour le Développement Forestier

IGN : Institut national de l'information géographique et forestière

IKS : Index Klima Struzh

LERFoB : Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt Bois

MAAF : Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt

MEDCIE : Mission d'Etude et de Développement des Coopérations Interrégionales et Européennes

MEDDE : Ministère de l'Ecologie, du développement Durable et de l'Energie

ONF: Office National des Forêts

PACA : Provence-Alpes-Côte d'Azur

PEFC: Programme for the Endorsement of Forest Certification schemes

PSG : Plan Simple de Gestion

PSDRF : Protocole de Suivi Dendrométrique des Réserves Forestières

RCP : Representative Concentration Pathways

SAFRAN : Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Adaptés à la Nivologie

SER : Sylvoécorégion

SRES : Special Report on Emissions Scenarios

SSP : Shared Socioeconomic Pathways

Liste des tableaux et figures

Figure 1 : Comparaison des scénarios RCP et SRES

Figure 2 : Carte des SER en Drôme et Ardèche

Figure 3 : Evolution du bilan hydrique estival en Drôme et Ardèche par décennie depuis 1960 selon les données SAFRAN de Météo France

Figure 4 : Les différentes antennes du CRPF Rhône-Alpes

Figure 5 : Secteurs CRPF de l'Ardèche

Figure 6 : Secteurs CRPF de la Drôme

Figure 7 : Répartition des placettes du CRPF e Drôme et Ardèche

Figure 8 : Essences présentes dans le réseau de placettes du CRPF

Figure 9 : Répartition des âges des placettes

Figure 10 : Répartition de la fréquence de visite par placette (nombre de visites par décennie)

Figure 11 : Démarche adoptée pour la proposition d'un réseau de placettes « changement climatique »

Figure 12 : Fonctionnement d'un modèle de niche

Figure 13 : Représentation bidimensionnelle des climats possibles pour IKS

Figure 14 : Fonctionnement du modèle IKS

Figure 15 : Fonctionnement des modèles du LERFOB

Figure 16 : Illustration de la théorie du boxeur en lien avec les seuils de tolérance à la sécheresse

Figure 17 : Fonctionnement de BioClimSol

Figure 18 : Carte des peuplements visités pour le test des trois modèles, répartis selon la probabilité de présence P d'après les modèles de niche du LERFoB

Figure 19 : Evolution du bilan hydrique de juin à août selon deux scénarios du GIEC d'après les données du portail Drias.

Figure 20 : Différences entre bilans hydriques de juin à août d'une période trentenaire à l'autre.

Figure 21 : Résultats de l'analyse de variance sur les peuplements de sapin et hêtre en Drôme-Ardèche

Figure 22 : Résultat de l'analyse de variance sur les peuplements de pin sylvestre et châtaignier en Drôme-Ardèche

Figure 23 : Répartition des peuplements propices à de nouvelles placettes selon la zone de vigilance climatique

Figure 24 : Peuplements soumis à PSG et susceptibles d'entrer dans un réseau « changement climatique »

Figure 25 : Répartition des mises en place de quatre réseaux dans le temps

Figure 26 : Estimation des coûts annuels de mise en place et suivi de deux réseaux installés à une année d'intervalle.

Figure 27 : Estimation des coûts annuels de mise en place et suivi de quatre réseaux installés lors de quatre années successives.

Figure 28 : Secteurs avec placettes ONF susceptibles d'être intéressantes pour un réseau « changement climatique

Tableau 1: Principales essences utilisées par la filière forêt-bois en Rhône-Alpes

Tableau 2 : Principales essences en forêt privée de Drôme et Ardèche et leur valorisation

Tableau 3 : Caractéristiques principales des scénarios RCP

Tableau 4 : Thèmes des placettes du réseau.

Tableau 5 : Synthèse des sites expérimentaux et de référence du CRPF Rhône-Alpes en Drôme-Ardèche

Tableau 6 : Exemple de seuils limites supérieurs pour le sapin pectiné

Tableau 7 : Exemple de seuils limites supérieurs pour le châtaignier

Tableau 8 : Variables écologiques utilisées pour l'élaboration des modèles du LERFoB

Tableau 9 : Variables écologiques sélectionnées pour l'élaboration des modèles du sapin, du hêtre, du châtaignier et du pin sylvestre

Tableau 10 : Définition des seuils de vigilance climatique en fonction de la récurrence des années critiques en termes de déficit hydrique climatique (P-ETP) pour BioClimSol 1

Tableau 11 : Synthèse comparative des trois modèles

Tableau 12 : Répartition des peuplements mesurés selon la probabilité P de présence de l'essence selon les modèles du LERFoB

Tableau 13 : Comparaison des résultats pour le sapin

Tableau 14 : Comparaison des résultats pour le châtaignier

Tableau 15 : Corrélations entre les résultats des différents modèles sur les relevés de terrain pour les relevés dans les peuplements de Sapin

Tableau 16 : Corrélations entre les résultats des différents modèles pour les relevés dans les peuplements de Châtaignier

Tableau 17 : Définition des trois groupes d'essences

Tableau 18 : Valeurs seuil d’altitudes pour les essences montagnardes et collinéennes aux différents horizons temporels selon les données Drias de bilan hydrique climatique estival

Tableau 19 : Clé de détermination du niveau de vigilance climatique d’un peuplement montagnard ou collinéen selon son altitude

Tableau 20 : Liste des sites de référence et d’expérimentation du CRPF susceptibles d’être réutilisés pour un réseau « changement climatique ».

Tableau 21 : Répartition des placettes vigies existantes en châtaignier et pin sylvestre dans les différentes zones de vigilance climatique

Tableau 22 : Evaluation du coût d’un réseau minimal constitué uniquement de nouveaux dispositifs pour une essence

Tableau 23 : Localisation des placettes de suivi de l’ONF en Drôme et Ardèche en fonction de leur essence et de leur thème

Introduction

A la veille de la COP21 à Paris de novembre à décembre 2015, et suite à un été soumis à plusieurs épisodes caniculaires en France (selon météo France, le cumul des précipitations au mois de juillet 2015 à Montélimar (Drôme) est de 7,6 mm, contre 50 mm pour la normale 1991-2000), le réchauffement climatique est au centre des préoccupations. Le cinquième rapport du GIEC indique que les trois dernières décennies ont été les plus chaudes depuis 1850, et que la température moyenne à la surface de la Terre a augmenté d'environ 1°C entre 1901 et 2012 (MEDDE, 2014).

L'Ardèche et la Drôme sont deux départements de Rhône-Alpes particulièrement soumis au changement climatique. On compte en effet 6 des 9 climats français sur ce territoire (Joly et.al. 2010). Des climats à tendances montagnardes et méditerranéennes se côtoient sur des espaces très proches, parfois à moins de 20 km à vol d'oiseau. Ce sont de plus des territoires très boisés, avec 48% de forêt en Drôme et 52% en Ardèche, dont respectivement 75% et 90% sont privés. Avec des essences telles que le sapin pectiné, le châtaignier ou encore le douglas, les enjeux liés à ces changements du climat sont forts pour les propriétaires et pour la filière bois.

Le 6 décembre 2013, les troisièmes assises de la filière Forêt-Bois en Sud Rhône-Alpes, consacrées au changement climatique, ont dressé la liste des actions à accomplir en lien avec le changement climatique. Ces assises rassemblaient l'ensemble de la filière bois sur secteur, ainsi que les Conseils départementaux de Drôme et Ardèche. Les deux départements se sont engagés à soutenir les expérimentations relatives aux impacts du changement climatique sur les forêts drômoise et ardéchoise, pour adapter les choix sylvicoles. Pour prévenir les effets du changement climatique, il a été proposé, entre autres, de réaliser un bilan des réseaux de placettes forestières en Drôme et Ardèche, de développer des essais autour des essences et de leurs provenances, et de consolider les outils de diagnostic et de prévention existants par rapport au changement climatique (Conseils régionaux de Drôme et Ardèche, 2014).

L'un des aboutissements de ces travaux communs est le projet de création d'un réseau expérimental de placettes forestières en Drôme et Ardèche, à partir de placettes en place au sein des réseaux existants, notamment celui du CRPF Rhône-Alpes. L'objectif d'un tel réseau est de disposer de données fiables et précises sur lesquelles le CRPF pourrait s'appuyer pour assurer son rôle de conseiller auprès des propriétaires, en termes de zones à risque à signaler et d'essences à implanter.

1. Contexte et objectifs

1.1. La forêt en Drôme-Ardèche

1.1.1. La forêt

En Drôme, 242 000 hectares de forêt sont possédés par 40 000 propriétaires privés. La surface moyenne d'une propriété est inférieure à 6 hectares, le plus souvent répartis en plusieurs parcelles (Conseil départemental de la Drôme, 2015). Sur le territoire ardéchois, ce sont 50 000 propriétaires qui se partagent 264 000 hectares, avec des propriétés d'une surface moyenne de 3 hectares.

1.1.2. Les entreprises

On compte une centaine d'entreprises de la filière bois sur les deux départements, des exploitations forestières aux scieries (Préfecture de l'Ardèche, 2012).

1.1.3. La récolte des bois

En Ardèche, environ deux tiers du volume récolté en 2013 étaient destinés à façonner du bois d'œuvre, les essences utilisées étant principalement le Douglas, le Sapin et de l'Épicéa. En Drôme, on observe un quasi-équilibre entre bois d'œuvre (essentiellement avec du Sapin et de l'Épicéa), bois d'industrie et bois énergie (Agreste, 2015), avec au nord du département une exploitation du châtaignier tournée vers le piquet et les petits sciages.

Tableau 1: Principales essences utilisées par la filière forêt-bois en Rhône-Alpes (Source : Agreste, 2015)

Principaux résultats en 2013

	Ain	Ardèche	Drôme	Isère	Loire	Rhône	Savoie	Haute-Savoie	**Rhône-Alpes**	France
LA RÉCOLTE DE BOIS (en milliers de m³)										
Bois d'œuvre	252	170	59	242	345	301	222	238	**1 829**	18 535
dont conifères	200	168	47	209	340	293	215	236	**1 708**	13 673
sapin-épicéa	177	63	38	200	185	136	209	232	**1 240**	6 512
douglas	10	76	ε	4	123	149	3	2	**367**	2 107
feuillus	52	2	12	33	5	8	7	2	**121**	4 862
Bois d'industrie	31	35	63	74	27	27	3	1	**261**	10 403
Bois énergie	69	58	52	133	32	29	40	33	**446**	6 915
TOTAL RECOLTE	**352**	**263**	**174**	**449**	**404**	**357**	**265**	**272**	**2 536**	**35 853**
dont bois certifié	172	96	61	105	144	103	120	75	**876**	18 581
LA PRODUCTION DES SCIAGES (en milliers de m³)										
conifères	298	80	35	154	160	58	91	153	**1 029**	6 544
dont sapin-épicéa	274	26	31	139	91	25	87	151	**824**	3 626
douglas	16	33	3	11	51	33	2	1	**150**	751
feuillus	38	1	3	5	2	4	ε	ε	**53**	1 305
TOTAL SCIAGES	**336**	**81**	**38**	**159**	**162**	**62**	**91**	**153**	**1 083**	**7 901**
dont sciages certifiés	97	26	27	51	20	12	40	12	**285**	3 074
LE NOMBRE D'ENTREPRISES										
exploitations forestières sans activité scierie	57	23	36	116	26	24	27	43	**352**	2 305
exploitations forestières avec activité scierie	26	14	9	20	28	10	14	28	**149**	802
scieries sans exploitation forestière	6	18	6	22	24	7	21	10	**114**	834

Source : Agreste - Enquête exploitations forestières et scieries 2013

Tableau 2 : Principales essences en forêt privée de Drôme et Ardèche et leur valorisation

Essence	% surface forêt privée Ardèche	% surface forêt privée Drôme	Valorisation
Châtaignier	17%	4%	Forte valeur patrimoniale en Ardèche. Ebénisterie, menuiserie, parquet, perches, piquets…
Hêtre	8%	10%	Tranchage, déroulage, ébénisterie, menuiserie, parqueterie…
Douglas	7%	-	Déroulage, charpente, menuiserie, emballage…
Sapin pectiné	5%	1%	Charpente, caisserie, menuiserie…
Pin sylvestre	23%	38%	Tranchage, trituration, menuiserie
Autres résineux (dont épicéa)	6%	2%	

Sources : CRPF Rhône-Alpes (2015), Vade-Mecum du Forestier (2006)

De ces données ressortent les essences à fort enjeu du secteur, à savoir le châtaignier, le hêtre, le douglas, le sapin pectiné et le pin sylvestre.

1.2. Le changement climatique

Le rapport du GIEC de 2007, basé sur les scénarios d'émissions SRES (du rapport Special Report on Emissions Scenarios), prévoit, pour les deux prochaines décennies, une élévation de la température globale de 0,2°C par décennie en considérant les augmentations d'émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols, et de 0,1°C tous les 10 ans sans les considérer. Ainsi, en fonction du scénario, on peut s'attendre à une augmentation des températures de 0,6°C à 4,0°C entre les périodes 1980-1999 et 2090-2099 (GIEC, 2007).

Le cinquième rapport du GIEC, publié en 2014, mentionne plusieurs observations alarmantes : les températures observées au cours de la décennie 2001-2010 n'avaient jamais été aussi hautes depuis 1850. Entre 1901 et 2012, la température moyenne à la surface de la Terre a augmenté de 1°C environ (MEDDE, 2013).

Ce dernier rapport en date s'appuie sur de nouveaux scénarios établis par la communauté scientifique : les scénarios RCP (Representative Concentration Pathway), se basant sur des profils d'évolutions possibles des concentrations de l'atmosphère en gaz à effet de serre, ozone et précurseurs d'aérosols. Les concentrations en gaz à effet de serre sont modélisées sur la période 2006-2300, à partir de données de forçage radiatif, c'est-à-dire la différence entre le rayonnement radiatif descendant et le rayonnement ascendant au sommet de la troposphère résultant de la variation de la concentration en gaz à effet de serre. Par exemple, le scénario RCP 4.5 désigne celui basé sur l'hypothèse d'un forçage de 4,5 watts par mètre carré après 2100. En 2011, le forçage radiatif est estimé à 2,4W/m². En parallèle, les RCP sont validés par des scénarios d'évolutions socio-économiques (SSP) (MEDDE, 2013).

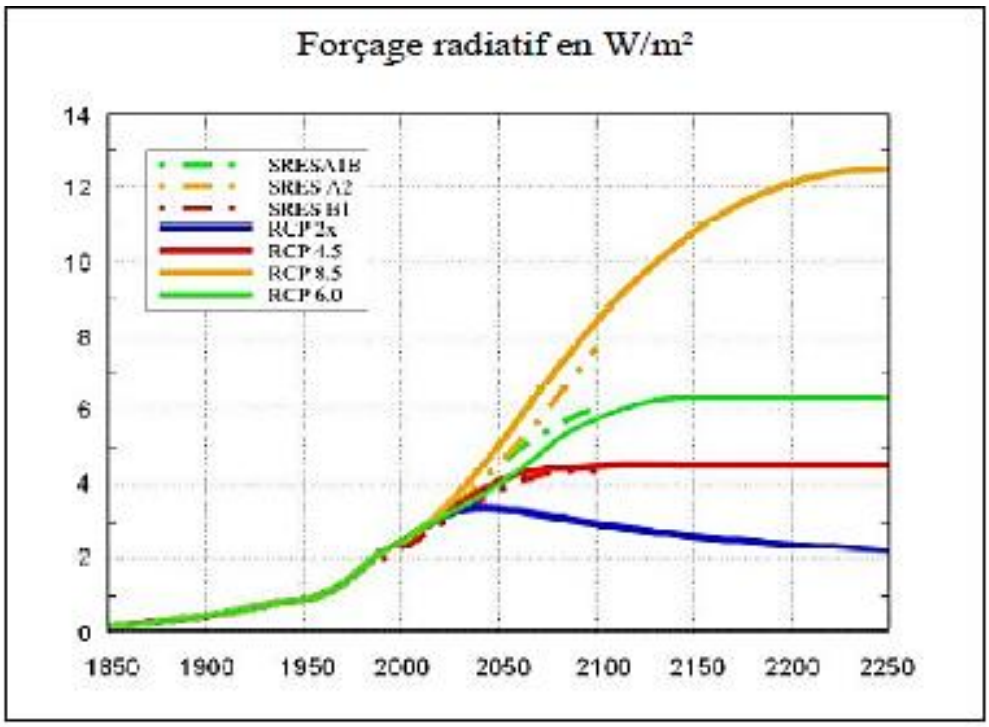
Ces études ont abouti à quatre nouveaux scénarios de référence, dont trois se rapprochent des anciens scénarios SRES (MEDDE, 2013).

Tableau 3 : Caractéristiques principales des scénarios RCP (Source : MEDDE, 2013).

Scénario	Forçage radiatif	Concentration de GES(ppm)	Trajectoire
RCP 8.5	>8.5W/m² en 2100	>1370 eq-CO2 en 2100	Croissante
RCP 6.0	6W/m² au niveau de stabilisation après 2100	850 eq-CO2 au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP 4.5	4.5W/m² au niveau de stabilisation après 2100	660 eq-CO2 au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP 2.6	Pic à 3W/m² avant 2100 puis déclin	Pic à 490 eq-CO2 avant 2100 puis déclin	Pic puis déclin

La figure 1 compare les scénarios SRES et RCP. On y observe des similitudes entre les allures des courbes du RCP 6.0 et du SRES A1B, ainsi qu'entre le CRP 4.5 et le SRES B1. Le RCP 2.6, qui intègre quant à lui des actions politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre, n'a pas d'équivalent parmi les anciens scénarios (MEDDE, 2013).

Figure 1: comparaison des scénarios RCP (lignes pleines) et SRES (en pointillés). (Bleu : RCP 2.6 ; Rouge : RCP 4.5 et SRES A2 ; Orange : SRES A2 et RCP 8.5 ; Vert : RCP 6.0 et SRES A1B). (Source : MEDDE, 2013)



L'ensemble des scénarios sont équiprobables : il n'est pas possible à ce jour d'affirmer que l'un d'entre eux est plus plausible que les autres (Drias, 2015). Si l'on « moyenne » l'ensemble des scénarios, on arrive à un scénario intermédiaire (ici le RCP 4.5).

Il n'est pas possible d'ignorer ces prévisions d'évolution climatique lorsque l'on raisonne à l'échelle de la vie d'un arbre. Les peuplements forestiers ont un temps de vie long, et sont particulièrement sensibles à des changements de climat, même prévus sur des pas de temps de plusieurs dizaines d'années. En effet, une des conséquences de cette transition climatique pourrait être une redistribution en latitude et altitude des aires de distribution des essences (Lenoir *et al*. 2008).

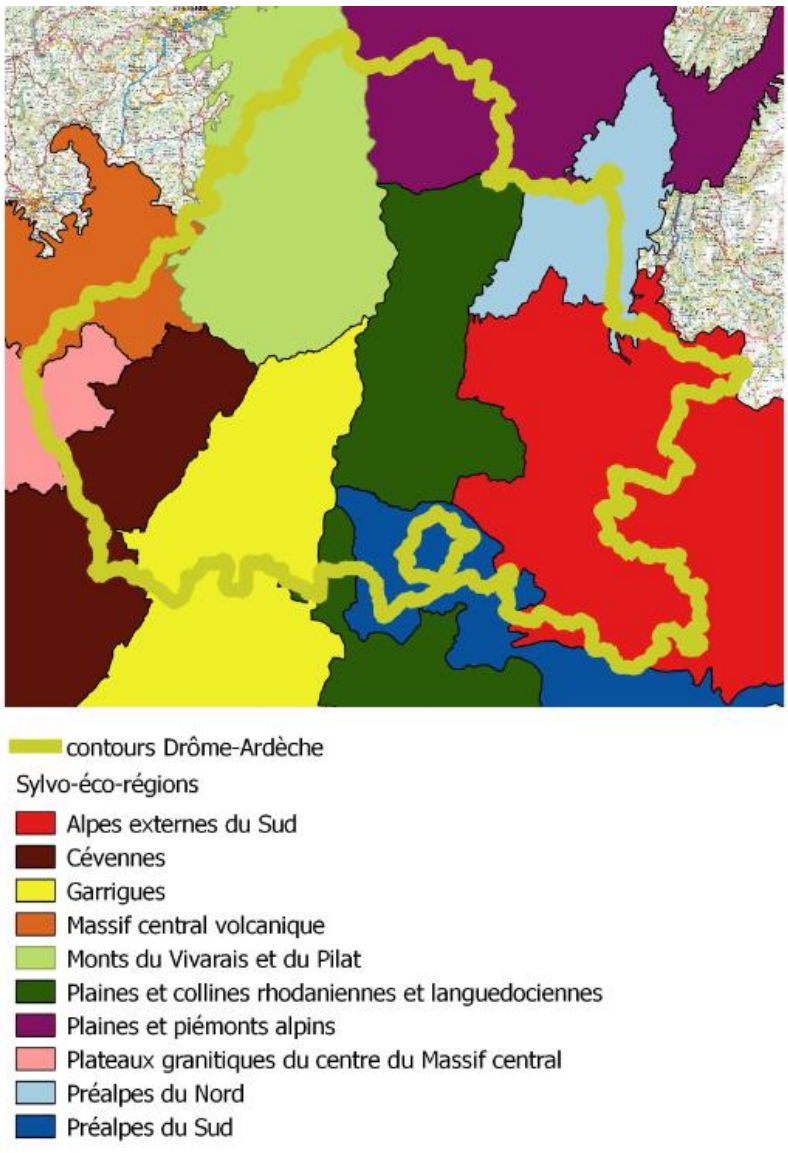
La COP21 aura lieu à Paris en décembre 2015. Il s'agit d'une conférence rassemblant les parties de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques, afin d'aboutir à un accord international sur le climat applicable à tous les pays. Si l'objectif de la Conférence des Parties est de trouver des mesures afin de lutter contre le dérèglement climatique (COP21, 2015), il reste nécessaire d'agir pour s'adapter aux changements prédits. A une échelle régionale, cette tâche est d'autant plus difficile à réaliser que les scénarios présentent des incertitudes : on peut ainsi observer sur la figure 1 que les prévisions diffèrent fortement. Les forçages radiatifs varient quasiment du simple au triple dès 2100. Ces scénarios s'appliquent à une échelle mondiale. Il est difficile d'estimer leurs conséquences sur les peuplements forestiers à l'échelle régionale. Plusieurs facteurs sont à considérer en plus des simples évolutions climatiques. La présence de pathogènes peut amplifier les effets des à-coups climatiques : gui, maladie des bandes rouges, chancres, phytophtora, typographes, cynips et autres insectes … De ce fait, le forestier doit en permanence se demander s'il observe les effets du climat ou bien de pathogènes.

1.3. Le climat en Drôme et Ardèche, aujourd'hui et demain

Si les études du GIEC donnent des indications à l'échelle globale, il est nécessaire de s'intéresser à la question d'un point de vue plus local pour réfléchir à plus petite échelle, afin d'aider le gestionnaire à agir au niveau de sa parcelle, ou à minima de sa forêt.

Une sylvoécorégion (SER) se définit comme « la plus vaste zone géographique à l'intérieur de laquelle les facteurs déterminant la production forestière ou la répartition des grands types d'habitat forestier varient de façon homogène entre des valeurs précises, selon une combinaison originale, différente de celles des SER adjacentes». Les SER sont donc des zones caractérisées par des conditions pédoclimatiques qui leur sont propres. Les départements de Drôme et Ardèche sont couverts par 10 SER différentes parmi les 86 de France, allant de la garrigue aux piémonts alpins (figure 2) (IFN, 2011). Le secteur est donc très contrasté d'un point de vue pédoclimatique. Les sols sont d'origine volcanique du côté du Massif Central, alors que l'on trouve des sols carbonatés dans les Alpes, et des alluvions dans la vallée du Rhône. Ils sont très superficiels dans les garrigues et peu propices à la production forestière. Dans les Préalpes du Nord, on trouve des substratums calcaires épais, souvent à fort potentiel. Le climat, sous influence méditerranéenne au sud des deux départements, devient déjà montagnard dans les Préalpes du Sud.

Figure 2 : Carte des SER en Drôme et Ardèche

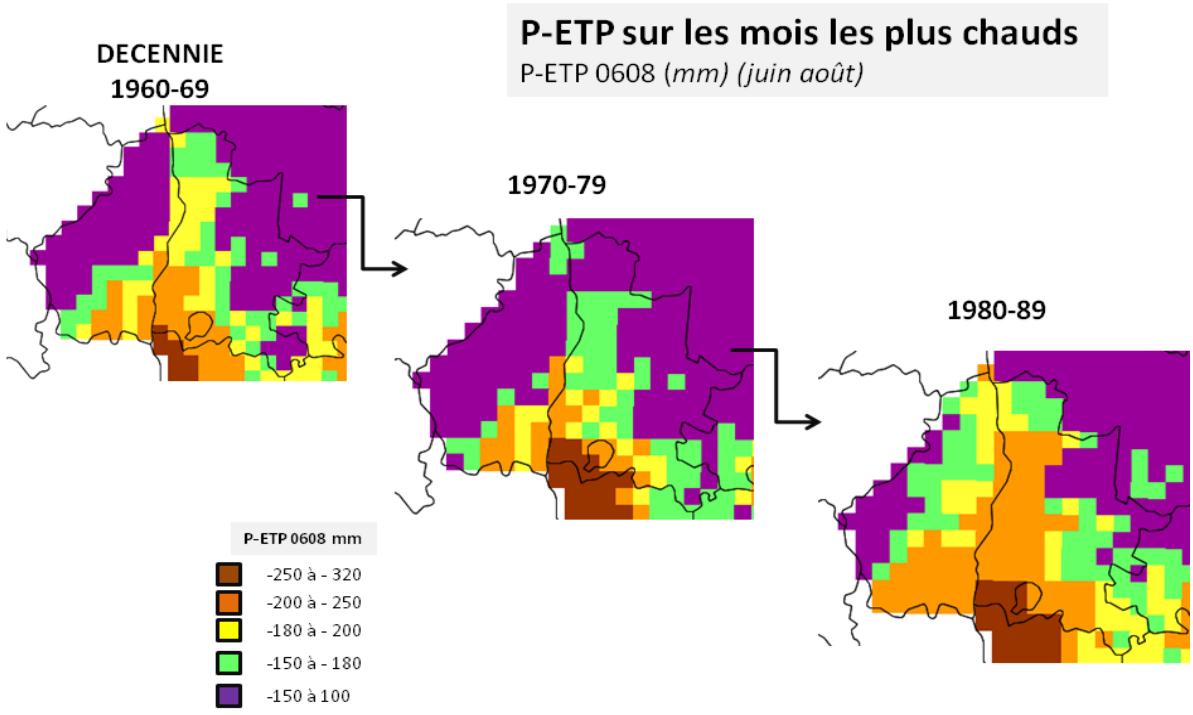


La diversité des SER engendre des gradients pour différents paramètres pédoclimatiques, avec des sols plus ou moins profonds aux textures diverses, et des climats très différents, comme le décrit le tableau en annexe 1.

Les départements Drôme et Ardèche sont influencés par le climat méditerranéen, de par des températures moyennes élevées : 23,5°C en juillet et 5,6°C en janvier à Montélimar de 1992 à 2012, les températures maximales moyennes annuelles dépassant 20°C et les températures minimales moyennes annuelles étant supérieures à 7°C. Les cumuls trimestriels de précipitations sont en moyenne inférieurs à 160 mm en plaine. Les précipitations sont maximales en altitude, avec des pics à l'automne : durant les épisodes cévenols, on relève plus de 250 mm de pluie en moins de 24 heures dans le Vivarais (Auffray *et al*., 2012). Des cartes des précipitations et températures sont disponibles en annexe 2.

Les deux départements sont soumis au changement climatique, comme le montre la figure 3 cartographiant le bilan hydrique estival à différentes dates sur le territoire Drôme Ardèche. Le bilan hydrique correspond à la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration.

Figure 3 : Evolution du bilan hydrique estival en Drôme Ardèche par décennie depuis 1960 selon les données SAFRAN de Météo-France



Une étude de la MEDCIE PACA (Mission d'Etude et de Développement des Coopérations Interrégionales et Européennes), basée sur les scénarios SRES du GIEC, prévoit dans le grand Sud-Est pour l'horizon 2030 une augmentation de la température moyenne en été de 1,1 à 2,1°C selon le scénario utilisé, et à l'horizon 2080 une baisse des précipitations moyennes cumulées par an de 350 mm sur la région Rhône-Alpes (MEDCIE Grand Sud-Est, 2008).

Une étude basée sur le scénario SRES A2 du GIEC prévoit des canicules estivales de plus en plus fréquentes en France, avec en moyenne 25 à 55 journées à plus de 35°C par été à Toulouse à la fin du XXIème siècle, alors que l'on en recense 3 à 5 actuellement. Dans le sud des départements Drôme et Ardèche, le scénario A2 prévoit jusqu'à 16 jours à plus de 35°C. (Auffray *et al.*, 2012).

1.4. Les activités du CRPF Rhône-Alpes

1.4.1. Les missions du CNPF

Le CRPF Rhône-Alpes est une délégation du Centre National de la Propriété Forestière (CNPF). C'est un organisme public, administré par un conseil de propriétaires élus. Le CNPF, et par conséquent le CRPF Rhône-Alpes, a pour mission :

- l'amélioration et le développement de la gestion des forêts
- la promotion et l'agrément des Plans Simples de Gestion
- le regroupement des propriétaires forestiers
- la sensibilisation et la formation des propriétaires
- la participation à la protection et à la pérennité de la forêt
- la contribution à la mise en compte de la forêt privée dans la société et l'aménagement du territoire
- le soutien de la certification PEFC (promouvoir la gestion durable des forêts)

(CRPF Rhône-Alpes, 2015).

Le technicien doit disposer d'outils de terrain pour permettre au CNPF d'informer les forestiers. Les projets menés consistent à :

- évaluer, valider et adapter de manière pragmatique aux contextes sociaux-pédoclimatiques locaux le progrès et la technique, pour répondre aux besoins exprimés par la filière forêt-bois
- garantir aux sylviculteurs une information technique objective et indépendante de tout intérêt commercial
- développer une expertise technique actualisée et localement adaptée, pour être un interlocuteur technique crédible auprès des instances et des acteurs de la filière
- assurer le transfert technique auprès des propriétaires par des formations et des informations s'appuyant sur des sites expérimentaux permettant une vulgarisation par des exemples de proximité
- opérer un retour vers le terrain à partir des expérimentations face aux résultats de la recherche obtenus par modélisation.

Pour cela, le CNPF dispose de 5 000 sites expérimentaux répartis sur toute la France. Ils sont géoréférencés, mesurés, et dont les résultats sont compilés dans une base de donnée interactive appelée Ilex. Cette base de données peut être intéressante pour les chercheurs souhaitant confronter leurs modélisations à des données de terrain.

1.4.2. Le CNPF, un organisme de conseil

Le technicien de CNPF a un rôle de conseiller auprès des propriétaires privés. Dans ce contexte de changement climatique, il peut être en mesure de donner son avis quant aux choix sylvicoles effectués par les particuliers. Pour bien conseiller, il est nécessaire de pouvoir d'appuyer sur des données fiables. Pour cela, le CRPF Rhône-Alpes dispose aujourd'hui de sites d'expérimentation et de référence, ainsi que de placettes vigies, suivie selon le protocole du Département de la Santé des Forêts (DSF). Le guide de l'expérimentation forestière (Rosa *et. al.*, 2011) définit deux types de placettes : la **référence mesurée** (site de référence) et le

dispositif expérimental (site d'expérimentations**)**. La référence mesurée correspond à une placette dont le but est d'illustrer une modalité d'un facteur, comme la plantation d'une essence, ou une pratique sylvicole. Sa principale vocation est la vulgarisation. Le dispositif expérimental, ou essai, compare plusieurs modalités d'un facteur sur une même placette, l'objectif étant *in fine* de traiter statistiquement les résultats pour quantifier l'influence d'un facteur, voire de modéliser certains phénomènes observés.

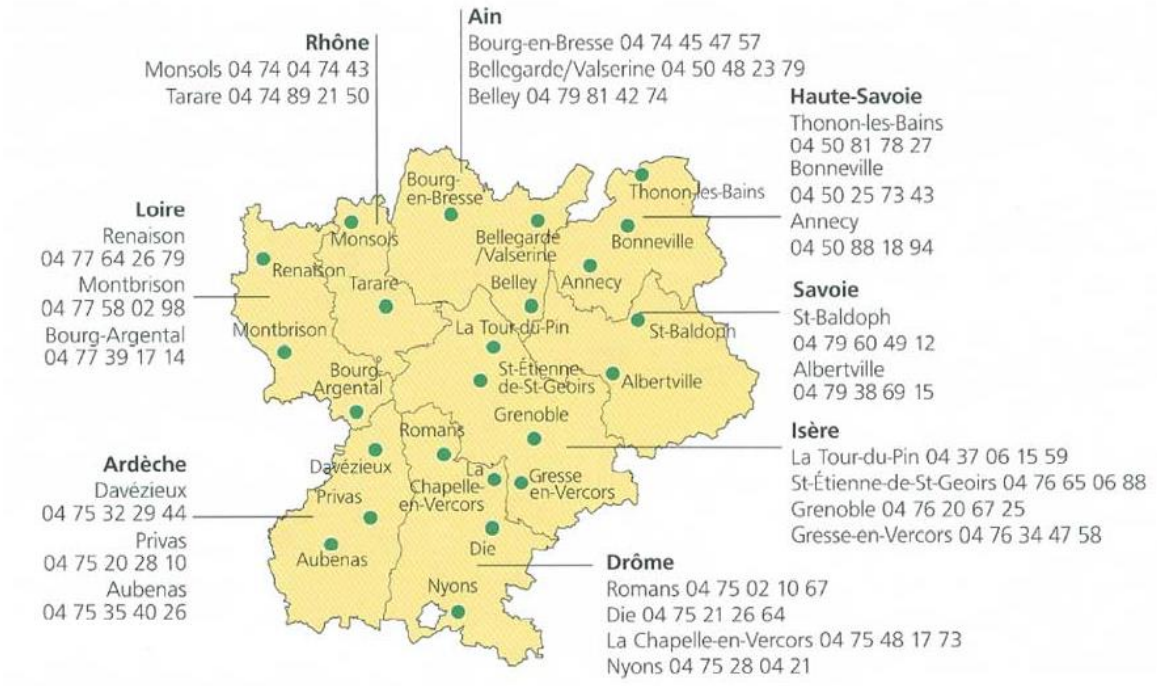
Les travaux de recherche menés avec l'IDF sur ces placettes permettent d'informer et de conseiller les propriétaires forestiers. Les actions de recherches appliquées visent à développer des nouvelles techniques de gestion sylvicole dans un contexte de changement climatique. Ainsi l'IDF met en place des réseaux d'expérimentation de comparaisons d'essences, de provenances ou de sylvicultures. Il développe des outils de diagnostic comme l'Indice de Biodiversité Potentielle (IBP, pour évaluer la biodiversité d'un peuplement forestier), Archi (méthode de diagnostic de l'état sanitaire des arbres) ou BioClimSol (outil de modélisation d'apparition d'année à risque pour une essence et de risque de dépérissement).

A une époque où le changement climatique pose beaucoup de questions dans le milieu forestier, il semble indispensable d'anticiper des impacts potentiels sur nos forêts : quelles plantations seront possibles demain ? Quelles nouvelles essences l'aval de la filière doit-il s'attendre à voir apparaître dans ses scieries, et desquelles devra-t-il se passer ? C'est en partie à ces questions que le CRPF doit être capable de répondre.

1.4.3 La délégation régionale du CRPF Rhône-Alpes

Le CRPF Rhône-Alpes emploie 8 ingénieurs, 42 techniciens et 7 administratifs qui se répartissent en 29 antennes locales, ainsi qu'au siège à Saint-Didier-au-Mont-d'Or. Ces professionnels s'occupent de 1 160 000 hectares de forêts privées, appartenant à plus de 475 000 propriétaires (CRPF Rhône-Alpes).

Figure 4 : les différentes antennes du CRPF Rhône-Alpes (source :foretspriveesfrancaises.com)



1.4.4. L'antenne Drôme-Ardèche

Les départements Ardèche et Drôme sont rattachés à une même antenne, dont le bureau est situé à Bourg-lès-Valence. L'Ardèche est divisée en 4 secteurs (figure 5), et la Drôme en 5 (figure 6). Chaque secteur est sous la responsabilité d'un technicien, lui-même rattaché à un ingénieur.

Figure 5 : secteurs CRPF de l'Ardèche (Source : CRPF Rhône-Alpes)

Figure 6 : secteurs CRPF de la Drôme (Source : CRPF Rhône-Alpes)

1.5. Objectifs

Des réseaux nationaux de suivi des peuplements existent, mais ne répondent pas toujours aux questions posées par le CRPF, plus locales. L'objectif de ce travail est de venir « compléter » ces réseaux déjà en place, qui sont gérés par le Département de la Santé des Forêts et l'Institut national de l'information géographique et forestière.

Le Département de la Santé des Forêts (DSF) dépend de la Direction Générale de l'Alimentation (DGAL). Il regroupe plus de 200 correspondants-observateurs de l'ONF, du CNPF ou de services déconcentrés du Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et de la Forêt (MAAF), qui gèrent un dispositif de surveillance de l'état sanitaire des peuplements forestiers en France, et assurent le conseil phytosanitaire pour la forêt (MAAF, 2010). Le DSF suit un réseau de placettes à l'échelle nationale, suivant un maillage systématique aux 16 km par 16 km (IFN, DSF, 2007). L'objectif est de quantifier les évolutions sanitaires des parcelles suivies, en lien avec des variables pédoclimatiques notamment. Mais la faible résolution de ce réseau ne permet pas de quantifier le risque de dépérissement. On compte en 2015 20 placettes du réseau national en Ardèche et Drôme. Cet échantillonnage lâche étant systématique, il n'est pas orienté vers une étude sur une thématique précise telle que celle du changement climatique. On peut ainsi sélectionner des parcelles à faible enjeu (essence peu présente), et manquer des zones pédoclimatiquement intéressantes. Enfin, on ne peut comparer l'impact des sylvicultures pratiquées sur l'état sanitaire des arbres. Ce réseau a donc plus une validité nationale que régionale. Un réseau régional voire bi départemental avec un échantillonnage non systématique pourrait alors compléter le national, en apportant des observations plus ciblées en termes de pratiques sylvicoles, sur des essences particulièrement intéressantes, des zones critiques vis-à-vis du climat, des cas de problèmes sanitaires particuliers. Il permettrait également d'obtenir plus rapidement des retours pour les propriétaires privés.

L'Institut national de l'Information Géographique et forestière (IGN) dispose également d'un réseau national de placettes d'inventaire, visité tous les ans. Ces placettes, distribuées selon une maille systématique de 1 km par 1 km, font l'objet de photo interprétation pour identifier l'occupation et l'utilisation du sol. Puis en fonction de cette information, on fait le choix de réaliser ou non une visite sur le terrain. Si le point tombe

sur un peuplement forestier, on y installe une placette faisant l'objet de mesure des arbres, d'un relevé floristique, d'une description du sol et du peuplement. L'ensemble des résultats est publié annuellement dans « Le mémento » (annexe 3) et sert à alimenter une application en ligne permettant de réaliser des calculs sur les peuplements d'un secteur souhaité. Cependant, un suivi précis des dépérissements n'est pas envisageable car, les coordonnées précises de chaque maille changent chaque année (IGN, 2014).

