Direction régionale
de l'alimentation,
de l'agriculture
et de la forêt Alsace

AgroParisTech
ENGREF
INSTITUT DES SCIENCES ET INDUSTRIES DU VIVANT ET DE L'ENVIRONNEMENT
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY FOR LIFE, FOOD AND ENVIRONMENTAL SCIENCES

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE
DE L'AGRICULTURE
DE L'ALIMENTATION
DE LA PÊCHE
DE LA RURALITÉ
ET DE L'AMÉNAGEMENT
DU TERRITOIRE

ÉTUDE DE L'INCIDENCE DE LA QUALITÉ DES PLANTS FORESTIERS SUR LA PÉRENNITÉ DES BOISEMENTS ET REBOISEMENTS EN ALSACE

Placettes permanentes

Troisième campagne de mesures

Matthieu FELLMANN
Chargé d'études AgroParisTech-ENGREF

Mariana DIAS BAPTISTA
Stagiaire AgroParistech-ENGREF, Université de Sao Paulo

Gérard FALCONNET
Responsable de l'étude

Juin 2011

Résumé

Dans le cadre de l'étude de l'incidence de la qualité des plants forestiers sur la pérennité des boisements et reboisements en Alsace, menée par AgroParisTech-ENGREF et soutenue par l'État, un réseau de 13 placettes permanentes a été mis en place au cours du printemps 2006. Il a été complété par 4 placettes en 2007.

Ce réseau a fait l'objet de deux séries de mesures et d'observations racinaires sur un échantillon de plants arrachés (Pin sylvestre et Chêne sessile) en hiver 2005-2006 et 2007-2008. La dernière campagne de mesures et objet de ce rapport, a été réalisée au cours de l'hiver 2009-2010 et porte spécifiquement sur le Pin sylvestre avec 12 placettes au total.

Ce rapport présente les différentes mesures réalisées ainsi que les résultats obtenus.

Sommaire

Résumé

1. Contexte et objectifs de l'étude 6

2. Choix des plantations "type" 6

3. Mesures réalisées 9

4. Résultats de la troisième campagne de mesures 13

4.1. Hauteur, diamètre, croissance 13

4.2. Bilan des observations racinaires 16

4.2.1. Paramètres agissant sur la hauteur des plants ou évoluant avec le temps 18

4.2.2. Autres paramètres 36

4.3. Critères potentiellement influencés par le système racinaire 41

4.3.1 L'écart à la verticalité 41

4.3.2 La courbure basale 42

4.3.3 La stabilité 44

5. Limites et perspectives 46

Annexes 47

Index des graphiques

Graphique 1 : Hauteur des plants arrachés en 2008 en fonction du diamètre du collet 13

Graphique 2 : Hauteur moyenne sur les 3 campagnes de mesures..... 14

Graphique 3 : Hauteur et croissance moyennes (cm) entre 2008 et 2010 des plants arrachés pour chaque série 14

Graphique 4 : Hauteur moyenne en 2008 des plants arrachés de pins sylvestres en godets 200cc pour des plantations de différents âges 15

Graphique 5 : Hauteur moyenne en 2010 des plants arrachés de pins sylvestres en godets 200cc pour des plantations de différents âges. 16

Graphique 6 : Evolution de la déformation "forme de godet"..... 20

Graphique 7 : Hauteur 2008 des pins sylvestres de 4 ans élevés en godets 200cc en fonction du diamètre du pivot ou de la grosse racine plongeante de l'agglomérat..... 21

Graphique 8 : Hauteur 2010 de tous les plants de pins sylvestres tout âge et toutes modalités confondues en fonction du diamètre du pivot..... 21

Graphique 9 : Hauteur 2010 de pins sylvestres tous âges et toutes modalités confondus en fonction du diamètre de la plus grosse racine de premier ordre..... 24

Graphique 10 : Nombre moyen de racines colonisatrices pour chaque série (les données de l'étiquette indiquent la différence entre les années) 25

Graphique 11 : Hauteur moyenne des plants en fonction du nombre de racines colonisatrices pour chaque série 25

Graphique 12 : Pourcentage de racines par horizon pour chaque série..... 26

Graphique 13 : Nombre moyen de racines tournées en face externe en 2008 et 2010, pour chaque série..... 28

Graphique 14 : Nombre de racines tournées par placette en 2010 29

Graphique 15 : Nombre moyen de racines incluses visibles pour chaque série..... 30

Graphique 16 : Hauteur des plants de pins sylvestres élevés en godets 200cc en fonction du nombre de racines incluses pour chaque âge en 2008..... 31

Graphique 17 : Hauteur des plants de pins sylvestres élevés en godets 200cc en fonction du nombre de racines incluses pour chaque âge en 2010..... 32

Graphique 18 : Nombre de plants présentant un agglomérat ou une protubérance dans chaque série en 2010 36

Graphique 19 : Nombre moyen de racines remontantes pour chaque série 39

Graphiques 20 et 21: Radars représentant l'orientation principale des racines pour la parcelle 1030 (Racines nues de 8ans) à gauche et pour la placette 13 (G 200 de 6 ans) à droite..... 40

Graphique 22 : Ecart à la verticalité moyen pour chaque série 41

Graphique 23 : Courbure basale moyenne pour chaque série 42

Graphique 24 : Moment pour incliner les plants de 20° en fonction du moment pour incliner les plants de 10° par rapport à la verticale (données 2008)..... 44

Graphique 25 : Stabilité moyenne pour les séries de 8 ans mesurées en 2010..... 45

Index des tableaux

Tableau 1 : Choix des parcelles 8

Tableau 2 : Croissance et hauteur des plants en godets 200cc comparés à une modalité du même âge 15

Tableau 3 : Déformations racinaires entre les godets et racines nues sur les 3 campagnes de mesures concernant les 12 station étudiées 17

Tableau 4: Pourcentage de déformation par placette en 2010 18

Tableau 5 : Impact de la déformation des racines en forme de L sur la hauteur en 2008 des pins sylvestres de 6 ans en fonction de leurs modalités de plantation 19

Tableau 6 : Impact des racines en forme de L sur la hauteur en 2010 des pins sylvestres de 8 ans en racines nues 19

Tableau 7 : Comparaison entre les hauteurs des plants en godets 200cc de 6 ans ayant ou pas les racines en forme de godet 20

Tableau 8 : Hauteur moyenne en 2010 des pins sylvestres en fonction du diamètre du pivot ou de la plus grosse racine plongeante 22

Tableau 9 : Coefficients de corrélation entre la hauteur des plants en 2010 et le diamètre du pivot ou de la grosse racine plongeante pour chaque modalité 22

Tableau 10 : Influence des déformations sur le diamètre du pivot ou de la plus grosse racine plongeante 23

Tableau 11 : Hauteur moyenne en 2010 des pins sylvestres en fonction du diamètre de la plus grosse racine de premier ordre 23

Tableau 12 : Coefficients de corrélation entre la hauteur des plants en 2010 et le diamètre de la plus grosse racine de premier ordre pour chaque modalité 24

Tableau 13 : Coefficients de corrélation entre la hauteur des plants en 2010 et le nombre de racines colonisatrices 26

Tableau 14 : Pourcentage de racines par classe de profondeur moyenne de prospection en 2010 27

Tableau 15 : Coefficients de corrélation entre la hauteur des plants en 2010 et le nombre de racines tournées en face externe 28

Tableau 16 : Coefficients de corrélation entre la hauteur des plants en 2010 et le nombre de racines incluses : 30

Tableau 17 : Coefficients de corrélation entre le nombre de racines colonisatrices en 2010 et le nombre de racines incluses : 30

Tableau 18 : Coefficients de corrélation entre la hauteur des plants en 2010 et le nombre de racines colonisatrices : 30

Tableau 19 : Évolution du nombre de racines incluses 32

Tableau 20 : Pourcentage de plants dans chaque classe de distribution des racines sur 360° 33

Tableau 21 : Hauteur moyenne (cm) des plant par classe de distribution racinaire sur 360° 34

Tableau 22 : Pourcentage de racines ayant une absence de racines structurales sur plus de 120° en continu. 35

Tableau 23 : Pourcentage de racines en "agglomérat" 36

Tableau 24 : Pourcentage de racines par classe de spiralisation 37

Tableau 25: Hauteur moyenne des plants en fonction de la classe de spiralisation de leurs racines pour chaque série 38

Tableau 26 : Orientation dominante de racines 39

Tableau 27 : Coefficients de corrélation entre la hauteur des plants en 2010 et l'écart à la verticalité 41

Tableau 28 : Pourcentage de plants ayant un écart à la verticalité de plus de 10 cm et 20 cm. 42

Tableau 29 : Coefficients de corrélation entre la hauteur des plants en 2010 et la courbure basale 43

Tableau 30 : Relation entre déformations, courbure basale et écart à la verticalité. 43

Tableau 31 : Relation entre déformation, courbure basale et écart à la verticalité pour les plants à 8 ans. 43

Tableau 32 : Coefficients de corrélation entre le moment appliqué pour incliner les plants de 20° et différents critères relevés en 2010 : 45

Index des photos

Photo 1 : Placette permanente parcelle 1030 en FI de Haguenau 6

Photo 2 : Mesure de la courbure basale 9

Photo 3 : Mesure de l'écart à la verticalité 10

Photo 4 : Arrachage avec l'« Extirpe plants » Becker 11

PPhoto 5 : Plant en racines nues de 8 ans en forme de L ; les racines ayant été rassemblées principalement d'un côté lors de la plantation. 18

Photos 6 et 7 : À gauche, système racinaire d'un godet 200cc à 8 ans ; à droite, celui d'un semis naturel de 5 ans 27

Photo 8 : Plant élevé en godet 200cc de 8 ans présentant des racines incluses. 31

Photos 9 et 10 : À gauche, plant G200cc de 6 ans en forme de L, avec absence de racines sur au moins 120°. À droite, semis naturel de 3 ans avec racines réparties sur 360° et pivot vertical plongeant 35

Photos 11 et 12 : À gauche, plant élevé en godet 200cc à l'âge de 6 ans avec un agglomérat en forme de godets. A droite, au même âge, un plant élevé en godet 320cc ayant un agglomérat qui commence à évoluer vers une protubérance. 36

Photo 13 : Godet 200cc de 10 ans présentant une racine spiralée 37

Photos 14 et 15 : À droite plant élevé en godet 200cc ajouré ; à gauche plant élevé en racines nues présentant également des racines avec une orientation dominante. 40

Photo 16 : Mesure de la stabilité des plants. 44

Photo 17 et 18 : Plants présentant des formations type « nécroses ». La nature exacte de ces dernières reste encore à déterminer. 46

1. Contexte et objectifs de l'étude

En Alsace, depuis une dizaine d'années, des pins sylvestres élevés en petits godets (100 et 200 cm^3) sont plantés en quantités importantes. Diverses observations effectuées sur des plantations ont permis de déceler des déformations racinaires souvent très importantes sur ces plants. C'est dans ce contexte que le Service de la Forêt, du Bois et de la Chasse-Alsace (SFBC-Alsace) a décidé d'étudier l'incidence de la qualité des plants forestiers sur la pérennité des boisements et, en particulier, l'effet du volume du godet sur leur architecture racinaire. La première phase de l'étude prévoyait :

- de déterminer et de caractériser, en collaboration avec l'ONF et la forêt privée, les situations "type" de boisements et reboisements réalisés avec des plants forestiers élevés en godets et de les cartographier ;
- d'installer, sur ces situations "type" identifiées, des placettes permanentes permettant le suivi des peuplements ; la localisation de ces placettes est présentée en annexe 1.
- de mettre en place et de suivre un dispositif expérimental permettant d'étudier plusieurs modalités de culture des plants (volume et conception du godet) et de types de reboisements (godets, racines nues, semis).

La phase 2, réalisée pendant l'hiver 2007/08, consistait à :

- remettre en état les placettes, deux années après leur installation : pose de nouvelles étiquettes de numérotation pour chaque plant, mise en place de peinture rouge sur les piquets pour faciliter leur repérage, etc. ;
- poursuivre les mesures des 12 placettes permanentes ;
- observer l'architecture racinaire de 10 plants par placette, après mesures et arrachage ;
- dégager d'éventuelles corrélations, par exemple entre des déformations racinaires observées et le volume des godets ou le type de reboisement utilisé.

Photo 1 : Placette permanente parcelle 1030 en FI de Haguenau

La dernière campagne de mesures des placettes permanentes a eu lieu lors de l'hiver 2009-2010.

2. Choix des plantations "type"

Le choix des plantations «type» s'est fait en fonction de la représentativité de l'essence au niveau de son utilisation sous forme de godets sur le massif forestier de Haguenau. En effet, sur ce massif, 83,9 % des plants livrés en godets sont des pins sylvestres. Ce choix s'est fait également en fonction du type de stations boisées ou reboisées principalement en godets. Il s'agit en général des stations 9 et 10 pour le Pin sylvestre.

Ensuite, pour déterminer les plantations "type", une sélection a été réalisée en fonction :

- de l'essence en premier lieu,
- du volume du godet (110cc, 200cc, 320cc, 400cc) et de sa conception (à paroi pleine (Cp) ou ajourée (Ca)),

- de l’année de plantation, généralement en lien avec le volume du godet,

- de la station, en choisissant les plantations présentes sur les stations 7, 8, 9 et 10 de la typologie des peuplements forestiers de Haguenau,

- et enfin de la provenance.

Les placettes ont été choisies en fonction de la modalité représentée et de sa fréquence au sein du massif de Haguenau. D'autres facteurs, comme l'âge du plant à la plantation, ont également été pris en compte.

De plus, deux placettes issues de plants en racines nues ont également été retenues, bien que l’objet de cette étude porte prioritairement sur les plants en godets, afin d’observer les éventuelles déformations racinaires induites lors de la plantation.

Quant à l’implantation de placettes en semis naturels, l’objectif est de pouvoir observer, a priori, des systèmes racinaires ne faisant l’objet d’aucune déformation induite, hormis d’éventuelles déformations liées à un travail du sol.

Les parcelles ainsi retenues sont présentées dans le tableau page suivante :

Essence	Ajoutées en 2007	Type	Type de godets	Année de plantation	Epoque de plantation	Age à l'hiver 05/06 (ans)	Age à l'hiver 07/08 (ans)	Age à l'hiver 09/10 (ans)	Station	Age du plant à la plantation (an)	Travail du sol	Forêt	Parcelle
Pin sylvestre		G 110 cc	Plein	1996	Automne	10	12	14	7?	1	Aucun – plantation en fente	Haguenau	1244
		G 220 cc	Ajouré. Section carrée	2001	Printemps	6	8	10	10	1	Aucun	Haguenau	1020
		G 220 cc	Ajouré. Section carrée	2001	Printemps	6	8	10	9	1	?	Haguenau	130
		G 200 cc	Ajouré. Section carrée	2003	Printemps	4	6	8	9	1	Mise en andain et labour sommaire	Haguenau	96
		G 200 cc	Ajouré ?	2004	Automne	2	4	6	7	1	Potet	Koenigsbruck	13
	*	G 320cc	Plein	2004	Automne	2	4	6	10a	1	Labour sommaire	Haguenau	243
		G 200 cc	Polystyrène. Section circulaire	2005	Printemps	2	4	6	10	1	Mise en andain et labour sommaire	Haguenau	14
		G 200 cc	Ajouré. Section carrée	2005	Automne	1	3	5	10	1	Mise en andain et labour sommaire	Haguenau	55
		Racines nues		2004	Printemps	4	6	8	10 (9)	2 praliné	Mise en andain et labour sommaire	Haguenau	1030
		Racines nues		2003	Printemps	4	6	8	9	1	Mise en andain et labour sommaire	Haguenau	95
	*	Semis naturels		(2005 - 2006)		0-1	2-3	4-5	9 et 10a		Labour sommaire et nivellement avec un rail de chemin de fer traîné par un tracteur	Haguenau	1028
	*	Semis artificiels		1996		9	11	13	9 et 10a		Passage d'un rotovateur (fraise horizontale) sur 8 à 10 cm de profondeur + travail manuel des lignes à la pioche avant semis	Haguenau	54

Tableau 1 : Choix des parcelles

3. Mesures réalisées

Lors de l'installation en 2006, chaque placette correspondait à une zone de forme rectangulaire, la plupart du temps, représentative de l'ensemble de la plantation comprenant **100 plants vivants**.

