



HAL
open science

**Etude de la décomposition des racines de pin d'Alep.
Digue amont du barrage de Mallemort : compte rendu
après l'intervention de mars 2019 et synthèse après 7 ans
de décomposition**

Michel Vennetier, Caroline Zanetti, Maxime Cailleret

► **To cite this version:**

Michel Vennetier, Caroline Zanetti, Maxime Cailleret. Etude de la décomposition des racines de pin d'Alep. Digue amont du barrage de Mallemort : compte rendu après l'intervention de mars 2019 et synthèse après 7 ans de décomposition. [Rapport de recherche] Irstea Aix en Provence. 2019, pp.1-22. hal-03096149

HAL Id: hal-03096149

<https://hal.inrae.fr/hal-03096149v1>

Submitted on 4 Jan 2021

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

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



ETUDE DE LA DECOMPOSITION DES RACINES DE PIN D'ALEP DIGUE AMONT DU BARRAGE DE MALLEMORT

Rapport de l'intervention de mars 2019
après 7 ans de décomposition

Auteurs : Michel Vennetier ¹, Caroline Zanetti ²,
Maxime Cailleret ¹

¹ IRSTEA
Groupement d'Aix-en-Provence
3275, Route de Cézanne
cs 40061
13182 Aix-en-Provence Cedex 5

² ARBEAUSOLUTIONS
Route de Fuveau
13720 Belcodène

Unité de Recherche RECOVER
-Equipe EMR

Avril 2019

SOMMAIRE

Résumé	3
Préambule	4
1 - Problématique générale et objectifs de l'étude	4
A - Localisation du site	4
B - Risques liés aux systèmes racinaires dans les ouvrages hydrauliques	5
D - Rappel des recommandations de gestion et de travaux énoncés en 2011	9
2 - Etude expérimentale de la décomposition des racines	10
A- Objectif de l'expérimentation sur la décomposition racinaire	10
B - Localisation du dispositif expérimental	10
C - Méthodologie et mise en place du dispositif	11
C.1. Conception du dispositif	11
C.2. Mise en place en 2011	12
C.3 - Protocole de mesures et observations à chaque déterrage	13
➤ Sur le terrain	13
➤ Au laboratoire	15
C.4 - Déterrages successifs et prélèvements	16
3 - Résultats	19
A - Note de décomposition et de pénétrométrie	19
B - Poids et densité du bois humide et sec	20
D - Interprétation des résultats	24
D.1 - Etat visuel et pénétrométrie	24
D.2 - Poids et densité des échantillons	26
E - Comparaison avec d'autres essais	28
4/ Conclusion et perspectives	28
Bibliographie	29
Annexes : Tableaux des évolutions visuelles et dégradations	

RESUME

Ce rapport fait le bilan, au bout de 7 années, du dispositif de suivi de la dégradation des racines de pin d'Alep enfouies fin 2011 dans le sol à proximité d'une digue en rive gauche à 2km en amont du barrage de Mallemort.

Les échantillons de racines, de 20 cm de long et appartenant à 5 classes de diamètre (2 ; 3 ; 5 ; 8 et 10 cm) ont été prélevés sur les systèmes racinaires de pin d'Alep vivants extraits de la digue. Après description précise et pesée, ces fragments ont été positionnés dans des paniers en acier inoxydable et enfouis en décembre 2011 à 50 cm de profondeur, dans un matériau similaire à celui de la digue, et à proximité de celle-ci.

En mars 2019, soit 7 saisons de végétation après leur enfouissement, ces échantillons de racines ont été déterrés. Après description sur place de leur état visuel de dégradation, un test de résistance à la pénétration (densité/dureté du bois) et une pesée précise (au 1/10 g), 75% des échantillons ont été immédiatement ré-enfouis avec les paniers dans les mêmes conditions. Le dernier quart des échantillons a été ramené au laboratoire pour séchage, détermination du poids et de la densité sèche, et analyses et observations complémentaires sur la dégradation du bois en profondeur.

L'inspection visuelle des racines montre une dégradation importante de l'aspect extérieur des échantillons. L'écorce est totalement ou largement décollée du bois dans 90% des cas, quel que soit la taille des échantillons, et est suffisamment fragile et fissurée pour perdre des fragments ou se détacher entièrement dès qu'on les manipule. La surface du bois est également fissurée, présentant un aspect fibreux irrégulier, et a parfois perdu quelques morceaux. Cette surface est souvent envahie de mycélium blanc, ou a pris une couleur noir foncé et s'effrite. Des radicelles s'immiscent entre le bois et l'écorce de nombreux échantillons. L'évolution interne du bois est variable, mais la dégradation est suffisamment avancée dans 60% des échantillons pour que le bois n'oppose plus de résistance à la pénétration complète d'une lame de couteau, sur l'ensemble ou une partie de l'échantillon. Sur quelques échantillons, le bois n'a plus de cohérence, est devenu très mou et se délite en nombreux fragments. Neuf échantillons ont cassé en 2 parties ou plus lors de l'extraction ou des tests de pénétration, principalement des petits diamètres (2 à 5 cm), malgré les précautions prises pour éviter ce phénomène. Il n'y a pas de corrélation entre diamètre des échantillons et niveau de dégradation visuelle. La relation entre diamètre et résistance à la pénétration est faible, la seule différence en moyenne séparant les plus gros (moins dégradés) et les plus petits, qui présentent cependant chacun toute la gamme de variation.

Les racines de pin d'Alep de tous diamètres présentent donc des niveaux de dégradation avancée après 7 ans passés dans le sol. Le bois de 30% des échantillons, dont certains dans toutes les classes de diamètre, ont assez perdu de cohérence ou montrent des fissures et pertes de morceaux suffisants pour devenir perméables à l'eau dans le sens longitudinal. Ils commenceraient donc à présenter un danger potentiel pour la pénétration de l'eau dans un corps de digue. De plus, la plupart ont une écorce décollée du bois, avec un espace suffisant entre bois et écorce pour permettre la circulation directe d'eau, en raison de la déformation des écorces et de la rétraction du bois dans les périodes de dessèchement du sol.

Certains échantillons ayant conservé une bonne cohérence, malgré la perte de substance du bois, le dispositif doit être maintenu encore quelques années et réanalysé dans 3 à 4 ans. On devrait observer alors une désintégration du bois des échantillons actuellement les plus dégradés, et un niveau avancé de dégradation de ceux qui ont jusqu'à maintenant le mieux résisté.

Préambule

L'expérimentation sur la décomposition racinaire du pin d'Alep a été mise en place en décembre 2011 à côté de la digue amont rive gauche de l'aménagement de Mallemort (digue de Belle Plaine). Elle fait suite à l'étude, réalisée à la même époque, de l'enracinement dans cette digue des peupliers et pins d'Alep qui en peuplaient la crête, les pentes et le pied. On peut se référer à cette étude pour tous les détails de description du site et de l'essai (Zanetti et al. 2012).

Cinquante échantillons de racines de pin d'Alep, prélevés sur les systèmes racinaires extrait de la digue, ont été enterrés à 50 cm de profondeur, dans un talus reliant la digue à la piste voisine, et constitué des mêmes matériaux. L'objectif était de suivre la décomposition progressive de ces racines en déterrants tous les échantillons régulièrement, en notant à chaque fois les caractéristiques principales de dégradation, de poids et de densité, jusqu'à ce que leur manipulation ne soit plus possible pour cause de pourriture ou déstructuration trop avancée. A chaque déterrage, une partie (1/5) des échantillons doit être prélevée pour des analyses et mesures plus poussées en laboratoire. Cela permet d'envisager 5 mesures successives, la date de chacune étant décidée en fonction de l'état de dégradation des échantillons lors de la précédente et de la vitesse d'évolution constatée.