Un projet de mise en place d'un réseau de placettes dédié à l'observation des effets du changement climatique a fait l'objet d'une convention entre les conseils départementaux de la Drôme et de l'Ardèche, suite au colloque « Changement Climatique Drôme-Ardèche » (copie en annexe 4). Ce réseau doit se constituer à partir de placettes forestières à thématiques variées déjà mises en place par plusieurs organismes : INRA, IRSTEA, FCBA, Institut pour le Développement Forestier, Département Santé des Forêts, ONF, et CRPF. La commande initiale des deux départements était de voir s'il est possible, pour la forêt privée, de se « réapproprier » le réseau de placettes du CRPF Rhône-Alpes et de l'ONF dans un deuxième temps, dans l'optique de réaliser une étude sur l'effet du changement climatique sur les peuplements forestiers. L'idée est de disposer d'un réseau de suivi des peuplements pour le propriétaire forestier (privé ou bien public) se questionnant à propos de l'avenir de ses arbres, notamment en cas de renouvellement des peuplements. Il est aussi envisagé d'étendre le réseau de placettes vigies du DSF et suivi par le CRPF Rhône-Alpes. La charte « Changement climatique en Drôme-Ardèche : identification et suivi des impacts en forêt, adaptation des peuplements et sylviculture » signée entre les conseils départementaux, le CRPF, Rhône-Alpes, l'IDF, l'ONF Drôme-Ardèche, le DSF Zone Sud-Est et Fibois Ardèche-Drôme demande la mise en place de cinq nouvelles placettes vigies changement climatique :

- 2 sapinières en Drôme et Ardèche
- 1 hêtraie en Drôme ou Ardèche
- 1 pineraie sylvestre en Ardèche
- 1 douglasaie en Ardèche.

Comment peut-on dans un premier temps se réapproprier les sites d'expérimentation du CRPF pour créer un nouveau réseau d'alerte vis-à-vis du changement climatique ?

Le travail qui suit commence par un bilan du réseau de placettes actuel.

Puis différents outils (modèles de vigilance climatique) seront comparés dans le but de les utiliser pour imaginer un réseau idéal de placettes que nous appellerons réseau « changement climatique ».

Différents réseaux « changement climatique » par essence seront alors proposés, et enfin les coûts pour la création d'un réseau optimum seront évalués.

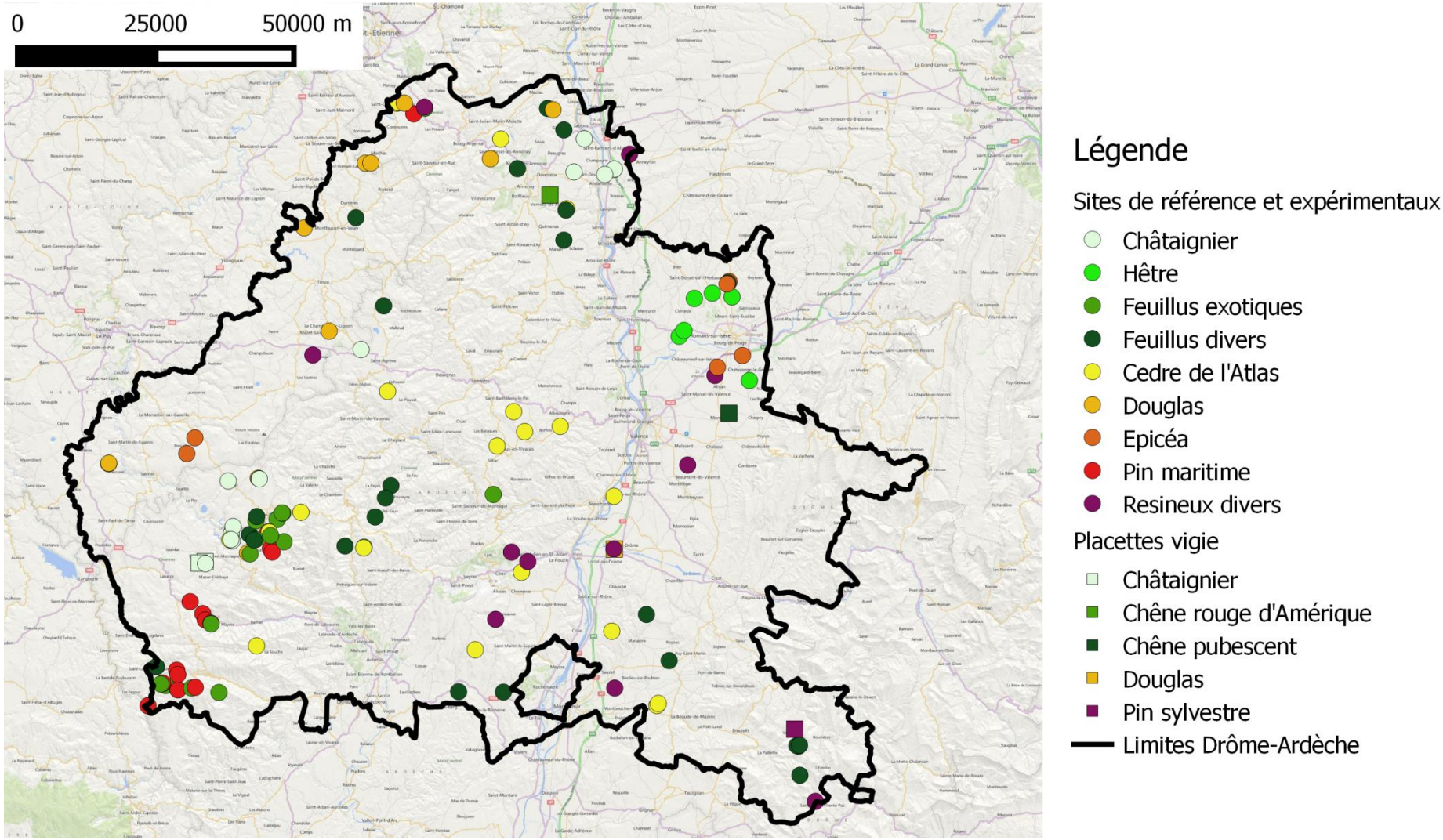
2. Analyse du réseau existant dans un contexte de recyclage de placettes pour une étude sur le changement climatique

En 2015, le CRPF Rhône-Alpes dispose d'un réseau d'environ 500 placettes que nous appellerons sites expérimentaux et de référence, dont 80 sont situées en Ardèche, et 75 sont en Drôme. 7 placettes vigies sont installées via le DSF dans ces deux départements. Elles ne font pas partie du maillage systématique de 16 km par 16 km du DSF. Des correspondants-observateurs DSF (voir partie A.5) travaillent au CRPF et contribuent au fonctionnement du réseau vigie. Les placettes vigies installées au CRPF Drôme-Ardèche ont été installées pour surveiller les dépérissements de différents peuplements, en lien avec le changement climatique. Elles viennent compléter le réseau national en ciblant les essences à fort enjeu du territoire. Le protocole suivi est le même que celui utilisé pour le réseau systématique 16 km par 16 km, et les relevés de terrain sont directement transmis au DSF. En Ardèche, on compte 2 placettes vigies en châtaignier. Les

placettes vigies de Drôme sont composées de chêne pubescent, de douglas, de pin sylvestre, et d'une plantation comparative de chêne rouge d'Amérique, de noyer, de merisier et d'érables sycomore.

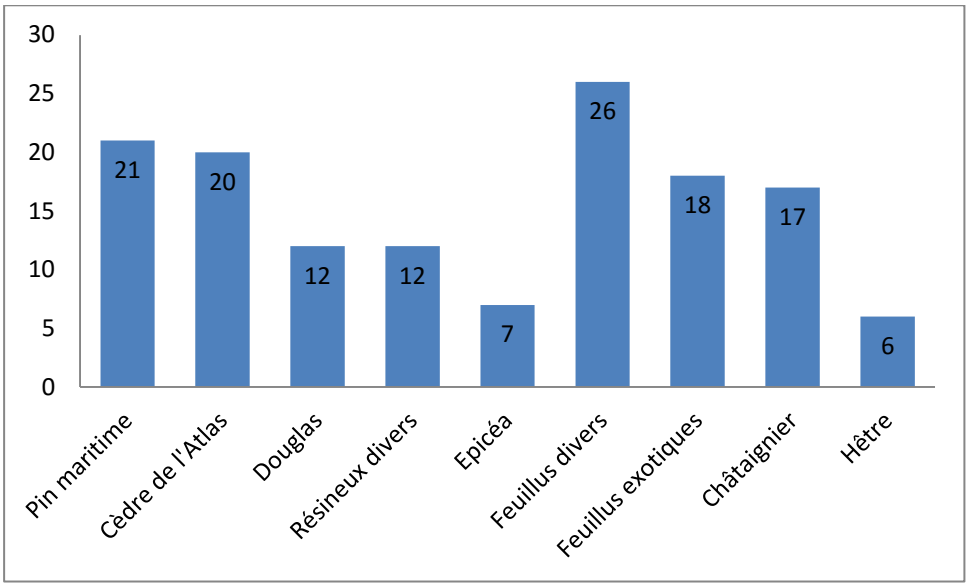
A ce jour, les dispositifs du CRPF Rhône-Alpes ne sont pas référencés dans Ilex. Ce travail est en cours et devrait être achevé fin 2015. Ces sites sont néanmoins listés dans un tableur, donnant des renseignements sommaires sur la parcelle (essence, altitude, sol basique, neutre ou acide, pluviométrie, pente, exposition, situation topographique, texture du sol). Les autres données ayant été prises ne sont pas numérisées et sont compilées dans des dossiers papier, rendant difficile la perception du réseau dans son ensemble. Le premier travail à effectuer est donc de parcourir ces documents pour connaître les données à disposition. Nous avons tout d'abord dressé un état des lieux du réseau de placettes pour savoir dans quelle mesure il est possible de « recycler » ces dispositifs dans un contexte de vigilance liée au changement climatique. Nous avons donc identifié les essences et les thématiques sylvicoles étudiées, l'âge des peuplements, et l'intensité de suivi du réseau.

Figure 7 : Répartition des placettes du CRPF en Drôme et Ardèche



1.1. Les essences

Figure 8 : Essences présentes dans le réseau de placettes du CRPF



Les principales essences présentes sont le pin maritime (*pinus pinaster*), le cèdre de l'Atlas (*cedrus atlantica*), le châtaignier (*castanea sativa*), le douglas (*pseudotsuga menziesii*), l'épicéa (*picea abies*) et le hêtre (*fagus sylvatica*). On compte, parmi les feuillus exotiques, l'eucalyptus (*myrtales eucalyptus*), le métasequoia (*metasequoia glyptostroboides*), le calocèdre (*calocedrus decurrens*), le sequoia géant (*sequoiadendron giganteum*), le chêne rouge d'Amérique (*quercus rubra*), le cyprès vert (*cupressocyparis leylandii*), le mûrier blanc (*morus alba*) et le micocoulier (*celtis*). La catégorie « feuillus divers » regroupe des placettes de chênes (notamment dans le cadre d'expérimentations en trufficulture), merisiers *(prunus avium*), frênes (*fraxinus*), érables (*acer*), peupliers (*populus*), sorbiers (*sorbus*), robiniers faux acacias (*robinia pseudoacacia*), et noyers. Enfin, on recense dans les résineux divers des dispositifs avec les essences suivantes : mélèze (*larix decidua*), pin noir d'Autriche (*pinus nigra*), pin laricio de Corse (*pinus nigra subsp Laricio var. corsicana*), pin laricio de Calabre (*pinus nigra calabrica*), *pinus serotina*, pin d'alep (*pinus halepensis*), et sapin pectiné (*abies alba*).

On retrouve les essences à enjeux identifiées dans la partie A, les plus représentées étant le châtaignier, le douglas et le hêtre. Le sapin pectiné, plus présent en forêt domaniale, est moins étudié. Des essences exotiques peuvent être utilisées pour tester leur capacité d'adaptation au changement climatique local.

1.2 Les thèmes

Les thèmes des placettes sont nécessaires pour appréhender la pertinence de chaque dispositif vis-à-vis d'une étude sur le changement climatique. Ils ont été regroupés dans 5 catégories, résumées dans le tableau 4.

Tableau 4 : Thèmes des placettes du réseau.

Grandes catégories de thèmes	Introduction, comparaison d'essences	Sylviculture	Etat sanitaire	Equilibre forêt-gibier	Haie, alignement
Thèmes mentionnés dans la base de données su CRPF Rhône-Alpes	Plantation, semis artificiels de plusieurs essences en parallèle, dont des essences exotiques : Cyprès vert, Cormier, Micocoulier, Eucalyptus, Metasequoia	Aménagements sylvo-pastoraux Eclaircies Conversions Régénération Dépressage précoce Futaie irrégulière Détourage Balivage Coupes d'ensemencement Micosylviculture	Notations de défoliation Suivis de dépérissements Evaluation du taux de dégâts (casse) au sein d'un peuplement	Impact du gibier sur la régénération naturelle	Création de haies « brise-vent »
Nombre de placettes correspondant aux thèmes	76 placettes	49 placettes	7 placettes	4 placettes	3 placettes

Les placettes de la catégorie « introduction, comparaison d'essences » semblent très adaptées puisqu'elles évaluent la capacité de nouvelles essences à s'adapter au climat local. Elles comprennent cependant uniquement des essences exotiques. D'autre part, il parait également intéressant d'utiliser des placettes ayant une thématique sylviculture, afin tester différents itinéraires sylvicoles sur les dépérissements au vu des changements climatiques à venir.

La catégorie « état sanitaire » est intéressante en ce qui concerne les notations de défoliation et les suivis de dépérissement.

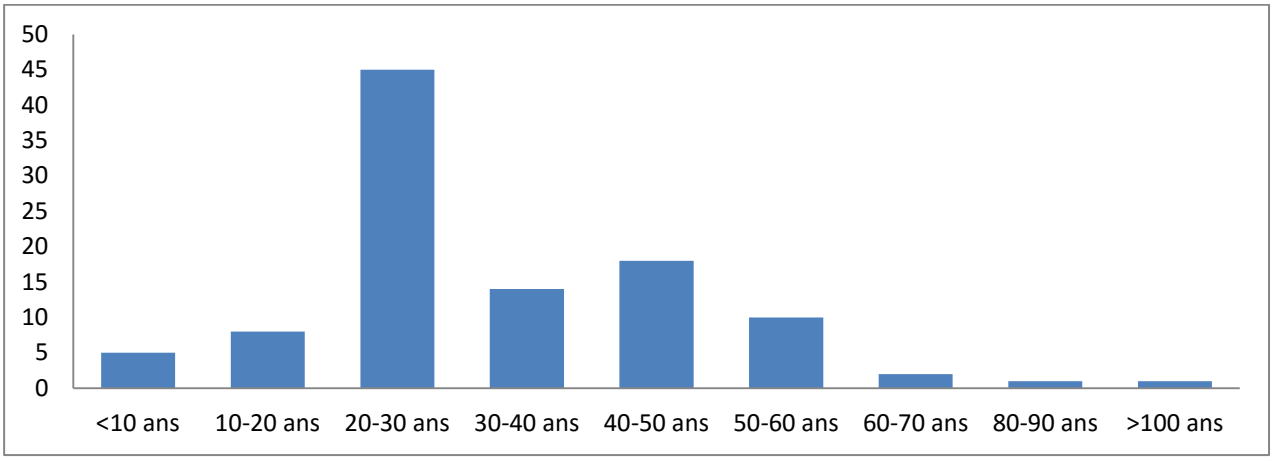
En revanche, les essais de haies brise-vent dans le but de protéger le bétail et les bâtiments agricoles et pour une meilleure production agricole ne constituent pas des peuplements forestiers « classiques ». Ils ne sont donc pas à retenir pour l'élaboration d'un réseau de placettes de vigilance.

Il serait intéressant de savoir, pour chaque placette, si un plateau témoin est installé, notamment pour celle à thématique « sylviculture ». Les dossiers des sites expérimentaux et de référence ne donnent pas d'accès rapide à cette information.

1.3 Les âges

Toutes les valeurs d'âge ne sont pas disponibles dans les dossiers des placettes. Pour pouvoir comparer plusieurs placettes, il est nécessaire de s'appuyer sur des peuplements d'âges comparables au sein d'une même essence.

Figure 9 : répartition des âges des placettes



1.4. Le suivi des placettes

Il est intéressant de se pencher sur le suivi déjà effectué sur les placettes existantes, afin de voir s'il est déjà possible de tirer des conclusions sur l'évolution de la croissance des peuplements lors des dernières années, notamment en fonction de l'âge, du climat et de la station.

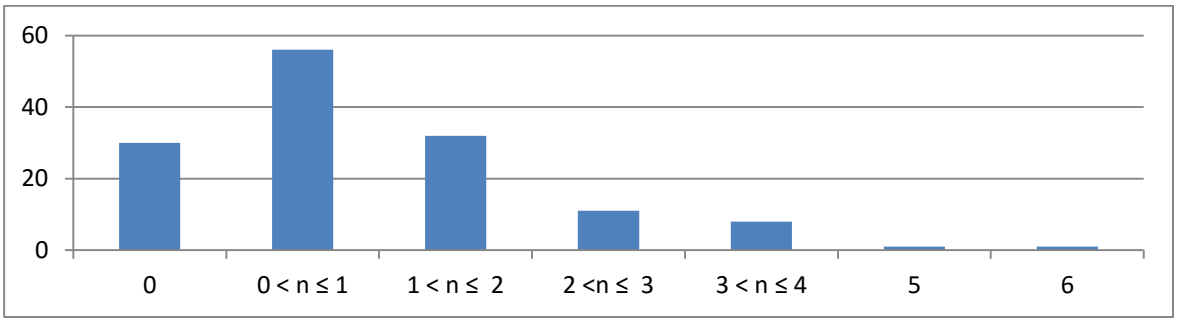
Les données le plus fréquemment relevées sont la hauteur moyenne, et dans certains cas des circonférences ou diamètres moyens, voire la surface terrière. A part pour les quelques placettes dont l'objet est d'évaluer l'état sanitaire des peuplements, ce dernier n'est pas précisé dans les compte-rendus de visites des dispositifs (l'objectif initial des placettes n'étant pas un suivi de l'état sanitaire).

L'intérêt des mesures est de pouvoir observer une évolution, en termes de croissance, de production voire de santé des peuplements. Nous avons donc, pour chaque placette, compté le nombre d'années où des mesures ont été effectuées.

Le nombre de visites par placette pour des mesures ou un état des lieux est très faible : plus de 20 peuplements n'ont jamais été visités après leur installation, malgré que celle-ci soit ancienne. En moyenne, les placettes ont été mesurées deux à trois fois en tout depuis leur installation.

Ainsi, il apparaît impossible de réaliser des mesures d'accroissement courant ou de faire des comparaisons de données dendrométriques sur l'ensemble des placettes en lien avec le climat. Le réseau actuel du CRPF Rhône-Alpes ne permet donc pas de tirer dès à présent des conclusions sur l'évolution des différentes essences au cours des dernières années.

Figure 10: répartition de la fréquence de visite par placette (nombre de visites par décennie)



Du fait de la prédominance de sites de références, la majorité des placettes n'a pas été suivie après installation. Les placettes du CRPF sont donc pour la majeure partie des références mesurées. Les données relatives aux placettes sont donc peu utilisables pour une étude sur le changement climatique, qui nécessite des relevés réguliers dans le temps.

1.5. Bilan et objectifs revus, la démarche adoptée

L'état des lieux du réseau de placettes du CRPF Drôme-Ardèche a mis en évidence une forte hétérogénéité des placettes (en termes d'âges, d'essences, de types de sylviculture), qui ne permettront pas à elles seules de constituer un nouveau réseau expérimental pour un suivi des peuplements en lien avec le changement climatique. Le suivi faible et hétérogène, caractéristique des dispositifs expérimentaux, n'est pas adapté pour une étude sur le changement climatique.

La difficulté d'accès aux données relatives à chaque site est handicapante pour le recyclage de ces sites : il serait judicieux de numériser plus d'informations, comme la présence ou non d'une placette témoin, la surface du site…

Les essences représentées sont variées, et plusieurs d'entre elles sont intéressantes pour étudier le changement climatique en Drôme et Ardèche, comme le hêtre, le sapin pectiné, le douglas, et le pin sylvestre. Cependant, le nombre de placettes par essence n'est pas suffisant pour la mise en place d'un réseau complet.

Il apparaît donc nécessaire d'imaginer un nouveau réseau, au sein duquel on pourra retrouver certains dispositifs existants. Même si toutes les mesures effectuées par le passé sur les placettes ne pourront pas être valorisées dans un nouveau réseau, il reste intéressant de réutiliser un maximum de placettes existantes afin de rentabiliser au maximum sa mise en place.

La démarche choisie a donc été de mettre en place un réseau de substitution de placettes pour une étude sur le changement climatique, auquel on pourra intégrer certains sites expérimentaux existants. Ces sites doivent être situés selon un gradient de vigilance climatique. Pour les positionner, on peut s'appuyer sur différents outils de modélisation. Enfin, le coût du réseau de placettes imaginé devra être évalué.

Figure 11 : Démarche adoptée pour la proposition d'un réseau de placettes « changement climatique »

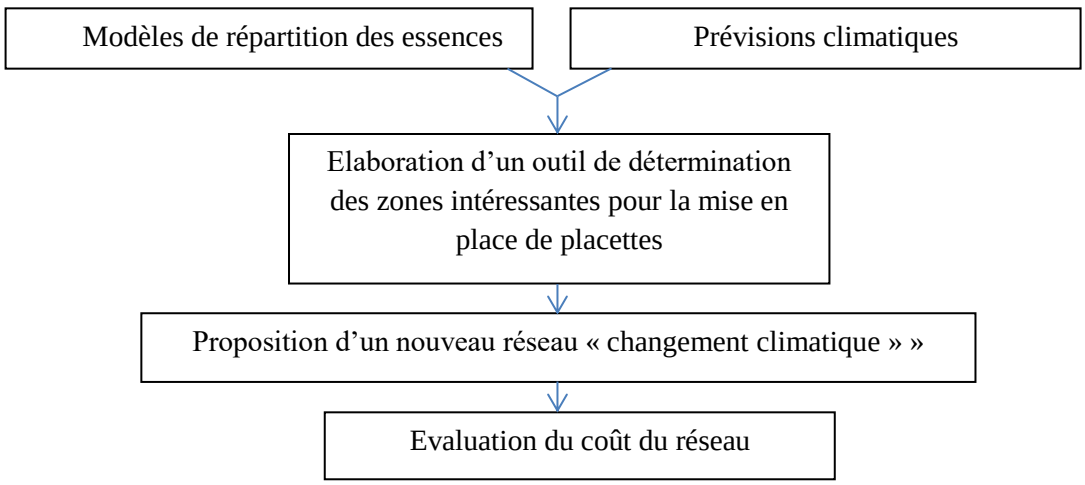


Tableau 5 : Synthèse des sites expérimentaux et de référence du CRPF Rhône-Alpes en Drôme-Ardèche

Essence	Nombre	Nombre de placettes ayant été visitées 2 fois ou plus en 10 ans	Âge minimal	Âge maximal	Altitude minimale	Altitude maximale	Textures recensées (dans l'ordre d'importance)	Nombre de stations à sol acide	Nombre de stations à sol neutre	Nombre de stations à sol basique
Cèdre de l'Atlas	20	3	20	111	90	1020	s, ls, al, sl, a, sa	6	3	9
Châtaignier	17	2	9	41	370	860	sl, s, ls	12	0	0
Douglas	12	3	4	44	280	1180	al, a, la, ls	6	1	0
Épicéa	7	0	35	58	900	1240	al, sal	7	0	0
Feuillus divers	26	10	12	30	60	1100	la, al, am, l, sl, l, lsa	9	5	4
Feuillus exotiques	18	5	14	31	170	660	al,sl, am, s	12	0	4
Hêtre	6	3			890	1480	a, al, la	2	0	4
Pin maritime	21	5	8	58	300	560	sa, sl, as, am, la, s	18	1	0
Résineux divers	12	4	18	63	180	1365	s, a, al, l, las, sa, sl	2	2	5

s = sableux

a = argileux

l = limoneux

3. Construction d'un réseau de substitution

3.1. Méthode utilisée pour cibler les peuplements intéressants dans un contexte de changement du climat

En raison du changement climatique, les scientifiques imaginent à l'avenir un déplacement des aires naturelles de répartition des essences forestières. Un réseau pour étudier le changement climatique devra donc disposer d'un ensemble de placettes réparties sur un gradient de risque climatique pour chaque essence. Pour positionner les dispositifs sur ce gradient, des données de prévision climatique sont à disposition, ainsi que différents modèles de répartition d'essences. Dans la partie qui suit, 3 modèles sont comparés et testés afin de savoir s'ils sont utilisables pour la mise ne place d'un réseau régional de placettes sur le changement climatique.

Ces modèles sont BioClimSol (CNFP, IDF), IKS (ONF), et les modèles du laboratoire LERFoB, modèles les plus référencés en France.

3.2. Les modèles IKS, LERFoB et BioClimSol

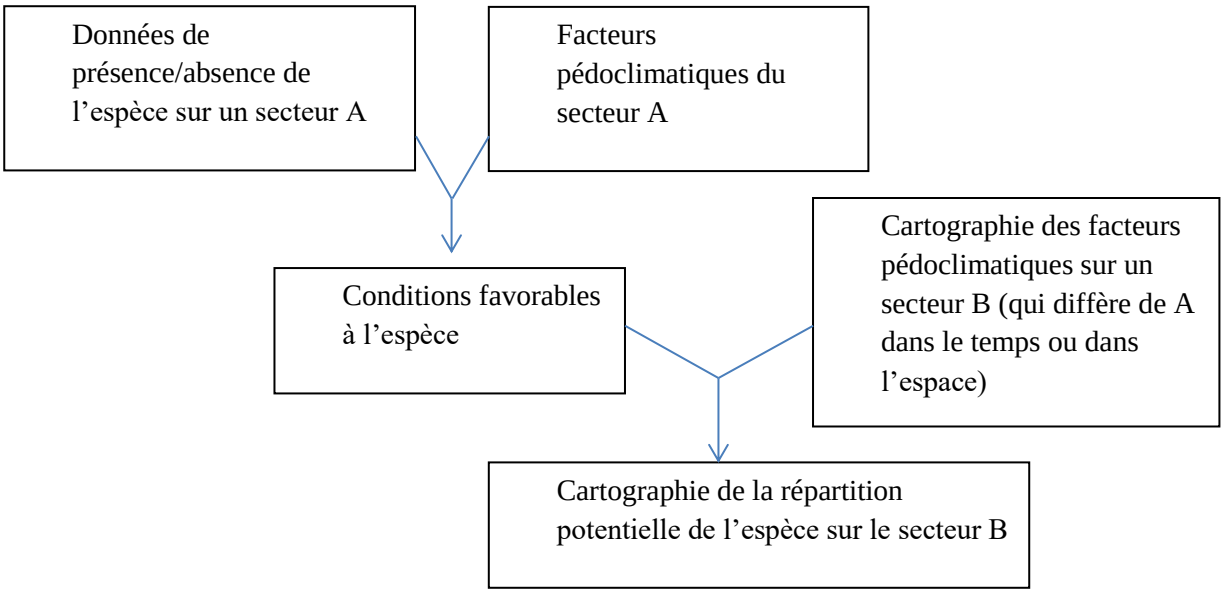
3.2.1 La notion de modèle de niche

Pour comprendre et comparer les trois modèles, il est nécessaire de comprendre le concept de niche écologique et le fonctionnement d'un modèle de niche.

La niche écologique d'une espèce correspond à l'espace multidimensionnel dont chaque dimension est un des facteurs qui joue sur la présence de cette espèce (Hutchinson, 1957). On distingue la **niche réalisée** (là où l'espèce est réellement présente) de la **niche fondamentale** (conditions dans lesquelles l'espèce pourrait être présente, sans considérer d'effets de compétition avec d'autres espèces ou bien d'intervention humaine telle que les choix de plantation d'essences).

Un modèle de niche repose sur le postulat que les espèces sont présentes uniquement dans les milieux adaptés à leurs exigences physiologiques, autrement dit dans leur niche écologique. Ainsi, on peut considérer qu'il est possible d'établir un lien statistique entre la répartition d'une espèce sur un territoire et les facteurs environnementaux caractérisant ce territoire. Pour élaborer un modèle de niche climatique, on a donc besoin de deux types d'information en entrée : des données de présence et absence d'une espèce (issues par exemple d'un inventaire, ou d'une aire de répartition naturelle), et des renseignements sur des variables environnementales qui caractérisent les lieux d'inventaire de l'espèce. On obtient alors, pour chaque facteur environnemental testé, les valeurs auxquelles l'espèce étudiée est adaptée. On parle d'**amplitude écologique** pour chaque facteur (Cheaib, 2012). On peut alors se servir de cette information pour prédire la présence de l'espèce dans un nouveau secteur (différent du premier géographiquement ou temporellement), en utilisant les facteurs environnementaux significatifs testés.

Figure 12 : fonctionnement d'un modèle de niche



3.2.2. Le modèle IKS

L'outil IKS (Index Klima Struzh, Struzh signifiant végétation en breton) est un modèle de niche. Il a été créé dans le cadre du projet NOMADES (NOuvelles Méthodes d'Acclimatation Des ESsences forestières, 2010-2011), qui vise à étudier les relations entre les essences et le climat, leur adéquation avec le climat actuel et leur potentielle place dans les futurs climats possibles, pour pouvoir proposer de nouveaux itinéraires techniques et plantations (Le Bouler *et. al*., 2014). Il fournit des données à l'échelle planétaire. Il est à l'heure actuelle en évolution.

IKS se base sur des données de présence issues de l'IGN en ce qui concerne la France Pour les autres régions du globe, les sources sont principalement issues des aires de répartition naturelle des essences (EUFORGEN, FARJON et LITTLE USDA). Un descriptif des sources de données est donné en annexe 5.

Quatre données climatiques sont utilisées :

- la **somme des degrés jours**, qui joue sur la croissance (énergie en saison de végétation) et sur la reproduction (énergie pour la maturation des fruits) des essences ;

- la **moyenne des minima de température du mois le plus froid de l'année,** influant sur la survie (dégâts dus au gel en hiver) et sur la reproduction (besoin en froid pour la dormance, gels printaniers) ;

- l'**aridité**, susceptible de causer des mortalités dues à des stress hydriques. Elle est calculée à partir de l'évapotranspiration de Turc (annexe 6), des précipitations, et de la réserve utile maximale des sols (fixée par défaut à 100mm) ;

- **la moyenne des maxima de température du mois le plus chaud de l'année**, intégrée à l'aridité

Les données climatiques utilisées pour l'élaboration du modèle de niche IKS sont issues de la base de données AURELHY (annexe 5). Ces valeurs sont des normales mensuelles calculées sur la période 1950-2000. Pour chacune des quatre variables climatiques, plusieurs seuils sont définis. Ils correspondent au pourcentage de points de présence connus située au-delà du seuil.

Tableau 6 : Exemple de seuils limites supérieurs pour le sapin pectiné

Valeurs du point si plus haut	% de points inclus	Somme des degrés jours	Moyenne des maxima de température	Moyenne des minima de température	Aridité
1	99.5	5369	35	262	518
2	99	5231	28	259	504
3	97.5	5016	22	252	299
4	95	4819	14	247	268
5	90	4554	7	242	247

Tableau 7 : Exemple de seuils limites supérieurs pour le châtaignier

Valeurs du point si plus haut que le seuil	% de points inclus	Somme des degrés jours	Moyenne des maxima de température	Moyenne des minima de température	Aridité
1	99.5	4165	63	309	230
2	99	4030	58	294	204
3	97.5	3779	49	273	167
4	95	3572	41	269	121
5	90	3357	31	265	71

Pour définir la niche d'une essence, IKS calcule deux composantes à partir des quatre indices attribués aux variables climatiques utilisées :

- une composante hydrique, relative à l'aridité ;
- une composante thermique, correspondant à la moyenne des notes attribuées pour les trois autres paramètres.

La donnée obtenue en sortie d'IKS est la distance entre le bioclimat du point étudié et le bioclimat idéal pour l'essence (au cœur de sa niche écologique, zone de niche certaine) : plus cette distance est élevée, moins le climat est adapté à l'essence.

Figure 13: Représentation bidimensionnelle des climats possibles pour IKS. Source : Hervé Le Bouler

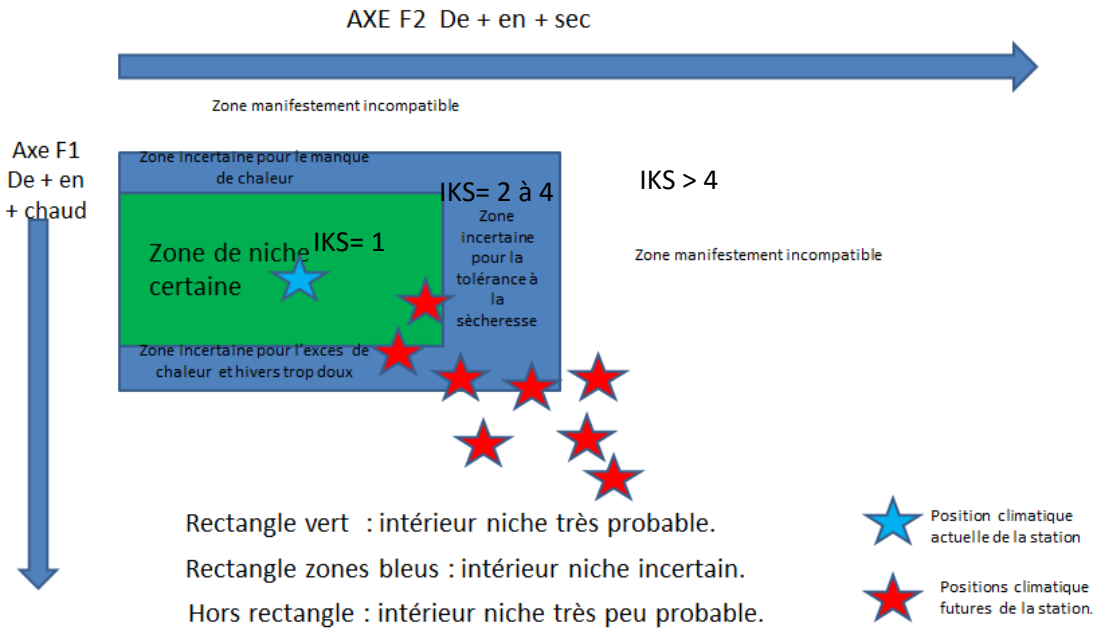
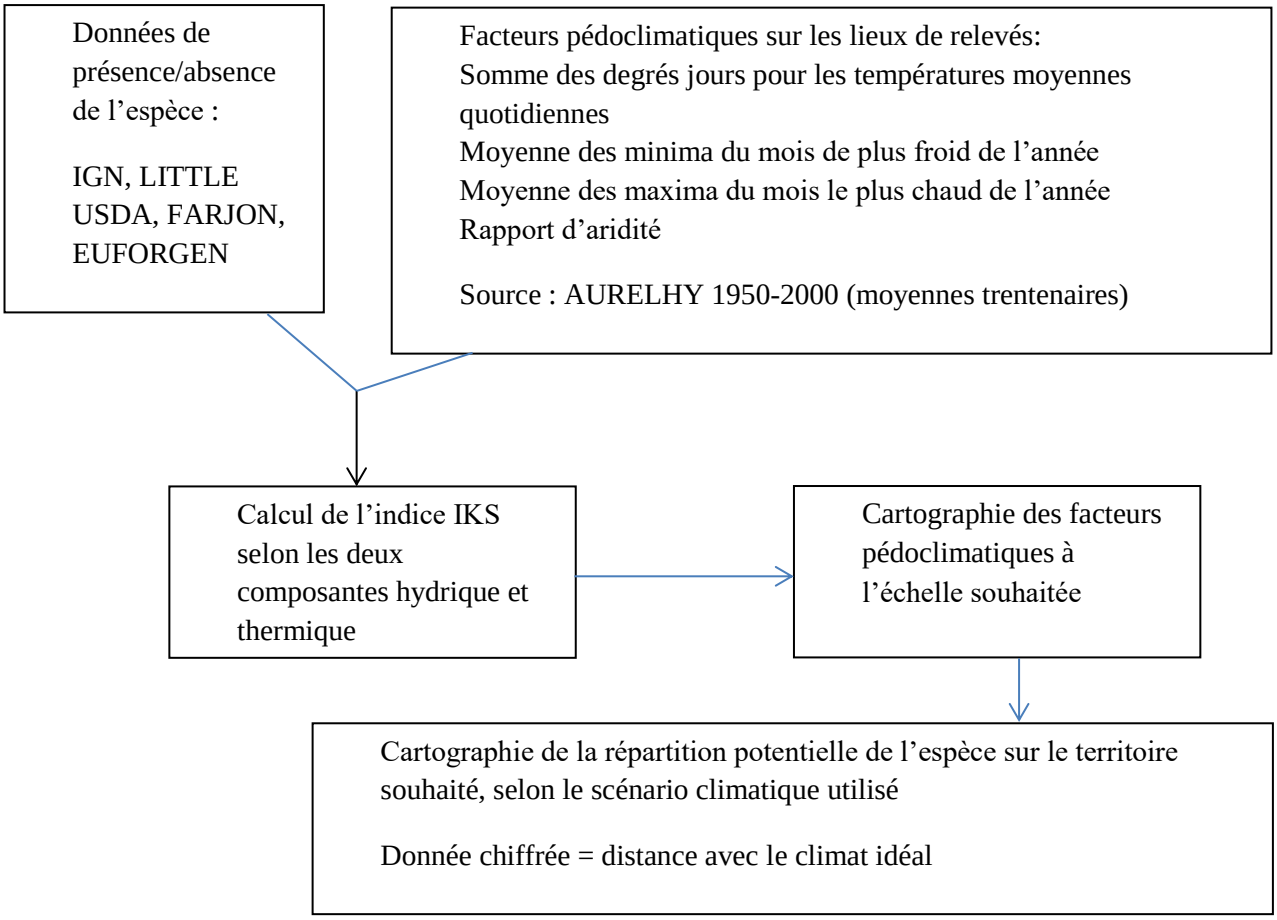


Figure 14 : Fonctionnement du modèle IKS



3.2.3 Les modèles du LERFoB

Sur le même principe du modèle de niche, le laboratoire LERFoB a élaboré des modèles de distribution pour 33 espèces forestières dont le sapin pectiné, le hêtre, l'épicéa commun, le chêne sessile, le chêne vert, le châtaignier, et le pin sylvestre.

Les données de présence sont issues des données de 46 768 relevés effectués sur l'ensemble du territoire français métropolitain par l'IGN. Les essences choisies correspondent à des espèces à enjeu en France et dont la répartition n'est pas en majorité due à des plantations.

61 variables écologiques ont été utilisées, et concernent l'énergie reçue par les essences (température), l'alimentation en eau, et les contraintes nutritionnelles et l'aération du sol. Les variables climatiques sont issues de données 1961-1990 Digitalis, tandis que les variables édaphiques ont été bioindiquées à partir de données EcoPlant.