Sur tous les plants de la placette, il a été relevé :
- la survie,
- la croissance en hauteur H et en diamètre D,
- l'état sanitaire.

Lors de chaque campagne de mesures, 10 plants de chaque placette sont arrachés afin d'étudier leur architecture racinaire. Le choix de ces 10 plants est effectué par tirage aléatoire (un plant par ligne). Les 10 numéros choisis au hasard sont les mêmes pour toutes les placettes.

Au préalable, sur les 10 plants arrachés, il est noté :
- l'écart à la verticalité (avant arrachage),
- la courbure basale (avant arrachage),
- la stabilité du plant (avant arrachage),

Puis, l'analyse de l'architecture racinaire est réalisée en laboratoire.

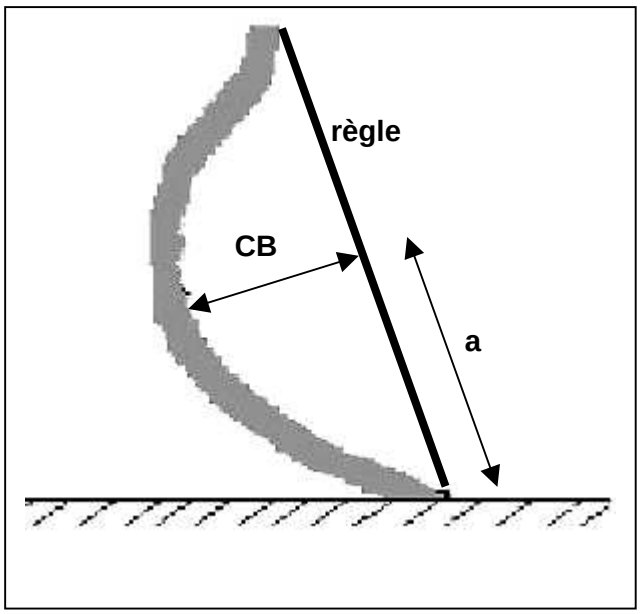
Pour cette 3ème campagne, la totalité des mesures suivantes a été réalisée et les données saisies.

Définition :

- La courbure basale :

Selon la littérature et plusieurs de nos observations faites sur le terrain, la courbure basale du plant pourrait être liée à l'architecture racinaire (P. BALLEUX, 2009).

Elle a été mesurée au niveau de la plus forte courbure, de la façon suivante :



On positionne une première règle au départ de la courbure (la base étant du collet jusqu'à 20 cm pour être au niveau de la base) jusqu'à sa fin (retour dans la direction "normale" de la tige, la tige n'étant pas nécessairement droite). On mesure la distance b au niveau de la courbure maximale et on obtient la courbure basale en cm. On peut la convertir en angle selon la formule suivante : $\tan \alpha = b/a$.

Photo 2 : Mesure de la courbure basale

- L'écart à la verticalité :

Il s'agit d'une distance (cm) entre la verticale au collet et l'arbre à 1 m du sol, on peut cette fois aussi convertir cette mesure en angle grâce à la formule précédente.

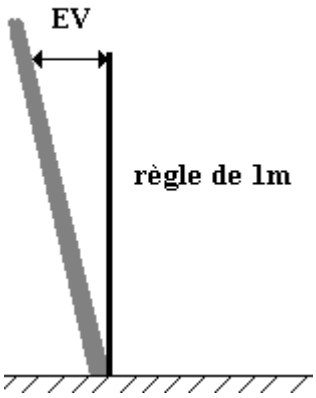


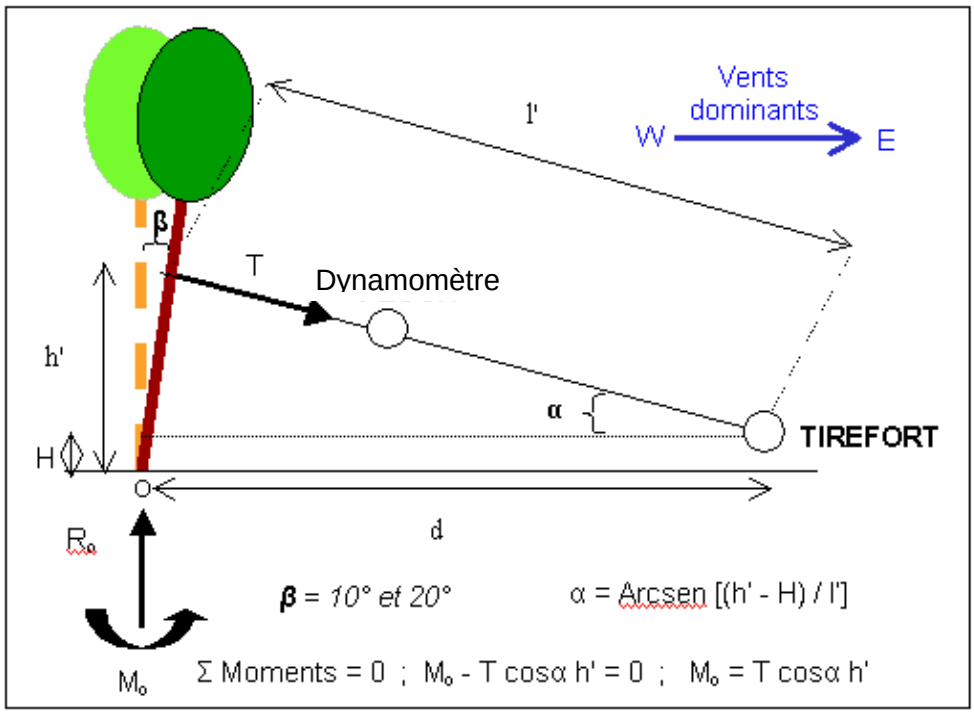
Photo 3 : Mesure de l'écart à la verticalité

- La stabilité :

Comme les deux mesures précédentes, la mesure de la stabilité a été effectuée sur les plants d'au moins 8 ans destinés à être extraits du sol. Pour les plants plus jeunes, le risque est de mesurer davantage la flexibilité de la tige que sa stabilité.

Une force est exercée sur le plant, à l'aide d'un "tirefort", dans le sens du vent dominant (W→E), de façon à l'incliner d'un certain angle β (20°).

La force exercée est mesurée grâce à un dynamomètre :



La hauteur h de fixation du câble est fonction des dimensions du plant, mais elle est toujours inférieure à 1 m et le plus bas possible pour limiter les effets de la flexibilité.

L'angle d'inclinaison β est mesuré à maximum 30 cm du sol pour limiter l'erreur due à la flexibilité du plant. L'angle d'inclinaison testé est égal à 20°.

En fonction de la force exercée, le moment au point O (voir schémas précédents) est calculé selon la formule : $M_o = T \cos\alpha\ h$.

D'après la littérature, le moment serait lié à la surface couverte par les racines. Ainsi, plus le moment est élevé, plus le plant est stable et bien ancré dans le sol.

Il est important, au cours de cette manipulation, de ne pas endommager le système racinaire.

- <u>L'architecture racinaire</u> :

Les plants les plus jeunes ont été extraits du sol à la pioche, à 40 cm de profondeur et 25 cm de la tige.

Les plants de 6 ans et plus ont été arrachés grâce à l'"Extirpe plants" Becker (photo ci-contre), à 50 cm de profondeur et à 25 cm de la tige.

Au regard des analyses de 2006, seuls les principaux critères de déformations racinaires ont été gardés en 2008. A cela, ont été ajoutées des nouvelles mesures (en gras).

Photo 4 : Arrachage avec l'« Extirpe plants » Becker

Après le nettoyage des racines à l'eau, les observations suivantes ont ainsi été relevées :

1) ensemble des racines principales en forme de L (plantation à la pioche),

2) racines de la forme du godet,

3) présence d'un "agglomérat" (ensemble des racines incluses et/ou soudées sous le collet),

4) nombre de racines primaires tournées en face externe (> 90°),

5) nombre de racines primaires ou secondaires remontantes,

6) nombre de racines incluses visibles,

7) distribution des racines sur 360°,

8) absence de racines principales structurales sur plus de 120° en continu : 1 = Oui / 0 = Non,

9) spiralisation (plan horizontal) ou enroulement d'au moins une racine de plus de 3 mm de diamètre autour du pivot ou de l'agglomérat.

10) présence d'un pivot directement vertical développé (minimum 10 cm en dehors de l'agglomérat),

11) si non, présence d'un pivot tordu (110°) au moins au départ,

12) diamètre du pivot,

13) si pas de pivot, présence d'une grosse racine plongeante de l'agglomérat,

14) diamètre de la plus grosse racine de premier ordre,

15) profondeur du pivot ou de la plus grosse racine de premier ordre,

16) nombre de racines dans la zone A (0 à 10 cm),

17) nombre de racines dans la zone B (11 à 20 cm),

18) nombre de racines dans la zone C (21 à 30 cm),

19) nombre de racines dans la zone D (31 à 40 cm),

20) nombre de racines dans la zone E (41 à 50 cm),

21) nombre de racines dans la zone F (> 50 cm),

22) nombre total de racines.

L'annexe 2 reprend le protocole d'analyse racinaire défini et utilisé pour cette étude.

4. Résultats de la troisième campagne de mesures

Les résultats présentés ont été organisés en "série". Une "série" correspond à un âge et une modalité de plantation. Cette nomenclature permet ainsi d'avoir une vision dynamique, avec des modalités de plantation similaires, mais à des âges différents. Cela permet également de comparer, pour un âge donné, deux modalités de plantation. Une synthèse des principales données a été faite pour chaque placette et est présentée en annexe 3.

La modalité de plantation la plus représentée dans l'échantillon est celle des pins sylvestres élevés en godets 200cc, objet principal de l'étude. En effet, ce volume de conteneurs est le plus utilisé depuis quelques années.

Rappelons que la taille réduite de l'échantillon permet principalement de mettre à jour des tendances, sur lesquelles pourront s'appuyer les gestionnaires et financeurs de la filière bois pour prendre leurs décisions.

Les résultats de l'observation du système racinaire de chaque placette sont présentés en annexe n° 1 sous forme de fiche de synthèse.

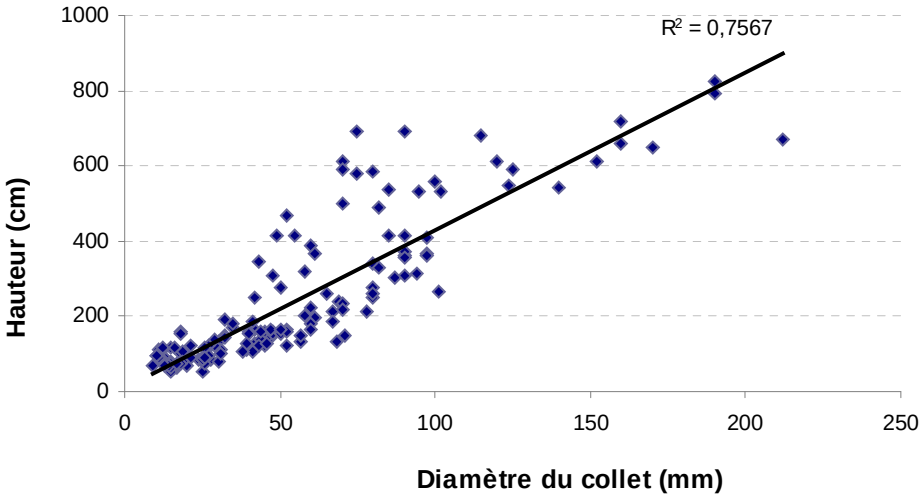
Age	5		6		8		10	13	14
Modalité de plantation	G 200	SN	G 200	G 320	G 200	RN	G 200	SA	G 110
Nombre de plants arrachés	10	10	20	10	10	20	20	10	9*

*

4.1. Hauteur, diamètre, croissance

On s'intéressera le plus souvent à la hauteur des plants pour évaluer l'impact d'une déformation racinaire.

En 2008, il a été montré, comme le présente le graphique 1, que le diamètre au collet est très fortement corrélé à la hauteur, ce qui était prévisible. Le coefficient de corrélation (r) entre la hauteur et le diamètre est de 0,75. La hauteur est une donnée facile à prendre sur le terrain et qui présente un faible risque d'effet notateur, raison pour laquelle on la retiendra comme paramètre principal.



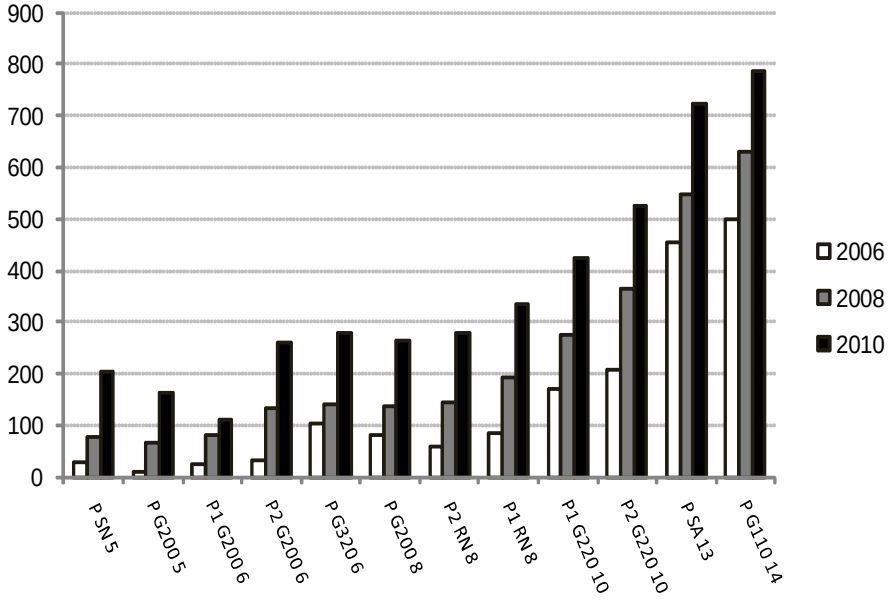
Graphique 1 : Hauteur des plants arrachés en 2008 en fonction du diamètre du collet

* Un plant de la placette G110 14 a été cassé pendant le transport et retiré des mesures

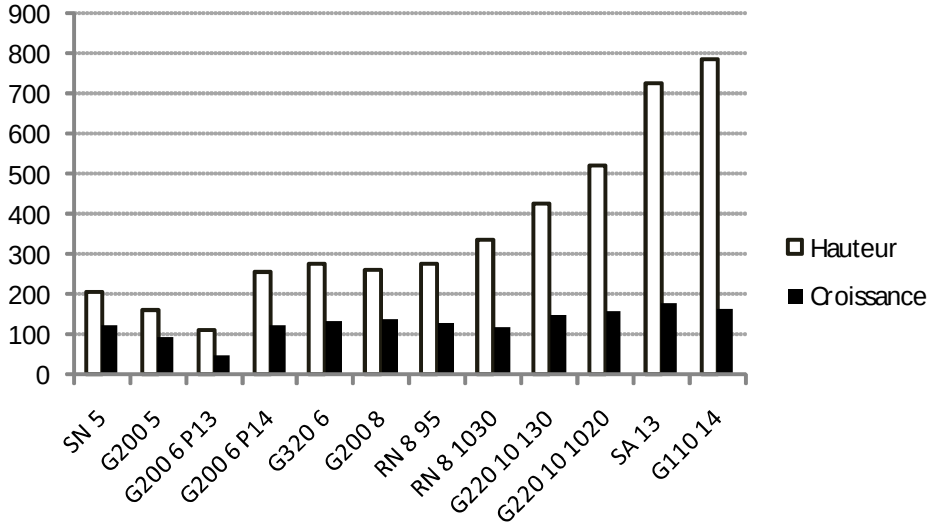
En ce qui concerne la hauteur des plants, en règle générale, les écarts observés initialement se maintiennent. Néanmoins, certains s'estompent, comme pour G 320 6 et G 200 6 P13. Au départ, la différence entre ces modalités était importante avec G320 6 bien plus haut que le reste des modalités, mais, en 2010, cet écart s'est restreint. Néanmoins, pour cet âge, la modalité avec le volume de godet le plus élevé présente une hauteur et une croissance plus importante.