1 - Situation et mise en place de l'essai

A - Localisation du site

La digue de protection contre les crues de Belle Plaine se situe en amont du barrage EDF de Mallemort, en rive gauche de la Durance (*figure 1, en jaune*). L'ouvrage a été réalisé en 1960-1962, lors des travaux de construction du barrage de Mallemort. Le dispositif d'enfouissement se trouve à proximité de la digue dans un talus à la jonction entre la piste parallèle à la digue côté sud et une piste perpendiculaire rejoignant la digue (*figure 1 cercle rouge, figure 2 et annexe 1*). Le site d'enfouissement est constitué du même matériau sablo-graveleux (*figure 3*) que le corps de digue.



Figure 1: localisation de la digue et du site d'expérimentation. Voir plan de détail annexe 1)



Figure 2: zone d'enfouissement des racines vu depuis le carrefour des pistes.



Figure 3: matériau constitutif du corps de digue et du talus de piste où sont enfouies les racines.

B - Mise en place de l'essai

Mise en place

Le 7 décembre 2011, des échantillons de racines, de 20 cm de long et appartenant à 5 classes de diamètre (2 ; 3 ; 5 ; 8 et 10 cm) ont été prélevés sur des systèmes racinaires de pins d'Alep extraits de la digue comme celui de la *figure 4*. Après description précise et pesée (*annexe 3.a*), 5 échantillons (1 par classe de diamètre) ont été ramenés au laboratoire pour analyse détaillée, et 50 autres (10 par classe de diamètre) ont été positionnés dans des paniers en acier inoxydable (*figure 5*) et enfouis en décembre 2011 à 50 cm de profondeur (*figures 6 et 7*). On disposait initialement de 6 paniers, deux contenant 1 seul échantillon de chaque classe de diamètre, et quatre contenant 2 échantillons de chaque classe de diamètre.



Figure 4: Système racinaire de pin d'Alep extrait de la crête de la digue. Ce sont des segments de telles racines qui ont été utilisées pour l'expérimentation.

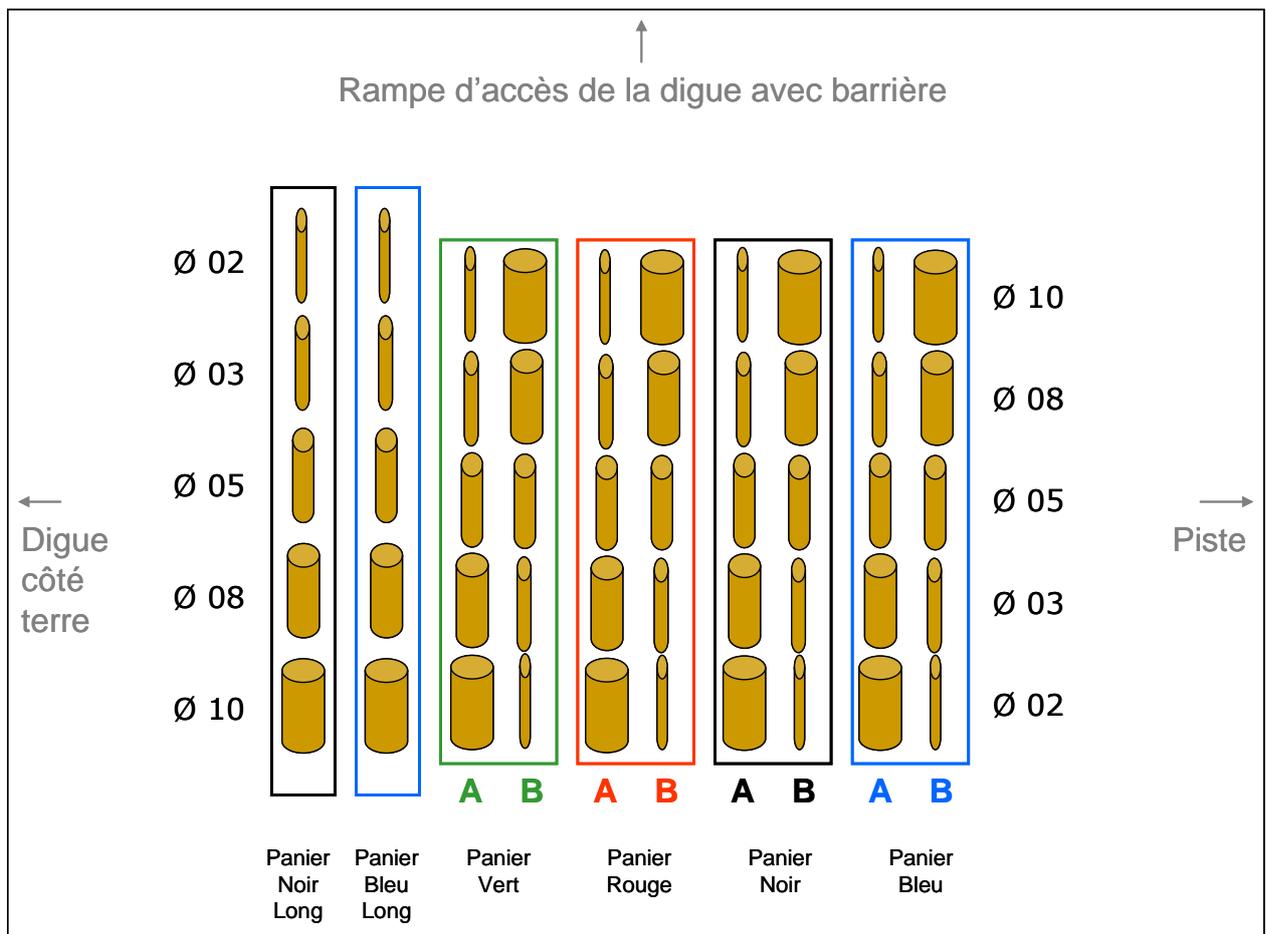


Figure 5 : plan initial du dispositif d'enfouissement



Figure 6 :
positionnement des
échantillons dans les
paniers en grillage
inoxydable.



Figure 7 :
enfouissement des
échantillons sous
50 cm de matériaux.

2 - Mesures réalisées en 2019

Les racines ont été déterrées le 25/03/2019 (figure 8). Malheureusement, les deux paniers longs contenant 1 seule série d'échantillon par classe de diamètre, et qui se situaient le plus en aval du talus, ont disparu. On suppose qu'ils ont été arrachés lors de la confection d'un muret en enrochement qui a été réalisé entretemps juste sur la bordure Nord du dispositif. Les quatre paniers avec deux séries d'échantillons étaient intacts.

Pour tous les échantillons retrouvés, nous avons réalisé une pesée précise, une photographie (cf. annexe 4), une notation de l'état visuel de dégradation, et un test de pénétration standardisé au couteau (protocole en annexe 2, tableaux de mesures en annexe 3 b).



Figure 8 : déterrage des paniers.

La numérotation des échantillons est la suivante pour chaque panier :

1 - couleur (Bleu, Noir, Rouge, Vert) ; 2 - côté A ou B ; 3 - diamètre (02, 03, 05, 08, 10) ; 4 - numéro → n°1 et 2 = côté A et B panier bleu, 3 et 4 = A et B panier noir, 5 et 6 = A et B panier rouge, 7 et 8 = A et B panier vert (il y a redondance entre côté et n° mais ça permet de faire le lien avec les données de 2011).

Par ex :

Panier bleu, côté A, diamètre 3 ⇔ Bleu.A.3.1;

Panier rouge, côté B, diamètre 8 ⇔ rouge.B.8.6

Pour le panier bleu avec deux séries de racines (A et B): les mesures de terrain ont été faites comme pour tous les autres, et ils ont été ramenés au laboratoire. Ils ont été pesés immédiatement, puis mis à l'étuve ventilée à 30°C jusqu'à stabilisation de leur poids sec. Les autres échantillons ont été remis en place dans les paniers, et ré-enfouis au même endroit et à l'identique, sauf pour le panier noir : pour limiter d'éventuelles confusions futures, liées à la faible cohésion probable des échantillons dont des fragments pourraient se mélanger à la prochaine extraction, la série A du panier noir a été remise dans le panier bleu après mesure, la série B du panier noir a été remise dans le panier noir.