Tableau 8 : Variables écologiques utilisées pour l'élaboration des modèles du LERFoB (Source : Piedallu *et. Al.*, 2015)

Variable climatiques issues de couches SIG		Variables bioindiquées	
Energie reçue par l'arbre	Disponibilité en eau	Nutrition du sol	Hydromorphie
Radiation * Températures maximale, minimale et moyenne * ETP Turc * ETR * Somme des degrés jours au-dessus de 5°C Amplitude thermique : Tmoy max mensuelle – Tmoy mn mensuelle	Précipitations * Bilan hydrique climatique P-ETP * Déficit hydrique climatique (=P-ETP si P-ETP<, 0 ; =0 si P-ETP>0)* Capacité au champ * Teneur en eau du sol * Déficit en eau du sol (=ETP-ETR si ETP>ETR, =0 si ETP<ETP)* Amplitude de précipitations : Pmoy max mensuelle – Pmoy mn mensuelle	pH	Engorgement temporaire Engorgement permanent

*Variables calculées en moyennes annuelles et saisonnières (hiver=décembre-janvier-février ; printemps=mars-avril-mai ; été=juin-juillet-août ; automne=septembre-octobre-novembre).

Sur ces 61 variables, 6 ont été retenues comme les plus significatives, à savoir, dans l'ordre d'importance :

- La température moyenne annuelle
- Le pH
- L'engorgement temporaire
- Le déficit en eau du sol
- Le rapport C/N
- L'engorgement permanent

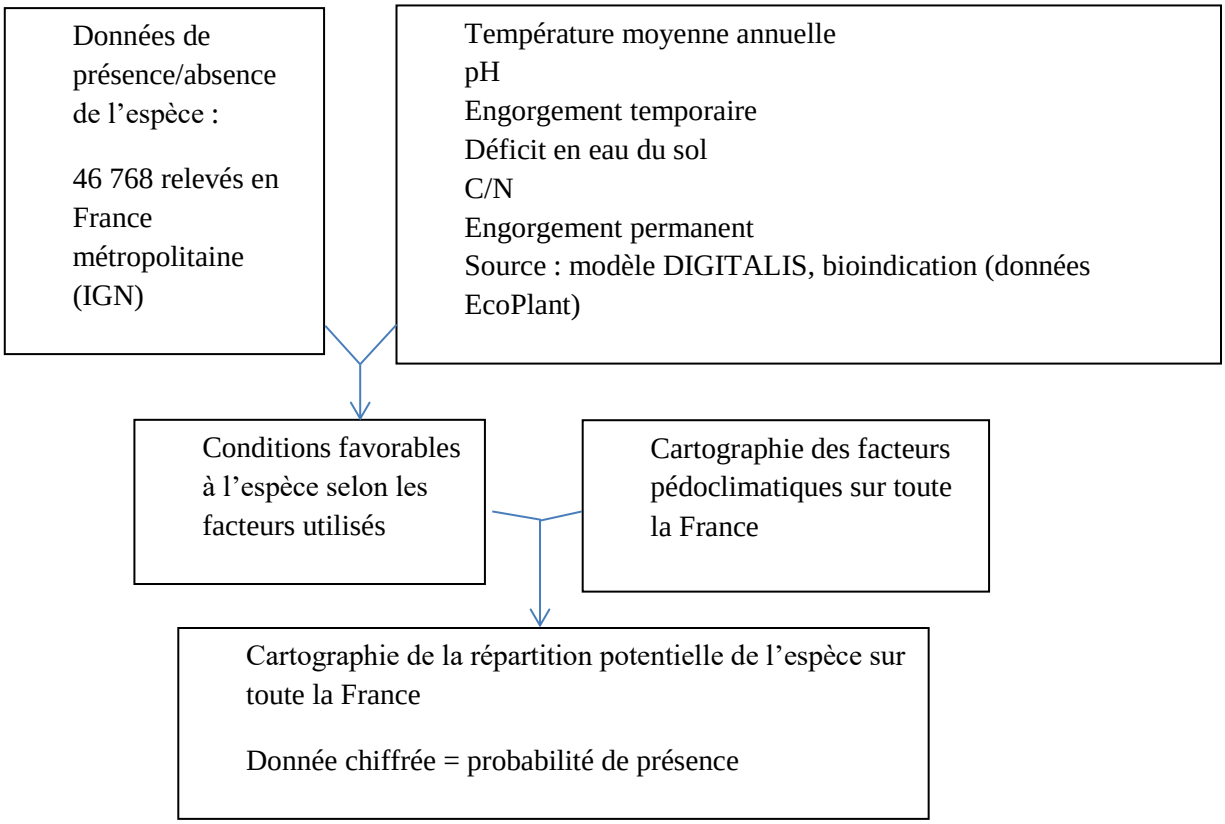
Une fois ces données acquises, la distribution des espèces a pu être modélisée par régression logistique : une relation entre la probabilité de présence P et les n variables explicatives Xi est recherchée sous la forme

P=1/[1+exp(-a+Σ bi Xi)]. Pour cela, on analyse par régression logistique la pertinence de chaque facteur écologique pour chaque essence : le modèle d'une essence ne conserve que les variables statistiquement significatives pour cette essence (tableau 9).

Tableau 9 : Variables écologiques sélectionnées pour l'élaboration des modèles du sapin, du hêtre, du châtaignier et du pin sylvestre

	Température moyenne annuelle	pH	Engorgement temporaire	Déficit en eau du sol	C/N	Engorgement permanente
Sapin pectiné	X			X	X	
Hêtre	X	X		X		X
Châtaignier	X	X			X	X
Pin Sylvestre	X	X		X	X	

Figure 15 : Fonctionnement des modèles du LERFOB



3.2.4 Les modèles BioClimSol

BioClimSol est un outil développé suite à un projet commun à l'Institut du Développement Forestier et aux Centres Régionaux de la Propriété Forestière, à propos des nombreuses demandes de coupes sanitaires dérogatoires aux Plans Simples de Gestion recensées en Pays de la Loire et Poitou-Charentes (Lemaire, 2011). L'objectif est d'obtenir un outil numérique couplé à un diagnostic de terrain permettant de conseiller le gestionnaire forestier à l'échelle de la parcelle. Il vise à prédire le risque de dépérissement dans un contexte de changement du climat, en se basant sur des données issues d'études régionales réalisées en France. Il existe deux générations de modèles BioClimSol. :

- BioClimSol 1 s'appuie uniquement sur des données climatiques,
- BioClimSol 2 intègre en plus des données de géomorphologie.

Suite à cette l'étude appelée « Chênaies atlantiques », il a été démontré que la perte de vitalité des chênes dans l'Ouest s'explique par une forte fréquence des années à fort déficit hydrique. C'est ainsi qu'est née la « Théorie du boxeur » (Lemaire, 2014): les arbres subissent des coups (les à-coups climatiques entraînant un dépérissement), et parviennent entre ces périodes de stress à « se relever » un certain nombre de fois (ils sont résilients et le dépérissement est réversible), mais finissent par être K-O au-delà d'un certain nombre de coups (dépérissement irréversible).

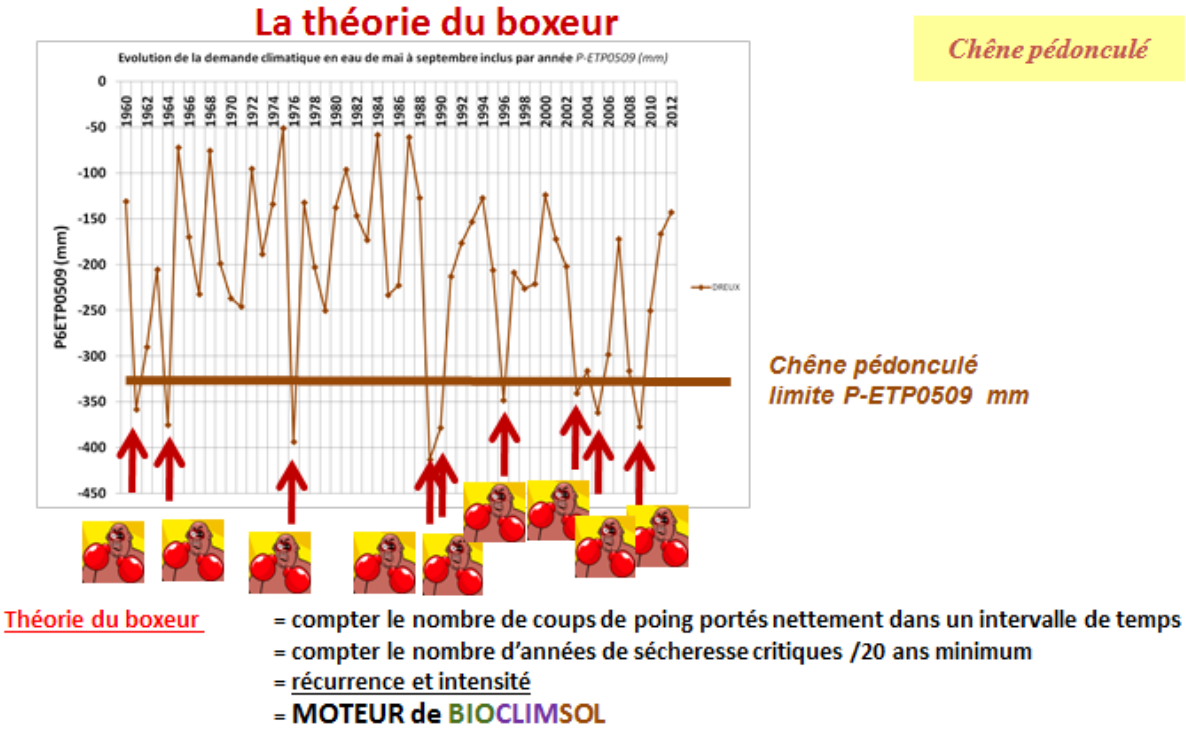
Le moteur des modèles BioClimSol, fondé sur cette théorie, est de prédire la probabilité de récurrence des années à fort déficit hydrique. Cette probabilité de récurrence est traduite sous forme de cartes de vigilance climatique, les cartes de BioClimSol 1. Les seuils de stress hydriques climatiques sont spécifiques chaque essence. Pour chaque essence, un seuil critique de valeur du déficit hydrique climatique, ainsi que de température minimale du mois de mars (risque de gelée printanière), est défini (tableau 10). Pour définir les seuils critiques de déficit hydrique, l'état sanitaire de peuplements (en général 90 à 120 peuplements) est évalué, sur un gradient de déficit hydrique du plus favorable au plus défavorable. La croissance est aussi évaluée durant les années critiques (à fort déficit hydrique) sur les peuplements avec les plus forts taux de dépérissement (selon l'essence, analyse d'images satellites, ou analyse dendrochronologique). Ces données ont été validées avec des études régionales pour le douglas, le sapin, le châtaignier, le hêtre, le chêne sessile, le chêne pubescent et le chêne pédonculé. Une fois les cartes de vigilance climatique établies, elles sont ensuite testées par les correspondants climatiques des CRPF dans d'autres régions de France. L'outil BioClimSol est donc fondé sur un grand nombre de placettes d'évaluation (plus de 2000 à ce jour) de l'état sanitaire, mesurées directement sur le terrain.

Les seuils sont utilisés pour cartographier la fréquence d'années à risques pour chaque essence sur la période trentenaire 1981-2010. On détermine à partir de quelle fréquence le risque devient élevé ou maximal pour chaque essence. Un exemple est donné dans le tableau 10 issu du Forêt Entreprise présentant BioClimSol (Lemaire, 2014).

Tableau 10 : Définition des seuils de vigilance climatique en fonction de la récurrence des années critiques en termes de déficit hydrique climatique (P-ETP) pour BioClimSol 1.

Niveaux de vigilance	Probabilité (%) de récurrence des années critiques en termes de déficit hydrique climatique (P-ETP)	
	Sapin pectiné et douglas	Chênes blancs
Modérée	<15%	<25%
Elevée	15 – 33%	25 – 40%
Maximale	>33%	>40%

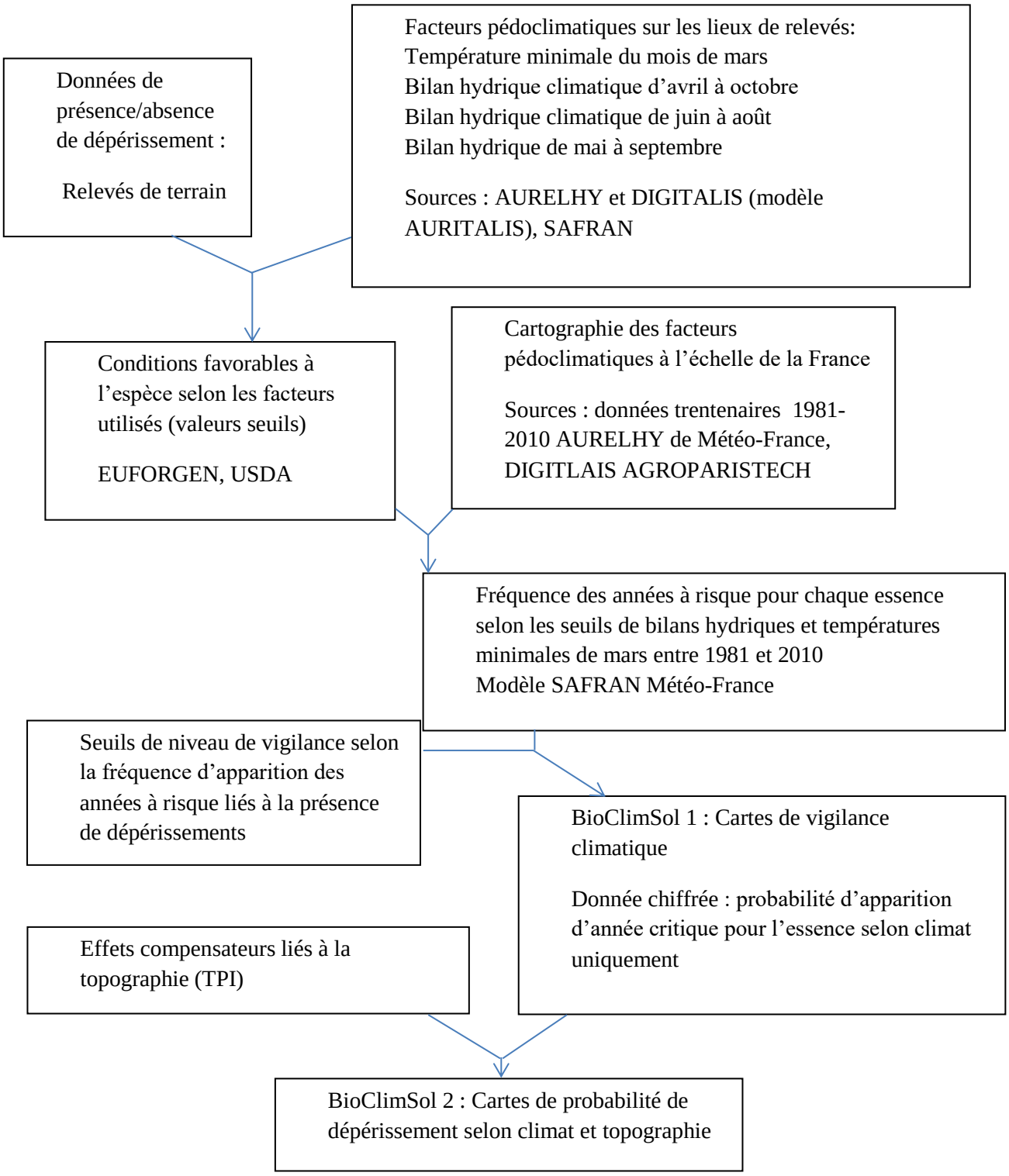
Figure 16: illustration de la théorie du boxeur en lien avec les seuils de tolérance à la sécheresse (exemple du Chêne pédonculé sur le secteur de Dreux) (Source : Jean Lemaire)



Pour intégrer les évolutions du climat, des cartes de vigilance sont également élaborées en se basant sur les données climatiques trentenaires de la période 1981-2010, auxquelles on a ajouté 1°C. L'hypothèse de cette évolution est faite sans changement de la pluviométrie. Des travaux sont en cours pour intégrer les modèles Drias dans les outils Bioclimsol.

Une deuxième génération de cartes a été réalisée (BioClimSol 2) sur le châtaignier (Garcia Collado, 2014) et le sapin pectiné (Couvin, 2015), cette fois donnant des probabilités de dépérissement des essences non seulement en fonction de la récurrence des sécheresses, mais aussi des paramètres liés à la topographie (pente, exposition, position topographique définie par l'indice de positon topographique (TPI) (Weiss, 2001). Pour le châtaignier par exemple, le TPI est pris en compte en plus du déficit hydrique climatique estival. Une régression logistique est effectuée à partir des paramètres significatifs, donnant une équation permettant de calculer en chaque point étudié une valeur de probabilité de dépérissement.

Figure 17 : fonctionnement de BioClimSol 1 et 2



3.2.5 Une première lecture croisées des trois modèles

Tableau 11 : Synthèse comparative des trois modèles

	IKS	LERFoB	BioClimSol
Type de modèle	Niche	Niche	Vigilance climatique et de dépérissement
Données de présence/absence	Données d'inventaires de l'IGN, aires de répartition LITTLE USDA, FARJON, EUFORGEN (mondiales)	Données d'inventaires de l'IGN	EUFORGEN, USDA (mondiales), données d'inventaires sur le terrain
Données climatiques	Somme des degrés jours pour les températures moyennes quotidiennes Moyenne des minima du mois de plus froid de l'année Moyenne des maxima du mois le plus chaud de l'année Rapport d'aridité (intégrant l'ETP Turc) AURELHY	Température moyenne annuelle ETP-ETR d'été Digitalis	Gel Worldclim ou bibliographie Récurrence des années à fort déficit hydrique climatique (en %, entre 1981 et 2010) AURITALIS - SAFRAN Température moyenne mensuelle Pluviométrie moyenne mensuelle Rayonnement (DIGITALIS) Evapotranspiration potentielle de Turc (SAFRAN) température AURELHY, rayonnement et modèle numérique de terrain DIGITALIS SAFRAN (Météo-France)
Données géomorphologiques		pH, C/N, Engorgement temporaire Engorgement permanent Bioindication avec données EcoPlant	TPI MNT
Période de référence du modèle	1950 - 2000	1961-1990	1981-2010
Donnée cartographiée	Distance entre le climat local et le climat adapté à l'essence : zones de compatibilité climatique	Potentialité de présence de l'essence	BioClimSol 1 : probabilité de répétition d'années à fort déficit hydrique pour une essence donnée BioClimSol 2 : probabilité de dépérissement
Résolution	600m	1000m	50m ou 25m

Pour une étude régionale sur le changement climatique, et en ciblant des essences classiques, les modèles du LERFoB et BioClimSol semblent se compléter pour localiser les zones à fort risque de dépérissements : le modèle de niche du LERFoB évalue la capacité de la station à accueillir l'essence étudiée, et BioClimSol estime le risque de fort déficit hydrique à cet endroit.

Le modèle IKS pourrait quant à lui s'avérer utile pour cibler des zones propices à des plantations pour des tests d'essences exotiques. Il vient donc en complément des deux autres outils, pour aboutir à un réseau de placettes « changement climatique » complet.

3.3. Une campagne de terrain pour valider localement les modèles

3.3.1 Matériel et méthode

La comparaison de ces trois modèles d'un point de vue purement bibliographique n'est pas envisageable si l'on souhaite utiliser ces outils sur le territoire. Les modèles de LERFoB, BioClimSol et IKS sont donc testés sur des peuplements Ardéchois et Drômois. Les tests ne pouvant pas être effectués sur toutes les essences modélisées, le choix se porte sur deux espèces à enjeu du territoire : le sapin pectiné et le châtaignier. Le sapin est en effet l'essence présentant le plus fort risque de dépérissement selon les prévisions du LERFoB. Le châtaignier est une essence emblématique des territoires de la Drôme et Ardèche. Pour ces deux essences, des dépérissements sont recensés sur le secteur d'étude.

Pour tester ces 3 modèles en Drôme Ardèche, nous avons voulu tester leur pertinence à prévoir les zones plus ou moins adaptées à chacune des deux essences. Dans un premier temps à partir de la base BD FORET de l'IGN, tous les peuplements à dominance de sapin ou de châtaignier sont repérés. Pour chaque peuplement, un numéro aléatoire (par essence) est attribué à chaque parcelle. La présence de l'essence recherchée dans chaque peuplement ainsi signalé est validée ou non par les techniciens du CRPF de chaque secteur, grâce à leur connaissance du territoire et aux photographies aériennes.

Les parcelles retenues sont ensuite classées par classe de la probabilité de présence (tableau 12) sur le secteur en fonction des cartes des modèles du LERFOB. Dans chaque classe de présence, les parcelles retenues sont celles où l'essence est présente et qui ont le numéro d'ordre aléatoire le plus petit (classement croissant). Les parcelles de moins de 14 m de hauteur dominante et ayant bénéficié d'une éclaircie récemment (moins de 6 ans) sont refusées lors de l'inventaire de terrain. Les jeunes peuplements sont effectivement moins touchés par les dépérissements, et les éclaircies ont éliminé les arbres dépérissant.

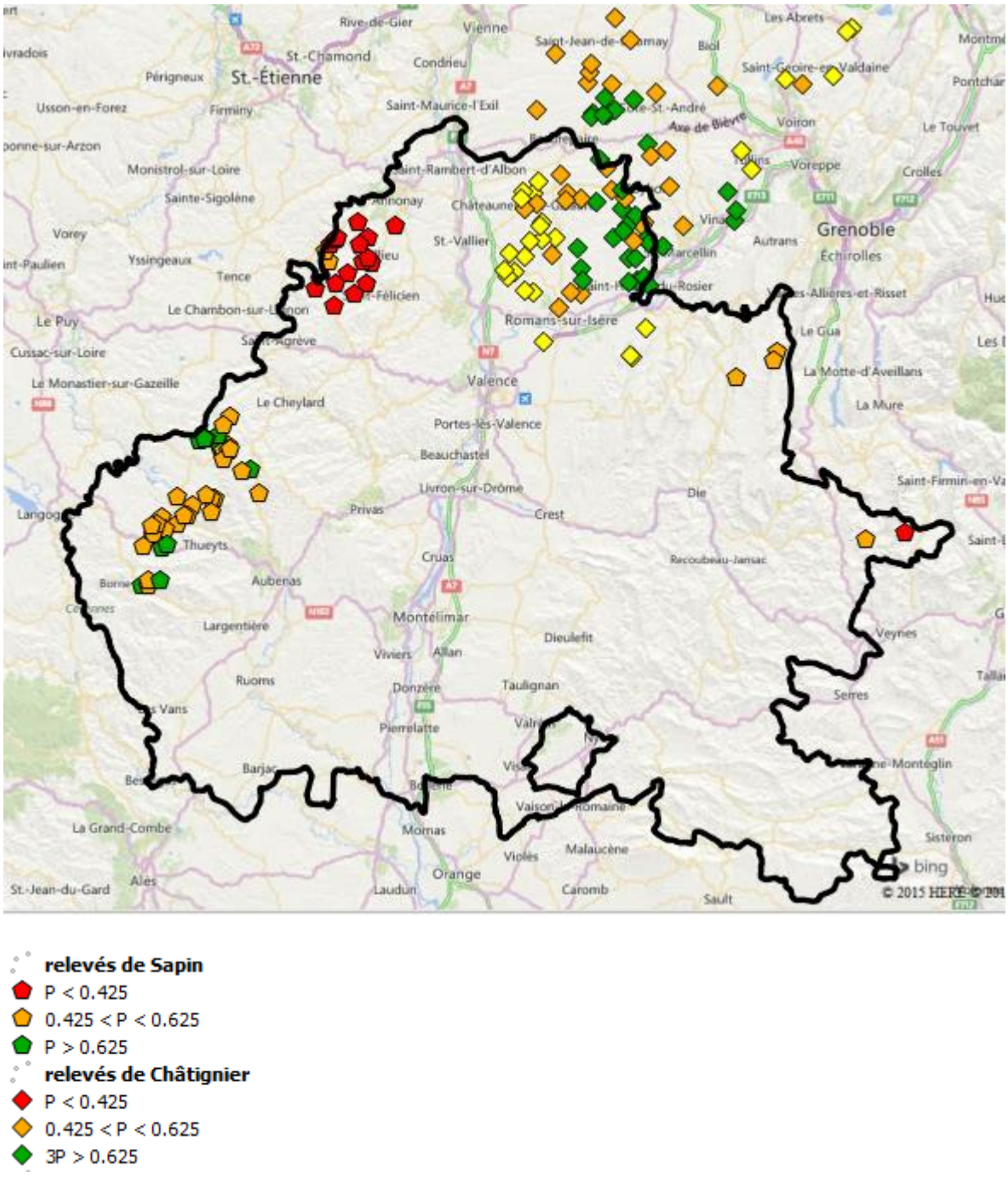
Dans le cas où l'on s'aperçoit sur la parcelle que le relevé ne peut être réalisé on se déplace sur le peuplement voisin le plus proche. On veille à obtenir des échantillons au mieux équilibrés. 150 relevés ont finalement été réalisés pour tester les modèles.

Tableau 12 : Répartition des peuplements mesurés selon la probabilité P de présence de l'essence selon les modèles du LERFoB

Catégories de peuplements en fonction de leur probabilité de présence P selon les modèles du LERFoB	Nombre de placettes mesurées	
	Sapin pectiné	Châtaignier
Catégorie 1 (P<0.425)	17	26
Catégorie 2 (0.425<P<0.625)	32	31
Catégorie 3 (P>0.625)	11	33
Total	60	90

Les cartes des peuplements visités sont présentées sur la figure 18.

Figure 18 : Carte des peuplements visités pour le test des trois modèles, répartis selon la probabilité de présence P d'après les modèles de niche du LERFoB



relevés de Sapin
P < 0.425
0.425 < P < 0.625
P > 0.625
relevés de Châtignier
P < 0.425
0.425 < P < 0.625
3P > 0.625

Chaque peuplement est visité pour réaliser un diagnostic pédologique, un relevé floristique pour bioindication, une évaluation de l'état sanitaire (méthode DSF d'évaluation du déficit foliaire, présence de pathogènes), un relevé dendrométrique. Le protocole est présenté en annexe 7.

Le principe de la bioindication repose sur l'élaboration de modèles de niche. A l'aide de données de présence/absence de différentes espèces végétales, et des caractéristiques écologiques des milieux où l'on inventorie ces espèces, des courbes de réponse des espèces à différentes variables écologiques sont élaborées. On a alors accès à la valeur indicatrice de chaque espèce, qui correspond à la valeur du facteur

écologique pour laquelle la probabilité de présence de l'espèce est la plus élevée (cette méthode ne s'appliquant qu'aux espèces végétales dont la réponse vis-à-vis du facteur est significative, et dont la courbe de réponse est unimodale et de faible amplitude) (AgroParisTech-ENGREF, IFN, 2008). Cette méthode a été utilisée pour évaluer sur chaque station le pH et le rapport C/N des sols. Le protocole utilisé est inspiré de celui du relevé floristique rapide de Jean Paul Gégout et Paolina Pinto.

3.3.2. Résultats

Les peuplements de sapin visités ont une surface terrière moyenne de 25 m²/ha, et un diamètre dominant moyen de 52 cm. La réserve utile maximale varie de 5 à 128 mm, le pH de 3 à 6, et la majorité des peuplements sont exposés nord-ouest. Du gui a été rencontré seulement au nord de l'Ardèche.

Les peuplements de châtaignier ont une surface terrière moyenne de 32m²/ha et un diamètre dominant moyen de 27cm. Le pH des sols varie entre 4 et 5, et les réserves utiles maximales vont de 4 mm à 215 mm. Les peuplements sont en majorité exposés Ouest. On observe une très forte présence de cynips dans l'ensemble des peuplements.

Des descriptifs plus détaillés sont donnés en annexe 8.

L'analyse des données est ensuite effectuée dans l'objectif de voir si les dépérissements diffèrent avec la probabilité de présence du LERFoB, et de comparer des résultats obtenus sur le terrain avec ceux prédits par les modèles BioClimSol et IKS. Le test statistique utilisé est celui du Khi², afin de tester l'indépendance entre dépérissements observés et valeurs prises par chaque variable en sortie de chaque modèle.

Les peuplements visités sont classés selon deux catégories : sain ou dépérissant. Pour cela, un seuil est défini, correspondant au pourcentage d'arbres dépérissant ou morts sur la placette. Pour le Sapin, un peuplement est considéré sain si moins de 20% des arbres de la placette sont en classe 3, 3+ ou 4 (MAAP, 2010). Pour le Châtaignier, une forte présence du cynips augmentant le déficit foliaire force à fixer le seuil non pas à 20% mais à 30% de tiges en classe 3, 3+ ou 4.

Les tableaux 13 et 14 dressent un bilan des résultats obtenus pour le châtaignier et le sapin avec chaque modèle. L'analyse graphique des cartes montre un fort contraste entre celles d'IKS et celles des autres modèles. Le modèle IKS parait optimiste, la quasi-totalité du territoire étudié étant considérée comme cœur de niche du châtaignier. Il en est de même pour le sapin pectiné. Il semble que la précision du modèle ne permette pas de prendre en considération les variations plus précises que dans les grandes zones bioclimatiques : seule l'influence méditerranéenne ressort sur la carte. Les résultats du test du Khi² viennent confirmer cette hypothèse, avec un Khi² significatif seulement pour la composante hydrique du modèle Châtaignier d'IKS. Le test n'est pas significatif pour la composante hydrique d'IKS avec le Châtaignier, car tous les points mesurés prennent la même valeur pour cette composante hydrique.

Les deux modélisations obtenues avec BioClimSol semblent pertinentes, avec des zones géographiques considérées à risque et caractérisées par des relevés où les peuplements sont dépérissants, et des Khi² significatifs.

Les cartes du LERFoB semblent aussi concorder avec les résultats de terrain pour le Sapin. Cependant, le test du Khi² pour le Châtaignier ne donne pas de lien significatif entre dépérissement observé et probabilité de présence selon le modèle. Comme les tests sur les modèles BioClimSol révèlent quant à eux des effets significatifs, on peut supposer que les dépérissements observés dans les zones de relevé pour le Châtaignier sont dus à des à-coups climatiques, considérés seulement par BioClimSol. De plus, la répartition des peuplements de châtaignier dépend en grande partie du facteur anthropique, puisque beaucoup de châtaigneraies ont été plantées en France aux XVIe et XVIIe siècles pour la culture de la châtaigne (ACRC,

2015). Enfin, les modèles du LERFoB s'appuient sur des données climatiques de la période 1961-1990, et ne prennent donc pas en compte les évolutions climatiques des dernières décennies.

On peut également évaluer la corrélation entre les résultats des différents modèles (annexe 9). Les tableaux ci-dessous résument ces corrélations entre modèles pour chaque essence.

Tableau 15 : Corrélations entre les résultats des différents modèles sur les relevés de terrain pour les relevés dans les peuplements de Sapin

R^2	BioClimSol 1 (années à risque)	BioClimSol 2 (dépérissement)	LERFoB	IKS hydrique	IKS thermique
BioClimSol 1		0.7983	0.6737	0.1747	0.0306
BioClimSol 2			0.7473	0.1634	0.0366
LERFoB				0.2496	0.0538
IKS hydrique					0.0088
IKS thermique					

Tableau 16 : Corrélations entre les résultats des différents modèles pour les relevés dans les peuplements de Châtaignier

R^2	BioClimSol 1 (années à risque)	BioClimSol 2 (dépérissement)	LERFoB	IKS hydrique	IKS thermique
BioClimSol 1		0.8076	0.0493	Toutes les mêmes valeurs	0.1785
BioClimSol 2			0.0349	Toutes les mêmes valeurs	0.1469
LERFoB				Toutes les mêmes valeurs	0.1049
IKS hydrique					Toutes les mêmes valeurs
IKS thermique					

On observe de fortes corrélations entre les différents modèles pour le sapin pectiné, sauf pour les composantes hydrique et thermique d'IKS. En ce qui concerne le châtaignier, toutes les corrélations sont faibles, sauf entre les deux modèles BioClimSol.

La forte corrélation entre les modèles BioClimSol et ceux du LERFoB suppose qu'il est possible d'utiliser ces outils ensemble pour une meilleure localisation des zones à risque pour les essences.

Toutefois, malgré la forte corrélation (0.75) entre BioClimSol2 et LERFoB pour le sapin pectiné, et la convergence générale des deux cartes en termes de prédiction de zones propices à l'essence, le modèle du LERFoB semble plus optimiste, notamment à l'est de la Drôme. On se trouve donc face à des zones de divergence entre les prédictions des modèles.

Tableau 13 : Comparaison des résultats pour le sapin

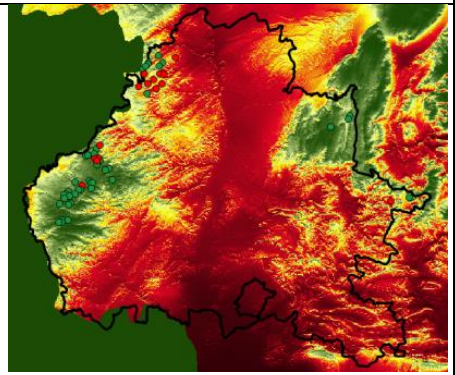
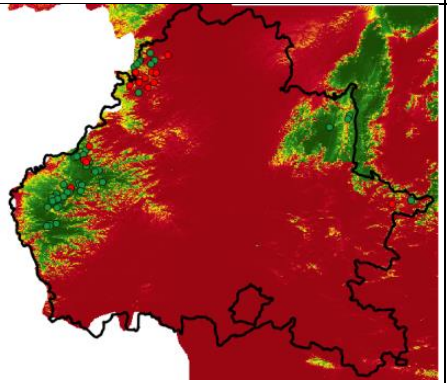
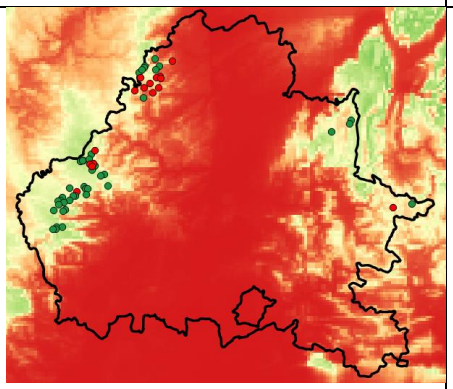
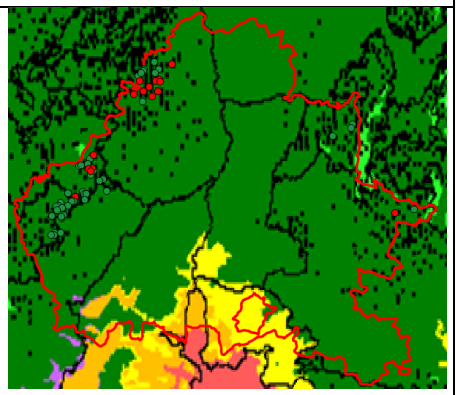
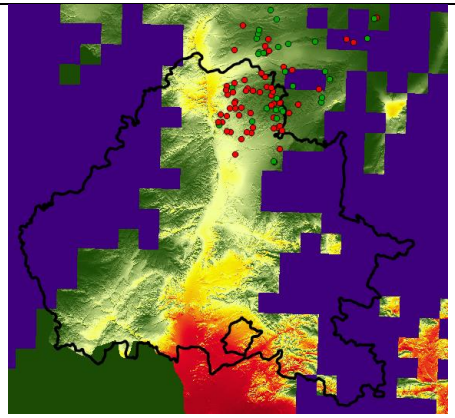
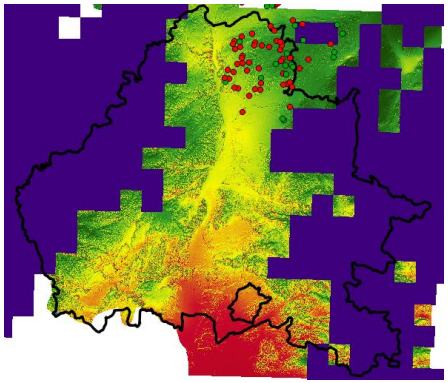
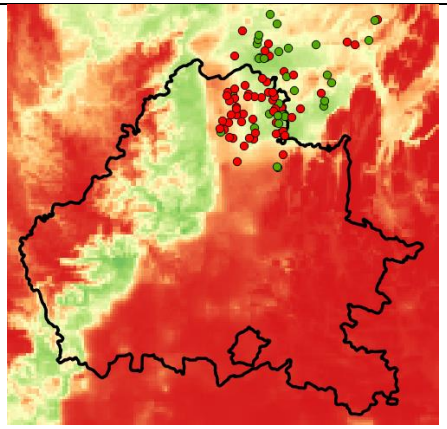
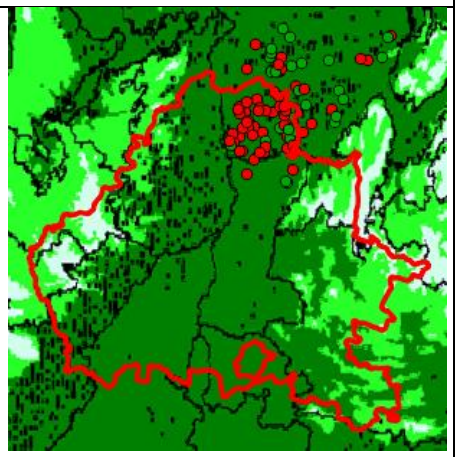
Modèle	BioClimSol 1	BioClimSol 2	LERFoB	IKS	
Cartes obtenues	 Légende : Probabilité d'apparition d'année à risque 0% 10% 15% 33% 100% Max, élevé, modérée	 Légende : Probabilité de dépérissement 0% 35% 60% 80% 100%	 Légende : Probabilité de présence 0% 25% 50% 75% 100%	 Légende : Vert foncé : cœur de niche Vert clair : limite de niche par manque de chaleur Mauve : hors niche thermique statistique par excès de chaleur sans risque hydrique. Jaune : dans niche thermique, et en limite de niche hydrique Orange : hors niche thermique par excès de chaleur en limite de niche hydrique	
Résultat du test du khi²	**Khi² = 11.57** **P=0.003**	**Khi² = 11.37** **P=0.022**	**Khi² = 11.43** **P=0.003**	Composante hydrique Khi² = 3.33 P=0.06	Composante thermique Khi² = 2.02 P=0.15

Tableau 14 : Comparaison des résultats pour le châtaignier

Modèle	BioClimSol 1	BioClimSol 2	LERFoB	IKS	
Cartes obtenues	 Légende : Probabilité d'apparition d'année à risque 0% 10% 15% 33% 100% Masque thermique	 Légende : Probabilité de dépérissement 0% 35% 60% 80% 100% Masque thermique	 Légende : Probabilité de présence 0% 25% 50% 75% 100%	 Légende : Vert foncé : cœur de niche Vert clair : limite de niche par manque de chaleur	
Résultat du test du khi²	**Khi² = 11.32** **P=0.003**	**Khi² = 16.36** **P=0.002**	Khi² = 0.22 P=0.89	Composante hydrique Aucun point discriminé	Composante thermique **Khi² = 6.25** **P=0.01**

NB : les modèles BioClimSol étant construits à partir de données de terrain, aucune donnée d'inventaire n'est disponible sur les zones où l'espèce est absente à cause du risque de gel. Les cartes BioClimSol pour le châtaignier sont donc complétées par un masque raster correspondant aux températures minimales annuelles sur la période 1975-2004 inférieures à 9°C selon le modèle SAFRAN.

