

## Protection des arbres contre les dégâts du chevreuil : étude d'impacts des manchons brise-vent et des tubes abris à effet de serre sur la croissance juvénile de l'érable plane



### Compte-rendu d'essai

Philippe Van Lerberghe (IDF) et Christian Ritter (UCL)



## REMERCIEMENTS

---

Un grand merci à :

- Christian et Anne-Claude LAVAL (heureux propriétaires à Calès) pour la mise à disposition de la parcelle d'essai et leur coopération active dans la réalisation technique et financière du dispositif expérimental ;
- l'entreprise d'espaces verts CALÈS ENVIRONNEMENT et tout son personnel pour la qualité de leurs prestations forestières ;
- Bhukan PARBHOO et Irina PERRY (TUBEX), Albert FORT et Pascal SOREL (INTERMAS) pour le financement des fournitures nécessaires à la réalisation de cette expérimentation ;
- Guillaume de COLOMBELLE et Yanis NIETO (Pépinières NAUDET) pour la fourniture de plants d'érable de qualité ;
- Eric Le BOULEGÉ (UCL) pour l'excellente planification expérimentale d'un protocole d'essai très robuste d'un point de vue statistique ;
- Marine LESTRADE, Jean-Pierre GOUDARD, YANN CLÉMENT et JOHANN HUBELÉ (CRPF Midi-Pyrénées) pour leur appui technique sans faille et leur bonne humeur communicative ;
- Pierre GONIN (IDF - CNPF) pour sa disponibilité et la qualité de son diagnostic stationnel ;
- Grégory SAJDAK et Violette DESOMBRE (IDF - CNPF) pour leur dynamisme, leur écoute et leur travail consciencieux.



De gauche à droite : Philippe<sup>1</sup>, Grégory<sup>1</sup>, Bernard<sup>2</sup>, Yann<sup>3</sup>, Johann<sup>3</sup>, Violette<sup>1</sup>, Gaël<sup>2</sup>, Jean-Pierre<sup>3</sup> et Christian<sup>2</sup>  
1 : IDF - 2 : Calès Environnement - 3 : CRPF de Midi-Pyrénées

## SOMMAIRE

---

<b>1. Contexte.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Hypothèses de travail.....</b>	<b>2</b>
<b>3. Matériel et méthodes .....</b>	<b>3</b>
3.1. Site expérimental .....	3
3.1.1 Localisation .....	3
3.1.2 Climat.....	3
3.1.3 Substrat.....	3
3.1.4 Sol.....	4
3.1.5 Travaux.....	4
3.2. Matériel végétal.....	4
3.3. Traitements .....	5
3.4. Dispositif expérimental .....	6
3.5. Mesures de croissance .....	6
3.5.1 Accroissement aérien .....	6
3.5.2 Accroissement racinaire .....	7
<b>4. Résultats.....</b>	<b>8</b>
4.1. Vérification du dispositif .....	8
4.1.1 Stratification .....	8
4.1.2 Relations allométriques destinées à l'estimation de la biomasse à la plantation.....	9
4.2. Croissance en hauteur .....	10
4.3. Croissance en diamètre .....	11
4.4. Croissance en élancement.....	12
4.5. Croissance en matière sèche totale.....	13
4.6. Croissance en matière sèche racinaire.....	14
4.7. Croissance en matière sèche aérienne .....	15
4.8. Rapport masse sèche en septembre 2011: racinaire/totale. ....	16
4.9. Rapport masse sèche en septembre 2011: racinaire/aérienne .....	17
<b>5. Brèves conclusions.....</b>	<b>18</b>
<b>6. Bibliographie .....</b>	<b>19</b>
<b>7. Histoire photographique .....</b>	<b>20</b>
<b>8. Partenaires .....</b>	<b>22</b>

## 1. CONTEXTE

---

Protéger les arbres par des tubes et des gaines grillagées plastiques contre les attaques d'animaux est une pratique d'usage courant dans le secteur forestier, agroforestier et paysager.

Ces techniques ne seraient pas aussi anodines qu'elles y paraissent pour le développement aérien et racinaire des arbres protégés.

En modifiant le microclimat autour de l'arbre, il a déjà été démontré que :

- les tubes à double paroi alvéolaire (tubes non ventilés) induisent un effet de serre préjudiciable à la croissance, à savoir une réduction de la croissance en diamètre de la tige principale et de la biomasse du système racinaire (Dupraz *et al.*, 1993 ; Svihra *et al.*, 1996 ; Dupraz, 1997b) ;
- les tubes plastiques ventilés, c'est-à-dire percés à la base (créant une ventilation de l'intérieur de la protection par effet dit « cheminée »), permettent de palier les modifications de température, de lumière ou d'échanges gazeux autour de l'arbre et de stimuler la croissance en diamètre de l'axe principal (Bergez et Dupraz, 2000). Néanmoins, les arbres protégés par ces tubes présentent toujours des différences de croissance par rapport aux arbres non protégés : malgré une biomasse totale normale des arbres, le déficit racinaire reste inchangé, c'est-à-dire que le ratio biomasse aérienne/biomasse racinaire demeure déséquilibré.

Il est aussi connu que les sollicitations mécaniques exercées sur un arbre (par exemple, par le vent) induisent une réduction de sa croissance en hauteur et une stimulation de sa croissance en diamètre (Jacobs, 1954 ; Mäkelä et Sievanen, 1992). Ce phénomène a été appelé « thigmomorphogénèse » (Jaffe, 1973).

Sachant qu'une des caractéristiques des arbres en tube est d'être immobiles, l'hypothèse selon laquelle l'absence de mouvements serait responsable des différences de croissance avec les arbres non protégés a été récemment posée. Il a été ainsi démontré (Coutand *et al.*, 2008) que la protection des arbres au moyen de tubes plastiques empêcherait les sollicitations mécaniques naturelles dues au vent, ce qui modifie la croissance des arbres et en particulier, la distribution de la biomasse entre partie aérienne et partie racinaire.