2 - Résultats synthétiques 2011-2019

2.1 Poids frais et caractéristiques physiques des échantillons

Il y a une très bonne correspondance entre le volume initial des échantillons et leur poids frais en 2011 (*figure 9.a*). Un seul point semble sortir du lot en valeur absolue dans les gros diamètres, mais une fois la variabilité normalisée entre classes de diamètres par une échelle logarithmique (*figure 9.b*), elle se montre très homogène entre classes. Les variations de densité entre échantillons sont liées à l'épaisseur de l'écorce (âge de la racine) et à la présence de nœuds et fourches qui respectivement diminuent légèrement et augmentent la densité à volume égal. Mais il n'y a presque pas de variations de moyenne de densité avec le diamètre (relation quasi-linéaire entre poids et volume), ce qui est surprenant : habituellement, les gros diamètres, issus de racines plus vieilles qui présentent un bois de cœur, sont plus denses.

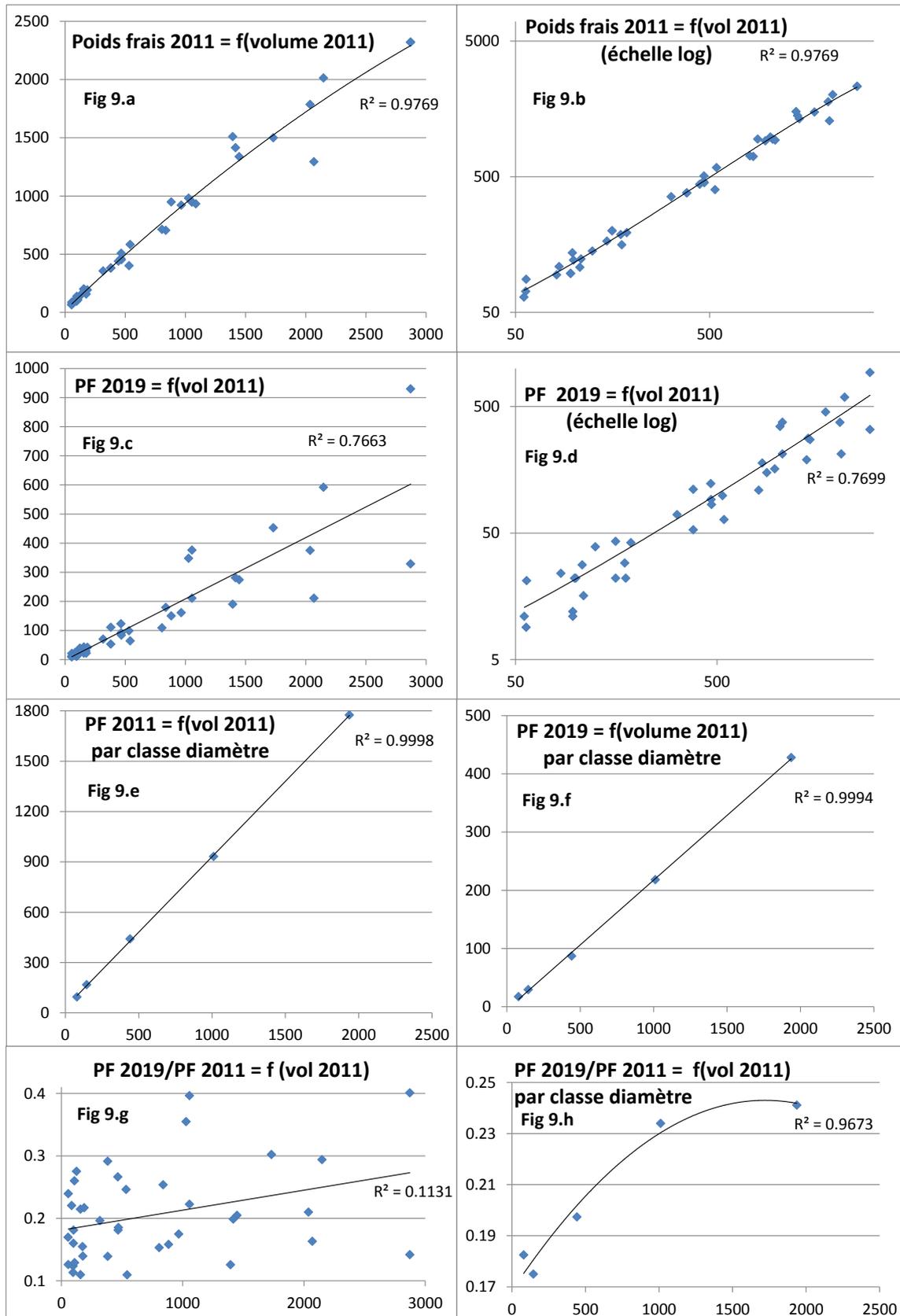


Figure 9 : relations entre le poids frais et le volume des échantillons en 2011 et 2019 (9.a à 9.f), pour tous les échantillons mesurés ou par classe de diamètre, et relation entre le ratio de poids frais 2019/2011 (traduisant la dégradation du bois) et la taille initiale des échantillons (9.g et 9.h).

En 2011 comme en 2019, la correspondance entre poids frais et volume est quasiment parfaite pour la moyenne par classe de diamètre (*figures 9.e et 9.f*), gommant la variabilité au sein des classes. La densité moyenne des échantillons par classe de diamètre est donc très homogène (cf. aussi *figure 13*), ce qui justifie une extrapolation à l'ensemble du système racinaire.

La variabilité du poids frais en 2019 (*fig. 9.c*) augmente par rapport à 2011 avec la dégradation des échantillons. Mais en valeurs relative elle reste homogène entre classes (*fig. 9.d*), montrant que la dégradation a été variable dans toutes les classes. Cette dégradation se traduit par l'hétérogénéité des ratios entre poids frais 2019 et 2011 (*figure 9.g*). Ces ratios sont aussi légèrement différents entre classes de diamètre, plus élevés pour les gros diamètres (*fig. 9.h et 10.a*), ce qui tendrait à montrer une dégradation moyenne un peu plus faible pour ces derniers (dans la *figure 10.a*, en se basant sur la *fig. 9.h*, on a regroupé les classes 2-3 et 8-10).

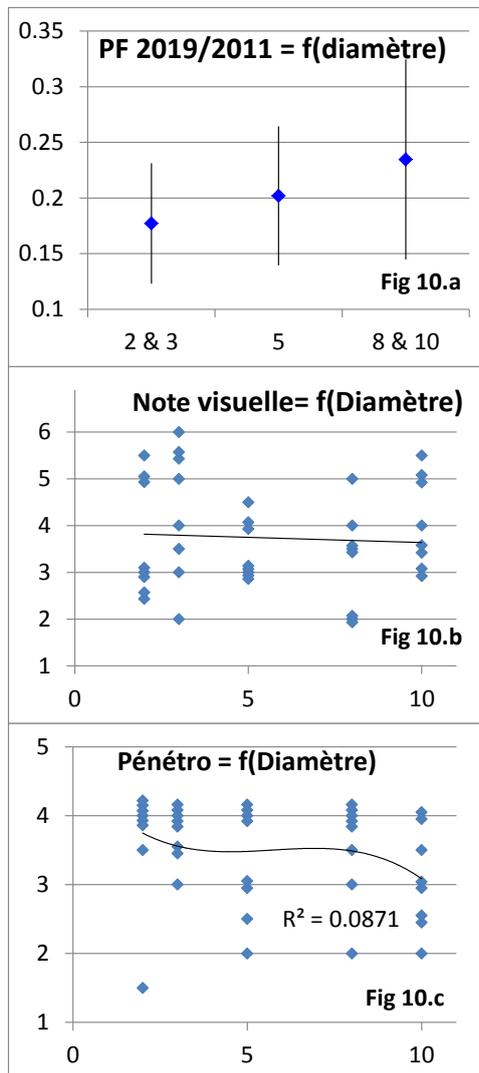


Figure 10 : variabilité de la note visuelle, du test de pénétrométrie et du ratio de poids frais 2019/2011 en fonction de la classe de diamètre des échantillons.