3.3 Analyse et comparaison des différents modèles

3.3.1 Les données utilisées

Un modèle de niche prévoit bien la niche fondamentale d'une espèce, et non pas sa niche réalisée. Ainsi, les modèles du LERFoB pour l'Épicéa, le Sapin, le Hêtre et le Chêne Sessile sur la période 1961-1990 sont optimistes : les surfaces où des présences sont prédites (en utilisant le seuil de la courbe ROC) sont plus étendues que les surfaces de présence observées par l'IGN entre 2004 et 2007. Certaines absences ne peuvent en effet pas être prédites par des modèles de niche, qui ne tiennent pas compte des facteurs anthropiques (plantations, choix sylvicoles), ni des effets de concurrence entre les espèces. Il est donc nécessaire d'interpréter les lieux à haute probabilité de présence non pas comme les endroits où l'on est certain de trouver l'essence étudiée, mais plutôt comme les milieux rassemblant des conditions à priori favorables à la présence de l'espèce (Piedallu et. al., 2009).

Cette mise en garde est aussi applicable au modèle de niche IKS, d'autant plus pour les présences modélisées d'essences introduites telles que le Douglas. C'est la raison pour laquelle nous avons choisi de nous concentrer d'abord sur des essences autochtones, dont les risques sont plus faciles à appréhender au vu des outils choisis ici.

Données de présence/absence

IKS s'appuie sur un grand nombre de sources de données pour la présence ou l'absence des espèces : IFN, LITTLE USDA, FARJON, et EUFORGEN. La multiplication des sources de donnée permet de rendre le modèle plus performant. Pour le territoire français, dans IKS, les bases de données de l'IGN ; de l'inventaire des Conifères de Farjon (Farjon, 1999) et EUFORGEN se superposent. De plus, cet outil étant élaboré à partir de données mondiales, il permet des modélisations pour un très grand nombre d'essences, à l'échelle globale. On dispose donc d'indications pour des essences exotiques, particulièrement intéressantes pour une étude sur le changement climatique. On peut supposer que l'élaboration du modèle à partir de données mondiales permet de compenser le caractère exotique des espèces, et donc rendre plus plausibles les résultats obtenus à partir d'un modèle de niche pour des essences exotiques du point de vue de la France.

BioClimSol se distingue des deux autres modèles en se basant sur un grand nombre de relevés de terrain (plus de 2000), permettant ainsi de prédire le risque de dépérissement des essences.

Variables environnementales

L'avantage du modèle BioClimSol est sa prise en compte des évènements extrêmes : il intègre les intensités, fréquences et durées des sécheresses, ainsi que les seuils de tolérance de chaque essence étudiée. Ce modèle permet donc d'appréhender plus de situations critiques pour les essences.

Les modèles de niche du LERFoB sont ceux qui incluent le plus de paramètres environnementaux, tant climatiques qu'édaphiques. La prise en compte du pH et du rapport C/N permet de cibler les stations propices à l'essence étudiée, au-delà de la réserve en eau du sol, difficile à évaluer en général. En revanche, le fait d'utiliser des données de la période 1961-1990 empêche de prendre en compte les dernières évolutions climatiques et risque de négliger certaines zones à risque.

Le modèle IKS ne prend en compte aucun paramètre édaphique. Ainsi, les zones indiquées propices à une essence donnée ne le sont que d'un point de vue climatique. Il s'appuie, pour un grand nombre d'essences, sur l'aire de répartition naturelles des essences géoréférencées. L'aire de répartition permet de connaître le périmètre de présence de l'essence, mais pas de connaître précisément les zones de présence de l'essence au

sein de cette aire. Le modèle s'avère alors optimiste dans le sens où il n'élimine pas tous les milieux dont le climat ou le sol est inadapté à l'essence étudiée, comme par exemple les zones à substrat calcaire pour les essences calcifuges.

Pour informations de présence/absence, les données climatiques utilisées par IKS sont mondiales, ce qui permet de construire des modèles de niche pour des essences exotiques : les conditions climatiques prises en compte pour les zones de présence ne sont pas seulement influencées par le facteur anthropique, mais comprennent également les aires d'apparition naturelle.

3.3.2 Le projet ASTEC : comparaison de l'efficacité deux modèles

Dans le cadre du projet ASTEC (AgroParisTech-ENGREF, 2014), un travail réalisé par des étudiants d'AgroParisTech dans le but d'étudier l'impact du changement climatique sur certaines essences et de faire des préconisation de gestion, la comparaison des outils du LERFoB, IKS et BioClimSol a été réalisée via une étude menée en Normandie sur le hêtre, le pin sylvestre, les chênes pédonculé et sessile.

La comparaison des efficacités des modèles IKS et LERFoB (les données BioClimSol n'étant pas accessibles aux étudiants travaillant sur le projet à ce moment-là) a été effectuée pour quatre essences dont les aires de présence ont été modélisées par ces deux modèles, à savoir le hêtre, le pin sylvestre, le chêne pédonculé et le chêne sessile. Les données de présence de chacune de ces espèces ont été extraites de bases de données du CNRS et de catalogues de stations forestières. Les probabilités de présence et indices des deux outils ont également été extraites pour la région Basse-Normandie, dans le but de les comparer aux observations de présences ou d'absences sur le terrain, et d'en déduire l'efficacité de chaque modèle.

Les résultats de ce travail montrent un taux de succès, autrement dit un pourcentage de points dont la valeur a été correctement prédite, plus élevé pour le LERFoB que pour IKS. L'outil du LERFoB donne également une spécificité (capacité à prédire correctement une absence) plus élevée, mais la sensibilité (capacité à bien prédire une présence) est meilleure pour IKS. La plus haute spécificité du LERFoB peut s'expliquer par un seuil de présence (valeur de probabilité de présence au-delà de laquelle on considère qu'il y a présence de l'essence) plus bas que pour IKS (rapport ASTEC 2014). Le succès supérieur du LERFoB permet de supposer une meilleure performance de cet outil, au moins sur le territoire de Basse-Normandie.

Les cartes obtenues pour les quatre essences et pour la période actuelle avec l'outil IKS donnent toutes le même indice IKS sur l'ensemble du territoire de la Basse-Normandie : tout comme en Drôme-Ardèche, aucune variation locale n'est signalée par IKS. Cependant, des variations d'indice IKS appariassent sur les cartes de simulation de l'horizon 2050 en Basse-Normandie.

3.3.3 Les tests sur le territoire Drôme-Ardèche

Le niveau de définition des cartes IKS ne semble pas adapté à une étude des essences en place à l'échelle départementale. Les résultats non significatifs des tests du Khi² sur les relevés de terrain en Drôme et Ardèche vont dans ce sens. L'intérêt d'un tel outil dans une étude sur le changement climatique pourrait être d'évaluer les possibilités en termes de plantation d'essences exotiques sur de grandes zones bioclimatiques très peu utilisées localement. Dans ce cas, il resterait néanmoins nécessaire de coupler l'information apportée par IKS à des données pédologiques à une échelle plus fine.

Les résultats de l'étude sur les modèles du LERFoB sont concluants uniquement pour le Sapin. On peut donc estimer que le modèle de niche du sapin est utilisable pour situer l'emplacement de placettes, mais il est plus délicat de recourir à celui du châtaignier.

Les deux modèles BioClimSol obtiennent des résultats significatifs pour les tests de corrélation entre dépérissement observé et prédiction d'année à risque ou de dépérissement. On peut donc les utiliser pour situer les zones à risque pour le sapin et le Châtaignier.

Les modèles du LERFoB et de BioClimSol ayant une forte corrélation, on peut envisager de coupler ces modèles pour définir les zones limites du Sapin. L'outil du LERFoB peut être utile pour localiser les zones favorables d'un point de vue pédoclimatique, et BioClimSol peut compléter l'information en termes de risque climatique, en intégrant la dimension d'à-coups climatiques. Pour situer les secteurs limites à venir et se faire une idée de l'évolution des conditions pédoclimatiques, on peut envisager d'utiliser ces modèles en les appliquant sur des données climatiques futures.

Il existe donc bien des modèles basés sur le climat actuel permettant d'appréhender les risques encourus par différentes essences. L'utilisation de ces modèles permet de situer les zones actuellement à risque, mais pas celles qui le deviendront dans un futur plus ou moins proche. Les résultats de ces modèles projetés avec des données de climat futur existent mais n'ont pas pu être utilisés dans le cadre de ce travail, faute de temps. De plus, les discordances observées entre les zones à risques signalées par BioClimSol2 et les zones à faible probabilité de présence selon le LERFoB rendent difficile une utilisation simultanée de ces deux modèles, ou bien un choix entre ceux-ci. Il est donc nécessaire de se projeter d'une autre manière qu'avec les modèles dans le climat futur afin de situer les zones propices à l'installation de placettes. Raisonner sur de grandes catégories d'essences permettrait d'obtenir des données adaptables à un grand nombre d'espèces. C'est là tout l'intérêt de l'utilisation des données climatiques Drias dans cette étude.

3.4 L'utilisation de données climatiques du portail Drias

3.4.1 Le déplacement des aires climatiques au cours du temps

Pour situer les placettes du réseau vis-à-vis des évolutions climatiques en Drôme et Ardèche, on s'appuie sur des données de prévisions disponibles sur le portail Drias. Il s'agit d'une plateforme de téléchargement fournissant des projections climatiques régionalisées (sous format numérique ou graphique) issues de plusieurs laboratoires de modélisation du climat. Ces données permettront de définir les évolutions des aires climatiques au cours du temps.

L'objectif est de situer de grandes zones de vigilance climatique. Pour cela, il est nécessaire de choisir des variables sur lesquelles s'appuyer. Les modèles BioClimSol 1 et 2 et ceux du LERFoB ayant donné des résultats significatifs pour le sapin, on peut envisager de choisir parmi les variables utilisées dans ces outils. Pour rappel, les variables utilisées dans BioClimSol et LERFoB sont :

- Déficit hydrique climatique
- Gel printanier
- TPI
- Température moyenne annuelle
- pH
- Engorgement temporaire
- Déficit en eau du sol
- C/N
- Engorgement permanent

Drias ne fournissant que des données climatiques, et au vu du temps imparti, seules des données climatiques peuvent être utilisées. Ce choix est cohérent dans le sens où ce sont les variables les plus soumises à des évolutions rapides. Les variables potentiellement utilisables pour anticiper le devenir des

peuplements sont donc le déficit hydrique climatique, le gel printanier et la température moyenne annuelle. Le gel printanier n'est pas un facteur risquant de devenir de plus en plus limitant dans un contexte de réchauffement climatique. Il n'est donc pas indispensable de le conserver pour déterminer des zones de vigilance climatique. L'évapotranspiration de Turc étant calculée à partir de la température moyenne mensuelle, les variables P-ETP et température moyenne annuelle risquent d'être fortement corrélées. Il semble donc pertinent de ne se baser que le bilan hydrique climatique P-ETP.

Pour quatre décennies successives, l'évolution du bilan hydrique climatique entre les mois de juin à août inclus est calculée, à partir des prévisions des scénarios RCP 4.5 (intermédiaire) et RCP 2.6 (plus optimiste). Les données modélisées sont celles du CRNM-2014.

Le bilan hydrique climatique (P-ETP) correspond à la différence entre les précipitations (P) et l'évapotranspiration potentielle (ETP), c'est-à-dire les pertes en eau par évaporation d'eau liquide et la transpiration de la biomasse qui se produiraient dans des conditions non limitantes en eau. Cette variable est utilisée dans BioClimSol. Elle est calculable à partir des données fournies dans les projections Drias.

Les moyennes trentenaires de P-ETP ont comparées. Les périodes concernées sont celles recommandées par le portail Drias : 1976-2005 pour la période de référence, 2021-2050, 2041-2070 et 2071-2100. Ces données ne correspondent pas à des valeurs précises prédites pour chaque variable climatique en un point et à une date donnée, mais reflètent plutôt la tendance du climat susceptible d'être observé sur une période donnée. Les données de références ne correspondent pas à des données météorologiques observées lors des années 1976 à 2000. Il est recommandé de les utiliser en calculant des moyennes trentenaires, qui reflètent le climat général de la période.

Pour l'élaboration des cartes, des seuils de tolérance au déficit hydrique sont utilisés. Ils sont issus de travaux réalisés en croisant des données climatiques 1950-2000 AURELHY avec des aires de répartition mondiales des essences. On définit un seuil par la valeur pour laquelle 10% des présences connues de l'essence seulement sont situés sur des points dont le bilan hydrique est inférieur à cette valeur (Lemaire, 2014). Pour faciliter la lecture des cartes et la manipulation des données, on peut regrouper les différentes essences dont la valeur seuil est connue, pour créer trois grands groupes d'essences et arriver à deux seuils, présentés dans le tableau 16.

Tableau 17 : Définition des trois groupes d'essences

Catégorie	Valeurs de P-ETP de juin à août
Essences montagnardes (sapin pectiné, hêtre, épicéa)	P-ETP >-160mm
Essences collinéennes (châtaignier, pin sylvestre, chêne sessile…)	-240 > P-ETP < -160mm
Tendance méditerranéenne : aire de répartition du chêne pubescent	-240 > P-ETP > - 290mm

Les cartes présentant les aires de répartition des différentes catégories d'essences sont présentées figure 19. Puis, les données trentenaires pouvant être comparées selon les recommandations du portail Drias, le calcul des différences entre les rasters des données trentenaires est effectué pour mieux visualiser les évolutions.

Figure 19 : Evolution du bilan hydrique de juin à août selon deux scénarios du GIEC d'après les données su portail Drias. NB : les données ont été téléchargées uniquement sur le territoire de Drôme et Ardèche. Les pixels hors de cette zone ne sont pas calculés à parti de données précises.

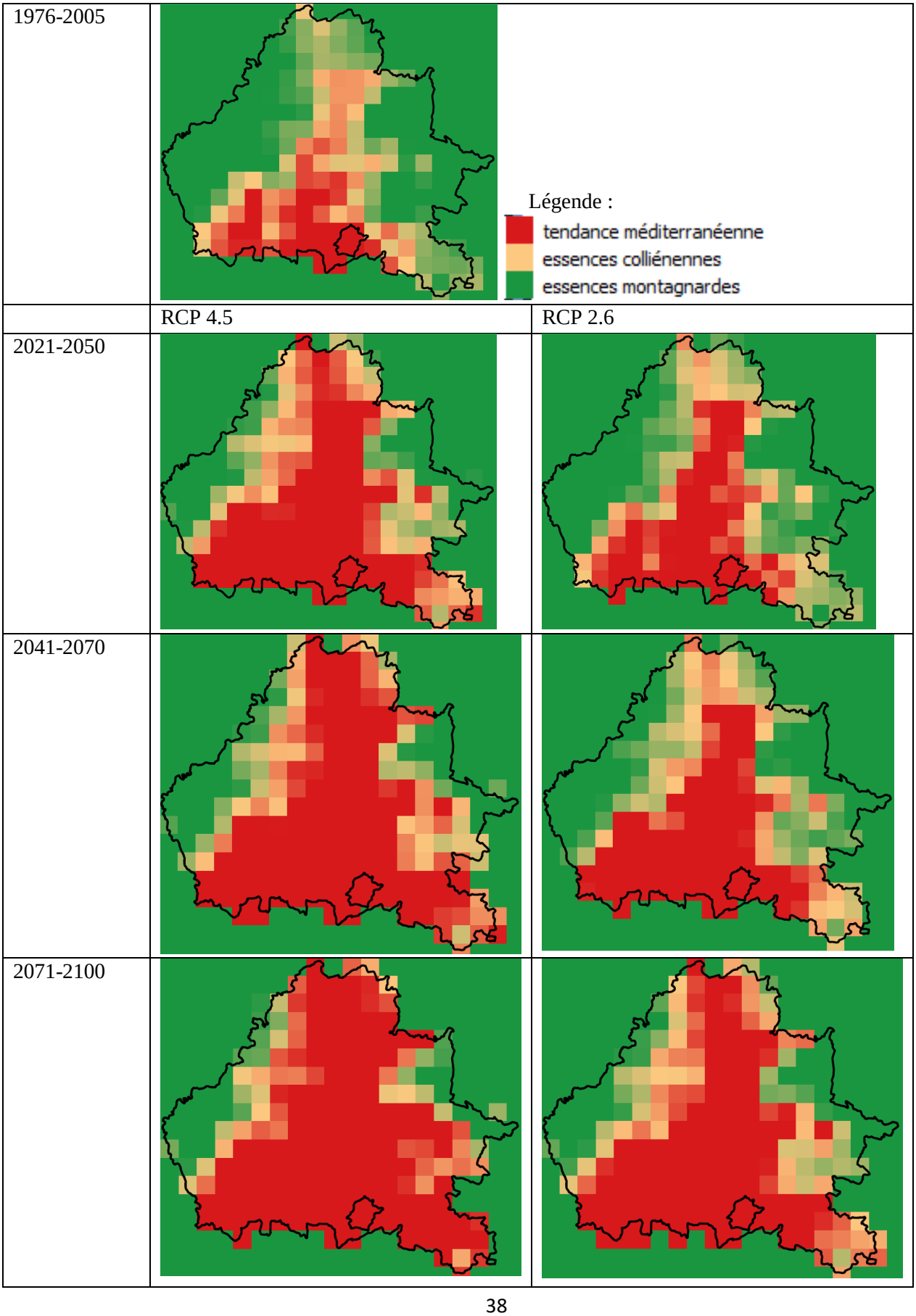
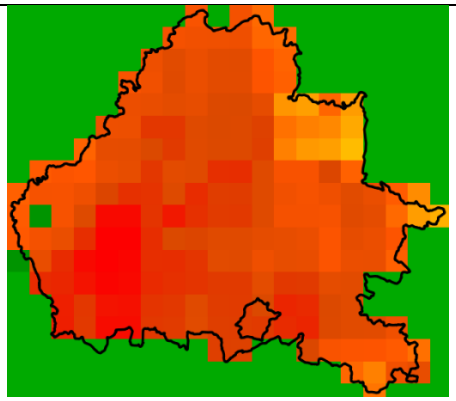
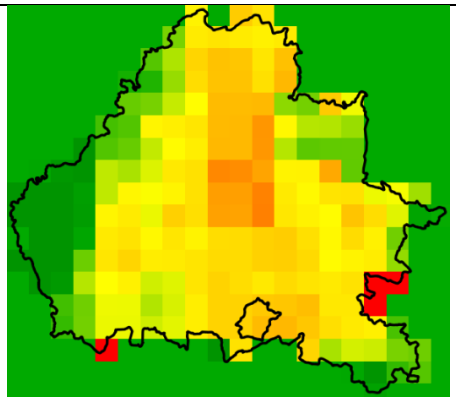
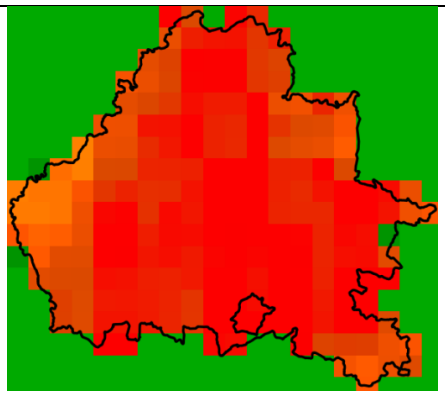
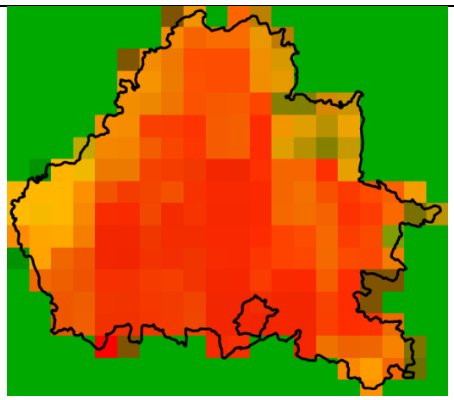
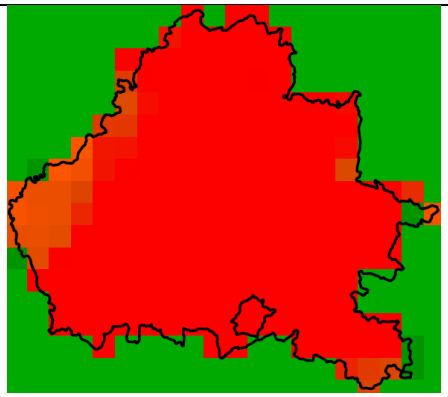
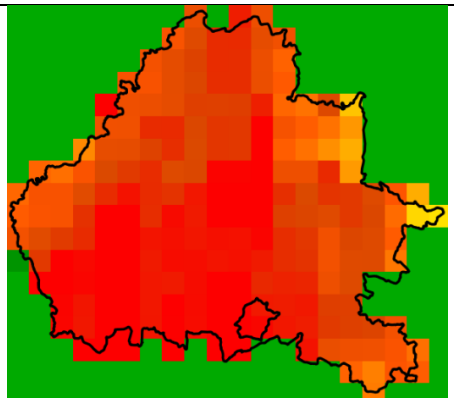


Figure 20 : Différences entre bilans hydriques de juin à août d'une période trentenaire à l'autre. NB : les données ont été téléchargées uniquement sur le territoire de Drôme et Ardèche. Les pixels hors de cette zone ne sont pas calculés à parti de données précises.

	RCP 4.5	RCP 2.6
1976-2005 à 2021-2050 Légende : -100;-80 -80;-60 -60;-40 -40;-20 -20;0 >0 10	 Ecart-type = 21,00 Moyenne = -73,58 Diminution du bilan hydrique de 73,58 mm à 28% près	 Ecart-type = 17,17 Moyenne = -20,92 Diminution du bilan hydrique de 20,92 mm à 82% près
1976-2005 à 2041-2070	 Ecart-type = 21,85 Moyenne : -88,12 Diminution du bilan hydrique de 88.12 mm à 25% près	 Ecart-type = 19,03 Moyenne = -46,64 Diminution du bilan hydrique de 46,64 mm à 40% près
1976-2005 à 2071-2100	 Ecart-type = 17.15 Moyenne = -111,22 Diminution du bilan hydrique de 111,22 mm à 15% près	 Ecart-type = 18,03 Moyenne = -82,46 Diminution du bilan hydrique de 82,64 mm à 22% près

On observe une diminution du bilan hydrique climatique estival assez homogène sur l'ensemble du territoire Drôme-Ardèche : elle est en moyenne de 74 mm en 2020 – 2050 avec un coefficient de variation de 0,28, et de 111 en – 2071-2100 avec un coefficient de variation de 0,15.

Le scénario RCP4.5 prévoit une baisse du bilan hydrique entre l'horizon de référence (1976-2005) et l'horizon 2071-2100.

Le scénario RCP2.6 prévoit également une baisse du bilan hydrique climatique entre la période de référence et l'horizon le plus lointain, mais avec des valeurs moins faibles de P-ETP que pour le scénario RCP 4.5.

Quel que soit le scénario, toutes les placettes du CRPF sont situées dans des zones où le bilan hydrique faiblit dès le passage entre la première et la deuxième période étudiée. Les cartes de moyennes trentenaires montrent pour quelques placettes un changement d'étage climatique : certains peuplements des essais sont susceptibles de se retrouver dans des conditions climatiques à priori inadaptées (cartes en annexe 10).

3.4.2 L'élaboration d'une clé de détermination de terrain pour cibler les peuplements utiles à la constitution d'un réseau « changement climatique »

Rappel : On souhaite obtenir un réseau de placettes se répartissant, pour chaque essence, sur un gradient de vigilance climatique. On peut donc dans un premier temps classer les peuplements en trois catégories définies selon le niveau de vigilance climatique. Le choix est fait de s'appuyer sur les données du scénario RCP 4.5 pour la sélection de placettes. Cependant, aucun scénario ne peut aujourd'hui être considéré comme plus plausible qu'un autre.

Les zones de vigilance sont les suivantes :

- Zone 1 : zone climatique toujours adaptée à l'essence, de la période de référence à l'horizon 2071-2100. Ces placettes sont situées dans une zone ne présentant à priori aucun risque pour l'essence d'un point de vue climatique.
- Zone 2 : zone climatique adaptée lors de la période de référence, mais passant en zone limite dès l'horizon proche 2021-2050. Cela correspond à la zone la plus critique puisque comprenant les placettes passant le plus rapidement en zone à risque.
- Zone 3 : zone toujours adaptée, sauf pour l'horizon 2071-2100.

Le choix d'utiliser les horizons les plus proche et éloigné permet de définir des zones de vigilances bien distinctes, en particulier pour l'étape suivante du travail qui consiste à relier vigilance climatique et altitude.

Afin d'élaborer un outil facile d'utilisation lors du repérage de zones intéressantes pour la mise en place de nouvelles placettes, un critère de détermination plus simple que le bilan hydrique estival est nécessaire. On peut donc essayer d'établir un lien entre altitude et niveau de vigilance climatique.

Les peuplements de la BD forêt de l'IGN sont analysés pour déterminer la zone de vigilance climatique dans laquelle ils se trouvent. Puis, une analyse de variance est effectuée pour déterminer si un lien existe entre le niveau de vigilance et l'altitude à laquelle se trouve chaque point.

On fait l'hypothèse Ho que l'altitude est indépendante de la zone de vigilance climatique. On réalise une ANOVA pour des peuplements d'essences montagnardes (sapin pectiné et hêtre), puis pour des peuplements d'essences collinéennes (châtaignier et pin sylvestre). Les tests sont effectués à l'aide du logiciel R. Pour les deux tests, on obtient une probabilité de dépasser la valeur seuil de Fischer très inférieure à 0.05 : $P=1.5^{e}$-12

pour les essences montagnardes et P=1.892^{e}-9 pour les essences collinéennes. L'hypothèse Ho est donc rejetée : l'altitude est liée à la zone de vigilance climatique.

Ces analyses statistiques donnent des résultats très significatifs, avec des P values très proches de 0. Les résultats des ANOVA montrent donc que pour les essences collinéennes comme pour les essences montagnardes, il existe bien un lien entre altitude et zone de vigilance climatique. Le critère « altitude », même s'il n'est pas le seul à avoir une influence sur le niveau de vigilance climatique, peut donc être utilisé pour localiser les zones propices à l'installation de placettes pour une étude sur le changement climatique.

Figure 21 : résultat de l'analyse de variance sur les peuplements de sapin et hêtre en Drôme-Ardèche

Ho : l'altitude est indépendante de la zone de vigilance climatique : Hmoy(zone1) = Hmoy(zone2) = Hmoy(zone3)

```
Analysis of Variance Table

Response: mont$alti
               Df  Sum Sq Mean Sq F value  Pr(>F)
mont$zonevigi   1 1093092 1093092  58.969 1.5e-12 ***
Residuals     160 2965877   18537
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Pr(>F) = 1,2*10^-12

Pr(>F) < 0.05

Donc Ho est rejetée : l'altitude est liée à la zone de vigilance pour le sapin et le hêtre.

Figure 22 : résultat de l'analyse de variance sur les peuplements de pin sylvestre et châtaignier en Drôme-Ardèche

Ho : l'altitude est indépendante de la zone de vigilance climatique : Hmoy(zone1) = Hmoy(zone2) = Hmoy(zone3)

```
Analysis of Variance Table

Response: col$alti
              Df   Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
col$zonevigi   1  2343993 2343993  40.222 1.892e-09 ***
Residuals    174 10140161   58277
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Pr(>F) = 1,892*10^-9

Pr(>F) < 0.05

Donc Ho est rejetée : l'altitude est liée à la zone de vigilance pour le pin sylvestre et le châtaignier

En observant la répartition des altitudes selon les valeurs Drias de bilan hydrique estival sur le territoire Ardèche-Drôme, on obtient le tableau 18. Les valeurs limites ont été définies telles que 95% des points dont le bilan hydrique correspond à l'étage souhaité soient situés à une altitude supérieure au seuil.

Tableau 18 : Valeurs seuil d'altitudes pour les essences montagnardes et collinéennes aux différents horizons temporels selon les données Drias de bilan hydrique climatique estival.

Altitude minimale	1976-2005	2021-2050	2071-2100
Essences montagnardes (P-ETP0608 > -160mm)	500 m	800 m	1000 m
Essences collinéennes (-160> P-ETP0608 > -240	300 m	500 m	700 m

Pour les essences montagnardes, la zone 1 de vigilance climatique se situe donc à une altitude supérieure à 1000m : les peuplements de sapin ou de hêtre situé à 1000m ou plus ne seront jamais dans une zone à déficit hydrique climatique important risquant d'entraîner des dépérissements à la fin du siècle. La zone 2 est située entre 500 et 800 mètres d'altitude (zone adaptée aujourd'hui mais qui ne le sera plus à l'horizon 2021-2050), et la zone 3 est en 800 et 1000m (encore adaptée aux essences montagnardes en 2021-2050, mais pas en 2071-2100). Pour intégrer l'effet de l'exposition dans le niveau de vigilance climatique, il est possible de tenir compte de deux grandes tranches d'exposition : on recommande alors une exposition nord pour la zone de vigilance climatique modérée, et une orientation en direction du sud pour les deux autres zones. L'ajout de ce paramètre permet d'atténuer les limites altitudinales indiquées : en bordure d'une zone de vigilance, l'exposition peut appuyer la décision quant à la catégorisation de la zone du peuplement. Par exemple, si un peuplement est situé à une altitude proche de la limite altitudinale supérieure de la zone de vigilance maximale, elle sera positionnée en zone de vigilance élevée si elle est orientée vers le nord.

En raisonnant de la même manière pour les essences de l'étage collinéen, on obtient le tableau 19.

Tableau 19 : Clé de détermination du niveau de vigilance climatique d'un peuplement montagnard ou collinéen selon son altitude

Altitude Exposition	Zone de vigilance climatique 1 : modérée	Zone de vigilance climatique 2 : maximale	Zone de vigilance climatique 3 : élevée
Essences montagnardes	>1000m Nord	500-800m Sud	800-1000m Sud
Essences collinéennes	>700m Nord	300-500m Sud	500-700m Sud

L'élaboration de cette clé implique de négliger les autres variables intervenant dans l'état sanitaire des peuplements, tels le confinement, tous les paramètres édaphiques... Ceci représente une très forte simplification, qui s'ajoute au regroupement des essences dans des grandes catégories. On accepte de perdre de la précision dans les données pour obtenir un outil de terrain simple d'utilisation. Pour obtenir un réseau de placettes « changement climatique » complet, il est donc nécessaire de disposer de peuplements situés dans les trois zones de vigilance climatique, donc dans les trois classes d'altitude. Ces classes pourront être affinées par le CRPF à l'aide de l'outil

BioClimSol. Le critère altitude est un critère simple et efficace qui pourra être utilisé facilement par les opérateurs de terrain pour sélectionner de nouvelles parcelles expérimentales. Cette clé pourra donc être également remise aux différents signataires de la charte, et pourront ainsi signaler les dispositifs en leur possession susceptible de rentrer dans un réseau « changement climatique ».

4. Proposition d'un réseau « changement climatique » et évaluation de sa faisabilité

4.1. Le nombre de dispositifs expérimentaux nécessaires

L'objectif est d'installer, pour plusieurs essences, des dispositifs expérimentaux au sens du guide de l'expérimentation forestière, pour pouvoir observer l'évolution de l'état sanitaire de différentes essences en fonction de l'itinéraire sylvicole adopté.

Le nombre de placettes nécessaires par modalité et par essence (appelé répétition) dépend de la vocation du réseau. Il est nécessaire de disposer d'un nombre de sites suffisant afin d'observer des résultats représentatifs, d'autant plus que les conditions pédologiques peuvent varier d'une placette à l'autre. Le guide de l'expérimentation forestière (Rosa *et. al*., 2011) recommande, pour un réseau avec un objectif de traitements statistiques poussés, 5 répétitions pour chaque modalité au sein d'un réseau. C'est effectivement le nombre minimum d'échantillons par modalité nécessaire pour effectuer un test du Khi2. On peut donc envisager au minimum 5 placettes par catégorie de vigilance climatique et par essence.

4.2 La répartition des dispositifs expérimentaux du réseau « changement climatique »

Les réseaux proposés sont élaborés essence par essence. Les premiers peuplements sélectionnés sont les sites du réseau du CRPF. Les sites et placettes vigies du CRPF en sapin, hêtre, châtaignier et pin sylvestre sont classés selon leur zone de vigilance climatique dans le tableau 20. Les détails de ces dispositifs sont en annexe 11.

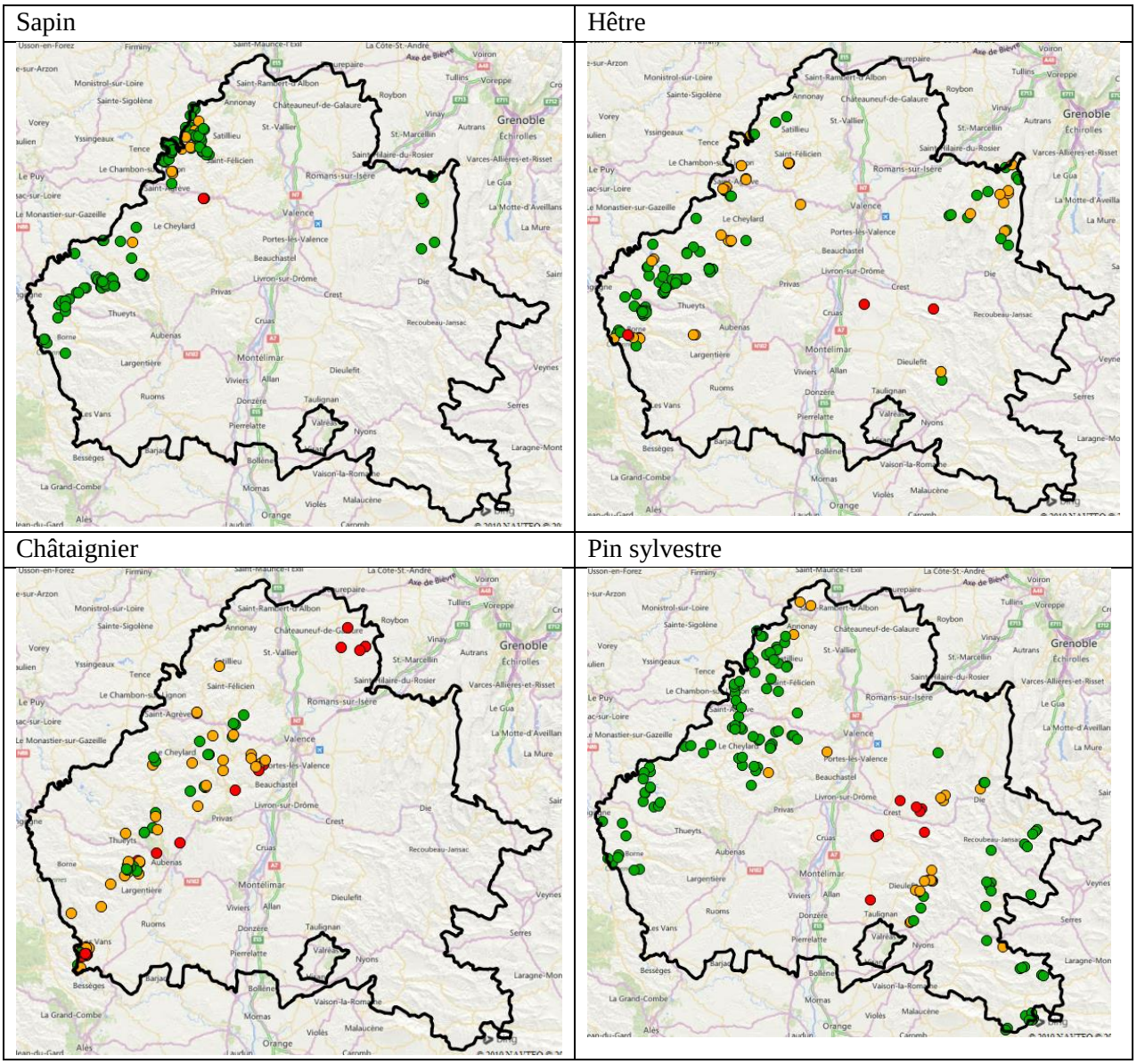
Tableau 20 : Liste des sites de référence et d'expérimentation du CRPF susceptibles d'être réutilisés pour un réseau « changement climatique ». Le premier numéro correspond au département, et le deuxième à l'année d'installation de la placette.

	Zone de vigilance modérée (2)	Zone de vigilance maximale (2)	Zone de vigilance forte (3)
Sapin pectiné	26/02/46 26/02/47 26/02/48 26/02/49		
Hêtre	26/02/47 26/02/48 26/02/49 26/12/03		26/06/55 26/07/01
Châtaignier	07/01/76 07/01/77 07/07/07 07/08/81 07/08/82 07/13/03 07/93/54	26/90/42	07/06/01 07/06/02 26/01/05 26/01/06 26/01/07 26/01/08 26/01/45
Pin sylvestre	07/08/82 ; 26/12/02		

Pour compléter le réseau, il reste alors à choisir plusieurs peuplements parmi ceux repérés via un croisement de la couche SIG de la BD forêt de l'IGN, et de celle des contours des Plans Simples de Gestion détenue par le CRPF. Cette dernière couche SIG permet de cibler les parcelles dont les propriétaires sont connus du CRPF et donc facilement accessibles pour convenir de l'installation de nouvelles placettes. Les peuplements issus de ce croisement de couches sont représentés par des points, afin d'extraire leur altitude via le logiciel QGIS. On peut ensuite les classer selon leur zone de vigilance climatique, de la même manière que pour les sites du CRPF.

La figure 23 montre l'ensemble des peuplements où l'installation de nouveaux dispositifs expérimentaux est possible, ainsi que les sites et placettes vigies déjà en place susceptibles d'être réutilisés. On y repère de grandes zones de vigilance climatique. Il parait donc judicieux de sélectionner des placettes réparties dans plusieurs de ces grandes zones pour compléter le réseau.

Figure 23 : Répartition des peuplements propices à de nouvelles placettes selon la zone de vigilance climatique



Les cartes de la figure 23 montrent des manques, notamment pour les peuplements situés en zone 2. Cependant, la BD forêt de l'IGN ne constitue pas toujours une liste exhaustive et précise des peuplements

pour chaque essence : la connaissance de terrain des techniciens de chaque secteur de Drôme et d'Ardèche peut aider à combler ces manques. Les points positionnés sur les cartes sont donnés à titre indicatif, et les techniciens du CRPF Rhône-Alpes pourront très bien décider d'installer des placettes dans des peuplements qu'ils connaissent mais n'apparaissent pas sur les cartes, dans la mesure où l'ensemble des placettes se répartissent sur un gradient altitudinal tel que celui de la clé de détermination.

Ont été fournies aux techniciens du CRPF les couches SIG listant les différents peuplements repérés pour chaque essence. Ces fichiers informent, pour chaque peuplement, la zone de vigilance climatique, l'altitude, le numéro du PSG et le nom du propriétaire de la parcelle.

4.3 Un positionnement possible des placettes vigies

Pour rappel, la commande des conseils départementaux en termes de nouvelles placettes vigies est la suivante :

- 2 sapinières en Drôme et Ardèche
- 1 hêtraie en Drôme ou Ardèche
- 1 pineraie sylvestre en Ardèche
- 1 douglasaie en Ardèche.

Dans le cadre de ce stage et du temps imparti, le cas du Douglas n'a pas pu être étudié : les modèles du LERFoB ne fournissent pas de données sur le Douglas étant donné son statut d'essence exotique.

