

Comportement de différentes provenances de chêne pubescent dans des contextes climatiques contrastés.

Comparaison avec le chêne sessile.



Mars 2021

Auteur : **Sabine GIRARD** (CNPFF-IDF)

Ont participé à ce travail :

Patrice Brahic, Jérôme Reilhan et Bastian Chareillat (PNRGF, Cadarache, ONF),

Sébastien Guérinet, Clément Morlon et Nadine Vergne (PNRGF, Peyrat le Château, ONF),

Olivier Forestier, Jean Pierre Huvelin, Michel Rondouin et Annabelle Gouche (PNRGF, Guémené-Penfao, ONF),

Bénédicte Le Guerroué et Brigitte Musch (CGAF/BIOFORA, ONF)

Christophe Vidal et Hedi Kebli (CNPFF-IDF)



Financier :



Table des matières

Résumé.....	4
I. Introduction.....	6
II. Contexte	7
II.1 Le marché des plants de chêne pubescent	7
II.2 Six régions de provenance.....	7
II.3 Les types de plants disponibles	8
III. Matériels et méthodes	10
III.1 Les provenances testées	10
III.2 Les 3 sites	18
III.3 Mesures et observations réalisées.....	29
IV. Résultats.....	31
IV.1 Mortalité après plantation	31
IV.2 Croissance en hauteur.....	35
IV.3 Apport des marqueurs génétiques.....	38
V. Synthèse	44
VI. En conclusion.....	47
Bibliographie	48

Résumé

Grâce aux récoltes effectuées en 2014 et 2015 dans des peuplements de chêne pubescent de différentes régions de provenance, **trois tests de provenances** identiques ont été installés sur un gradient climatique de pluviométrie et de température (Peyrat le Château en Haute Vienne, Saffré en Loire Atlantique et St Paul lès Durance dans les Bouches du Rhône). Ils comparent le comportement et la croissance de **4 provenances de chêne pubescent** : 2 récoltées dans la moitié sud (QPU751-Pignans dans le Var et QPU360-Martel dans le Lot), 2 autres, plus septentrionales, récoltées dans la Vienne (QPU101-Ternay) et dans l'Eure (QPU101-Pacy) et **2 provenances de chêne sessile** : QPE105-Dourdan dans l'Essonne et QPE311-La Moulière dans la Vienne.

La recherche de **marqueurs génétiques** de types microsatellites sur une partie des descendants de ces peuplements a permis d'établir que 97 % des plants de QPU101-Pacy appartenaient à l'espèce *Q. pubescens* et 93 % dans le cas de QPU101-Ternay. Concernant les peuplements sélectionnés de sessile, la proportion de plants attribués à l'espèce *Q. petraea* était de 93 % pour QPE311-La Moulière et de 80 % pour QPE105-Dourdan.

Trois ans après plantation, la **survie** des plants n'est que de 47 % sur le site le plus chaud à St Paul lès Durance, de 82 % en Loire Atlantique et de 100 % à Peyrat le Château, le plus frais. Quel que soit le site considéré, la mortalité a concerné toutes les provenances dans les mêmes proportions.

Concernant la **croissance**, les plants des dispositifs de Saffré et Peyrat atteignent des hauteurs moyennes de 70 cm, trois ans après plantation. En revanche, ceux installés à St Paul lès Durance sont en moyenne 30 cm plus petits. Quel que soit le site considéré, les plants des provenances QPU101-Pacy et QPU101-Ternay sont toujours les plus grands, et ceux de QPU751-Pignans, toujours les plus petits. Les écarts observés peuvent être liés à des différences de hauteurs initiales (de 26 à 40 cm en moyenne selon les provenances) mais également à la qualité génétique du matériel. Rappelons que les provenances QPU101-Pacy et QPU101-Ternay sont issues de peuplements répondant à un cahier des charges prenant en compte la qualité phénotypique des arbres, ce qui n'est pas le cas des autres provenances de chêne pubescent.

Dans tous les sites, les chênes pubescents QPU101-Pacy et QPU101-Ternay sont aussi grands (voire plus grands à Peyrat) que les chênes sessiles issus de peuplements sélectionnés récoltés dans la même zone géographique (QPE105-Dourdan et QPE311-La Mouillière).

I. Introduction

Pour répondre à l'évolution du climat, la plantation de chêne pubescent, espèce adaptée à des conditions plus chaudes et sèches que ne le sont le pédonculé et le sessile, pourrait se développer dans la moitié nord du pays.

Jusqu'à très récemment, les propriétaires et gestionnaires de ces régions qui étaient intéressés par cette espèce, ne trouvaient en pépinière que des plants issus de glands récoltés en Provence, Languedoc ou dans le sud-ouest du pays. Or, les références sur le comportement de ce matériel dans les conditions plus fraîches de la moitié nord du pays manquaient.

Par ailleurs, les prospections engagées à partir de 2013 en Poitou Charente et Normandie avaient permis d'identifier des peuplements d'une certaine qualité, susceptibles d'être des sources de graines pour la région de provenance « QPU Nord-Ouest ». Deux peuplements, l'un situé à Pacy sur Eure dans l'Eure et à Ternay dans la Vienne, ont été récoltés pour la première fois en 2014 et sont devenus les premières sources de graines de la région de provenance « QPU101 Nord-Ouest ».

Mais de tels peuplements, à proximité desquels voire à l'intérieur desquels des chênes pédonculés et sessiles étaient présents, pouvaient-ils être considérés comme des sources de graines valables ? Les descendants présentaient-ils les caractéristiques morphologiques de l'espèce *Quercus pubescens* ou bien des formes intermédiaires ? Par ailleurs, quelles étaient leurs performances comparativement à celles des provenances de la moitié sud ? Quel différentiel de croissance existait-il avec les chênes sessiles de la même région ?

Pour conseiller les sylviculteurs quant au matériel végétal le mieux adapté pour des plantations dans la moitié nord du pays, il était donc indispensable d'installer rapidement des plantations comparatives. Ainsi, trois dispositifs expérimentaux ont été mis en place en 2017 dans 3 régions différentes. Ils comparent le comportement et la croissance de 4 provenances de chêne pubescent : (2 situés dans la moitié sud et 2 autres, plus septentrionales) et 2 provenances de chêne sessile issues des peuplements sélectionnés situés à proximité des peuplements de chêne pubescent récoltés.

Dans le cadre du programme CONQueTh, nous avons analysé les résultats de ces dispositifs 3 ans après leur plantation et avons réalisé des analyses génétiques sur une partie des plants des différentes provenances étudiées.

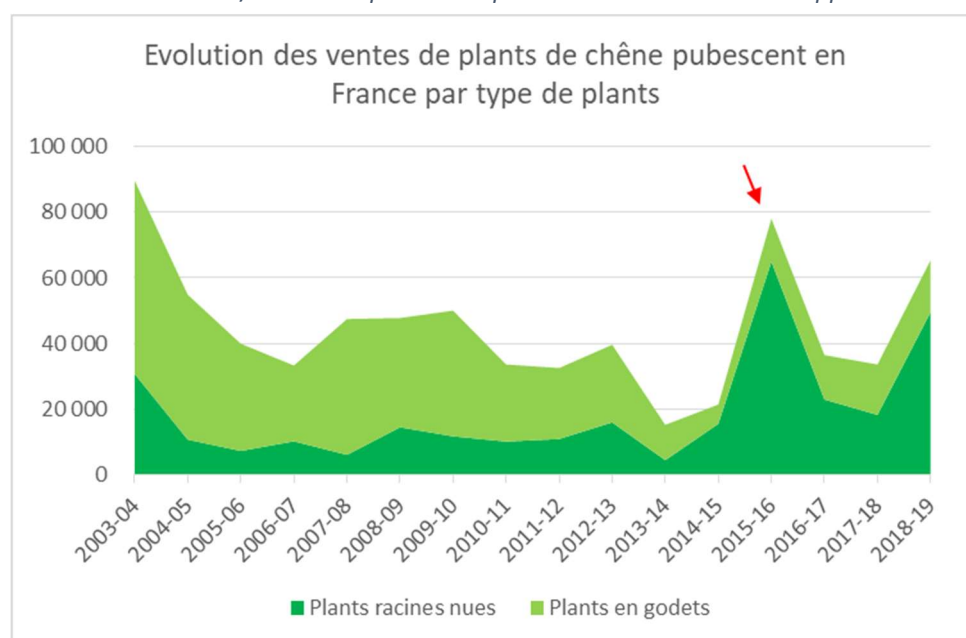
II. Contexte

II.1 Le marché des plants de chêne pubescent

L'enquête annuelle des ventes de plants intègre le chêne pubescent depuis seulement 2003 lorsque l'espèce a été réglementée. Le volume de plants vendus annuellement en France s'établissait jusqu'à présent entre 30 à 40 000 plants, à l'exception toutefois de l'année 2015/16 où 77 000 plants ont été vendus en lien avec la réalisation des boisements compensateurs effectués dans le cadre de la création de la ligne de chemin de fer à grande vitesse Bordeaux Paris (flèche rouge sur le graphe 1).

Fig.1 : Vente de plants de chênes pubescents en France, de 2003 à 2019.

Source : Enquêtes annuelles du MAAF sur les ventes de plants forestiers. Les résultats de la campagne 2019/20 ne sont pas encore parus à l'achèvement de ce rapport.



Jusqu'aux années 2013/14, le mode de production des plants de chêne pubescent était dominé par l'élevage hors sol. Ensuite, les ventes de plants racines nues ont très significativement augmenté. Ces évolutions pourraient traduire un changement de régions utilisatrices de plants. En effet, jusqu'à très récemment, les plants de chêne pubescent étaient très majoritairement installés en zone méditerranéenne où, compte tenu des contraintes climatiques, l'utilisation de plants en godets est privilégiée. Depuis quelques années, on observe des plantations de chênes pubescents hors zone méditerranéenne là où les forestiers utilisent traditionnellement des chênes sessile et/ ou pédonculés racines nues.

II.2 Six régions de provenance

En France, jusqu'à présent, seule la catégorie identifiée (étiquette jaune) est disponible.

Six régions de provenances ont été définies :

-dans le tiers sud de la France, des études génétiques menées sur l'ADN chloroplastique ont permis de distinguer quatre populations différentes, séparées en quatre régions de provenance : le Sud-Ouest (QPU 360), le Languedoc (QPU 741), la Provence (QPU 751) et la Corse (QPU 800).

-au Nord, deux grands ensembles ont été distingués : le premier sous influence atlantique (provenance QPU 101- Nord-Ouest), le second sous influence plus continentale (provenance QPU 901- Est et Massif Central nord). La limite nord-sud entre ces deux provenances suit le même tracé que celui séparant les provenances atlantiques et continentales du chêne sessile.

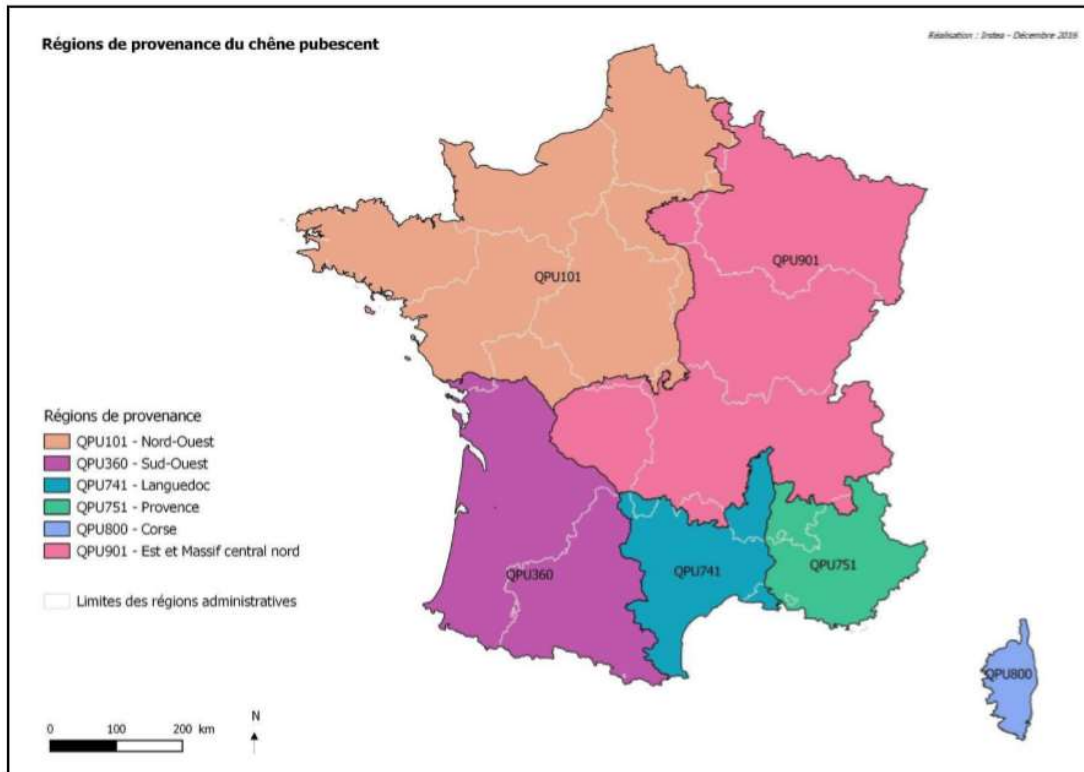


Fig.2 : Carte des régions de provenance de chêne pubescent.

Source : Fiche de conseils d'utilisation d'IRSTEA pour le Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, octobre 2018.

II.3 Les types de plants disponibles

Les exigences minimales relatives à la qualité extérieure des plants commercialisés sont fixées nationalement par l'arrêté du 29 novembre 2003 modifié. Afin que les plantations bénéficiant d'aides de l'Etat soient réalisées avec des taux de réussite élevés, des exigences supplémentaires peuvent être requises en matière de dimensions des plants et d'équilibre hauteur-diamètre. Ces exigences sont mentionnées dans les arrêtés régionaux fixant la liste des « Matériels Forestiers de Reproductions » éligibles aux aides de l'Etat pour les boisements et reboisements, dits arrêtés « MFR ».

En octobre 2020, les normes dimensionnelles concernant les chênes pubescents ont été modifiées (Instruction technique DGPE/SDFCB/2020-656 du 27/10/2020) et diffèrent désormais de celles du chêne sessile et du chêne pédonculé. Elles intègrent le fait qu'au même âge, les plants de chêne pubescent sont généralement un peu plus petits que ceux du sessile et du pédonculé. Ainsi, pour être commercialisés, les plants de chêne pubescent vendus racines nues doivent avoir au moins 25 cm de hauteur pour un diamètre minimum de 4 mm, ceux élevés hors sol doivent atteindre au moins 15 cm de hauteur (Fig. 3)

ESSENCES		HAUTEUR en cm	DIAMETRE minimum au collet en mm	Âge maximum des plants		Volume minimum du godet ou mottes et remarques
Nom commun	Nom latin			Racines nues	godets ou mottes	
Chêne pubescent	<i>Quercus pubescens</i>	25 - 40	4	2		
		30 - 50	5	3		
		50 - 80	7	4		
		15 - 30	4		1	200 cc
		20 - 60	5		1	350 cc

Fig.3 : Dimensions des plants de chêne pubescent éligibles aux aides de l'Etat.

Source : Instruction technique DGPE/SDFCB/2020-656 du 27/10/2020.

Jusqu'à présent, l'utilisation de plants racines nues était déconseillée en région PACA où seuls les plants élevés dans des godets de 400 cc étaient préconisés. Ailleurs, la plantation des deux types de plants était possible. A noter néanmoins que ces éléments sont susceptibles d'évoluer dans la mesure où de nouveaux arrêtés régionaux sont en préparation au moment de la rédaction de ce rapport.

III. Matériels et méthodes

III.1 Les provenances testées

a. Choix des provenances

Rappelons au préalable que, jusqu'à présent, les plantations de chênes pubescents sont rares en France, qu'elles se situent essentiellement dans le sud de la France et qu'elles sont issues essentiellement de glands récoltés dans l'une des 3 régions de provenance méridionales à savoir QPU 751-Provence, QPU 741-Languedoc et QPU 360-Sud-Ouest sur des peuplements n'ayant pas fait l'objet de sélection phénotypique. Aucune récolte de graines originaires de la moitié nord du pays n'avait été faite jusqu'à très récemment.