Si les notes de dégradation visuelle, donc l'aspect extérieur des échantillons, ne diffèrent pas du tout entre diamètre (*figure 10.b*), les tests de pénétrabilité (*Figure 10.c*) confirment que le bois intérieur des gros diamètres (classe 10) a mieux résisté à la dégradation. Un seul échantillon de petit diamètre (2-3 cm) a conservé un bois dur, les autres étant pénétrables et même friables pour certains. Dans les plus gros diamètres (10), une majorité est restée relativement ferme à dure, avec cependant plusieurs échantillons très mous.

Des racines de pin d'Alep de tous diamètres présentent donc des niveaux de dégradation avancée après 7 ans passés dans le sol (note ≥ 5 *fig 10.b*, pénétrométrie ≥ 3.5 , *fig. 10.c*). Le bois de 30% des échantillons, dont certains dans toutes les classes de diamètre, a perdu sa cohérence. Ces échantillons se déforment sous la pression des doigts, se cassent très facilement ou montrent des fissures et pertes de morceaux suffisants pour devenir perméables à l'eau dans le sens longitudinal. Ils commenceraient donc à présenter un danger potentiel pour la pénétration de l'eau dans un corps de digue. De plus, la plupart ont une écorce décollée du bois, avec un espace suffisant entre bois et écorce pour permettre la circulation directe d'eau, en raison de la déformation des écorces et de la rétraction du bois dans les périodes de dessèchement du sol.

2.2 Poids sec et humidité relative des échantillons

Le poids sec des échantillons dépend logiquement de leur volume (*figure 11.a*), mais pas de leur état de dégradation, que ce soit visuellement ou en pénétrabilité comme le montre une régression PLS combinant volume, état visuel et pénétrabilité (*figure 12.a*). Par contre, le ratio entre bois sec et bois frais (humidité relative au moment du déterrage), qui donne une indication de la porosité du bois, répond au niveau de dégradation (*figure 12.b*) : plus le bois a perdu de substance, donc plus sa densité a diminué, plus grande est la proportion d'eau qu'il

est supposé capable de contenir. Le taux d'humidité relative des échantillons peut être variable en fonction de l'humidité du sol au moment de l'extraction et dans les semaines précédentes.

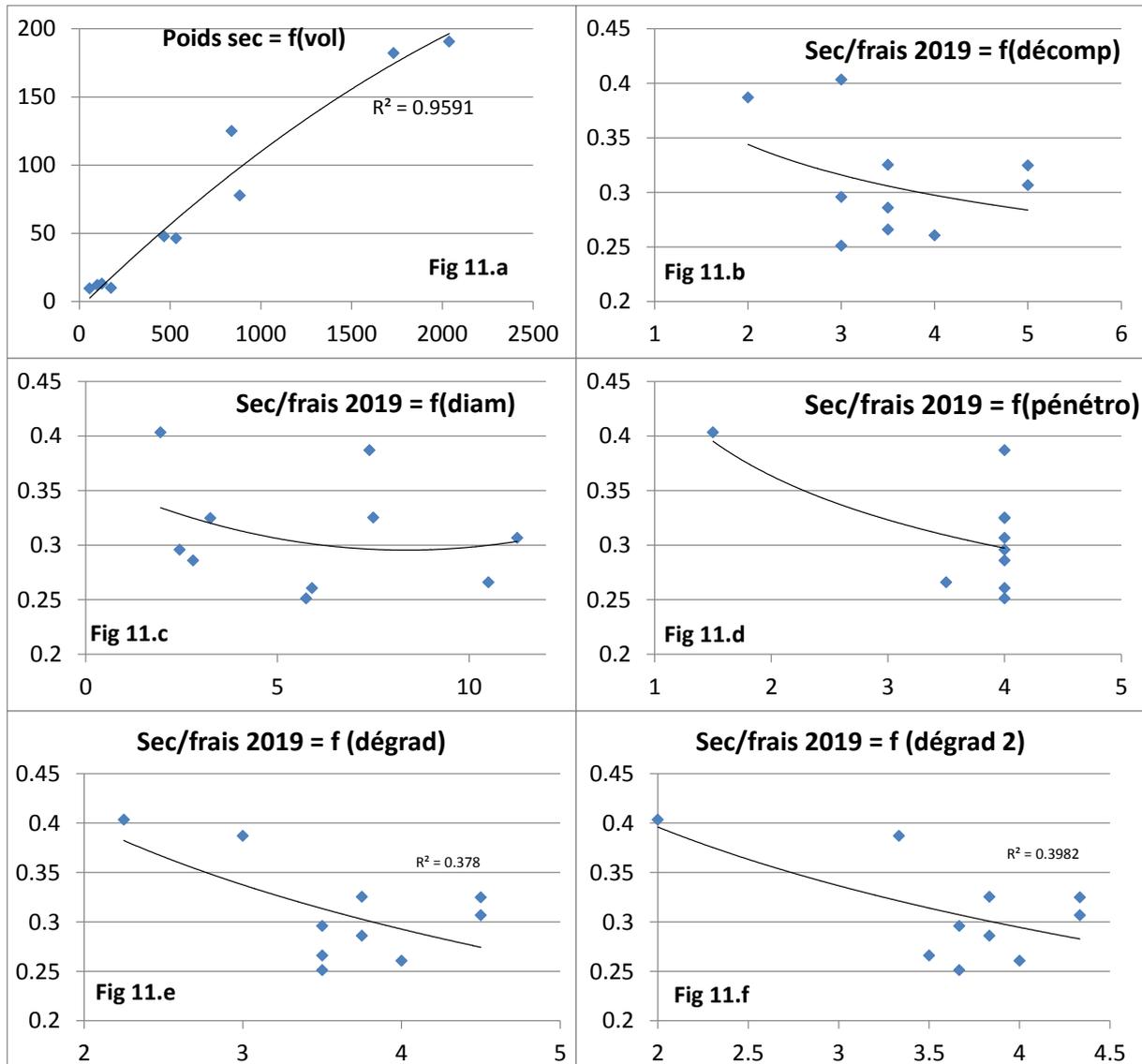


Figure 11 : relations entre le poids sec (11.a) ou le ratio poids sec/poids frais (11.b-11.f) et les caractéristiques des échantillons (volume, diamètre moyen, état visuel, pénétrabilité).