Le tableau 21 situe les placettes vigies avec des essences qui nous intéressent dans les zones de vigilance climatique de la même manière que les sites du CRPF et les peuplements de la BD forêt.

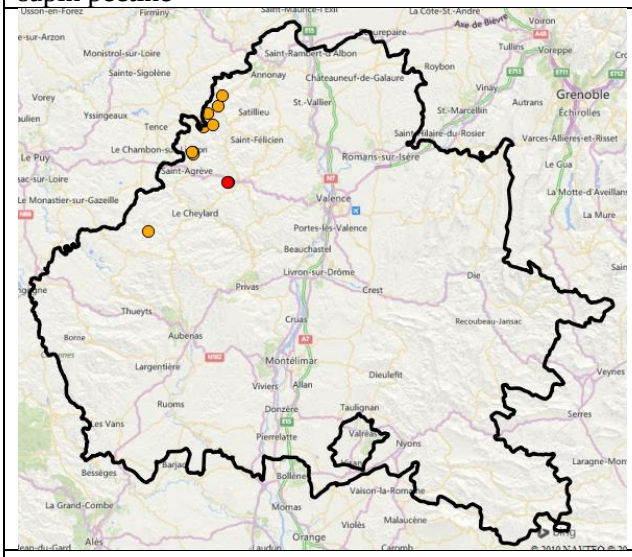
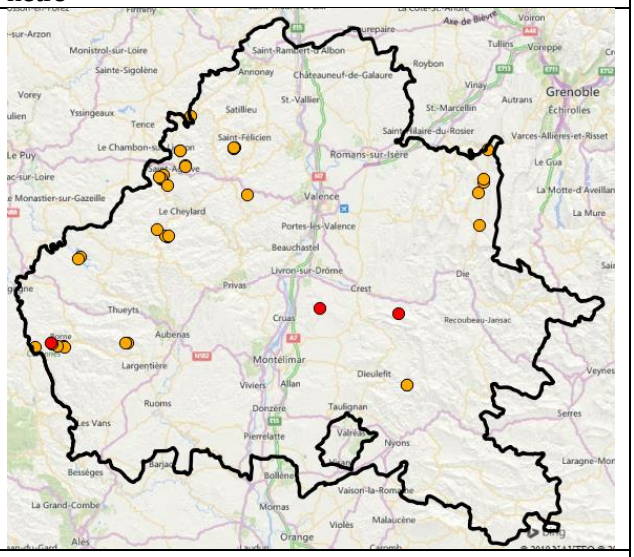
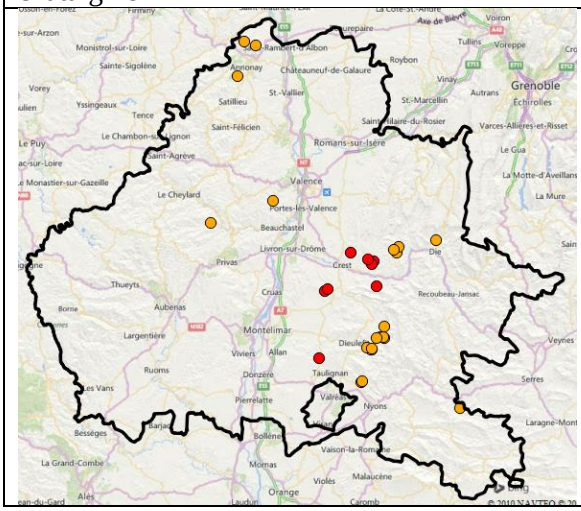
Tableau 21 : Répartition des placettes vigies existantes en châtaignier et pin sylvestre dans les différentes zones de vigilance climatique

	Zone 1 (vigilance modérée)	Zone 2 (vigilance maximale)	Zone 3 (vigilance forte)
Châtaignier	07/12/03	07/12/01	
Pin sylvestre	26/93/43		

Il paraît intéressant de positionner de nouvelles placettes vigies en limite de station, c'est-à-dire dans une zone favorable à l'essence aujourd'hui mais qui devrait rapidement ne plus l'être. Les positionnements possibles correspondent donc aux peuplements sélectionnés de préférence en zone 2, de vigilance climatique, voire en zone 3.

L'ensemble des peuplements possibles est présenté sur la figure 24.

Figure 24 : Peuplements soumis à PSG et susceptibles d'entrer dans un réseau « changement climatique »

Positionnements possibles de placettes vigies en sapin pectiné	Positionnements possibles de placettes vigies en hêtre
	
Positionnements possibles de placettes vigies en châtaignier	
	

Là encore, on observe des manques de sites, notamment pour le pin sylvestre.

Le réseau « changement climatique » pourra aussi se construire avec des dispositifs de l'ONF (voir paragraphe 5.2).

4.4 Le suivi des réseaux

4.4.1 Les mesures à effectuer et la fréquence des visites

Les peuplements seront soumis à un itinéraire sylvicole particulier susceptible d'agir sur l'état sanitaire lié au changement climatique, comme par exemple une éclaircie forte précoce qui permettrait un meilleur apport de l'eau au sol et un contrôle de l'évapotranspiration via celui de la surface foliaire. C'est d'ailleurs la modalité choisie pour le réseau ForClimadapt (ONF, 2015). Le choix précis de l'itinéraire sylvicole pourra faire l'objet du prochain comité technique de la charte. Pour chaque dispositif une placette témoin sera mise en place.

Un diagnostic de l'état sanitaire selon la méthode ARCHI (Drénou *et. Al.*, 2011) décrit en annexe 12 sera effectué dans chaque placette. Un diagnostic annuel des arbres est nécessaire afin d'obtenir un suivi approfondi de l'évolution des peuplements. Ce type de relevé est peu coûteux en temps par rapport à des mesures dendrométriques précises, il est donc possible d'en réaliser un grand nombre et à une fréquence élevée.

Il est également intéressant de disposer de données dendrométriques, afin d'apprécier l'évolution de la productivité des peuplements. Cependant, ces mesures étant plus coûteuses et ne répondant pas à la première fonction du futur réseau « changement climatique », il n'est pas nécessaire de les effectuer à haute fréquence : un relevé tous les cinq ans peut être envisagé.

Les diagnostics sanitaires s'appuyant sur des évaluations de défoliation, les campagnes de mesures doivent être effectuées durant la période estivale.

Le protocole complet de mise en place et de suivi des placettes est présenté en annexe 13. L'organisation d'une placette est inspirée de celle recommandée dans le protocole de suivi du réseau systématique du DSF (DSF, 2011).

4.4.2 Le nombre d'arbres mesurés

Comme indiqué dans le protocole du réseau systématique du DSF, on pourra numéroter 20 arbres dominants ou co-dominants sur chaque placette (celle soumise à sylviculture particulière et le témoin) pour les observations annuelles. Les numérotations pourront être réalisées de proche en proche, à partir du centre de la placette.

4.5 Les coûts des différents réseaux

4.5.1 L'évaluation du coût d'un réseau

Le coût des différents réseaux est évalué en s'inspirant des données du Guide de l'expérimentation forestière sur les réseaux consacrés à l'étude des adaptations au changement climatique (Rosa *et. Al.*, 2011) et de la demande de financement du Référentiel Forestier Régional de Bretagne. On considère à chaque fois qu'une seule personne réalise la tâche dont le coût est évalué. Le protocole étant déjà fait dans le cadre de cette étude, son élaboration n'est pas prise en compte dans le coût global des placettes. L'évaluation du coût en euros des travaux relatifs au réseau « changement climatique » est basé sur les tarifs de prestations journalières 2014 du CNPF. Les tarifs utilisés sont exprimés en unité jour opérateur avec charges de structure, et avec frais de déplacement et maintenance des véhicules pour les techniciens.

On compare dans le tableau 22 deux cas extrêmes : celui où toutes les placettes du réseau sont nouvelles, et celui où le réseau est constitué uniquement de placettes déjà existantes (ceci étant un cas hypothétique puisque nous avons vu que le CRPF ne dispose pas d'un assez grand nombre de placettes réutilisables pour constituer un réseau en entier). Le « recyclage » de placettes ne se répercute que sur le coût de mise en place du réseau. Les économies sont estimées à 3 900 euros pour un réseau entier.

Tableau 22 : Evaluation du coût d'un réseau minimal constitué uniquement de nouveaux dispositifs pour une essence

Etape	Nombre de jours par étape pour 15 couples de placettes (test + témoin)	Coût en euros
Actions techniques (technicien)		
Année d'installation		
Contact du propriétaire, rédaction et signature de la convention	Si nouvelles placettes : 7 j * 1 technicien	3 416
	Si placettes « recyclées » : 5 j * 1 technicien	
15 cheminements, matérialisation et mesures relatives à la station et aux arbres sur 30 placettes	Si nouvelles placettes : 7 j * 2 techniciens	6 832
	Si placettes « recyclées » : 4 j * 2 techniciens	
Saisie des données	1 j * 1 technicien	488
Total année d'installation	Si nouvelles placettes : 25 j	**10 736 €**
	Si placettes « recyclées » : 14 j	**6 832 €**
Visite annuelle		
15 cheminements, évaluation des états sanitaires et rematérialisation de 30 placettes	4 j * 2 techniciens	3 904
Saisie des données	½ j * 1 technicien	244
Total visite annuelle	8,5 j	**4 148 €**
Visite tous les 5 ans		
15 cheminements, mesures (état sanitaire + dendrométrie) et rematérialisation de 30 placettes	6 j * 2 techniciens	5 856
Saisie des données	½ j * 1 technicien	244
Total visite aux 5 ans	14,5 j	**6 100 €**
Animation (responsable réseau ou ingénieur)		
Rassemblement de toutes les données et traitement (tous les 5 ans)	5 j * 1 ingénieur / responsable placettes	3 135
Communication sur les résultats (tous les 5 ans)	5 j * 1 ingénieur / responsable placettes	3 135
Total animation aux 5 ans	8 j * 1 ingénieur / responsable placettes	**6 270 €**

Le temps passé à compiler les données recueillies sous format informatique peut être réduit via l'utilisation de tablettes numériques, dont ont été équipés les techniciens de Drôme et d'Ardèche durant l'été 2015. La saisie des données peut en effet se faire directement sur le terrain si une fiche de terrain sous forme

de tableur est préalablement réalisée et chargée dans les tablettes. Ce mode de fonctionnement n'est pas encore applicable car nécessiterait une formation spécifique.

Les techniciens ont déjà été initiés au fonctionnement de l'application IphiGéNie, qui permet de charger des points GPS sur tablette numérique et de s'y rendre facilement via la fonction GPS sur la carte IGN. Cela peut être particulièrement utile lorsqu'un nouveau technicien arrive sur un secteur qu'il ne connait pas encore. La démarche à suivre pour charger des points sur IphiGéNie est présenté en annexe 14.

4.5.2 Une proposition de planification de l'installation des réseaux

L'année d'installation d'un réseau pour une essence et les années de mesures dendrométriques sont plus onéreuses que celles de relevé d'état sanitaire (10 700 € et 12 400 €). Pour réduire les coûts de certaines années, on peut projeter de répartir les mises en place de réseaux dans le temps : si l'on installe un réseau pour l'essence 1 l'année n, on installe alors le réseau de l'essence 2 à l'année n+2.

Figure 25 : Répartition des mises en place de quatre réseaux dans le temps

Année n°	1	2	3	4	5	6	7	8
Réseau essence 1 :	Installation 10 700 €	Etat sanitaire : 4 200 €	Etat sanitaire : 4 200 €	Etat sanitaire : 4 200 €	Mesures dendro + bilan: 12 400 €	Etat sanitaire : 4 200 €	Etat sanitaire : 4 200 €	Etat sanitaire : 4 200 €
Réseau essence 2 :		Installation 10 700 €	Etat sanitaire : 4 200 €	Etat sanitaire : 4 200 €	Etat sanitaire : 4 200€	Mesures dendro + bilan: 12 400 €	Etat sanitaire : 4 200 €	Etat sanitaire : 4 200 €
Réseau essence 3 :			Installation 10 700 €	Etat sanitaire : 4 200 €	Etat sanitaire : 4 200 €	Etat sanitaire : 4 200 €	Mesures dendro + bilan: 12 400 €	Etat sanitaire : 4 200 €
Réseau essence 4 :				Installation 10 700 €	Etat sanitaire : 4 200 €	Etat sanitaire : 4 200€	Etat sanitaire : 4 200 €	Mesures dendro + bilan: 12 400 €
Coût annuel	10 700 €	14 900 €	19 100 €	23 300 €	25 000 €	25 000 €	25 000 €	25 000 €

Le coût d'installation de réseaux pour plusieurs essences pour chaque année est représenté dans les figures 26 et 27. Les cas simulés ne prennent pas en compte le « recyclage » de placettes existantes au vu de la faible différence finale de coût.

Figure 26 : Estimation des coûts annuels de mise en place et suivi de deux réseaux installés à une année d'intervalle.

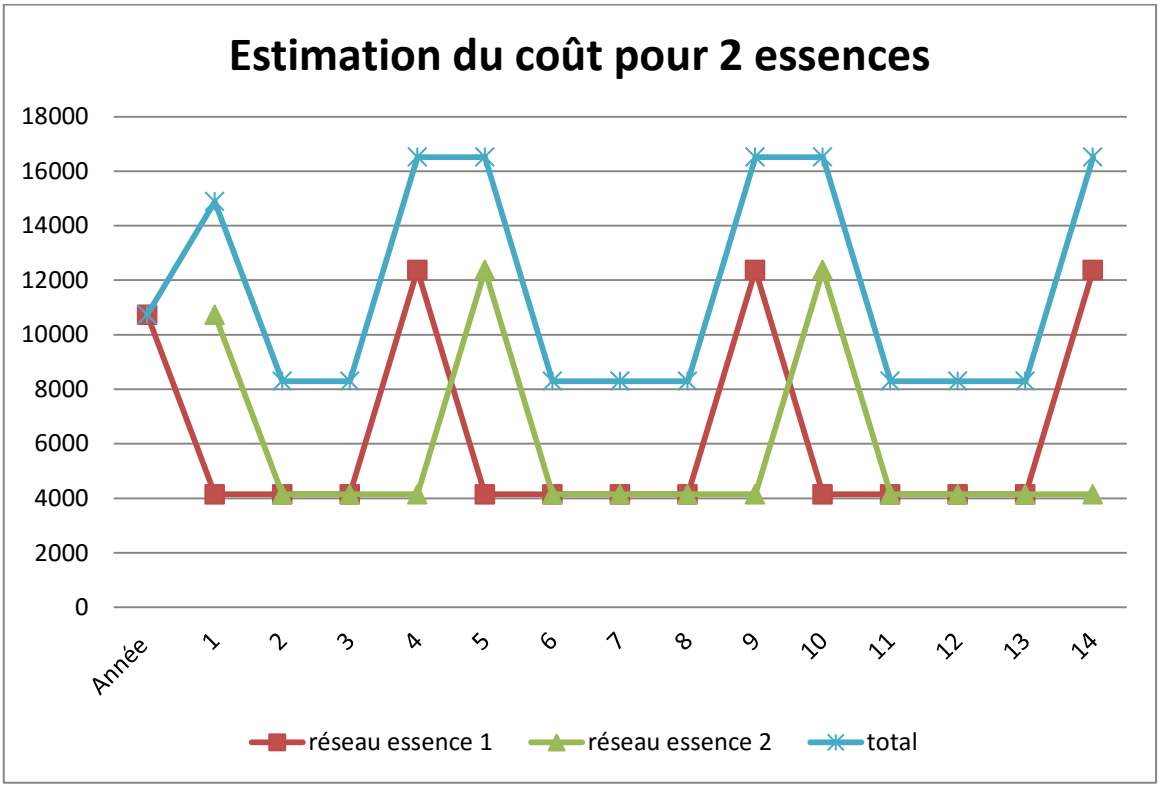
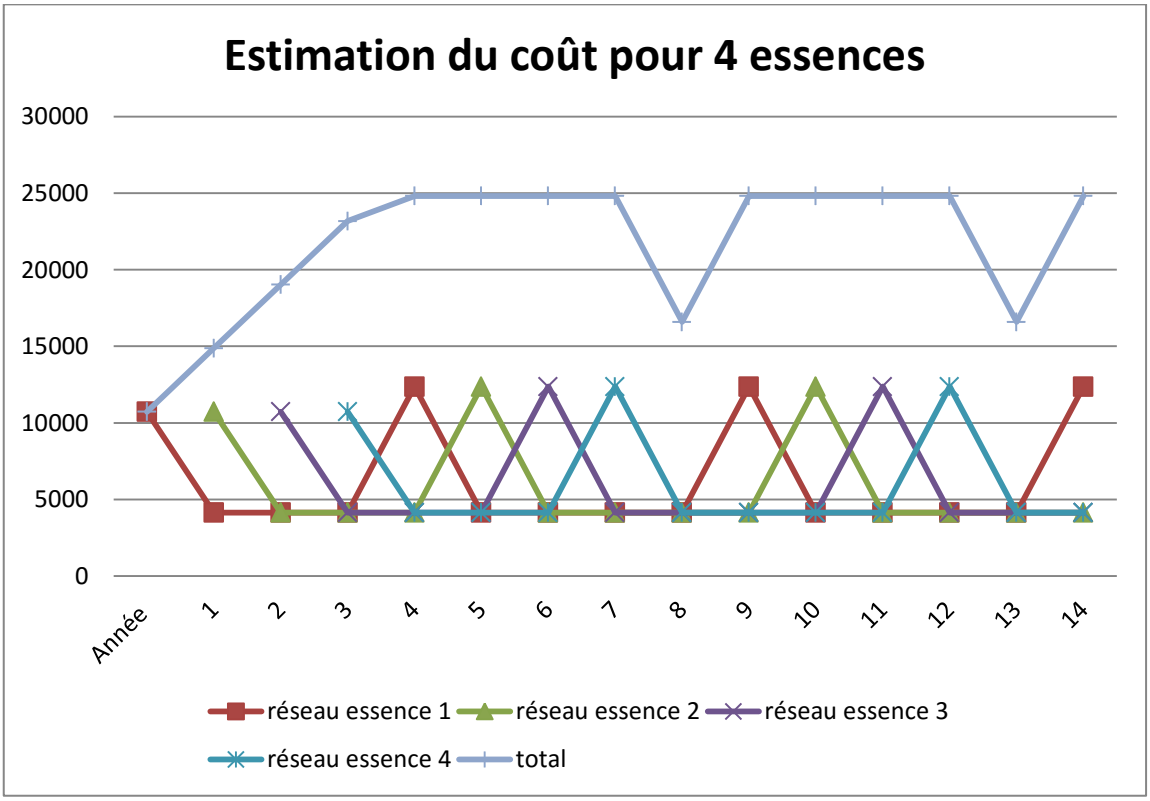


Figure 27 : Estimation des coûts annuels de mise en place et suivi de quatre réseaux installés lors de quatre années successives.



5. Les limites et perspectives

5.1 Les limites de l'étude

Le positionnement des placettes se base sur un scénario climatique particulier, qui n'est pas plus probable qu'un autre. Le choix d'un scénario mène à l'élaboration d'un réseau possible parmi d'autres. Le fait d'utiliser le scénario «intermédiaire » permet néanmoins de se prémunir d'être trop optimiste ou pessimiste. L'utilisation d'un scénario plus optimiste aurait pu négliger certaines zones à risque, alors que le recours à un scénario plus pessimiste aurait pu nous empêcher de repérer certaines zones à privilégier pour l'implantation de certaines essences.

La clé de détermination élaborée constitue un outil très simplifié : alors que les différents modèles tentent d'intégrer les effets aggravants ou compensateurs de variables liées à la pédologie et au relief, on propose ici se s'appuyer uniquement sur l'altitude et l'exposition, en lien avec le bilan hydrique climatique. Ce choix a été fait uniquement pour obtenir un outil simple d'utilisation sur le terrain, mais ne remet en aucun cas en cause l'intégration d'autres facteurs dans les modèles.

La résolution des cartes utilisées (8km) ne permet pas de tenir compte des effets de topographie, ni des conditions pédologiques à échelle fine. Cela constitue un obstacle à la précision des résultats de l'étude, tant pour la comparaison des modèles que pour la classification des placettes et peuplements selon un niveau de risque climatiques.

Le recours à la BD forêt pour localiser les peuplements dans lesquels il sera possible d'installer des placettes ne permet pas d'obtenir une liste exhaustive de ces peuplements, et peu également comporter des sites non adaptés (densité ou âge des peuplements trop faibles, etc.). L'expertise du technicien est indispensable pour valider un projet de mise en place d'une placette.

Faute de temps, aucune préconisation n'a pu être faite pour le Douglas. La répartition géographique de cette essence en France dépendant fortement du facteur anthropique, les exigences climatiques de cette essence exotique sont encore mal cernées localement (l'élaboration d'un modèle de niche étant plus délicate). Il est donc difficile de traiter le problème du Douglas de la même manière que pour des espèces dont les exigences sont mieux appréhendées. De plus, le test des modèles du LERFoB n'aurait pas été possible avec le Douglas, puisque l'aire de répartition de cette essence, résultant de choix de plantations, ne peut pas être modélisée avec la méthode du LERFoB. C'est ce que l'on peut pressentir en obtenant les résultats non significatifs lors tu test du modèle du LERFoB sur le châtaignier, également en grande partie introduit dans le secteur étudié.

Le manque de temps ne nous a pas permis de tester les modèles à disposition sur plus de deux essences. Il serait pourtant particulièrement intéressant de tester les prévisions de BioClimSol et d'IKS sur le Douglas, pour ainsi déterminer s'ils sont utilisables pour établir un réseau de placettes pour cette essence. Le recours au modèle BioClimSol peut être utile pour repérer des zones intéressantes où les risques de dépérissement sont élevés : une étude a été réalisée dans le Parc Naturel Régional du Haut-Languedoc (Lemaire *et.al*., 2014) pour élaborer des cartes BioClimSol.

5.2 Les perspectives

Le réseau « changement climatique » pourra se mettre en place petit-à-petit, essence par essence, en fonction des moyens accordés à la mise en place et au suivi des dispositifs.

Le bilan des placettes du CRPF en Drôme et Ardèche a mis en évidence un suivi faible et hétérogène, qui rend difficile la valorisation du travail effectué sur le terrain. Les données collectées sur les placettes gagneraient à être numérisées afin d'être mieux valorisées. « Ne pas stocker les mesures sur un support informatique » est d'ailleurs le neuvième conseil donné par Fédération Française de Vulgarisation Forestière de l'Est pour « rater à coup sûr son expérimentation » (Armand, 1998) ! Le recours à des bases de données intranet telles qu'Ilex pourrait aider à organiser les informations. Ilex est une plateforme nationale du CNPF, permettant d'informatiser des données et ainsi de consolider les réseaux de dispositifs en place, d'optimiser les installations et leur suivi en harmonisant les protocoles, et de mieux valoriser les résultats (CNPF, 2014).

Le CRPF Rhône-Alpes n'est pas le seul organisme possédant un réseau de placettes en partie utilisable pour travailler sur le changement climatique. Il serait judicieux de rassembler les dispositifs, observations et résultats expérimentaux de chacun pour tirer des conclusions communes. Des difficultés ont été rencontrées durant ce stage pour accéder aux données relatives aux placettes des partenaires de la région. En effet, plusieurs programmes œuvrent pour avancer sur la question du changement climatique mais les passerelles entre ces différents projets sont quasiment inexistantes. Cette problématique fait l'objet du projet VALORESO (Perrier, 2014). Pour avancer efficacement dans la réflexion portée sur le changement climatique et l'avenir de différentes essences à enjeu, il parait indispensable de communiquer davantage sur les différents travaux déjà effectués et en cours sur ce sujet. Il semblerait d'ailleurs qu'un projet de « recyclage » de placettes expérimentales dans le but de créer un réseau d'alerte pour travailler sur le changement climatique ait déjà été entamé par ailleurs, et qu'il n'ait pas abouti. Malgré la tentative d'en savoir plus à ce sujet, il n'a pas été possible de connaitre les conclusions de ce travail.

Le réseau proposé est élaboré à partir de placettes du CRPF seulement. Il serait intéressant d'inclure dans un deuxième temps les dispositifs expérimentaux d'autres organismes forestiers pour enrichir le réseau. On pourrait notamment travailler avec l'ONF qui dispose de placettes de suivi en hêtre, sapin, épicéa, cèdre et pin noir (tableau 23), de 359 placettes permanentes aménagement, et de 877 protocoles de suivi dendrométrique des réserves forestières (PSDRF). Ces placettes sont surtout situées en Drôme, dans le Vercors, secteur assez intéressant notamment pour le sapin. La carte du la figure 28 situe les secteurs où des placettes sont présentes. Les essences n'étant pas toutes connues, elles ne sont pas précisées par la symbologie.

Figure 28 : secteurs avec placettes ONF susceptibles d'être intéressantes pour un réseau « changement climatique »

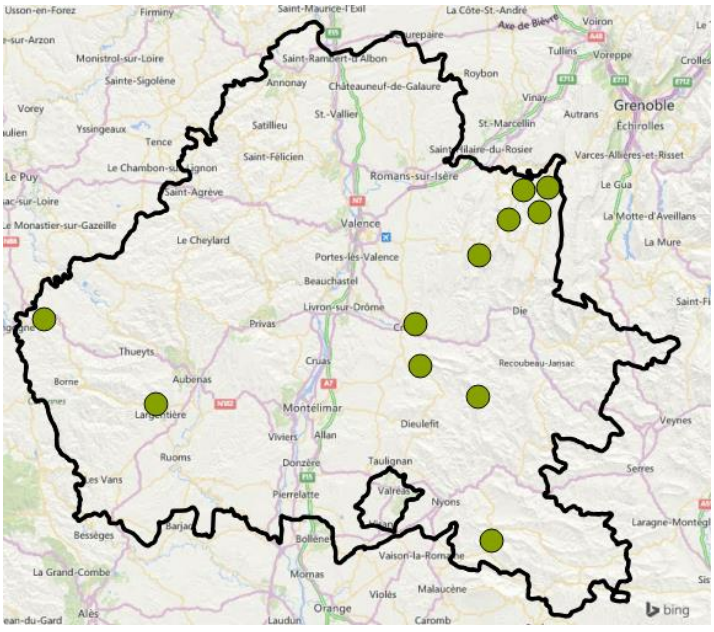


Tableau 23 : Localisation des placettes de suivi de l'ONF en Drôme et Ardèche en fonction de leur essence et de leur thème

Thème	Inventaire de bois mort	Marteloscope	Placette AFI	Placette expérimentale de sylviculture	Placette permanente inventaire	Placette sylvicole de référence	Placette aménagement	RENECOFOR
Hêtre						Saint Martin en Vercors		Lente
Hêtre Sapin						Saint Martin en Vercors (3) Lente Sapine Côte-Belle		
Sapin pectiné - épicéa							Gresse en Vercors	
Sapin pectiné - épicéa - hêtre	Vercors							
Sapin pectiné		La Chapelle en Vercors	Chambons					Lente Lavilatte
Pin noir		Val de Drôme		Barronies		Justin (2) La Roanne		
Cèdre					Saou			

La clé de détermination de zone de vigilance climatique pourrait être fournie à l'ONF afin qu'il puisse communiquer quelles placettes peuvent être utilisées pour le réseau « changement climatique ».

Le test des modèles sur les autres essences à enjeu fort du territoire (hêtre, pin sylvestre, douglas), serait aussi à mettre en place. Il serait également intéressant d'étudier le cas d'essences exotiques afin de pouvoir tester leur capacité d'adaptation au climat local. Là encore, le travail en collaboration avec des partenaires disposant déjà de placettes (en particulier avec des essences exotiques) est à envisager pour la suite.

Enfin, lors d'observations de l'état sanitaire des peuplements, il reste difficile d'établir des liens directs avec le réchauffement climatique. Selon le DSF, des méthodes telles que la dendrochronologie seraient très intéressantes pour mettre en évidence un effet du changement climatique, notamment en observant la croissance des arbres au cours des 5 dernières années. Cette discipline s'intéresse en effet à la réponse d'arbres aux variations climatiques, via la mesure des cernes (Lebourgeois, Merian, 2012). On peut alors imaginer une évolution du suivi des placettes du CRPF vers des études plus approfondies en termes de suivi d'accroissements via la dendrochronologie. Cependant, le contexte économique n'est pour le moment pas favorable à des investissements dans le domaine de la recherche pour un organisme de conseil. Ce type de travaux, nécessitant de lourds investissements en matière de dispositifs, semble plus du ressort d'organismes de recherche, en partenariat avec les organismes de la forêt privée.

5.3 Discussion

Si l'outil d'aide à la décision de positionnement de nouvelles placettes élaboré est très simplifié par rapport aux différents modèles existants, il a l'avantage d'être adapté à une utilisation de terrain et à plusieurs catégories d'essences. En utilisant les modèles, on aurait obtenu une clé par essence, plus précise, mais moins facile d'utilisation dans un contexte de mise en place d'un réseau comprenant plusieurs essences.

La demande des conseils départementaux d'Ardèche et de Drôme aura notamment vocation à informer les propriétaires de ces départements sur les zones à risque et celles recommandées pour les essences à enjeux du territoire au vu du changement climatique, et à sensibiliser les élus vis-à-vis de ce phénomène. Ainsi, il apportera un complément aux autres réseaux de placettes installés à plus large échelle, qui ne ciblent pas forcément les essences les plus intéressantes pour la région, et ne permettent pas un suivi à échelle aussi fine. Les informations tirées des dispositifs nationaux restent toutefois à prendre en considération lors des choix sylvicoles.

Un réseau plus ciblé à l'échelle départementale permet de toucher directement les élus locaux, professionnels de la filière et propriétaires forestiers, avec des exemples plus concrets et précis pour ceux-ci. Ce type de dispositif peut également inciter les propriétaires à s'investir dans les observations des peuplements. Des présentations régulières des dispositifs aux élus et propriétaires peuvent de plus contribuer à la mise ne valeur, à la pérennité et au suivi régulier du réseau.

L'objectif initial de « recyclage » de placettes déjà existantes a été revu après avoir considéré l'état actuel du réseau : les suivis déjà réalisés ne permettent pas de tirer dès à présent des conclusions sur des phénomènes de dépérissement ou bien sur la croissance des arbres. Il semble peut-être optimiste de penser que n'importe quel réseau peut être réutilisé pour en établir un nouveau pour des suivis de peuplement. S'il est effectivement intéressant de se servir de placettes déjà en place dans un souci d'économie et de gain de temps, cette étude aboutit à un projet de réseau dont tous les dispositifs seront à matérialiser spécifiquement pour le suivi de l'état sanitaire et pour chaque placette, il sera nécessaire d'installer une placette témoin pour éviter les effets sylviculture. Le gain de temps pour les techniciens vis-à-vis de la mise en place de nouveaux dispositifs n'est pas à négliger (les parcelles sont déjà bien connues du technicien, et les propriétaires déjà sensibilisés vis-à-vis du besoin de placettes). Cependant, les économies réalisées semblent minimes.

Conclusion

Les sites expérimentaux du CRPF en Drôme Ardèche sont pour la plupart des références mesurées, pas toujours adaptées à la mise en place d'un nouveau réseau d'expérimentation sur le changement climatique. L'utilisation de projections climatiques a permis l'élaboration d'un outil aidant le technicien forestier à choisir la localisation de nouveaux dispositifs pour une étude sur le changement climatique, basé sur l'altitude des peuplements.

Des propositions de nouvelles placettes ont été faites pour le sapin pectiné, le hêtre, le châtaignier et le pin sylvestre, et il est important de poursuivre des travaux pour élaborer de nouveaux réseaux expérimentaux avec des essences plus exotiques, dont l'étude est incontournable dans un contexte de changement climatique.

La comparaison des modèles BioClimSol, IKS et LERFoB sur le territoire Drôme-Ardèche a permis d'identifier l'utilisation possible de chacun de ces modèles : LERFoB pour la localisation des aires de répartition possible des essences autochtones en France, BioClimSol pour la mise en garde vis-à-vis des risques de dépérissements dus aux à-coups climatiques, et enfin IKS pour la localisation de grandes zones adaptées à des essais d'implantation de nouvelles essences.

Le recours aux données climatique futures disponibles sur le portail Drias a permis d'intégrer la dimension de risque à venir pour les essences, sur laquelle se base l'échantillonnage proposé pour le nouveau réseau. L'utilisation de données autres que celles des modèles testés a permis l'élaboration d'un outil unique de terrain destiné au technicien, utilisable pour plusieurs essences.

Ainsi, deux informations se complètent : des informations actuelles sur les aires propices à l'implantation d'essences, fournies par les modèles, et des prévisions relatives au devenir des essences implantées en fonction de leur situation géographique sur le secteur Drôme-Ardèche.

Bibliographie

Agreste Rhône-Alpes, 2015. *Enquête exploitations forestières et scieries 2013* [En ligne]. http://draaf.rhone-alpes.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/No171_EXFS_2013_cle01a7e8.pdf (Page consultée le 15/04).

AgroParisTech – Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts, 2014. *Etude des effets du changement climatique sur des essences forestières et des espèces végétales de zone humide de Basse-Normandie.* Analyse Spatiale et temporelle des Espèces et des Communautés.

AUFFRAY, A., BRISSON , A., TAMBURINI, A., DZIAK, V., MALOISEL, V., MARTINONI-LAPIERRE, S., 2012. *Climat de la région Rhône-Alpes [*En ligne]. http://srcae.rhonealpes.fr/static/cms_page_media/24/rapport-climat-final.pdf (Page consultée le 28/04/2015).

Aveyron Conservatoire Régional du Châtaignier, 2015. *Le châtaignier – Histoire*. [En ligne] http://www.chataignier-conservatoire.com/chat_histoire.html#arrivee (Page consultée le 01/09/2015).

Centre National de la Propriété Forestière, 2014. *Rapport d'activités 2014*. [En ligne] http://www.foretpriveefrancaise.com/data/info/507968-CRA_CNPF_2014.pdf (Page consultée le 17/08/2015).

Centre Régional de la Propriété Forestière de Bretagne, 2001. *Référentiel Forestier Régional – Demande de financement*.

CHEAIB, A., BADEAU, V., BOE, J., CHUINE, I., DELIRE, C., DUFRÊNE, E., FRANCOIS, C., GRITTI, E.E., LEGAY, M., PAGE, C., THUILLER., W., VIOVY, N., LEADLEY, P., 2012. *Climate change impacts on tree ranges: model intercomparison facilitates understanding and quantification of uncertainty.* Ecology letters. Pp 533-544.

Conférence des parties de la Convention-cadre des Nations unies, 2015. *Qu'est-ce que la COP21/CMP11 ?* [En ligne]. http://www.cop21.gouv.fr/fr/cop21-cmp11/quest-ce-que-la-cop21-cmp11 (Page consultée le 30/08/2015).

Conseil départemental de la Drôme, 2015. *Filière bois* [En ligne] http://www.ladrome.fr/nos-actions-economie/filiere-bois (Page consultée le 05/08/15).

Conseils départementaux de Drôme et d'Ardèche, 2014. *Changement Climatique – Préparer le forêt pour construire demain.* 3èmes assises Sud Rhône-Alpes Filière forêt-bois.

DRENOU, C. BOUVIER, M., LEMAIRE, J., 2011. *La méthode de diagnostic ARCHI – Application aux chênes pédonculés dépérissants.* Forêt-entreprise n°200. [Enligne] http://www.crpf.fr/bretagne/pdf-information/diagnostic_deperissement_chene.pdf (Page consultée le 24/02/2015).

DRENOU, 2011. *Utilisation de la méthode ARCHI pour diagnostiquer les dépérissements du sapin pectiné (Abies albaMill., PINACEAE)* [En ligne] http://www.parc-pyrenees-ariegeoises.fr/IMG/pdf/6_Diagnostic_deperissement_Sapin3.pdf (Page consultée le 22/08/2015).

Drias, les futurs du climat, 2015. *Recommandations* [En ligne] http://www.drias-climat.fr/accompagnement/section/41 (Page consultée le 10/06/2015).

DUHEN, L.M., 2012. *Comment prouver le rôle de la forêt vis-à-vis de l'érosion hydrique sur un bassin versant ?* Forêt méditerranéenne [En ligne]. http://www.sylvamed.eu/docs/FORET_MED_2012_4_341-352.pdf (Page consultée le 28/04/2015).

GARCIA COLLADO, 2014. *Détermination des limites pédoclimatiques du châtaignier dans le Haut-Languedoc – Construction d'un outil d'aide à la décision pour l'adaptation de la sylviculture.*

GIEC, 2007. *Changements climatiques 2007 – Rapport de synthèse* [En ligne]. www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_fr.pdf (Page consultée le 03/03/2015).

HUTCHINSTON, G.E., 1957. *Concluding remarks.* [En ligne] http://artifex.org/~ecoreaders/lit/Hutchinson1957.pdf (Page consultée le 20/08/2015).

Institut national de l'information géographique et forestière (IGN), 2014. *Un inventaire annuel sur la France entière* [En ligne] http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/IMG/pdf/140916-2p-newmetho.pdf (Page consultée le 13/05/2015).

JOLY, D., BROSSARD, T., CARDOT, H., CAVAILHES, J., HILAL, M., WAVRESKY, P., 2010. *Les types de climats en France, une construction spatiale*. Cybergeo : European Journal of Geography, pp.1-21.

LE BOULER, H., LEGAY, M., RIOU-NIVERT, P., 2014. *Le climat change, vite, trop vite… Commente aider les arbres à le suivre ?* Forêt entreprise n°217. pp 26-29.

LEBOURGEOIS, F., MERIAN, P., 2012. Principes et méthodes de la dendrochronologie. [En ligne] http://www.researchgate.net/profile/Francois_Lebourgeois/publication/235989567_Principes_et_mthodes_de_de_la_dendrochronologie/links/02e7e51543aaf00764000000.pdf?inViewer=true&disableCoverPage=true&origin=publication_detail (Page consultée le 02/03/2015).

LEMAIRE, 2014. *Théorie du boxeur : exemple du chêne pédonculé.* Forêt entreprise n°218. Pp26-33.

LEMAIRE, J., BEAUSSART, X., FORMERY, P., GUYON, A., HEMERYCK, R., LAGACHERIE, J.P., MARTIN-HORCAJO, G., MARTY, P, MATHIEU, P., d'ORAZIO, J.M., ORTISSET, J.P., WEBEN, C., 2014. *BioClimSol, un outil d'aide à la décision face au changement climatique*. Forêt entreprise n°218.

Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, 2010. *Département de la Santé des Forêts.* [En ligne] http://agriculture.gouv.fr/departement-de-la-sante-des-forets (Page consultée le 15/08/2015).

Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2013. *Découvrir les nouveaux scénarios RCP et SSP utilisés par le GIEC*. [En ligne] http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ONERC_decouvrir_scenarios_Giec.pdf (Page consultée le 03/05/2015).

Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2014. *Rapport du GIEC : Volume 1 - les éléments scientifiques* [En ligne]. http://www.developpement-durable.gouv.fr/Volume-1-changements-climatiques.html (Page consultée le 24/06).

Mission d'Etude et de Développement des Coopérations Interrégionales et Européennes, 2008. Etude des effets du changement climatique sur le grand Sud-Est [En ligne]. http://www.paca.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/MEDCIE_RapportSynthese_040608_cle0ac9a9.pdf (Page consultée le 28/04/2015).

Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique, 2013. *Découvrir les nouveaux scénarios RCP et SSP utilisés par le GIEC* [En ligne]. http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ONERC_decouvrir_scenarios_Giec.pdf (Page consultée le 11/05/2015).

