



HAL
open science

Étude de la décomposition des racines de conifères digue de fermeture du barrage de Casterino : rapport d'étape après 10 ans de décomposition et compte rendu après l'intervention d'octobre 2018

M. Vennetier, C. Zanetti, Maxime Cailleret, G. Bambara

► To cite this version:

M. Vennetier, C. Zanetti, Maxime Cailleret, G. Bambara. Étude de la décomposition des racines de conifères digue de fermeture du barrage de Casterino : rapport d'étape après 10 ans de décomposition et compte rendu après l'intervention d'octobre 2018. irstea. 2019, pp.37. hal-02609823

HAL Id: hal-02609823

<https://hal.inrae.fr/hal-02609823v1>

Submitted on 16 May 2020

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 CONIFERES

DIGUE DE FERMETURE DU BARRAGE DE CASTERINO

Rapport d'étape après 10 ans de décomposition
et compte rendu après l'intervention d'octobre 2018

**Auteurs : Michel Vennetier, Caroline Zanetti,
Maxime Cailleret, Gisèle Bambara**

Avec la collaboration de :

Camille Gresset, Sebastien Tourrette, Geoffrey Blanc,
Maxime Brugier, Roland Estève, Mathieu Audouard,
et Christian Travaglini

Groupe de Recherche RECOVER
Equipes EMR / G2DR

Groupement d'Aix-en-Provence
3275, Route de Cézanne
CS 40061
13182 Aix-en-Provence Cedex 5
Tél. 04 42 66 99 10 - Fax 04 42 66 88 65

Mai 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
C - Rappel des recommandations énoncées en 2009	8
2 - Etude expérimentale de la décomposition des racines	9
A- Objectif de l'expérimentation sur la décomposition racinaire	9
B - Localisation du dispositif expérimental	9
C - Méthodologie et mise en place du dispositif	10
C.1. Conception du dispositif	10
C.2. Mise en place en 2009	11
C.3 - Protocole de mesures et observations à chaque déterrage	13
➤ Sur le terrain	13
➤ Au laboratoire	14
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
C - Spectroscopie proche infra-rouge	25
D - Interprétation synthétique des résultats	27
D.1 - Etat visuel et pénétrométrie	27
D.2 - Poids et densité des échantillons	30
D.3 - Spectroscopie proche infra-Rouge (SPIR)	31
E - Comparaison avec des essais similaires	32
4/ Conclusions et perspectives	33
Bibliographie	34
Annexes : Tableaux des évolutions visuelles et dégradations	
Mélèze	30
Pin sylvestre	

RESUME Méthodes

Ce rapport fait le bilan, au bout de neuf années, du dispositif de suivi de la dégradation des racines de pin sylvestre et de mélèze enfouies dans le sol à proximité de la digue de fermeture du barrage de Casterino. Pour chaque espèce, six groupes d'échantillons de racines, comportant chacun différents diamètres (2 ; 3 ; 5 ; 8 et 10 cm) ont été enterrés en 2009 à 50 cm de profondeur dans un matériau très proche de celui de la digue, et à proximité immédiate de celle-ci. En 2011, 2013, 2015 et 2018, les échantillons ont été retirés du sol, observés et pesés. Puis ils ont été remis en place sauf un des groupes à chaque fois, qui a été définitivement retiré et ramené au laboratoire afin de subir des mesures et analyses complémentaires après séchage.

La dégradation des racines est évaluée par différentes méthodes : aspect visuel, test de dureté du bois par résistance à la pénétration d'une lame calibrée, poids et densité des échantillons au moment de leur déterrage et, pour le groupe retiré à chaque mesure, poids et densité après séchage, et enfin analyses chimiques et spectroscopie infra-rouge.

Résultats

L'aspect visuel des racines montre une dégradation superficielle progressive, à peine amorcée en 2011, s'accéléralant ou se poursuivant entre 2013 et 2018. Cette dégradation, plus rapide en moyenne sur les racines de petite dimension (2 et 3 cm de diamètre), se traduit par divers symptômes : (1) le décollement des écorces et leur ramollissement, ou leur exfoliation en petites plaques fines, parfois leur perte partielle au moment du déterrage; (2) la prolifération, sous l'écorce et sur les faces, de mycéliums de champignons qui deviennent avec le temps plus adhérents et plus denses; (3) la pénétration et l'installation, sous l'écorce, de fines racines provenant de végétaux voisins. Le phénomène est quasi généralisé chez le pin sylvestre et fréquent chez le mélèze. Il contribue au décollement de l'écorce, et parfois à sa fragmentation.

On note parallèlement une moindre résistance du bois à la pénétration de la lame. Le pin sylvestre perd plus rapidement et régulièrement sa dureté et sa densité que le mélèze. Ce dernier n'a quasiment pas perdu de dureté sur les 5 dernières années.

La perte de densité du bois frais et sec s'accélère avec le temps : -20% pour les deux espèces après 6 ans et -40 à -70% après 10 ans, la perte étant d'autant plus forte que le diamètre est petit chez le pin sylvestre. La densité des échantillons et leur capacité d'imbibition, ainsi que la réponse de leur bois en spectroscopie proche infra-rouge, montrent des transformations chimiques significatives dès deux ans de séjour dans le sol, ayant peu évolué à 4 ans mais s'accéléralant entre 4 et 6 ans.

Conclusion:

La vitesse de dégradation des racines est moins rapide dans cette zone de montagne que celle observée pour différents feuillus ou résineux en zone de plaine humide ou méditerranéenne. En cause sans doute, la période estivale, favorable aux décomposeurs que sont les insectes, champignons et bactéries, qui est beaucoup plus courte en montagne. Au bout de 10 années sous terre, le bois des deux espèces reste assez dur et cohérent, et ne s'est pas encore décomposé en profondeur. Mais on peut noter une dégradation avancée de l'écorce des petits diamètres et leur forte perte de densité, et un décollement assez généralisé des écorces de tous les diamètres par rapport au bois. L'intervalle entre bois et écorce est susceptible de favoriser la circulation d'eau. L'eau ainsi confinée sous l'écorce ne pourrait pas entraîner directement des matériaux, mais pourrait s'échapper à l'occasion de défauts dans l'écorce créés par les radicelles qui la pénètrent. Ce serait suffisant pour imbiber les matériaux alentour, initier des zones d'érosion interne, ou pour pénétrer, le long des racines, dans un matériau par ailleurs imperméable.

Le dispositif doit être maintenu encore quelques années et réanalysé dans 3 ans, pour espérer détecter le début de décomposition du bois, qui ne devrait plus tarder.

Préambule

L'expérimentation sur la décomposition racinaire a été mise en place en juin 2009 vers le pied aval de la digue rive droite de fermeture du barrage de Castérino. Soixante échantillons de racines de mélèze et pin sylvestre ont été enterrés à 50 cm de profondeur. L'objectif est de les déterrer tous les 2 à 3 ans, tant que cela sera jugé utile, le délai pour la prochaine intervention étant décidé à chaque prélèvement pour le suivant en fonction de la vitesse observée de décomposition.

Le présent rapport fait la synthèse des résultats obtenus suite aux déterrages successifs d'échantillons en 2011, 2013, 2015 et 2018

En 2015, les échantillons ont été déplacés en rive gauche après les mesures, en prévision de travaux prévus sur le site. Ils ont conservé leur place en 2018.

1 - Problématique générale et objectifs de l'étude

A - Localisation du site

Le site d'étude de Castérino est situé à l'extrême nord-est des Alpes Maritimes, à proximité de la vallée des Merveilles dans la haute vallée de la Roya. Le climat est issu d'influences alpines et méditerranéennes, ce qui se traduit par un ensoleillement important avec de grosses chaleurs d'été et une abondance de neige en hiver (qui perdure parfois jusqu'en juillet). Afin d'assurer la pérennité et l'efficacité des prises d'eau à vocation hydroélectrique, le régime torrentiel des cours d'eau alpins est à prendre en considération, notamment pour leurs importants apports sédimentaires en aval.

Le chantier a été consacré à l'aile de fermeture rive droite du barrage de Castérino (**Photo 1**), sur laquelle des mélèzes et des pins sylvestres s'étaient installés (**Photo 2**). L'aménagement est un petit barrage poids-voûte en maçonnerie, construit par les italiens au début du XX^{ème} siècle, en amont de la prise d'eau de Castérino (alt. 1500 m). Sa fonction est de protéger la prise d'eau qui alimente l'usine hydro-électrique des Mesches, par le stockage d'une partie de la charge solide de la rivière du Val de Castérino. En rive gauche, le barrage s'appuie sur le versant alors qu'en rive droite, un remblai d'environ 80 mètres de longueur assure la fermeture de la cuvette. Cette dernière est quasi-complètement engravée et ce, depuis plusieurs années. Il est possible de constater la présence d'aménagements de confortement, notamment à l'amont du déversoir en rive gauche où se trouve un enrochement en dur fait de blocs (**Photo 3**).

La digue de Castérino est un remblai hydraulique à charge transitoire, ayant un rôle de fermeture de la retenue du barrage lors des crues, avec présence avérée par sondage [Durouchoux TEGG, 2008] d'un noyau étanche et cohésif à faible profondeur. Le mélèze et le pin sylvestre sont des essences intéressantes à étudier dans le cadre de la sécurité des digues, en particulier le mélèze dont le bois a la réputation d'être imputrescible et qui est une essence de pleine lumière prompte à coloniser les remblais.

Le remblai a fait l'objet d'une dessouchage et d'une réfection généralisée en 2015.



Photo 1 : La digue en rive droite vue de l'amont.

Photo 2 : Mélèzes jadis implantés sur la digue en parement amont, en crête et en pied.

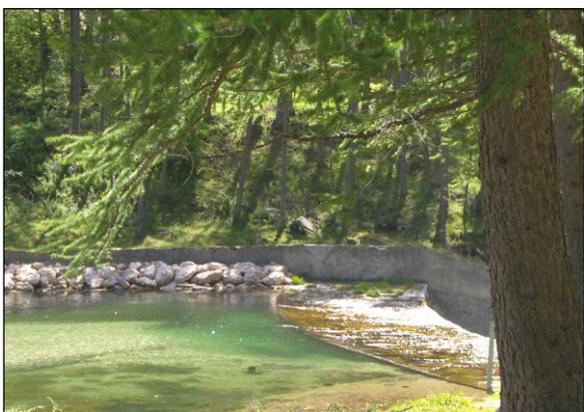


Photo 3 : Enrochement en rive gauche et dépôts sédimentaires dans la retenue, au droit du déversoir.

B - Risques liés aux systèmes racinaires dans les ouvrages hydrauliques

Comme le précise le guide technique ¹ paru en 2015, l'enracinement des arbres génère deux types de risques pour les digues :

- L'érosion externe est liée à l'arrachement d'un arbre (chablis). Ceci peut induire une déstabilisation de l'ouvrage suite à l'ablation, par le système racinaire, d'une loupe de terre plus ou moins importante (**Photo 4** ci-dessous).



Photo 4: Arrachement imprévu d'une partie du remblai lors de l'étude des systèmes racinaires de la digue de Castérino en 2009. La rupture du remblai jusqu'au-delà du milieu de la crête donne une idée de la masse que pourrait emporter un arbre couché par une tempête.
Photo C. Zanetti

¹ Venetier M., Mériaux P., Zanetti C. - 2015. Gestion de la végétation des ouvrages hydrauliques en remblai. Irstea et Cardère Editeur, ISBN 978-2-914053-84-6,

- Ces hétérogénéités de surface favorisent, lors des crues, le développement de courants tourbillonnaires qui sont à l'origine d'affouillements pouvant déstabiliser le talus de l'ouvrage. Enfin, l'arrachement d'un arbre en crête de digue peut créer un point bas et être à l'origine d'une surverse.

- L'érosion interne est aggravée par la présence des systèmes racinaires qui constituent des zones d'hétérogénéité dans le corps de digue. De leur vivant, les racines peuvent contribuer à la stabilité des talus. Mais elles ont aussi une action mécanique défavorable : elles induisent le décompactage de certains matériaux et la déstructuration des revêtements maçonnés ou enrochements lorsque la digue en est dotée. **Après abattage ou mort naturelle des arbres, les racines pourrissent et génèrent un risque de renard hydraulique du fait de la création de conduits, favorisant les circulations d'eau et pouvant conduire à la formation rapide d'une brèche par effondrement.**

Vis-à-vis de la décomposition, l'importance du risque dépend essentiellement de la structure et du volume de l'enracinement (répartition spatiale, nombre, longueur et diamètre des racines), de la position des racines dans le remblai (traversantes ou pivotantes), des dimensions de l'ouvrage et des propriétés des matériaux constituant le corps de digue.

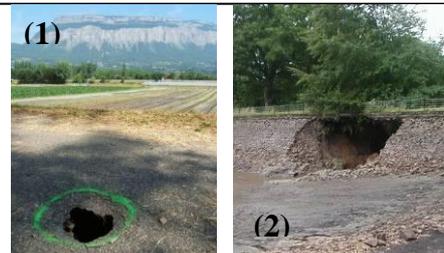
La mise en place d'un dispositif de suivi du pourrissement des racines à proximité du barrage de Castérino a pour objectif de caractériser le phénomène de décomposition racinaire des conifères, c'est-à-dire, d'appréhender comment et à quelle vitesse se décomposent les racines ligneuses des essences concernées, dans le contexte montagnard.

Sur d'autres sites, en plaine, nous avons observé avec un dispositif similaire la décomposition racinaire d'essences feuillues. Nous avons pu identifier les paramètres influençant le risque. Il s'agit principalement de l'architecture racinaire (dimension des racines et position dans l'ouvrage), des propriétés des matériaux, et des propriétés du bois des racines (**Encadré 1**).

Encadré 1:

◦ **En fonction de l'architecture racinaire :**

- Gros pivots = risque d'effondrement (1)
- Grosses racines traçantes et traversantes = risque de renard hydraulique (2)



◦ **En fonction des matériaux :**

- Peu préjudiciable dans les matériaux granulaires (structure et propriétés du remblai conservées)
- Problématique dans les matériaux cohésifs = formation de galeries (3)



◦ **En fonction des propriétés des racines :**

- Diamètre des racines = les racines fines se décomposent plus rapidement que les grosses
- Conservation de l'écorce et dégradation du bois de cœur = galerie interne (4 et 5).
- Décollement ou pourrissement de l'écorce créant un passage entre bois et écorce.



Tandis que les racines traçantes traversant une partie du remblai augmentent le risque de renard hydraulique, les pivots et autres racines sub-verticales peuvent générer des effondrements localisés après décomposition.