En 2014, grâce aux actions menées en Poitou Charentes¹ et en Normandie², des récoltes de glands avaient pu être organisées dans deux peuplements de chêne pubescent localisés dans la région de provenance QPU101 Nord-Ouest, à Ternay dans la Vienne et à Pacy sur Eure dans l'Eure. Cette même année, dans le sud du pays, 2 peuplements de chênes pubescents avaient également été récoltés pour un usage forestier (Martel dans le Lot et Pignans dans le Var).

Au printemps 2015, pour la première fois, il a donc été possible de lancer la production de plants de 4 provenances différentes de chênes pubescents au PNRGF de Guémené-Penfao.

Afin de comparer le comportement des différentes provenances de chêne pubescent à celui du chêne sessile « local », des plants issus de deux peuplements de chêne sessile ont également été produits : QPE105-004 (peuplement sélectionné situé en forêt domaniale de Dourdan dans l'Essonne) et QPE311-003 (peuplement sélectionné situé en forêt domaniale de La Moulière dans la Vienne). Ils correspondent aux peuplements sélectionnés les plus proches géographiquement des peuplements de pubescent récoltés : 62 km à vol d'oiseau séparent ceux de La Moulière et Ternay et 68 km ceux de Pacy /Eure et Dourdan et qui ont fait l'objet d'une récolte de glands en 2014.

¹ « Etude pour le maintien de la biodiversité des écosystèmes à base de chêne dans le contexte du réchauffement climatique », programme financé par la fondation LISEA Biodiversité de 2014 à 2015.

² Travail mené par le CRPF Normandie depuis 2013, notamment dans le cadre du Plan Climat- Energie du Conseil Général de L'Eure.

Fig.4 : Liste des provenances testées, toutes récoltées l'automne 2014.

Espèce	Région de provenance	Peuplement	N° de certificat maitre
Chêne pubescent	QPU 101 Nord Ouest	Pacy /Eure (27)	FR23-14R007
Chêne pubescent	QPU 101 Nord Ouest	Ternay (86)	FR54-14R006
Chêne pubescent	QPU 360 Sud Ouest	Martel (46)	FR73-14R017
Chêne pubescent	QPU 751 Provence	Pignans (83)	FR93-14R023
Chêne sessile	QPE 105 Sud Bassin Parisien	F.D. de Dourdan (91)	FR11-14R005
Chêne sessile	QPE 311 Charentes-Poitou	F.D. de Moulière (86)	FR54-14R004
Chêne pédonculé	QRO 203 Vallée de la Saône	F.C de Gy (70)	FR43-14R022

Fig.5 : Localisation des peuplements source de graines évalués (fond jaune : chêne sessile, fond vert pubescent) et des 3 plantations comparatives (fond rouge).



b. Caractéristiques des lots de graines

Les glands des différentes provenances ont été fournis à la pépinière du PNRGF de Guéméné-Penfao au printemps 2015 par 3 fournisseurs et ont fait l'objet d'une évaluation de leur qualité à réception (cf. tableau ci-dessous).

Fig.6 : Caractéristiques des lots de graines reçus.

Provenance	Fournisseur	V ³ livré (l)	Poids de 100 graines	Nombre de graines livrées	% de graines viables	Estimation du nombre de graines viables
QPU 101 Pacy	Lemonnier	10	240	2492	20%	498
QPU 101 Ternay	Vilmorin	15	325	3000	70%	2100
QPU 360 Martel	Vilmorin	13	311	2588	80%	2071
QPU 751 Pignans	ONF	13	386	2023	60%	1214
QPE 105 Dourdan	ONF	13	418	1758	80%	1407
QPE 311 Moulière	ONF	13	467	1664	80%	1331

En grisé : valeurs calculées après comptage et observations d'un échantillon de graines prélevé juste après la livraison à la pépinière

Il est intéressant de noter l'écart important du poids de 100 graines entre les provenances étudiées. Les glands de chêne sessile sont habituellement plus gros que ceux du pubescent ce qui explique le poids plus important mesuré ici. Concernant le pubescent, la provenance QPU101Pacy présente les glands les plus légers et QPU751 les plus lourds.

Après vérification du volume reçu, les lots ont été pesés puis échantillonnés de façon à pouvoir calculer le poids de 100 glands. Dix de ces glands ont ensuite été ouverts et observés pour déterminer la proportion de glands sains (Fig. 5). Cette valeur a permis de calculer le nombre de graines à semer pour produire 75 plants/m² sur la planche de pépinière. L'objectif initial était la production de 1 200 plants de 2 ans de chaque provenance.



Fig. 7 : Détermination du nombre de glands viables après réception en pépinière. A gauche, glands sains et viables ; à droite, glands parasités, attaqués par des champignons, non viables. (Photo : JP Huvelin, PNRGF-ONF).

c. Itinéraire d'élevage des plants en pépinière

Les glands ont été semés en pleine terre le 21 avril 2015, à l'exception des provenances QPU101Ternay et QPU360 Sud-Ouest qui l'ont été un mois plus tard, le 24 mai. L'ensemble des semis a donc été réalisé très tardivement comparativement à la pratique courante.

Fig.8 : Photos de semis de 1 an des 4 provenances de chêne pubescent en mai 2016.
(Photos : E. Collin, IRSTEA).

QPU 751



QPU 360



QPU101 Ternay



QPU101 Pacy



L'élevage s'est déroulé sur 2 saisons sans soulèvement racinaire. Les plants ont été arrachés début janvier 2017, triés et inventoriés par classe de hauteur. Il s'agissait de plants de type 2-0.

d. Caractérisation morphologique des plants en pépinière

Afin d'avoir rapidement des éléments d'information sur la descendance des peuplements récoltés dans le nord de l'aire de répartition du chêne pubescent, les rameaux et les feuilles de plants ont été observés en août 2016. Un rameau latéral a été prélevé sur 10 plants différents de chaque provenance pris au hasard en planche de pépinière et a fait l'objet d'une description (soit 60 rameaux au total qui portaient chacun 4 à 5 feuilles) pour déterminer à quelle espèce le plant en question appartenait. La longueur du pétiole des feuilles a été mesurée. La pubescence du rameau de l'année et de la face inférieure des feuilles, la présence de lobes acuminés et d'oreillettes à la base du limbe ont également été observés.

Fig.9 : Caractérisation morphologique d'un échantillon de plants de 2 ans en planche de pépinière. .

	Longueur du pétiole (mm)		% de plants ayant ...			
	moy	ecart type	le rameau de l'année pubescent	la face inférieure des feuilles pubescente	des lobes acuminés	des oreillettes à la base du limbe
QPE105	6.8	2.8	0%	10%	10%	0%
QPE311	4.7	1.5	0%	20%	20%	0%
QPU101P	2.6	0.7	100%	100%	100%	0%
QPU101T	1.8	0.4	100%	100%	100%	0%
QPU360	1.7	0.4	90%	90%	90%	0%
QPU751	1.4	0.2	100%	100%	100%	0%

Tous les plants observés des provenances QPU 101 présentait les caractères distinctifs du chêne pubescent à savoir une pubescence sur le rameau de l'année et sur la face inférieure des feuilles ainsi que des lobes terminés en pointe (acuminés).

e. Qualité des plants en sortie de pépinière

La tardiveté du semis ainsi que la sécheresse estivale de 2015 expliquent probablement le faible nombre de plants obtenus *in fine* et leur petite taille. Le rendement en plants de + 20 cm c'est-à-dire le nombre de plants ayant atteint cette hauteur relativement au nombre de glands semés, varie de 3 à 38 %.

Distribution des classes de hauteur

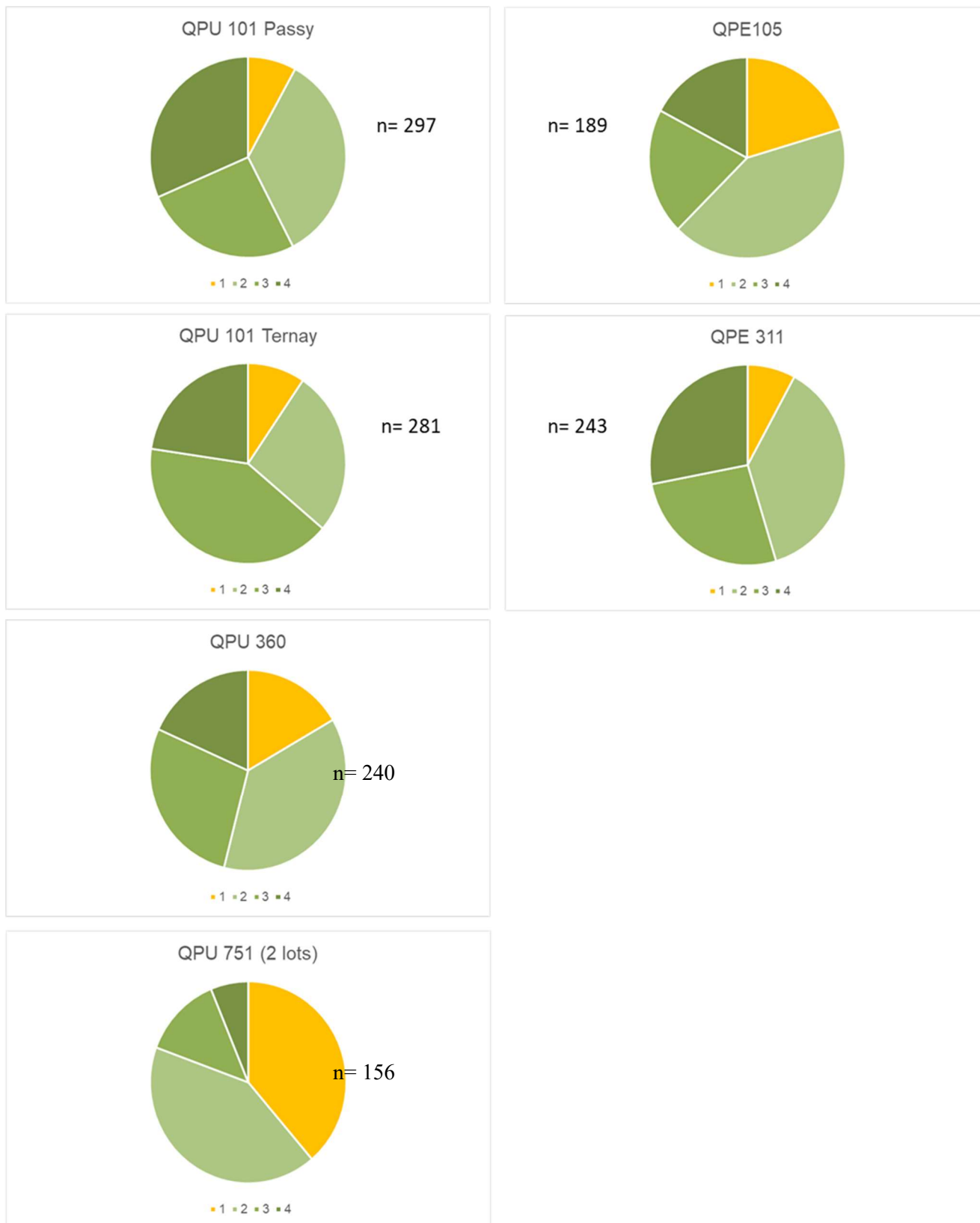
Concernant la caractérisation morphologique des lots de plants, les graphes de la figure 10 rendent compte de la distribution des classes de hauteur.

La provenance QPU 751 est celle qui présentait la plus forte proportion de plants de petite taille c'est-à-dire inférieurs à 20 cm (40 % contre 17 % pour QPU 360 et 7% pour les QPU 101).

Un quart des plants de la provenance QPU 101 Pacy dépassaient 40 cm de hauteur, la proportion était d'environ 20 % pour les autres provenances de pubescent à l'exception toutefois de QPU 751 avec 6 % seulement de « grands » plants.

Fig.10 : Répartition des plants par classes de hauteur pour chaque provenance (n correspond à l'effectif total des plants vivants après 2 saisons d'élevage).

■ Moins de 20 cm ■ 20/30 cm ■ 30/40 cm ■ Plus de 40 cm



Les peuplements de Moulière (QPE311) et Ternay (QPU101), situés dans la même région, présentent des distributions très proches. En revanche, les différences sont plus importantes entre QPU101 Pacy et QPE105 (Dourdan), la provenance de chêne sessile présentant des plants globalement plus petits.

Constitution de lots homogènes

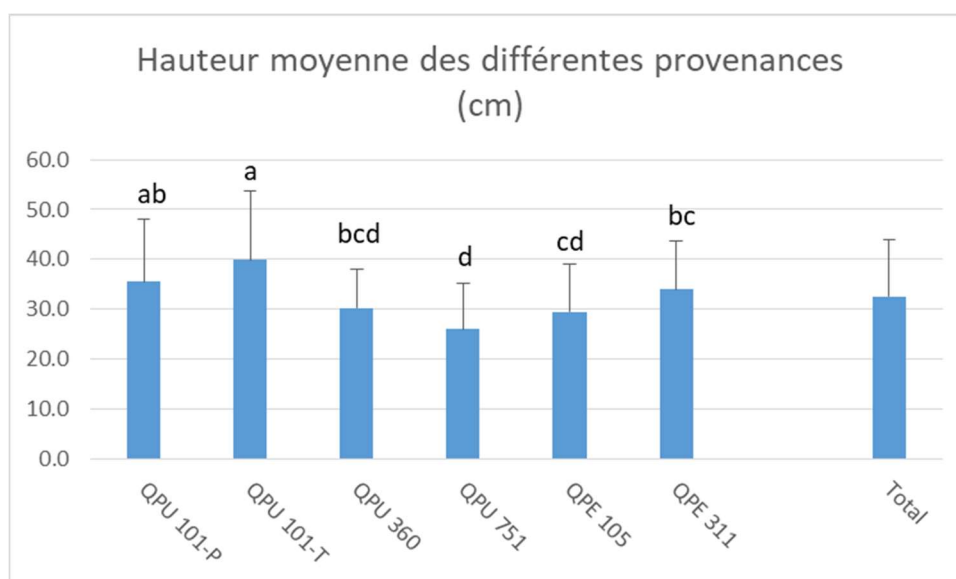
Afin de constituer des lots de plants équivalents en termes de hauteur, les différentes classes de hauteur de chaque provenance ont été réparties dans les mêmes proportions pour chaque site et chaque bloc. Ce point a par ailleurs été vérifié *a posteriori* en réalisant une analyse de variance à 2 facteurs (Provenance et Bloc) sur les hauteurs initiales mesurées sur le site de St Paul lès Durance : l'analyse met en évidence des différences entre provenances mais aucune entre blocs et aucune interaction Bloc x Provenance.

Compte tenu des précautions prises pour constituer les lots de plants, nous considérons que les valeurs moyennes mesurées à St Paul lès Durance sont identiques à celles des deux autres sites.

Hauteurs moyennes des différentes provenances

A la suite de cette répartition, les plants les plus petits étaient ceux de la provenance QPU751 (26 cm en moyenne, Fig.11), les plus grands ceux de la provenance QPU101T (40 cm en moyenne). La moyenne générale se situait autour de 32 cm.

Fig.11 : Hauteur initiales (HO et écart type) des plants du dispositif de St Paul lès Durance



f. Conservation et transport des plants avant plantation

Après constitution des lots et avant transfert vers les 3 sites de plantation, les plants ont été conservés dans la chambre froide de la pépinière de Guéméné Penfao, en sacs plastiques fermés à une température proche de 0°C.

Les plants n'ayant pas atteint 20 cm de hauteur au moment de l'arrachage ont été repiqués dans des godets de 1.4 litres et ont été utilisés, l'année suivante, pour remplacer les plants disparus dans le dispositif de St Paul lès Durance.

g. Observation de la pubescence sur les rameaux de l'année

Le 6 juillet 2020, sur le site de Peyrat, les jeunes rameaux de 30 plants de chaque provenance ont été observés à la loupe. La pubescence des rameaux de l'année semble en effet le critère morphologique le plus simple et pertinent pour discriminer le chêne pubescent des sessile et pédonculé, surtout lorsque l'observation est faite tôt en saison. Pour rendre compte de l'intensité de la pubescence, nous avons utilisé une échelle de 0 à 5 et les illustrations de Kissling (1980) (cf. ci-dessous).