Office National des Forêts, 2015. *INTERREG MED ForClimadapt*. [En ligne] http://www.onf.fr/projets_europeens/sommaire/en_cours/interreg_for-climadapt/interreg_climadapt/20120523-144828-833324/@@index.html (Page consultée le 04/05/2015).

PERRIER, C, 2014. *AFORCE présente le bilan de trois années d'action autour du choix des essences, de la gestion de l'eau et du renouvellement des peuplements*. Les échos d'Ecofor. [En ligne]. http://www.reseau-aforce.fr/data/info/436223-Bilan_du_colloque_restit_3_AFORCE_2014.zip (Page consultée le 18/05/2015).

PIEDALLU, C., GEGOUT, J .C., LEBOURGEOIS, F., SEYNAVE, I., 2015. *Assessing the most common European tree species's climate and soil requirements using distribution models*. Journal of Vegetation Science (communication personnelle).

PIEDALLU, C., PEREZ, V., GEGOUT, J.C., LEBOURGEOIS, F., BERTRAND, R., 2009. *Impact potentiel du changement climatique sur la distribution de l'épicée, du sapin, du hêtre et du chêne sessile en France.* Revue forestière française LXI. Pp 567-593.

Préfecture de l'Ardèche, 2012. *La sylviculture, une activité économique* [En ligne] http://www.ardeche.gouv.fr/la-sylviculture-une-activite-economique-a940.html (Page consultée le 05/08/2015).

Société Forestière de Franche-Comté, 2006. Vade-Mecum du Forestier. Pp 285-319

WEISS, A.D., 2001. *Topographic position and landforms analysis.* The nature conservancy. [En ligne] http://www.jennessent.com/downloads/tpi-poster-tnc_18x22.pdf (Page consultée le 13/08/2015).

Personnes contactées

Prénom NOM	Fonction	Organisme	Adresse	Téléphone	Mail
Jean-Baptiste DAUBREE	Chef du pôle interrégional DSF Sud-Est	DRAAF PACA	BP 95 - 84 141 MONTFAVET CEDEX	04.90.81.11.21	jean-baptiste.daubree@agriculture.gouv.fr
Jacques DEGENEVE	Responsable placettes CRPF Drôme-Ardèche	CRPF Rhône-Alpes	10, place Olivier de Serres 07200 AUBENAS	04.75.35.40.26	Jacques.degeneve@crpf.fr
Sabine GIRARD	Ingénieur IDF	CNPF-IDF	175 cours Lafayette 69006 LYON	04.37.24.04.08	Sabine.girard@cnpf.fr
Jean LADIER	Responsable pôle R&D Avignon	ONF Avignon	1175 chemin du Lavarin, 84000 AVIGNON	04.90.89.27.84	Jean.ladier@onf.fr
Hervé LE BOULER	Chargé de recherche	ONF		06.28.65.64.96	hlbpro2@laposte.ne
Yves LE JEAN	Responsable du service forêt	ONF Drôme-Ardèche	16 r La Pérouse, BP 919 26009 VALENCE CEDEX	04.75.82.15.63	yves.le-jean@onf.fr
Jean LEMAIRE	Ingénieur IDF	CNPF-IDF	175 cours Lafayette 69006 LYON	06.09.41.61.51	Jean.lemaire@cnpf.fr
Vincent PEREZ	Géomaticien	AgroParisTech Nancy - LERFoB	14, rue Girardet CS 14216 54042 NANCY CEDEX	03.83.39.68.00	vincent.perez@agroparistech.fr
Christian PIEDALLU	Enseignant-chercheur	AgroParisTech Nancy - LERFoB	14, rue Girardet CS 14216 54042 NANCY CEDEX	03.83.39.68.00	Christian.piedallu@agroparistech.fr
Paolina PINTO	Ingénieur de recherche	INRA Nancy, LERFoB	14, rue Girardet CS 14216 54042 NANCY CEDEX	03.83.39.68.46	paulina.pinto@nancy.inra.fr
Yves ROUSSELLE	Chargé R&D en Génétique Quantitative	ONF Orléans	2163 Avenue de la Pomme de Pin, CS 40001 ARDON, 45075 ORLEANS Cedex 2	06.07.78.70.84	Yves.rousselle@onf.fr

Annexes

Annexe 1 : Descriptif succinct des différentes SER présentes en Drôme et Ardèche

Annexe 2 : Précipitation et températures sur la région Rhône-Alpes selon Météo France

Annexe 3 : Page de couverture du Mémento publié annuellement par l'IGN

Annexe 4 : Charte partenariale

Annexe 5 : Données climatiques et de présence des essences

Annexe 6 : Evapotranspiration de Turc.

Annexe 7 : Protocole de visite des peuplements et fiche terrain pour le test des trois modèles

Annexe 8 : Eléments relatifs aux peuplements visités de sapin pectiné et châtaignier

Annexe 9 : Corrélation entre les modèles BioClimSol 1, BioClimSol 2,LERFoB, IKS hydrique et IKS thermique pour le sapin pectiné et pour le châtaignier

Annexe 10 : Evolution des conditions pédo-climatiques des placettes pour leurs essences

Annexe 11 : Détail des placettes réutilisables

Annexe 12 : Le protocole ARCHI : exemple pour le sapin pectiné

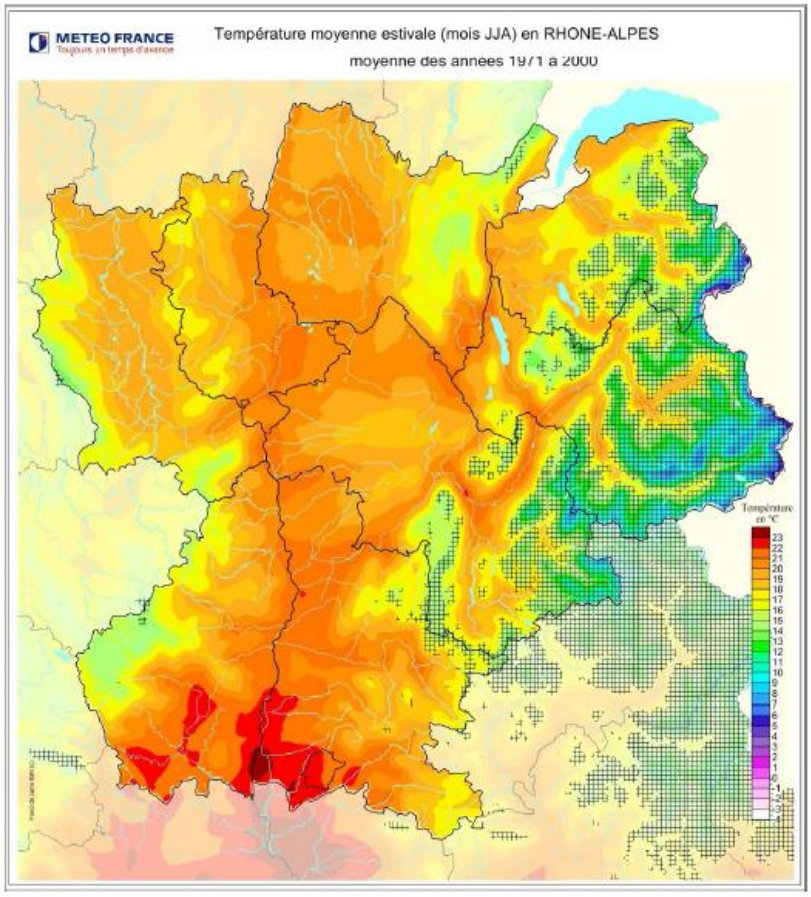
Annexe 13 : Protocole de mise en place et suivis du réseau « changement climatique »

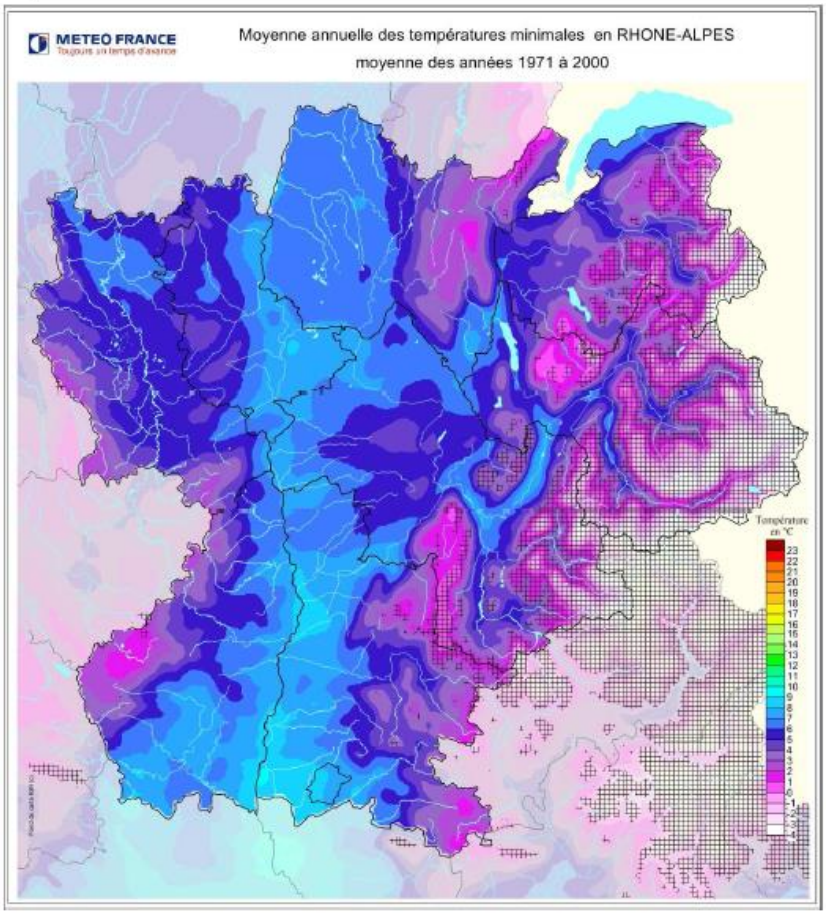
Annexe 14 : Comment importer des points dans iPhiGéNie depuis QGIS ?

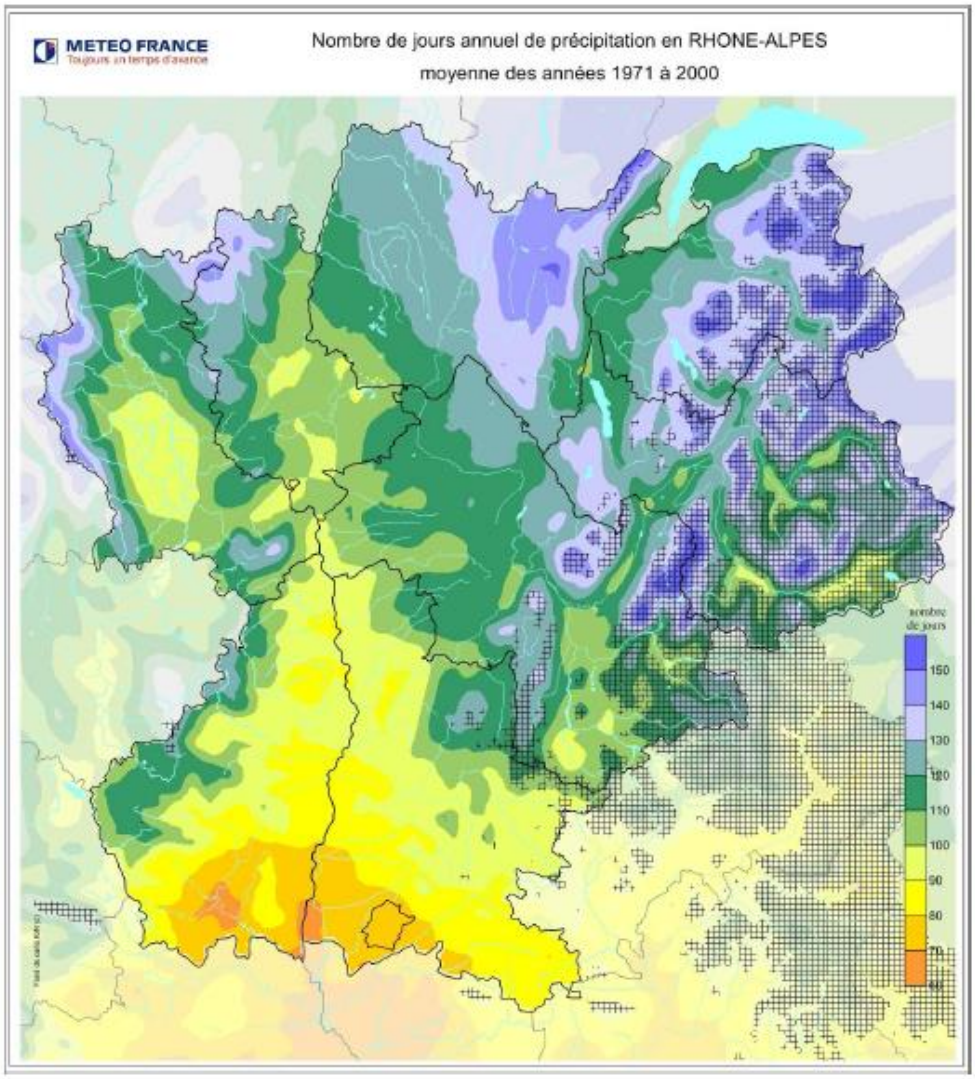
Annexe 1 : Descriptif succinct des différentes SER présentes en Drôme et Ardèche

SER	Sols	Climat	Surface boisée
Alpes externes du Sud	Texture argileuse à 60%, limoneuse à 35% 22% de sols caillouteux ou très caillouteux, 35% de sols profonds de plus de 35 cm	Continental au nord, méditerranéen au sud et à l'ouest	68%
Cévennes	Texture principalement limoneuse (76%), sableuse (16%) ou argileuse (4%) 45% de sols caillouteux à très caillouteux, 50% de sols à plus de 35cm de profondeur	Montagnard très humide sous influence méditerranéenne	73%
Garrigues	66% de sols argileux, 25% de limoneux, 50% caillouteux ou très caillouteux	Méditerranéen (production forestière limitée)	47%
Massif central volcanique	Limoneux à 89%, sableuse à limono-sableuse pour le reste 11 % de de sols caillouteux à très caillouteux, 82% de sols de plus de 35 cm de profondeur	Montagnard à tendance atlantique	25%
Monts du Vivarais et du Pilat	Texture peu variée, limoneuse (56%) ou sableuse (36%) 80% des sols à plus de 35 cm de profondeur	Intermédiaire entre méditerranéen et continental	51%
Plaines et collines rhodaniennes et languedociennes	50% de sols limoneux, 30% argileux 70% de sols de plus de 35 cm de profondeur	Méditerranéen très venteux	19%
Plaines et piémonts alpins	Texture variées (sableuse à argileuse) mais dominance limoneuse 60% de sols à plus de 64 cm de profondeur	Continental, influences rhodaniennes au sud par la présence de mistral et des étés chauds	23%
Plateaux granitiques du centre du Massif Central	Sous-sol cristallin d'origine granitique ou métamorphique Sols lessivés acides, limoneux à sableux	Atlantique sous influences continentales et montagnardes	45%
Préalpes du Nord	50% de sols limoneux, 30% de sols argileux et 10% argilo-limoneux 60% de sols avec une profondeur supérieure à 35 cm.	Montagnard froid et humide, méditerranéen au sud du Vercors	61%
Préalpes du Sud	60% de sols argileux, 30% limoneux 50% de sols profonds de plus de 35 cm, 25 % de sols caillouteux à très caillouteux	Méditerranéen humide	62.5%

Annexe 2 Précipitation et températures sur la région Rhône-Alpes selon Météo France






METEO FRANCE
Toujours un temps d'avance
Nombre de jours annuel de précipitation en RHONE-ALPES
moyenne des années 1971 à 2000
nombre de jours
150
140
130
120
110
100
90
80
70
60

Annexe 3 : page de couverture du Mémento publié annuellement par l'IGN

Annexe 4 : Charte partenariale

CHARTE PARTENARIALE

Changement climatique en Drôme et Ardèche : identification et suivi des impacts en forêt, adaptation des peuplements et sylvicultures

2015-2017

Entre :

Le Département de l'Ardèche, siégeant à l'Hôtel du Département, BP 737 - 07007 PRIVAS Cedex, représenté par Monsieur Hervé SAULIGNAC agissant en qualité de Président du Conseil Général de l'Ardèche et autorisé aux fins de signature par la délibération de la Commission permanente du 2 Mars 2015, désigné ci-après par "le Département de l'Ardèche",

Le Département de la Drôme, siégeant à l'Hôtel du Département – 26 avenue du Président Herriot – 26026 VALENCE Cedex 9, représenté par Monsieur Didier GUILLAUME agissant en qualité de Président du Conseil Général de la Drôme, et autorisé aux fins de signature par la délibération de la Commission permanente du 23 février 2015, désigné ci-après par "le Département de la Drôme",

Le Centre Régional de la Propriété Forestière (CRPF), siégeant 95 avenue Georges Brassens – 26500 BOURG LES VALENCE, représenté par Monsieur Xavier MARTIN agissant en qualité de Directeur, désigné ci-après par "le CRPF",

L'Institut de Développement Forestier (IDF), siégeant 47 rue de Chaillot 75116 Paris, représenté par Thomas Formery agissant en qualité de Directeur, désigné ci-après par "l'IDF",

L'Office National des Forêts (ONF), siégeant 16 rue La Pérouse BP 919 – 26009 VALENCE Cedex, représenté par Monsieur Jean-Luc MARTIN agissant en qualité de Directeur, désigné ci-après par "l'ONF",

L'interprofession Fibois Ardèche Drôme, siégeant 1 rue Marc Seguin, La Correspondance – 26300 ALIXAN, association type Loi 1901 non soumis à la TVA (n° SIRET : 401 419 056 00023), représentée par Monsieur Thierry BARRAQUAND agissant en qualité de Président, désigné ci-après par "Fibois",

Le Département Santé des Forêts (DSF), siégeant rue de la Castelette, BP 700095, 84143 MONTFAVET cedex, représenté par un Jean-Baptiste DAUBREE le chef de pôle interrégional de la santé des forêts, désigné ci-après par "le DSF".

Préambule : le changement climatique en Drôme Ardèche

Même si des incertitudes existent quant à l'ampleur du changement climatique à venir, le réchauffement des dernières décennies ne fait plus aucun doute (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat - GIEC, 2014) et ses conséquences sur les écosystèmes forestiers sont désormais largement documentées (cf. par exemple n°509 de Forêts de France, 2007).

La Drôme et l'Ardèche sont des départements à fortes transitions climatiques puisque 6 des 9 climats recensés en France métropolitaine s'y rencontrent (Joly et al, 2013). Dans un tel contexte, toute évolution climatique a des conséquences complexes au niveau de la biodiversité et notamment des végétaux pérennes que sont les arbres forestiers.

D'ores et déjà, les données montrent qu'au cours des décennies précédentes, les quantités d'eau disponibles pour la végétation pendant l'été ont significativement diminué sur la majeure partie des deux départements. Cette augmentation du déficit hydrique estival fragilise certaines espèces - et notamment le sapin, le douglas, le châtaignier, le cèdre-, pour lesquelles des baisses de vitalité sont actuellement observées.

Des travaux de recherche ont d'ailleurs été entrepris localement pour en comprendre les causes (Programmes « Châtaignier » en Drôme des Collines et « Cèdre » en Ardèche).

Par ailleurs, pour mieux appréhender les impacts de ces changements en termes de croissance et d'état sanitaire des peuplements, des réseaux d'observation sont utilisés et cela à différentes échelles territoriales. Suivis sur le long terme, ils permettent de disposer d'une vision à la fois spatiale et dynamique des phénomènes en cours.

Quant aux moyens dont disposent les propriétaires pour adapter leurs forêts aux changements en cours, ceux-ci sont relativement limités. Choisir des variétés ou provenances plus adaptées aux nouvelles conditions climatiques lors du renouvellement des peuplements en est un. Mais lesquelles conseiller ? Les potentialités d'essences ou provenances plus résistantes à la sécheresse que celles naturellement présentes sont-elles bien connues ? Tout cela reste encore à préciser.

Pour finir, en décembre 2013, plus d'une centaine de personnes ont assisté aux 3èmes assises Sud Rhône-Alpes de la filière forêt-bois qui avaient pour thème le changement climatique. Ce sujet préoccupe donc de nombreux professionnels du bois mais aussi les propriétaires forestiers et les élus locaux.

En conséquence, les principaux acteurs de la filière forêt-bois et les Départements de Drôme et d'Ardèche ont émis la volonté de mener de façon concertée, bi-départementale, des réflexions et expérimentations sur cette thématique.

Article 1 : objet de la charte

La présente charte a pour objet de définir :

- les enjeux qui rassemblent les partenaires, les objectifs que ces derniers se fixent en matière de suivi des impacts du changement climatique dans les forêts de Drôme et d'Ardèche, mais aussi en termes d'adaptation des peuplements et sylvicultures,

- les relations technico-financières qui lient les différents partenaires dans le cadre du projet détaillé dans cette Charte, leurs missions et engagements respectifs.

Article 2 : les partenaires et leurs missions

Au jour de la signature de la présente charte, les partenaires identifiés sont :

- Les 2 Départements de Drôme et d'Ardèche, au vu de leurs politiques respectives en faveur de la filière forêt-bois (premier volet de la stratégie 2015-2017 du Plus Bois Drômois et action 8 du Plan départemental forêt-bois 2013-2017 pour l'Ardèche) et de leurs engagements pris lors des Assises Sud Rhône-Alpes de la filière forêt-bois du 6 décembre 2013, en matière de forêts et changement climatique. Les Départements seront chefs de file du comité de pilotage.

- Les 5 structures techniques présentées ci-après, au vu de leurs compétences et intérêts pour la thématique :

    - Le pôle Sud-Est du Département Santé des Forêts : a pour mission de suivre la santé des forêts au travers différents protocoles et réseaux de placettes sur le terrain. A ce titre, il intègre le réseau de placettes vigies du CRPF Rhône Alpes (réseau spécifique dédié à la thématique du changement climatique).

    - Le Centre Régional de la Propriété Forestière Rhône-Alpes (CRPF): une des missions du CRPF est de participer à la protection des forêts et à leur pérennité. Dans ce cadre, le CRPF peut intervenir dans la mise en place de dispositifs de démonstration. Il dispose ainsi d'un certain nombre de références qui seront exploitées dans la présente mission. De nouvelles placettes seront aussi installées.
      De plus, le CRPF sera le chef de file du comité technique mis en place. En tant que chef de file ou « coordonnateur technique », le CRPF sera l'interlocuteur privilégié et de référence des Départements pour ce projet.

    - L'Institut pour le Développement Forestier (IDF) : est le service de Recherche & Développement du CNPF (centre national de la propriété forestière) ; il mène notamment des travaux, études et expérimentations sur le changement climatique. Il proposera les protocoles de mesures des dispositifs existants et assurera l'analyse des données recueillies ; il coordonnera la mise en place de nouvelles plantations expérimentales, il proposera le protocole de suivi et analysera les premiers résultats. Il assurera également le lien avec les programmes de R&D (recherche et développement) traitant de sujets similaires au niveau national.

    - L'agence Drôme-Ardèche de l'Office National des Forêts (ONF) : elle gère près de 125 000 ha de forêts sur les deux départements concernés et elle assure un certain nombre de suivis dendrométriques pouvant contribuer à évaluer les effets du changement climatique sur les forêts, en particulier sur le réseau des réserves biologiques (5 000 ha). L'agence 07-26 pourra mutualiser ces données et implanter de nouveaux dispositifs, sous réserve de l'accord des propriétaires concernés, dans le cadre d'une convention spécifique.

- L'interprofession Fibois Ardèche Drôme : œuvrant au développement de la filière bois et à l'utilisation du matériau bois sous toutes ses formes, elle porte un intérêt à ces travaux pour appréhender et anticiper la forêt et les essences de demain qui constitueront la matière première des scieries dans l'avenir. FIBOIS apportera au groupe les attentes et points de vue des professionnels et en particulier des scieries (reboisement, choix d'essences par rapport à l'intérêt pour le marché du sciage et plus spécifiquement du bois dans la construction, ...).

Au besoin d'autres partenaires pourront être associés à la démarche.

Article 3 : les motivations et intérêts des partenaires, les orientations co-définies

Que faire pour préparer au mieux les forêts ardéchoises et drômoises à l'évolution climatique ? Outre des méthodes de gestion « adaptatives » qu'il convient encore à l'heure actuelle de préciser, la substitution d'espèces mieux adaptées aux conditions climatiques futures est une des méthodes possibles. Ainsi, lors des Assises forêt-bois Sud Rhône-Alpes de 2013, la nécessité de développer des essais autour des essences et de leurs provenances, avec le changement climatique comme angle d'étude, a été largement reconnue.

Néanmoins, avant de mettre en place de nouveaux essais comparant le comportement d'espèces et de provenances « nouvelles », il ressort pertinent de répertorier ceux déjà présents sur les deux départements et d'en faire l'analyse.

Ainsi, les partenaires s'accordent sur le fait que les 3 axes ci-dessous sont nécessaires :

a. Analyse des essais présents sur le territoire sous l'angle des évolutions climatiques annoncées. Ce préalable permettra, grâce à la valorisation d'investissements forestiers consentis ces 20 dernières années, d'identifier certaines espèces et/ou provenances qui sont d'ores et déjà à proscrire sur le territoire, celles qui pourraient être intéressantes à l'avenir et celles qui n'ont pas encore été testées en Drôme-Ardèche ;

b. Mise en place de nouvelles placettes afin de compléter les réseaux d'observation des différents partenaires concernant les peuplements existants. Ces placettes sont des outils indispensables aux sylviculteurs qui les alerteront d'évènements climatiques sévères nécessitant des récoltes précoces, et les guideront en matière de type de plantations à mener à l'avenir ;

c. Evaluation de nouvelles essences/variétés et/ou provenances. En effet, il semble important de tester dès à présent des variétés et provenances qui seraient pressenties comme plus adaptées au climat de demain.

Les structures techniques partenaires présentées en article 2, participeront donc à des opérations conjointes dans le but de développer un programme d'actions cohérent, autour du changement climatique en forêt, et prenant en compte les 3 axes cités ci-dessus.

Article 4 : le programme d'actions prévisionnel

Il se décline ainsi pour les trois années du présent partenariat :

Premier semestre 2015 :

- Recherches bibliographiques sur le climat en Drôme et Ardèche, ainsi que sur l'autécologie des essences cibles (voir avant-dernier § de ce présent article),

- Elaboration du protocole d'analyse des essais présents sur le territoire et pré-sélectionnés par le comité technique,

- Analyse des essais (modalités possibles: visite des dispositifs répertoriés, mesures dendrométriques, rapprochement avec des cartes climatiques),

- Synthèse des résultats, bilan de l'analyse, conclusions et perspectives.

Second semestre 2015, années 2016 et 2017 :

Sur la base des conclusions de l'analyse opérée au premier semestre 2015, les actions menées pourront être :

- Mise en place de nouvelles placettes vigies complétant le réseau existant,

- Installation de nouvelles plantations expérimentales comparant des espèces/variétés et/ou provenances,

- Suivi, entretien et mesures des dispositifs précités nouvellement installés.

Les travaux seront concentrés dans un premier temps sur les essences locales reconnues « affaiblies », c'est-à-dire celles déjà impactées par les évolutions du climat, ou sur des essences jusqu'alors inféodées à la zone méditerranéenne mais qui sont en cours de migration vers d'autres territoires de Drôme et d'Ardèche ; les essences cibles devant prioritairement être valorisables en bois d'œuvre. La liste de ces essences cibles sera proposée par le comité technique et validée par le comité de pilotage (voir article 5).

Une attention particulière sera portée à la localisation des plantations expérimentales de façon à prendre en compte au mieux les enjeux paysagers et environnementaux.

Article 5 : la gouvernance, les modalités d'évaluation et suivi

Deux instances seront constituées pour assurer la gouvernance de ce projet : un comité de pilotage et un comité technique.

Le comité de pilotage :

- Objectifs : veiller au bon avancement du programme d'actions. Pour cela, le comité de pilotage :
    - planifiera les dates-clés du projet,
    - décidera des orientations stratégiques et des actions à mener,
    - analysera les options/déclinaisons techniques pour réaliser ces actions, proposées par le comité technique,
    - validera les méthodologies et protocoles élaborés par le comité technique, et notamment l'emplacement des différents essais et placettes ainsi que la liste des essences cibles.

- Membres : Départements de Drôme et d'Ardèche, autres financeurs, Fibois Ardèche Drôme, CRPF, IDF, ONF, DSF.

- Chefs de file : les Départements.

Le comité de pilotage se réunira au minimum une fois par an pour une réunion de bilan, au dernier trimestre de chaque année n du programme. Cette dernière permettra de dresser le bilan des actions réalisées la dite année n, de préciser celles à mener l'année suivante le cas échéant, et mesurera les éventuelles difficultés d'application de la présente Charte.

Lors de cette réunion annuelle, la structure technique coordinatrice (chef de file du comité technique) présentera un bilan qui comportera :

- des éléments qualitatifs retraçant les principaux évènements, difficultés éventuelles et suggestions relevant de la mission,
- des éléments quantitatifs comportant toute information mesurable jugée pertinente. Ce volet retracera également le niveau d'avancement de chaque action sur le plan financier.

Il est convenu que sans l'organisation de cette réunion bilan annuelle, le programme d'actions détaillé de l'année suivante ne pourra être engagé financièrement. En effet, c'est à l'occasion de cette rencontre que ce programme d'actions détaillé de l'année n+1 sera validé.

A l'issue de chaque « réunion bilan », les partenaires techniques et financiers pourront, si nécessaire, s'entendre pour modifier les grandes orientations du présent projet et de son programme d'actions prévisionnel (mentionnés en articles 3 et 4), sous la forme d'un avenant à la présente Charte.

Le comité technique :

- Objectifs : mettre en œuvre le programme d'actions après validation du comité de pilotage. Pour cela il :
  - élaborera et soumettra au comité de pilotage des propositions d'actions détaillées, les options/déclinaisons techniques pour réaliser ces actions,
  - élaborera et mettra en place après validation du comité de pilotage, les conditions nécessaires à la réalisation des actions (définition des méthodologies et protocoles techniques y compris le choix des emplacements des nouveaux dispositifs ainsi que des essences cibles, sélection d'un ou plusieurs porteurs de projet, recherche de financements complémentaires si nécessaires , etc.),
  - assurera le suivi des actions.
- Membres : CRPF, IDF, ONF, DSF.
- Chef de file : le CRPF.

Le comité technique se réunira a minima 2 fois par an. Un compte rendu de ces réunions sera adressé à l'ensemble des membres du comité de pilotage.

Les chefs de file de chacun des comités ont la responsabilité d'organiser des réunions autant que de besoin, de rédiger et diffuser leurs comptes rendus, de répartir les tâches au sein de chaque instance, de coordonner le fonctionnement du comité.

Article 6 : modalités d'attribution des aides

Pour mener à bien le programme d'actions dont le contenu prévisionnel est défini à l'article 4, des dossiers de demande d'aide pourront être déposés annuellement, au cours du premier trimestre, auprès des Départements d'Ardèche et de Drôme.

L'intégralité des subventions représentera 80% maximum des dépenses éligibles (ce taux s'appliquant par dossier), et ne pourra excéder :

- 9 000 €/an de la part du Département de l'Ardèche,

- 10 000 €/an de la part du Département de la Drôme.

Les subventions 2016 et 2017 seront affectées sous réserve du vote des crédits par les deux Départements.

Le programme d'actions triennal pourra ainsi être financé annuellement par attribution de subventions par les deux Départements : soit à chacune des structures opératrices qui solliciteront une aide, soit à une unique structure technique dite coordinatrice (au titre de l'ensemble des autres opérateurs). Le cas échéant, c'est cette structure coordinatrice qui percevra les aides financières et qui aura la responsabilité de les redistribuer aux autres partenaires techniques en conformité de leurs investissements.

Les modalités d'attribution et versement de ces aides départementales sont les suivantes :

- les bénéficiaires devront avant le 31 Mars de chaque année n du programme triennal (et après vote des crédits correspondants à l'occasion de l'approbation du Budget primitif année n) déposer un dossier de demande de subvention auprès de chaque Département financeur.

- Ce dossier comportera a minima :

  - un prévisionnel technique détaillé des actions à mettre en œuvre. Il devra correspondre aux grands axes définis dans la présente charte, avoir été établi de façon concertée par le comité technique et avoir été unanimement validé par le comité de pilotage (voir articles 3, 4 et 5). Ce prévisionnel fera clairement apparaître les modalités de mises en œuvre sur chacun des territoires (Drôme et Ardèche), notamment la répartition des moyens humains (temps passé).

  - un prévisionnel financier faisant clairement apparaître les dépenses, recettes (dont les subventions escomptées) ainsi que leur répartition entre Drôme et Ardèche.

- les services de chaque Département pourront solliciter auprès de la structure coordonnatrice toute information complémentaire jugée nécessaire pour l'instruction du (des) dossier(s).

- lorsque le dossier sera réputé complet, un accusé de réception sera délivré par chaque Département et vaudra autorisation de commencer les travaux ou l'opération aidés correspondants,

- le dossier sera ensuite proposé pour décision à la Commission permanente de chacun des Départements. Une notification sera ensuite transmise au demandeur bénéficiaire.

- les aides seront versées après réalisation des actions, sur justificatifs technico-financiers correspondants. La demande de versement avec présentation des justificatifs devra intervenir au plus tard le 31 janvier de l'année n+1 (soit l'année suivant le lancement de l'opération ainsi soutenue). Les services de chaque Département pourront solliciter auprès de la structure coordonnatrice tout justificatif complémentaire jugé nécessaire pour pouvoir procéder au versement des aides.

- pour tout dossier d'un montant minimum de 5000 euros de dépense éligible, un acompte représentant 50% de la subvention allouée pourra être versé, sur demande accompagnée d'une attestation de commencement de l'opération financée.

La recherche d'autres sources de financement sera menée au cours du présent programme par le chef de file du comité technique, notamment dans le cadre du FEADER 2014-20.

Article 9: communication

Les structures techniques partenaires s'engagent à mentionner expressément, dans tout écrit non administratif ou dans toute déclaration publique, la participation financière des Départements de l'Ardèche et/ou de la Drôme à ce projet.

En outre, elles s'engagent à soumettre à visa préalable du (ou des) Département(s) concerné(s) tout document écrit destiné à une large diffusion, tout support de communication relatif aux actions définies ci-avant, et à y inscrire le logo du (ou des) Département(s) concerné(s).

Article 10: Durée de validité de la présente charte

La présente charte est conclue pour un programme d'actions réalisé entre le 1er janvier 2015 et le 31 décembre 2017.
Elle prendra effet à la date de la dernière délibération départementale en approuvant les termes.
Elle court financièrement à partir de la date de la dernière délibération départementale en approuvant les termes, et jusqu'au versement du dernier solde des subventions attribuées dans le cadre de la charte.

Article 11 : Modification, dénonciation, résiliation

Durant sa durée d'application, les dispositions de la présente charte pourront être modifiées par voie d'avenant avec l'accord de l'ensemble des partenaires ou comité de pilotage.

La présente charte peut être résiliée par décision unanime de l'ensemble de ses membres partenaires fondateurs listés à l'article 2.

Toute demande de résiliation devra intervenir au moins trois mois avant la date anniversaire.

ARTICLE 12 : Contentieux

En cas de litige, les parties signataires s'engagent à épuiser les ressources de la conciliation amiable avant de s'en remettre, le cas échéant, aux juridictions compétentes (Tribunal Administratif de LYON).

Fait en 7 exemplaires à Valence , le 18 MAR. 2015

Département de la Drôme

Par délégation du Président,
Le Directeur Général Adjoint
des Services Départementaux

Olivier MERLIAUD

Département de l'Ardèche

CRPF Rhône-Alpes

IDF

ONF Drôme Ardèche

DSF Zone Sud Est

Fibois Ardèche Drôme

Annexe 5 : Données climatiques et de présence des essences

Données de présence des essences :

EUFORGEN est un programme de collaboration entre différents pays européens dont le but est de travailler sur les ressources génétiques forestières. Dans le cadre de ces travaux, des cartes de répartition des essences en Europe sont créées, à partir de données bibliographiques. Ces cartes ne s'appuient donc pas sur des données d'inventaires, et fournissent les enveloppes des aires de répartition de chaque espèce.

IGN : Les placettes de l'IGN suivant une maille de 1 km sur 1 km permettent de localiser les différentes essences sur le territoire français pour un inventaire national. Ces informations sont obtenues par télédétection, et validées sur le terrain.

USDA : Le ministère de l'agriculture des Etats-Unis (United States Department of Agriculture) effectue des inventaires forestiers constituant une source de points de présence des différentes essences.:

Données climatiques :

Modèle	Auteur	Résolution	Période
AURELHY : Analyse Utilisant le RElief pour l'HYdrométéorologie	Météo-France	1 km	Moyennes trentenaires 1971-2000 et 1981-2010
DIGITALIS	AgroParisTech	50 m	Moyenne trentenaire 1961-1990
AURITALIS			1981-2010
SAFRAN : Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Adaptés à la Nivologie	Météo-France	8 km	Données horaires de 1958 à aujourd'hui

Le portail Drias

Le portail Drias s'appuie sur les données d'une équipe multi-partenariale, qui regroupent leurs simulations climatiques. Cette équipe est composée de Météo-France, du CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques) de Météo-France, du CERFACS (Centre européen de Recherche et Formation Avancées en Calcul Scientifique), et de l'IPSL (Institut Pierre et Simon Laplace). Ainsi, les données de ces différents organismes sont disponibles sur la plateforme de téléchargement.

Annexe 6 : Evapotranspiration de Turc.

L'évapotranspiration correspond aux pertes en eau par évaporation d'eau liquide et la transpiration de la biomasse qui se produiraient dans des conditions non limitantes en eau. La formule de Turc pour l'évapotranspiration est la suivante :

- Si Hr >50% : **ETP(mm/mois)= 0.40*(Rg+50)*(T/(T+15))**
- Si Hr<50% : **ETP(mm/mois)= 0.40*(Rg+50)**

Avec :

Hr humidité relative de l'air,

T température moyenne mensuelle de l'air sous abris en degrés Celsius,

Rg = rayonnement global en calories par centimètre carré par jour

Pour le mois de février, le coefficient n'est pas 0.40 mais 0.37.

Annexe 7 : Protocole de visite des peuplements et fiche terrain pour le test des trois modèles

1. Localisation et description des placettes

a. Localisation des peuplements

Les peuplements sont répartis sur l'ensemble du secteur Drôme-Ardèche. Ils sont sélectionnés au sein de trois classes correspondant à des probabilités de présence de l'espèce concernée modélisées par le Lerfob (modèles de niche).

Chaque peuplement est localisé par les coordonnées GPS en système WGS84 et Lambert 93. Un plan des différents points à visiter est fourni avec le protocole. On s'aide également de l'application iPhiGéNie, dont les techniciens disposent sur tablette.

Les points correspondent aux centroïdes des polygones de la BD Forêt de l'IFN : ils ne correspondent donc pas forcément au point précis du centre de la placette.

b. Positionnement de la placette

Si le point GPS tombe dans un endroit non homogène, en lisière, ou près d'un chemin, on le décale de manière à réaliser la placette dans une zone adaptée du peuplement, et on note les nouvelles coordonnées GPS.