Favorisant la circulation de l'eau, les racines en décomposition dans les digues sembleraient avoir un effet moindre sur la structure des matériaux constitutifs de l'ouvrage lorsque le remblai est sablo-graveleux. En effet, le colmatage progressif des racines pourries par les particules fines de sable et le réarrangement spontané des matériaux peu cohésifs évitent la formation de galeries franches. De plus, les propriétés drainantes caractérisant ce type de matériaux ne sont pas fortement modifiées par les racines décomposées, ce qui voudrait dire que le risque de renard hydraulique est peu augmenté.

Par contre, l'observation des traces laissées par les racines (galeries) dans les matériaux fins et cohésifs soulève le problème de la création de véritables conduits dans le corps de digue. Les racines peuvent également créer des conduits lorsque le bois de cœur se désagrège plus rapidement que le bois périphérique ou l'écorce. L'eau peut aussi circuler entre le bois et l'écorce lorsque celle-ci se décolle en début du processus de dégradation.

Lors des travaux en juin 2009 à Castérino, le système racinaire d'arbres préalablement abattus au niveau du collet, sur la partie amont de la digue, a été déterré. Nous les avons excavés à la pelle mécanique afin d'examiner l'état de décomposition des racines. Nous avons pu observer, sur deux souches en décomposition (**Photos 5 et 6**), le squelette laissé par les principales racines de structures dans un rayon d'environ 60 cm autour du collet et la disparition des racines les plus fines. Il s'agissait d'observations basées sur la seule description du phénomène de décomposition : la texture du bois (sciure, copeaux, bois encore consistant) et sa structure (état de conservation du cœur, du duramen, de l'aubier et de l'écorce) ainsi que les traces d'attaques du bois (champignons lignivores ou insectes). Il n'a pas été possible de déterminer l'espèce concernée (mélèze ou pin sylvestre vraisemblablement), ni l'année approximative d'abattage. Par conséquent, nous n'avons pas pu établir de relation entre l'état de décomposition et le temps écoulé depuis l'abattage.

Le bois en décomposition se défibre selon les axes des rayons ligneux et des cernes de croissance. L'avancement de la décomposition est fonction du diamètre des racines et de la distance à la souche. Les grosses racines à proximité de la souche sont partiellement conservées. Les racines plus fines, et les parties des grosses racines plus éloignées de la souche, sont largement ou totalement décomposées et n'ont pas pu être extraites car elles partaient en lambeaux ou en sciure (**Photo 5**). Une certaine variabilité de la décomposition a été observée, liée à des attaques localisées de champignons ou d'insectes (**Photo 6**).



Photo 5 : Etat d'une souche en décomposition



Photo 6 : Traces d'attaques d'insectes

C - Rappel des recommandations énoncées en 2009

La digue de Castérino a été entièrement rénovée en 2015, après abattage de l'ensemble des arbres encore présents sur l'ouvrage et à ses abords immédiats, et extraction de toutes les souches récentes ou anciennes du remblai. Les risques liés à la végétation ont donc été éliminés. Les détails concernant l'ancien remblai, sa granulométrie et sa structure figurent dans le précédent rapport (2015).

Les recommandations passées restent valables pour le nouvel ouvrage. Le rapport entre la dimension potentielle des arbres qui peuvent se développer sur la digue (photo 2) et celle de l'ouvrage ne permet pas leur conservation. L'emprise racinaire de ces arbres représente plus de 50 % de la largeur l'ouvrage sur la partie amont de la digue (**Photo 4**). Des grosses racines peuvent plonger vers le cœur de l'ouvrage et le traverser de part en part dans sa partie basse (**Photo 7**).

Il ne faut donc pas laisser de nouveaux arbres se développer sur le remblai ni à ses abords.



Photo 7 : *Sur la gauche de ce système racinaire, une énorme racine plonge dans cœur de la digue.*

2 - Etude expérimentale de la décomposition des racines

L'étude a été conçue pour acquérir des connaissances sur les processus et les vitesses de décomposition des racines de mélèze et de pin sylvestre, dans un milieu de montagne, et sur un sol représentatif des matériaux de l'ouvrage.

La vitesse de décomposition conditionne le délai qui s'écoule entre la coupe ou la mort des arbres et le moment où le pourrissement racinaire dépasse un seuil critique, c'est-à-dire où le risque d'érosion ou d'effondrement de la digue concernée sera maximum.

A - Objectif de l'expérimentation sur la décomposition racinaire

Il s'agit d'observer et de quantifier l'évolution du pourrissement, la vitesse et le pic de décomposition des racines (seuil critique vis-à-vis du risque d'érosion interne) en fonction de l'espèce, du diamètre des racines et des conditions environnementales.

L'expérimentation a été mise en place pour une période de 10 à 15 ans. Un dispositif contenant des racines de différents diamètres et des deux espèces concernées, prélevées sur des souches d'arbres abattus en juin 2009, a été enterré sur une placette proche de la digue de fermeture du plan d'eau de Castérino. Le nombre de paniers enfouis a été prévu pour permettre 6 extractions. Les intervalles de temps entre chaque intervention sont à définir suite à chaque extraction, en fonction de l'avancement et de la vitesse de la décomposition.

B - Localisation du dispositif expérimental

Le dispositif a été initialement enfoui en rive droite du torrent le Bieugne (*Figure 1*) à quelques mètres en aval du pied de digue. La surface disponible était de 3 m par 3 m de longueur (soit 9 m²).

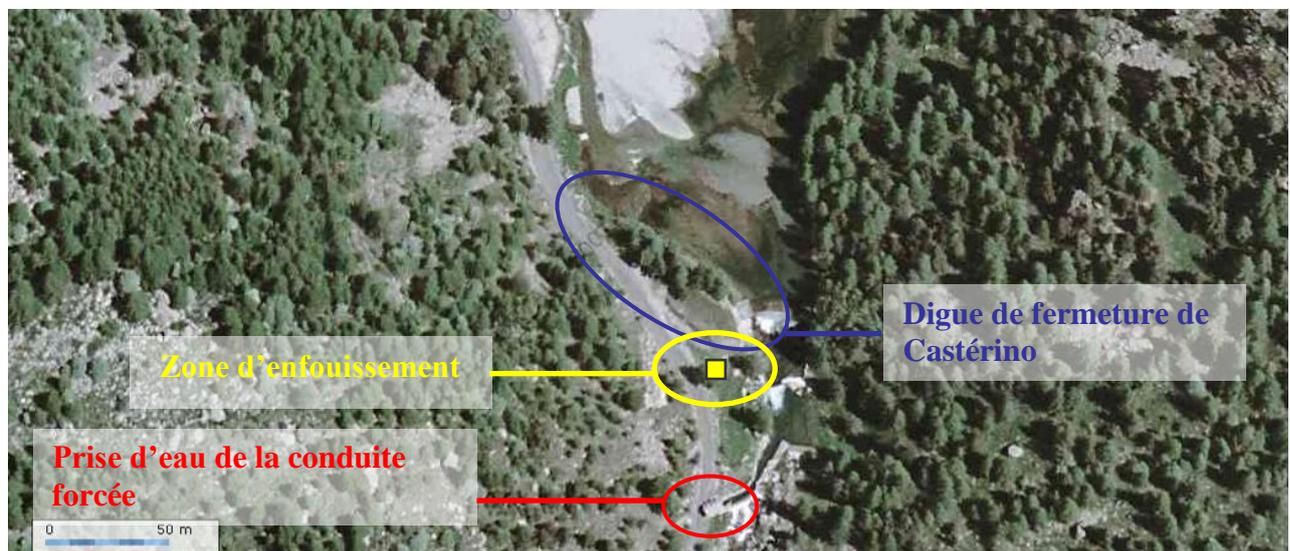


Figure 1 : Localisation initiale de la zone d'enfouissement du dispositif expérimental

Le dispositif a été déplacé en rive gauche en 2015 en prévision des travaux sur l'ouvrage et ses alentours (*Figure 2, photos 8 et 9*). L'accès se fait à partir du pont situé en amont du barrage, en suivant la piste qui redescend le long du torrent puis monte en forêt avant de redescendre vers les terrasses au-dessus du lac de retenue. Le dispositif est situé sur une petite terrasse dans la boucle du chemin d'accès, au-dessus du talus de ce chemin.



Figure 2 : Localisation du dispositif en 2015 au nord de la retenue



Photos 8 et 9 : l'enfouissement des échantillons restant

C - Méthodologie et mise en place du dispositif

C.1 - Conception du dispositif

- Choix de 7 échantillons par classe de diamètre (5 classes = 2; 3; 5; 8 et 10 cm) et par espèce (mélèze et pin sylvestre) → 70 échantillons au total.
- 10 échantillons ramenés au laboratoire en 2009 (mesure des caractéristiques du bois sain) ;
 - 60 échantillons enfouis sur site (6 par classe de diamètre pour chacune des 2 espèces) ;
 - 12 paniers contenant chacun 5 échantillons = 1 échantillon de chaque classe de diamètre pour chacune des deux espèces (*Figure 5*)

A chaque mesure, tous les 2 à 3 ans, un panier est ramené au laboratoire. Le dispositif permet de faire au maximum six prélèvements successifs en plus de la mesure initiale.

C.2 - Mise en place en 2009

- découpe des échantillons de 20 cm de longueur (*Photos 10, 11 et 12*)
- description des échantillons (épaisseur de l'écorce et du bois de cœur)
- mesures dimensionnelles (diamètres et longueur, *Photo 13*) et masse des échantillons frais
- déblaiement à la pelle du trou d'enfouissement (*Photo 14*)
- pose des échantillons dans des paniers en grillage inoxydable (*Figure 3, Photos 15 et 16*)
- enfouissement du dispositif à 50 cm de profondeur en moyenne (*Photo 17*) et prélèvement de matériaux pour la caractérisation en laboratoire (DE1, DE2, DE3, DE4)
- positionnement du grillage avertisseur et balisage (*Photo 18*)
- remblaiement de la zone (*Photo 19*)
- repérage du site (*Figure 4*)



Photos 10, 11 et 12 : Découpe et prélèvement des échantillons de racines sur pin sylvestre



Photo 13 : Mesure et pesée des échantillons



Photo 14 : Terrassement de la zone expérimentale

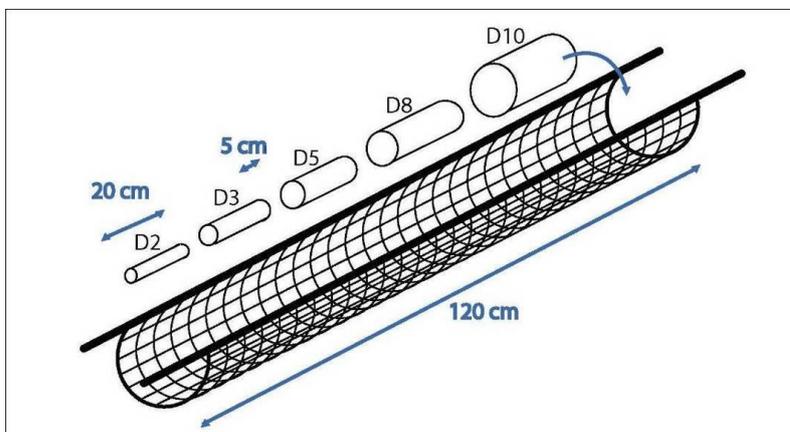


Figure 3 : Représentation des paniers et de la position des échantillons de racines



Photo 15 : Positionnement des échantillons dans les paniers et étiquetage



Photo 16 : Mise en place des paniers



Photo 17 : Enfouissement des échantillons



Photo 18 : Mise en place du grillage avertisseur



Photo 19 : Remblaiement de la zone

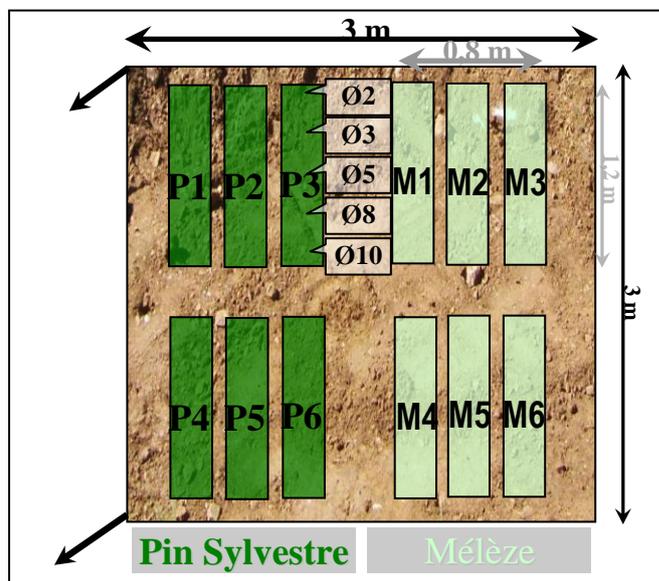


Figure 4 : Plan du dispositif : organisation des paniers et des échantillons

C.3 - Protocole de mesures et observations à chaque déterrage

- *Sur le terrain*

Des opérations de déterrages ont été effectuées 2, 4, 6 et 9 ans après enfouissement (juin 2011, mai 2013, avril 2015 et octobre 2018). L'activité biologique des décomposeurs étant maximale de juin à septembre, elle s'est exercée durant 2 ans entre chacune des 4 premières mesures (2009 à 2015), puis 4 années entre avril 2015 et octobre 2018, soit fonctionnellement un total de 10 ans.

A chaque opération de mesure, les paniers sont déterrés à la pelle mécanique, délicatement afin de ne pas les tordre, le grillage avertisseur servant de repère lors du creusement. Les échantillons sont ensuite dégagés manuellement et avec précautions dans les paniers, en évitant de les gratter pour ne pas altérer l'écorce ou des parties molles. Ils sont enfin extraits un par un des paniers et nettoyés à l'aide d'une brosse douce pour enlever la terre, toujours en évitant de les altérer. Ils font alors l'objet de différentes mesures :

- Les échantillons sont pesés sur une balance de précision ($\pm 1g$) afin d'obtenir leur poids frais humide.
- Une classe de dégradation est attribuée à chacun d'entre eux en fonction de critères visuels et tactiles (**Tableau 1**) (Sandström et al., 2007; Tobin et al., 2007). Les paramètres pris en compte sont l'état de l'écorce (dégradation, décollement, pourcentage de disparition, ramollissement), la fragmentation et la dureté du bois, la présence de champignons et d'insectes sur ou dans l'échantillon et la pénétration sous l'écorce ou dans le bois de racelles d'autres végétaux.
- Un test de pénétration de la lame d'un couteau standard (8 cm de longueur) est réalisé (**Tableau 2, photo 20**) en testant plusieurs parties de l'échantillon, sur leur côté et sur les faces. Le couteau test est utilisé parallèlement aux fibres du bois mais on évite de forcer sur les petits diamètres ou sur les échantillons trop mous afin de ne pas les fendre. Des prélèvements de matériaux du sol sont effectués afin d'évaluer leur teneur en eau au moment de l'étude.