En 2010, pour les plants de 8 ans, les racines nues ont une hauteur moyenne de légèrement plus importante à significativement plus importante (RN 8 1030) que les godets 200cc, alors qu'au départ l'une des parcelles avait une hauteur moyenne plus faible.

Rappelons qu'une hauteur importante au plus jeune âge permet d'économiser en général un dégagement de la plantation. Un volume légèrement plus important (400cc par exemple) aurait peut-être donné des résultats avec de plus grandes différences ? L'étude des sites expérimentaux contribuera à aider à répondre à cette question.



Graphique 2 : Hauteur moyenne sur les 3 campagnes de mesures.



Graphique 3 : Hauteur et croissance moyennes (cm) entre 2008 et 2010
des plants arrachés pour chaque série

Le tableau 2 compare les données de croissance et de hauteur entre des plants en godets 200cc et une autre modalité du même âge.

Tableau 2 : Croissance et hauteur des plants en godets 200cc comparés à une modalité du même âge

Série	Hauteur (cm)	Croissance (cm)
SN5	**205**	126,6
G200 5	163	96
G200 6 P13	112	47
G200 6 P14	259	125,8
G320 6	**277**	**134,6**
G200 8	262	**141**
RN 8 95	277	130,9
RN 8 1030	**336**	120,4

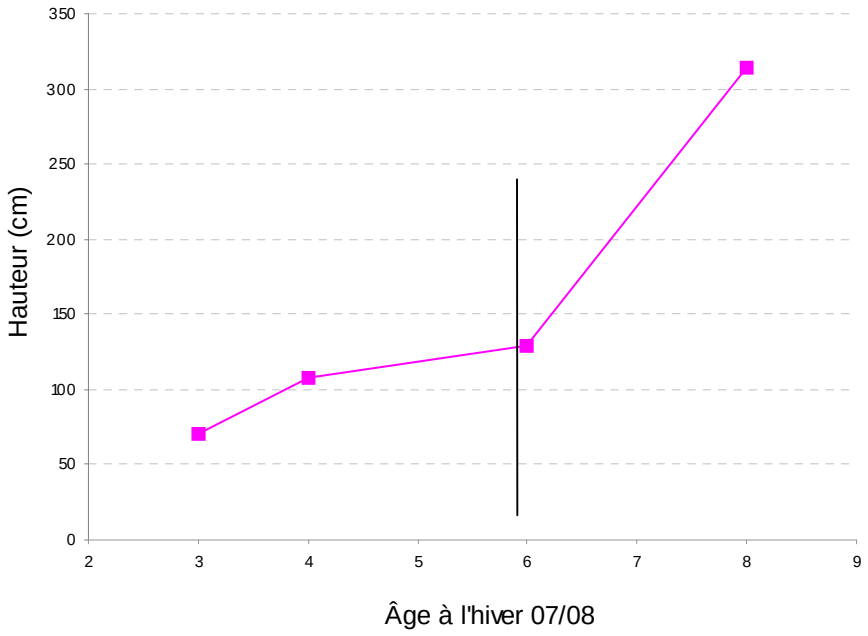
A 5 ans, la hauteur des semis naturels est déjà significativement plus importante que celle des godets 200 cc du même âge.

Pour les plants de 6 ans, le constat est le même en comparaison avec les plants de conteneurs 320cc : 18 cm de différence sur la hauteur par rapport à G 200 6 P 14, et 165 cm d'écart avec G200 6 P13 (cette placette présente un problème de plantation). Pour la croissance, les godets 320cc présentent également la plus forte valeur avec des écarts allant d'environ 10 cm à 87 cm.

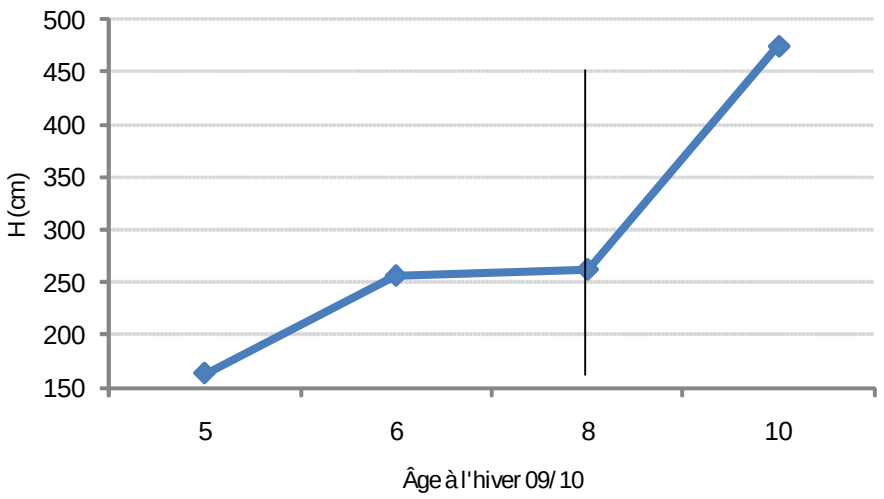
A 8 ans, les racines nues ont une croissance plus faible que les godets 200cc, mais leur hauteur moyenne est toujours plus importante avec des écarts allant de 15 cm à 74 cm par rapport aux plants en G200cc.

Ainsi, on constate qu'à âge identique, **les godets 200cc ont systématiquement une hauteur inférieure aux autres modalités**.

En ce qui concerne notre "série" de référence, à savoir les pins sylvestres élevés en godets 200cc, voici l'évolution de la hauteur des plants qui avait été constatée en 2008.



Graphique 4 : Hauteur moyenne en 2008 des plants arrachés de pins sylvestres en godets 200cc pour des plantations de différents âges



Graphique 5 : Hauteur moyenne en 2010 des plants arrachés de pins sylvestres en godets 200cc pour des plantations de différents âges.

Lors de l'étude précédente, une hypothèse proposait que le plant, à partir de 6 ans, avait pu s'adapter aux contraintes stationnelles expliquant cette augmentation de hauteur. Cette proposition devait être vérifier lors de la troisième campagne de mesures.

Le graphique 4 présente l'évolution de la hauteur en 2008. Il est intéressant de noter l'effet station où le "décrochement" obtenu après l'âge de 6 ans, en 2008, est à présent observable à l'âge de 8 ans. Cela souligne l'impact de la placette plus que celui de l'âge des plants. Cela montre également l'intérêt d'avoir complété ce dispositif par des sites où toutes les modalités équiennes se trouveront dans des conditions écologiques, de travail du sol et de plantation similaires et seront donc davantage comparables là où la typologie des stations montre parfois des limites avec une classification très globale et une qualité de plantation qui peut également différer entre placettes.

4.2. Bilan des observations racinaires

Au cours de cette étude, nous avons défini plusieurs types de déformations racinaires :

- les déformations évoluant dans le temps. Dans ce cas, on comparera par exemple, pour une même espèce et une même modalité de plantation, des âges différents (PS G 200cc à 5, 6, 8 et 10 ans) afin d'obtenir une vision dynamique. On utilisera également les données de 2006 si celles-ci sont disponibles. Ainsi, on pourra noter l'évolution des déformations (au sein d'une même série) ;
- celles qui semblent avoir un impact sur la croissance des plants ;
- et enfin, celles qui ne semblent pas avoir d'impact évident sur la hauteur des plants ou qui sont trop peu représentées pour être prise en compte. Dans ce cas là, on donnera le résultat des observations partant du principe qu'une déformation est susceptible, à un moment donné, d'avoir un impact sur le plant, lors notamment d'aléas climatiques (coups de vent, sécheresse, etc.).

Si la proportion de déformations a globalement diminué avec le temps, ce qui était prévisible avec des déformations plus difficiles à observer ou compenser par le plant, il n'en reste pas moins qu'une part non négligeable est encore concernée par ces déformations.

Ainsi, pour des plants dont l'âge est compris entre 5 et 14 ans, 20 % des plants à racines nues présentent encore une forme en L, 15 % des plants en conteneurs ont gardé la forme du godet, 25 % des plants en racines nues et 44 % des plants en godet ont des racines en agglomérat. **42 % des plants,** toutes modalités confondues, **ont une absence de racines principales structurales sur plus de 120° en continu**, ce qui confirme les résultats obtenus en 2008 avec 53 % des plants présentant ce manque.

Tableau 3 : Déformations racinaires entre les godets et racines nues sur les 3 campagnes de mesures concernant les 12 stations étudiées

	Racines nues			Godets			TOTAL		
	2006**	2008	2010	2006	2008	2010	2006	2008	2010
Ensemble de racines principales en forme de L (due à la pioche)	45,0 %	25,0 %	25,0%	7,1 %	7,0 %	11,4 %	15,6 %	10,4 %	14,1 %
Racine en forme de godets	-	0,0 %	0,0 %	-	27.9 %	15,2 % (5,8%*)	-	22,6 %	12,1 % (4,5 %)
Agglomérat	-	75,0 %	30,0 %	-	46,5 %	13,9 %	-	51,9 %	17,2 %
Absence de racines principales structurales sur plus de 120° en continu	90,0 %	55,0 %	35,0 %	47,1 %	53,5 %	44,3 %	56,7 %	53,8 %	42,4 %

(*) Pourcentage sans la parcelle 13
(**) En 2006, la différence "forme de godets" et "agglomérat" n'avait pas été faite

Sur l'échantillon étudié en 2010 avec des plants allant de 5 à 14 ans :

- **25 % des plants en racines nues** présentent des racines **en forme de L**. Ces plants sous-exploitent donc une partie du sol et peuvent être potentiellement plus sensible au vent ;
- **15,2 % des plants élevés en godets conservent la forme de celui-ci** par la suite, 5,8 % en excluant la placette 13 ;
- **près de la moitié des plants**, quelle que soit la modalité, présente **une absence de racines principales structurales sur plus de 120° en continu.**

Tableau 4: Pourcentage de déformation par placette en 2010

	Racines en forme de L	Racines en forme de godet	Absence de racines principales sur + de 120° en continu
SN5	0	0	20
G200 5	0	10	60
G200 6 P13	**70**	**80**	**90**
G200 6 P14	0	10	30
G320 6	0	10	60
RN 8 P95	10	0	30
G200 8	**20**	10	30
RN 8 1030	**40**	0	40
G220 10 P130	0	0	30
G220 10 P1020	0	0	30
SA 13	0	0	20
G110 14	0	0	22

Dans le tableau 4, on peut observer que la déformation de racines en forme de L est encore bien visible à 8 ans. Les godets 200cc sont également concernés.

On peut aussi noter que la placette 13 est concernée par toutes les déformations et ce dans des proportions très importantes. Un problème de plantation est ici clairement visible avec 70 % des godets en forme de "L" et 90 % des plants avec une absence de racines principales sur plus de 120 degrés en continu.

Pour les racines en forme de godets, la déformation semble disparaître après l'âge de 8 ans ; ceci s'explique par le fait qu'à partir d'un certain âge les racines se sont incluses et la déformation n'est plus visible.

PPhoto 5 : Plant en racines nues de 8 ans en forme de L ; les racines ayant été rassemblées principalement d'un côté lors de la plantation.

4.2.1. Paramètres agissant sur la hauteur des plants ou évoluant avec le temps

- Racines principales en forme de L

Cette déformation touche principalement les plants en racines nues (25 % en 2010) et dans une moindre mesure les plants en godets (11,4 % campagne 2010). En revanche, les semis ne sont pas touchés. Ce phénomène est donc lié à la plantation.

Impact de la déformation sur la hauteur :

En 2008, il avait été constaté que les individus, présentant des racines principales en forme de L, avaient une **hauteur légèrement moins importante** que les autres.

Les mesures 2010 montrent le même constat : les plants à racines nues de 8 ans présentent une différence de hauteur moyenne importante avec 4,30 m pour les plants sans cette déformation contre 2,60 m pour les plants avec les racines principales en forme de L, la limite étant l'effectif très faible disponible.

Tableau 5 : Impact de la déformation des racines en forme de L sur la hauteur en 2008 des pins sylvestres de 6 ans en fonction de leurs modalités de plantation

Série	Ensemble des racines principales en forme de L (due à la pioche) (1=oui ; 0=non)	
RN 8	0	1
Hmax	***430,0***	***260,0***
Hmoy	*339,8*	*248,0*
Hmin	*215,0*	*215,0*
Ecart type	*56,2*	*21,8*
Nombre	*16*	*4*
G200 8	0	1
Hmax	***362,0***	***350,0***
Hmoy	*268,1*	*276,5*
Hmin	*206,0*	*203,0*
Ecart type	*53,2*	*103,9*
Nombre	*8*	*2*

On peut observer que, pour les RN8 P 95, cette déformation impacte également le diamètre moyen du pivot ou de la plus grosse racine plongeante.

Tableau 6 : Impact des racines en forme de L sur la hauteur en 2010 des pins sylvestres de 8 ans en racines nues

Série	**Données 2010**	**Ensemble de racines principales en forme de L (due à la pioche)**	
		1 = oui	**0 = non**
RN 8 P95	Diam. moyen du pivot ou de la plus grosse racine plongeante (mm)	25,5	30,60
	Ecart type	2,6	8,4
	Nombre de plants	4	6

Il est difficile de noter l'évolution au cours du temps de cette déformation étant donné que nous ne disposons que de 2 placettes de plants en racines nues de même âge, mais les tendances observées en 2006 et 2008 sont confirmées, ce qui montre que les racines en forme de L semble affecter la croissance des plants dès les premières années.

- <u>Racines en forme du godet</u>

5,8 % des plants de pins sylvestres élevés en godets sont touchés par cette déformation en 2010. Le pourcentage est inférieur à celui des années précédentes, ce qui montre que cette déformation est plus difficile à observer à partir d'un certain âge.

<u>Impact de la déformation sur la hauteur</u> :

Les plants présentant cette déformation ont une **hauteur inférieure à celle des plants non déformés**.