Si de nombreuses informations sont disponibles dans la littérature scientifique internationale au sujet de l'impact des protections tubulaires sur la croissance aérienne des arbres protégés, peu ou pas de résultats sont actuellement disponibles quant à l'effet des tubes abris à effet de serre et surtout, des gaines brise-vent en grillage plastique sur la croissance racinaire de jeunes plants de feuillus précieux.

## 2. HYPOTHESES DE TRAVAIL

---

Nous faisons les hypothèses suivantes :

- les tubes abris-serre non ventilés induisent des différences significatives de croissance aérienne et racinaire (en hauteur, diamètre, élancement, biomasse totale et ratio biomasse aérienne/biomasse racinaire) entre les arbres tubés et les arbres à croissance libre ;
- malgré une biomasse totale normale des arbres, le déficit racinaire reste inchangé chez les arbres sous tubes ventilés, c'est-à-dire que le ratio biomasse aérienne/biomasse racinaire demeure déséquilibré ;
- les manchons à petites mailles ( $\leq 4$  mm) dites « brise-vent » induisent des différences significatives de croissance aérienne et racinaire (en hauteur, diamètre, élancement, biomasse totale et ratio biomasse aérienne/biomasse racinaire) entre les arbres sous gaines et les arbres à croissance libre ;
- ces différences de croissance aérienne et racinaire (en hauteur, diamètre, élancement, biomasse totale et ratio biomasse aérienne/biomasse racinaire) mesurées sur les arbres protégés avec des manchons sont significativement moindres que celles des arbres sous tubes abris à effet de serre.

### 3. MATERIEL ET METHODES

#### 3.1. SITE EXPERIMENTAL

##### 3.1.1 Localisation

La parcelle expérimentale a été gracieusement mise à disposition de l'Institut pour le Développement Forestier (IDF) à partir du 1<sup>er</sup> septembre 2010 pour une durée de 64 mois, expirant le 31 décembre 2015. Elle est située dans le sud-ouest de la France (Midi-Pyrénées) sur la commune de Calès (lat. 44° 48' 29.89" Nord, long. 1° 30' 33.74" Est, à 135 m d'altitude), au lieu-dit « Les Dames », dans le département du Lot (46), à environ 55 km au nord de Cahors.

Le site d'essai est une friche agricole d'une superficie totale d'environ 1,46 ha et située, en fond de vallée, à proximité de l'autoroute A20 (l'Occitanie) qui relie Brive-la-Gaillarde (19) à Montauban (82). Cette parcelle était occupée par des cultures céréalières. La dernière récolte a eu lieu en juin 2010.

##### 3.1.2 Climat

Le site est soumis à un climat océanique aquitain, caractérisé par le balancement des influences atlantiques et méditerranéennes, les **étés chauds et secs** contrastant avec les **hivers doux et humides** (données Météo France à Gourdon, alt. = 259 m, période 1960-90).

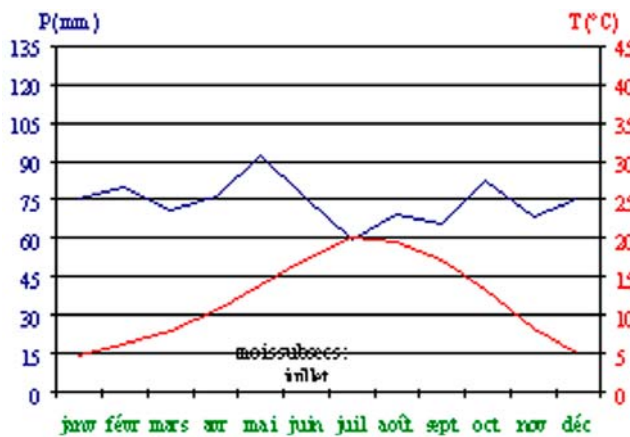


Figure 1 - Diagramme ombrothermique (P = 3T) Gourdon (Lot ; 1960 - 1990)

La **pluviosité** est **assez faible** : environ 890 mm/an répartis irrégulièrement au cours de l'année, le maximum s'observant au printemps et secondairement à l'automne, le minimum en été. La pluviosité présente de fortes variations interannuelles, comprises entre 700 et 900 mm.

Les **températures** sont **assez élevées** avec une moyenne annuelle de **12,0°C**, les hivers doux (4,7°C en janvier) s'opposent aux étés très chauds (20°C en juillet). Il gèle 35 jours par an.

Les **vents** dominants sont orientés d'ouest à nord-ouest, amenant la pluie.

Concernant le **bilan hydrique**, il n'existe pas de mois secs au sens de Gausson ( $P < 2T$ ) mais, une faible subsécheresse ( $P < 3T$ ) apparaît en juillet (Figure 1).

L'**ensoleillement** est **très appréciable** avec une moyenne annuelle de 2 058 heures.

##### 3.1.3 Substrat

Le site repose sur les alluvions (Figure 2) des petites vallées secondaires (C-F : Quaternaire, Cailloutis à matrice argileuse 0-10 m).