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

Tableau 1 : Caractérisation qualitative des racines par classes de dégradation (Ferrat, 2010 d'après Sonderström, 1988 ; Lee and Sturgess, 2001 ; Tobin, 2007)

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

Tableau 2 : Classification par test pénétrométrique au couteau (Renvall, 1995)



Photo 20 : Test pénétrométrique au couteau (Classe 1 – pénétration de la lame de quelques millimètres)

- **Au laboratoire**

Les échantillons ramenés au laboratoire sont séchés à température ambiante dans une étuve ventilée (30°C) et pesés une fois secs (stabilisation du poids après 4 semaines à 2 mois selon les diamètres). La masse volumique des échantillons de bois sain a été obtenue par tomographie rayons X à l'INRA de Nancy, en mai 2010. Le volume des échantillons est mesuré par déplacement d'eau à chaque fois. En 2009, les résultats des deux méthodes ont été comparés. La méthode de mesure par déplacement d'eau surestime (de 7% en moyenne) la masse volumique par rapport à la technique tomographique. Mais les valeurs entre les deux méthodes sont proportionnelles, ce qui les valide chacune en relatif.

Les comparaisons de masse volumique (densité du bois) entre 2009, 2011, 2013, 2015 et 2018 sont effectuées d'après les seuls résultats obtenus par déplacement d'eau.

Les échantillons de 2009, 2011 et 2013 ont été étudiés et comparés par spectroscopie proche infra-rouge (SPIR), suivant les protocoles décrits dans la thèse de Gisèle Bambara (2016).

Remarques

Vulnérabilité des échantillons comparés aux racines entières: Les échantillons découpés en morceaux de 20 cm de long sont initialement plus vulnérables aux agents de décomposition que des racines entières après coupe d'un arbre. Ils présentent en effet deux faces de bois exposées aux agents pathogènes alors qu'une racine entière n'est attaquable initialement que par l'extérieur.

A plus long terme, à contrario, les racines entières sont plus sensibles aux pathogènes : ceux-ci peuvent les coloniser à partir de la souche qui dépasse à l'extérieur, et peuvent coloniser toute une racine à partir d'un seul point d'entrée, alors que les échantillons découpés sont plus indépendants les uns des autres.

Au-delà d'un certain seuil de décomposition ou d'attaque, racines entières et échantillons découpés présentent la même vulnérabilité.

Homogénéisation des données: Pour une comparaison plus standardisée du poids frais et de la masse volumique humide (=densité) des échantillons restant sur le terrain, leur volume réel est estimé à partir de leurs dimensions (moyenne des diamètres aux extrémités x longueur) avec une correction de forme prenant en compte leurs particularités (ramification, rétrécissements et bosses, aplatissement). Pour les échantillons ayant bénéficié d'une mesure de volume par déplacement d'eau en 2011, 2013, 2015 et 2018, c'est cette valeur mesurée qui est prise en compte comme volume réel. On ramène ensuite le poids frais de tous les échantillons à un volume théorique identique calculé à partir diamètre de la classe (2; 3; 5; 8 et 10 cm) et longueur théorique (20 cm), et leur poids sec au même volume corrigé de la rétraction. Ces valeurs standardisées sont notées "stand" dans les tableaux. Le poids standardisé et la masse volumique sont strictement proportionnels, et représentent chacun l'évolution du bois.

Les variations du poids frais standardisé et de la densité correspondante, mais aussi de la pénétrabilité et de l'état visuel de décomposition, ne sont totalement fiables qu'initialement entre 2009 et 2011 puisqu'elles sont calculées sur les mêmes 6 échantillons par espèce et par classe de diamètre. Mais ce nombre diminue avec le temps, puisqu'un panier est éliminé à chaque passage. Il restait 3 paniers mesurables en 2018, et 2 ont été remis en terre. L'évolution des moyennes entre années de mesures comporte donc un biais lié aux différences de caractéristiques entre les échantillons d'une catégorie : la disparition à chaque date d'un échantillon qui peut être éloigné de la moyenne (plus gros ou plus petit, plus ou moins dense, dur ou décomposé, ...), fait varier cette moyenne indépendamment de l'évolution des variables qu'on cherche à estimer. Ce biais est d'autant plus probable que le nombre d'échantillons diminue avec le temps, et ne permet plus d'atténuer l'effet d'un échantillon particulier. De plus, les différences entre échantillons d'une catégorie s'accroissent avec le temps, notamment pour les niveaux de décomposition, donc aussi pour les densités et dureté. Enfin, les variations absolues des échantillons les plus lourds sont supérieures à celles des échantillons plus légers, et comptent donc plus dans la moyenne pour une évolution relative similaire en pourcentage. Pour éviter ce biais jusqu'en 2015, on n'avait pris en compte, pour le calcul des évolutions, que la moyenne des échantillons restant présents à la date de la dernière mesure.

Mais avec le nombre réduit d'échantillons restant en 2018 (3), on perd trop d'informations venant des échantillons retirés aux dates précédentes. A partir de 2018, on a donc considéré non plus la moyenne des échantillons par date, mais la moyenne des évolutions relatives des échantillons entre deux mesures successive depuis l'origine, pour tous les échantillons disponibles à chaque mesure. On conserve ainsi les informations issues des échantillons retirés. En pratique pour 2018, la différence avec la méthode précédente reste faible.

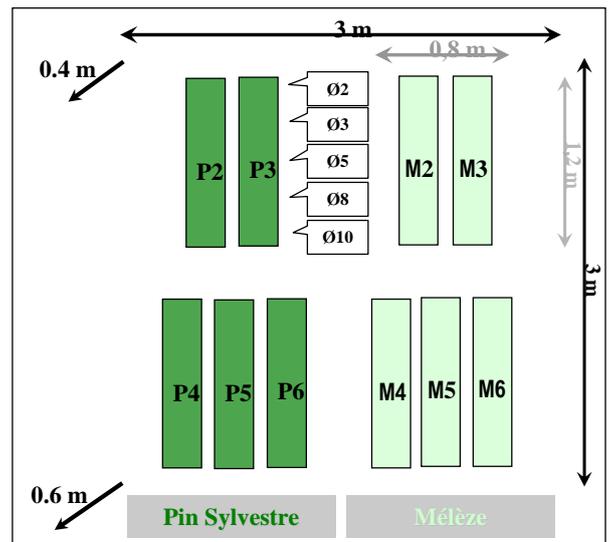
Ce mode d'élimination des biais n'est pas applicable à la comparaison des poids sec d'un prélèvement à l'autre : nous ne ramenons au laboratoire à chaque prélèvement qu'un seul échantillon par espèce et par classe de diamètre (panier 1, puis 2, puis 3 etc...). Les différences de poids initial et d'évolution de ce poids entre échantillons d'une classe ne peuvent pas être corrigées par les tendances interannuelles individuelles puisque les échantillons ne sont séchés qu'une fois. Par ailleurs, le poids frais n'est pas un bon indicateur du poids sec, puisque leur rapport (eau absorbable par les racines) dépend en partie du niveau de décomposition. Le poids sec en lui-même n'a donc d'intérêt que pour calculer la densité sèche. Cette densité est théoriquement indépendante du volume des échantillons, mais est en fait influencée par leur taille via les proportions d'écorce et de bois de cœur, et indirectement par leur état de dégradation qui est lui-même en partie lié à leur taille. L'interprétation de l'évolution de la densité sèche doit aussi tenir compte de l'état particulier de certains échantillons qui sont éclatés, et évoluent donc comme des échantillons de plus petit diamètre, de la présence de nœuds qui les densifient, etc. Elle n'est donc fiable en moyenne et interprétable que sur la durée : les 10 saisons de décomposition écoulées depuis la mise en place révèlent des variations significatives.

C4 - Déterrages successifs et prélèvements

Déterrage et mesures de juin 2011

Les paniers n° 1 de chaque espèce (P1 et M1 - 12 échantillons au total) ont été prélevés en juin 2011 et ramenés au laboratoire pour analyses, tandis que les autres échantillons ont été immédiatement remis en place dans leur panier et ré-enfouis (**Figure 5**). Il restait 49 échantillons pour la suite des opérations de suivi de la décomposition, l'échantillon de 2 cm de diamètre ayant été perdu pendant l'extraction du panier M6.

Figure 5 : Plan du dispositif : organisation des paniers et des échantillons restant après retrait des paniers P1 et M1 en juin 2011.



Déterrage et mesures de mai 2013

Le second déterrage du dispositif expérimental d'étude et de suivi de la décomposition des racines de Mélèze et de Pin sylvestre a eu lieu le 29 mai 2013 suivant le protocole habituel pour la partie terrain :

- Déterrage délicat du dispositif avec la pelle mécanique jusqu'au grillage avertisseur (**Photo 21**), puis à la main avec une pelle et une pioche.
- Récupération de l'ensemble des paniers (**Photo 22**);



Photos 21 et 22. Déterrage du dispositif à la pelle mécanique et récupération des paniers

- Nettoyage des échantillons à la brosse afin de dégager ceux-ci des matériaux (**Photo 23**);
- Pesée de chaque échantillon de racine afin d'obtenir son poids frais (**Photo 24**);
- Estimation de la classe de dégradation de chaque échantillon;
- Estimation de la résistance du bois par test de pénétrométrie au couteau;
- Prélèvement de matériau à l'intérieur du dispositif afin d'obtenir la teneur en eau du sol et pesée du sac de matériaux récupérés (poids humide);
- Remise en place des échantillons dans leurs paniers et ré-enfouissement des paniers au sein du dispositif expérimental (**photo 25**) à l'exception des paniers n°2 de mélèze et de pin sylvestre (10 échantillons au total) qui sont ramenés au laboratoire.



Photos 23 et 24 : nettoyage-dégagement des échantillons et pesée du bois (poids frais).



Photo 25 : Ré-enfouissement des paniers

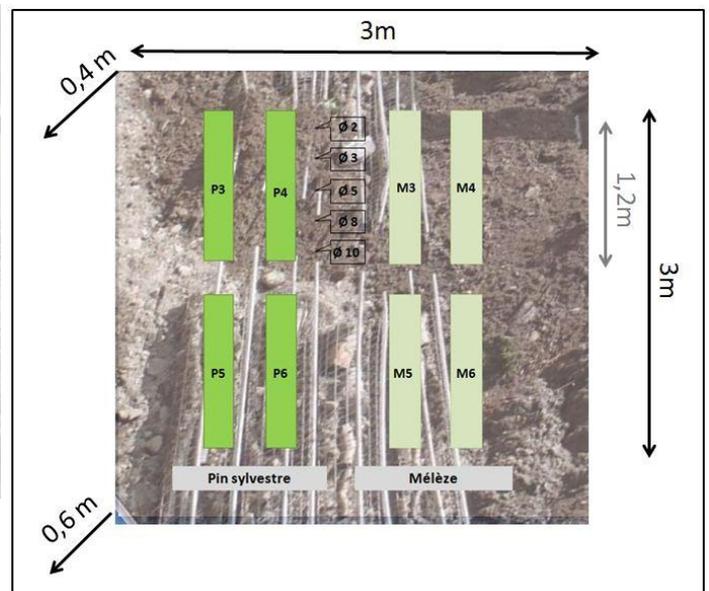


Figure 6 : Organisation des échantillons après retrait des paniers n°2 en mai 2013.

Suite à cette intervention, il restait 39 échantillons pour la suite des opérations. Le plan du dispositif restant est représenté sur la **figure 6**.

En plus du protocole standard pour lesquels les échantillons sont séchés, pesés et leur volume mesuré par déplacement d'eau, des analyses chimiques ont été ajoutées :

- Préparation des sciures de bois : découpe et broyage des échantillons à l'aide d'un broyeur planétaire puis tamisage des sciures à une maille de 315µm ;
- Passage des échantillons de sciure au spectromètre proche infrarouge (SPIR) ;
- Extraction chimique à partir des sciures de bois de la lignine, de la cellulose et de l'hémicellulose ;
- Analyse élémentaire C/H/N/S pour l'obtention des proportions des composés de carbone, hydrogène, azote et soufre.

Déterrage et mesures d'avril 2015

Les prélèvements ont été effectués le 15 avril 2015 en suivant le protocole standard. Les paniers M3 et P3 ont été récupérés. Les échantillons restant, après pesée et mesures, ont été déplacés en rive gauche au nord du lac de retenue (**Photos n° 26 et 27**).



Photos n° 26 et 27 : enfouissement des 6 paniers restant pour un déterrage ultérieur.

Déterrage et mesures d'octobre 2018

Les prélèvements ont été effectués le 9 octobre 2018 (**Photo n° 28**) en suivant le protocole standard. Les paniers M4 et P4 ont été récupérés.

Photo n° 28 : Déterrage des 6 paniers (3 de mélèze et 3 de pin sylvestre) en octobre 2018.



Après pesée et mesures, les 4 paniers d'échantillons restant ont été ré-enfouis au même endroit au nord du lac de retenue, mélèze et pin sylvestre côte à côte (**Photos n° 29**).

Photo 29 : disposition des 4 paniers restant (P5, P6, M5 et M6) avant ré-enfouissement.

3 - Résultats

A - Notes de dégradation et de pénétrométrie

Les **tableaux 3** et **4** ainsi que les **figures 8** et **9** présentent les résultats de l'inspection visuelle et de la pénétrométrie pour respectivement le mélèze et le pin sylvestre.

Tableau 3 : Notes de pénétrabilité et dégradation pour le mélèze

Tableau 3a: pénétrométrie						Tableau 3b: dégradation					
	2009	2011	2013	2015	2018		2009	2011	2013	2015	2018
M2	1.00	1.20	1.33	1.33	1.33	M2	1.00	1.00	1.10	1.23	1.39
M3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.17	M3	1.00	1.17	1.67	1.67	2.33
M5	1.00	1.04	1.04	1.04	1.04	M5	1.00	1.00	1.00	1.13	1.79
M8	1.00	1.25	1.25	1.25	1.25	M8	1.00	1.00	1.30	1.43	1.68
M10	1.00	1.17	1.42	1.42	1.42	M10	1.00	1.33	1.73	1.86	2.28
moy	1.00	1.13	1.21	1.21	1.24	moy	1.00	1.10	1.36	1.46	1.89

Figures 8a et 8b : Evolution des notes de pénétrabilité et dégradation pour le mélèze.