Tableau 7 : Comparaison entre les hauteurs des plants en godets 200cc de 6 ans ayant ou pas les racines en forme de godet

	Racines en forme de godets (oui=1; non=0)	
	0	**1**
Hmax	*398,0*	*265,0*
Hmoy	*263,3*	*173,0*
Hmin	*135,0*	*70,0*
Ecart type	*44,4*	*45,6*
Nombre	*20*	*10*

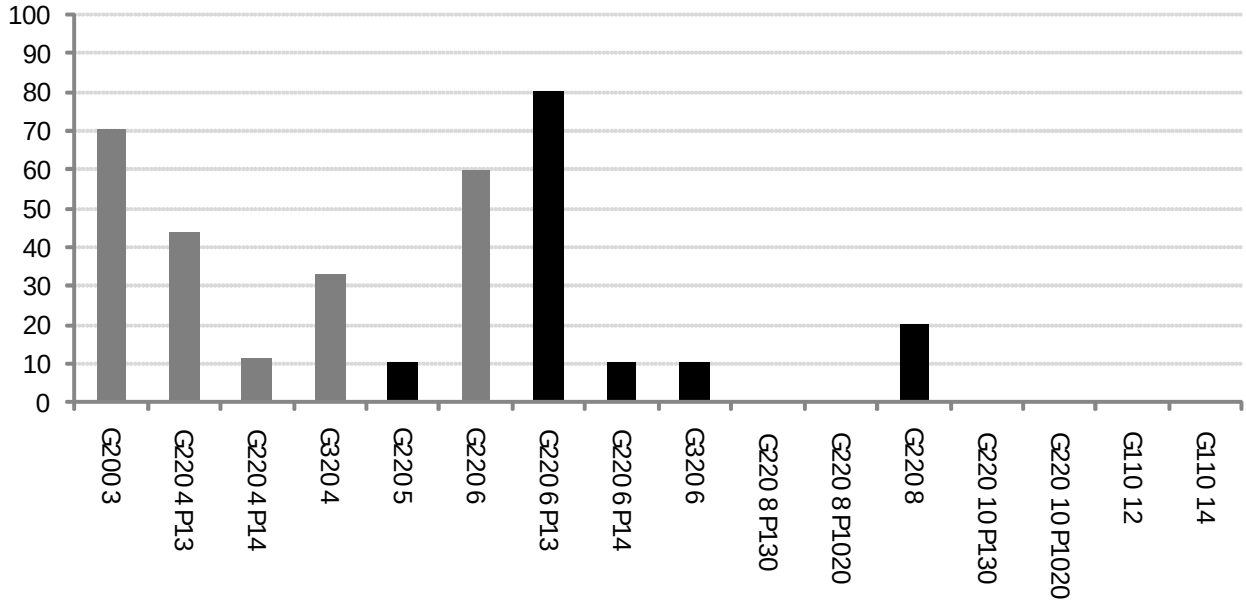
Evolution du phénomène dans le temps :

En 2010, il a également été observé que ce type de déformation n'apparaît plus dans les stades plus âgés ; à partir de 10 ans, on ne retrouve plus de racines en forme de godet. L'hypothèse est que ce type de déformation évolue en agglomérat et plus tard en protubérance et devient moins visible.

La **déformation des racines en forme de godet** qui s'observe uniquement chez les jeunes plants (avant d'évoluer en agglomérat), **semble donc affecter la hauteur** des plants concernés.

Enfin, on constate, à âge égal, une **hauteur supérieure pour les godets 320cc** par rapport aux godets 200cc, avec une différence sur la hauteur moyenne de **27,1 cm**, ce qui peut correspondre à **l'économie d'un dégagement**.

Dans le graphique 6, les histogrammes en gris présentent les données de l'année 2008 et en noir ceux de l'année 2010. Cette déformation tend à "disparaître" avec l'âge. Comme déjà précisé, cette déformation n'est surtout plus observable à partir de quelques années.

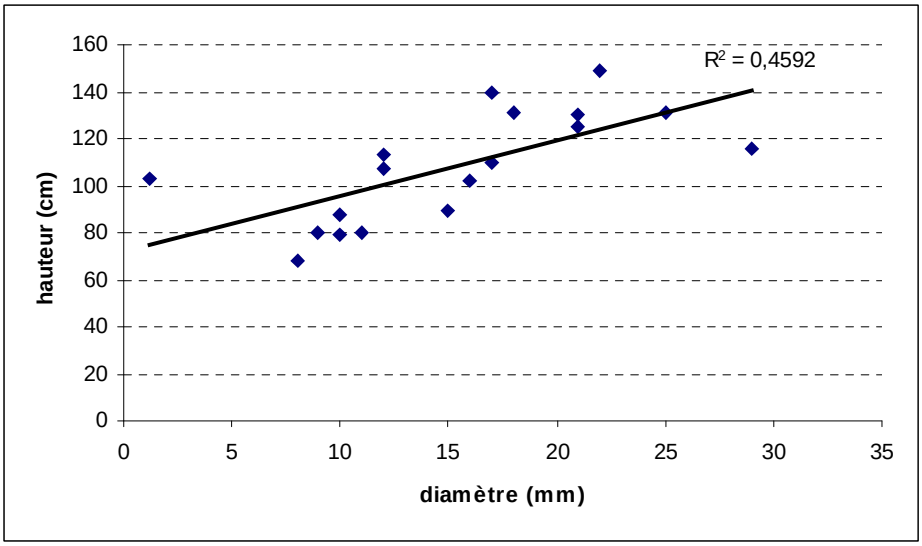


Graphique 6 : Evolution de la déformation "forme de godets"

- **Diamètre du pivot ou de la plus grosse racine plongeante de l'agglomérat**

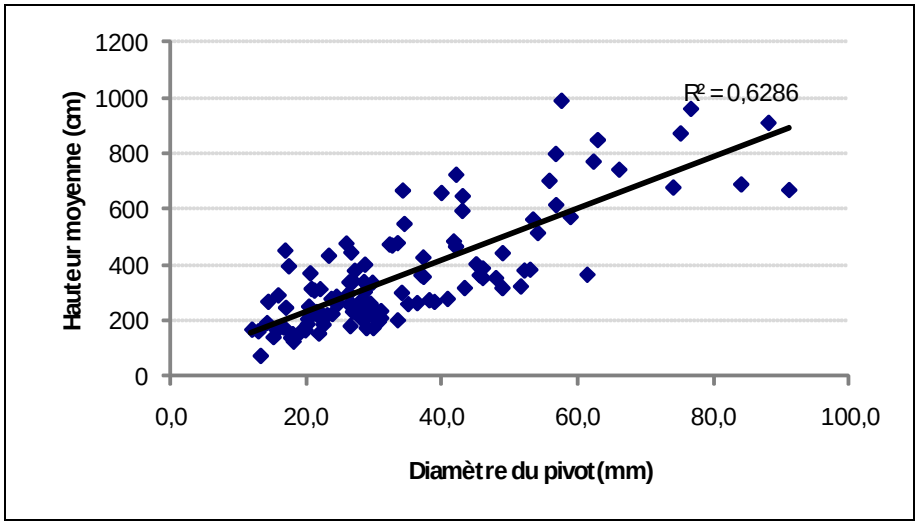
Impact du phénomène sur la hauteur :

En 2008, une certaine corrélation entre le diamètre du pivot ou de la plus grosse racine plongeante et la hauteur de chaque plant avait été relevée.



Graphique 7 : Hauteur 2008 des pins sylvestres de 4 ans élevés en godets 200cc en fonction du diamètre du pivot ou de la grosse racine plongeante de l'agglomérat

En 2010, cette corrélation est confirmée et renforcée avec un coefficient de corrélation de 0,62.



Graphique 8 : Hauteur 2010 de tous les plants de pins sylvestres tout âge et toutes modalités confondues en fonction du diamètre du pivot

Comme on le voit dans le tableau 8, les plants dont le diamètre du pivot ou de la plus grosse racine est plus important, présentent une hauteur moyenne supérieure. Cela souligne l'importance d'avoir des plants avec un système racinaire bien développé, avec des racines à fort diamètre pour assurer une bonne croissance.

Tableau 8 : Hauteur moyenne en 2010 des pins sylvestres en fonction du diamètre du pivot ou de la plus grosse racine plongeante

Série	Donées 2010	Diam.< mediane	Diam.> mediane
G200 8	H moyenne (cm)	233,5	**299,2**
	Nbre plants	5	5
	Ecart type	18,0	51,4
RN 8	H moyenne (cm)	308,1	**311,1**
	Nbre plants	10	10
	Ecart type	58,9	44,5
G200 10	H moyenne (cm)	435,1	**469,3**
	Nbre plants	10	10
	Ecart type	54,1	82,2

La corrélation entre le diamètre du pivot ou de la plus grosse racine plongeante et la hauteur est plus significative pour les plants en godets que pour les plants en racines nues. Les godets, et notamment ceux de gros volume, favoriseraient le développement de pivot puissant favorable à la croissance des plants.

Tableau 9 : Coefficients de corrélation entre la hauteur des plants en 2010 et le diamètre du pivot ou de la grosse racine plongeante pour chaque modalité

	SN 5	G200 5	G200 6 P13	G200 6 P14	G320 6	RN 8 P95	G200 8	RN 8 P1030	G220 10 P130	G220 10 P1020	SA 13	G110 14
Diamètre du pivot ou de la plus grosse racine plongeante (mm)	**0,78**	0,44	**0,63**	0,03	0,29	0,11	**0,85**	**0,51**	0,43	**0,60**	0,08	**0,86**

Evolution dans le temps :

Si on s'intéresse au diamètre du pivot, on peut dire qu'il ne cesse d'augmenter, ce qui est logique ; en revanche, pour la corrélation entre celui-ci et la hauteur, elle n'est pas identique à chaque modalité, mais une bonne corrélation peut être observée dans certaines placettes.

Par rapport aux données de 2008, on ne peut donc pas voir une relation nette entre ces paramètres et l'âge du plant.

Influence des déformations racinaires sur le diamètre du pivot ou de la racine plongeante de l'agglomérat :

Dans le tableau 10, on peut observer l'influence que la déformation en forme de "L" et l'absence de racines sur plus de 120° en continu exercent sur le diamètre moyen du pivot ou de la plus grosse racine plongeante. Ces déformations affectent quelque peu leur développement.

Tableau 10 : Influence des déformations sur le diamètre du pivot ou de la plus grosse racine plongeante

		Ensemble de racines principales en forme de L (due à pioche) (1=oui; 0=non)	
Série	**Donées 2010**	**1**	**0**
RN 8	Diam. Moyenne du pivot ou de la plus grosse racine plongeante (mm)	25,2	30,2
	Ecart type	1,9	8,0
	N de plants	5	15
		Absence de racine principales structurales sur plus de 120° em continu (1=oui; 0=non)	
Série	**Donées 2010**	**1**	**0**
RN 8	Diam. Moyenne du pivot ou de la plus grosse racine plongeante (mm)	28,4	29,5
	Ecart type	6,0	6,8
	N de plants	8	12

- **Diamètre de la plus grosse racine de premier ordre**

Impact sur la hauteur :

En 2008, les plants avec une racine de premier ordre ayant un diamètre supérieur à la médiane avaient **une hauteur supérieure aux autres plants**. Ce constat se confirme en 2010, comme le montre le tableau 11.

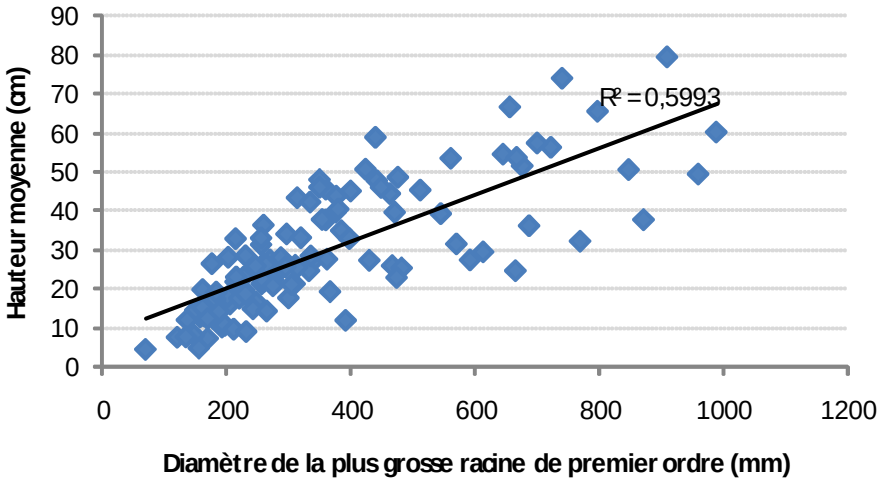
Cette constatation confirme l'intérêt d'avoir des racines principales à l'optimum de leur développement.

Tableau 11 : Hauteur moyenne en 2010 des pins sylvestres en fonction du diamètre de la plus grosse racine de premier ordre

Série	Donées 2010	Diamètre < med	Diamètre > med
SN 5	Hauteur moyenne (cm)	194	**205**
G220 5	Hauteur moyenne (cm)	168	**176,6**
G200 6 P13	Hauteur moyenne (cm)	142,4	**160,5**
G200 6 P14	Hauteur moyenne (cm)	239,6	**280,2**
G320 6	Hauteur moyenne (cm)	251	**323**
RN 8 P95	Hauteur moyenne (cm)	335,6	**373,8**
G200 8	Hauteur moyenne (cm)	251,8	**292,75**
RN 8 1030	Hauteur moyenne (cm)	255,4	**273,6**
G220 10 P130	Hauteur moyenne (cm)	362,2	**412,8**
G220 10 P1020	Hauteur moyenne (cm)	507,6	**526,2**
SA 13	Hauteur moyenne (cm)	665,2	**712,4**
G110 14	Hauteur moyenne (cm)	720,4	**823,3**

Comparaison entre les différents types de plants :

Une corrélation entre la hauteur et le diamètre de la plus grosse racine de premier ordre est également observée, comme le montre le graphique 9.



Graphique 9 : Hauteur 2010 de pins sylvestres tous âges et toutes modalités confondus en fonction du diamètre de la plus grosse racine de premier ordre

De manière générale, il y a une bonne corrélation entre le diamètre de la plus grosse racine de premier ordre et la hauteur du plant à l'exception de RN8 P95, qui révèle peut-être un problème de déformations racinaires liées à la plantation. Les semis présentent une très bonne corrélation.

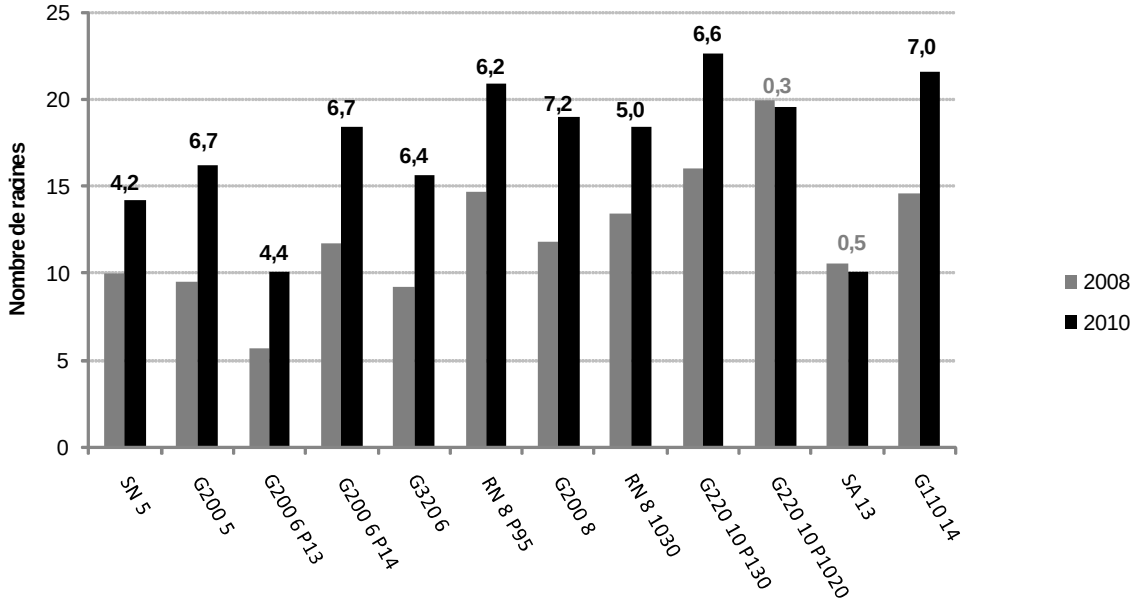
Comme en 2008, le tableau 12 montre que la corrélation entre le diamètre de la plus grosse racine de premier ordre et la hauteur des plants est plus importante chez les plants élevés dans des godets de gros volume (plants de pins sylvestres de 6 ans).