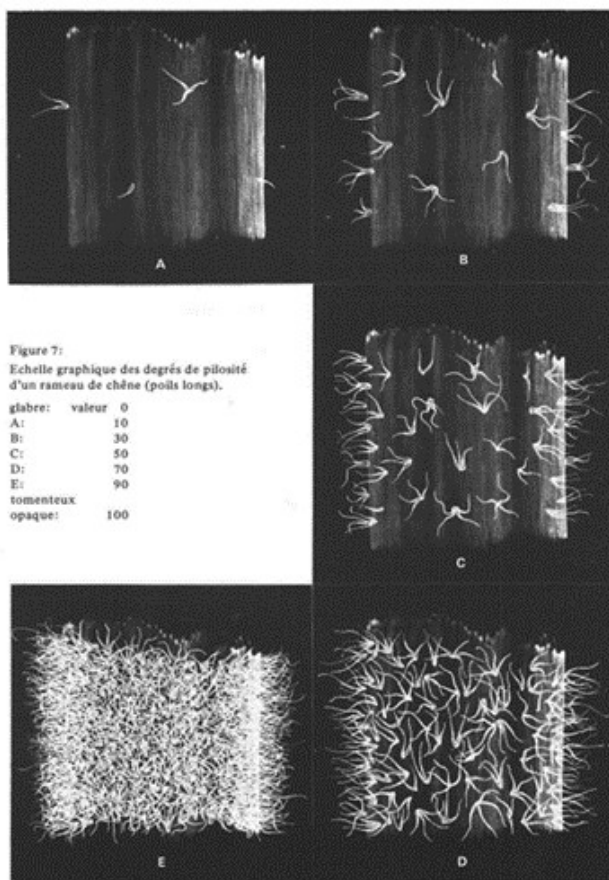
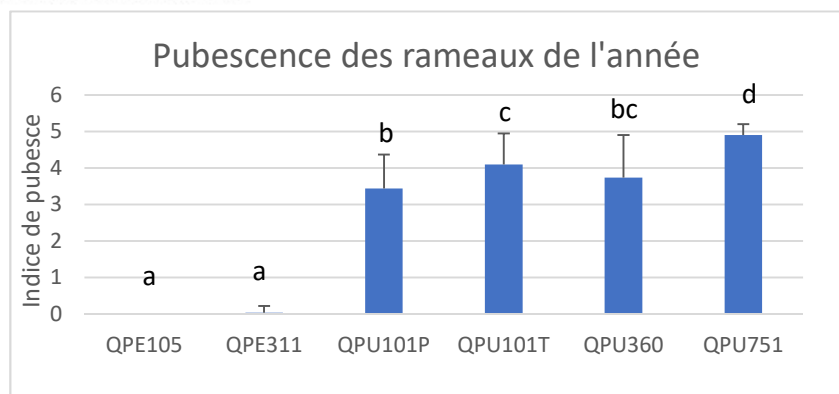


Fig.12 : Echelle utilisée pour caractériser l'intensité de la pubescence des rameaux de l'année. (Source : Kissling, 1980)

La pubescence est très présente chez toutes les provenances QPU. Elle est particulièrement dense chez QPU751, un peu moins chez les autres provenances. Elle est absente sur les rameaux des deux provenances de sessile (1 plant/:60 avec la note 1).

Fig.13 : Moyenne des indices de pubescence des rameaux de l'année



III.2 Les 3 sites

Compte tenu du peu de plants produits, le nombre et la taille des dispositifs expérimentaux initialement prévus ont été très fortement réduits. Afin de valoriser au mieux les plants produits, nous avons privilégié l'installation selon un gradient climatique dans des sites où le suivi serait aisé. Pour ces raisons, les dispositifs expérimentaux ont été installés à proximité des 3 sites du PNRGF :

à **Peyrat le Château** en Haute Vienne sur les terrains de la pépinière,

à **Saffré** en Loire Atlantique sur un terrain communal situé à 30 km de la pépinière de Guémené Penfao,

à **St Paul Les Durance** à moins de 1 km du site de Cadarache.

Les 3 dispositifs ont tous été plantés en mars 2017 selon un schéma identique à savoir : **3 blocs x 6 provenances x 20 plants soit 360 plants mesurés.**

a. Peyrat Le Château

Altitude : 575 m

Antécédent cultural : culture de sarrasin

Préparation du terrain avant la plantation : labour puis rotovator

Plantation le 3 mars 2017.

Ecartement 2.5 x 2.5 m (1 600 plants /ha).

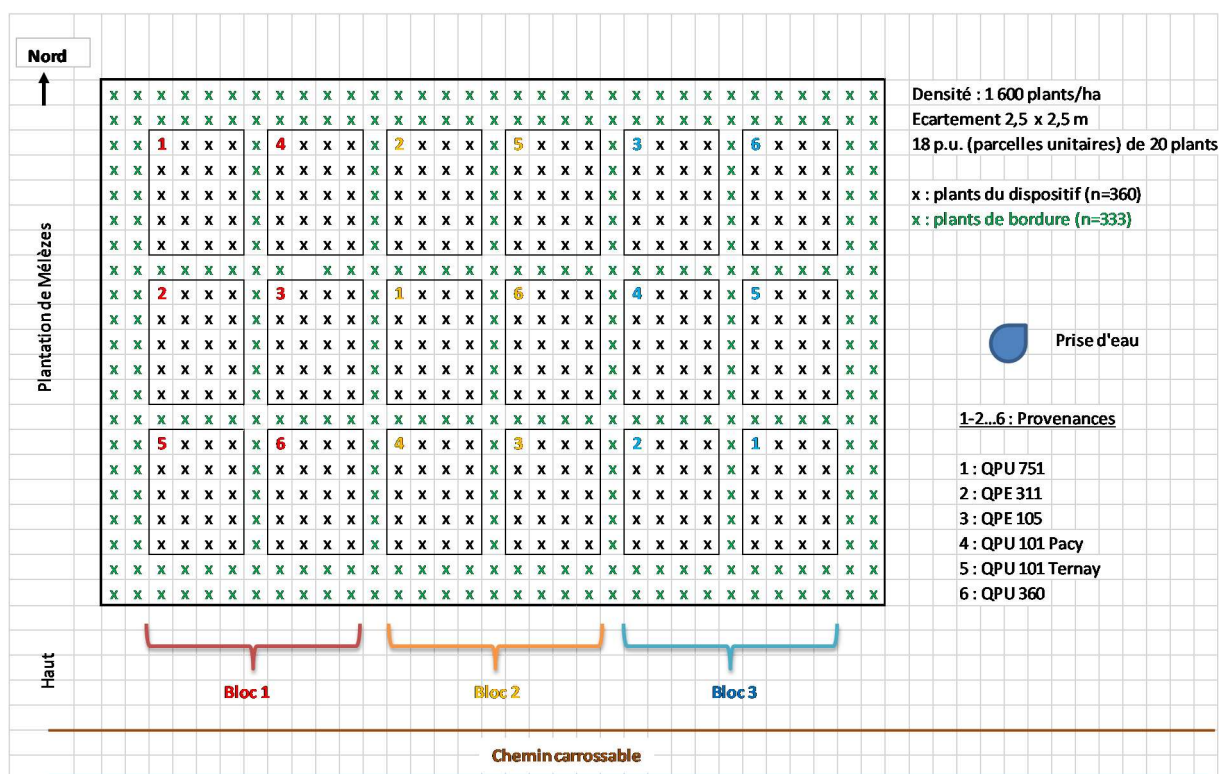


Fig.14 : Etat de la parcelle de Peyrat le Château en février 2017 avant plantation et après piquetage (Photo C. Morlon, PNRGF-ONF)

Les plants qui bordent le dispositif sont des chênes pédonculés (QRO203) produits par la pépinière de Guémené, dont une partie est également suivie.

Une protection individuelle contre le lièvre (50 cm de hauteur, 25 cm de diamètre, maille de 10 mm) maintenue par 2 bambous a été mise en place autour de tous les plants du dispositif (à l'exception des plants de bordure) en décembre 2017.

Fig.15 : Plan du dispositif de Peyrat Le Château (Haute Vienne).



Arrosages : les 19 avril 2017 (1 heure), 27 & 28 avril 2017 (1h30 au total), 12 & 15 juin 2017(1h30 au total) et 28 août 2017 (2 h).

La quantité d'eau reçue par le dispositif a été calculée en intégrant un débit de 40 m³/heure. Les arrosages sont indiqués par les flèches rouges sur le graphe page 17.

Entretiens ultérieurs :

2017 : Girobroyage (novembre).

2018 : Girobroyage (mai) puis passage de rotofil au pied des plants (juin) suivi d'un désherbage manuel dans les protections en juillet.

2019 : Girobroyage puis passage de rotofil au pied des plants (août).

Caractéristiques climatiques :

Le modèle climatique NORCLIS intégré dans l'application BioClimSol[®] donne les valeurs suivantes sur la période 1981-2010 :

Température annuelle moyenne : 10.7°C

Moyenne des températures maximales de juin à août : 23.7°C

Moyenne des températures minimales de janvier : 0.1°C

Précipitations annuelles : 1 260 mm

Précipitations d'avril à octobre : 716 mm

Déficit hydrique climatique de mars à octobre : 70 mm

Déficit hydrique climatique de juin à août : -95 mm

Actuellement, sur ce site, les indices de vigilance climatique BioClimSol® (Fig.14) indiquent des conditions très favorables aux chênes pédonculé, sessile et pubescent (tous sont verts). Avec une augmentation de 1°C, le chêne pédonculé pourrait être en difficulté (indice 4). Quoiqu'il en soit, les conditions climatiques de ce site sont très favorables à la croissance des deux espèces testées : le sessile présentant a priori un léger avantage sur le pubescent.

Fig.16 : Indices de vigilance BioClimSol® calculés uniquement sur les variables climatiques pour le site de Peyrat le Château (87).

BIOCLIMSOL  **INDICE de VIGILANCE BIOCLIMSOL** pour des essences ayant fait l'objet d'études BIOCLIMSOL en France

ID POINT	NOM POINT	Essence	VIGILANCE ACTUELLE	VIGILANCE +1°C	VIGILANCE +2°C
39	QPUQPE Peyrat	Chêne pédonculé	2	4	7
39	QPUQPE Peyrat	Chêne pubescent	1	2	2
39	QPUQPE Peyrat	Chêne sessile	0	1	1
39	QPUQPE Peyrat	Chêne vert	10	10	5

<https://www.foretpriveefrancaise.com/n/bioclimsol/n:558>
Contact assist-bioclimsol@cnpf.fr

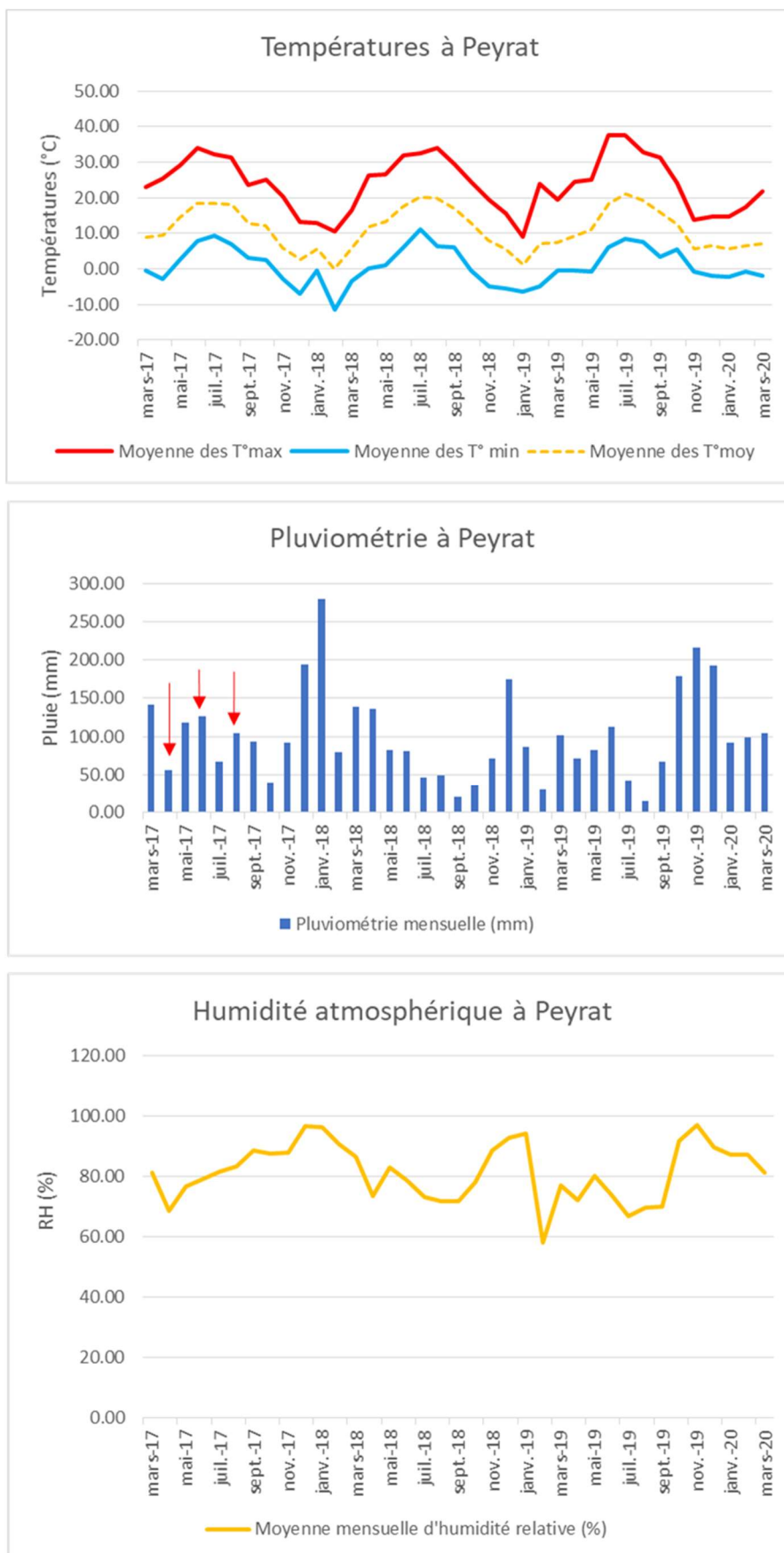
VERSION R 2020 1 24/06/20

Par ailleurs, comme la pépinière de Peyrat dispose d'une station météorologique enregistrant les données locales (T° min, max de l'air, Humidité relative, Rayonnement photosynthétiquement actif), nous avons donc pu accéder aux conditions climatiques réelles que les plants ont connues durant leurs 3 premières années et cela à partir du jour de leur plantation (graphes ci-après).

Ainsi, la température annuelle moyenne des années 2017, 2018 et 2019 a été de 12.95°C soit plus de 2°C supérieure à la moyenne trentenaire (1980-2010). Avec des températures estivales beaucoup plus chaudes (moyennes de températures maximales des mois de juin à août à 29°C) en particulier en 2019. Durant ces mêmes années, les précipitations annuelles se sont élevées à 1168 mm avec, d'avril à octobre des cumuls de 523 mm en moyenne (453 mm seulement en 2018).

L'énergie lumineuse active pour la photosynthèse a été de l'ordre de 290 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ en moyenne en 2018 et 2019 (minimum de 66, maximum de 563).

Fig.17 : Principales caractéristiques météorologiques du site de Peyrat pendant les 3 saisons de végétation qui ont suivies la plantation. (Source : station météorologique du site). Les flèches rouges représentent les arrosages qui ont été intégrés aux précipitations.



b. Safran

Altitude : 28 m

Antécédent culturel : ancienne prairie utilisée pour les fêtes de village, avec quelques arbres.

Préparation du terrain avant la plantation : Arrachage des arbres présents, décompactage sur 50 cm, labour un mois avant la plantation.