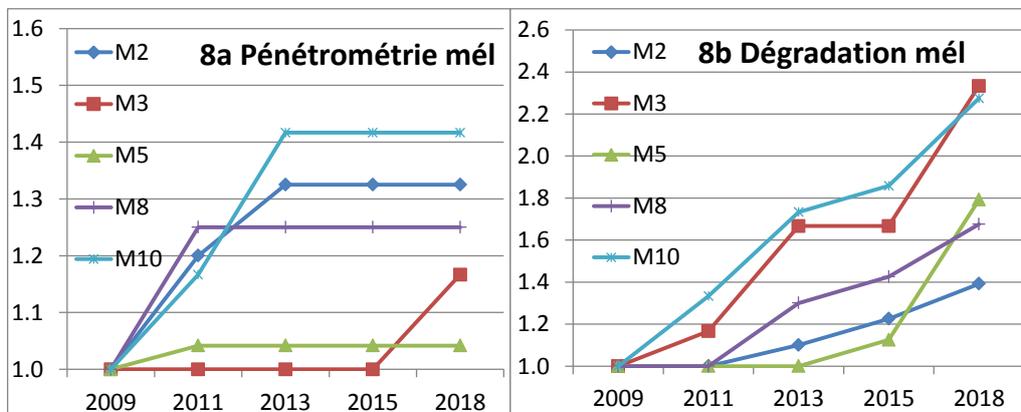
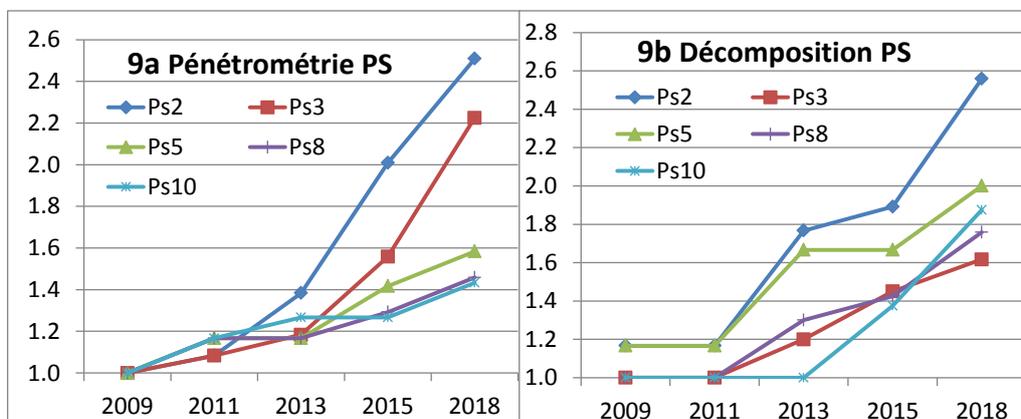
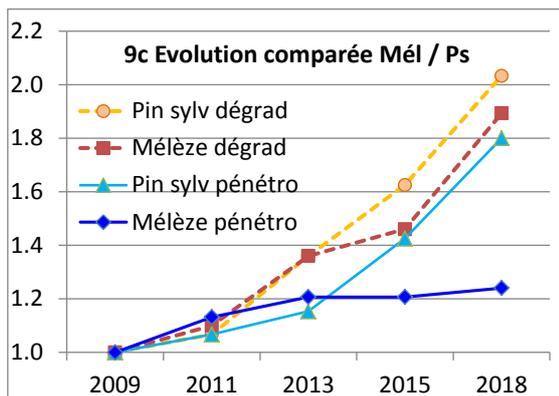


Tableau 4 : Notes de pénétrabilité et dégradation pour le pin sylvestre

Tableau 4a: Pénétrabilité						Tableau 4b: Dégradation					
	2009	2011	2013	2015	2018		2009	2011	2013	2015	2018
Ps2	1.00	1.08	1.38	2.01	2.51	Ps2	1.17	1.17	1.77	1.89	2.56
Ps3	1.00	1.08	1.18	1.56	2.23	Ps3	1.00	1.00	1.20	1.45	1.62
Ps5	1.00	1.17	1.17	1.42	1.58	Ps5	1.17	1.17	1.67	1.67	2.00
Ps8	1.00	1.17	1.17	1.29	1.46	Ps8	1.00	1.00	1.30	1.43	1.76
Ps10	1.00	1.17	1.27	1.27	1.43	Ps10	1.00	1.00	1.00	1.38	1.88
moy	1.00	1.13	1.23	1.51	1.84	moy	1.07	1.07	1.39	1.56	1.96

Figures 9a et 9b : Evolution des notes de pénétrabilité et dégradation pour le pin sylvestre.





Toutes tailles confondues, mélèze le pin sylvestre suivent une dégradation visuelle assez similaire, en moyenne comme en valeur maximale. Par contre, la dureté du mélèze diminue beaucoup plus lentement que celle du pin sylvestre et son bois reste ferme, quasi-inchangé sur les 6 dernières années (*figure 9c*). En 2018, les échantillons les plus pénétrables de mélèze ont la résistance des moins pénétrables du pin sylvestre (autour de 1.4).

Figure 9c: Evolution comparée de la dureté et de la dégradation visuelle pour mélèze et pin sylvestre

Chez le mélèze, le niveau de dégradation visuelle comme la pénétrabilité semblent indépendants du diamètre des échantillons (*figure 8*). Ils dépendent dans chaque classe de quelques individus évoluant plus vite, notamment d'échantillons fendus. Les notes plus élevées de dégradation de la classe 10 vient en particulier des premiers échantillons retirés qui avaient plus évolué que la moyenne. Cette tendance a été conservée par la méthode des variations relatives, alors que les échantillons restant en 2018 ont un niveau de pénétrabilité similaire à celui de 2011.

Chez le pin sylvestre, le bois des petits échantillons (2 et 3cm) s'est plus rapidement ramolli que celui des gros (*figure 9.a*). Visuellement, seule la classe 2cm se distingue par une dégradation plus avancée.

B - Poids et densité du bois humide et sec

Les *tableaux 5 à 8* ainsi que les *figures 10 à 13* et *l'annexe 2* donnent pour successivement le mélèze et le pin sylvestre, l'évolution du poids standardisé du bois humide et sec, et les densités correspondantes (corrigés des biais d'échantillonnage).

Tableau 5 : évolution du poids de la densité du bois frais pour le mélèze, standardisés et corrigés du biais d'échantillonnage.

5a : poids frais standardisé cor						5b : densité du bois frais cor					
Diam	2009	2011	2013	2015	2018	Diam	2009	2011	2013	2015	2018
M2	65.9	73.6	65.6	62.4	39.9	M2	1.05	1.17	1.04	0.99	0.6
M3	136.4	145.7	136.6	134.1	82.8	M3	0.96	1.03	0.97	0.95	0.6
M5	386.3	439.9	411.2	394.2	255.6	M5	0.98	1.12	1.05	1.00	0.7
M8	912.4	1033.4	955.2	907.8	625.6	M8	0.91	1.03	0.95	0.90	0.6
M10	1103.0	1305.5	1040.3	1012.0	708.6	M10	0.70	0.83	0.66	0.64	0.5
	520.8	599.6	521.8	502.1	342.5		0.92	1.04	0.93	0.90	0.59
	2009	2011	2013	2015	2018						
M2	1.00	1.12	0.99	0.95	0.60						
M3	1.00	1.07	1.00	0.98	0.61						
M5	1.00	1.14	1.06	1.02	0.66						
M8	1.00	1.13	1.05	0.99	0.69						
M10	1.00	1.18	0.94	0.92	0.64						
	1.00	1.13	1.01	0.97	0.64						

A l'état frais, le poids et la densité du mélèze ont beaucoup baissé entre 2015 et 2018 (*tableau 5 et figure 10*). Il est possible que cela soit dû à l'état d'hydratation des échantillons : en 2015, ils étaient gorgés d'eau à cause de la fonte récente de la neige, alors qu'en 2018 ils ont été prélevés dans un sol sec. Cette baisse s'inscrit cependant dans la suite logique d'une baisse continue depuis 2011. Les plus gros diamètres (10 cm) ont de façon récurrente une densité fraîche nettement plus faible (-30%) que les autres classes qui sont homogènes. Cette différence n'est pas due à un ou deux échantillons particulièrement légers, mais est générale à tous les échantillons de la classe 10 dès le départ. Cette différence n'est pas non plus due (ou seulement très peu) à l'écorce, qui est de la même épaisseur initiale que celles des diamètres 5 et 8 cm (0.4 à 0.5 cm), bien que 2 fois plus épaisse dans ces

trois classes que celles des deux plus petites classes (0.23 cm). Elle pourrait être due en partie à une plus forte proportion de bois de cœur, respectivement 85%, 76%, 72%, 68% et 56% pour les classes 10 à 2 cm. La différence avec les classes 8 et 5 ne semble pas suffisante, mais peut être due aussi à un effet de seuil lié à l'âge des racines dans l'imprégnabilité du cœur. Le bois de cœur de mélèze étant réputé peu perméable et peu imprégnable, il est possible qu'il forme une barrière à l'humidification du bois en profondeur, et donc allège le bois frais. En valeurs relatives (*figure 10.b*), toutes les classes de diamètre suivent de près la même tendance d'évolution de la densité du bois frais depuis 2009.

Figures 10 : Evolution de la densité fraîche du mélèze en valeur absolue 10a et relative 10b

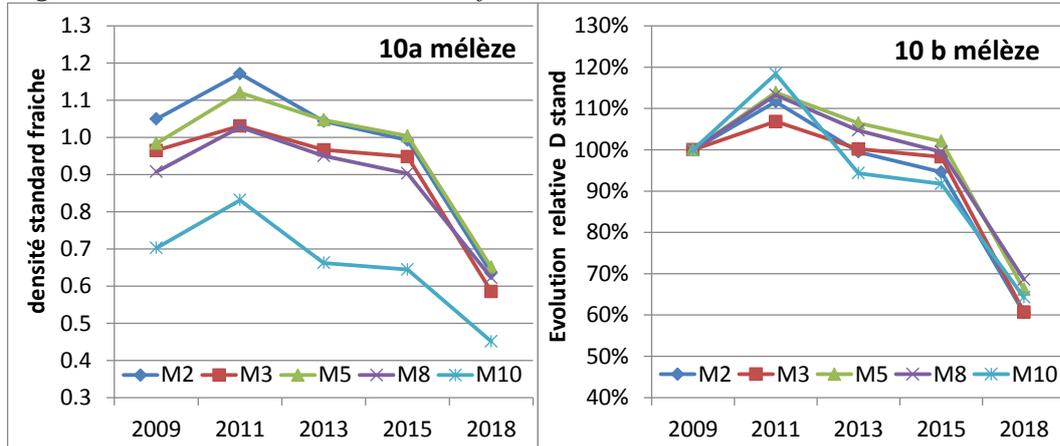


Tableau 6 : Evolution de la densité du bois sec pour le mélèze.

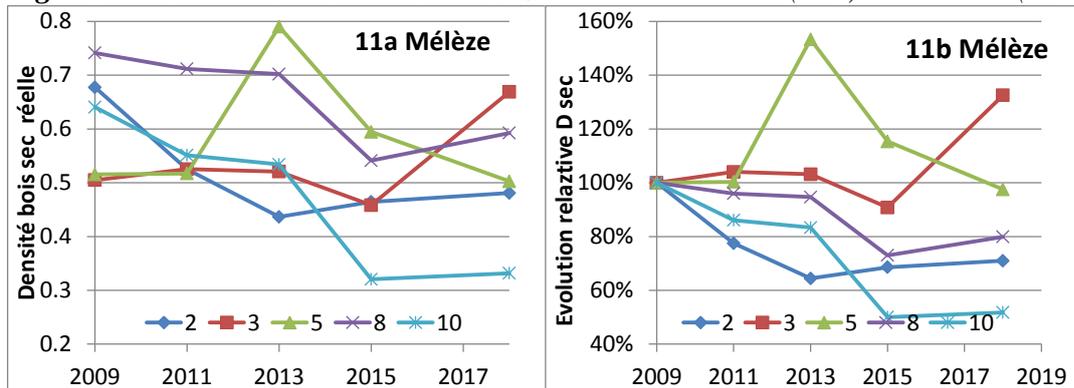
Tableau 6.a évolution de la densité sèche

diam	2009	2011	2013	2015	2018
M02	0.68	0.53	0.44	0.46	0.48
M03	0.50	0.53	0.52	0.46	0.67
M05	0.52	0.52	0.79	0.59	0.50
M08	0.74	0.71	0.70	0.54	0.59
M10	0.64	0.55	0.53	0.32	0.33
moy	0.62	0.57	0.60	0.48	0.52

Tableau 6.b évolution relative densité sèche

diam	2009	2011	2013	2015	2018
M02	1.00	0.77	0.64	0.69	0.71
M03	1.00	1.04	1.03	0.91	1.33
M05	1.00	1.00	1.53	1.15	0.98
M08	1.00	0.96	0.95	0.73	0.80
M10	1.00	0.86	0.83	0.50	0.52
moy	1.00	0.93	1.00	0.80	0.87

Figures 11: densité du bois sec de mélèze: valeurs absolues (11a) et relatives (11b)



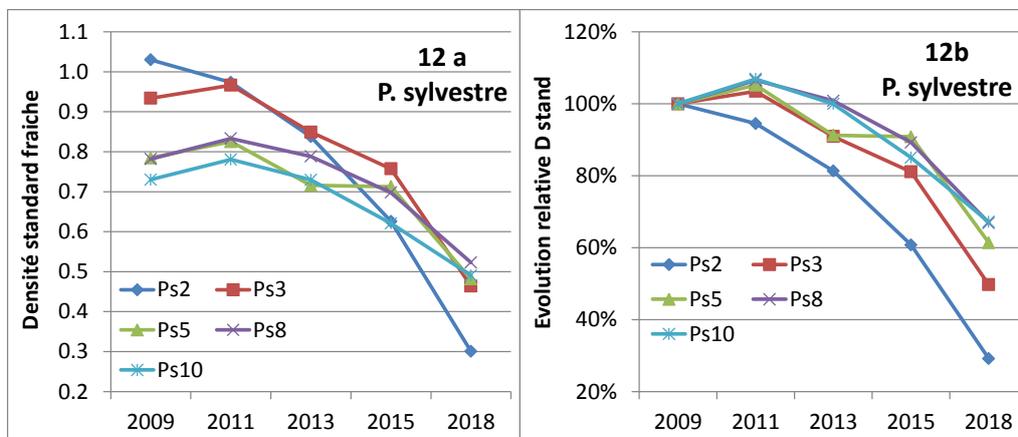
Si la tendance moyenne sur l'ensemble du suivi est à une légère baisse de densité de l'ordre de 15 à 20% sur 10 ans (*figure 14*), cette tendance est contrariée par la grande variabilité des échantillons prélevés à chaque contrôle. En 2013, 2015 et 2018, un échantillon des classes 5, 10 et 3 cm respectivement sortait fortement des tendances, vers le haut ou vers le bas. En 2015, l'échantillon de diamètre 10 étaient éclaté en plusieurs morceaux longitudinalement, et le bois de cœur étant plus

dégradé que la moyenne des échantillons. Les deux autres échantillons spéciaux, de diamètre 5 et 3 cm et d'une densité très élevée, ne présentaient aucun signe particulier, sinon d'être très peu dégradés, sans être de ce point de vue exceptionnels. Ils n'avaient pas non plus une proportion très forte de bois de cœur ou des nœuds importants. Il pourrait s'agir de très vieilles racines malgré leur faible diamètre, ou de racines jouant un rôle particulier d'ancrage (bois de tension).