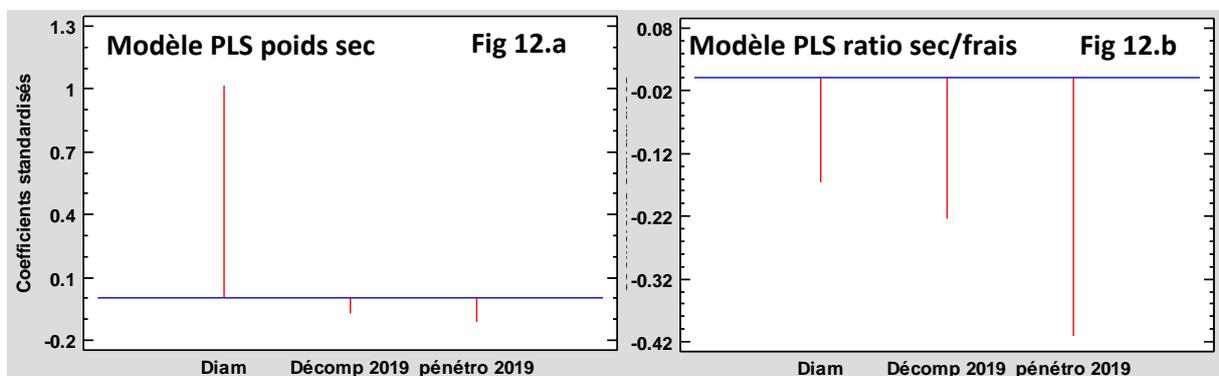


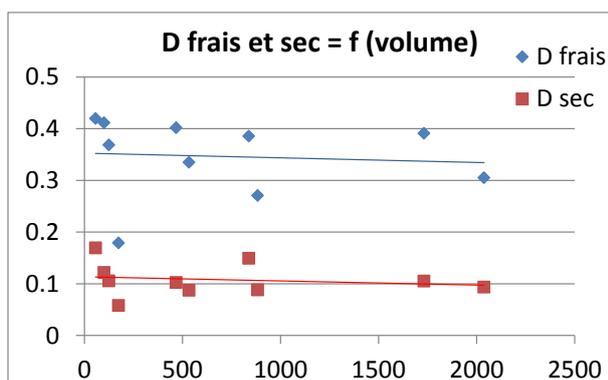
Figure 12 : modèles de régression PLS pour le poids sec et le ratio poids sec/poids frais. La taille des barres verticales donne le poids relatif des variables dans le modèle.

Dans ce cas, en 2019, le sol était déjà très sec et les mois de janvier à mars 2019 ont été exceptionnellement secs. Les échantillons n'étaient donc pas dans leur état d'humidité maximale potentielle. Les gros mettant plus de temps que les petits à perdre leur eau excédentaire, le résultat aurait pu être biaisé, mais la longue durée de la sécheresse antérieure à l'étude permet de penser que l'état d'équilibre entre le sol et les échantillons de toutes tailles était atteint. Les études précédentes (Bambara 2016) montrent que c'est d'abord la cellulose et les hémicelluloses qui se décomposent et font perdre au bois sa densité, la lignine étant beaucoup plus récalcitrante.

Les échantillons en séchant ont perdu entre 25% et 40% de leur masse, ce qui correspond à leur humidité relative. Les corrélations entre l'humidité relative et le diamètre (*figure 11.c*) ou les niveaux de dégradation (visuelle et pénétrométrie *figures 11.b et 11.d*) sont très faibles et non significatives, car la variabilité est très forte et les tendances ne dépendent que d'un ou deux points. Une régression PLS montre que la combinaison des trois variables explique mieux l'humidité relative des échantillons, en donnant un peu plus de poids à la pénétrométrie, ce qui est logique puisqu'elle traduit l'état du bois en profondeur. Nous avons donc testé les relations entre l'humidité relative et une combinaison des notes de pénétrométrie et de décomposition visuelle, soit par leur moyenne (dégrad : *figure 11.e*) soit par leur combinaison pondérée (dégrad 2 - deux fois plus de poids pour la pénétrométrie que pour la décomposition visuelle comme indiqué par la régression PLS: *figure 11.f*). Dans les deux cas la relation s'améliore par rapport aux variables seules, mais reste faible et peu robuste en raison du faible nombre de points et de leur variabilité forte.

2.3 Densité des échantillons

L'humidité relative des échantillons dégradés dépend théoriquement, et au moins en partie, de la densité de leur bois, à cause des pertes de matière qui permettent à l'eau de s'infiltrer : nous avons donc étudié les relations entre cette densité et l'ensemble des paramètres mesurés pour les échantillons récoltés en 2019 (2 échantillons par classe de diamètre). Conformément à ce



qui a été constaté sur les moyennes de densité fraîche par classe de diamètre pour l'ensemble des échantillons du dispositif, (*figure 9*), les échantillons récoltés en 2019 n'affichent aucune relation entre densité sèche et taille (*figure 13*).

Figure 13 : relation entre la densité du bois frais et sec et le volume des échantillons (donc leur diamètre).

L'humidité relative du bois n'est que modérément liée à sa densité sèche. Seuls les deux échantillons les plus denses se distinguent par un ratio du poids bois sec/bois frais élevé, donc une faible humidité relative (*figure 14.a*). Il n'y a par contre aucune relation entre l'humidité relative et la densité humide (pas de graphique), montrant que celle-ci est sans doute une combinaison complexe de la densité sèche, des niveaux de dégradation du bois et de caractéristiques propres à chaque échantillon (pourcentage d'écorce, de bois de cœur, etc...).

Les densités sèches et fraîches sont assez bien corrélées (*figure 14.b*). Les échantillons ont donc perdu de l'eau en majorité dans les mêmes proportions quelle que soit leur densité

initiale, avec cependant une perte légèrement moins forte en moyenne pour les plus denses à cause des deux échantillons particuliers déjà visibles sur la *figure 14.a*.

Les densités fraîches et sèches décroissent avec le niveau de dégradation des échantillons. Elles sont sensibles au niveau de décomposition visuelle (*figures 14.c et 14.e*), surtout à ses valeurs les plus élevées pour la densité fraîche. La relation avec la pénétrabilité ne peut pas être étudiée avec si peu d'échantillon, car 8 sur 10 ont la même note de 4 (cf. *figure 11.d*). Par contre, si on introduit cette dureté du bois dans l'indice synthétique "dégradation" combinant les deux notes, comme dans les *figures 11.e et 11.f*, la corrélation devient forte (*figures 14.d et f*), particulièrement pour le bois sec. Cela confirme que la dureté est un bon indicateur de l'état de décomposition du bois en profondeur.