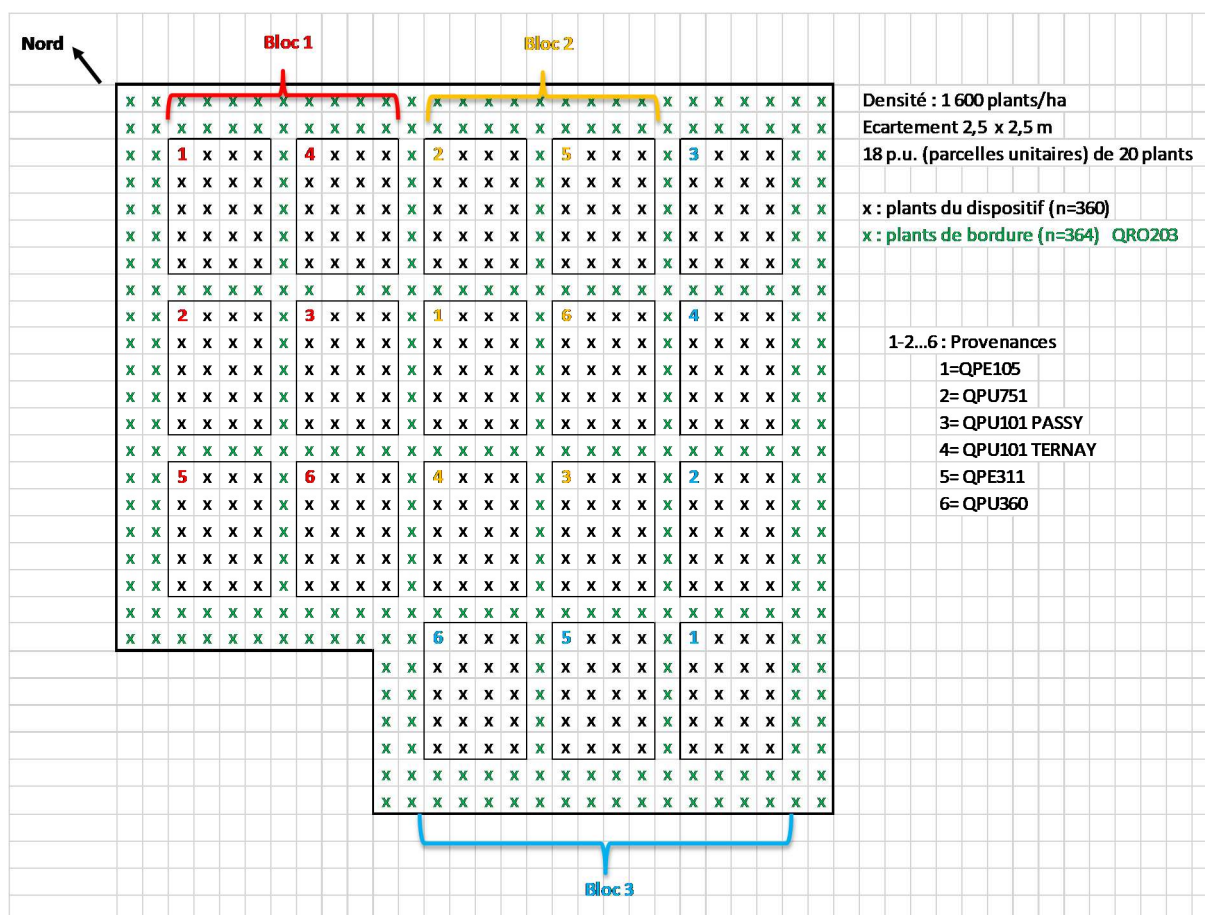
Plantation le 16 mars 2017 (1 journée à 3 personnes pour le dispositif, 6 h à 3 pour le bourrage et les bordures)

Ecartement 2.5 x 2.5 m (1 600 plants /ha)

Pas de protection individuelle des plants contre le gibier car la parcelle est clôturée. Un bambou de 1.20 m a été placé au pied des plants pour faciliter leur repérage.

Les plants qui bordent le dispositif sont des chênes pédonculés (QRO203) produits par la pépinière de Guémené, dont une partie est également suivie.

Fig.18 : Plan du dispositif de Safran



Entretiens ultérieurs : Aucun arrosage n'a été effectué sur ce site.

-juin 2017 : entretien manuel autour des plants

-juillet 2018 : passage du girobroyeur dans les 2 sens + coupe manuelle autour des plants.

-juillet 2019 : passage du girobroyeur dans les 2 sens.

Fig.19 : Etat de la parcelle de Saffré en Août 2017, (Photos S. Girard, IDF-CNPF)



Caractéristiques climatiques :

Le modèle climatique NORCLIS intégré dans l'application BioClimSol® donne les valeurs suivantes sur la période 1981-2010 :

Température annuelle moyenne : 12.1°C

Moyenne des températures maximales de juin à août : 24.7°C

Moyenne des températures minimales de janvier : 2.6°C

Précipitations annuelles : 746 mm

Précipitations d'avril à octobre : 426 mm

Déficit hydrique climatique de mars à octobre : -211 mm

Déficit hydrique climatique de juin à août : -224 mm

Actuellement, sur ce site, les indices de vigilance climatique BioClimSol© (Fig.18) indiquent des conditions favorables au chêne pubescent (indice 3) alors que le pédonculé apparaît comme très vulnérable. Avec une augmentation de 1°C, le chêne sessile sera en difficulté (indice 5). Quoiqu'il en soit, les conditions climatiques de ce site sont a priori plus favorables à la croissance du pubescent que du sessile.

Fig.20 : Indices de vigilance BioClimSol® calculés uniquement sur les variables climatiques pour le site de Saffré (44).

BIOCLIMSOL INDICE de VIGILANCE BIOCLIMSOL pour des essences ayant fait l'objet d'études BIOCLIMSOL en France

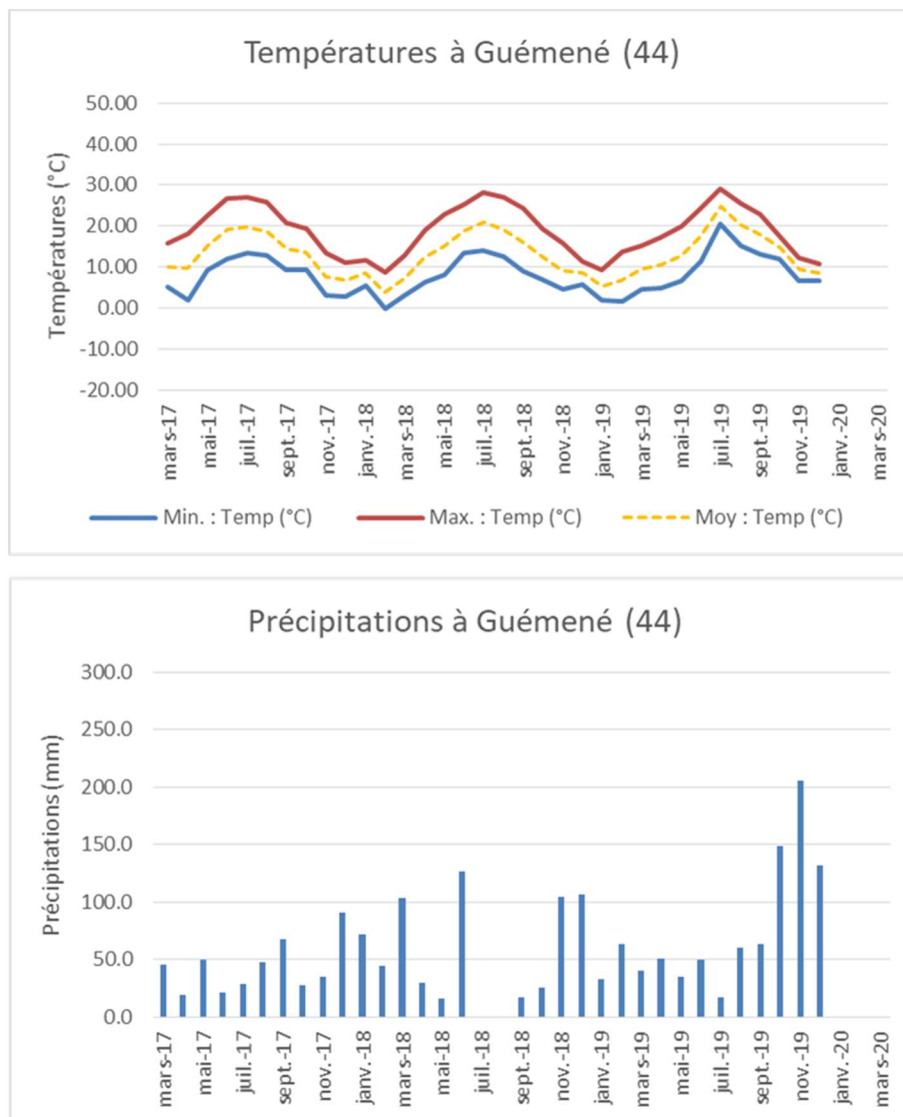
ID POINT	NOM POINT	Essence	VIGILANCE ACTUELLE	VIGILANCE +1°C	VIGILANCE +2°C
38	QPUQPE Saffré	Chêne pédonculé	9	10	10
38	QPUQPE Saffré	Chêne pubescent	3	4	7
38	QPUQPE Saffré	Chêne sessile	4	5	6
38	QPUQPE Saffré	Chêne vert	3	3	4

<https://www.foretpriveefrancaise.com/n/bioclimsol/n.558>
Contact assist-bioclimsol@cnpf.fr

VERSION R 2020_1 24/06/20

Le site de Saffré se trouve à 30 km au Sud Est de la pépinière de Guémené-Penfao dans un contexte climatique similaire. Nous avons de ce fait utilisé les données enregistrées sur le site de la pépinière pour caractériser les conditions météorologiques qu'ont réellement connus les plants pendant les 3 années qui ont suivi leur plantation (graphes ci-dessous).

Fig.21 : Principales caractéristiques météorologiques du site de Saffré pendant les 3 années qui ont suivies la plantation. (Source : station météorologique située à la pépinière de Guémené-Penfao).



La température annuelle moyenne des années 2017 et 2018 (il manque des données pour l'année 2019) a été de 12.4°C proche de la moyenne trentenaire (1980-2010). Les moyennes des températures maximales des mois de juin à août ont également été identiques aux normales avec 26.4°C sur les 3 années de croissance. Durant cette période, les précipitations annuelles ont été de 525 mm en 2017, 647 mm en 2018 et 898 mm en 2019, soit une moyenne de 690 mm légèrement inférieure aux normales. D'avril à octobre les cumuls de précipitations ont été de 262 en 2017, 215 mm en 2018 et 424 en 2019.

Le rayonnement photosynthétiquement actif n'est pas mesuré sur le site de Guémené.

c. St Paul lès Durance

Altitude : 283 m

Antécédent culturel : ancienne truffière à base de chênes pubescents

Préparation du terrain avant la plantation : Coupe des chênes pubescents. Passage de Chizel entre les lignes de souches.

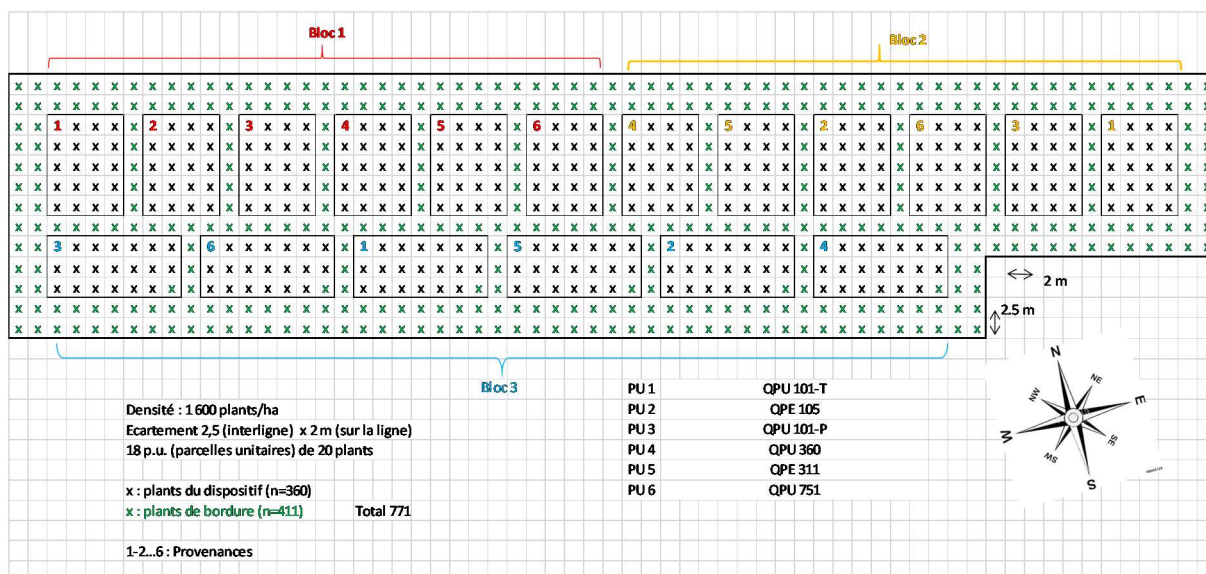
Plantation le 23 mars 2017

Ecartement 2.5 x 2 m sur la ligne (2 000 plants /ha)

Pas de protection individuelle des plants contre le gibier mais la parcelle est clôturée (clôture électrique). Un bambou de 0.60 m a été placé au pied des plants pour faciliter leur repérage.

Les bordures du dispositif de St Paul les Durance (n=698)- site inadapté au chêne pédonculé- ont été constituées de chêne sessile (154 plants de QPE 106 Secteur ligérien, 313 plants de QPE107 Berry Sologne et 231 plants de QPE 311 Charentes-Poitou) élevés à Guéméné-Penfao.

Fig.22 : Plan du dispositif de St Paul lès Durance



Entretiens ultérieurs :

- juin 2017 : entretien manuel autour des plants
- juillet 2018 : passage du girobroyeur dans les 2 sens + coupe manuelle autour des plants.
- juillet 2019 : passage du girobroyeur dans les 2 sens et arrosage (12 juillet).

Caractéristiques climatiques :

Le modèle climatique NORCLIS intégré dans l'application BioClimSol® donne les valeurs suivantes sur la période 1981-2010 :

Température annuelle moyenne : 13.1°C

Moyennes de températures maximales de juin à août : 30.5°C

Moyenne des températures minimales de janvier : -1.9°C

Précipitations annuelles : 620 mm

Précipitations d'avril à octobre : 381 mm

Déficit hydrique climatique de mars à octobre : -378 mm

Déficit hydrique climatique de juin à août : -321 mm

Actuellement, sur ce site, les indices de vigilance climatique BioClimSol® (Fig.21) indiquent des conditions climatiques très défavorables pour tous les chênes (indice 9&10) dès à présent. Il s'agit donc d'un site particulièrement contraignant pour les espèces testées.

Fig.23 : Indices de vigilance BioClimSol® calculés uniquement sur les variables climatiques pour le site de St Paul lès Durance (13).

BIOCLIMSOL INDICE de VIGILANCE BIOCLIMSOL pour des essences ayant fait l'objet d'études BIOCLIMSOL en France

ID POINT	NOM POINT	Essence	VIGILANCE ACTUELLE	VIGILANCE +1°C	VIGILANCE +2°C
40	QPUQPE Cadarache	Chêne pédonculé	10	10	10
40	QPUQPE Cadarache	Chêne pubescent	9	10	10
40	QPUQPE Cadarache	Chêne sessile	10	10	10
40	QPUQPE Cadarache	Chêne vert	8	8	9

<https://www.foretpriveefrancaise.com/n/bioclimsol/n:558>
Contact assist-bioclimsol@cnpf.fr

VERSION R 2020_1 24/06/20

Le dispositif expérimental est situé à moins d'un kilomètre à vol d'oiseau de la pépinière où se trouve une station météorologique enregistrant les données locales depuis le 1^{er} janvier 2018 (T° min, max de l'air, Humidité relative, Rayonnement photosynthétiquement actif). Nous avons ainsi pu accéder aux conditions climatiques réelles que les plants ont connues à partir de cette date (Fig. 23). Les données relatives à la première année de croissance n'étaient toutefois pas disponibles.

En 2018 et 2019, les valeurs des températures moyennes annuelles et des maximales de l'été ont été cohérentes avec les valeurs établies par modélisation sur la période 1980/2010 : 13.9 °C en 2018 et de 13.45°C en 2019 pour les moyennes annuelles, 30.5°C pour 2018 et 30.6 pour 2019 pour les températures maximales de juin à août.

Les précipitations annuelles ont été de 898 mm en 2018 et 810 mm en 2019, soit des valeurs supérieures aux normales. D'avril à octobre les cumuls de précipitations ont atteint 648 mm en 2018 et 480 en 2019 soit des valeurs supérieures aux moyennes trentenaires calculées par modélisation.

Le rayonnement photosynthétiquement actif a été de l'ordre de 370 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ en moyenne en 2018 et 2019 (minimum de 125, maximum de 707).