Tableau 7 : Evolution du poids frais standardisé et de sa densité pour le pin sylvestre

Tableau 7a : Poids frais standardisé cor						Tableau 7b : Evolution relative de la densité cor					
	2009	2011	2013	2015	2018	Diam (cm)	2009	2011	2013	2015	2018
Ps2	64.7	61.2	52.6	39.3	18.9	Ps2	1.03	0.97	0.84	0.63	0.30
Ps3	132.0	136.6	120.1	107.1	65.6	Ps3	0.93	0.97	0.85	0.76	0.46
Ps5	308.1	324.1	281.1	279.8	189.2	Ps5	0.78	0.83	0.72	0.71	0.48
Ps8	786.0	837.6	792.6	701.5	525.6	Ps8	0.78	0.83	0.79	0.70	0.52
Ps10	1146.8	1226.2	1146.3	975.2	770.5	Ps10	0.73	0.78	0.73	0.62	0.49
	487.54	517.14	478.55	420.58	313.96		0.85	0.88	0.78	0.68	0.45
	2009	2011	2013	2015	2018						
Ps2	1.00	0.95	0.81	0.61	0.29						
Ps3	1.00	1.03	0.91	0.81	0.50						
Ps5	1.00	1.05	0.91	0.91	0.61						
Ps8	1.00	1.07	1.01	0.89	0.67						
Ps10	1.00	1.07	1.00	0.85	0.67						
	1.00	1.03	0.93	0.81	0.55						

Figure 12 : Evolution de la densité fraîche du pin sylvestre: valeur absolue 12a, relative 12b



La densité fraîche du pin sylvestre est à l'origine supérieure pour les petits diamètres (2 et 3 cm), traduisant sans doute un plus haut niveau d'imprégnation du bois (moins de bois de cœur). Les trois autres classes sont très homogènes.

Le bois frais de pin sylvestre a gardé une relative constance dans son poids comme dans sa densité au cours des 4 premières années passées sous terre, augmentant très légèrement en 2011 (sauf pour les plus petits diamètres) pour revenir au point de départ en 2013. Par la suite, la décroissance s'est accélérée, particulièrement pour la classe 2 cm, qui est la seule à se détacher des autres en valeur absolue en 2018, en lien avec la dégradation plus marquée en profondeur du bois (figure 8). Dans la même logique, bien que ce soit moins marqué, la classe 3 cm qui montre un niveau de dégradation visuelle et de résistance plus forte que les gros diamètre perd aussi un peu plus qu'eux en proportion, mais les rejoint car elle partait de plus haut.

En valeur relative, la densité du pin sylvestre évolue similairement à celle du mélèze pour les classes 5 à 10 qui terminent avec un niveau proche en perte relative (~40% contre -35%). Les petits diamètres par contre perdent nettement plus (50 à 70%) que pour le mélèze (40%). En moyenne tous diamètres confondus, le pin sylvestre perd donc plus sur 10 ans que le mélèze (-49% contre -32%, *annexe 2*).

Tableau 8 : évolution de la densité du bois sec pour le pin sylvestre,

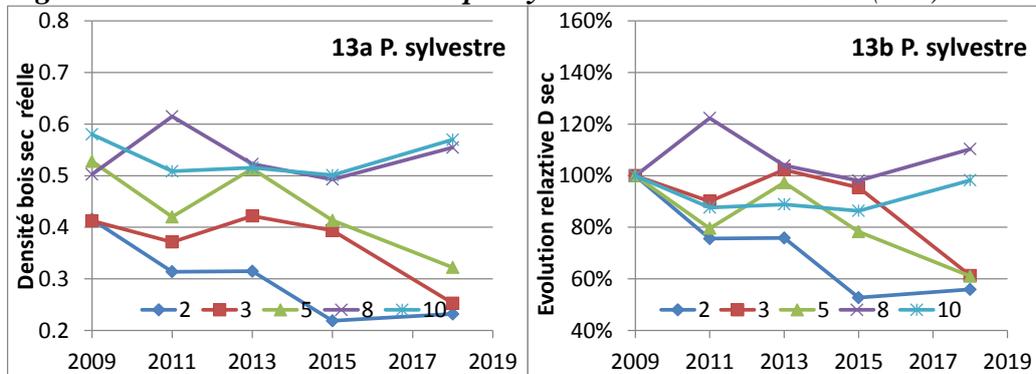
Tableau 7.a évolution de la densité sèche

	2009	2011	2013	2015	2018
PS02	0.42	0.31	0.31	0.22	0.23
PS03	0.41	0.37	0.42	0.39	0.25
PS05	0.53	0.42	0.51	0.41	0.32
PS08	0.50	0.61	0.52	0.49	0.55
PS10	0.58	0.51	0.52	0.50	0.57
moy	0.49	0.45	0.46	0.40	0.39

Tableau 7.b évolution relative densité sèche

	2009	2011	2013	2015	2018
PS02	0.42	0.31	0.31	0.22	0.23
PS03	0.41	0.37	0.42	0.39	0.25
PS05	0.53	0.42	0.51	0.41	0.32
PS08	0.50	0.61	0.52	0.49	0.55
PS10	0.58	0.51	0.52	0.50	0.57
moy	0.49	0.45	0.46	0.40	0.39

Figures 13 : densité du bois sec de pin sylvestre: valeurs absolues (13a) et relatives (13b)



Comme pour le mélèze, l'évolution du bois sec chez le pin sylvestre est plus chaotique que celle du bois frais, en raison d'échantillons assez variables. Contrairement au mélèze où les plus gros diamètres présentaient une densité plus faible, les classes 8 et 10 cm ont chez le pin sylvestre des densités plus élevées, et qui se maintiennent au même niveau depuis l'origine. A l'inverse, la densité des diamètres intermédiaires et faibles (2 à 5cm) diminue avec le temps, même si quelques individus particuliers ont perturbé momentanément cette tendance. Comme pour la densité fraîche, la classe 2 cm décroche dès l'origine. Elle est rejointe en 2018 par les classes 3 et 5 cm. Pour la classe 3cm, c'est en accord avec une dégradation forte de la pénétrométrie en 2018 (*figure 9.a*). La classe 5 montrait dès l'origine un niveau de dégradation visuelle plus important que les gros diamètres, et qui a continué à augmenter, s'ajoutant à un léger décrochage de la pénétrométrie par rapport aux gros diamètres depuis 2015.

La *figure 14* compare en valeur relatives et absolues les évolutions des densités fraîches et sèches du mélèze et du pin sylvestre.

Elle confirme que la densité du bois de mélèze, qui était comme attendu supérieure à celle du pin sylvestre à l'origine, le reste durant les 10 ans de l'expérience en valeur absolue à l'état frais et sec (*figures 14.a et 14.c*). Les évolutions relatives des bois frais et secs entre deux mesures suivent des tendances opposées: la densité fraîche tend à augmenter ou ralentir sa perte quand la densité sèche décroît le plus. Il y aurait donc une relation entre la densité sèche et l'imprégnabilité du bois (humidité relative), qui explique en partie la densité fraîche. Comme montré par les analyses chimiques (*chapitre C*), la perte de densité se fait initialement surtout par perte de cellulose, cela rendant le bois plus poreux. L'eau ayant une densité supérieure à celle du bois, les échantillons les plus imprenables tendent donc à se saturer plus d'eau, donc à être plus lourds à l'état frais.

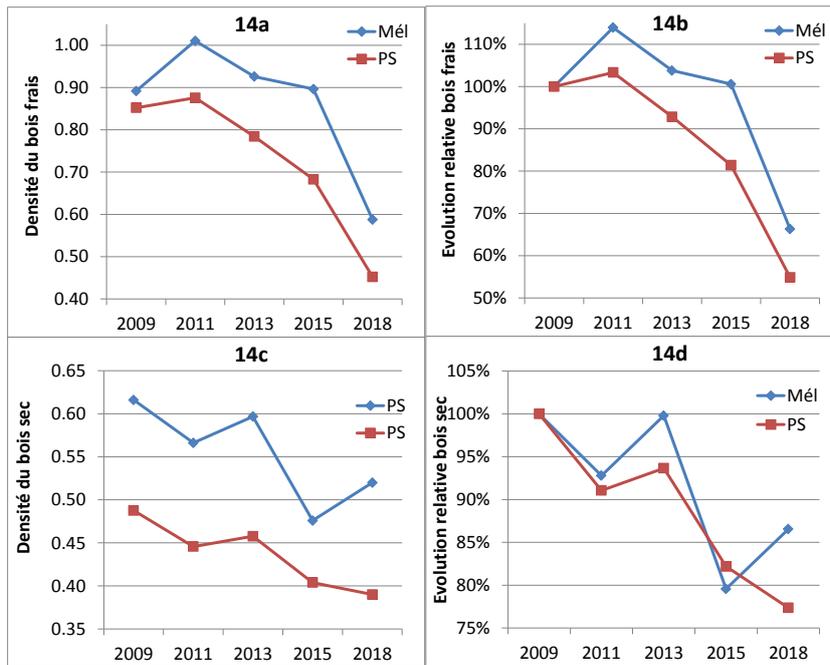


Figure 14 : évolution en valeurs absolue et relatives des densités du bois frais et du bois sec de mélèze et pin sylvestre.

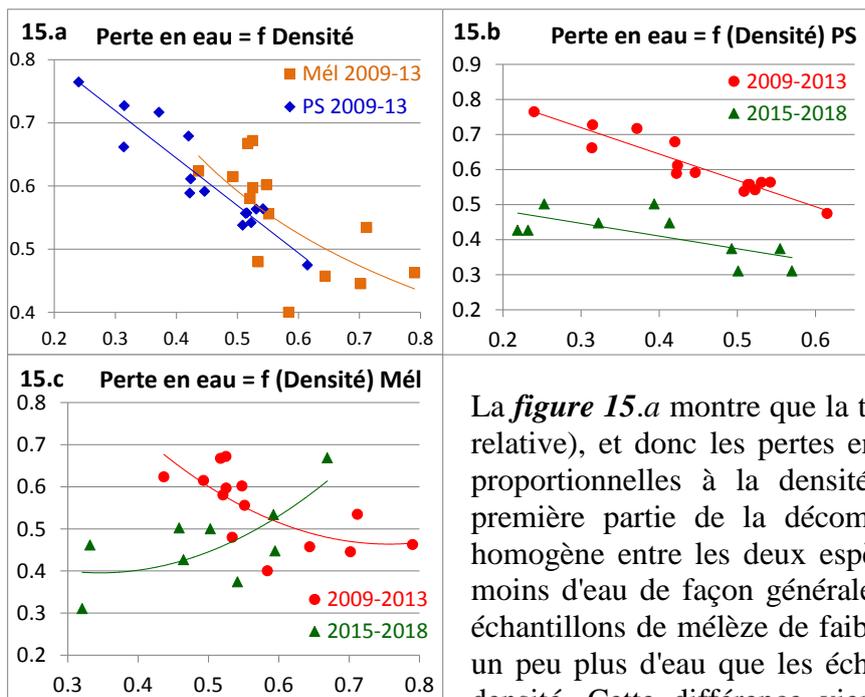


Figure 15 : Teneurs en eau du bois frais en fonction de la densité du bois sec, pour mélèze et pin sylvestre suivant les niveaux d'avancement de la décomposition.

La *figure 15.a* montre que la teneur en eau du bois frais (humidité relative), et donc les pertes en eau au séchage, sont inversement proportionnelles à la densité du bois sec au durant toute la première partie de la décomposition (jusqu'en 2015), et assez homogène entre les deux espèces. Les bois plus denses stockent moins d'eau de façon générale pour du bois peu décomposé. Les échantillons de mélèze de faible densité ont eu tendance à stocker un peu plus d'eau que les échantillons de pin sylvestre de même densité. Cette différence vient du fait que ces échantillons de

densité comparable sont les plus petits pour le mélèze, qui se sont décomposé plus vite que le gros, alors que ce sont en majorité des gros diamètres pour le pin sylvestre. La relation entre densité sèche et teneur en eau du bois frais se conserve mais en s'affaiblissant pour le pin sylvestre jusqu'en 2018 (*figure 15.b*) et s'inverse pour le mélèze (*figure 15.c*). Avec l'avancement de la décomposition extérieure (discontinuité et décollement de l'écorce), et des modifications plus profondes du bois (fissuration, fragmentation, perte de morceaux, pénétration de mycéliums), l'eau peut pénétrer dans le bois de multiples façons et se stocker dans des discontinuités qui sont de plus en plus variables suivant les échantillons avec le temps. Le fait que nous n'ayons que peu d'échantillons à chaque date rend les variations entre échantillons d'autant plus susceptibles de produire des ruptures dans les tendances. Le taux d'humidité des échantillons dépend aussi de plus en plus de l'humidité des sols au moment des mesures et dans les semaines précédant celles-ci.