Tableau 12 : Coefficients de corrélation entre la hauteur des plants en 2010 et le diamètre de la plus grosse racine de premier ordre pour chaque modalité

	SN 5	G220 5	G200 6 P13	G200 6 P14	G320 6	RN 8 P95	G200 8	RN 8 1030	G220 10 P130	G220 10 P1020	SA 13	G110 14
Diamètre de la plus grosse racine de premier ordre (mm)	**0,76**	0,26	0,28	0,49	**0,63**	0,05	**0,60**	0,32	**0,77**	**0,51**	**0,57**	0,19

- **Racines colonisatrices**

Le nombre de racines colonisatrices continue logiquement d'augmenter avec l'âge. Hormis 2 placettes, cette augmentation est assez importante avec, en 2 ans, une augmentation pouvant atteindre 7 racines colonisatrices en plus.

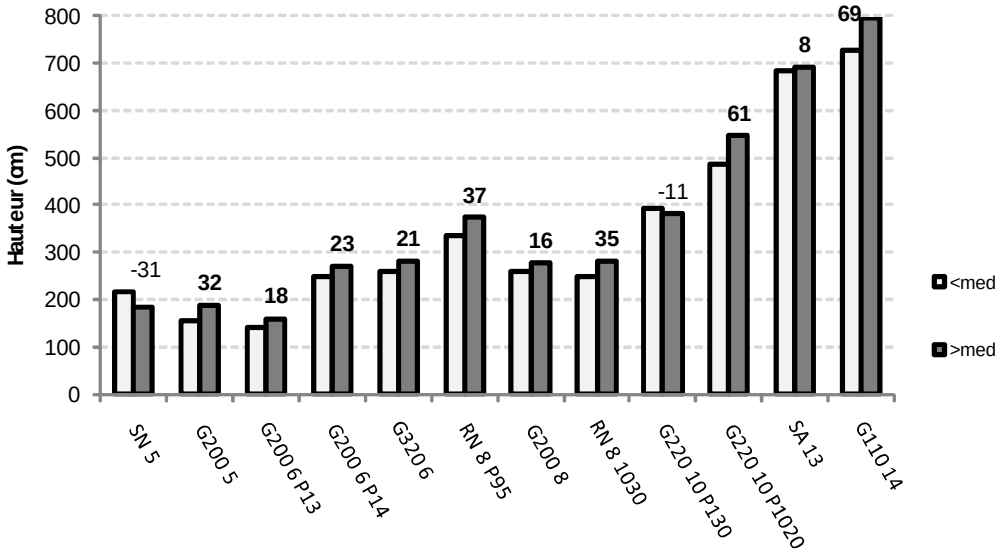


Graphique 10 : Nombre moyen de racines colonisatrices pour chaque série
(les données de l'étiquette indiquent la différence entre les années)

Impact du facteur sur la hauteur :

Les plants avec un nombre de racines colonisatrices supérieur à la médiane ont également une hauteur supérieure, à l'exception de 2 placettes.

En effet, les semis semblent ne pas privilégier le nombre de racines colonisatrices, les plants avec moins de racines colonisatrices ayant une hauteur plus importante chez SN 5 et peu différente avec SA 13. Dans le jeune âge, ces plants cherchent peut-être davantage à développer leurs racines en profondeur et en diamètre avec des racines colonisatrices moins nombreuses que chez les autres modalités (cf. profondeur, page 25).



Graphique 11 : Hauteur moyenne des plants en fonction du nombre de racines colonisatrices pour chaque série

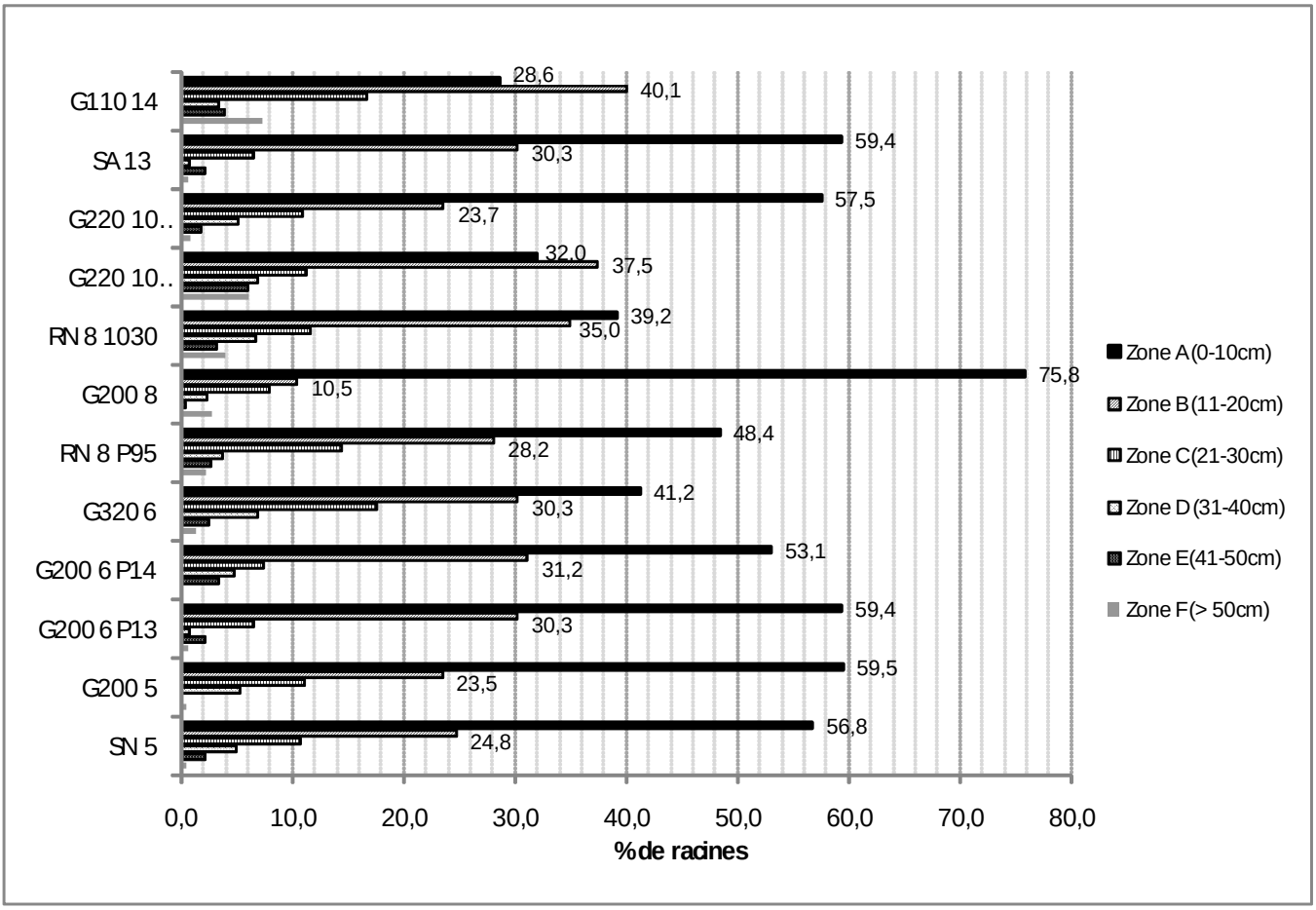
A l'exception de G220 10 p130, les autres modalités ont une bonne, voire très bonne, corrélation entre le nombre de racines colonisatrices et la hauteur du plant.

Tableau 13 : Coefficients de corrélation entre la hauteur des plants en 2010 et le nombre de racines colonisatrices

	SN 5	G200 5	G200 6 P13	G200 6 P14	G320 6	RN 8 P95	G200 8	RN 8 1030	G220 10 P130	G220 10 P1020	SA 13	G110 14
Nombre de racines colonisatrices	-0,39	**0,95**	0,33	**0,68**	0,47	0,46	**0,53**	**0,65**	-0,15	0,48	0,15	0,35

- **Profondeur de prospection des racines et nombre de racines par classe de profondeur**

Avec l'âge, c'est principalement la prospection en profondeur qui évolue plus que le nombre de racines dans les 10 premiers centimètres. Si on prend la zone A (0 à 10 cm), le pourcentage de racines se situe entre 28 et 76 en moyenne, pour toutes modalités, mais il n'y pas vraiment une augmentation du pourcentage de racines en fonction de l'âge.



Graphique 12 : Pourcentage de racines par horizon pour chaque série

On peut observer, dans le graphique 12, qu'il y a une prédominance de racines dans les premiers centimètres (0-20 cm), avec des pourcentages qui varient de 65 à 85 %. Le pourcentage de racines qui arrivent à plus de 30 cm, est faible et on peut noter, par exemple, que les semis naturels à 5 ans présente un pourcentage plus important de racines à plus de 30 cm que la placette en godet 200cc à 8 ans.

Cette prédominance de racines dans les premiers centimètres rend davantage sensible ces plants vis–à-vis d'une période de sécheresse qui concernera d'abord la superficie du sol.

Tableau 14 : Pourcentage de racines par classe de profondeur moyenne de prospection en 2010

	Classe 1 (0-10 cm)	Classe 2 (11-20 cm)	Classe 3 (21-30 cm)	Classe 4 (31-40 cm)	Classe 5 (41-50 cm)	Classe 6 (> 50 cm)
SN 5	-	-	20	40	30	10
G200 5	-	-	40	50	-	10
G200 6 P13	10	20	30	10	10	20
G200 6 P14	-	-	40	30	30	-
G320 6	-	10	20	30	20	20
RN 8 P95	-	-	20	10	40	30
G200 8	20	-	10	10	10	50
RN 8 1030	-	-	10	60	-	30
G220 10 P130	-	-	-	-	40	60
G220 10 P1020	-	-	20	40	20	20
SA 13*	-	-	-	40	10	50
G110 14	-	-	11	-	-	89

* 4 plants présentent un pivot horizontal de par la présence d'une nappe d'eau temporaire

Dans le tableau 14, on peut comparer les plants de même âge en semi-naturels avec ceux élevés en godets 200cc et noter que les SN ont 40 % de racines à plus de 40 cm de profondeur, alors que les G200 5 présentent juste 10 % des racines dans la même classe de profondeur.

Les plants en godets 200cc de 8 ans ont encore 20 % de racines qui ne vont pas à plus à 10 cm de profondeur. Pour les placettes de 10 ans, on peut remarquer que toutes les racines sont à plus de 20 cm de profondeur ; par contre, il y a encore 60 % des individus qui ont des racines à moins de 40 cm de profondeur. Là encore, une vulnérabilité à la sécheresse est renforcée pour certaines placettes

<u>Comparaison avec les données des années précédentes</u> :

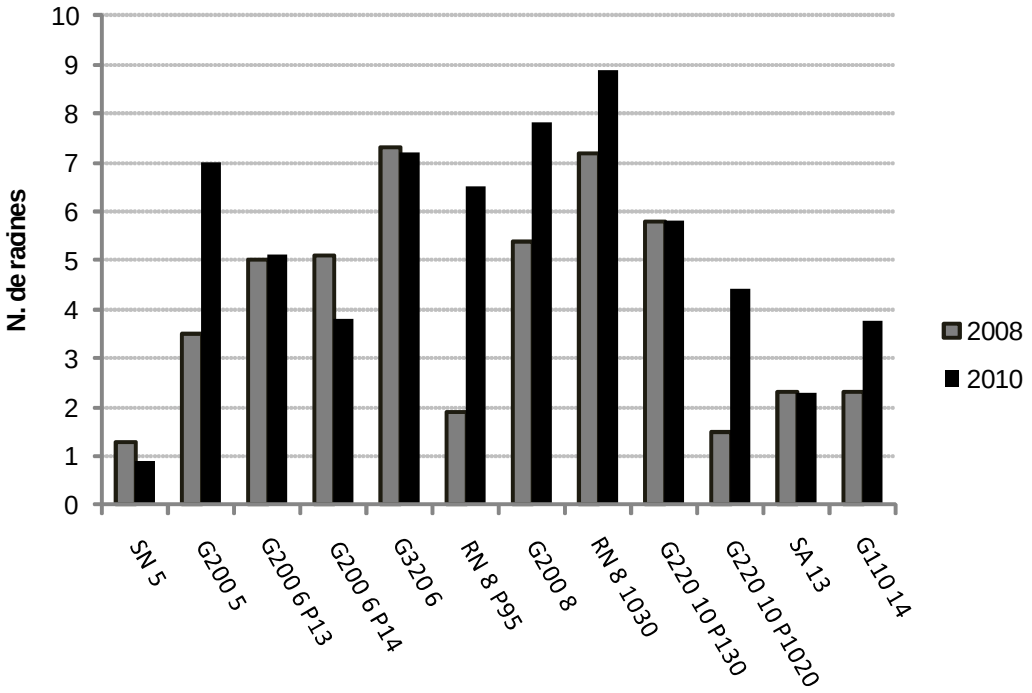
Les observations 2008 présentent le même constat : dans l'horizon A, le nombre de racines de premier ordre n'évolue ni en fonction de l'âge, ni en fonction du type de plant. Par contre, dans les horizons inférieurs, la colonisation augmente avec l'âge, ce qui est normal. La comparaison des observations, entre les modalités de plantation, montre que les plants en godets 200cc ne sont pas les plus rapides pour coloniser le sol en profondeur.

Photos 6 et 7 : À gauche, système racinaire d'un godet 200cc à 8 ans ; à droite, celui d'un semis naturel de 5 ans

Racines tournées en face externe

Cette déformation correspond à des racines tournant sur un plan horizontal à plus de 90°, peut-être dû au type de conteneur, à la densité du substrat ou encore à un problème lors de la plantation.

Les semis sont peu touchés avec un nombre moyen de 1,5 racines tournées, contre 6,5 pour les autres modalités. L'accentuation de ce phénomène apparaît donc sûrement lors de la plantation pour les plants en racines nues ou par la nature du conteneur et du substrat pour les plants en godets.



Graphique 13 : Nombre moyen de racines tournées en face externe en 2008 et 2010, pour chaque série

Lorsque l'on compare les données 2008 et 2010, deux phénomènes sont observables : il y a soit une certaine différence ou très peu de différence. On voit bien que cette déformation ne diminue pas avec l'âge et qu'une racine conserve cette déformation avec parfois un impact pour sa croissance à venir.

Impact de la déformation sur la hauteur :

On peut observer un impact de la déformation sur la hauteur pour les plants en racines nues qui présentent des coefficients de corrélation plus importants par rapport aux autres modalités.

Tableau 15 : Coefficients de corrélation entre la hauteur des plants en 2010 et le nombre de racines tournées en face externe

	SN 5	G200 5	G200 6 P13	G200 6 P14	G320 6	RN 8 P95	G200 8	RN 8 1030	G220 10 P130	G220 10 P1020	SA 13	G110 14
Nombre de racines primaires tournées (>90°) en face externe	-	0,25	0,23	-0,29	0,05	0,40	-0,02	0,83	0,08	-0,20	0,28	-0,35

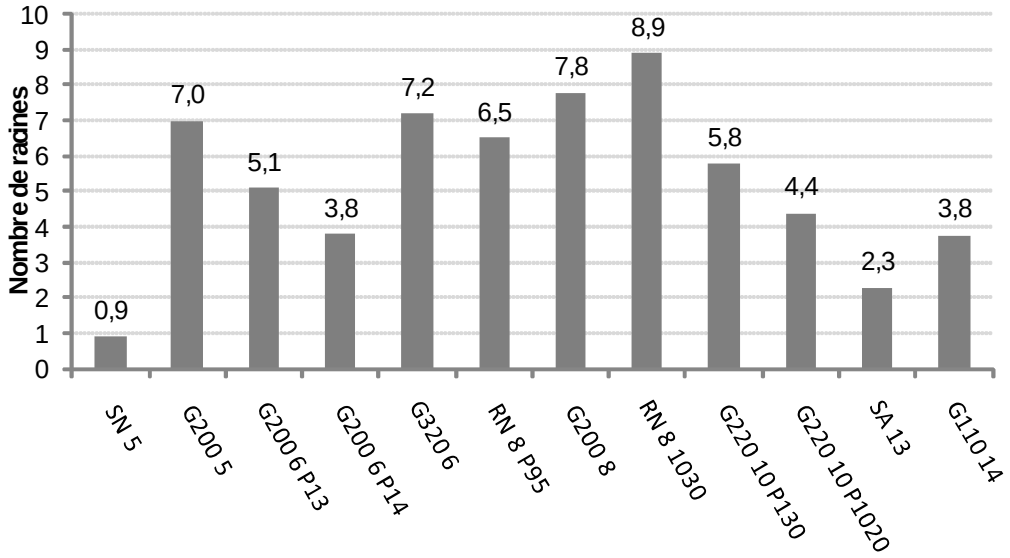
Les corrélations entre le nombre de racines tournées et la hauteur sont plutôt faibles, sauf pour les plants en racines nues avec une corrélation jusqu'à 0,83. Est-ce que cette déformation, particulièrement présente chez les racines nues, traduit des déformations induites à la plantation ?