Fig.24 : Principales caractéristiques météorologiques du site de St Paul Lès Durance du 1^{er} janvier 2018 au 31 mars 2020.

(Source : station météorologique située à la pépinière)

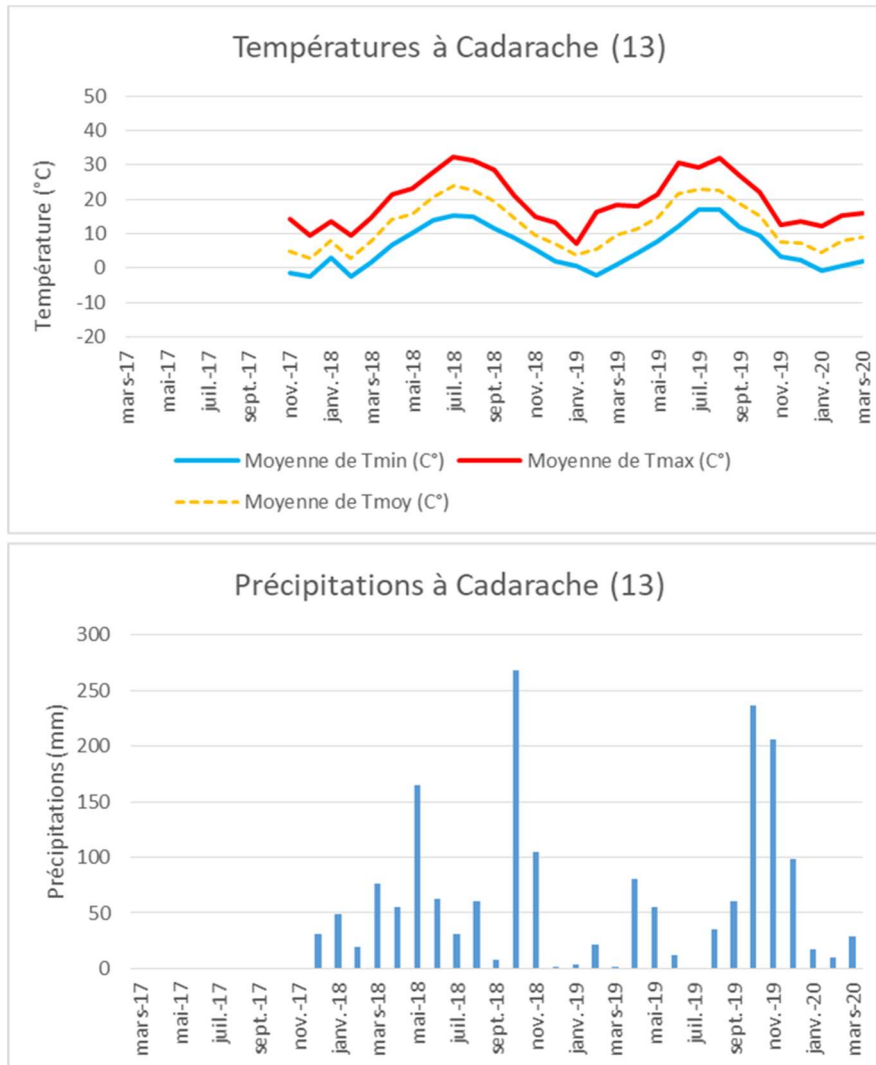


Fig.25 : Etat de la parcelle de St Paul lès Durance en Janvier 2020, trois saisons après plantation
(Photo S. Girard, IDF-CNPF)



d. Comparaison des conditions climatiques des 3 sites

Fig.26 : Comparaison des conditions climatiques des 3 sites

		87 Peyrat	44 Saffré	13 St Paul
	Altitude	576 m	28 m	283 m
Moyennes sur la période 1981/2010 *	Température annuelle moyenne :	10.7°C	12.1°C	13.1 °C
	Moyennes des températures maximales de juin à août :	23.7°C	24.7°C	30.5°C
	Moyennes des températures minimales de janvier :	0.1°C	2.6°C	-1.9°C
	Précipitations annuelles :	1 260 mm	746 mm	620 mm
	Précipitations d'avril à octobre :	716 mm	426 mm	381 mm
	Déficit hydrique climatique de mars à octobre :	70 mm	-211 mm	-378 mm
	Déficit hydrique climatique de juin à août :	-95 mm	-224 mm	-321 mm
	Indice de vigilance climatique BioClimsol pour QPU	1	3	9
	Indice de vigilance climatique BioClimsol pour QPE	0	4	10
Valeurs réelles mesurées	Température annuelle moyenne 2018	11.5	12.7	13.9
	Température annuelle moyenne 2019	11.3	13.2	13.5
	Moyennes des températures maximales de juin à août 2017	32.5	26.5	
	Moyennes des températures maximales de juin à août 2018	32.8	26.8	30.5
	Moyennes des températures maximales de juin à août 2019	36.0	20.8	30.6
	Moyennes des températures minimales de janvier 2018	-0.5	5.35	2.9
	Moyennes des températures minimales de janvier 2019	-6.3	1.78	0.55
	Moyennes des températures minimales de janvier 2020	-2.4		-0.62
	Précipitations annuelles 2018	1195	647	898
	Précipitations annuelles 2019	1195	898	810
	Précipitations d'avril à octobre 2017	549	263	
	Précipitations d'avril à octobre 2018	452	216	648
	Précipitations d'avril à octobre 2019	569	426	480
	PAR moyen 2018 (min et max)	295 (66/554)		375 (125/707)
	PAR moyen 2019 (min et max)	294 (80/563)		365 (132/689)

* Données issues du modèle NORCLIS intégré à l'application BioClimSol®

III.3 Mesures et observations réalisées

Le tableau ci-dessous récapitule les mesures et observations réalisées sur les différents sites.

Fig.27 : Mesures et observations réalisées sur les différents sites

	H0	H1	H2	H3	Génotypage	Morphologie foliaire
87 Peyrat	Non	OK	OK	OK	mars-20	juil-20
44 Saffré	déduite lors de la mesure de H1	OK	OK	OK		
13 St Paul	OK	OK	Non	OK		

a. Survie et croissance après plantation

La hauteur initiale (H0) a été mesurée juste après plantation uniquement sur le site de Cadarache. Sur le site de Saffré, la hauteur initiale a été déduite au moment de la mesure de H1-c'est-à-dire après la première saison de croissance (été 2017)- en examinant les cicatrices laissées par les différentes unités de croissance.

La distribution normale des données récoltées a été vérifiée à l'aide du test de Shapiro-Wilk. Des analyses de variance à deux facteurs (Provenance et Bloc) ont ensuite été réalisées sur les données individuelles. Les moyennes ont ensuite été comparées deux à deux à l'aide du test HSD de Tukey.

La liaison entre les variables « taux de mortalité à 3 ans » et « provenance » a été recherchée en utilisant le test d'indépendance du χ^2 au seuil de risque α de 1%. Dans le cas d'une liaison entre ces variables, les résidus ajustés (résidus d'Haberman) ont été testés au seuil unilatéral de 1%.

Afin de tenir compte des différences de hauteur à la plantation entre provenances et plants, les accroissements relatifs en hauteur ont été calculés : $Acc (\%) = (H_n - H_{n-1}) / H_{n-1}$.

b. Observations de caractères morphologiques

Les plants du dispositif de Peyrat ont fait l'objet d'une notation de plusieurs critères morphologiques en juillet 2020. Ont notamment été notés la pubescence du rameau de l'année et de la face inférieure des feuilles, la présence de lobules et de lobes acuminés (terminés en pointe).

c. Recherche de marqueurs moléculaires

Récolte des échantillons

En décembre 2019 et mars 2020, une vingtaine de bourgeons a été prélevée sur 190 plants du dispositif de Peyrat le Château soit 30 individus (= 10 par bloc) de chaque provenance auxquels ont été

ajoutés 10 individus de chêne pédonculé. Les échantillons ont été envoyés au laboratoire de l'ONF (CGAF, UMR BioForA) à Orléans qui a réalisé les analyses.

Préparation et analyse des échantillons

Afin qu'il n'y ait pas de dégradation des tissus, les bourgeons ont été conservés à -80°C. Après passage dans l'azote liquide puis broyage, l'extraction de l'ADN total a été réalisée avec le kit NucleoSpin® 96 Plant II Kit (Macherey-Nagel). Un kit de 18 marqueurs nucléaires, décrit dans (Guichoux, 2011), a ensuite été utilisé pour amplifier les parties de l'ADN correspondantes³. Tous les fragments amplifiés ont été analysés par le séquenceur automatique ABI 3500.

Traitements des données

Les données brutes ont été traitées à l'aide du logiciel GeneMapper (Applied Biosystems) et d'une macro développée sous Microsoft Excel 2007 par Franck Salin (INRA Pierroton-UMR BIOGECO). La détermination de l'espèce a été effectuée en utilisant une méthode d'attribution (Pritchard *et al.* 2000) à l'aide du logiciel « Structure ». Cette méthode repose sur une approche bayésienne permettant de constituer des groupes à partir des génotypes multilocus, ceci sans a priori, de telle sorte que chaque groupe soit le plus proche de l'équilibre panmictique. Si l'échantillonnage inclut plusieurs espèces et/ou des populations génétiquement distinctes d'une même espèce, des groupes peuvent être identifiés, chaque individu étant caractérisé par une probabilité d'appartenance à chaque groupe ainsi constitué.

Les individus devant être attribués à une des quatre espèces de chênes blancs présents en France (*Q. pyrenaica*, *pubescens*, *petraea* et *robur*) sont comparés à ceux de la base de données contenant des individus identifiés comme espèces pures à plus de 90%. Aucun *a priori* d'espèces ou de mélange d'espèces (hybrides) n'est fait au moment de l'analyse.

Les résultats sont obtenus sous forme de fichier texte contenant entre autres les valeurs d'attribution de chaque individu à chaque groupe.

Le logiciel GeneAlex v6.5 (Peakall and Smouse 2012) a été utilisé pour estimer, dans chaque population, le nombre d'allèles (N_a), le nombre d'allèles efficaces (N_e), l'hétérozygotie observée (H_o) et attendue (H_e), ainsi que l'indice de Fixation (F). Il permet aussi de calculer la distance génétique de Nei entre les populations étudiées.

³ Guichoux et al, 2011 mentionnent 20 marqueurs (une série de 12 « PIE » (eSSRs) et 8 gSSRs avec des Qr, Qp, Ms), deux d'entre eux n'ont pas été utilisés car n'amplifient pas correctement ou de façon irrégulière, il s'agit de PIE227 et QrZAG20 (B. Le Guerroué, comm. pers.).

IV. Résultats

IV.1 Mortalité après plantation

Peyrat Le Château

Aucune mortalité n'a eu lieu sur ce dispositif.

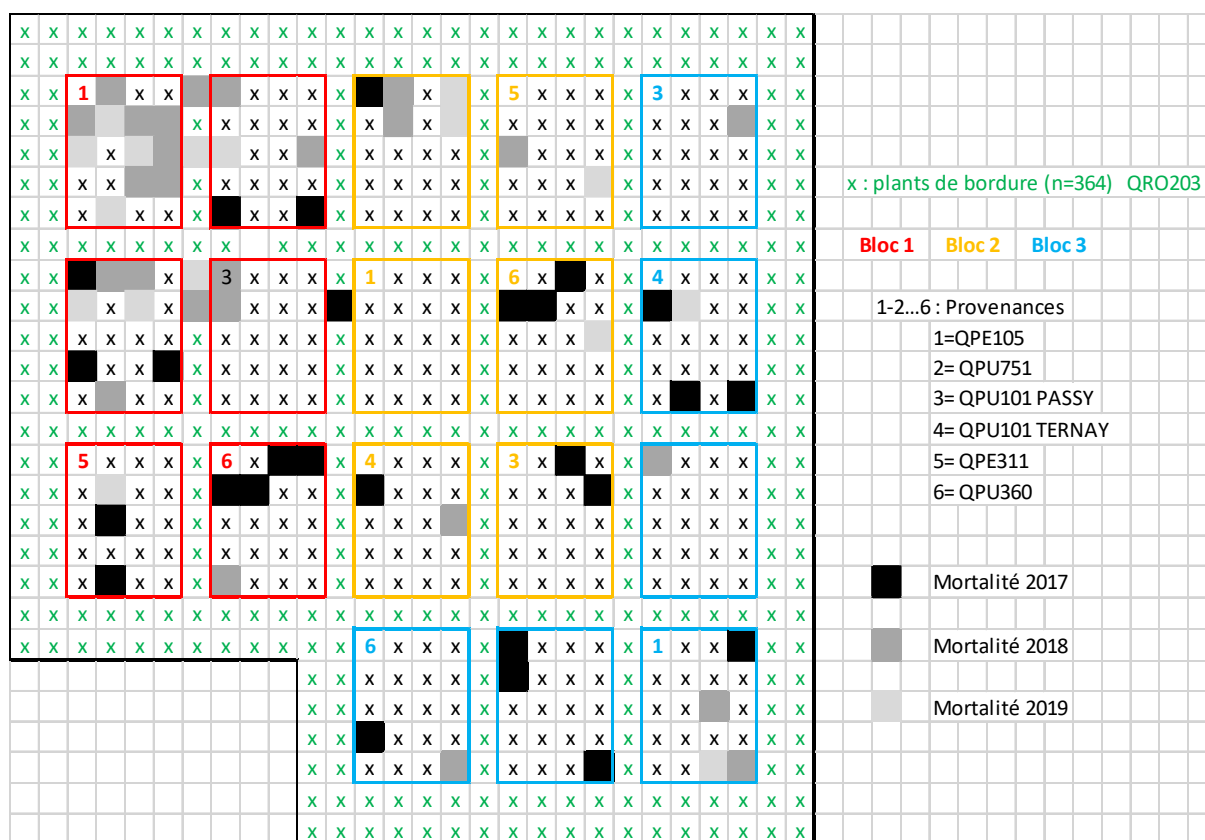
Saffré

En 2017, 7 % des plants du dispositif avaient disparu. Les disparitions étaient bien réparties sur l'ensemble du dispositif et essentiellement liées à la présence de campagnols. Les plants disparus ont été remplacés en novembre 2017 (n=26).

En 2018, 24 plants supplémentaires ont disparu, dont un regarni, portant à 12 % le taux de survie des plants installés au départ. De nouveaux regarnis ont eu lieu en février 2019 (n=26).

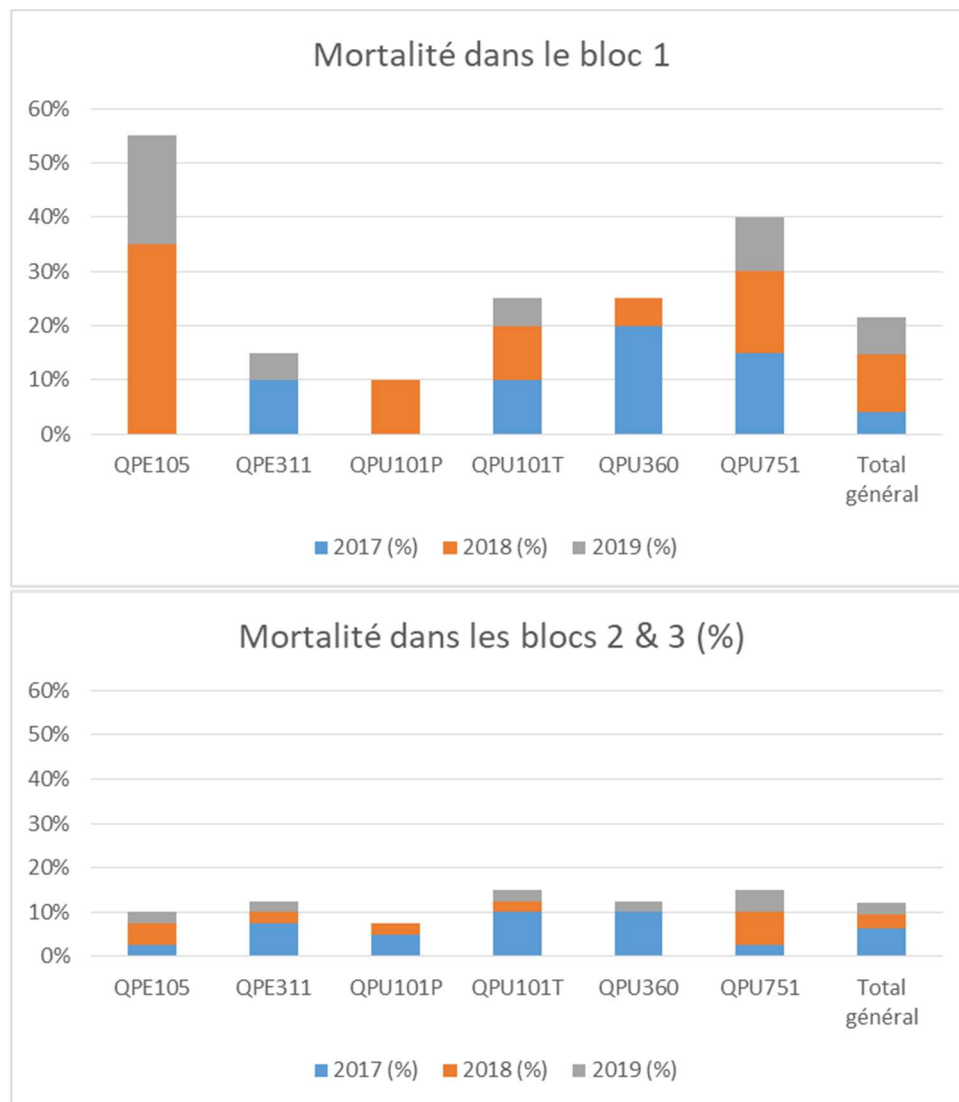
En 2019- soit 3 années après la plantation- 297 chênes plantés en 2017 et faisant l'objet d'un suivi étaient vivants ce qui correspond à un taux de survie de **82 %**.