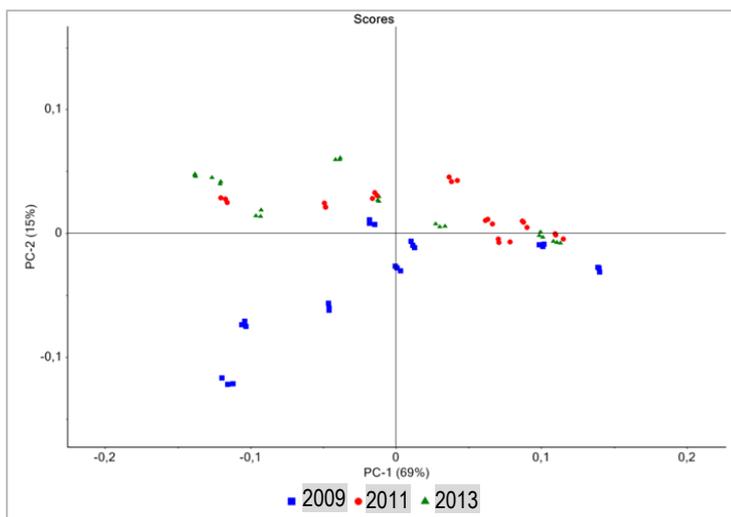
C - Spectroscopie Proche Infra-Rouge

Ces résultats sont tirés de la thèse de Gisèle Bambara (2016). On ne présente pas ici les détails des protocoles et méthodes de mesures qui sont décrits dans cette thèse.

Les spectres Proche Infra-Rouge ont été mesurés sur de la poudre obtenue par broyage des échantillons de racines des deux espèces, prélevés en 2009, 2011 et 2013. Les analyses SPIR n'ont pas encore été effectuées sur les racines prélevées en 2015. La forme des spectres varie en fonction de la composition chimique des poudres et de leurs caractéristiques physiques. Dans la mesure où les poudres ont été obtenues par un procédé identique et normalisé, les variations physiques doivent être négligeables et aléatoires. Les différences obtenues traduisent donc des variations de la composition chimique.

Pour chaque classe de diamètre, 3 échantillons ont été prélevés dans la même racine (pseudo-répétition), afin de valider la répétabilité du protocole. Effectivement, les trois points correspondant à chaque racine sont toujours très proches dans les figures (*figures 16, 17 et 18*) et dans les tableaux correspondants. Il n'y a donc pas d'incertitude significative liée au protocole dans les résultats.

Les résultats synthétiques sont présentés sous forme de plans représentant les groupes d'observations dans des Analyses en Composantes Principales (ACP). Ces représentations permettent de vérifier si les espèces et les dates de prélèvement se différencient de façon significative.

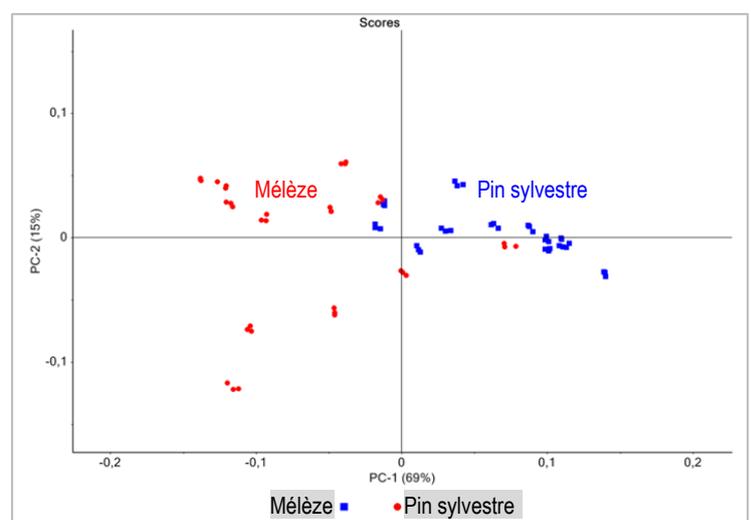


La *figure 16* présente le plan des deux facteurs principaux (1 & 2) de l'ACP réalisée sur les spectres NIR de l'ensemble des échantillons de racines de mélèze et pin sylvestre prélevés en 2009, 2011 et 2013 (n=72). La composante n°2 (verticale) sépare une partie des échantillons d'origine (2009) et ceux qui ont séjourné sous terre 2 ou 4 ans.

Figure 16 : Plan 1/2 de l'ACP de l'ensemble des échantillons avec une couleur par date de prélèvement.

La *figure 17* présente le même plan d'ACP dans lequel on a discriminé les deux espèces par la couleur. Mélèze et pin sylvestre forment deux groupes distincts, bien qu'il y ait des zones de recoupement aux marges.

Figure 17 : Plan 1/2 de l'ACP de l'ensemble des échantillons montrant la séparation assez nette entre les deux espèces.



La **figure 18** présente les résultats des ACP réalisées indépendamment pour chaque année, respectivement 2009, 2011, 2013, avec les deux espèces. Elle distingue par leur couleur les deux espèces, qui sont généralement bien séparées, et par les étiquettes les différents diamètres des racines concernées. Chaque analyse prend en compte 24 échantillons.

Le classement des échantillons dans le plan, pour chaque espèce, suit à peu près l'ordre de la densité sèche des échantillons concernés, en particulier suivant l'axe 1. Cela signifie que cette densité représente d'une certaine façon les variations chimiques, notamment par des proportions différentes de bois de cœur et d'aubier, et pour 2011 et 2013 par des évolutions contrastées de la décomposition.

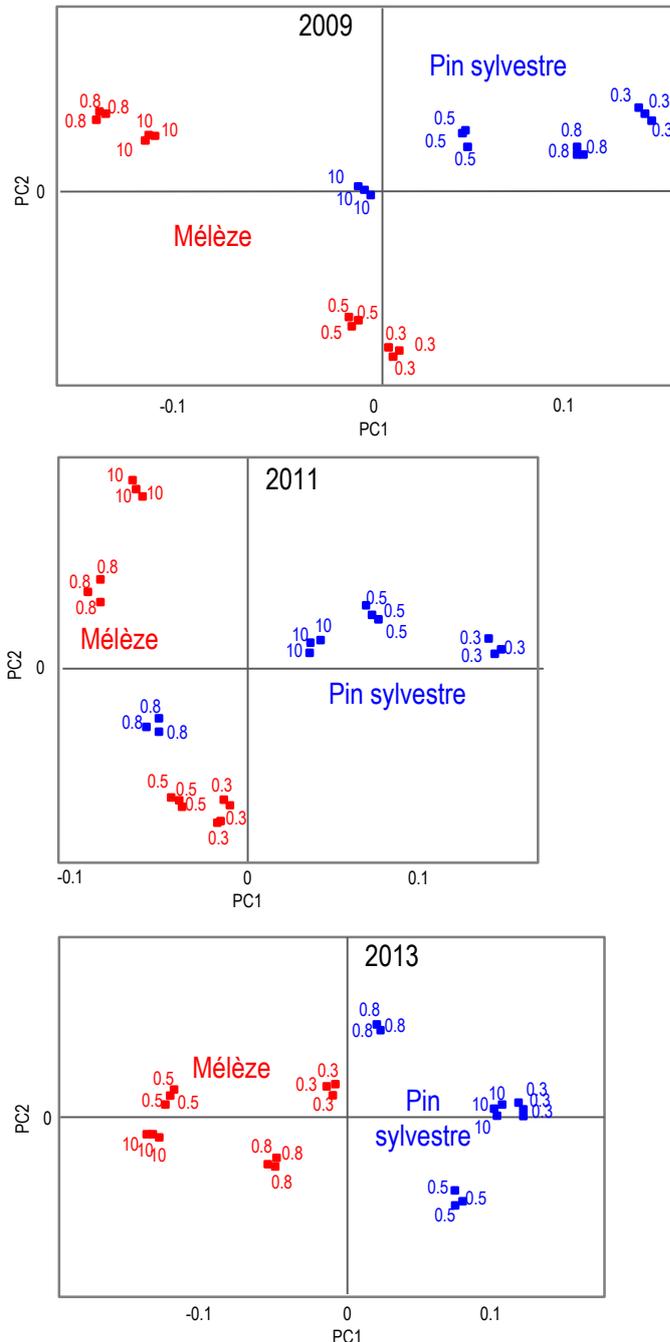


Figure 18 : ACP pour chaque année d'échantillonnage. Les deux espèces se distinguent bien sur l'axe 1 horizontal, le long duquel les échantillons s'ordonnent par densité sèche, cette densité ne suivant pas toujours l'ordre de diamètre.

Chez le mélèze en 2009 et 2011, il y a une forte différenciation selon l'axe 2 (vertical), séparant les gros et petits diamètres. On ne la retrouve pas chez le pin sylvestre, où cette séparation se fait plutôt suivant l'axe 1, mais avec une inversion entre les diamètres 8 et 10 cm. Il s'agit sans doute d'un effet de la présence et du pourcentage de bois de cœur et de l'âge des racines.

En 2013, l'ordre des diamètres dans le graphique ne suit plus de logique claire. Il fait sans doute écho à des phénomènes observés comme l'éclatement de certains échantillons et de fortes variations de densité au sein des classes (annexe 2).

La variabilité des échantillons entre deux années et leur faible nombre ne permet pas d'aller plus avant dans l'analyse.

D - Interprétation synthétique des résultats

D.1 - Etat visuel et pénétrométrie

Mélèze et pin sylvestre suivent des évolutions moyennes très semblables visuellement jusqu'en 2013. La note du mélèze est augmentée par un échantillon éclaté, très différents des autres. Entre 2013 et 2018, le pin sylvestre se dégrade visuellement de façon plus systématique et plus rapide que le mélèze, où là encore quelques échantillons tirent la note moyenne vers le haut, alors que beaucoup d'autres se sont peu dégradés (*figure. 9c*, tableau en *annexe 1*).

2011 - La note visuelle reste au niveau le plus bas au cours des deux premières années, sauf 2 ou 3 échantillons par espèce. Le bois reste sain et dur, mais quelques échantillons de mélèze montrent une forte teneur en eau superficielle (de l'eau s'écoule à l'endroit du test de pénétration), en raison de la saturation du sol en début de printemps (la neige vient de fondre, et il a plu). Les écorces sont intactes sauf une tendance à s'exfolier extérieurement. Des filaments de champignons blancs colonisent la surface de quelques échantillons de pin sylvestre (*photo 28*) et le centre de 2 échantillons fendus (*photo 29*). Ils ne pénètrent pas dans le bois.

De nombreuses radicelles d'herbacées ont colonisé les matériaux entourant les échantillons (*photo 28*). Ils se sont parfois immiscés dans ou sous l'écorce quand elle était un peu décollée ou s'exfoliait, ou dans les fentes des échantillons éclatés.



Photo 28 : Champignons blancs tapissant superficiellement l'échantillon, et radicelles d'herbacées colonisant les matériaux alentour



Photo 29 : Champignons blancs développés dans une fente de l'échantillon (produite lors de la découpe en 2009)



2013 - Des dégradations apparaissent sur toutes les classes de diamètre, le pin sylvestre étant en proportion des échantillons un peu plus touché que le mélèze, mais quelques échantillons de mélèze augmentent sa moyenne. Les écorces tendent à s'exfolier et à devenir spongieuses. Des radicelles colonisent assez systématiquement la surface et parfois l'intérieur de l'écorce qui commence par endroits à se décoller (*photo 30*).

Photo 30. Décollement de l'écorce sur un échantillon de Pin sylvestre de diamètre 10

Le nombre d'échantillons envahis de champignons blancs en surface ou dans les fentes a doublé chez le pin sylvestre (6), et 3 échantillons de mélèze sont atteints. Pour le pin sylvestre, ce ne sont pas forcément les mêmes échantillons qu'en 2011 qui présentent des champignons en surface d'écorce en 2013. Ce qui montre que ce développement était initialement très superficiel et opportuniste, et ne contribuait que peu à la dégradation. Par contre en 2013, le bois présente par endroits, notamment sur les faces coupées, un tapissage blanc qui semble bien accroché dans les fibres du bois.

Le test de pénétration montre que le bois est encore très dur pour les deux espèces. La note des deux espèces n'a que très légèrement augmenté, un à deux échantillons par classe de diamètre ayant gagné ½ classe de pénétrabilité. Ces variations de faible ampleur proviennent en partie de la manipulation elle-même (ce n'était pas le même opérateur) et de la variabilité intrinsèque des échantillons qui peuvent différer suivant les points testés. La dégradation au bout de 4 ans, tout en étant assez probable sur la dureté, est minime.

2015 - La dégradation visuelle se systématisait entre 4 et 6 ans. Elle reste faible en raison du code de classement qui impose des dégradations importantes sur le bois lui-même pour passer à la classe 3, mais à l'intérieur de la classe 2 l'évolution des symptômes est claire. L'augmentation se poursuit au même rythme que dans période précédente pour le pin sylvestre, et ralentit un peu pour le mélèze. On note en particulier un décollement quasi-systématique au moins partiel des écorces,



parfois sur la totalité de l'échantillon, et la disparition d'une partie de l'écorce qui s'est détachée par morceau sur plusieurs racines de pin sylvestre (*photo 31*).

Photo 31 : décollement et perte de l'écorce sur un échantillon de pin sylvestre

Les champignons ont envahi la moitié des échantillons de pin sylvestre, et un tiers des échantillons de mélèze. Sur certains de ces échantillons, ils sont très abondants, formant une couche continue sur une forte proportion de la surface, que ce soit sur les faces coupées ou sur les écorces. Ils sont parfois bien accrochés dans la structure du bois (*photo 32*) ou de l'écorce.

Photo 32 : champignon couvrant une face d'un échantillon de pin sylvestre.



Un champignon à mycélium jaune a aussi fait son apparition sur le pin sylvestre.

Chez quatre échantillons de pin sylvestre, de l'eau s'est écoulée plus ou moins abondamment du trou lors du test de pénétrométrie, montrant une saturation du bois et de l'écorce au moins en périphérie de l'échantillon. Les radicelles sont moins systématiquement présentes autour des échantillons, mais elles restent présentes sous l'écorce décollée de certains d'entre eux.

En pénétrométrie, l'évolution s'est un peu accélérée chez le pin sylvestre. On compte pour cette espèce 7 fois la note 2, alors qu'elle n'en comptait aucune en 2013. Chez le mélèze, l'évolution est divergente : la note baisse pour 4 échantillons dans les classes de diamètre 5, 8 et 10, n'augmente d'une demi-classe que pour 1 échantillon, et en moyenne stagne pour toutes les classes de diamètre. La note 2 n'est jamais atteinte. La moyenne générale est stable par

rapport à 2013. Le bois semble donc un peu (à peine) se durcir ou se stabiliser à ce stade en vieillissant, malgré les attaques extérieures qui restent physiquement superficielles. Ces variations sont sans doute en partie liées à un niveau différent de saturation en eau de l'écorce, parfois épaisse, et de la couche superficielle du bois.

2018 - L'état visuel des deux espèces évolue à la même vitesse moyenne, avec de fortes disparités entre classes de diamètre : chez le pin sylvestre, ce sont les plus petits (2cm, note 2.6) qui ont évolué le plus rapidement, les autres diamètres suivant une même tendance modérée et arrivant à une note très proche (1.6 à 2) sans corrélation avec le diamètre. Chez le mélèze ce sont des échantillons éclatés qui tirent vers le haut les classes 3 et 10cm, les plus petits étant paradoxalement les mieux préservés visuellement. Les différences relatives entre classes sont plus fortes que chez le pin sylvestre.