Au sein de chaque peuplement sélectionné, on effectue le diagnostic sur les 20 premiers arbres autour du centre de la placette, et le relevé floristique sur une placette circulaire de 10 mètres de rayon autour du point géolocalisé.

2. Matériel

Le matériel suivant est nécessaire :

- GPS / tablette / smartphone disposant de l'application iPhiGéNie
- Boussole
- Clisimètre
- Jumelles
- Compas ou ruban-mètre
- Relascope
- Tarière pédologique
- Catalogue de station / flore
- Appareil photo
- Fiche terrain avec plan
- Crayon

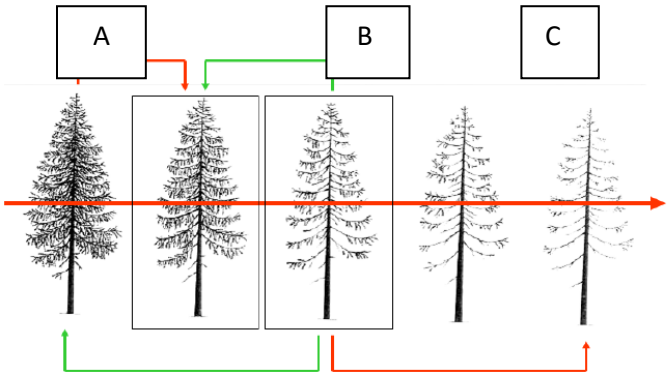
3. Mesures à effectuer

a. Evaluation de l'état sanitaire

Le dépérissement des arbres est noté selon un protocole d'évaluation de la défoliation du DSF, sur les 20 premiers arbres de l'essence principale autour du point de la placette.

Les observations se font à l'aide de jumelles. La notation se fait de manière simplifiée : on regroupe les classes 0-1-2 et 3-3+. Ainsi, on obtient la notation suivante :

Classe de défoliation	0-1-2	3-3+	4
Classe simplifiée	A	B	C
Observation	Pas de défoliation ou défoliation inférieure à 25%	Défoliation à plus de 25%, notamment sur l'axe 2	Arbre mort



? **Figure 2** : *Dynamique de l'arbre.* Source : Christophe Drénou. 2012

On note également l'éventuelle présence de pathogènes sur la placette. L'intensité de la présence de Gui est précisée sur chaque arbre:

Classe d'intensité de présence du Gui	0	3	4	5
Observation	absence ou présence sur l'extérieur des branches seulement	présence dans la moitié intérieure des branches, forte extension dans la moitié extérieure	présence abondante sur le tronc et la moitié intérieure des branches	présence abondante sur le tronc et sur toute la longueur des branches

b. Relevé dendrométrique

On note la classe de hauteur dominante, ainsi que le diamètre dominant (classe de 5m).
La surface terrière en sapin pectiné est mesurée par un tour d'horizon relascopique à l'aide d'un porc-épic.

c. Relevé stationnel

On note la topographie, l'altitude, la pente, et l'exposition. On évalue également le pourcentage d'affleurement rocheux à l'aide de la clé fournie avec la fiche terrain.

Un trou à la tarière est effectué et on relève la profondeur et la raison du blocage (dalle ou non). On décrit chaque horizon par sa structure et sa teneur en éléments grossiers (pourcentage en volume). La réserve utile est ensuite évaluée à l'aide d'une table de valeurs.

On signale également d'éventuelles traces d'hydromorphie.

d. Relevé floristique

Ce relevé concerne dans un premier temps les espèces ligneuses et non ligneuses de moins de 7 mètres de hauteur, présentes dans toute la placette circulaire de 10 mètres de rayon autour du point GPS. On veille donc bien à parcourir l'ensemble de celle-ci.

Il est nécessaire de noter 10 espèces différentes, afin de pouvoir estimer le pH et le rapport C/N du sol en un temps minimum.

La présence d'une espèce est notée avec son ordre de repérage, ainsi que sa classe de hauteur :

- « h » si l'espèce mesure mois de 50cm
- « a » si l'espèce est un arbuste de 50cm à 7m

En cas de doute sur l'espèce, on conserve un échantillon et/ou on la photographie pour l'identifier plus tard, tout en notant son ordre de repérage.

On signale ensuite la présence ou l'absence des espèces de plus de 7 mètres de hauteur (en annotant « A » en face du nom de l'espèce), mais sans préciser l'ordre d'apparition.

Classe de texture (selon le triangle de Jamagne)	S	SL	SA	LlS	LS	LmS	LSA	LAS	Ll	Lm	LA	AS	A	AL	A lourde
Réservoir utilisable (mm d'eau par cm de sol)	0.7	1.0	1.35	1.20	1.45	1.60	1.65	1.75	1.30	1.75	1.95	1.70	1.75	1.80	1.65

Tableau des réservoirs en eau selon les textures, Service de cartographie des sols de l'Aisne, Jamagne *et al*., 1977 ; in Baize et Jabiol, 1995).

Placette n° ☐

Date ___/___/_____
Opérateur _____
Commune _____
PGS
Publique

Coordonnées L93	X=	Y=
Coordonnées WGS84	X=	Y=

PEUPLEMENT

Essence _____

Ho <3m 3m-9m 9m-15m 15m-24m >24m

Do _____

G _____

Etat sanitaire

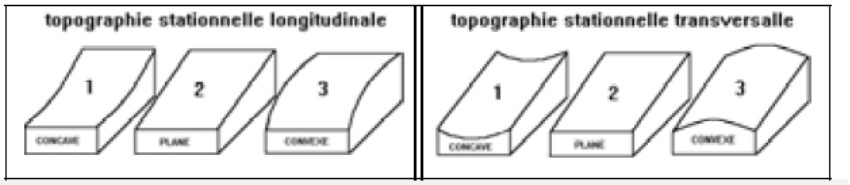
Dépérissement DEFIFOL : A,B,C*										

Présence de Gui : 0 3 4 5

STATION

Topographie _____

plaine (1) vallée (2) vallon (3) plateau (4) replat (5) sommet (6)
haut de pente (7) mi-pente (8) bas-pente (9) croupe (10)



Pente _____

Exposition _____

Altitude _____

Affleurement rocheux <10% 10%-30% 30%-50% 50%80% >80%

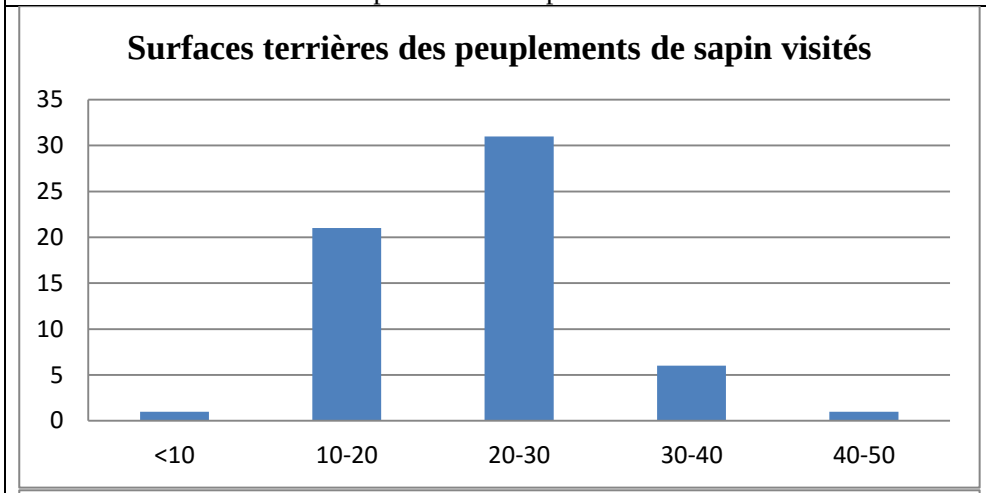
Profil pédologique : texture, profondeur, %éléments grossiers ☐

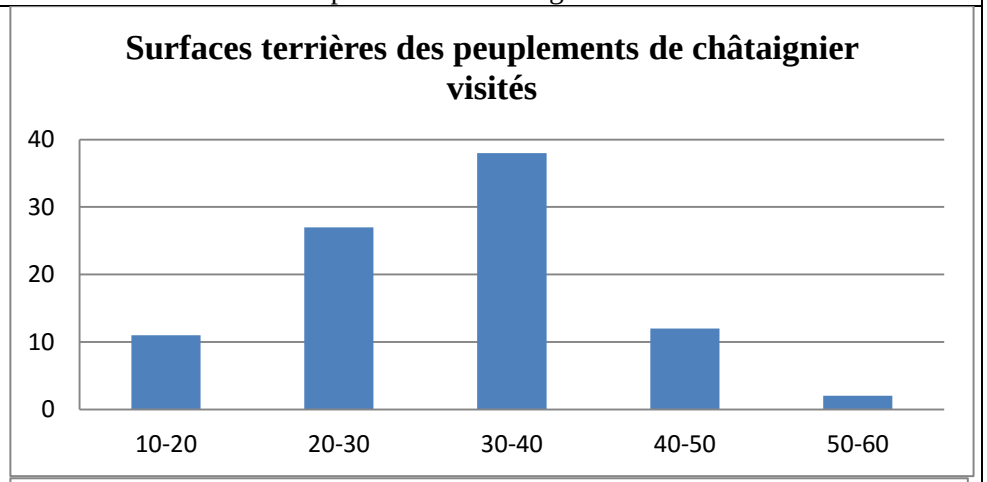
RU*** _____

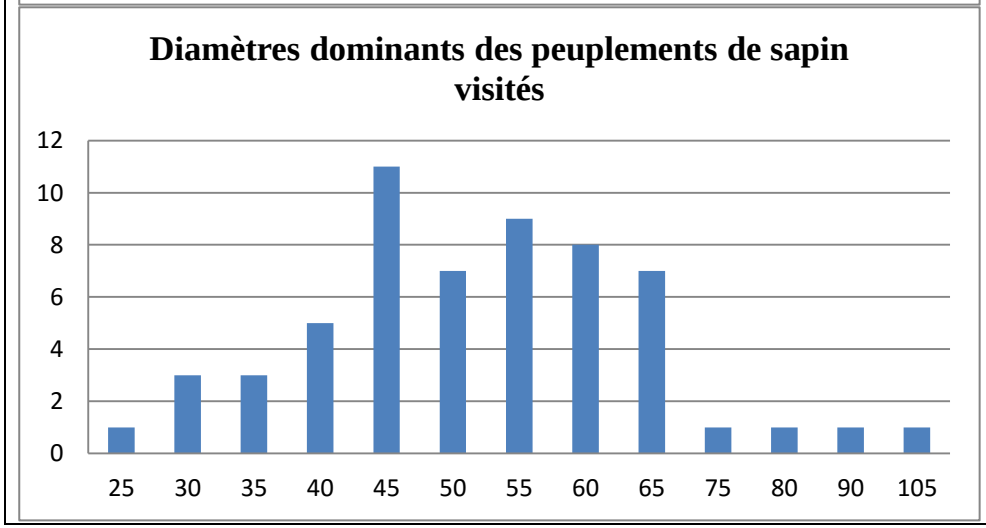
Hydromorphie oui non

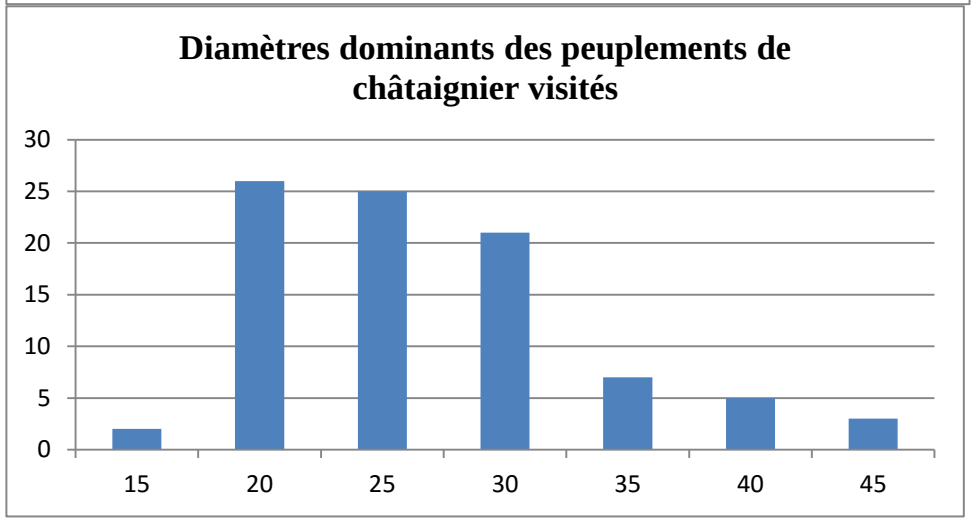
Annexe 8 Eléments relatifs aux peuplements visités de sapin pectiné et châtaignier

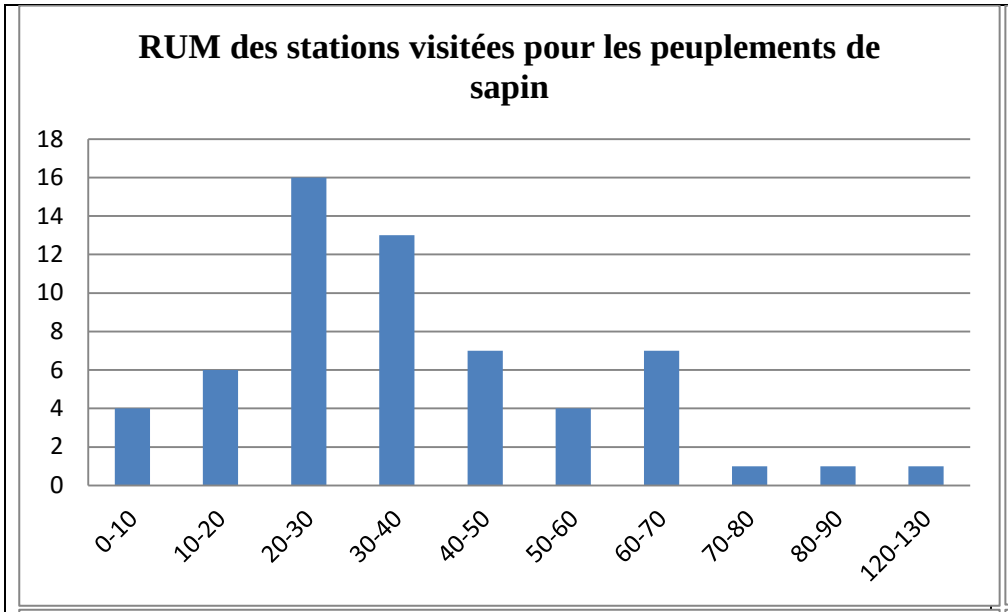
Peuplements de sapin visités	Peuplements de châtaignier visités

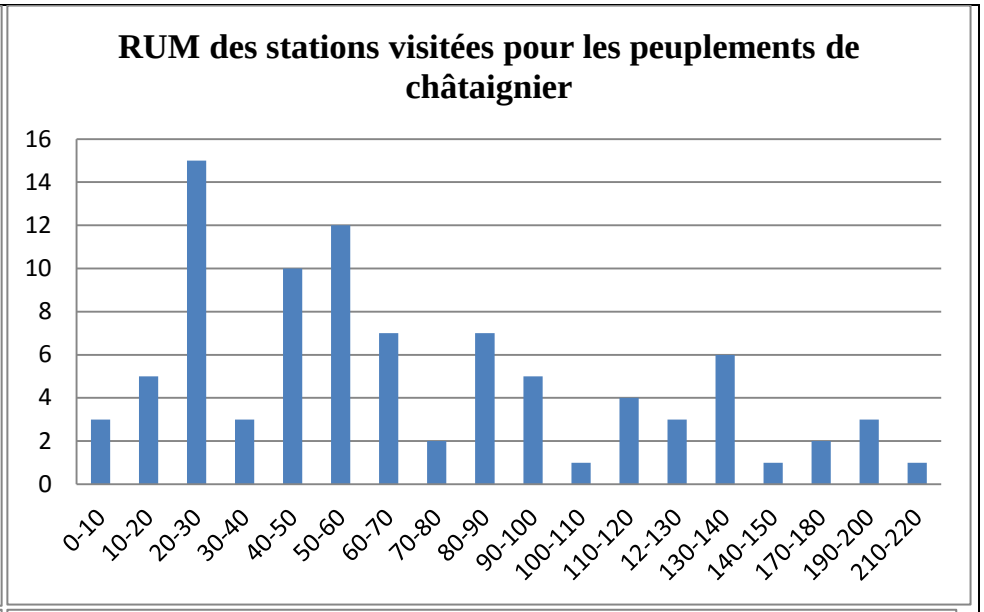


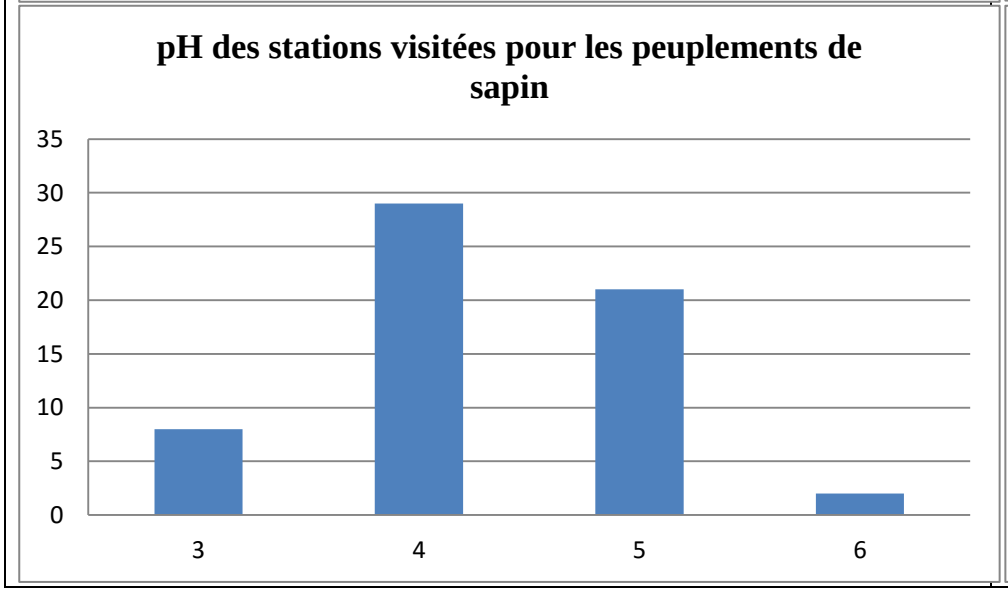


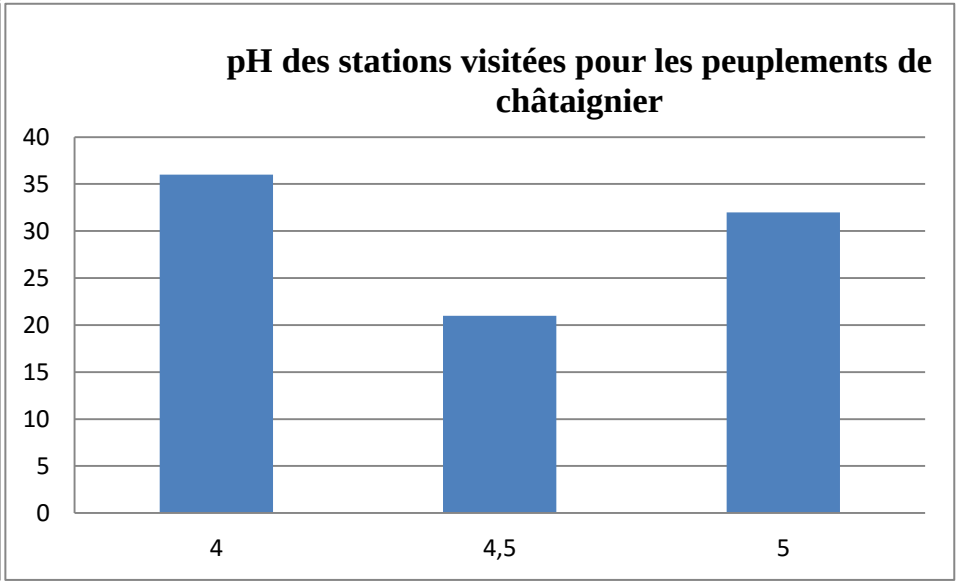


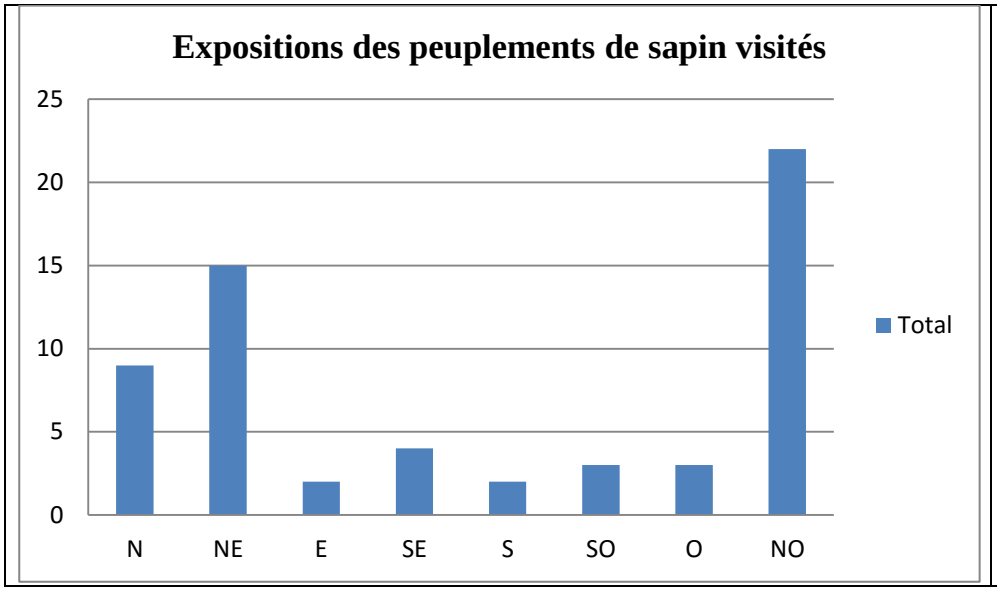


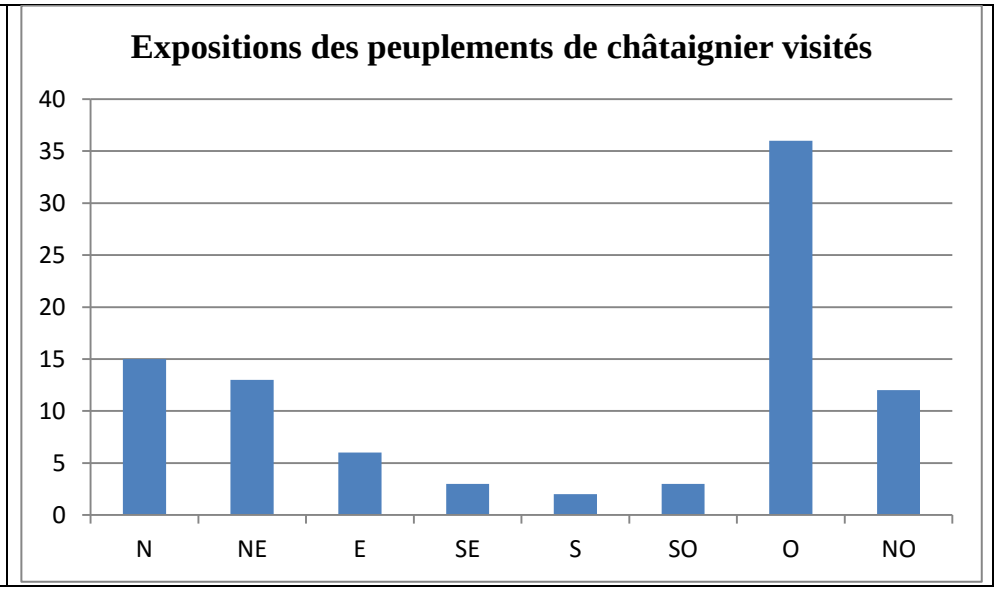

RUM des stations visitées pour les peuplements de sapin
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
0-10
10-20
20-30
30-40
40-50
50-60
60-70
70-80
80-90
120-130


RUM des stations visitées pour les peuplements de châtaignier
16
14
12
10
8
6
4
2
0
0-10
10-20
20-30
30-40
40-50
50-60
60-70
70-80
80-90
90-100
100-110
110-120
12-130
130-140
140-150
170-180
190-200
210-220


pH des stations visitées pour les peuplements de sapin
35
30
25
20
15
10
5
0
3
4
5
6

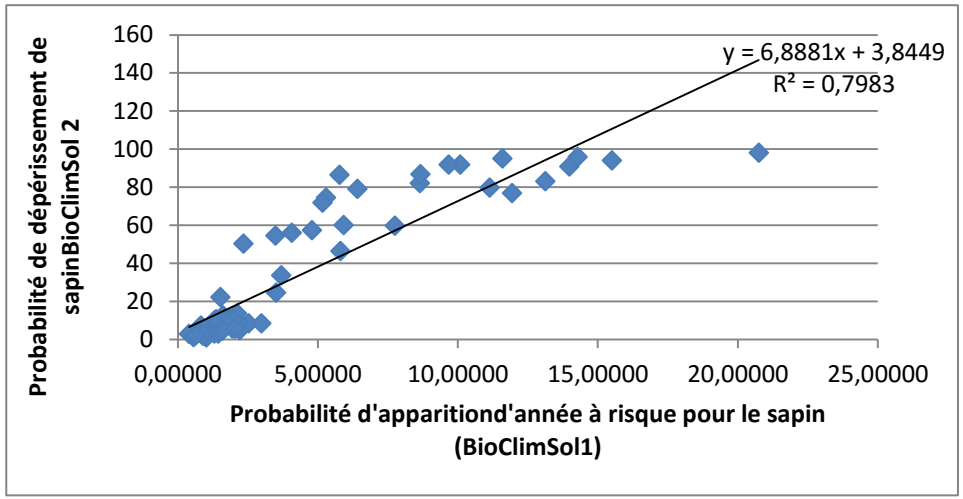

pH des stations visitées pour les peuplements de châtaignier
40
35
30
25
20
15
10
5
0
4
4,5
5

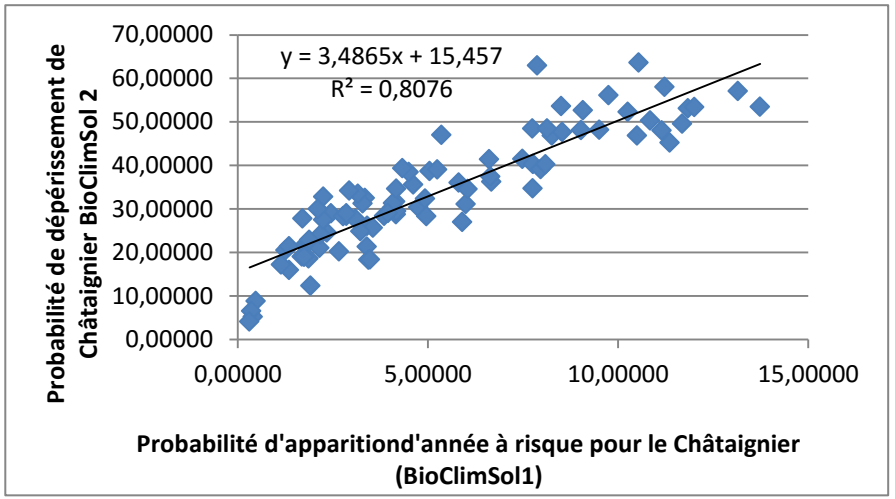

Expositions des peuplements de sapin visités
25
20
15
10
5
0
N
NE
E
SE
S
SO
O
NO
Total


Expositions des peuplements de châtaignier visités
40
35
30
25
20
15
10
5
0
N
NE
E
SE
S
SO
O
NO

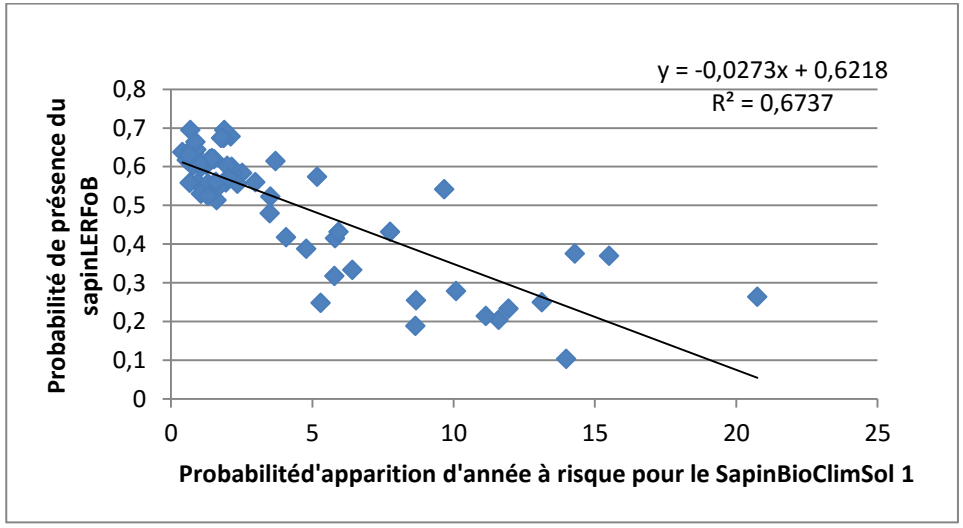
Annexe 9 : Corrélations entre les modèles BioClimSol 1, BioClimSol 2, LERFoB, IKS hydrique et IKS thermique pour le sapin pectiné et le châtaignier

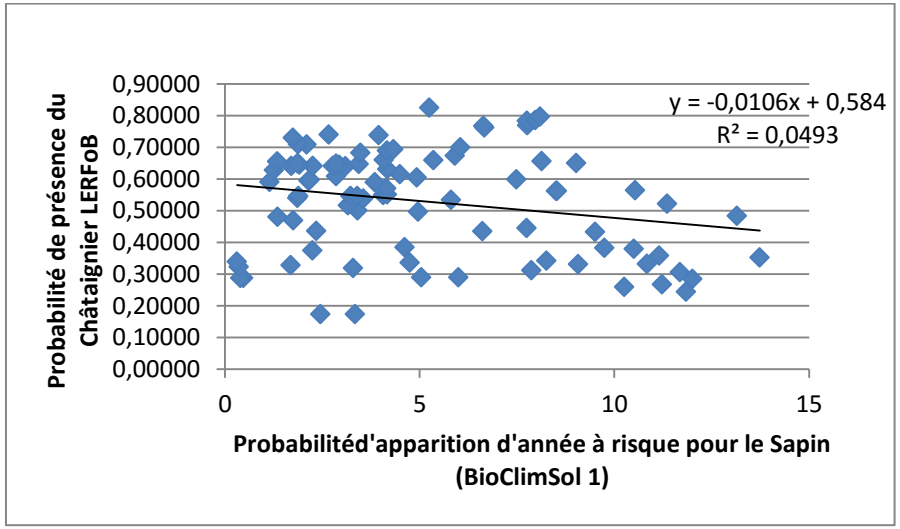
BioClimSol 1 et BioClimSol 2 :



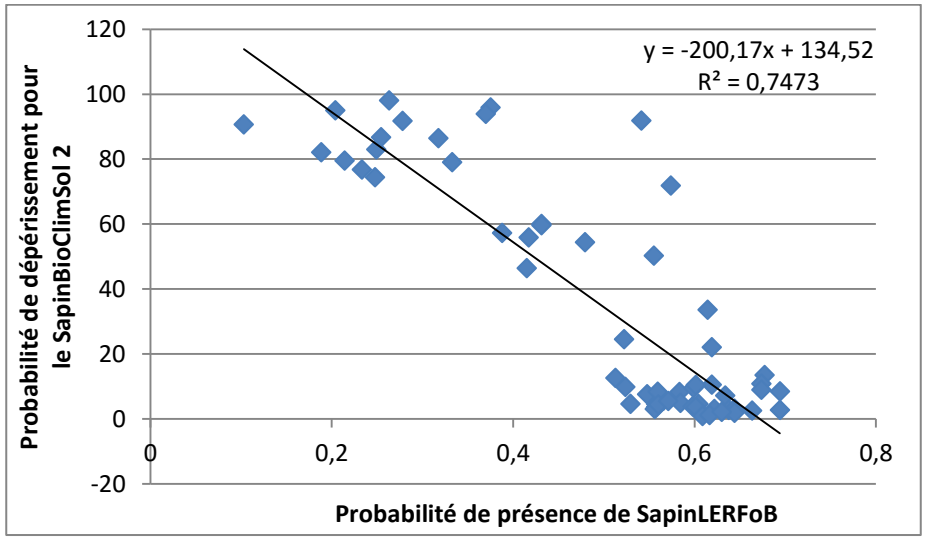


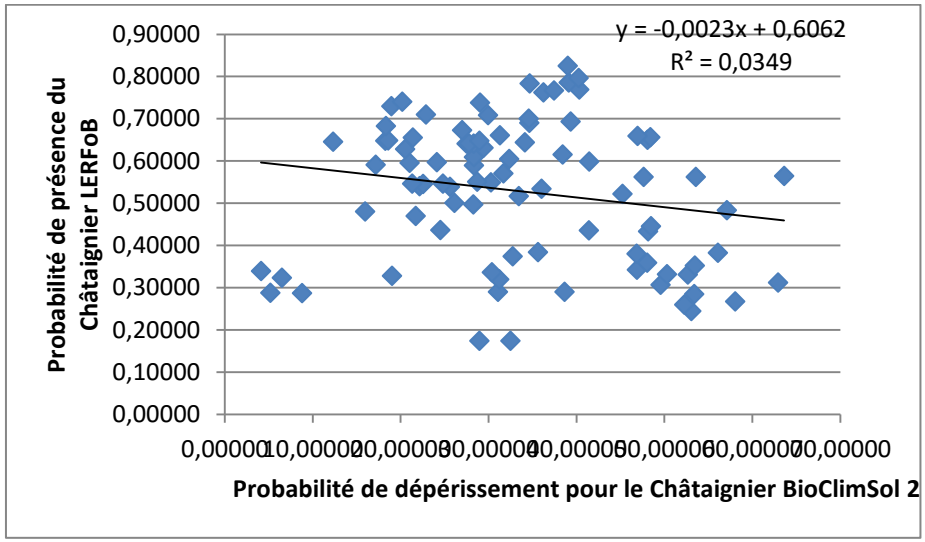
BioClimSol 1 et Lerfob :



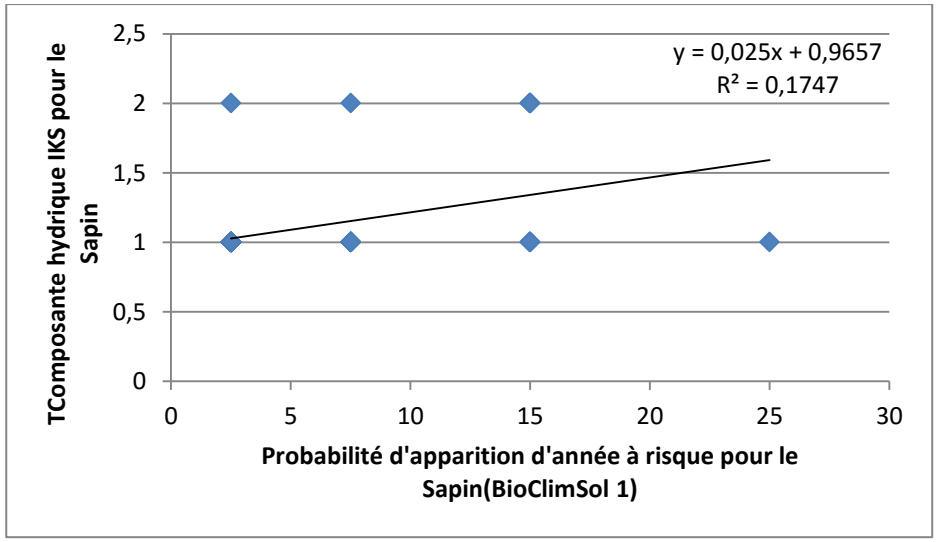


BiocClimSol 2 et LERFoB :

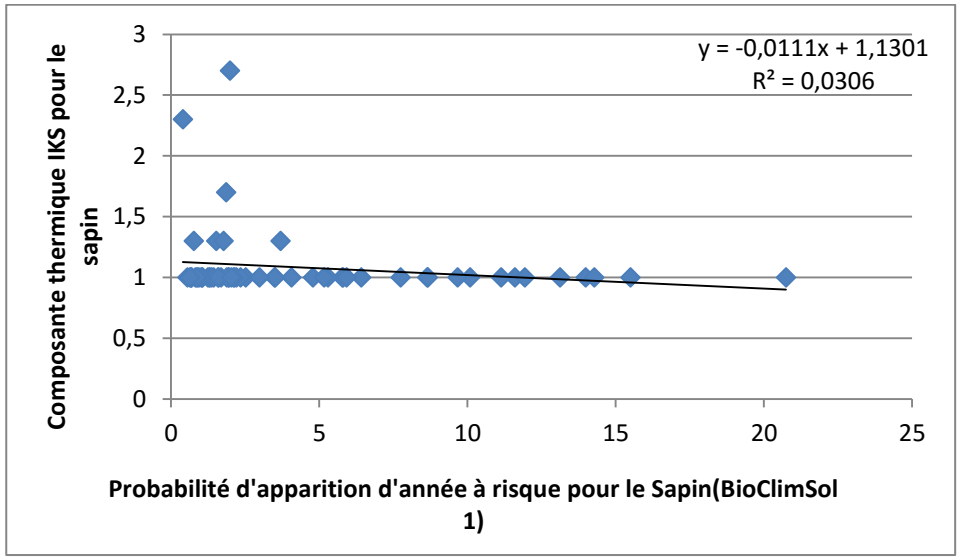


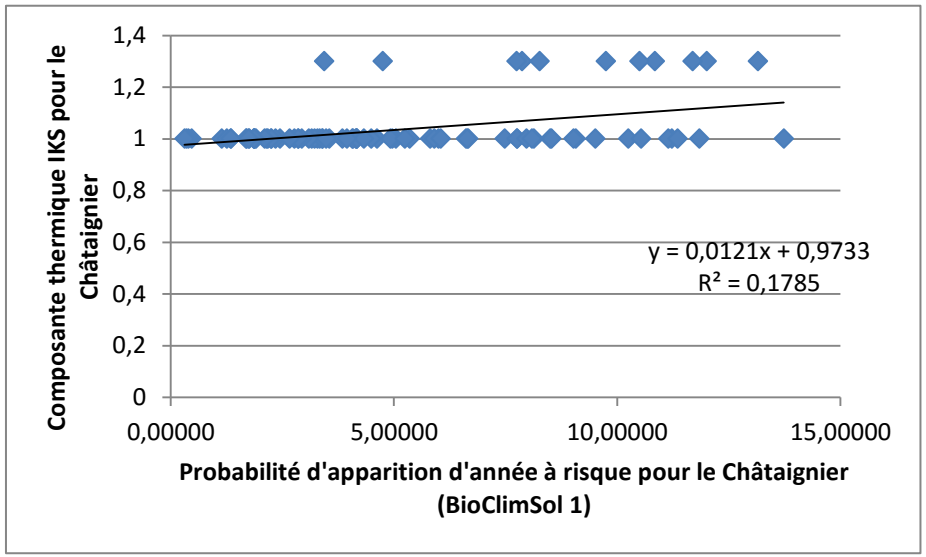


BioClimSol 1 et IKS hydrique :