Fig.28 : Trois ans après plantation, localisation des plants disparus dans le dispositif de Saffré (44)



Les dégâts ne sont pas répartis de façon homogène sur l'ensemble du dispositif mais concentrés dans le bloc 1, au nord du dispositif (Figure 27). Cette surmortalité du bloc 1 pourrait être liée à un sol plus contraignant (JP. Huvelin, comm. pers.).

Fig.29 : Mortalité des différentes espèces et provenances dans le dispositif de Saffré (44)

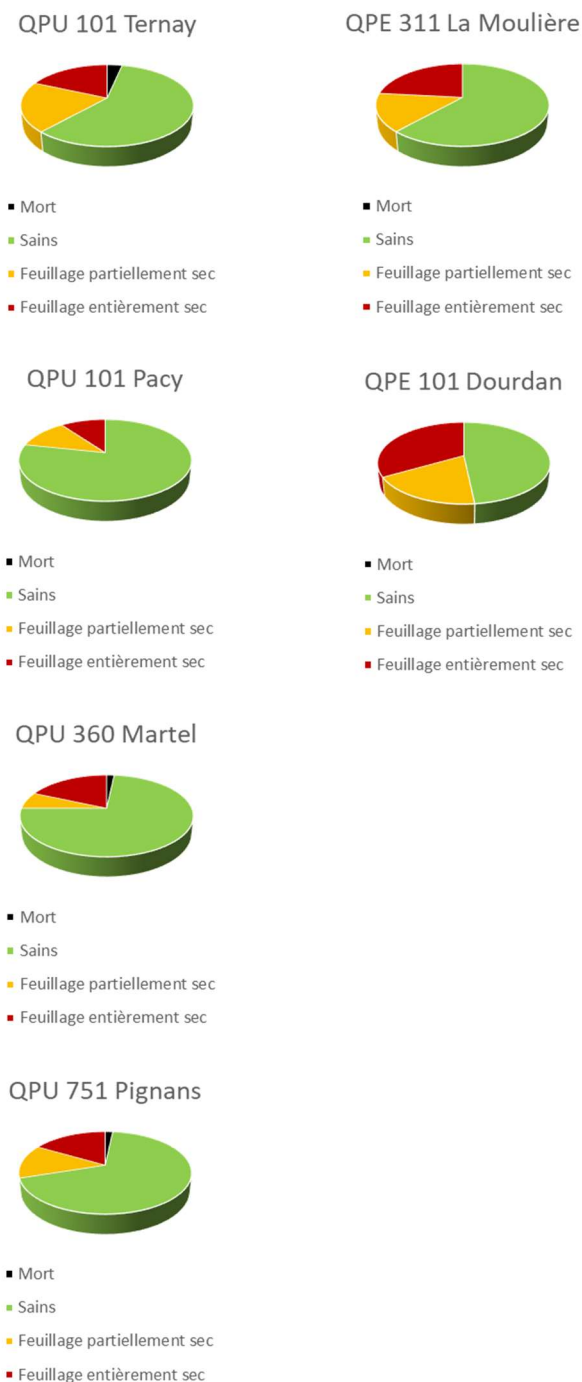


La mortalité concerne 12 % des plants des blocs 2 & 3, moins impactés par les campagnols et sur un terrain a priori meilleur. Dans ces blocs, le test de χ^2 n'établit pas de lien entre mortalité et provenance.

St Paul lès Durance

La première année, seulement 6 plants- soit moins de 2%- avaient disparu du dispositif et cela, malgré une perte de feuillage observée en début d'été. Des notations réalisées le 17 juillet 2017, indiquaient en effet que 35% d'entre eux avaient le feuillage partiellement ou entièrement sec (Fig.30).

Fig.30 : Etat des plants 4 mois après leur plantation à St Paul lès Durance



En revanche, à la suite de la saison 2018, 176 plants supplémentaires ont disparu, portant le taux de survie à 50 %. Cette mortalité est apparue tôt en saison puisque une notation en juin 2018 donnait déjà ce résultat.

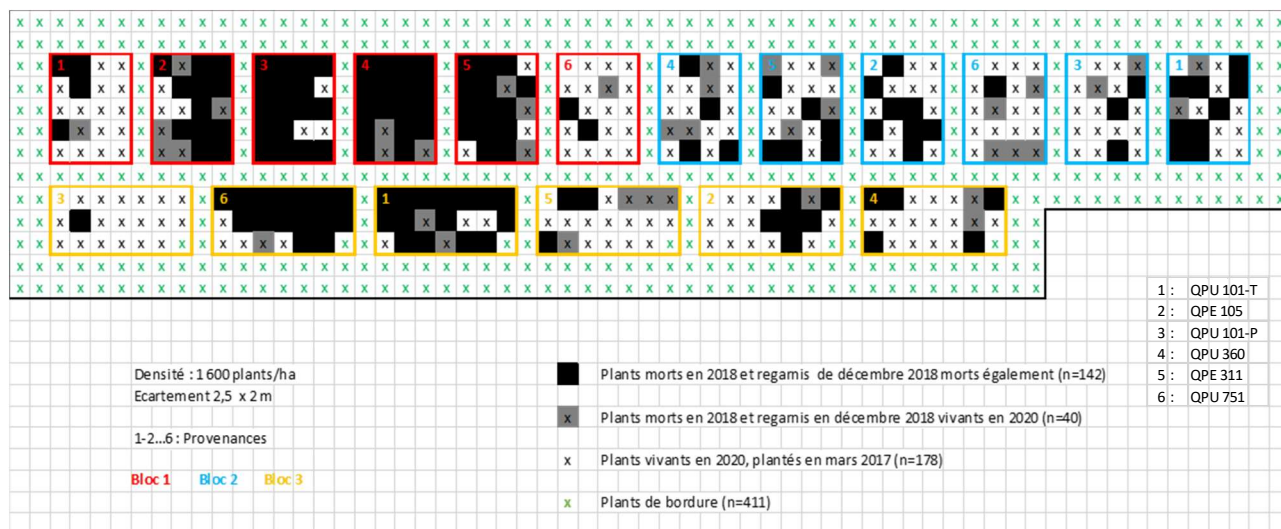
La mortalité a été plus abondante dans la partie nord de la parcelle au niveau du bloc 1 du dispositif et d'une partie du bloc 3 (Fig. 31). Dans ces 2 blocs, le test du χ^2 montre une liaison entre le taux de mortalité et la provenance, ce qui n'est pas le cas dans le bloc 2.

Les plants morts ont été regarnis avec les provenances initiales, sans toutefois respecter le schéma initial puisque certaines provenances n'avaient pas un nombre suffisant de plants disponibles.

En Juillet 2019, les plants -et en particulier les regarnis- étaient totalement ou partiellement secs, raison pour laquelle un arrosage a été organisé la semaine suivante. Malgré cela, 80 % des regarnis n'ont pas survécu.

Au final, lors du passage en mesure en janvier 2020 soit 3 saisons de végétation après la plantation, seuls 170 plants installés en mars 2017 étaient toujours vivants soit un taux de survie de **47 %**.

Fig.31 : Localisation des plants vivants, 3 ans après plantation, sur le dispositif de St Paul lès Durance.



Dans le bloc 1, 70 % des plants installés en 2017 ont disparu (Fig.31), près de la moitié dans les blocs 3 et 40 % dans le bloc 2.

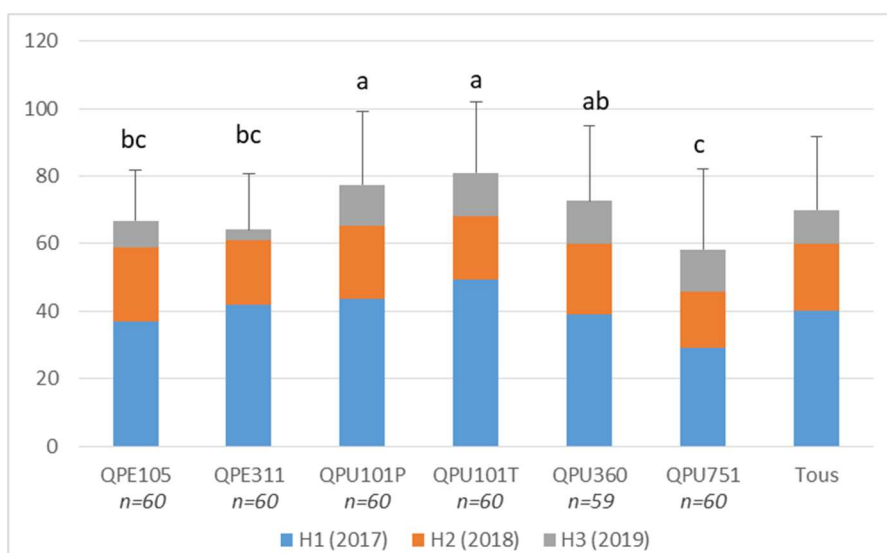
Globalement sur le site, il n’y a pas de lien entre la mortalité des plants et leur provenance.

IV.2 Croissance en hauteur

Peyrat Le Château

La croissance annuelle moyenne des plants de chaque provenance est visible sur la figure 32.

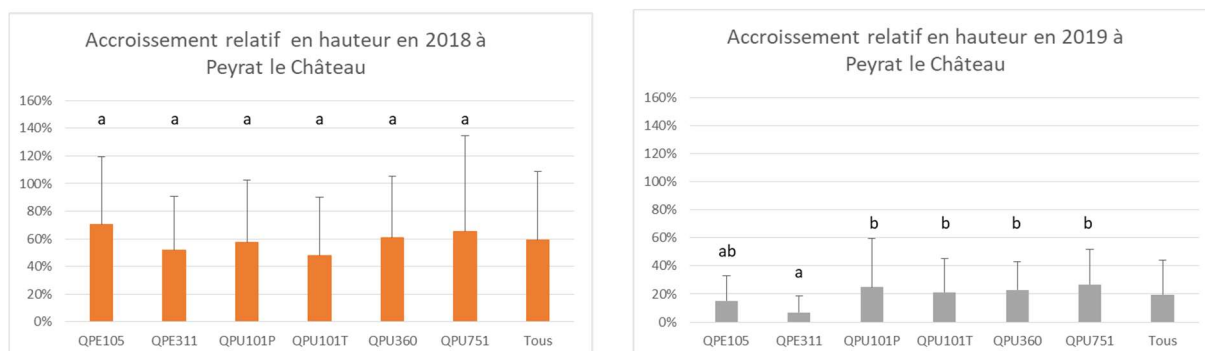
Fig.32 : Hauteur moyenne (cm) des plants, 3 ans après la plantation à Peyrat le Château (les valeurs-n correspondent aux effectifs pris en compte pour calculer les moyennes, les barres, aux écarts type).



Trois ans après plantation, la hauteur moyenne des chênes pubescents et sessiles, toutes provenances confondues, est de 70 cm en moyenne. L'analyse statistique de H3 (ANOVA à 2 facteurs : provenance et Bloc, $p < 0.01$) met en évidence un effet Bloc, un effet Provenance et une interaction Bloc x Provenance. Les plants issus des provenances de pubescent du Nord-Ouest (QPU 101) sont les plus grands et atteignent environ 80 cm en moyenne. Ils sont significativement plus grands que les chênes sessiles. Les pubescents provençaux sont les plus petits avec 58 cm de hauteur moyenne.

En 2018, chênes pubescents et sessiles avaient tous mis en place une nouvelle pousse d'environ 20 cm en moyenne (16.5 pour QPU 751). L'accroissement relatif 2018 (H2-H1)/H1) était de 50 % en moyenne et était identique quelle que soit la provenance considérée.

Fig.33 : Moyenne des accroissements relatifs en hauteur (%) réalisés sur le site de Peyrat le Château en 2018 et 2019.

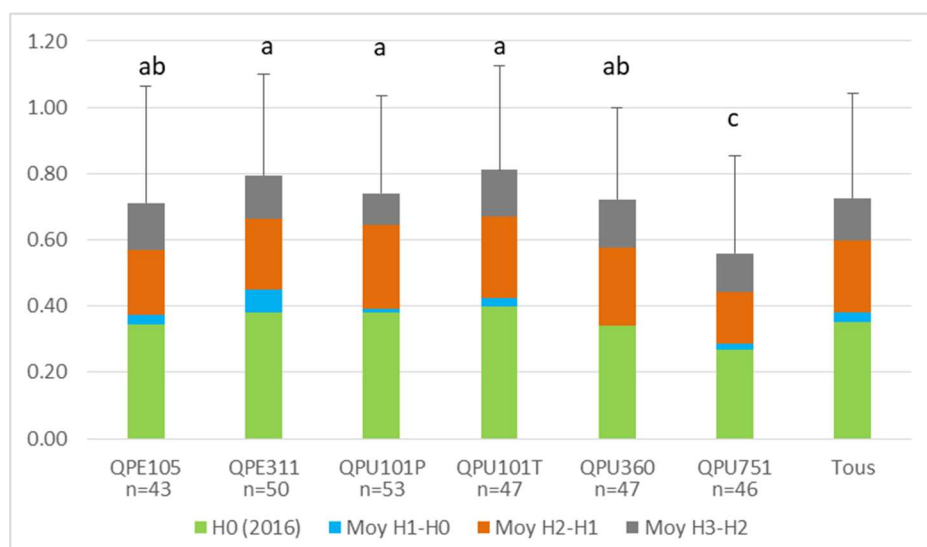


En 2019, la croissance en hauteur a été deux fois plus faible, la nouvelle pousse des QPU était de 12 cm en moyenne alors que celle des sessiles de 3 et 7.6 cm pour QPE311 et QPE105 respectivement (Fig.33). L'accroissement relatif 2019 (H3-H2)/H2) était de 20 % en moyenne et était identique quelle que soit la provenance considérée.

Saffré

Le graphe ci-dessous représente la croissance en hauteur des plants vivants 3 ans après plantation.

Fig.34 : Hauteur moyenne (m) des plants, 3 ans après la plantation à Saffré (les valeurs-n correspondent aux effectifs pris en compte pour calculer les moyennes, les barres, aux écarts type).



L'année qui a suivi la plantation (2017), la croissance en hauteur a été très faible (3 cm en moyenne), 42 % des plants ayant fait une descente de cime.

L'année suivante, les plants ont poussé de 22 cm en moyenne contre 13 seulement en 2019. Les ANOVA pratiquées sur les accroissements relatifs 2018 et 2019 ne laissent apparaître aucune différence statistiquement significative entre les provenances.