La quasi-totalité des échantillons des deux espèces a une écorce au moins partiellement décollée du bois, et souvent entièrement même si elle semble intacte. Bien que sèche, l'écorce est souvent molle. Il n'y a eu aucun cas de liquide coulant lors des tests de pénétrométrie en 2018, montrant que le phénomène observé aux dates précédentes était lié à la saturation du sol par de l'eau lors des mesures effectuées au printemps. Comme en 2015, différents types de mycéliums blancs, filamenteux ou couvrants, tapissent parfois très densément les faces des échantillons, et une partie du bois sans écorce (*photo 33*), et s'insinuent entre l'écorce et le bois. Ils se mélangent parfois avec des mycéliums jaunes ou verts (*photo 34*).

Photos 33 et 34: *mycélium très dense sur un échantillon de mélèze (à gauche), et mélange de champignons blancs, jaunes et vert sur un échantillon de pin sylvestre (à droite)*



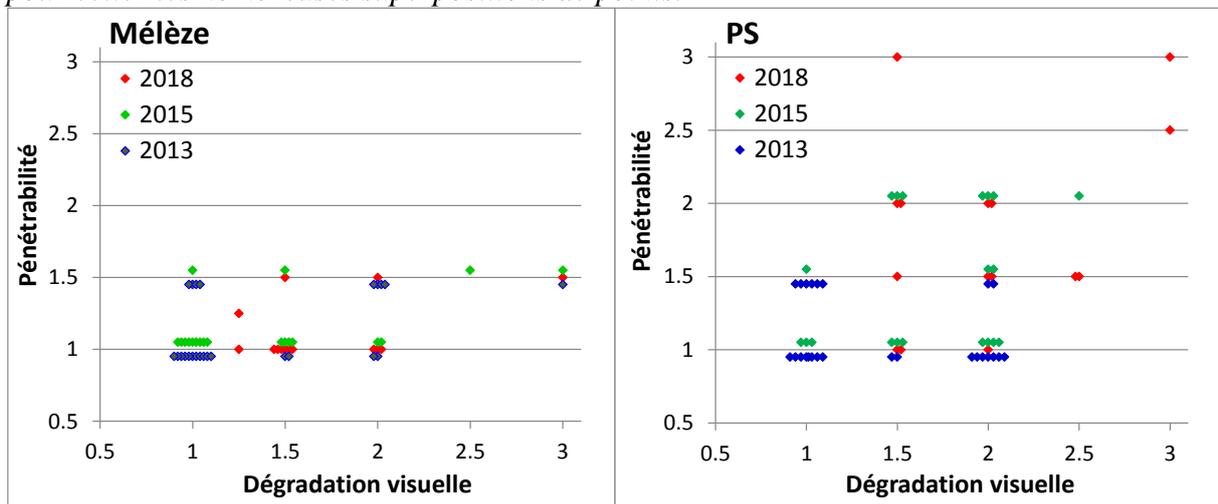
Les écorces sont de plus en plus colonisées par des radicelles (*photo 33 et 35*), et même des petites racines (*photo 36*) émettant de nombreuses radicelles sous l'écorce, profitant de son décollement et l'accentuant.

Photos 35 et 36 : *radicelles (à gauche) et petites racines (à droite) colonisant des écorces*



Aucune des deux espèces ne montre une relation forte ($r^2 < 0.2$) entre aspect visuel extérieur des échantillons et dureté de leur bois (*figure 19*), que ce soit sur l'ensemble des échantillons ou sur les mesures à chaque date. Une forte hétérogénéité et quelques échantillons atypiques en sont responsables, ainsi que chez le mélèze la faible différence entre la valeur maximale (1.5) et minimale (1) de pénétrabilité sans rapport avec la variabilité de la dégradation visuelle (de 1 à 3). Cependant, l'augmentation moyenne de ces deux valeurs de dégradation s'observe simultanément (*figures 8 et 9*). Par ailleurs, les quelques valeurs les plus fortes de dégradation visuelle correspondent le plus souvent au niveau le plus élevé de pénétrabilité à une date donnée. Si, chez le mélèze, un pourcentage important des valeurs les plus faibles de pénétrabilité correspond à des échantillons peu dégradés extérieurement, ce n'est pas autant le cas chez le pin sylvestre. L'écorce, qui se dégrade beaucoup plus vite que le bois, contribue à accentuer l'écart entre les deux paramètres, ainsi que les attaques de champignons, qui sont spectaculaires en surface mais encore peu pénétrantes aux dernières mesures.

Figure 19: Relation entre note visuelle de dégradation et note de dureté (pénétrométrie). Les valeurs ont été volontairement décalées de quelques pourcents, latéralement et verticalement, pour éviter les nombreuses superpositions de points.



Chez le pin sylvestre, la dureté est proportionnelle au diamètre en 2015 et en 2018 (*fig. 9a*), ce qui montre que les petits échantillons se ramollissent plus vite que les gros. Mais ce n'est pas le cas chez le mélèze (*fig. 8a*) où l'évolution est plus chaotique avec le temps et où il n'y a pas de hiérarchie liée à la taille. Les écarts entre classes de diamètre chez le mélèze restent faibles et dépendants de quelques échantillons particuliers. Dans tous les cas, le bois du mélèze reste dur après 10 saisons dans le sol, et cette dureté n'a pas changé en moyenne depuis 2013 : en 2018, les échantillons les plus mous du mélèze sont aussi dur (note moyenne autour de 1.4) que les échantillons les plus résistants du pin sylvestre.

D.2 - Poids et densité des échantillons

A l'état frais, le poids standardisé des échantillons de mélèze, et leur densité qui lui est strictement proportionnelle, (*tableau 5, figure 10*) ont augmenté en moyenne de 13% en 2011 par rapport à 2009, montrant une forte saturation en eau. Ils sont revenus très près de leur valeur initiale en 2013 (+1%) et 2015 (-3%), avant de plonger fortement, et de façon très homogène, en 2018, atteignant -34% par rapport à l'origine.

Pour le pin sylvestre (**tableau 7, figure 12**) il n'y a pas de gain significatif du poids ni densité du bois frais en 2011 (+3%). La saturation en eau s'est donc sans doute accompagnée d'un début de transformation du bois (cf. variations du bois sec). La perte est similaire à celle du mélèze en 2013 et se poursuit avec la même ampleur en 2015 (-10% à chaque mesure), avant de plonger de -25% en 2018 en valeur relative, ce qui l'amène à -45% de la valeur d'origine.

La densité fraîche initiale des échantillons de mélèze (2009 et 2011) était inversement corrélée à leur diamètre (**figure 10**), comme si les petits échantillons étaient plus gorgés d'eau. Le bois de cœur, plus important en proportion chez les gros diamètres, devrait en principe les rendre plus denses. Mais ce bois de cœur très imperméable, et donc moins imprégnable, est beaucoup moins gorgé d'eau à l'état frais. Cette hiérarchie s'est estompée par la suite, seule la classe 10cm conservant une densité significativement plus faible à l'état frais que les autres, qui sont très proches les uns de autres.

Pour le pin sylvestre, on retrouve à l'état frais (**figure 12**) une densité supérieure chez les petits diamètres (2 et 3 cm) par rapport aux plus gros (5 à 10 cm), encore plus marquée et pour des raisons similaires.

A l'état sec, les échantillons de mélèze ont perdu en moyenne 15% de poids entre 2009 et 2018 (**figure 14**), mais avec une perte de 20% en 2015 compensée par un rebond en 2018. La tendance à une perte progressive est, sur la moyenne de 2013, perturbée par un échantillon anormal (très dense) dans la classe 5, et en 2018 par un échantillon très dense dans la classe 3 (**figure 11**). Concernant 2015, l'échantillon ramené au laboratoire pour la classe 10 est également spécial car il était éclaté dès le premier déterrage. Il a beaucoup plus évolué que la moyenne de sa classe, en raison de l'exposition de son cœur aux éléments de décomposition et à l'imprégnation, sans protection de l'écorce sur une grande partie de sa surface. Sa densité est particulièrement et anormalement faible et cet échantillon doit être fonctionnellement assimilé à un plus petit diamètre.

La combinaison d'une densité fraîche stable sur 6 ans avec une densité sèche en baisse progressive montre que le taux de saturation du bois augmente avec le temps, signe d'une transformation physicochimique interne qui modifie la structure et la composition du bois. Cette transformation est cependant assez faible pour conserver au bois sa robustesse et sa dureté.

A l'état sec (**figure 13**), la densité du pin sylvestre diminue progressivement (avec des variations intermédiaires non significatives dues à l'échantillonnage) pour atteindre 77% de la valeur initiale en 2018, soit une perte un peu plus forte (de 12%) que celle du mélèze (**figure 14d**). Chez le pin sylvestre, la densité fraîche a diminué plus que la densité sèche sur 10 ans (-45% contre -23%), même si on notait, au bout de 2 ans, une divergence de ces deux densités avec une augmentation de densité du bois frais, la tendance s'étant inversée ensuite.

La différence entre mélèze et pin sylvestre pour la perte relative de densité en 10 ans est du même ordre de grandeur pour le bois frais et le bois sec (10 à 12%). Cela demande à être confirmé au prochain déterrage, car la variabilité des échantillons de mélèze entre dates est très forte pour le bois sec. Mais elle est logique et cohérente avec la meilleure résistance du bois de mélèze à la dégradation qui est bien connue.

D.3 - Spectroscopie Proche Infra-Rouge (SPIR)

La spectroscopie proche infra-rouge permet de distinguer d'une part les espèces, d'autre part la taille des racines, et enfin des échantillons récemment récoltés par rapport à des échantillons ayant séjourné dans le sol. Elle témoigne sur ce dernier point d'une transformation chimique significative dès 2 années de décomposition dans le sol, même si l'apparence externe et la dureté du bois ne semblent pas modifiées. Elle confirme les mesures de teneur en eau des bois frais qui augmentent avec le temps, signe de cette transformation du bois. En comparant les **figures 16 et 17**, on peut noter que l'évolution relative des échantillons de mélèze entre 2009 et 2011 est beaucoup plus forte que celle du pin sylvestre.

L'ordre des diamètres dans le plan de l'ACP suit l'ordre des densités sèches des échantillons. Normalement la densité des racines augmente avec leur diamètre, en raison de la proportion croissante du bois de cœur. Mais la variabilité des échantillons disponible fait que parfois cette logique n'est pas respectée. La position de l'échantillon de diamètre 5 de mélèze en 2013, anormalement dense (**figure 11**), se retrouve par exemple dans sa position dans l'ACP sur la NIRS (**figure 18-2013**).

L'outil NIRS s'est révélé intéressant dans d'autres contextes pour une bonne différenciation des espèces, des diamètres de racines et des temps de décomposition dans le sol. Cette analyse le confirme, malgré des incertitudes liées au faible échantillonnage.

E - Comparaison avec des essais similaires

La décomposition des racines de mélèze et de pin sylvestre sur le site de Castérino est plus lente que celle mesurée sur des dispositifs identiques situés en plaine:

- d'une part, pour des feuillus (peuplier, robinier, chêne, frêne) dans un contexte à la fois plus humide et plus chaud dans la région de Grenoble (Bambara 2016, Zanetti et al. 2009).
- d'autre part en milieu méditerranéen pour des racines de pin d'Alep, dans un contexte beaucoup plus chaud mais aussi plus sec sur la digue du barrage EDF de Mallemort (Vennetier et al. 2019).

Cette différence est logique : la saison favorable à l'activité des champignons, insectes et bactéries qui décomposent le bois est très courte à Castérino, où les températures nocturnes sont fréquemment négatives durant 7 à 8 mois de l'année, et où la neige reste au sol couramment jusqu'en avril. De plus, le matériau constitutif de la digue et du site d'enfouissement initial du dispositif (jusqu'en 2015) est très grossier et très perméable. Il a une faible capacité de rétention en eau. Le climat plutôt sec de l'été, influencé par la proximité de la Méditerranée, peut donc rendre la courte période chaude également défavorable à l'activité des décomposeurs à cause de la sécheresse induite dans le sol drainant. Si la saison chaude, favorable aux décomposeurs en région méditerranéenne, est plus longue qu'à Grenoble, elle est interrompue par une sécheresse d'été qui arrête l'activité biologique.

Le bois de cœur de mélèze est réputé imputrescible quand il est à l'air. On aurait donc pu penser qu'il s'altérerait moins vite que celui du pin sylvestre, même dans le sol. Cette hypothèse est en partie vérifiée par une plus faible perte de dureté des échantillons de mélèze, comparé au pin sylvestre. Mais elle n'est pas confirmée par les autres analyses : la densité à l'état sec du mélèze diminue autant en pourcentage que celle du pin (-20%), les analyses en spectroscopie infra-rouge montrent une évolution significative de la composition chimique, plus forte que celle du pin sylvestre au cours des deux premières années dans le sol, et quelques échantillons fendus ou éclatés ont beaucoup perdu en densité lorsque les agents de décomposition pouvaient pénétrer jusqu'à leur cœur.

4 - Conclusions et perspectives

Au bout de 10 ans d'enfouissement, mélèze et pin sylvestre suivent des évolutions visuelles similaires dans l'ensemble, avec une dureté qui résiste mieux chez le mélèze.

La vitesse de décomposition des racines est moins rapide en zone montagneuse (1500 m d'altitude) qu'en plaine. Les conditions environnementales en altitude sont moins propices à l'activité des agents entrant dans le processus de décomposition, notamment lors des périodes hivernales. Seuls les petits diamètres de pin sylvestre commencent à montrer, pour certains, des signes de dégradation avancée, sans que l'intégrité du bois soit encore menacée.

Les champignons ont cependant fortement progressé avec le temps, ayant gagné une grande partie des échantillons au bout de 10 ans. Au départ simplement appliqués très superficiellement sur les écorces et sur les faces coupées, et peu couvrants, ils ont pénétré les couches les plus superficielles du bois et parfois forment un tapis continu en surface, en particulier sous les écorces qui sont largement décollées. Il est donc possible que la décomposition s'accélère désormais sous la pression de ces décomposeurs.

Les écorces décollées, et qui se dissocient du bois, offrent une voie de passage à l'eau. Celle-ci peut déjà s'infiltrer le long de racines dans les matériaux qu'elles colonisent, et donc imprégner en profondeur un remblai, et initier une érosion interne. Le danger commence donc à apparaître pour une digue, malgré la faible décomposition du bois des échantillons.