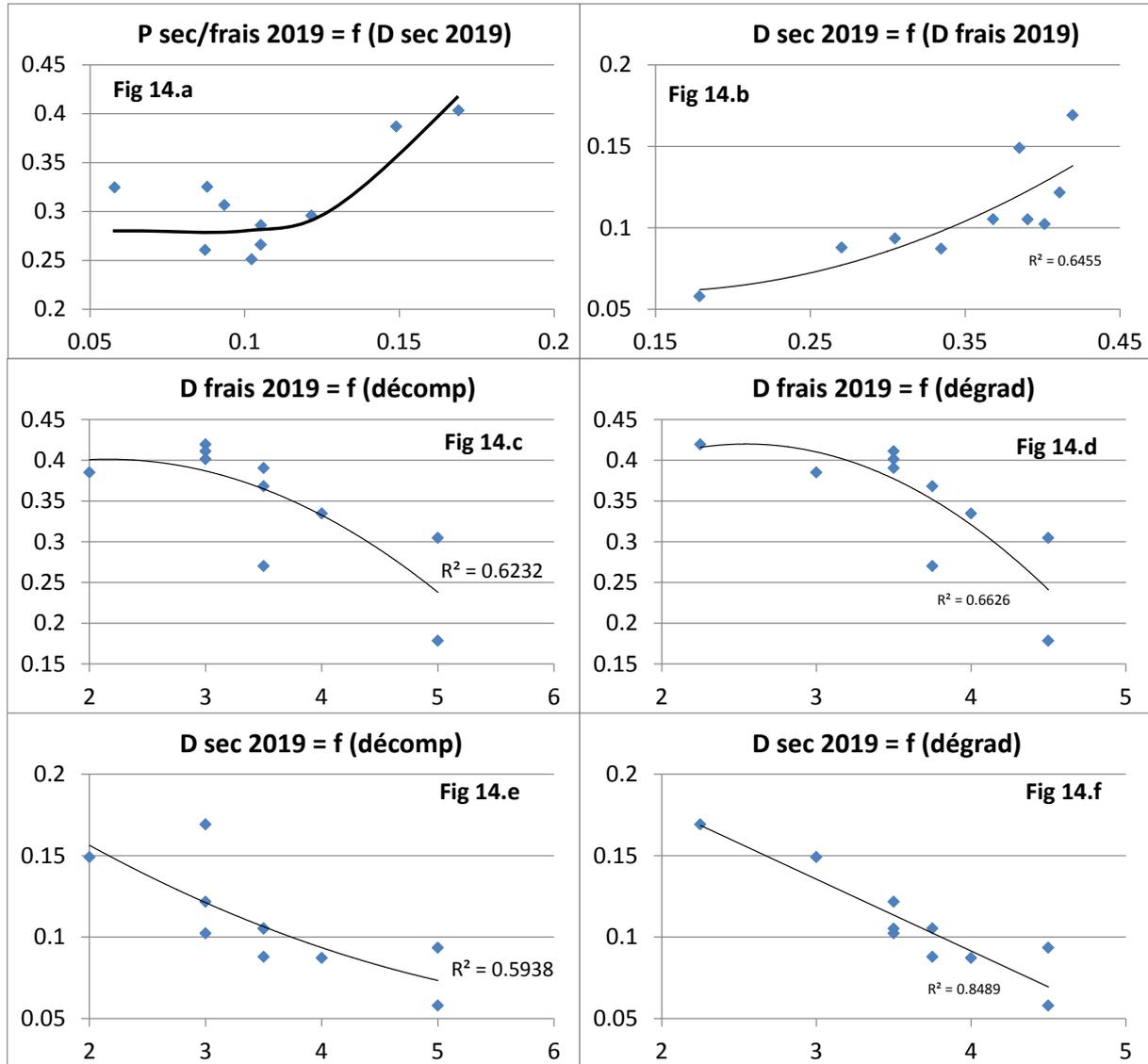


Figure 14 : relations entre la densité des échantillons et les différentes variables de dégradation des échantillons.

3 - Comparaison avec des études similaires

Les racines de pin d'Alep sous climat méditerranéens se montrent plus facilement et plus rapidement dégradables que celles d'autres résineux (pin sylvestre et mélèze) étudiés sur des ouvrages situés dans un climat plus froid, mais aussi plus humides (digue du barrage EDF de Castérino, altitude 1500m, Alpes Maritimes) après 10 années d'enfouissement.

Ainsi, des racines de pin sylvestre et de mélèze restent dures après 10 ans d'enfouissement : la moyenne des tests de pénétration varie respectivement de 1.4 à 2.4 et de 1.1 à 1.4 des plus gros aux plus petits échantillons, avec des maximums respectifs de 3 et 1.5. Les notes moyennes de dégradation visuelles varient pour leur part respectivement de 1.6 à 2.6 et de 1.4 à 2.3 avec des maximums de 3 et 2. En d'autres termes, les échantillons les plus dégradés de ces deux espèces ont un aspect visuel similaire aux échantillons les moins dégradés de pin d'Alep. Le climat froid est ici la principale raison de cette résistance : il limite la période d'activité des champignons, insectes et radicules à quelques mois par an en été, malgré l'humidité quasi-permanente.

Par ailleurs, une étude similaire porte sur quatre espèces de feuillus dans la vallée de l'Isère près de Grenoble (chêne, frêne, peuplier et robinier). La dernière extraction des échantillons date de 2014 et s'est déroulée après 6 ans de décomposition, donc à peu près la même durée que pour les pins d'Alep de Mallemort. La *figure 15* détaille les résultats comparés du pin d'Alep et de ces espèces de feuillus.

Pour les petits diamètres (2-3cm), les feuillus se dégradent aussi vite (chêne et peuplier) ou même plus vite (frêne-robinier) que le pin d'Alep, que ce soit visuellement ou pour la dureté.

Pour les diamètres intermédiaires (5-8cm), le pin d'Alep fait partie des moins dégradés visuellement avec le robinier et le peuplier, mais avec le chêne et le frêne il est un des plus dégradés dans la profondeur du bois (forte pénétrabilité). Il y a peu de correspondance entre aspect visuel et dureté du bois en profondeur. Le robinier est de loin resté le plus dur.

Pour les plus gros diamètres (10cm), les feuillus à bois dur (chêne, frêne et robinier) et qui développent un bois de cœur dense et pour certains réputés imputrescible avec l'âge (chêne et robinier) ont logiquement beaucoup mieux résisté pour la pénétrabilité, mais aussi pour la dégradation visuelle. Le peuplier, dont le bois est peu résistant aux attaques de champignons et insectes, s'est dégradé autant que pour les petits diamètres et que le pin d'Alep, et même pour certains échantillons un peu plus que le pin d'Alep. Le robinier est resté le plus dur, comme pour les diamètres intermédiaires, bien qu'en moyenne le plus dégradé extérieurement, notamment en raison d'une tendance à se fendre et à éclater sous l'effet des alternances de sécheresse et d'humidité. Son bois de cœur réputé peu putrescible dans le sol (utilisation en piquets) confirme ici sa bonne tenue, au moins à court terme, même s'il est éclaté. Cet éclatement ouvre cependant la voie à la pénétration de l'eau au niveau de ces grosses racines.

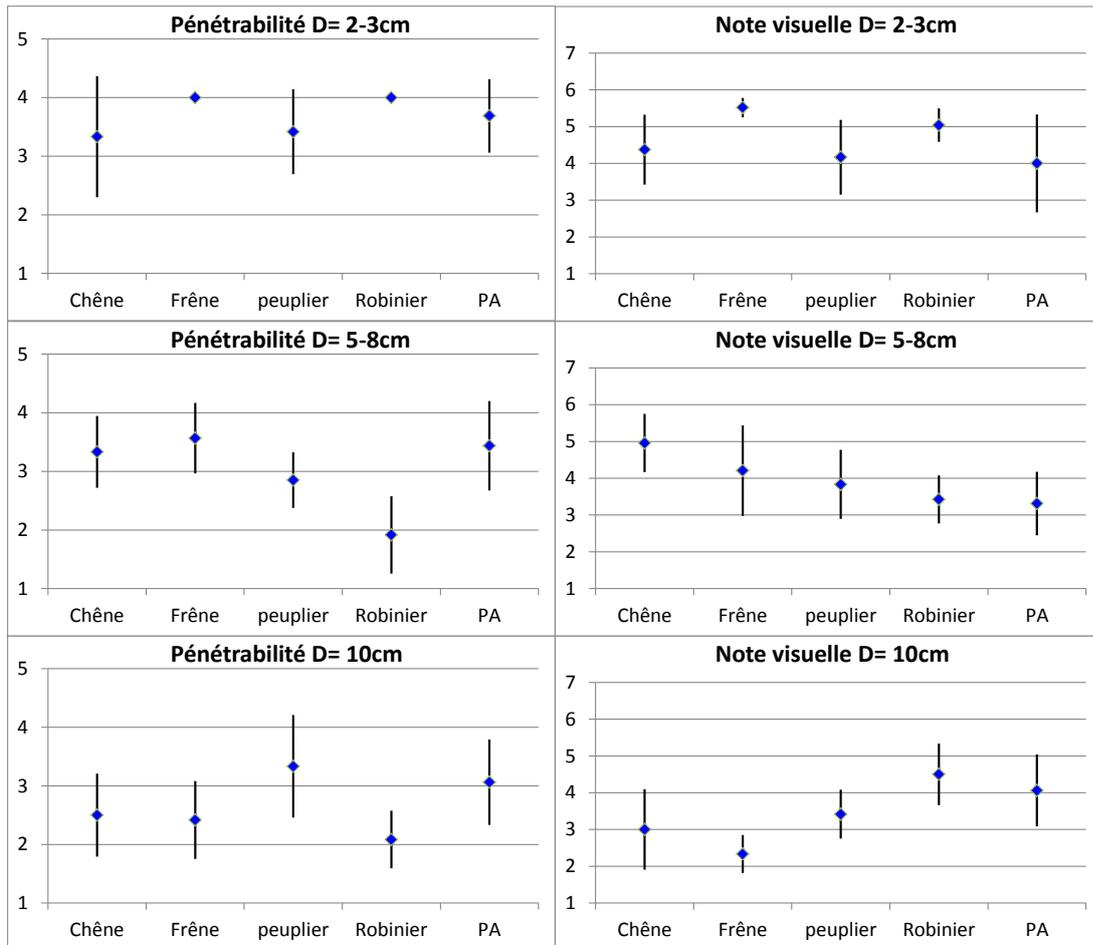


Figure 15 : Moyenne (losanges bleus) et +/- 1 écart type (barre verticale) pour les notes de pénétrabilité et de dégradation visuelle, à 6 ans pour les feuillus dans une digue de l'Isère, 7 ans pour le pin d'Alep (PA) dans la digue de Mallemort.