Comparaison entre les différents types de plants :

En 2008, on a noté que les plants de pins sylvestres de 6 ans en racines nues, même s'ils sont autant touchés que les plants en godets, avaient en moyenne un nombre de racines tournées en face externe inférieur. Les coefficients de corrélation entre la hauteur et le nombre de racines tournées ont montré que, pour les plants en godets, cette déformation ne semble pas avoir d'influence, alors que pour les plants en racines nues, celle-ci est négative pour la croissance.

Mais, en 2010, on peut noter qu'il n'y a pas une bonne corrélation pour les plants en godets entre les racines tournées et la hauteur et qu'elle est positive pour les racines nues. De plus, le nombre de ces racines "diminue" avec le temps puisqu'elles s'incluent et sont de moins en moins visibles.

Le graphique 14 montre le nombre de racines tournées observées en 2010 pour chaque modalité de plantation.



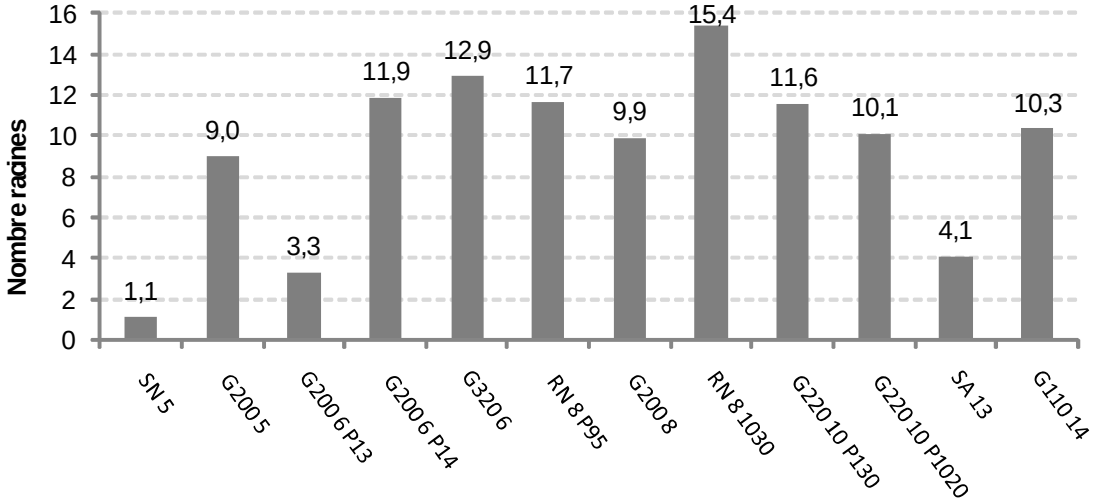
Graphique 14 : Nombre de racines tournées par placette en 2010

Evolution du phénomène dans le temps :

Le nombre de racines tournées en face externe semble diminuer avec le temps, probablement dû au fait qu'on les distingue moins.

- **Racines incluses**

Les racines incluses apparaissent à partir d'un certain âge, les racines étant au départ croisées, entrelacées ; on remarque néanmoins, dès 5 ans, pour les godets 200cc, un nombre important de racines incluses comparé aux semis naturels.



Graphique 15 : Nombre moyen de racines incluses visibles pour chaque série

Le nombre de racines incluses, sauf chez les semis, est important, ce qui traduit un enchevêtrement des racines dès le jeune âge.

Impact de la déformation sur la hauteur :

On peut croire, au vu de la corrélation, que les racines incluses semblent avoir plutôt un impact positif sur la croissance des pins sylvestres, les plants présentant un nombre d'inclusions supérieur à la moyenne ayant une hauteur plus importante que les aux autres plants. En réalité, l'impact positif serait dû au fait que les plants, avec davantage de racines colonisatrices, ont également plus de racines incluses, comme le montre le tableau de coefficients de corrélation. L'impact positif sur la hauteur est donc avant tout dû au nombre important de racines colonisatrices.

Tableau 16 : Coefficients de corrélation entre la hauteur des plants en 2010 et le nombre de racines incluses :

	SN 5	G200 5	G200 6 P13	G200 6 P14	G320 6	RN 8 P95	G200 8	RN 8 1030	G220 10 P130	G220 10 P1020	SA 13	G110 14
Nombre de racines incluses ou soudées	0,26	0,83	0,20	0,42	0,45	0,16	0,18	0,48	-0,61	0,05	-0,17	-0,24

Tableau 17 : Coefficients de corrélation entre le nombre de racines colonisatrices en 2010 et le nombre de racines incluses :

	SN 5	G200 5	G200 6 P13	G200 6 P14	G320 6	RN 8 P95	G200 8	RN 8 1030	G220 10 P130	G220 10 P1020	SA 13	G110 14
Correlation r.colonisatrices x r. incluses	0,82	0,88	0,81	0,60	0,72	0,61	0,22	0,81	0,10	0,62	0,52	0,51

Tableau 18 : Coefficients de corrélation entre la hauteur des plants en 2010 et le nombre de racines colonisatrices :

	SN 5	G200 5	G200 6 P13	G200 6 P14	G320 6	RN 8 P95	G200 8	RN 8 1030	G220 10 P130	G220 10 P1020	SA 13	G110 14
Nombre de racines colonisatrices	-0,39	**0,95**	0,33	**0,68**	0,47	0,46	**0,53**	**0,65**	-0,15	0,48	0,15	0,35

Comparaison entre les différents types de plants

D'une façon générale, les semis présentent beaucoup moins de racines incluses que les autres modalités et ce facteur est inversement proportionnel à la hauteur, les semis privilégiant probablement la prospection en profondeur.

Comme en 2008, on peut observer que les plants en racines nues de 8 ans présentent plus de racines incluses que les plants en godets du même âge. Là encore, le regroupement des racines lors de la mise en terre peut probablement en être la cause. On notera aussi que les pins sylvestres de 8 ans en godets de gros volumes ont légèrement plus de racines incluses que ceux en godets de plus faible volume.

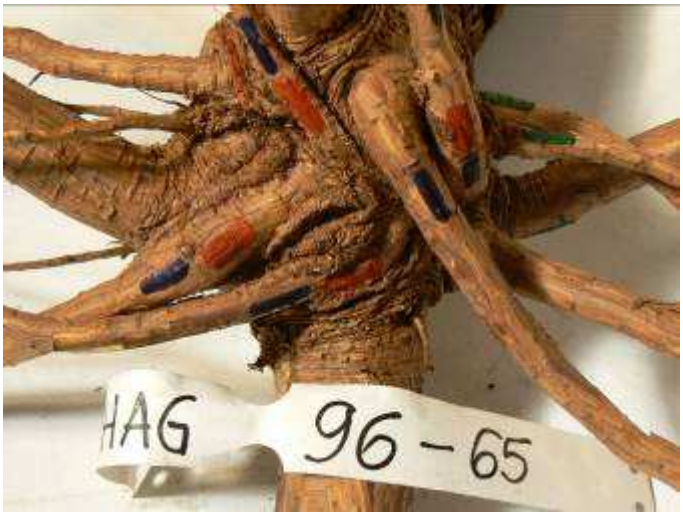
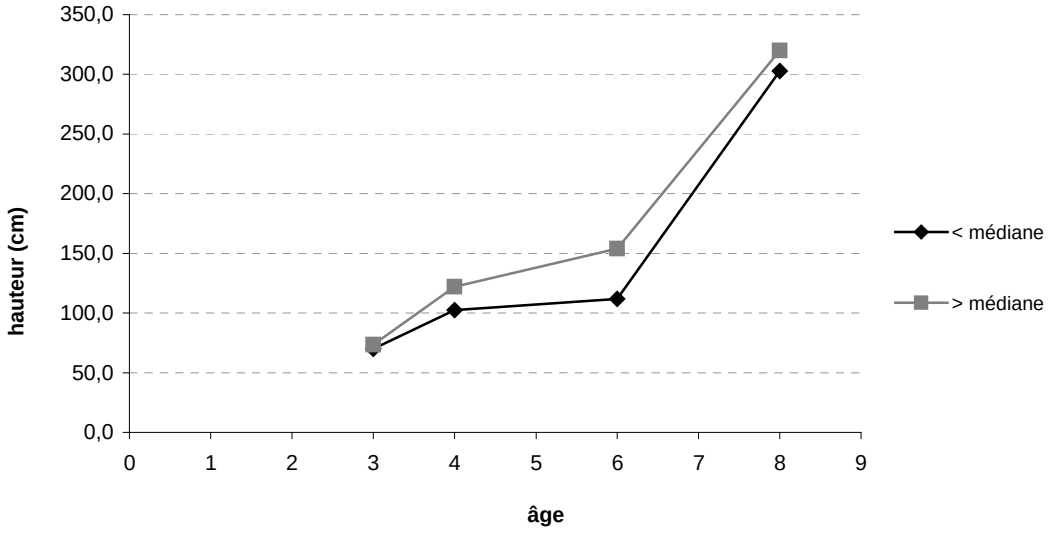


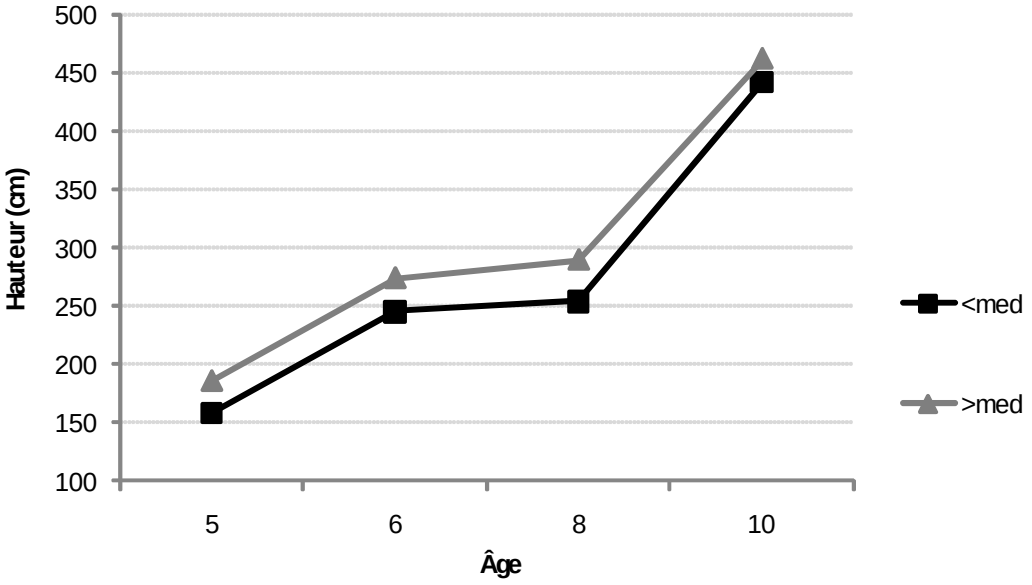
Photo 8 : Plant élevé en godet 200cc de 8 ans présentant des racines incluses.

Evolution du phénomène dans le temps :

Le nombre de racines incluses visibles augmente avec l'âge du plant, mais la corrélation entre la hauteur et le nombre de racines incluses ne suit pas cette logique. Si l'effet des ces racines parait positif, en lien avec le nombre de racines colonisatrices, aucune tendance n'est visible quant à son évolution dans le temps. De plus, on peut se demander si ces racines incluses ne vont pas conduire à la formation de nécroses au niveau de ces inclusions.



Graphique 16 : Hauteur des plants de pins sylvestres élevés en godets 200cc en fonction du nombre de racines incluses pour chaque âge en 2008



Graphique 17 : Hauteur des plants de pins sylvestres élevés en godets 200cc en fonction du nombre de racines incluses pour chaque âge en 2010

Comparaison avec les données des années précédentes :

Le nombre de racines incluses augmente clairement avec l'âge. Par exemple, en 2006, les pins sylvestres de 4 ans élevés en godets 200cc avaient en moyenne 1,5 racines incluses par plant et, en 2008, ce nombre est passé à 7 puis à 9,9 en 2010.

Tableau 19 : Évolution du nombre de racines incluses

Placette/ Année	2006	2008	2010
G200 8	1,5	7	9,9
RN 8	5,1	5,9	13,6

- **Distribution des racines sur 360°**

On peut constater que la distribution des racines est directement liée à la modalité de plantation avec, par exemple, des **semis naturels** qui ont occupé quasiment **les trois quarts des 360° colonisables dès 3 ans.**

Comparaison de la modalité de plantation :

Tableau 20 : Pourcentage de plants dans chaque classe de distribution des racines sur 360°

	Classe 1 < 1/4	**Classe 2 > 1/4 < 1/2**	**Classe 3 1/2 < 3/4**	**Classe 4 > 3/4**
SN5	0	10	**60**	**30**
G200 5	0	50	50	0
G200 6 P13	**40**	**60**	0	0
G200 6 P14	0	20	50	30
G320 6	0	30	40	30
RN 8 P95	0	**40**	40	**20**
G200 8	0	30	40	30
RN 8 1030	**10**	**20**	60	**10**
G220 10 P130	0	0	**60**	**40**
G220 10 P1020	0	20	50	30
SA 13	0	11	33	**56**
G110 14	11	11	33	**45**

Dans le tableau 20, les résultats de la comparaison des modalités de plantation au même âge, sont très intéressants. Par exemple, la distribution des racines sur 360° est en moyenne plus importante pour les semis de 5 ans que pour des plants en godets. Mais, contrairement à 2008, les plants de 8 ans en racines nues n'ont pas une distribution supérieure à ceux en godets. En revanche, le volume du godet ne semble pas apporter une meilleure distribution (série G200 6 et G320 6). Cependant, notons que la différence de volume entre 200cc et 320cc n'est peut-être pas suffisante pour voir des variations.

On peut également observer que, à l'âge de 8 ans, les plants en racines nues ont encore 40 % des individus avec une distribution de racines à moins de 180° et, pour les godets 200cc au même âge, 30 % des plants présentent le même défaut. À 10 ans, les plants élevés en godets 200cc présentent encore 20 % des individus avec des racines distribuées à moins de la moitié de 360º.

Impact sur la hauteur :

Le tableau 21, page suivante, montre la hauteur moyenne des plants de chaque classe de distribution. On peut noter que les plants ayant une distribution faible des racines sur 360° présentent également une hauteur moins importante par rapport aux plants avec une bonne répartition racinaire sur 360°.