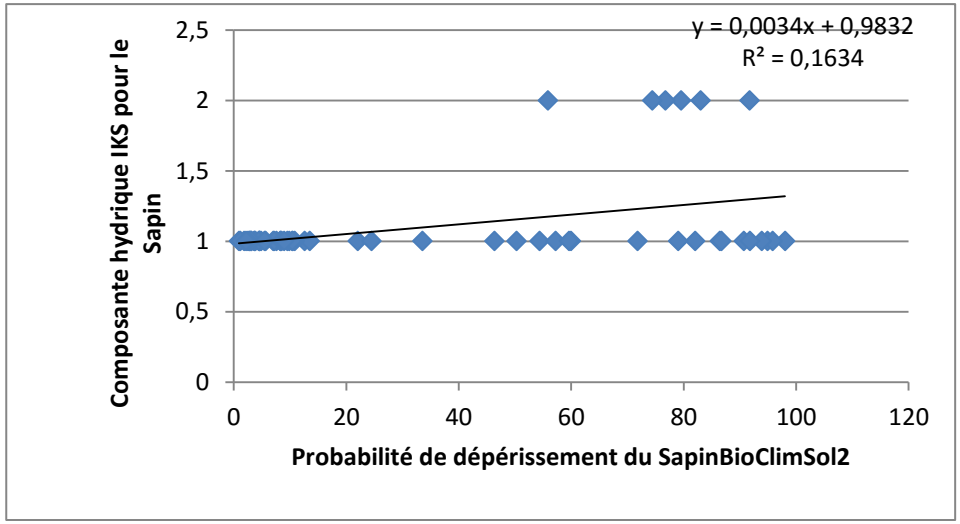


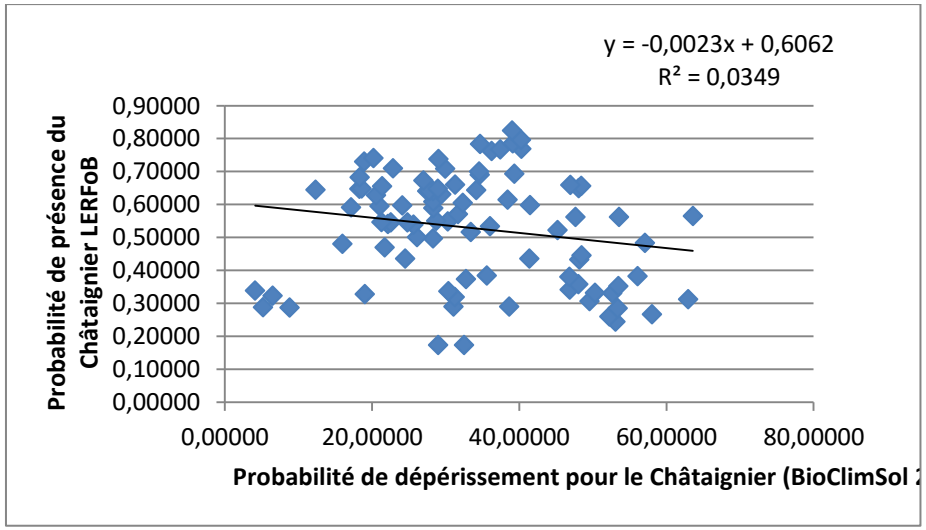
BioClimSol 1 et IKS thermique :



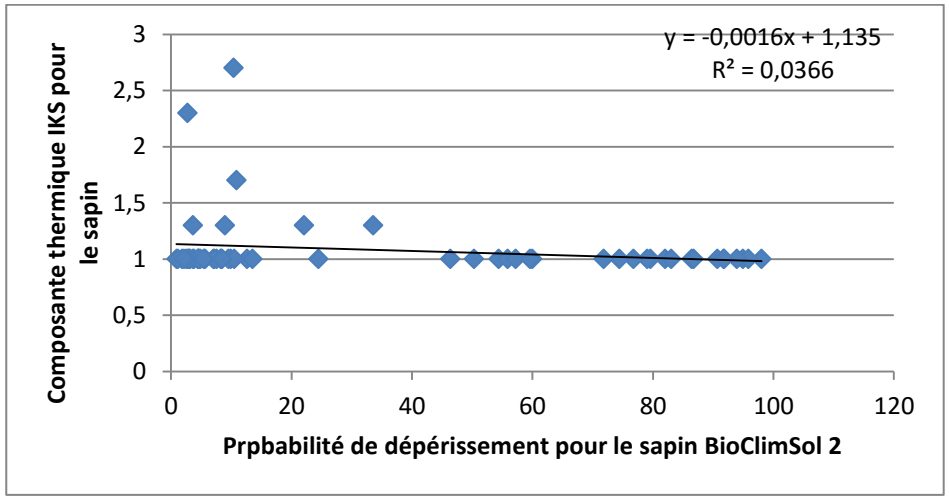


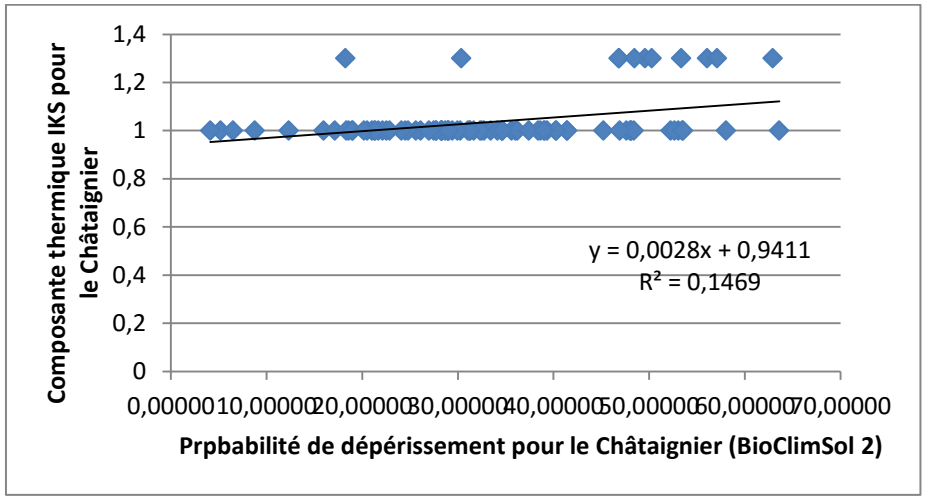
BioClimSol 2 et IKS hydrique :



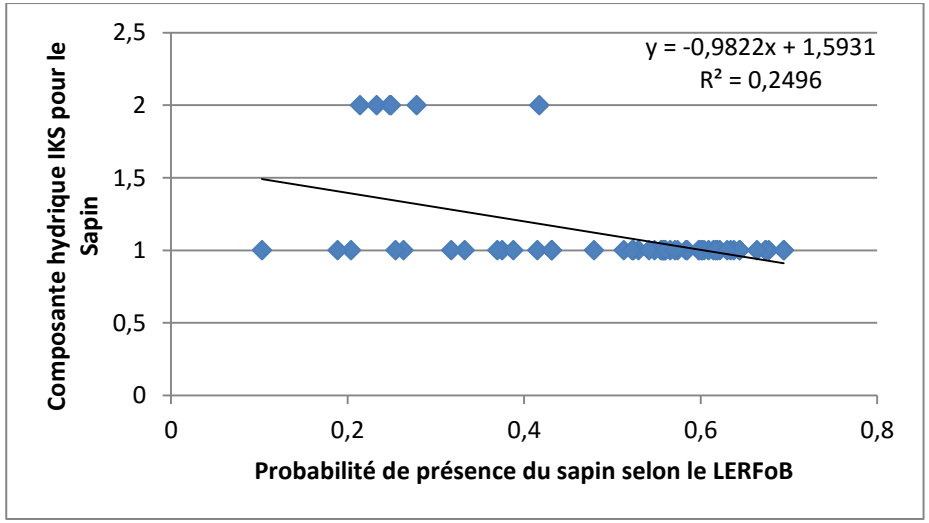


BioClimSol 2 et IKS thermique :

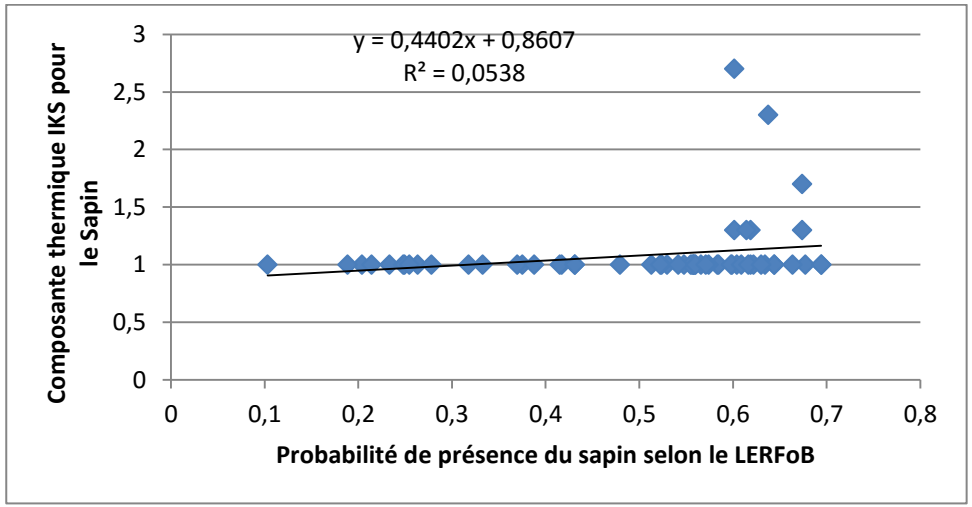


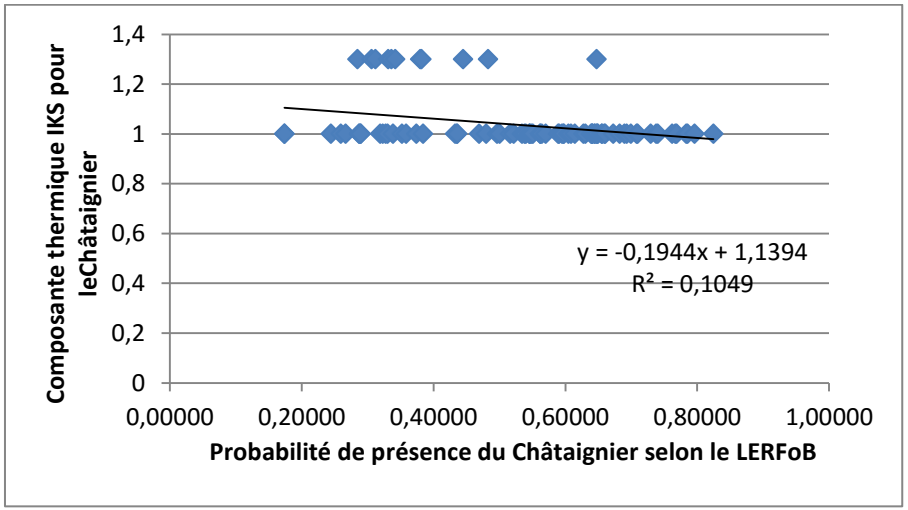


LERFoB et IKS hydrique :

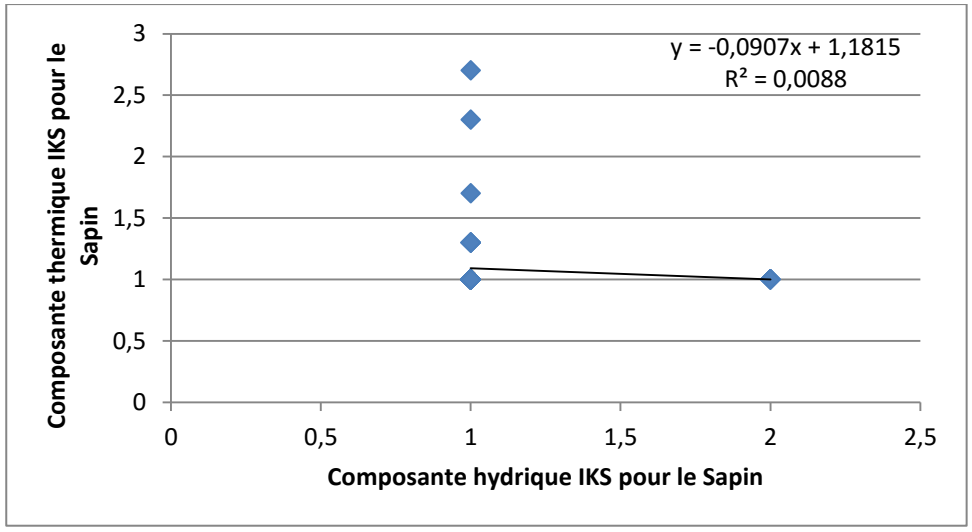


LERFoB et IKS thermique :





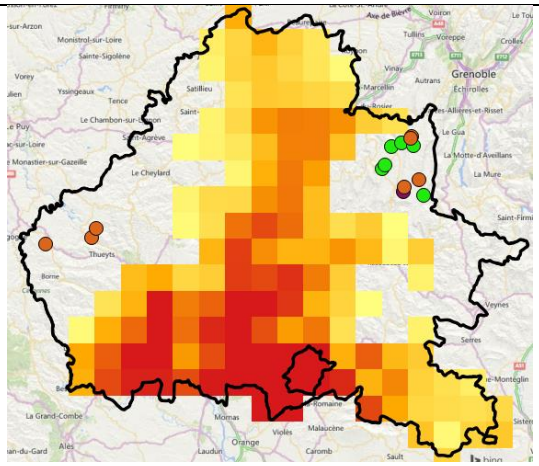
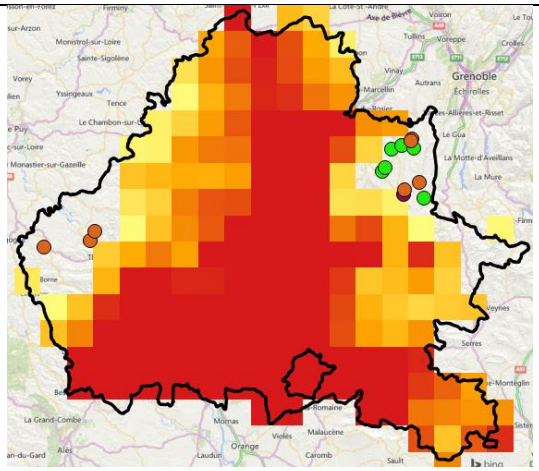
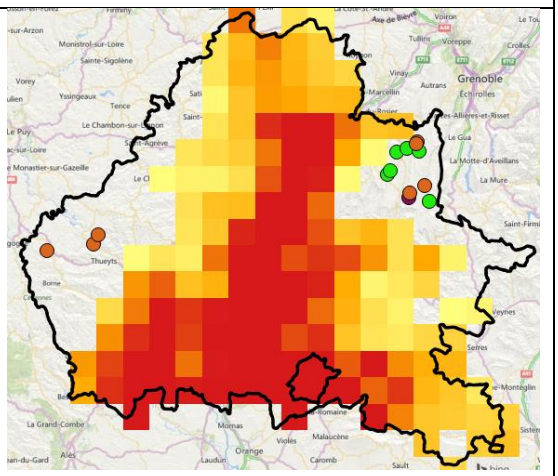
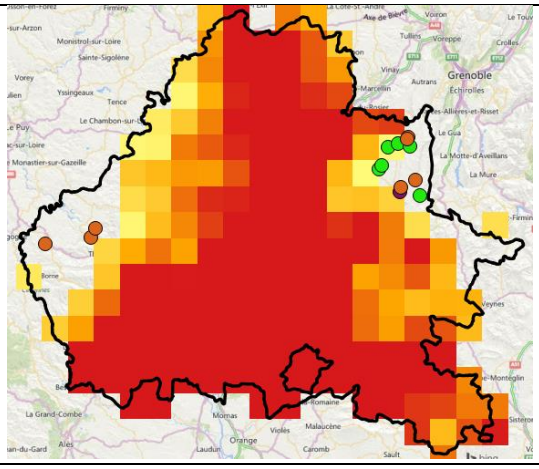
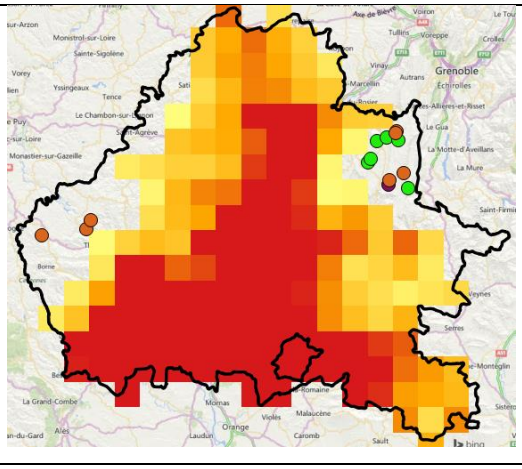
IKS thermique et IKS hydrique :



Annexe 10: Evolution des conditions pédoclimatiques des placettes pour leurs essences

Nous avons regroupé des placettes comprenant des essences adaptées à l'étage montagnard (hêtre sapin, épicéa) ou collinéen (pin sylvestre, châtaignier) pour n'afficher sur la carte que les zones de climat inadapté à ces essences.

Figure 29 : Placettes avec essences montagnardes (en vert : hêtre ou hêtre et sapin pectiné, en orange : Épicéa, en violet : sapin pectiné).

<table>
<tr><td>1976-2005</td><td colspan="2"> 
</td></tr>
<tr><td></td><td>RCP 4.5</td><td>RCP2.6</td></tr>
<tr><td>2021-2050</td><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>2041-2070</td><td>  </td><td>  </td></tr>
</table>

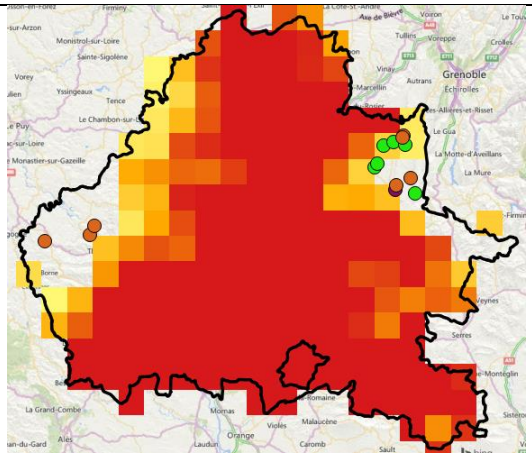
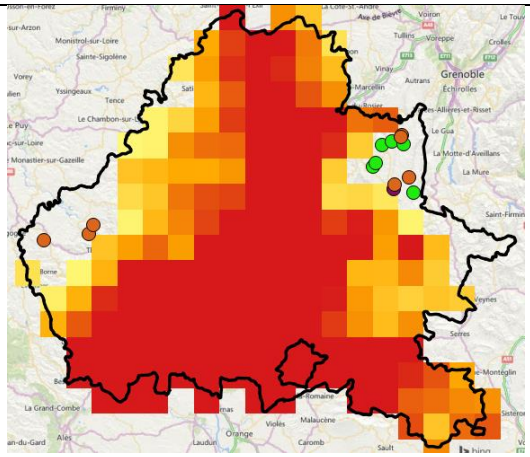
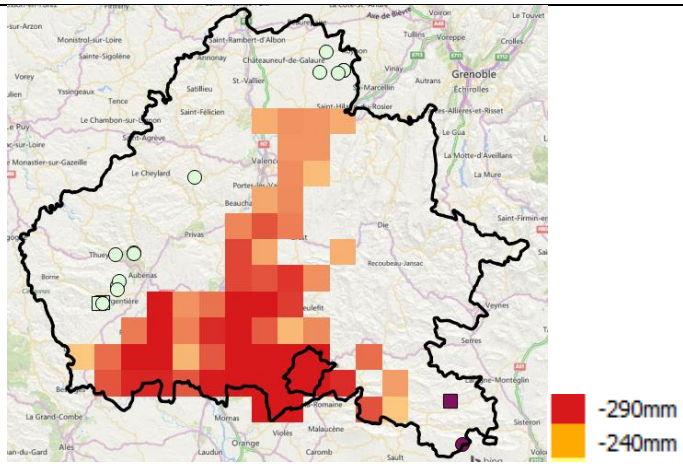
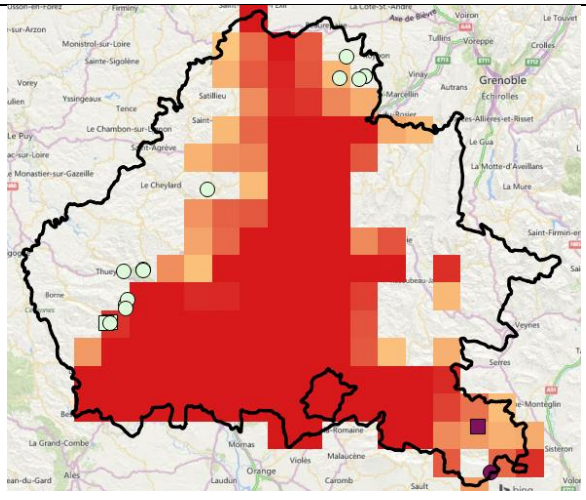
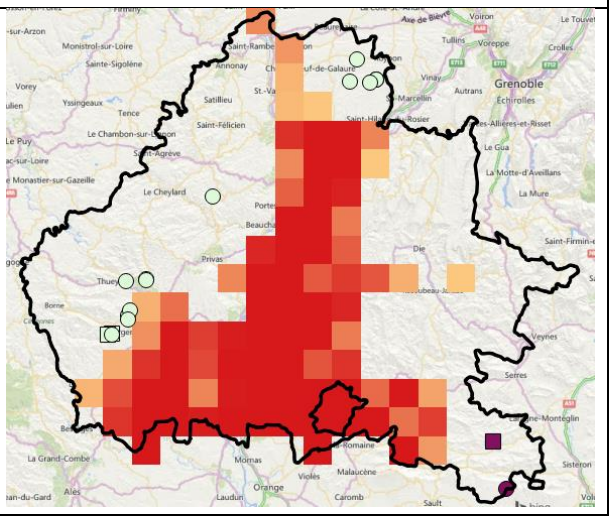
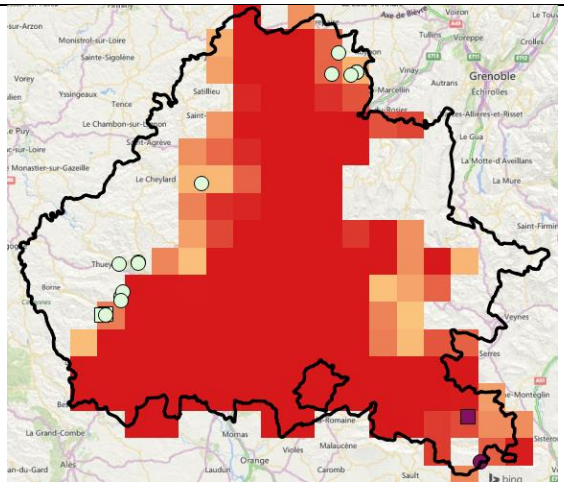
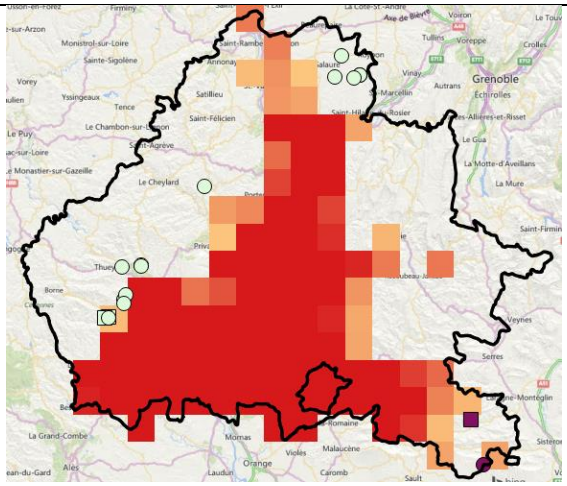
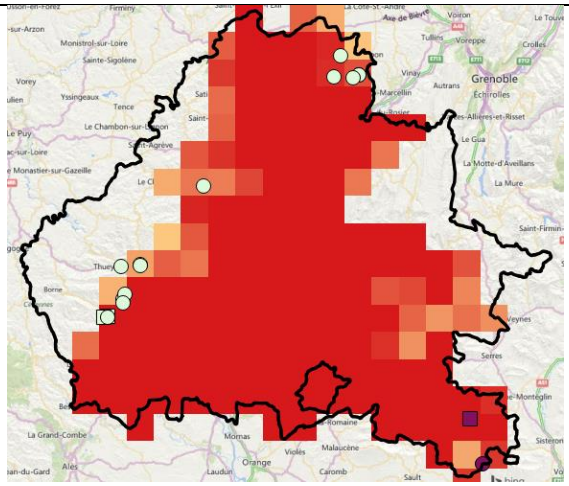
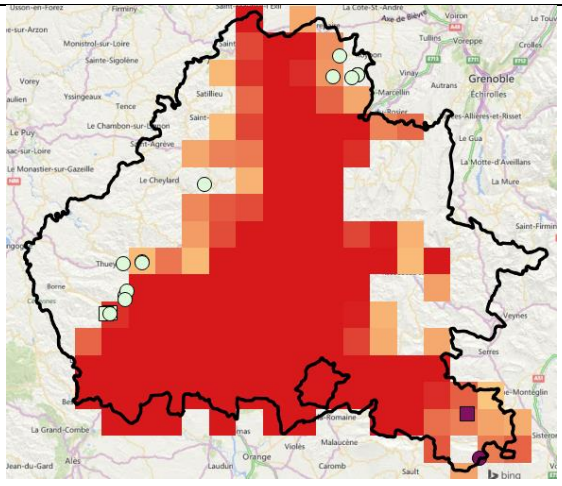
2071-2100		

Figure 30 : Placettes avec essences collinéennes (en blanc : châtaignier ou châtaignier et pin sylvestre ; en violet : pin sylvestre). Les puces carrées correspondent à des placettes vigies.

1976 - 2005		
	RCP 4.5	RCP2.6
2021 - 2050		

2041 - 2070		
2071 - 2100		

Annexe 11 : Détail des placettes réutilisables

Placettes de Châtaignier :

Zone de vigilance	Numéro de placette	Thème	Années de réalisation de mesures (données disponibles dans le dossier)	Âge du peuplement en 2015
3	07/06/02	Régénération d'un taillis de châtaignier, avec coupe à blanc	2013	18
2	26/01/05	Balivage d'un taillis de châtaignier avec suivi du développement du chancre	2001	
3	07/07/07	Conversion d'anciens vergers de châtaigniers en châtaigniers bois	2008,2013	9
1	07/01/76	Aménagements sylvo-pastoraux (PFCI) dans des peuplements de châtaignier	2001	39
1	07/01/77	Aménagements sylvo-pastoraux (PFCI) dans des peuplements de châtaignier	2001	39
2	26/01/06	Détourage d'un taillis de châtaignier de 16 ans	aucune	25
2	26/01/07	Eclaircie d'un taillis de châtaignier de 10 ans	aucune	18
2	26/01/08	Eclaircie d'un taillis de châtaignier de 7 ans	aucune	14
2	26/01/45	Dégagement et dépressage de semis de Châtaignier dans un taillis	aucune	
2	26/90/42	Balivage d'un taillis de Châtaignier	1990,1994,1997	41
3	07/06/01	Régénération d'un taillis de Châtaignier, avec coupe à blanc	2013	9
1	07/93/54	Régénération d'un taillis de Châtaignier, avec dépressage précoce	2001,2008,2013	30
3	07/13/03	Détourage dans peuplement âge de châtaigniers	2013,2014	32
1	07/08/81	Futaie irrégulière	2008,2013	
1	07/08/82	Placette AFI	2008	

Placettes de Hêtre :

Zone de vigilance	Numéro de placette	Thème	Dates de réalisation de mesures (données disponibles dans le dossier)

3	26/07/01	Régénération hêtre	2007,2009,2010
1	26/12/03	Mycosylviculture	
3	26/06/55	Régénération hêtre (buis)	2007,2001
1	26/02/47	Impact du gibier sur la régénération naturelle	2003,2006, 2008
1	26/02/48	Impact du gibier sur la régénération naturelle	2003, 2006,2008
1	26/02/49	Impact du gibier sur la régénération naturelle	2003, 2006,2008

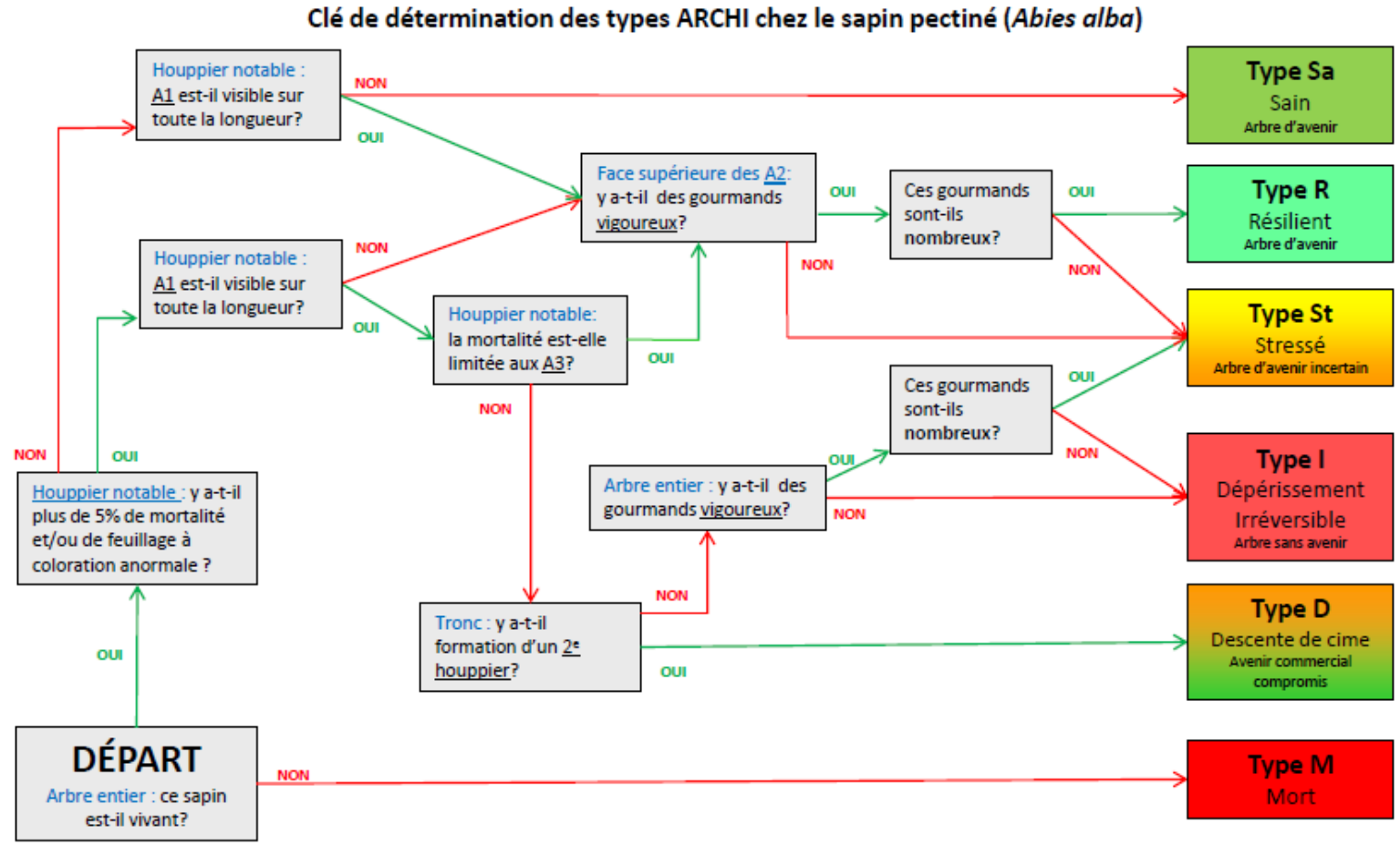
Placettes de sapin pectiné :

Zone de vigilance	Numéro de placette	Thème	Dates de réalisation de mesures (données disponibles dans le dossier)
1	26/02/47	Impact du gibier sur la régénération naturelle	2003, 2006,2008
1	26/02/48	Impact du gibier sur la régénération naturelle	03, 06,08
1	26/02/49	Impact du gibier sur la régénération naturelle	03, 06,08
1	26/02/46	Impact du gibier sur la régénération naturelle	03, 06,08

Placettes de pin sylvestre :

Zone de vigilance	Numéro de placette	Thème	Dates de réalisation de mesures (données disponibles dans le dossier)	Âge du peuplement en 2015
2	26/12/02	Mycosylviculture	aucune	60
1	07/08/82	Placette AFI	8	

Annexe 12 : Le protocole ARCHI : exemple pour le sapin pectiné (Source : Drénou, 2011)



Houppier notable : partie du houppier située au dessus de la ligne joignant les contacts latéraux avec les arbres voisins.
A1, A2, A3 : le tronc est l'axe d'ordre 1 (A1), il porte des étages de branches appelées A2, lesquelles portent des rameaux A3.
Gourmands vigoureux : gourmands plagiotropes ou orthotropes présentant une forte dominance apicale (existence d'un axe principal dominant), une forte croissance (net espacement entre les étages de ramifications), et une sexualité absente ou limitée à quelques cônes femelles.
Gourmands nombreux : gourmands présents sur plus de 50% des A2 et les recouvrant sur plus du quart de leur longueur. Sur l'A1, les gourmands sont nombreux lorsqu'ils cachent la partie du tronc qui les porte.
2e houppier : structure constituée de gourmands vigoureux portés par le tronc et hiérarchisés entre eux (certains étant dominants, d'autres dominés).

Annexe 13 : Protocole de mise en place et suivis du réseau « changement climatique »

1. Objectifs

Le réseau « changement climatique » est un ensemble de dispositifs visant à alerter le forestier sur certains secteurs en Ardèche et Drôme devenant risqués pour les essences à enjeu du territoire. Le seul facteur étudié est l'évolution du climat.

2. Choix du site

Les peuplements à visiter ont été sélectionnés selon un niveau de risque de déficit hydrique, en considérant des prévisions climatiques à plus ou moins long terme. Ainsi, trois catégories de placettes ont été définies :

- Des peuplements situés en zone sans prévision de risque de déficit hydrique trop important pour l'essence en place
- Des peuplements avec une prévision de déficit hydrique à risque pour l'essence en place dans un futur proche
- Des peuplements situés dans une zone risquant un déficit hydrique à risque pour l'essence en place dans un futur lointain.

Ces sites correspondent donc aux trois modalités expérimentées dans ce réseau.

Dans le peuplement, le point devra se trouver dans une station homogène, dans un peuplement suffisamment âgé pour pouvoir observer des dépérissements.

3. Plan d'expérience

Les placettes mises en place sont des dispositifs expérimentaux. Pour chaque modalité, on compte 5 répétitions et un témoin pour chaque répétition, répartis dans la mesure du possible sur l'ensemble du territoire Drôme-Ardèche.

Une placette unitaire est constituée de 20 tiges dominantes ou co-dominantes de l'essence étudiée.

4. Installation des placettes
   a. Signalisation utilisée

Les tiges suivies sont marquées à la peinture. Elles correspondent à des tiges de l'essence étudiée, dominantes ou co-dominantes, numérotées de 1 à 20 de proche en proche à partir du centre de la placette, lui-même repéré via ses coordonnées GPS.

La placette test est soumise à un itinéraire sylvicole particulier (par exemple une éclaircie précoce).

L'état sanitaire sue chaque arbre de chaque placette (test et témoin) est noté chaque année. Si d'une année à l'autre, une tige vient à disparaitre (mort ou coupe), celle-ci doit être remplacée lors de la campagne de mesures suivante, et la cause de son remplacement doit être notée.

b. Matériel nécessaire à l'installation des placettes

- GPS
- Boussole
- Clisimètre
- Tarrière
- Peinture

c. Description stationnelle de la placette

A l'installation, on prendra soin de réaliser un descriptif détaillé de la station, en précisant :

- Les coordonnées du centre de la placette
- L'altitude
- La topographie
- La topographie vis-à-vis du bilan en eau
- L'exposition
- La pente
- Le confinement
- La texture du sol
- La profondeur du sol
- La teneur en éléments grossiers

5. Variables étudiées

L'état sanitaire est noté tous les ans. Il est réalisé selon le protocole ARCHI.

Des mesures dendrométriques (diamètre et hauteur) sont prises tous les cinq ans.

6. Durée de l'expérimentation

Pour obtenir des résultats exploitables en ce qui concerne les mesures dendrométriques, l'expérience doit durer au minimum 15 ans.

7. Analyse des résultats

On réalisera des tests d'indépendance entre pourcentage de peuplement dépérissant et zone de vigilance : des tests du Khi2 pourront être effectués.

Des calculs d'accroissement moyens par placette et par modalité seront effectués à partir des mesures dendrométriques.

8. Investissement en temps

Le temps à prévoir pour l'installation et le suivi d'un réseau de placettes est décrit dans le tableau suivant :

Etape	Nombre de jours par étape pour 15 couples de placettes (test + témoin)

Contact du propriétaire, rédaction et signature de la convention	7 j * 1 technicien
Cheminement Matérialisation Mesures relatives à la station et aux arbres	7 j * 2 techniciens
Saisie des données	1 j * 1 technicien
Total année d'installation	25 j
Cheminement + évaluation des états sanitaires Rematérialisation	3 j * 2 techniciens
Saisie des données	½ j * 1 technicien
Total visite annuelle	8,5 j
Cheminement + mesures (état sanitaire + dendrométrie) Rematérialisation	6 j * 2 techniciens
Saisie des données	½ j * 1 technicien
Total visite aux 5 ans	14,5 j
Rassemblement de toutes les données et traitement	4 j * 1 ingénieur / responsable placettes
Communication sur les résultats (tous les 5 ans)	4 j * 1 ingénieur / responsable placettes
Total animation aux 5 ans	8 j * 1 ingénieur / responsable placettes

Annexe 14 : Comment importer des points dans iPhiGéNie depuis QGIS ?

1. Convertir les coordonnées des points en WGS84, degrés décimaux, méridien de Greenwich (à l'aide du logiciel Convers3).

2. Avec Excel, créer un tableau avec les noms des points et leurs coordonnées en WGS84. Enregistrer ce document sous format .CSV.

3. Importer le fichier .CSV sous QGIS.

4. faire un clic droit sur le nom de la couche importée dans le catalogue QGIS. Cliquer sur « enregistrer sous » et choisir le format GPX.

5. Envoyer le fichier GPX sur une boite mail accessible depuis la tablette.

6. Ouvrir le mail sur la tablette, télécharger la pièce jointe.

7. En cliquant sur la pièce jointe téléchargée, la tablette propose de l'ouvrir avec iPhiGéNie : sélectionner cette option.

8. Dans iPhiGéNie, les points apparaissent sur la carte. Il est possible de voir les détails dans les repères (symbolisés par des épingles dans le menu de l'application).