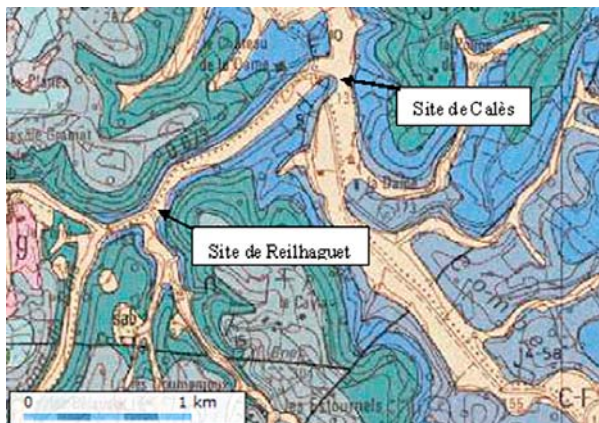


Figure 2 - Carte géologique du site

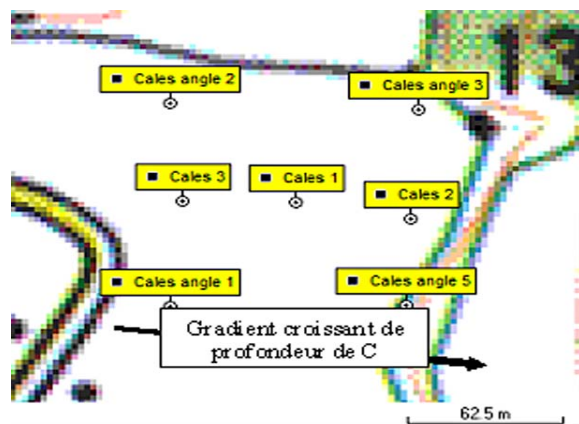


Figure 3 - Localisation des sondages pédologiques

### 3.1.4 Sol

#### Type de sol - profil 1 : CALCOSOL épais (= sol brun calcaire)

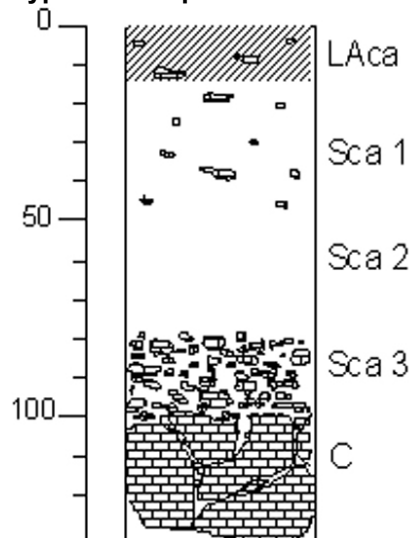


Figure 4 - Profil d'un Calcosol épais

Le profil (Figure 4) est caractérisé par la présence de calcaire sur tout le sondage et l'horizon de surface (LAca) est basique (pH = 6,8).

La texture est argileuse. La charge en graviers calcaires est faible (< 5 %) en surface (entre 0 et 45 cm), nulle entre 45 et 80 cm, puis devient très élevée (70 %) entre 80 et 100 cm, juste au-dessus de la roche-mère altérée.

En dehors de l'horizon de surface LAca compact à structure grumeleuse, les autres horizons sont très compacts et leur structure est massive.

Seul l'horizon intermédiaire (45 - 80 cm) présente une sur-structure en grands polyèdres.



Le profil est suffisamment **bien drainé** pour ne pas présenter de traces d'hydromorphie.

### 3.1.5 Travaux

La mise en place de l'essai a nécessité diverses opérations complémentaires :

- un diagnostic pédologique approfondi du sol (Photo 1) de la parcelle (27 juillet 2010) afin de choisir l'essence la plus adaptée à la station ;
- l'enfouissement dans le sol de conteneurs de 70 litres (Photo 2) destinés à l'étude de la croissance de la biomasse racinaire (2 mars 2011) ;
- la production du BRF de noisetier commun (*Corylus avellana* L.) (2 au 5 mars 2011) ;
- la plantation des jeunes arbres dans les conteneurs (1 arbre/bassin) et l'installation des divers types de protection et du paillis (9 mars 2011).

## 3.2. MATERIEL VEGETAL

Des plants d'érable plane (*Acer platanoïdes* L.; origine APL 901 Nord) d'un an (1-0) et à racines nues (40-60 cm) ont été achetés dans une pépinière commerciale du sud ouest de la France.

Les jeunes arbres ont été stratifiés (cf. section 3.4) puis, plantés manuellement en potet (30 x 30 x 30 cm) ouverts à la bêche dans chaque conteneur préalablement enfoui dans le sol.



Photo 1 : Après l'étude des horizons, des échantillons de sol sont prélevés pour analyses en laboratoire



Photo 2 : L'enfouissement préalable de bassins facilite l'étude de la croissance de la biomasse racinaire des plants

### 3.3. TRAITEMENTS

Dans cet essai en champ, 48 arbres sont soumis à 4 traitements.

Les traitements sont : (A) arbres soumis au vent librement (Tem) (Photo 3) ; (B) arbres protégés de gaines plastiques en grillage à petites mailles (Mai) (Photo 4) ; (C) arbres protégés de tubes plastiques non perforés (TuF) (Photo 5) ; (D) arbres protégés de tubes plastiques perforés (TuV) (Photo 6).

Les modèles de protection mécanique individuelle sont :

- (B) des gaines rigides 4 plis en PEHD, à mailles de 2,5 mm avec renforts tous les 25 mm, de couleur noire, de 120 cm de haut et de 15 cm de large et 190 gr/ml ([Nortène Climatic 3\\*](http://www.pepinieres-naudet.com/pdf/climatic.pdf) ; <http://www.pepinieres-naudet.com/pdf/climatic.pdf>);
- des tubes circulaires en polypropylène, à double paroi alvéolée, de couleur vert clair, translucide, de 120 cm de haut et de 6,5 à 12 cm de large :
  - (C) sans trous de ventilation à la base du tube : Tubex® « L » Standard » ; <http://www.tubexfrance.com/tl.pdf>
  - (D) avec ou sans trous de ventilation à la base du tube : Tubex® « E » Equilibre, appelé aussi « Ventex » ; <http://www.tubexfrance.com/te.pdf>

Les arbres sont tuteurés sur des piquets épointés de bois de châtaignier écorcé, de 175 cm de haut et 11 à 13 cm de circonférence. Ils sont installés au nord des arbres afin de réduire les effets d'ombrage.

Chaque traitement a été appliqué à 12 arbres (Photo 7). Les arbres sont paillés par des copeaux de Bois Raméal Fragmenté de noisetier commun (*Corylus avellana* L.), de calibre 5 à 25 mm, déposé sur une surface d'1 m<sup>2</sup> et sur 15 cm d'épaisseur (Photo 8).