De façon générale, le pin d'Alep ne diffère pas sensiblement des feuillus pour la dégradation des racines de diamètres petits à moyens, mais semble plus sensible que les feuillus à bois dur pour les gros diamètres.

En raison du faible nombre d'échantillons (6 par classe de diamètre pour les feuillus, 8 pour le pin d'Alep), il faut être prudent avec le détail ces résultats : un à deux échantillons atypiques suffisent à modifier significativement la moyenne et l'écart-type. Il y a parfois une très forte variabilité au sein d'une même classe de diamètre, avec des échantillons à tous les niveaux de dégradation pour une même espèce.

Parce que le poids du climat (température, humidité, variabilité, saisonnalité) est fort dans la vitesse de décomposition des racines, l'extrapolation des résultats par espèce à d'autres régions doit être prudente. De même, le matériau dans lequel se développent les racines, et donc dans lequel elles se décomposent, joue un rôle important par sa capacité de rétention en eau, donc la conservation plus ou moins longue de conditions favorables aux décomposeurs après les pluies. C'est donc la combinaison climat/substrat, permettant d'évaluer la durée annuelle des périodes favorable à la dégradation du bois, qu'il faut prendre en compte.

4 - Conclusions et suites à donner à l'étude 2019

Bien qu'ils soient minoritaires, certains échantillons de pin d'Alep ont conservé une bonne cohérence, malgré la perte de substance du bois. Le dispositif doit donc être maintenu encore quelques années et réanalysé dans 3 ans (2022). On devrait alors obtenir une désintégration du bois des échantillons actuellement les plus dégradés, et un niveau avancé de dégradation pour ceux qui ont jusqu'à maintenant le mieux résisté. On a en effet observé dans le dispositif de l'Isère, mesuré à 2, 4 et 6 ans, que la dégradation s'était fortement accélérée entre 4 et 6 ans. Il en est sans doute de même pour le pin d'Alep.

Dans la mesure où les racines de pin d'Alep ne pénétraient pas dans le corps de la digue de Belle-Plaine, le danger pour cet ouvrage était et reste limité. Mais la dégradabilité rapide des racines de pin d'Alep est susceptible de poser des problèmes de sécurité sur d'autres ouvrages, dès 6 à 7 ans après la mort ou la coupe des arbres et l'abandon de leur système racinaire.

Bibliographie

Bambara G. 2016. Evaluation de la performance des ouvrages hydrauliques en remblai soumis à la présence de végétation arborescente. Thèse de doctorat, Irstea, Aix-Marseille Université, 268 P.

Vennetier M., Mériaux P., Zanetti C. 2015. Gestion de la végétation des ouvrages hydrauliques en remblais: guide technique. Irstea, Cardère éditeur, 232 p.; ISBN 978-2-914053-84-6

Vennetier M., Zanetti C., Cailleret M. - 2019. Etude de la décomposition des racines de conifères, digue de fermeture du barrage de Casterino: compte rendu après l'intervention d'octobre 2018 et synthèse après 10 ans de décomposition. Irstea - EDF, ?? p.

Zanetti C., Mériaux P., Vennetier M., Etude de l'enracinement des arbres dans les digues de protection contre les crues de l'Isère, Cemagref / AD-IDR, Juillet 2009, 40p.

Zanetti C., Vennetier M., Mériaux P., Piana C. - 2012. Etude de l'enracinement des pins d'Alep et peupliers noirs dans la digue de Belle Plaine. IRSTEA, EDF, 32 p.

ANNEXES

Annexe 1 :

Position et localisation GPS (+/- 3m) du site d'enfouissement. Des piquets indiquent les limites de la zone d'enfouissement.



(image © Google Map)

Annexe 2

Classes de dégradation visuelle et pour le test de pénétration au couteau.

Dégradation visuelle

Classe de dégradation	Description des classes
1	- Écorce intacte - Peu de signes de dégradation (peut-être trous, craquellements) - Racines peu flétries
2	- Ecorce présente à plus 50 % - Quelques morceaux manquants - Petites surfaces dégradées
3	- Moins de 50% de l'écorce est présente - Fissures - Morceaux manquants
4	- Peu d'écorce - Contour déformé par pertes de gros fragments de bois - Aubier manquant
5	- Plus d'écorce - Bois déformé et fibreux - Attaque bois de cœur
6	- Etat sciure - Effondrement de la structure - Impossible à manipuler

Pénétration du couteau standard

Classe de dégradation	Description des classes
1	Bois dur, lame du couteau pénètre juste de quelques millimètres dans le bois
2	Bois assez dur, la lame du couteau pénètre de 1 à 2 cm dans le bois
3	Bois assez mou, la lame du couteau pénètre facilement dans le bois (la moitié de la lame)
4	Bois mou, la forme du tronc est déformée, la lame entière du couteau pénètre facilement dans le bois



Annexe 3

3.a - Tableaux de mesures 2011

	DIAM + N° Panier	Diam D (cm)	Diam A (cm)	Long (cm)	Vol 2011	Ecorce	Poids frais 2011	Remarques initiales
PA02	Bleu.2.A.1	1.9	2	19	56.7431	1	87.7	
	Bleu.2.B.2	2.4	2.5	21.1	99.4728	3	121.5	
	Noir.2.A.3	2.7	2.4	21	107.248	1	107.7	
	Noir.2.B.4	2.5	2.4	20.4	96.1728	1	97	
	Roug.2.A.5	2.4	2.2	20.2	83.9261	2	108.9	
	Roug.2.B.6	2.5	2.4	20.4	96.1728	1	97	
	Vert.2.A.7	1.9	1.9	19.5	55.2881	2	64.8	
	Vert.2.B.8	1.9	1.8	21	56.4485	1.5	71.5	
moyenne	2.28	2.20	20.33	81.43	1.6	94.5		
PA03	Bleu.3.A.1	2.9	2.7	20.2	124.382	2	141.7	
	Bleu.3.B.2	3.2	3.3	21	174.211	3.5	187.5	E
	Noir.3.A.3	2.5	2.5	20	98.1748	2	137.5	CS
	Noir.3.B.4	2.8	3.3	21.5	157.083	2	200.3	
	Roug.3.A.5	2.7	2.5	20.5	108.84	1	124.1	
	Roug.3.B.6	2.8	3.3	21.5	157.083	2	200.3	
	Vert.3.A.7	3.9	3	20	186.964	2	193.7	E
	Vert.3.B.8	3.2	3.5	20	176.283	2	157.6	
moyenne	3.00	3.01	20.59	147.88	2.06	167.84		
PA05	Bleu.5.A.1	5.5	6	18	467.41	3	507.8	
	Bleu.5.B.2	5.9	5.9	19.5	533.124	3	402.1	E
	Noir.5.A.3	5	5.5	21.5	465.422	2	461.8	
	Noir.5.B.4	5	4.9	19.8	381.036	1	380.9	
	Roug.5.A.5	4.6	4.5	19.5	317.064	2	356.3	
	Roug.5.B.6	5	4.9	19.8	381.036	1	380.9	
	Vert.5.A.7	4.9	5.9	20.5	469.495	3	453.1	
	Vert.5.B.8	5.5	5.7	22	541.862	3	583.9	E-
moyenne	5.18	5.41	20.08	444.56	2.25	440.85		
PA08	Bleu.8.A.1	7.5	7.3	19.5	838.664	2	705.7	CS
	Bleu.8.B.2	7.5	7.5	20	883.573	2	948.5	
	Noir.8.A.3	7.3	8.3	21.5	1027.35	4	981.2	
	Noir.8.B.4	7.5	8.5	21	1055.58	3	948.5	E++
	Roug.8.A.5	8	7.5	20.5	967.046	2.5	920.9	
	Roug.8.B.6	7.5	8.5	21	1055.58	3	948.5	E++
	Vert.8.A.7	8.9	13.5	21	2068.93	4	1293.5	
	Vert.8.B.8	7.2	7.5	19	806.154	3.2	712.3	
moyenne	7.68	8.58	20.44	1087.86	2.96	932.39		
PA10	Bleu.10.A.1	10.5	12	20.5	2037.74	3	1786.2	E
	Bleu.10.B.2	11	10	20	1731.8	2	1499.4	E
	Noir.10.A.3	10.5	13.5	19	2148.85	5	2013.7	CS
	Noir.10.B.4	13	12.5	22.5	2872.72	5	2320.5	
	Roug.10.A.5	9.2	10.5	19	1447.82	2	1338.2	E
	Roug.10.B.6	13	12.5	22.5	2872.72	5	2320.5	
	Vert.10.A.7	9.5	9.5	20	1417.64	4	1414.2	E
	Vert.10.B.8	9.4	8.9	21.2	1394.02	3.5	1510.1	E
moyenne	10.76	11.18	20.59	1990.41	3.69	1775.35		