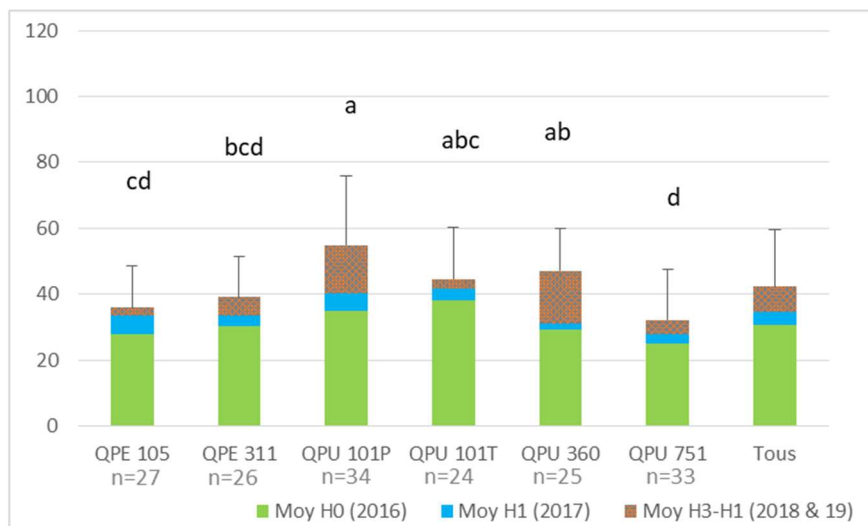
Trois ans après plantation, la hauteur moyenne des chênes pubescents et sessiles, toutes provenances confondues est de 72 cm en moyenne. Dans ce dispositif, l'analyse statistique des hauteurs 3 ans après plantation (ANOVA à 2 facteurs : provenance et Bloc, $p < 0.01$) indique un effet Bloc, un effet Provenance et une interaction Bloc x Provenance. Les plants de la provenance QOU751 sont les plus petits, ceux des autres provenances n'étant pas significativement différents.

Il convient de noter une plus grande hétérogénéité des croissances au sein des provenances dans ce dispositif comparativement à ce qui est observé sur le dispositif de Peyrat.

St Paul Les Durance

La croissance annuelle moyenne des plants toujours vivants 3 ans après plantation (n =170), est visible sur la figure ci-dessous :

Fig.35 : Hauteur moyenne (m) des plants, 3 ans après la plantation à St Paul lès Durance (les valeurs-n correspondent aux effectifs pris en compte pour calculer les moyennes, les barres, aux écarts type).



La croissance en hauteur l'année qui a suivi la plantation (2017) a été faible (un peu moins de 4 cm en moyenne) et statistiquement identique pour toutes les provenances⁴.

Trois ans après plantation, la hauteur moyenne des chênes pubescents et sessiles, toutes provenances confondues est de 42 cm en moyenne. Dans ce dispositif, l'analyse statistique des hauteurs 3 ans après plantation (ANOVA à 2 facteurs : provenance et Bloc, $p < 0.01$) indique un effet Provenance. Les plants les plus grands appartiennent à QPU101 Pacy, les plus petits à la provenance locale provençale QPU751.

⁴ Résultats des ANOVA à 2 facteurs (provenance et bloc), sur H1-H0 et sur (H1-H0)/H0 ($p < 0.01$)

IV.3 Apport des marqueurs génétiques

a. Attribution des plants échantillonnés à une espèce de *Quercus*

Après recherche des marqueurs adéquats, chacun des 190 individus échantillonnés dans la plantation de Peyrat Le Château a été attribué à l'une des quatre espèces : *Q. pyrenaica*, *pubescens*, *petrea* ou *robur*. Un individu est attribué à une de ces espèces lorsque la probabilité d'affiliation à l'espèce pure calculée par le logiciel Structure est supérieure à 80 %. Les résultats d'affiliation sont présentés dans le tableau ci-dessous par provenance.

Fig.36 : Affiliation par espèce de 190 individus échantillonnés dans la plantation de comparative de Peyrat le Château (87).

Région de provenances comparées	Peuplements porte-graines *	% d'individus affiliés à l'espèce correspondante	% d'individus appartenant à une autre espèce	% d'individus hybrides
QPU 101 Nord Ouest	Pacy /Eure (27)	97%	Aucun	3 % avec QRO + QPE
QPU 101 Nord Ouest	Ternay (86)	93%	Aucun	6 % -3% avec QRO -3% avec QRO + QPE
QPU 360 Sud Ouest	Martel (46)	83%	3 % de tauzin 6 % de pédonculé	6 % -3% avec QPE -3% avec QPY
QPU 751 Provence	Pignans (83)	100%	Aucun	Aucun
QPE 105 Sud Bassin Parisien	F.D. de Dourdan (91)	80%	3 % de pédonculé	17 % -3% avec QPU -3% avec QPU + QRO -10% avec QRO
QPE 311 Charentes-Poitou	F.D. de Moulière (86)	93%	Aucun	6 % -3% avec QRO -3% avec QPY
QRO 203 Vallée de la Saône		100%	Aucun	Aucun

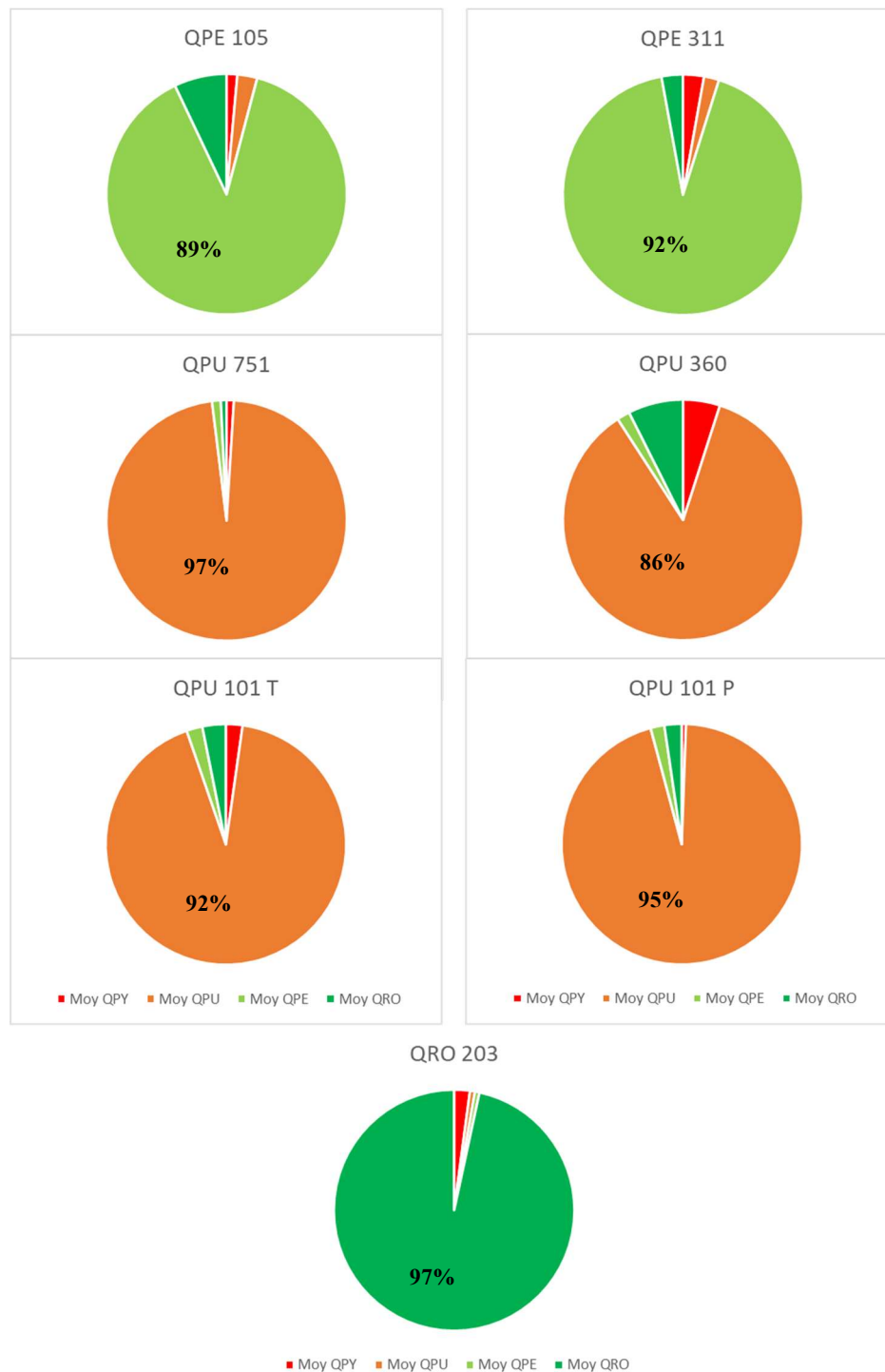
* en vert : peuplements sélectionnés, en jaune, source de graines identifiées. Pour mémoire, 30 individus par provenance ont été analysés (10 seulement pour QRO 203 utilisé en bordure du dispositif).

Les plants issus des différentes provenances étudiées appartiennent très majoritairement à l'espèce attendue. On remarque néanmoins que des plants d'autres espèces se trouvent dans la descendance du peuplement sélectionné de Dourdan et dans celle du peuplement récolté dans le Lot en catégorie identifiée. Aucun des plants analysés, issus des peuplements pubescents situés dans la moitié nord du pays (Ternay et Pacy sur Eure), n'a été affilié à une autre espèce.

Des hybrides entre espèces ont été repérés dans la plupart des provenances étudiées à l'exception toutefois de QPU751 située dans le Var. La proportion atteint plus de 15 % dans la

descendance du peuplement sessile de Dourdan (QPE105). Les combinaisons hybrides sont variables. Dans les peuplements pubescents, elles intègrent la plupart du temps, majoritairement une autre espèce qu'il s'agisse de QPE, QRO et QPY et parfois QPE et QRO dans des proportions voisines. Dans les peuplements sessiles, elles intègrent majoritairement une autre espèce (très souvent QRO mais aussi QPU ou QPY).

Fig.37 : Moyenne des valeurs d'attribution pour les plants des différentes provenances étudiées
 (pour mémoire, le nombre d'individus analysés par provenance est de 30 sauf pour QRO 203 (n=10))



b. Analyse de la diversité génétique des marqueurs microsatellites

Il est possible de calculer, au sein des provenances étudiées, différents paramètres génétiques permettant d'apprécier la diversité des allèles et des combinaisons d'allèles liés aux marqueurs utilisés :

-le nombre total d'allèles (N_a). Ce paramètre peut toutefois être sous-estimé si le nombre d'individus typés est faible, les allèles rares ayant alors peu de chances d'être échantillonnés. Le nombre efficace d'allèles (N_e) correspond au nombre d'allèles en tenant compte des différences de fréquence que chaque allèle présente dans l'échantillon étudié.

-le taux d'hétérozygotie observée (H_o) correspond à la proportion d'individus qui possèdent deux allèles différents d'un gène donné dans l'échantillon étudié. Le taux d'hétérozygotie attendu (H_e) rend compte de la probabilité que 2 allèles pris au hasard dans l'échantillon soient différents ; plus sa valeur est élevée plus l'échantillon est diversifié.

-l'indice de fixation (F) correspond à l'écart relatif entre le taux d'hétérozygotie attendu (H_e) et celui qui est observé (H_o), il varie entre -1 et +1. Il permet d'estimer si il y a ou non un excès d'hétérozygotes.

Les résultats des échantillons issus du dispositif de comparaison de provenances de Peyrat le Château sont exposés dans le tableau ci-dessous :

Fig. 38 : Paramètres de diversité génétique des 7 provenances étudiées : effectif analysé (N), nombre d'allèles (N_a), nombre d'allèles efficaces (N_e), hétérozygotie observée (H_o) et attendue (H_e) et indice de Fixation (F)

Population		N	N_a	N_e	H_o	H_e	F
QPE105_Dourdan_d	Mean	29,50	8,94	4,53	0,69	0,72	0,05
	SE	0,50	0,89	0,52	0,04	0,03	0,03
QPE311_Moulière_d	Mean	29,72	8,72	4,35	0,68	0,73	0,06
	SE	0,28	0,69	0,47	0,04	0,03	0,04
QPU101_Pacy_d	Mean	29,94	8,00	4,17	0,75	0,73	-0,04
	SE	0,06	0,60	0,35	0,04	0,03	0,05
QPU101T_Ternay_d	Mean	29,89	9,33	5,37	0,78	0,80	0,02
	SE	0,08	0,62	0,41	0,03	0,02	0,03
QPU360_Martel_d	Mean	29,94	10,11	5,84	0,77	0,80	0,05
	SE	0,06	0,68	0,55	0,03	0,02	0,03
QPU751_Pignans_d	Mean	29,94	9,00	4,89	0,76	0,76	0,01
	SE	0,06	0,57	0,42	0,04	0,02	0,03
QRO203_Gy_d	Mean	9,94	6,00	3,80	0,70	0,70	0,00
	SE	0,06	0,40	0,34	0,05	0,03	0,06
Total	Mean	26,98	8,59	4,70	0,73	0,75	0,02
	SE	0,63	0,26	0,17	0,02	0,01	0,02

La population de QRO203_GY est représentée par seulement 10 individus et comporte le moins d'allèles (6). Pour les autres populations le nombre d'allèles varie de 8 pour QPU101_Pacy à 10,11 pour QPU360_Martel. Les valeurs du nombre d'allèles efficaces se situent entre 3,80 pour la provenance de chêne pédonculé et 5,84 pour QPU360_Martel. On ne note pas de différences en nombre d'allèles entre les différentes espèces même si la fréquence de ceux-ci peut varier au sein des populations.

Les valeurs d'hétérozygoties observées sont légèrement inférieures aux valeurs d'hétérozygoties attendues, sauf pour QPU101_Pacy. L'indice de fixation est donc positif pour toutes ces populations sauf pour QPU101_Pacy (-0,04). Le F est compris entre 0,002 pour QRO203 et 0,057 pour QPE311_Moulière, mais sans qu'il y ait un excès significatif d'homozygotes ou un déséquilibre de liaison.

Ces résultats ont été comparés à ceux des échantillons récoltés en parc à pieds mères (cf. rapport Conqueth, Volet 4, Partie3) et d'une forêt préalablement étudiée au CGAF : Vicq sur Gartempe située en Poitou-Charentes (Fig.39).

Fig. 39 : Paramètres de diversité génétique des 7 provenances étudiées et de 3 autres populations : effectif analysé (N), nombre d'allèles (Na), nombre d'allèles efficaces (Ne), hétérozygotie observée (Ho) et attendue (He) et indice de Fixation (F)

Population		N	Na	Ne	Ho	He	F
QPE105_Dourdan_d	Mean	29,50	8,94	4,53	0,69	0,72	0,05
	SE	0,50	0,89	0,52	0,04	0,03	0,03
QPE106_PPM_Bercé	Mean	79,89	10,11	4,63	0,67	0,70	0,04
	SE	0,11	1,10	0,63	0,05	0,05	0,02
QPE311_Moulière_d	Mean	29,72	8,72	4,35	0,68	0,73	0,06
	SE	0,28	0,69	0,47	0,04	0,03	0,04
QPU101_Pacy_d	Mean	29,94	8,00	4,17	0,75	0,73	-0,04
	SE	0,06	0,60	0,35	0,04	0,03	0,05
QPU101T_Ternay_d	Mean	29,89	9,33	5,37	0,78	0,80	0,02
	SE	0,08	0,62	0,41	0,03	0,02	0,03
QPU360_Martel_d	Mean	29,94	10,11	5,84	0,77	0,80	0,05
	SE	0,06	0,68	0,55	0,03	0,02	0,03
QPU751_Pignans_d	Mean	29,94	9,00	4,89	0,76	0,76	0,01
	SE	0,06	0,57	0,42	0,04	0,02	0,03
QPU751_PPM	Mean	76,94	12,17	6,51	0,80	0,83	0,03
	SE	0,06	0,81	0,58	0,02	0,01	0,03
QRO203_Gy_d	Mean	9,94	6,00	3,80	0,70	0,70	0,00
	SE	0,06	0,40	0,34	0,05	0,03	0,06
Vicq_sur_Gartempe	Mean	49,89	12,06	5,90	0,74	0,80	0,06
	SE	0,08	0,84	0,62	0,03	0,02	0,03
Total	Mean	39,56	9,44	5,00	0,74	0,76	0,03
	SE	1,60	0,26	0,17	0,01	0,01	0,01