**Photo 3 :** (A) Arbre soumis au vent librement (témoin)



**Photo 4 :** (B) Arbre protégé par une gaine plastique en grillage à petites mailles



**Photo 5 :** (C) Arbre protégé par un tube non ventilé à effet de serre



**Photo 6 :** (D) Arbre protégé par un tube ventilé à effet de serre



**Photo 7 :** Dispositif en blocs aléatoires complets de 12 x 4 arbres

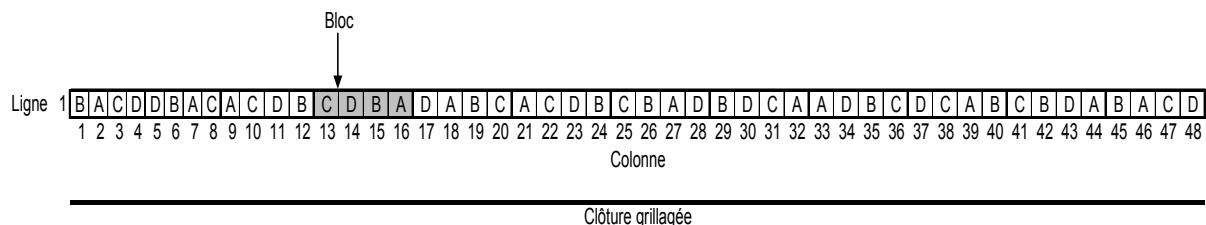


**Photo 8 :** Paillage des plants au moyen d'une couche de BRF de noisetier de 15 cm d'épaisseur



### 3.4. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

La forme du dispositif est linéaire : les arbres sont plantés selon une ligne de 48 arbres (colonnes) espacés d'un mètre environ. L'intersection de cette ligne et de chaque colonne est une **placette** où est planté un arbre, auquel est assignée l'une des 4 modalités de protection. La protection gibier est le facteur d'intérêt, dont l'influence sur les caractéristiques des arbres est à analyser. Les 4 modalités sont disposées aléatoirement dans chacun des 12 **blocs** de 4 arbres.



#### Stratification des plants avant plantation

Afin de contrôler la variabilité des plants avant plantation, des distributions similaires en termes de dimensions de tiges pour les différents traitements ont été obtenues par **stratification**. L'objectif était de constituer pour les 4 traitements, 4 échantillons de 12 arbres de même distribution en hauteur.

Pour ce faire, nous avons choisi de :

- prélever 32 plants au hasard (**Photo 9**) dans la fourniture livrée (1 arbre dans chaque sac) ;
- les trier du plus petit au plus grand (**Photo 10**), puis, préparer un bambou de la taille du 8<sup>ème</sup> plus petit (bambou n°1), un bambou de la taille du 16<sup>ème</sup> plus petit (bambou n°2) et un bambou de la taille du 24<sup>ème</sup> plus petit (bambou n°3) ;
- trier les 48 arbres à planter en 4 tas : plus petits que le bambou n°1, plus grands que le bambou n°3, ceux entre le bambou n°1 et n°2 ou ceux entre le bambou n°2 et n°3 (12 arbres par tas) ;
- pour chaque traitement, prendre 3 arbres de chacun des 4 tas pour constituer un échantillon de 12 arbres et donner un code à chaque botte (CB + abréviation de la modalité) avant mise en jauge individuelle (**Photo 11**) ;
- répartir les 12 plants au hasard sur les 12 positions assignées à chaque traitement.

### 3.5. MESURES DE CROISSANCE

Les mesures de mortalité et de croissance aérienne sont effectuées durant la 1<sup>ère</sup> saison de végétation après plantation (depuis avril jusqu'à octobre 2011). Les arbres ont été inspectés visuellement et marqués en tant que plant « mort (M) » ou « vivant (V) ». L'effet des traitements sur la croissance de l'arbre est déterminé par la mesure mensuelle de la hauteur totale (au ½ cm près) et du diamètre basal (mesuré à 15 cm au-dessus du sol, au mm près) mais aussi, de la biomasse totale, aérienne et racinaire (estimées) à l'issue de la 1<sup>ère</sup> saison de végétation.

#### 3.5.1 Accroissement aérien

La **taille** ou hauteur de la pousse (**Photo 12**) est mesurée avec une règle (précision ± 0,5 cm). En cas de mort du bourgeon apical, la hauteur du plant est mesurée sur la nouvelle pousse. Le **diamètre** de chaque arbre (**Photo 13**) est mesuré avec un pied à coulisse numérique SYLVAC S-Cal PRO à 15 cm de hauteur (**Photo 14**) au-dessus du collet (précision ± 0,01 cm). Il est facile d'en déduire l'**élancement** de la pousse par le rapport entre sa hauteur et son diamètre.

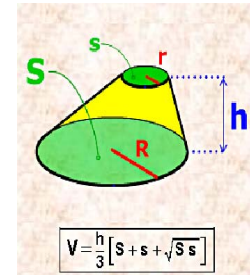
La **biomasse totale** fraîche du plant est mesurée avant plantation (**Photo 15**) au moyen d'une balance KERN 444-45 (précision ± 0,1 g). La **biomasse aérienne** (il s'agit du tronc, les jeunes plants n'étant pas branchus) n'est pas mesurée (car elle implique la destruction préalable du plant) mais, estimée au moyen d'une relation allométrique.

Les effets des traitements sur la croissance étant souvent masqués par la variabilité de la taille initiale des plants, nous calculerons les **accroissements** afin de tenir compte des variations de vigueur entre plants. Il s'agit d'une mesure périodique de type :  $(T2 - T1) / (t2 - t1)$ , où T1 et T2 sont des mesures de taille (hauteur totale ou diamètre) des plants à des moments différents (t1 et t2). Dans cette étude, ces mesures périodiques de taille de plants ont été réalisées chaque mois (t2 - t1 = 1), d'avril à octobre 2011.

### 3.5.2 Accroissement racinaire

La **biomasse racinaire** des arbres à la plantation est estimée indirectement :

- en utilisant une relation allométrique obtenue au moyen de mesures faites sur un échantillon supplémentaire de 36 arbres ; établir cette relation a nécessité le calcul des variables suivantes :
  - connaissant le diamètre de chaque tige à 3 niveaux de chaque plant avant plantation, le volume du tronc est calculé comme la somme de 2 cônes tronqués (**Figure 5**) ;
  - les troncs ont été séparés des systèmes racinaires. Tiges et racines ont été pesées (biomasse fraîche), séchées et pesées à nouveau (biomasse sèche). Le pourcentage d'eau dans les plants à l'état frais peut ainsi être estimé ;
  - la relation entre la biomasse du tronc et le volume du tronc frais est donnée selon une relation linéaire du type : **Biomasse du tronc (g) =  $\alpha$  (volume du tronc frais, mm<sup>3</sup>) -  $\beta$** .
- en mesurant la biomasse fraîche totale de chaque plant avant plantation ;
- en estimant la biomasse du tronc de chaque plant avant plantation :
  - les dimensions de chaque tronc ont été mesurées [hauteurs et diamètre à 3 niveaux : collet (**Photo 16**), hauteur médiane et hauteur total sous bourgeon terminal (**Photo 17**)] afin de calculer le volume du tronc frais ;
  - les biomasses fraîche et sèche du tronc sont alors estimées en utilisant la relation allométrique définie précédemment.