Tableau 21 : Hauteur moyenne (cm) des plants par classe de distribution racinaire sur 360°

	Classe 1 < 1/4	**Classe 2 > 1/4 < 1/2**	**Classe 3 1/2 < 3/4**	**Classe 4 > 3/4**
SN5	-	212,0	195,3	SH*
G200 5	-	168,6	176,0	-
G200 6 P13	120,3	165,5	-	-
G200 6 P14	-	258,5	239,6	294,7
G320 6	265,0	247,5	**329,5**	**297,0**
RN 8 P95	-	362,8	348,5	351,0
G200 8	-	231,7	270,7	**307,7**
RN 8 1030	231,0	237,5	266,8	**338,0**
G220 10 P130	-	-	390,2	383,5
G220 10 P1020	-	476,5	511,8	**552,3**
SA 13	-	665,0	645,0	**716,5**
G110 14	449,0	871,0	624,0	**925,8**

(*) SH = sans hauteur, plants coupés lors du dégagement

A noter que les plants en racines nues de 8 ans (placette 95) avec une répartition de moins de 180° ont une hauteur moyenne de plus de 3,50 m, ce qui peut faire craindre à une vulnérabilité importante au vent.

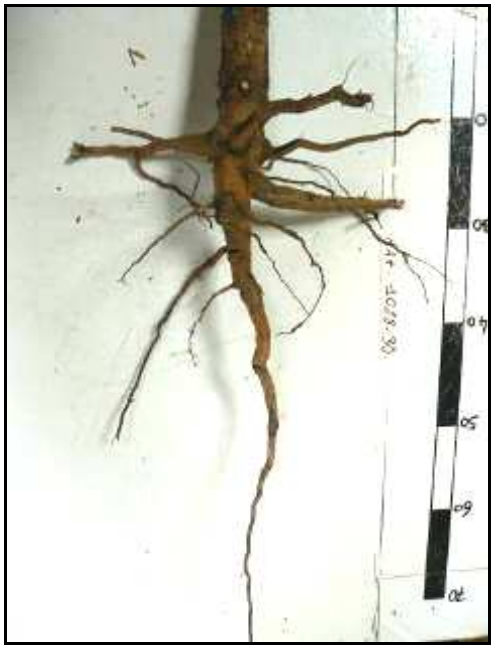
Evolution du phénomène dans le temps :

La distribution racinaire moyenne sur 360° des plants augmente avec l'âge, ce qui est normal. Ces résultats montrent la vulnérabilité des plants dans le jeune âge qui couvrent moins de ¾ des 360° disponibles jusqu'à l'âge de 8 ans, voire plus.

- Absence de racines sur plus de 120° en continu

En 2008, cette déformation se répartissait équitablement entre toutes les modalités de plantation. En moyenne, **52 % des plants étaient touchés par ce phénomène**.

En 2010**, 42 % des plants** présentent une absence de racines sur plus de 120° en continu. Avec l'âge, ce pourcentage diminue, mais reste néanmoins très important avec près de la moitié des plants concernés.



Photos 9 et 10 : À gauche, plant G200cc de 6 ans en forme de L, avec absence de racines sur au moins 120°. À droite, semis naturel de 3 ans avec racines réparties sur 360° et pivot vertical plongeant.

Tableau 22 : Pourcentage de racines ayant une absence de racines structurales sur plus de 120° en continu.

	Absence de racines principales structurales sur plus de 120° en continu	
	0 = non	1 = oui
SN5	80	20
G200 5	40	**60**
G200 6 P13	10	**90**
G200 6 P14	30	**70**
G320 6	40	**60**
RN 8 P95	**70**	30
G200 8	**70**	30
RN 8 1030	**60**	40
G220 10 P130	**70**	30
G220 10 P1020	**70**	30
80	80	20
G110 14	**78**	22

Jusqu'à 6 ans, à l'exception des semis naturels qui présentent rarement cette déformation, plus de la moitié des plants ont une absence de racines principales structurales sur plus de 120° en continu : 70 % des plants pour la placette G200 6 P14 et 90 % des plants pour G2006 P13 (problème de plantation).

A 8 ans et plus, la majorité des plants n'ont plus cette absence de racines. Notons tout de même que, jusqu'à 10 ans, il reste entre 30 et 40 % des plants avec cette absence de racines, toutes modalités confondues, ce qui renforce la vulnérabilité du plant face aux aléas climatiques, notamment les épisodes de forts vents, et limite leur utilisation optimale du sol pour prélever des

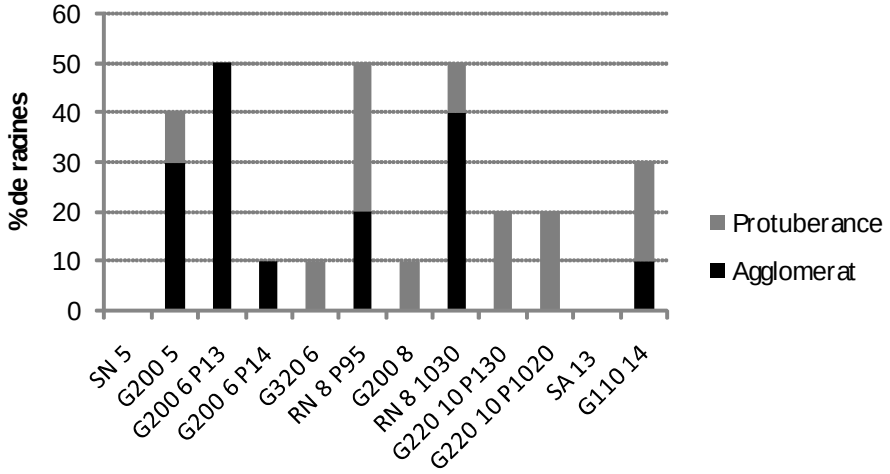
4.2.2. Autres paramètres

- Agglomérat

En 2010, 19 % des plants sont concernés par des racines en "agglomérat ". Avec l'âge, ce pourcentage diminue, cette déformation étant moins visible, bien que les agglomérats évoluent parfois vers une protubérance qui touche une grande part des plants plus âgés. À 14 ans, il y a encore 30 % des racines avec une protubérance ou des racines en agglomérat.

Il est également intéressant de voir que les semis ne présentent pas ce type de déformation qui semble donc être clairement lié à la plantation et à la culture en godets.

Graphique 18 : Nombre de plants présentant un agglomérat ou une protubérance dans chaque série en 2010



Photos 11 et 12 : À gauche, plant élevé en godet 200cc à l'âge de 6 ans avec un agglomérat en forme de godets. A droite, au même âge, un plant élevé en godet 320cc ayant un agglomérat qui commence à évoluer vers une protubérance.

Cette mesure semble être une évolution des racines "en forme de godet" ou des plants qui présentent des racines très entrecroisées et enchevêtrées. C'est pour cette raison que l'on ne trouve quasiment pas d'individu présentant un agglomérat chez les jeunes plants et qu'à l'inverse les racines en forme de godet sont très difficilement observables après quelques années.

Tableau 23 : Pourcentage de racines en "agglomérat"

Placette	2006	2008	2010
RN 8	100%	75%	30%

G200 10	95%	78%	0%

- <u>Spiralisation des racines</u>

Il est difficile de noter une tendance dans le temps vis-à-vis de ce paramètre qui semble ne pas varier avec l'âge des plants.

Comme en 2008, les semis ne présentent pas de racines fortement spiralées. Cette déformation est très certainement induite par le manque de porosité du substrat et, pour les racines nues, par le mode de plantation. Même à un âge avancé, il est possible d'observer un nombre important de racines spiralées à plus de 180°.

Tableau 24 : Pourcentage de racines par classe de spiralisation

	Classe 1 (pas de spiralisation)	**Classe 2 (1°-179°)**	**Classe 3 (180°-359°)**	**Classe 4 (360° et +)**
SN5	**30**	**70**	-	-
G200 5	-	50	**50**	-
G200 6 P13	10	20	30	**40**
G200 6 P14	-	10	80	**10**
G320 6	-	60	40	-
RN 8 P95	10	30	**60**	-
G200 8	-	40	**50**	**10**
RN 8 1030	10	30	**50**	**10**
G220 10 P130	-	90	-	**10**
G220 10 P1020	-	10	**60**	**30**
SA 13	**30**	**60**	10	-
G110 14	-	89	11	-

Le volume du godet dans cet échantillon semble plutôt jouer positivement sur ce phénomène, même si la spiralisation reste assez importante. Encore une fois, il sera intéressant de savoir si ceci se confirme ou pas avec les godets de 400cc installés sur les sites expérimentaux.

Photo 13 : Godet 200cc de 10 ans présentant une racine spiralée

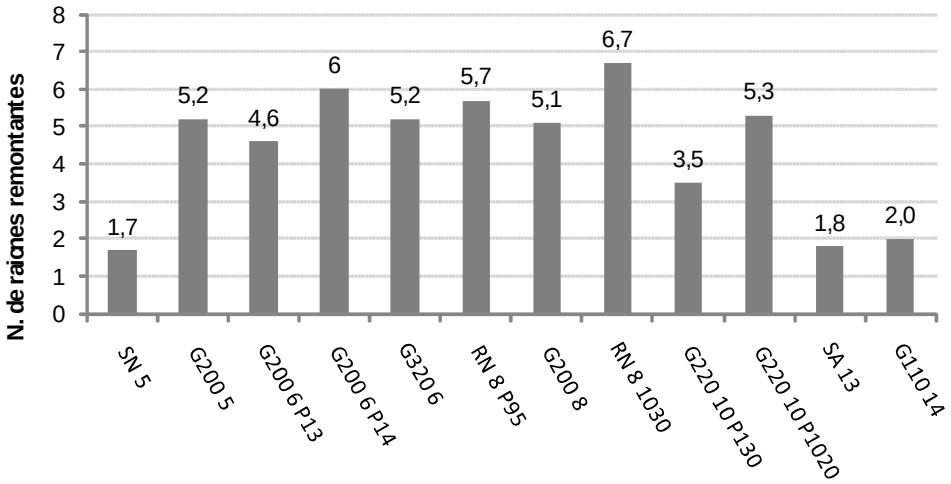
Comme le montre le tableau 25, avec les pins sylvestres de 10 ans élevés en godets, l'impact de la spiralisation des racines sur la croissance des plants n'est pas évidente. Cette spiralisation peut peut-être avoir des impacts à plus long terme : étranglement du colet, nécrose, etc. On peut également se préoccuper du risque d'instabilité pour des plants dépassant 4 mètres de haut avec une spiralisation de plus de 360°, comme c'est le cas pour la placette G220 10 P1020.

Tableau 25: Hauteur moyenne des plants en fonction de la classe de spiralisation de leurs racines pour chaque série

	Classe 1 (pas de spiralisation)	**Classe 2 (1°-179°)**	**Classe 3 (180°-359°)**	**Classe 4 (360° et +)**
SN5	198,0	**200,0**	-	-
G200 5	-	**198,0**	181,2	-
G200 6 P13	**216,0**	166,0	108,7	160,0
G200 6 P14	-	261,0	263,6	229,0
G320 6	-	272,7	**308,5**	-
RN 8 P95	**430,0**	321,3	358,8	-
G200 8	-	259,3	**286,5**	247,0
RN 8 1030	260,0	**297,0**	252,6	231,00
G220 10 P130	-	381,7	-	**440,0**
G220 10 P1020	-	471,0	**540,7**	484,7
SA 13	696,3	671,7	**769,0**	-
G110 14	-	**780,0**	476,0	-

- **Racines remontantes**

Le nombre de racines remontantes varie entre 1 et 9 par plant. Après toutes les observations, on peut conclure que les semis ont un nombre de racines remontantes significativement inférieur aux autres séries. Un déficit d'arrosage peut entraîner cette déformation chez les plants en godet ou être induite par le mode de plantation. Ce phénomène ne semble pas influencer la hauteur des plants puisque, par exemple, les plants de pins sylvestres en racines nues présentant le plus de racines remontantes ont une hauteur supérieure par rapport aux plants qui en ont le moins. Néanmoins, des racines remontantes limitent la prospection racinaire et auront peut-être un impact à moyen terme sur la croissance du plant. Là encore, l'imbrication des facteurs rend difficile l'obtention de conclusions certaines



Graphique 19 : Nombre moyen de racines remontantes pour chaque série

Orientation dominante

Le tableau 26 montre le pourcentage d'individus par placette avec des racines présentant une orientation dominante. Comme ce problème peut être lié à la plantation, le sens de la plantation est précisé. Il faut remarquer qu'en général, au moins 30 % des plants présentent une orientation dominante dans chaque placette. La placette 13 montre 90 % des plants avec ce problème, qui souligne un problème de plantation. Il y a également 70% des plants en racine nues de la placette 1030 qui ont encore une orientation dominante à 8 ans.

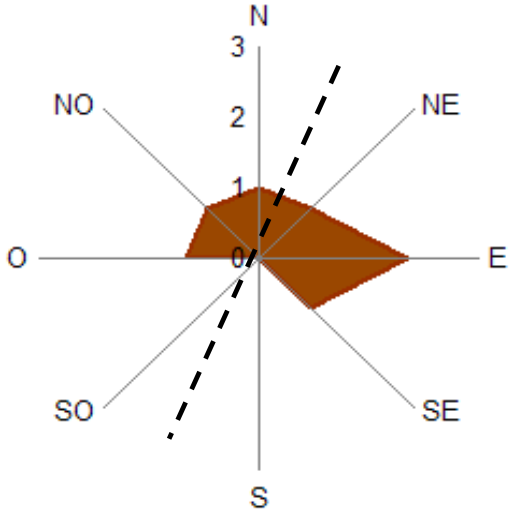
Tableau 26 : Orientation dominante de racines

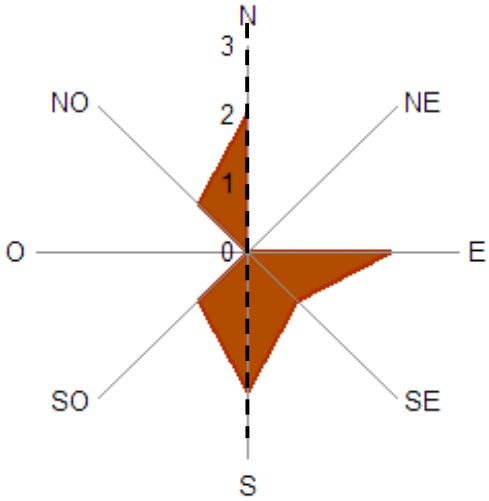
	% de racines avec une orientation dominante	Orientation moyenne (°)	Sens de la plantation (°)
SN 5	40	122,5	-
G200 5	60	143,1	100-300
G200 6 P13	**90**	134,7	0-200
G200 6 P14	**60**	194,5	100-300
G320 6	**80**	119,5	134-334
RN 8 P95	40	166,5	105-305
G200 8	30	313,3	90-209
RN 8 1030	**70**	185,3	15-215
G220 10 P130	**50**	307,5	85-285
G220 10 P1020	**60**	161,8	100-300
SA 13	30	123,3	105-305
G110 14	33	166,7	120-320

On peut observer des pourcentages importants pour la majorité des placettes en godets. On aurait pu croire que les plants en godets présentent moins de racines avec une orientation dominante que les plantes en racines nues, cette orientation étant souvent induite à la plantation, mais au vu des observations, ils sont également concernés.

Photos 14 et 15 : À droite plant élevé en godet 200cc ajouré ; à gauche plant élevé en racines nues présentant également des racines avec une orientation dominante.

Ci-dessous, quelques exemples d'orientation racinaire induite à la plantation représentée sous forme de radar. Le sens de la plantation est présenter en pointillés.