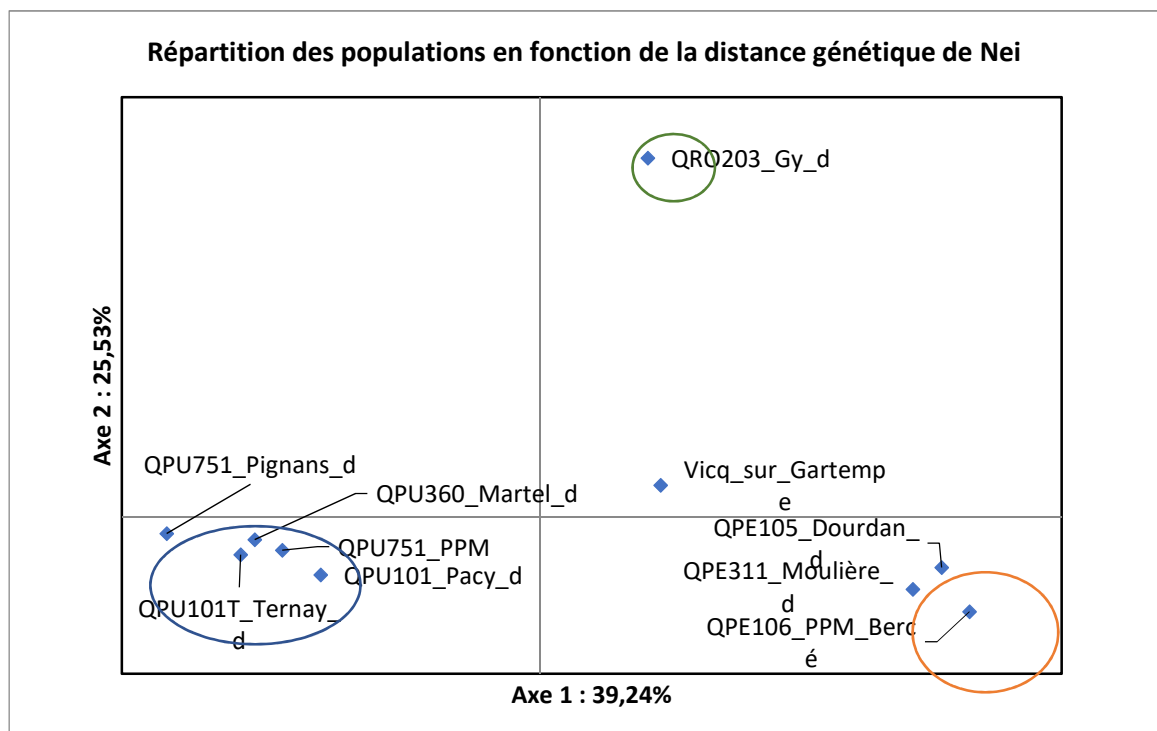
Le nombre d'allèles observés dans les 3 populations QPE106_PPM_Bercé, QPU751_PPM et Vicq_sur_Gartempe est respectivement égal à 10,11 ; 12,17 et 12,06. Ces valeurs sont supérieures à celles trouvées dans les populations du test de comparaison de provenance, cette différence s'explique en partie par le nombre plus important d'individus échantillonnés : lorsque celui est plus élevé pour une population donnée, des allèles plus rares sont alors observés. Ceci est confirmé par les nombres d'allèles efficaces qui se répartissent entre 3,80 pour QRO203_Gy_d et 6,51 pour QPU751_PPM.

Le nombre élevé d'allèles pour Vicq sur Gartempe (12,06) peut être dû à la composition en mélange de cette forêt, en effet elle est composée de *Quercus petraea*, *Quercus robur*, *Quercus*

pubescens et d'hybrides malgré que l'on ne distingue pas d'allèles diagnostiques pour distinguer les espèces.

Comme précédemment, les valeurs d'hétérozygoties observées sont légèrement inférieures aux valeurs d'hétérozygoties attendues, sauf pour QPU101_Pacy. L'indice de fixation est positif pour toutes les populations sauf pour QPU101_Pacy, et F est compris entre 0 pour QRO203 et 0,06 pour QPE311_Moulière et Vicq sur_Gartempe. De même, il n'y a pas d'excès significatif d'homozygotes ou de déséquilibre de liaison.

Les distances génétiques de Nei ont été calculées entre chacune des populations étudiées pour réaliser le graphique ci-dessous.



La variation, entre les populations, cumulée par les deux premiers axes est élevée, elle atteint 64,77%. Cette analyse fait apparaître un « groupe *Quercus robur* » qui se distingue des autres populations, il est en effet composé de 100% d'individus *Quercus robur*.

La variation, entre les populations, cumulée par les deux premiers axes est élevée, elle atteint 64,77%. Cette analyse fait apparaître un « groupe *Quercus robur* » qui se distingue des autres populations, il est en effet composé de 100% d'individus *Quercus robur*. Les populations composées majoritairement de *Quercus petraea* d'une part et de *Quercus pubescens* d'autre part forment 2 groupes bien distincts.

Même si certaines populations d'une même espèce sont éloignées géographiquement, par exemple QPU751_Pignans et QPU101_Pacy, elles sont regroupées sur le graphique et donc elles sont génétiquement proches.

La position sur le graphique de la population Vicq sur Gartempe est intermédiaire, en raison de sa composition en mélange d'espèces différentes et aussi d'hybrides entre ces espèces.

V. Synthèse

Le fait que les peuplements de chêne pubescent de Ternay (QPU101T) et Pacy (QPU101P) se trouvent à proximité de chênes sessiles et pédonculés, laissait penser que le phénomène d'hybridation interspécifique pouvait aisément intervenir. Pour cette raison, on pouvait craindre que tout ou partie des plants issus des glands récoltés dans ces peuplements ne présentent pas les caractéristiques morphologiques typiques du chêne pubescent et ne puissent de ce fait être utilisés comme matériel forestier de reproduction.

Attribution des plants de la provenance QPU101 à l'espèce *Quercus pubescens*

Les observations réalisées en pépinière à Guémené Penfao (Fig.9) et après plantation sur le dispositif de Peyrat le Château (Fig.13) ont montré que la quasi-totalité des plants des provenances QPU101T et QPU101P présentaient des caractères morphologiques typiques de l'espèce *Q. pubescens* : pubescence des jeunes rameaux et de la face inférieure du limbe foliaire, présence de lobes acuminés.

La recherche de marqueurs génétiques de types microsatellites sur une partie des descendants de ces peuplements a permis d'établir que 97 % des plants de la provenance Pacy appartenaient à l'espèce *Q. pubescens* et 93 % dans le cas de la provenance Ternay. Concernant les peuplements sélectionnés de sessile, la proportion de plants attribués à l'espèce *Q. petraea* était de 93 % pour QPE311-La Moulière et de 80 % pour QPE105-Dourdan.

Rappelons également que, plusieurs milliers de plants ont été produits à partir de glands récoltés dans ces deux peuplements depuis 2014, sans que les pépiniéristes et les utilisateurs n'aient émis des réserves sur l'attribution de ce matériel à l'espèce *Quercus pubescens*.

Des taux de mortalité différents selon les sites mais pas selon les provenances

L'analyse des résultats des trois tests de provenances installés en 2017 sur un gradient climatique de pluviométrie et de température a permis d'obtenir des informations quant au comportement de ces deux provenances juste après plantation et de le comparer d'une part à celui de 2 provenances de la même espèce mais récoltées dans la moitié sud et d'autre part d'appréhender leur croissance comparativement à celle de chênes sessiles originaires des mêmes régions.

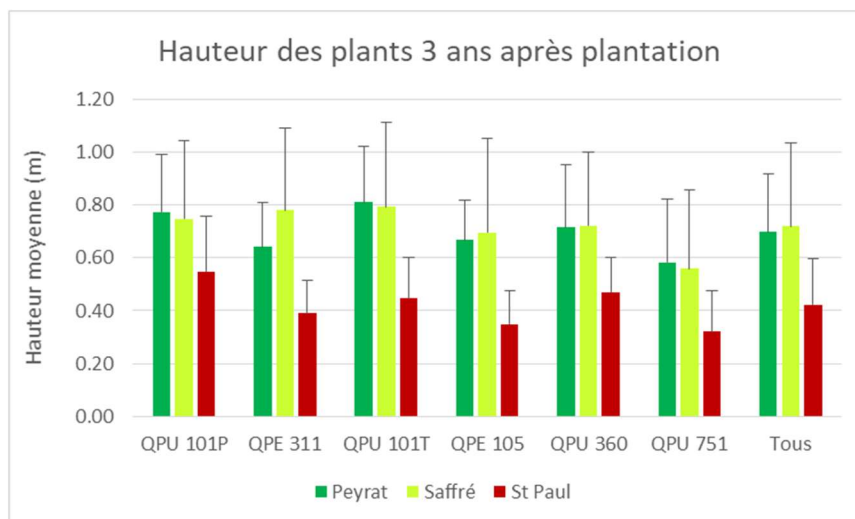
Trois ans après plantation, la survie des plants n'est que de 47 % sur le site le plus chaud à St Paul lès Durance, de 82 % en Loire Atlantique et de 100 % à Peyrat le Château, site le plus frais. Signalons que les basses températures de janvier 2019 à Peyrat le Château (-6.3°C sous abri) n'ont pas provoqué de dégâts sur les plants de chêne pubescent.

Quel que soit le site considéré, la mortalité a concerné toutes les provenances dans les mêmes proportions.

Bonne croissance des 2 peuplements QPU101« Nord-Ouest » dans les trois sites...

Trois ans après plantation, les plants des dispositifs de Saffré et Peyrat atteignent des hauteurs moyennes de 70 cm. En revanche, ceux installés à St Paul lès Durance sont en moyenne 30 cm plus petits.

Fig. 40 : Hauteurs des différentes provenances sur les 3 sites, 3 ans après plantation
Les effectifs pris en compte sont indiqués dans les figures 32, 34 et 35.



Pour la hauteur mesurée à 3 ans, l'analyse de variance à 2 facteurs détecte un effet « site » et un effet « provenance » mais aucune interaction entre ces deux facteurs (ANOVA à 2 facteurs, $p < 0.01$). Ainsi, partout, les hauteurs à 3 ans varient selon la provenance considérée mais le classement des provenances est quasi identique d'un site à l'autre (Fig. 41).

Fig. 41 : Groupes de provenances homogènes ($p < 0.01$) pour la hauteur à 3 ans sur les 3 sites
Sur un site donné, en bleu : provenances les plus hautes, en gris, provenances les plus petites.

	Groupes homogènes selon les tests HSD de Tuckey					
	QPE105	QPE311	QPU101P	QPU101T	QPU360	QPU751
87 Peyrat	c	bc	a	a	ab	c
44 Saffré	ab	ab	a	a	ab	c
13 St Paul	cd	bcd	a	abc	ab	d

Quel que soit le site considéré, les plants de QPU101P et QPU101T sont toujours les plus grands et ceux de QPU751, toujours les plus petits. L'écart entre ces deux provenances est le plus marqué sur le site le plus chaud (St Paul) où QPU101T atteint 55 cm ($\sigma = 21$) en moyenne et QPU751, 32 cm ($\sigma = 16$).

Rappelons qu'à la plantation, il existait déjà un écart de hauteur entre ces provenances puisque les plants de QPU101P et QPU101T mesuraient en moyenne respectivement 35 ($\sigma = 12$) et 40 ($\sigma = 14$) cm, contre 26 cm ($\sigma = 9$) pour ceux de QPU751.

Outre des hauteurs initiales différentes, les écarts observés 3 ans après plantation peuvent également être liés à la qualité génétique du matériel. Rappelons que les provenances QPU101P et QPU101T sont issues de peuplements répondant à un cahier des charges prenant en compte la qualité phénotypique des arbres ce qui n'est pas le cas des autres provenances de chêne pubescent.

... Croissance équivalente à celle des sessiles de la même région

Dans tous les sites, les chênes pubescents QPU101Pacy et QPU101Ternay sont aussi grands (voire plus à Peyrat) que les chênes sessiles issus de peuplements récoltés dans la même zone géographique (QPE105 Dourdan et QPE311 La Mouillère). Même si ils ont pu être avantagés par une hauteur à la plantation légèrement plus grande, les chênes pubescents des 2 provenances testées ont pour le moment des niveaux de croissance très proches de ceux des sessiles de leur région.

VI. En conclusion

Les informations recueillies dans le cadre du programme CONQueTh ont permis de conforter la démarche visant à sélectionner dans la moitié nord du pays des peuplements de *Q. pubescens* pour approvisionner la filière graines et plants. En effet, malgré le voisinage d'autres chênes, le taux d'hybrides dans la descendance des deux peuplements étudiés de la région de provenance QPU101 « Nord Ouest », est très faible. De plus, leurs performances dans le jeune âge sont particulièrement intéressantes, non seulement en comparaison avec celles des provenances de la moitié sud mais également avec celles de chênes sessiles de la même zone géographique. Ces éléments valident donc la pertinence du cahier des charges utilisé pour sélectionner les deux peuplements en question, cahier des charges qui a été utilisé pour sélectionner d'autres peuplements dans la moitié nord du pays dans le cadre de ce même programme (cf. Rapport 2 du volet 4).

Pour conforter et généraliser les résultats obtenus concernant les performances comparées de différentes provenances de pubescent et sessile, d'autres actions seront nécessaires. Outre la **poursuite des observations** dans les 3 dispositifs étudiés dans le cadre de ce rapport, il faudra analyser les **résultats d'autres essais** dans lesquels se trouvent ces mêmes provenances, essais que le programme CONQueTh a permis de recenser (cf. Rapport Volet 3). Souvent plus modestes en termes de nombre de provenances testées, ces essais présentent l'avantage de couvrir des conditions pédo-climatiques beaucoup plus variées ce qui permettra de mieux cerner les éventuelles différences de comportement entre le chêne pubescent et les autres chênes.

Par ailleurs, d'autres sources de graines vont progressivement venir alimenter le marché - en particulier celles récoltées dans les peuplements repérés dans le cadre de CONQueTh. Afin d'évaluer leur qualité, il faudra encourager la **mise en place de nouveaux dispositifs expérimentaux** utilisant d'une part les **protocoles** définis et, d'autre part, des plants **témoins stables** dans le temps permettant d'interpréter les résultats de tous ces dispositifs, quel que soit l'année d'installation et les conditions climatiques rencontrées. De tels plants sont désormais disponibles pour la communauté des organismes de R&D, il s'agit des 2 variétés clonales créées à des fins expérimentales, finalisées et produites pour la première fois dans le cadre de CONQueTh (cf. Rapport 3 du volet 4).

Assurer le suivi des essais en place, analyser et valoriser leurs résultats, en installer de nouveaux selon des protocoles communs, avec des témoins identiques et dans des zones pédo-climatiques pertinentes, permettra d'acquérir progressivement des connaissances pour conseiller les sylviculteurs quant au matériel végétal le mieux adapté pour des plantations de chêne pubescent dans la moitié nord du pays, dans un contexte de changement climatique.

Bibliographie

- CRPF Poitou-Charentes. (2015). *Etude pour le maintien de la biodiversité des écosystèmes à base de chêne dans le contexte du réchauffement climatique*. Rapport d'étude.
- Guichoux, E. (2011). Two highly validated multiplexes (12-plex and 8-plex) for species delimitation and parentage analysis in oaks (*Quercus* spp.). *Molecular Ecology Resources*, 12 : 717-724.
- Horisberger, D. (2016). Détermination des chênes - Clé et utilisation pratique, Fiche technique,. (P. Eds, Ed.) 10.
- Kissling, P. (1980). Clef de détermination des chênes médioeuropéens (*Quercus* L.). *Berichte der Schweizerischen Botanischen Gesellschaft = Bulletin de la Société Botanique Suisse*(90 (1/2)), 29-44.
- Lemaire, J. (2011). Les chênaies atlantiques face aux changements climatiques : comprendre et agir. *Forêt-entreprise*(198), 48-50.
- Peakall, R., & Smouse, P. (2012). GenAlEx 6.5: genetic analysis in Excel. Population genetic software for teaching and research-an update. *Bioinformatics*, 28, 2537-2539.
- Sigaud, P. (1986). "Ne parlons plus du chêne mais des chênes". *R.F.F.*, 376-384.
- Viscosi, V., Antonecchia, G., Lepais, O., Fortini, P., Gerber, S., & Loy, A. (2012). Leaf shape and size differentiation in white oaks : assessment of allometric relationships among three sympatric species and their hybrids. *Int. J. Plant Sci.*, 173(8), 875–884.
- Viscosi, V., Lepais, O., Gerber, S., & Fortini, P. (2009). Leaf morphological analyses in four European oak species (*Quercus*) and their hybrids: A comparison of traditional and geometric morphometric methods. *Plant Biosystems*, 1–11.
-