**Figure 5** - Calcul du volume d'un cône tronqué

**La biomasse racinaire des arbres à la plantation est alors calculée par différence entre la biomasse totale (mesurée) et la biomasse du tronc (estimée par la relation allométrique).**

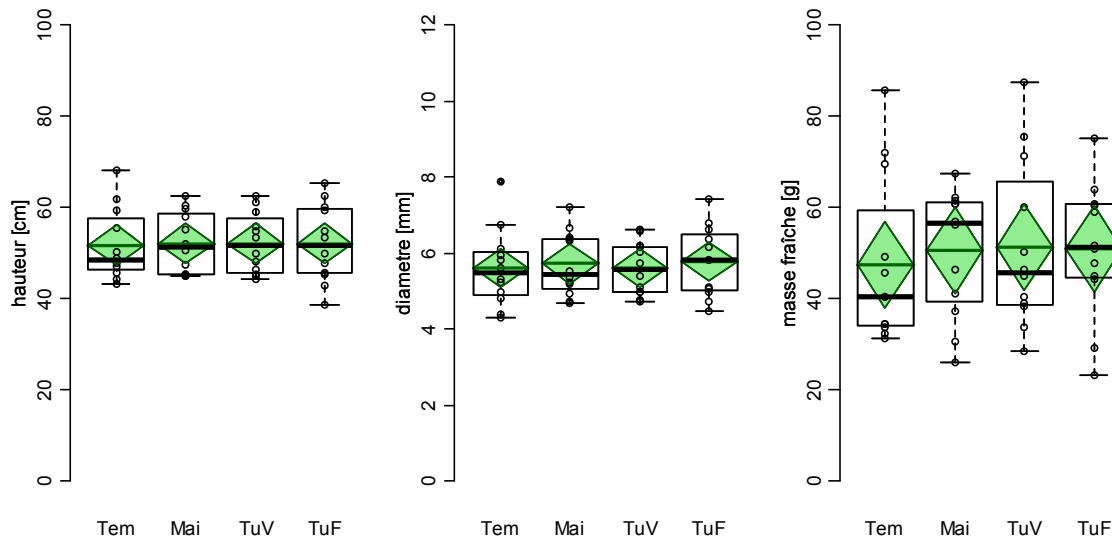
En fin de la 1<sup>ère</sup> année de croissance (**Photo 18**), les conteneurs ont été extraits du sol (**Photo 19**), les arbres dépotés (23 avril 2012) et leurs systèmes racinaires soigneusement nettoyés à l'eau (**Photo 20**). Les feuilles, les branches, les tiges et les racines ont ensuite été patiemment séparées (26 et 27 avril 2012) avant pesage de cette biomasse fraîche (**Photo 21**), séchage durant 3 jours à 103°C et enfin, pesage de la biomasse sèche (**Photo 22**). La production nette en biomasse à l'issue de cette unique saison de végétation peut alors être calculée par différence entre la biomasse des plants d'1 an et celle des plants à la plantation.

## 4. RESULTATS

### 4.1. VERIFICATION DU DISPOSITIF

#### 4.1.1 Stratification

Comme les arbres à planter n'étaient pas de taille uniforme, une procédure de stratification vise à équilibrer l'attribution aux traitements. Le graphique suivant (Figure 6) montre le résultat de cette procédure.



**Figure 6 - Les diamètres, les hauteurs, et les masses fraîches des arbres à la plantation sont similaires pour les quatre modalités.**

Des analyses de variance confirment l'impression visuelle: il n'y a pas d'indication d'attribution hétérogène des arbres aux modalités du traitement. La modalité du traitement (MODAL) est loin du seuil de signification dans les trois analyses.

```
lm(formula = HTM3 ~ MODAL, data = Combi)
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
MODAL    3    1.6    0.54    0.01  0.999
Residuals 44 2401.4   54.58
```

```
lm(formula = DMM3 ~ MODAL, data = Combi)
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
MODAL    3   0.30  0.0992    0.13  0.942
Residuals 44  33.66  0.7650
```

```
lm(formula = GRTF0 ~ MODAL, data = Combi)
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
MODAL    3   111  37.07    0.138  0.937
Residuals 44 11819  268.61
```

#### 4.1.2 Relations allométriques destinées à l'estimation de la biomasse à la plantation

Les quantités d'intérêt sont la croissance en biomasse sèche et le rapport entre la biomasse sèche racinaire et la biomasse sèche totale.

La croissance de la biomasse sèche implique la différence entre la biomasse sèche à la fin de l'étude (septembre 2011) et celle au moment de la plantation (mars 2011) :