R = Ram ; C = Coude ; E = Ecorcé ; F = Fendu ; Co² = Double cœur ; L = Liquide (+) = beaucoup ; Ch = Champignon Blanc ; Rad = Radicelles entre écorce et bois ou traversent l'écorce ; dec = début décollement - desquamation écorce encore en place mais molle; DEC = Ecorce fortement décollée; Chj = champignon jaune

3.b - Tableau de mesures 2019

	Décomp 2019	pénétré 2019	Poids frais terrain 2019	Poids frais labo 2019	Poids sec 2019	Photo 2019	Remarque 2019
PA02	3	1.5	21	23.8	9.6	5882	Ch, écorce totalement décollée ou disparue
	3	4	22	40.9	12.1	5887	Ch, écorce détachée 80%, bois noir en surface
	2.5	4	28			5893	cassé, radicelles, écorce décollée, présente 70%
	5.5	4	12			5898	cassé, moitié disparue, écorce reste mais décollée
	3	4	24			5903	Ch, écorce 100% décollée, 60% tombée
	2.5	3.5	11			5908	Aucune écorce
	5	4	11			5913	Cassé, gros morceau tombé, écorce partie adhérente
	5	4	9			5918	Cassé, écorce 100 décollée, perdue 50%
	3.69	3.63	17.3	32.4	10.9		
PA03	3.5	4	39	45.8	13.1	5883	Ch, qq radicelles, cassé en 2
	5	4	29	31.1	10.1	5888	qq radicelles, cassé en 2, qq morceaux détachés
	5.5	4	22			5894	Cassé en 2, écorce décollée tombe en lambeaux
	5.5	4	43			5899	Ch, qq radicelles, cassé en 2, écorce toute décollée
	4	3	16			5904	pas d'écorce, cassé en 2
	3	3.5	22			5909	Ch, cassé, écorce 100% décollée, 50% disparue
	2	3.5	42			5914	Ch, écorce non adhérente présente 100%
	6	4	22			5919	Cassé, écorce décollée 100%, tombée 50%
	4.31	3.75	29.4	38.5	11.6		
PA05	3	4	92	190.3	47.8	5884	Ch, qq radicelles, écorce toute décollée, perdue >50%
	4	4	99	178.4	46.5	5889	qq radicelles, écorce détachée >80%
	3	2	123			5895	Ch, écorce perdue > 60%
	3	4	111			5900	Ecorce présente 100% mais décollée >70%
	4	3	70			5905	Ch, écorce 100% détachée, 25% tombée
	4.5	4	53			5910	Ch, cassé, écorce décollée
	3	3	84			5915	Ch, radicelles, écorce tombée 20%, trait de scie
	3	2.5	64			5921	Ch, écorce largement décollée, perdue 10%
	3.44	3.31	87.0	184.4	47.2		
PA08	2	4	179	323	125	5885	Ecorce perdue > 50%
	3.5	4	150	238.8	77.7	5890	Ch, Radicelles, écorce présente >80% mais décollée
	2	3	348			5896	Ecorce décollée, présente 90%
	3.5	2	376			5901	Ch, bois noir, écorce perdue >70%
	4	4	161			5906	Ch, écorce entière, en partie décollée
	3.5	3.5	211			5911	Ch, bois noir, écorce décollée 10%, perdue 40%
	5	4	211			5916	reste peu d'écorce, bois se délite sur 50%
	2	4	109			5923	Ch, écorce décollée mais entière
	3.19	3.56	218.1	280.9	101.4		
PA10	5	4	375	621.1	190.5	5886	Ecorce 100% décollée détachée
	3.5	3.5	453	684.9	182.2	5891	Ch, écorce presque entièrement détachée
	4	2	592			5897	Ecorce totalement détachée, grosses fentes
	3	3	930			5902	Ch, écorce décollée et détachée 100%
	5	2.5	274			5907	Cassé, manque 1 bout, écorce décollée 100%
	3.5	3	329			5912	écorce décollée en partie, perdue 25%
	5.5	4	281			5917	manque écorce, bois en lambeaux 30% surface
	3	2.5	190			5924	Ch, écorce largement décollée, entière
	4.06	3.06	428.0	653.0	186.4		

R = Ram ; C = Coude ; E = Ecorcé ; F = Fendu ; Co² = Double cœur ; L = Liquide (+) = beaucoup ; Ch = Champignon Blanc ; Rad = Radicelles entre écorce et bois ou traversent l'écorce ; dec = début décollement - desquamation écorce encore en place mais molle; DEC = Ecorce fortement décollée; Chj = champignon jaune

Annexe 4

Photos d'échantillons représentatifs des niveaux de décomposition

4.1 Petits diamètres (2 et 3 cm)



Échantillon 3 cm, écorce entièrement présente bien que non adhérente, pas de signe de dégradation du bois (décomp. 2) mais bois mou (pénétré 3.5)



Échantillon 2 cm, écorce entièrement partie, mais bois bien conservé (décomp. 3) et resté dur (pénétré 1.5)



Échantillon 3 cm, écorce en partie présente mais non adhérente, décomposition du bois qui se fragmente et se délite (décomp. 5.5) et bois très mou (pénétré 4)



Échantillon 2 cm, écorce en partie adhérente, décomposition du bois qui se casse et se délite sur moitié de l'échantillon (décomp. 5) et bois très mou (pénétré 4)

4.2 Diamètres moyens et gros (5 à 10 cm)



Échantillon 8 cm, écorce entière mais toute décollée, racelles et champignons abondants sous écorce, fissures sur les faces (décomp. 3.5) bois peu dégradé extérieurement mais très mou (pénétré 4)



Échantillon 5 cm, écorce en partie présente mais décollée, bois sans décomposition visible extérieure ni fragmentation (décomp. 3) mais très mou (pénétré 4)



Échantillon 8 cm, écorce perdue à 70%, bois noirci, champignon en surface, sans fragments (décomp. 3.5) Mais bois resté très dur (pénétré 2)



Échantillon 10cm, fendu, morceau disparu, racelles sous écorce, écorce toute décollée, bois fissuré, se délite en surface (décomp. 5) mais bois resté dur (pénétré 2.5)