Les prochaines excavations

Bien que l'accélération des phénomènes de dégradation soit probable, cette dégradation restera assez lente par rapport aux milieux de plaine. On peut attendre 3 à 4 années avant la prochaine excavation, suggérée fin 2022 ou au plus tard fin 2023, pour bénéficier de la totalité de la saison de décomposition. L'évolution des échantillons devrait alors être très significative. Il s'agira de déterrer et mesurer sur le terrain les échantillons restants et de ramener au laboratoire les paniers n°5 de pin sylvestre et mélèze, éventuellement les paniers n°6 si la décomposition est très avancée.

On considérera qu'il s'agit de la fin de l'expérimentation lorsque les échantillons ne seront plus manipulables.

Bibliographie

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

Durouchoux, C., Barrage de Castérino – Connaissances géologiques après investigations, Rapport EDF, Département TEGG, Réf : EDTGG 07 0464, 2008.

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 pin d'Alep, digue amont du barrage de Mallemort: Rapport après 7 ans de décomposition. Irstea, EDF, mai 2019, 22p.

Zanetti C., Mériaux P., Vennetier M. 2019 - Etude de l'enracinement des arbres dans les digues de protection contre les crues de l'Isère, Cemagref / AD-IDR, Juillet 2009, 40p.

-

ANNEXES

Annexe 1 : Tableaux des évolutions visuelles du mélèze et du pin sylvestre

Annexe 2 : Variabilité des évolutions de poids frais pour mélèze et pin sylvestre

Annexe 1.1: Evolution visuelle Mèlèze

	Info 2009	Info 2011	Info 2013	Remarques 2013	Info 2015	Remarques 2015	Info 2018	Remarques 2018
M02.1								
M02.2	R/C	E	R / rad	un peu mou/spongieux - écorce qui se décolle du bois				
M02.3	R		R	l'écorce s'arrache avec le couteau / un peu spongieux	dec	écorcé à 15%		
M02.4		E		Spongieux + décollement léger	dec		dec, rad	décolée mais entièrement présente
M02.5			rad	décol écorce à l'extrémité + mou + effeuillement	dec		dec, rad	
M02.6		/	/	manquant perdu en 2011		manquant perdu en 2011		
M03.1		E						
M03.2			R					
M03.3	R		rad		DEC	écorcé à 40%, écorce se décolle largement		
M03.4			R	Spongieux	dec		dec	Très peu de ch
M03.5		F E	rad	Fissure	dec		DEC, rad	
M03.6			rad	Effeuillement + décollement à l'extrémité + mou	dec, rad	bois reste dur sur faces transversales	DEC, rad	écorce entière mais entièrement décollée du bois
M05.1								
M05.2	R/C	E	R / rad	un peu de radicelles				
M05.3	C/E	E	rad / C		dec, ch+	Très gros filaments mycéliens sur écorces et toutes les faces		
M05.4	R	E	rad / R	Effeuillement	dec, ch	1 face latérale ttes blanche de mycélium	ch++, rad	bcp de champ blanc
M05.5	E	E L	E / R	Effeuillement	dec, rad		dec	à peine qq radicelles
M05.6	R	L	R / rad	Effeuillement + décollement extrémité entre l'écorce et le bois	dec, rad	bois reste dur sur faces transversales	dec, rad	
M08.1								
M08.2		L	R / rad	écorce qui se décolle un peu				
M08.3		C	ch / R / rad	Beaucoup de champignon	dec, ch++	faces latérales couvertes de ch blc, un peu sur écorce		
M08.4	C/R/F	L F	C / rad	un peu spongieux, fissure au niveau de l'écorce	dec, ch+, rad	Bcp de ch sur faces latérales, un peu sur écorce	ch++, dec, rad	Bcp de chsur tranches et décollements d'écorce
M08.5	R DC	E L	rad / DC	Effeuillement	dec, rad		ch, dec	ch seulement sur extrémités
M08.6		L	rad	Effeuillement mais pas mou.	dec, rad	bois reste dur sur faces transversales	dec	Seulement quelques radicelles
M10.1	F	F						
M10.2		C	ch	écorce un peu décollé				
M10.3	F	F	Fx2 / ch	Fendu 2 fois / champignon / spongieux	F, ch++, E,	bcp de mycélium blc sur faces internes et latérales, bcp		
M10.4	F	F C	F x3 / ch	fendu 3 fois / aubier qui se défibre + fissure + débris	F, ch++, E, DEC,	bois mou sur 1 face (pénétro 2cm), éclaté 3 morceaux, écorce tte décollée, ch blc a tt envahi	ch+++, DEC, rad	Pénétro variable 1 à 2, entièrement couvert de ch blanc, éclaté en 3 morceaux
M10.5		L	rad	Mou à l'extrémité	dec, rad		chj, ch, rad	
M10.6	R	L	rad / R	pas mou + effeuillement	dec, rad	bois reste dur sur faces transversales	dec, rad	

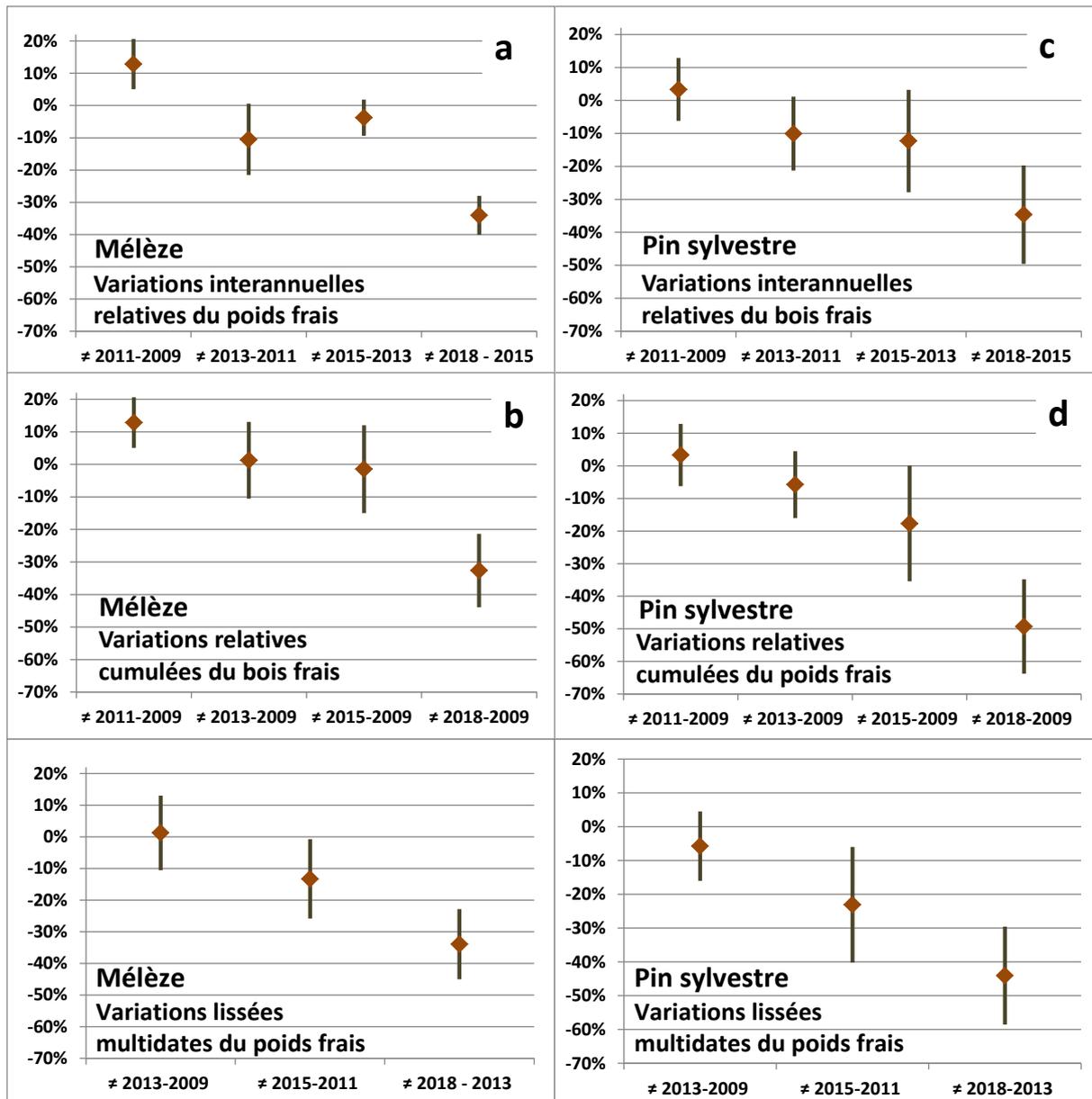
R = Ram ; C = Coude ; E = Ecorcé ; F = Fendu ; Co² = Double cœur ; L = Liquide ; ch = champignon Blanc (++ = très abondant) ; rad = radicelles entre écorce et bois ou traversent l'écorce
 dec = début décollement - désquamation écorce encore en place mais molle; DEC = Ecorce fortement décollée; chj = champignon jaune; chv = champignon vert

Annexe 1.2: Evolution visuelle pin sylvestre

	Info 2009	Info 2011	Info 2013	Remarques 2013	Info 2015	Remarques 2015	Info 2018	Remarques 2018
Ps02.1								
Ps02.2	R	R	R	Mou au touché, aspect un peu spongieux				
Ps02.3	F	F	F/rad	Manque quelques bouts d'écorce	F/DEC	Reste écorce sur 80% mais toute décollée, bois assez mou		
Ps02.4	F	F	F/E/rad	Un peu mou / écorce qui se décolle	F/E/DEC	Ecorce toute décollée, début érosion bois aux extrémités	DEC, rad	coupé en 2 (1/4 - 3/4) quelques radicelles
Ps02.5	C	C	C/rad	Effeuillement + décollement de l'écorce	C/ch/DEC	ch blc sur 1 face, écorce présente 70% mais toute décollée	DEC, rad	Ecorce presque entièrement partie
Ps02.6	C	C	C/rad	Décollement de l'écorce aux extrémités	C/L	un peu de liquide au test pénétro	rad, dec	Ecorce partie à une extrémité et localement
Ps03.1								
Ps03.2								
Ps03.3					dec	écorce se désquame superficiellement		
Ps03.4	C	C	C/E	Effeuillement de l'écorce	C/EL/dec	Ecorce en place en partie décollée, un peu de liquide au test pénétro	rad, ch, DEC	quelques radicelles, 1 peu ch
Ps03.5	R	R	R/rad	Effeuillement de l'écorce / spongieux sous l'écorce	R/ch+/dec	beaucoup champignon blc, écorce partie sur 25%	ch, rad, dec	
Ps03.6	C/E	C/E/ch	C/E	Effeuillement de l'écorce	C/EL+/dec	bcp de liquide sort au test pénétro.	ch, rad, dec	un peu ch et rad
Ps05.1	R	R/E						
Ps05.2	R	R	R/rad					
Ps05.3	R/C/E	R/C/E	R/C/E/rad		R/C/E/dec	Ecorce partie sur 10%		
Ps05.4	C/E	C/E	C/E	Décollement de l'écorce / spongieux entre l'écorce et le	C/E/DEC	Ecorce partie sur 30%, se décolle sur 80% du restant	ch, rad, DEC	
Ps05.5			ch/rad	Mou entre l'écorce et le bois / Spongieux	ch/dec	début de ch blc sur les faces. Ecorce molle se désquame	ch++, rad, DEC	Bcp de ch blanc
Ps05.6	R	R	R/ch	Décollement de l'écorce, ch sous l'écorce	R/L/ch/dec	Un peu de liqu au test pénétro, ch blc sur 50% d'1 face	rad, ch, dec	
Ps08.1	F	F						
Ps08.2		ch						
Ps08.3			rad		dec	quelques petits bouts d'écorce sont partis		
Ps08.4	R	R	R/rad	Effritement de l'écorce	R/dec/rad	Ecorce partie sur 20% Se décolle en partie, radicelles	rad, DEC, ch	qq traces de champignons
Ps08.5	R	R/ch	R/ch/rad		ch, rad	un peu ch blc sur les faces, quelques radicelles sous écorce	ch, rad++	Bcp radicelles
Ps08.6	R/Co ²	R/Co ²	R/Co ² /rad	écorce spongieuse - décollement de l'écorce	R/Co ² /ch/dec	un peu ch blc sur 1 face et surface branches coupées	ch++, rad, DEC	Bcp champ sur les faces, écorce intacte mais décollée molle
Ps10.1	R	R						
Ps10.2								
Ps10.3	R/Co ²	R	R/Co ²	Décollement de l'écorce / écorce molle / aubier + consistant	R/Co ² /DEC/rad	écorce présente 100% mais se décolle sur 80%		
Ps10.4	R	R	R/ch/rad		R/chj/DEC/rad	écorce partie sur 25%, se décolle en partie, champ jaune, radicelles	DEC, rad, ch, chj, chv	ch blancs, jaune verts très localisés
Ps10.5	R/Co ²	R/Co ²	R/Co ² /ch/rad		ch	bcp de champignon blc sur les faces	rad, ch++, dec	bcp de ch sur les tranches
Ps10.6	R/C	R/C	R/C/ch/rad		R/C/ch/dec/rad	1/4 écorce manque, bcp raéidicelles sous écorce	ch++, rad, dec	bcp de ch sur tranches et zones écorcées

R = Ram ; C = Coude ; E = Ecorcé ; F = Fendu ; Co² = Double cœur ; L = Liquide ; ch = champignon Blanc (++ = très abondant) ; rad = radicelles entre écorce et bois ou traversent l'écorce
 dec = début décollement - désquamation écorce encore en place mais molle ; DEC = Ecorce fortement décollée ; chj = champignon jaune , chv = champignon vert

Annexe 2: variabilité des évolutions de poids frais pour mélèze et pin sylvestre



Ces figures montrent que les évolutions du poids frais des deux espèces sont assez cohérentes dans l'ensemble, et suivent des tendances similaires. Les tendances moyennes montrées dans les figures principales du rapport (*figures 10 et 12*) sont assorties d'une forte variabilité. Cette variabilité a eu tendance à augmenter à partir de 2015 pour le pin sylvestre, mais pas pour le mélèze ou seulement quelques échantillons par date divergent significativement de la moyenne. Cette variabilité intrinsèque des échantillons explique que les mesures de poids et densité du bois sec, obtenues sur un seul échantillon par date, soient assorties de quelques valeurs anormales à chaque déterrage, et implique que seule la tendance générale sur la durée puisse être interprétée pour elles.