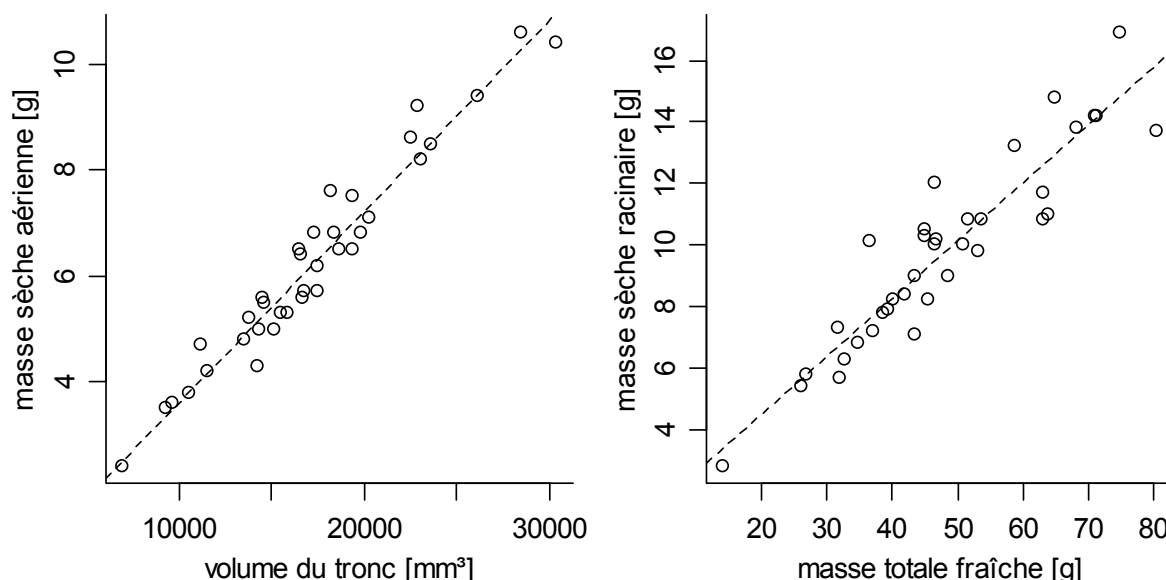
- la première de ces deux mesures est facile à réaliser. On sacrifie l'arbre, sépare les racines de la partie aérienne, les sèche et les pèse ;
- la biomasse sèche au moment de la plantation doit, par contre, être estimée par une relation allométrique de la biomasse fraîche. Cette relation doit être dérivée d'une étude annexe: *Le Boulengé E. (2013). Prédiction de calibration de biomasses non mesurables, UCL, 31 p.*

**La biomasse sèche de la partie aérienne (GRAS)** dépend de son volume et de sa densité. Comme la partie principale de la masse aérienne des arbres qui nous intéressent ici est contenue dans le tronc, on peut poser la relation: Masse sèche de la partie aérienne (GRAS) = facteur0 \* volume du tronc (V) où le facteur comprend à la fois la densité du tronc et le rapport entre la masse du tronc et du tronc avec les tiges et les feuilles.

**La biomasse sèche de la partie racinaire (GRRS)** est plus difficile à estimer parce qu'il n'y a pas une notion de volume qu'on peut utiliser :

- un modèle basé sur le volume aérien de l'arbre ne donne pas un ajustement adéquat ;
- le modèle univarié qui donne le meilleur ajustement est proportionnel à la masse totale fraîche (GRTF). Une légère amélioration pourrait être apportée si l'on y inclut le volume aérien, mais sa contribution additionnelle est marginalement significative et dépend d'un nombre faible d'observations influentes. **Le modèle retenu ici implique alors simplement la masse totale fraîche.**

Les deux modèles pour les deux parties exprimées dans la nomenclature du logiciel R utilisé pour les calculs sont alors: GRAS~V et GRRS~GRTF.



**Figure 7 - Les deux graphiques montrent des fortes relations linéaires entre la masse sèche aérienne et le volume du tronc (gauche) et entre la masse sèche racinaire et la masse totale fraîche (droite).**

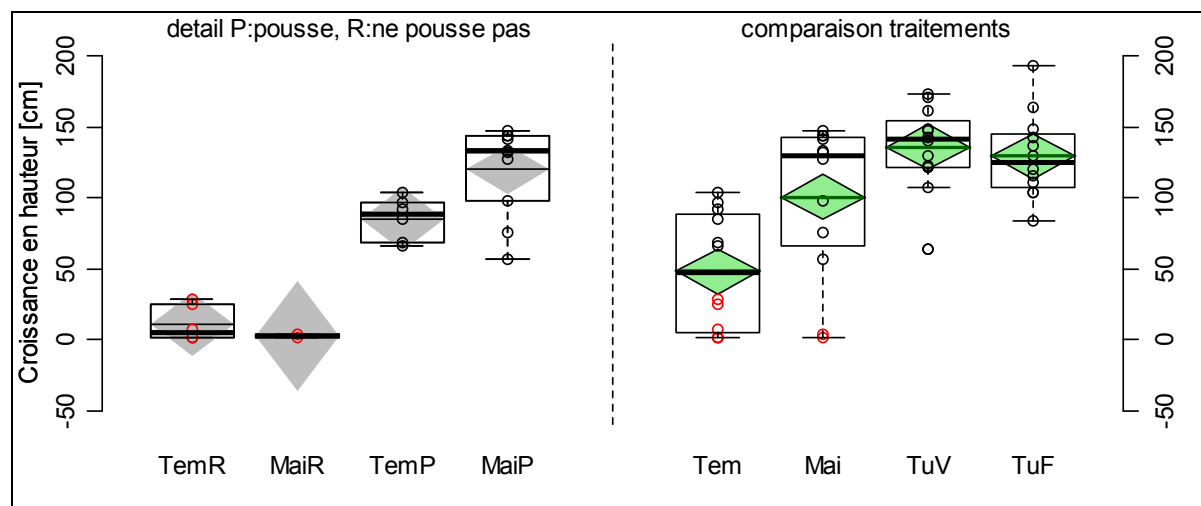
Les statistiques de cette modélisation (Figure 7) permettant alors d'estimer la masse sèche racinaire et aérienne au moment de la plantation sont les suivantes :

- **Masse sèche aérienne [GRAS en g] = 0.000361 \* Volume du tronc [mm<sup>3</sup>]**
- **Masse sèche racinaire [GRRS en g] = 0.202 \* Masse totale fraîche du plant [g]**

## 4.2. CROISSANCE EN HAUTEUR

La variable d'intérêt pour cette analyse est la différence en hauteur entre le mois de septembre 2011 (fin d'étude) et le mois de mars 2011 (plantation). Outre la variabilité naturelle, elle est potentiellement affectée par le traitement et par le positionnement de l'arbre exprimé par la variable BLOC.