Graphiques 20 et 21: Radars représentant l'orientation principale des racines pour la parcelle 1030 (Racines nues de 8 ans) à gauche et pour la placette 13 (G 200 de 6 ans) à droite

4.3. Critères potentiellement influencés par le système racinaire

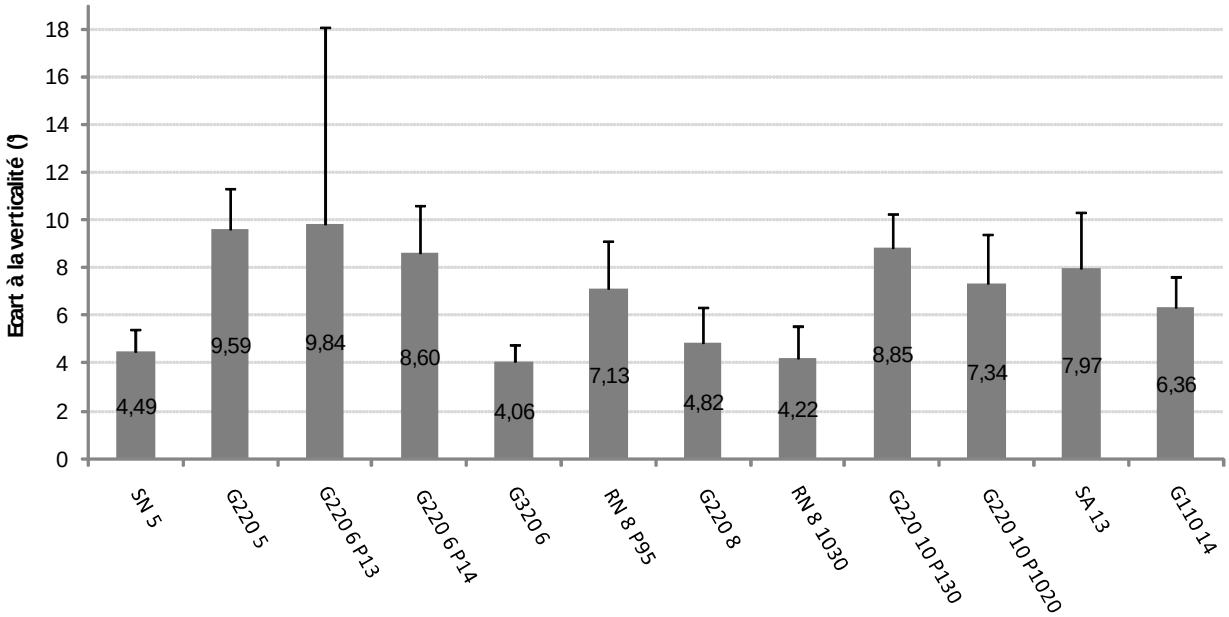
4.3.1 L'écart à la verticalité

L'écart à la verticalité moyen chez les semis de pins sylvestres est moins important que celui des autres modalités.

Le graphique 22 montre un grand écart type, cela peut indiquer un effet négatif de la plantation qui a généré une hétérogénéité d'écart à la verticalité dans chaque série. Il peut aussi être dû au faible effectif.

Les plants en G200 de 5 et 6 ans ont un écart à la verticalité important. On peut noter qu'il diminue avec l'âge, ce qui peut signifier une compensation de l'arbre sur le temps.

Il faut remarquer que pour la placette 13, les plants présentent un important écart à la verticalité probablement lié au problème de plantation mise en avant.



Graphique 22 : Ecart à la verticalité moyen pour chaque série

L'impact de ce phénomène sur la hauteur est plutôt negatif au vu des coefficients de corrélation de ces deux paramètres. La corrélation importante constatée chez les semis naturels peut être expliquée par la forte densité du peuplement ; en effet, les plants sont obligés de s'incliner légèrement pour aller chercher la lumière, les plus performants étant ceux ayant réussi à s'incliner légèrement pour croître.

Tableau 27 : Coefficients de corrélation entre la hauteur des plants en 2010 et l'écart à la verticalité

	SN 5	G220 5	G220 6 P13	G220 6 P14	G320 6	RN 8 P95	G220 8	RN 8 1030	G220 10 P130	G220 10 P1020	SA 13	G110 14
Correlation EV x H	0,97	-0,34	-0,07	-0,12	-0,47	**0,54**	-0,51	-0,39	0,00	-0,38	-0,09	-0,17

Dans le tableau 28, on peut observer un pourcentage important (80 %) de plants qui présentent un écart à la verticalité de plus de 10 cm pour la placette 55 (G200 5), pendant que les semis naturels au même âge ne présente que 10% des individus avec cet écart. Pour les plants en godets à 6 ans, on constate des pourcentages importants et, de plus, certains plants présentent un écart à la verticalité de plus de 20 cm, ce qui est d'autant plus important pour un plant avec un diamètre de seulement quelques centimètres.

Une grande quantité de plants en semis artificiels présente un écart à la verticalité de plus de 10 cm. Une hypothèse serait la forte densité avec parfois plus de 10 000 plants à l'hectare.

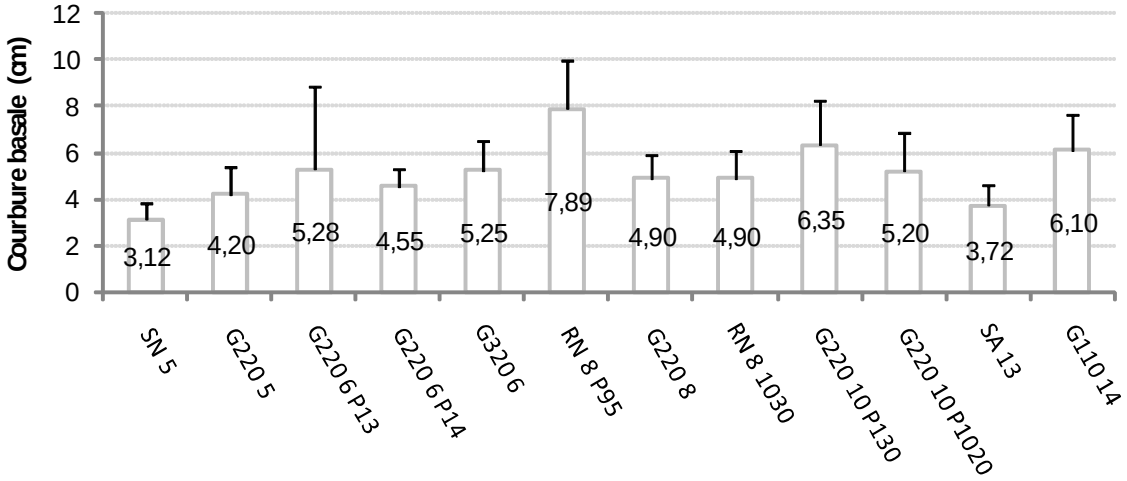
Il y a encore des plants en godets 110cc à 14 ans qui présentent, malgré leur âge avancé, un écart à la verticalité de plus de 10 cm, même s'il n'y a plus d'inclinaison à plus de 20 cm.

Tableau 28 : Pourcentage de plants ayant un écart à la verticalité de plus de 10 cm et 20 cm

	% plants EV > 10 cm	**% plants EV > 20 cm**
SN5	10	0
G200 5	**80**	0
G200 6 P13	25	**25**
G200 6 P14	70	**20**
G320 6	10	0
RN 8 P95	**55**	11
G200 8	30	0
RN 8 1030	40	0
G220 10 P130	**90**	**30**
G220 10 P1020	**60**	**20**
SA 13	50	20
G110 14	50	0

4.3.2 La courbure basale

Comme pour l'écart à la verticalité, la courbure basale des semis de pins sylvestres est moins importante que celle de plants en godets.



Graphique 23 : Courbure basale moyenne pour chaque série

L'impact de la courbure basale sur la hauteur est difficile à interpréter. La corrélation ne suit pas une logique qui prouve une influence négative, ni positive.

Tableau 29 : Coefficients de corrélation entre la hauteur des plants en 2010 et la courbure basale

	SN 5	G220 5	G220 6 P13	G220 6 P14	G320 6	RN 8 P95	G220 8	RN 8 1030	G220 10 P130	G220 10 P1020	SA 13	G110 14
Correlation CB x H	-0,04	-0,40	0,27	0,04	0,48	0,45	0,11	0,02	0,18	-0,24	-0,27	0,05

Courbure basale et écart à la verticalité x déformations

D'après le tableau 30, les plants qui présentent une absence de racines sur plus de 120° et des racines en forme de L, sont celles qui ont également les valeurs de courbure basale et d'écart à verticalité les plus hautes.

Tableau 30 : Relation entre déformations, courbure basale et écart à la verticalité.

	Absence de racines sur plus de 120°		Racines en forme de L	
	non = 0	oui = 1	non = 1	oui= 0
CB	4.8	5.3	4.2	5.1
EV	11.7	13.5	8.9	12.9
Eff.	*47*	*73*	*105*	*15*

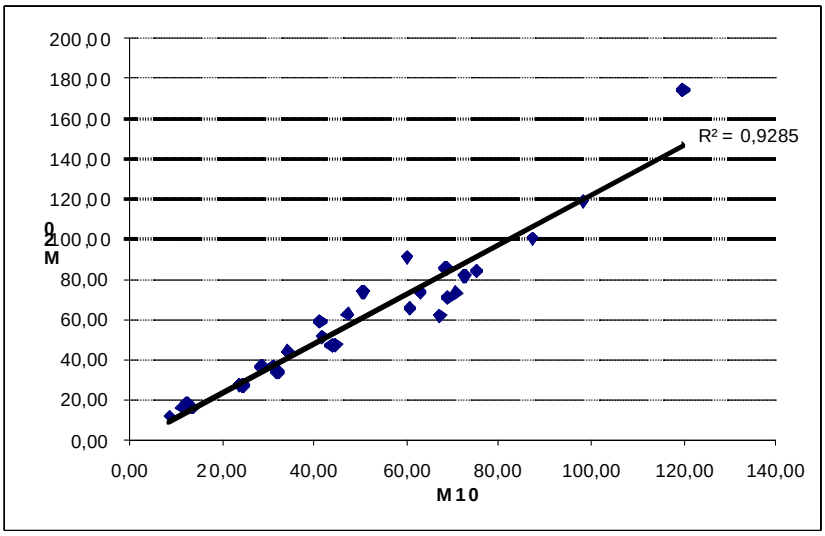
Quand on observe plus spécifiquement les mêmes paramètres pour les plants en racine nues et godets 200cc à 8 ans, on peut noter que la cohérence est valable pour les racines nues, mais pour les godets, elle fonctionne à l'envers.

Tableau 31 : Relation entre déformation, courbure basale et écart à la verticalité pour les plants à 8 ans.

		Absence de racines sur plus de 120°		Racines en forme de L	
		non = 0	oui = 1	non = 1	oui= 0
RN 8	*CB*	5.5	7.6	4.7	6.9
	EV	9.2	11.0	7.3	10.8
	Eff.	*13*	*7*	*15*	*5*
G200 8	*CB*	5.3	4.0	6.3	4.6
	EV	8.6	8.0	9.8	8.1
	Eff.	*7*	*3*	*2*	*8*

4.3.3 La stabilité

En 2008, le moment pour une inclinaison à 10°, puis à 20° du plant avait été relevé. Ces deux mesures étant très fortement corrélées, comme l'avait montré l'étude en 2010 (cf. graphique 24), la stabilité a été uniquement relevée pour une inclinaison à 20°; celle-ci demandant le plus de force, on peut supposer observer les plus grandes différences entre modalités.

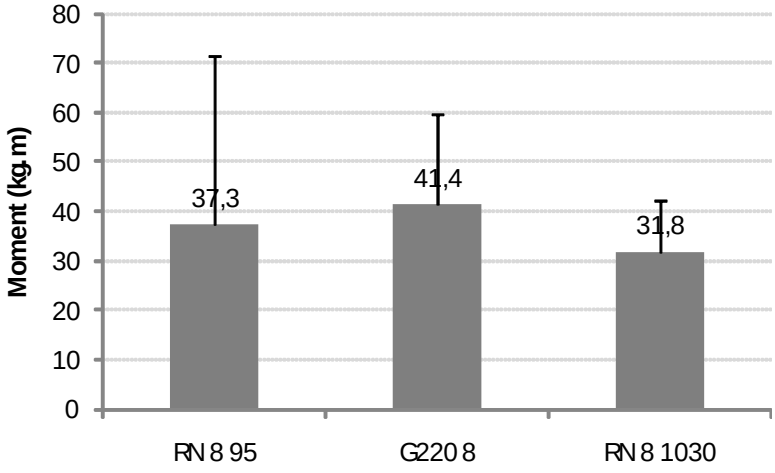


Graphique 24 : Moment pour incliner les plants de 20° en fonction du moment pour incliner les plants de 10° par rapport à la verticale (données 2008)

Photo 16 : Mesure de la stabilité des plants.

On incline l'arbre à l'aide d'un "tirefort" jusqu'à atteindre une inclinaison, ici de 20°. La force nécessaire est mesurée à l'aide d'un dynamomètre (au centre). Les résultats obtenus sont présentés dans le graphique 24 page suivante.

Le graphique 25 montre un écart type important et une différence trop faible entre les modalités. Néanmoins, les racines nues ont besoin de moins de force pour s'incliner.



Graphique 25 : Stabilité moyenne pour les séries de 8 ans mesurées en 2010.

Le tableau 32 souligne qu'il est difficile d'établir des corrélations franches expliquant la bonne stabilité ou non d'un plant tant les facteurs sont nombreux et imbriqués. L'écart type est trop important et les moyennes trop proches pour constater des différences significatives entre les placettes. Néanmoins, on peut relever des tendances, telles que l'importance de la **distribution des racines sur 360°** ou le **nombre de racines colonisatrices** pour une meilleure stabilité. En effet, 2 parcelles sur 3 présentent une bonne corrélation entre ces facteurs et la hauteur des plants. A l'inverse, à cet âge, un facteur tel que le nombre de racines dans les 10 premiers centimètres ne semblent plus être déterminant sur la stabilité.

Tableau 32 : Coefficients de corrélation entre le moment appliqué pour incliner les plants de 20° et différents critères relevés en 2010 :

	Diamètre de la + grosse racine de 1° ordre (mm)	**Racines zone A**	**Racines colonisatrices**	**Distribution 360°**
RN 8 P1030	0,28	0,22	**0,67**	**0,80**
G200 8	0,17	0,29	- 0,18	**0,56**
RN 8 P95	**0,51**	0,00	**0,51**	- 0,16

5. Limites et perspectives

L'analyse racinaire permet d'observer des déformations telles que la spiralisation de racines, des inclusions ou encore des racines remontantes.

Néanmoins, à partir d'un certain âge, le plant poursuivant sa croissance, toutes ses racines finissent par s'agglomérer et deviennent invisibles à l'œil nu. A titre d'expérience, certains plants âgés de 10 à 14 ans ont été ouverts en deux, dans le sens longitudinal, comme le montre les photos ci-dessous.

Photo 17 et 18 : Plants présentant des formations type « nécroses ». La nature exacte de ces dernières reste encore à déterminer.

On observe parfois des zones sombres que l'on pourrait assimiler à des nécroses, présentant à la fois des creux mais également composées de sol ou encore du cortex provenant des racines incluses dans cette masse. On peut s'interroger sur l'impact de telles formations sur la croissance du plant et l'importance de cette perte de cellules saines propices à la circulation de la sève. La résistance mécanique de ces zones soulève également des interrogations.

De nouveaux outils existent, tel que le tomographe à rayons x, qui pourrait peut-être permettre d'observer et d'estimer ces phénomènes. Aussi, il serait à présent intéressant de passer au scanner des plants d'environ 10 ans et plus, afin de mieux appréhender le devenir de ces déformations racinaires, constatées au jeune âge et engendrées soit par le volume, la forme ou le substrat des conteneurs soit lors de la mise en terre du plant.

Annexes

Annexe 1 : Localisation des placettes permanentes

Annexe 2 : Protocole d’analyse racinaire

Annexe 3 : Fiches de synthèse des données par placette