Le modèle le plus simple pour cette situation est un modèle linéaire à deux entrées (MODAL et BLOC) dans lequel nous nous intéressons uniquement aux différences entre modalités. Comme l'analyse exploratoire a montré qu'il y a une série d'arbres qui n'ont eu que très peu de croissance ou aucune du tout, il est logique de les retirer de l'analyse ou au moins de faire l'analyse avec et sans ces arbres.



**Figure 8 - Croissance en hauteur [cm] entre mars et septembre 2011**

```
lm(formula = yy ~ MOD + BLOC, data = data)
      Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
MOD      5  96677   19335  23.682 9.64e-10 ***
BLOC     11   5682     517   0.633  0.787
Residuals 31  25310     816
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

L'influence du facteur BLOC est clairement non significative. L'analyse des modalités sera alors faite sans ce facteur.

La table suivante (Tableau 1) montre la signification d'une sélection de contrastes.

Le premier contraste SER-TemP concerne la différence entre les arbres témoin qui ont poussé et les autres arbres qui ont poussé.

Le second contraste compare les arbres protégés par tubes aux arbres protégés par gaines (qui ont poussé).

Puis suivent trois comparaisons de paires de modalités qui comparent les deux types de tubes, les témoins qui ont poussé à ceux qui n'ont pas poussé, et les arbres protégés par gaines qui ont poussé à ceux qui n'ont pas poussé.

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )	
SER-TemP	42.796	12.035	3.556	0.00599	**
TU-MaiP	12.674	10.224	1.240	0.11100	
TuF-TuV	-6.358	11.090	-0.573	0.29362	
TemP-TemR	74.567	15.683	4.755	0.00157	**
MaiP-MaiR	116.830	21.041	5.552	8.72e-07	***

**Tableau 1 - Croissance en hauteur [cm]: Contrastes sélectionnés.**

### 4.3. CROISSANCE EN DIAMETRE

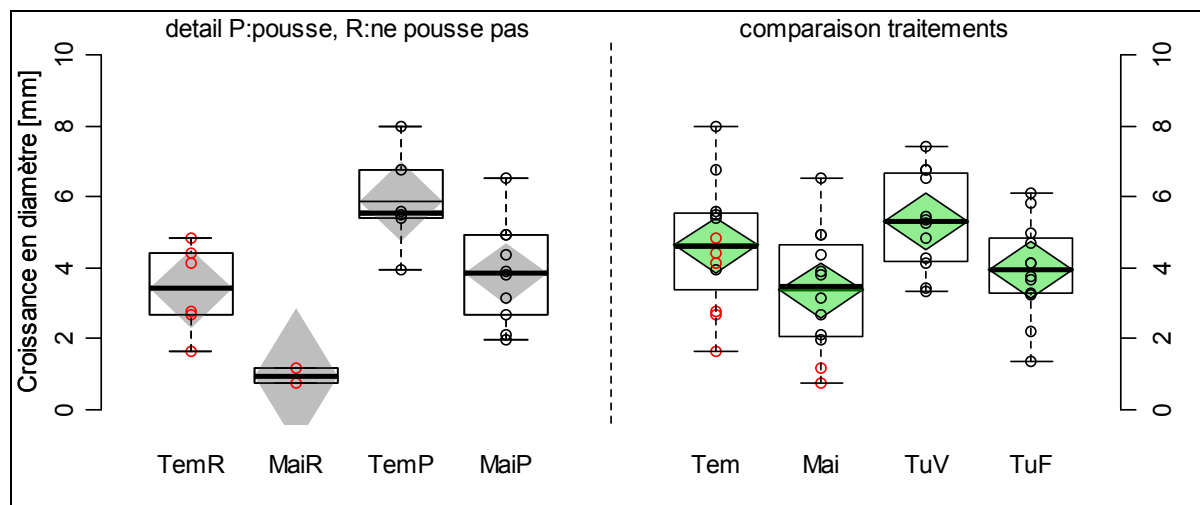


Figure 9 - Croissance en diamètre [mm] entre mars et septembre 2011

```
lm(formula = yy ~ MOD + BLOC, data = data)
      Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
MOD      5  57.46  11.492    6.763 0.000229 ***
BLOC     11  23.83   2.167    1.275 0.283731
Residuals 31  52.67   1.699
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

L'influence du facteur BLOC est clairement non significative. L'analyse des modalités sera alors faite sans ce facteur.

La table suivante (Tableau 2) montre la signification d'une sélection de contrastes.

Le premier contraste SER-TemP concerne la différence entre les arbres témoin qui ont poussé et les autres arbres qui ont poussés.

Le second contraste compare les arbres protégés par tubes aux arbres protégés par gaines (qui ont poussé).

Puis suivent trois comparaisons de paires de modalités qui comparent les deux types de tubes, les témoins qui ont poussé à ceux qui n'ont pas poussé, et les arbres protégés par gaines qui ont poussé à ceux qui n'ont pas poussé.

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )	
SER-TemP	-1.507	0.598	-2.520	0.02266	*
TU-MaiP	0.786	0.508	1.547	0.06463	
TuF-TuV	-1.352	0.551	-2.455	0.02474	*
TemP-TemR	2.462	0.779	3.159	0.00979	**
MaiP-MaiR	2.876	1.045	2.751	0.00437	**

Tableau 2 - Croissance en diamètre [mm]: Contrastes sélectionnés.

#### 4.4. CROISSANCE EN ELANCEMENT

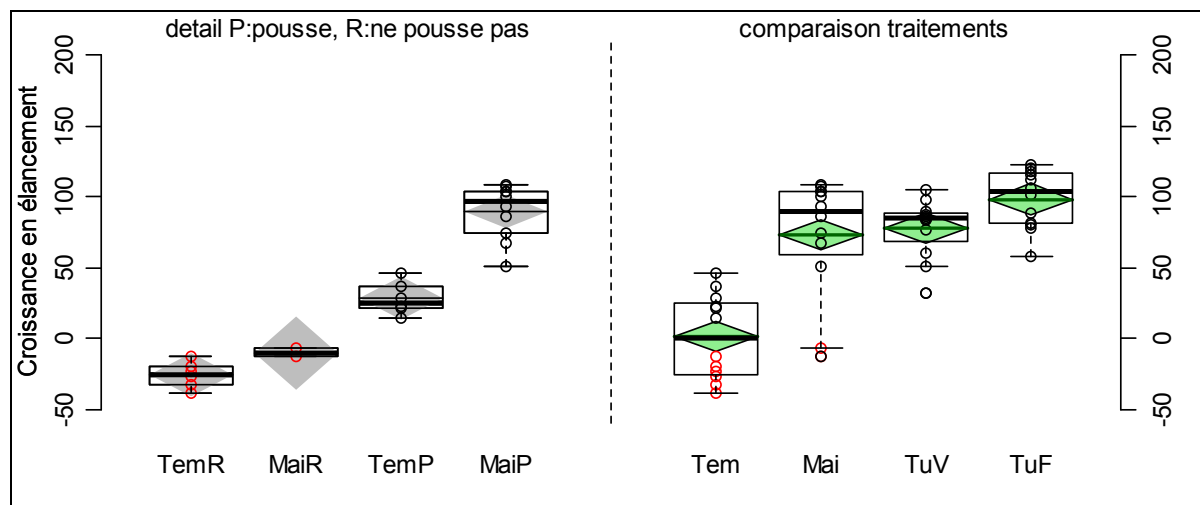


Figure 10 - Croissance en élancement entre mars et septembre 2011

```
lm(formula = yy ~ MOD + BLOC, data = data)
      Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
MOD      5  89584   17917   51.116 4.69e-14 ***
BLOC     11   3087     281    0.801  0.638
Residuals 31  10866     351
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

L'influence du facteur BLOC est clairement non significative. L'analyse des modalités sera alors faite sans ce facteur.

La table suivante (Tableau 3) montre la signification d'une sélection de contrastes.

Le premier contraste SER-TemP concerne la différence entre les arbres témoin qui ont poussé et les autres arbres qui ont poussés.

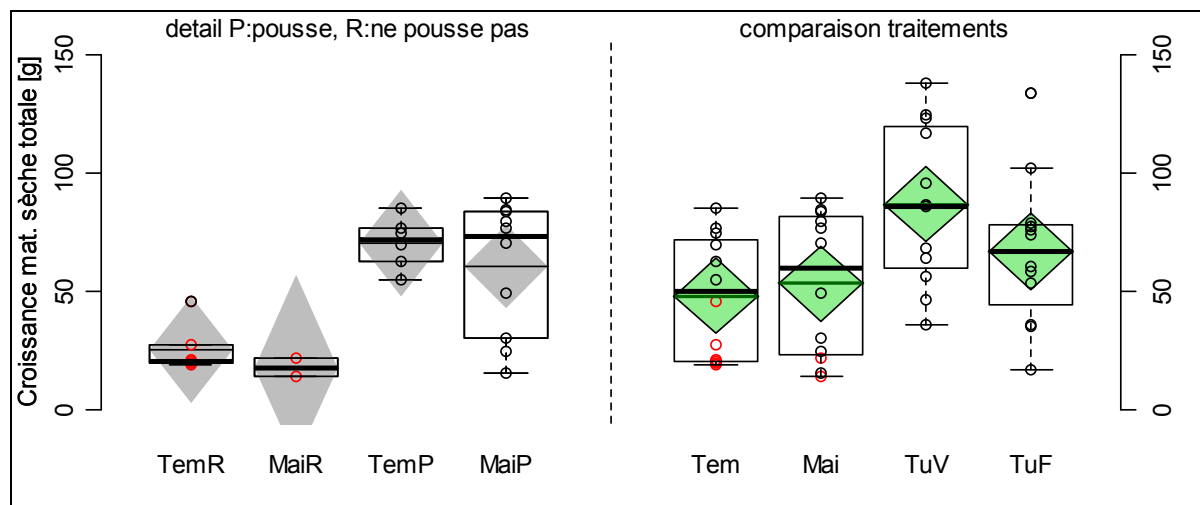
Le second contraste compare les arbres protégés par tubes aux arbres protégés par gaines (qui ont poussé).

Puis suivent trois comparaisons de paires de modalités qui comparent les deux types de tubes, les témoins qui ont poussé à ceux qui n'ont pas poussé, et les arbres protégés par gaines qui ont poussé à ceux qui n'ont pas poussé.

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )	
SER-TemP	60.413	8.076	7.481	0.000147	***
TU-MaiP	-1.143	6.860	-0.167	0.434243	
TuF-TuV	20.183	7.441	2.712	0.017500	*
TemP-TemR	53.677	10.523	5.101	0.001110	**
MaiP-MaiR	99.430	14.119	7.043	6.32e-09	***

Tableau 3 - Croissance en élancement: Contrastes sélectionnés.

#### 4.5. CROISSANCE EN MATIERE SECHE TOTALE



**Figure 11 - Croissance mat. sèche totale [g] entre mars et septembre 2011**

```
lm(formula = yy ~ MOD + BLOC, data = data)
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
MOD      5  19921    3984   5.040 0.00171 **
BLOC     11   7010     637   0.806 0.63368
Residuals 31  24507     791
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

L'influence du facteur BLOC est clairement non significative. L'analyse des modalités sera alors faite sans ce facteur.

La table suivante (Tableau 4) montre la signification d'une sélection de contrastes.

Le premier contraste SER-TemP concerne la différence entre les arbres témoin qui ont poussé et les autres arbres qui ont poussés.

Le second contraste compare les arbres protégés par tubes aux arbres protégés par gaines (qui ont poussé).

Puis suivent trois comparaisons de paires de modalités qui comparent les deux types de tubes, les témoins qui ont poussé à ceux qui n'ont pas poussé, et les arbres protégés par gaines qui ont poussé à ceux qui n'ont pas poussé.

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
SER-TemP	0.741	12.137	0.061	0.4766
TU-MaiP	16.350	10.311	1.586	0.0601
TuF-TuV	-19.952	11.183	-1.784	0.0623
TemP-TemR	45.193	15.816	2.857	0.0144 *
MaiP-MaiR	42.728	21.219	2.014	0.0252 *

**Tableau 4 - Croissance mat. sèche totale [g]: Contrastes sélectionnés.**



#### 4.6. CROISSANCE EN MATIERE SECHE RACINAIRE

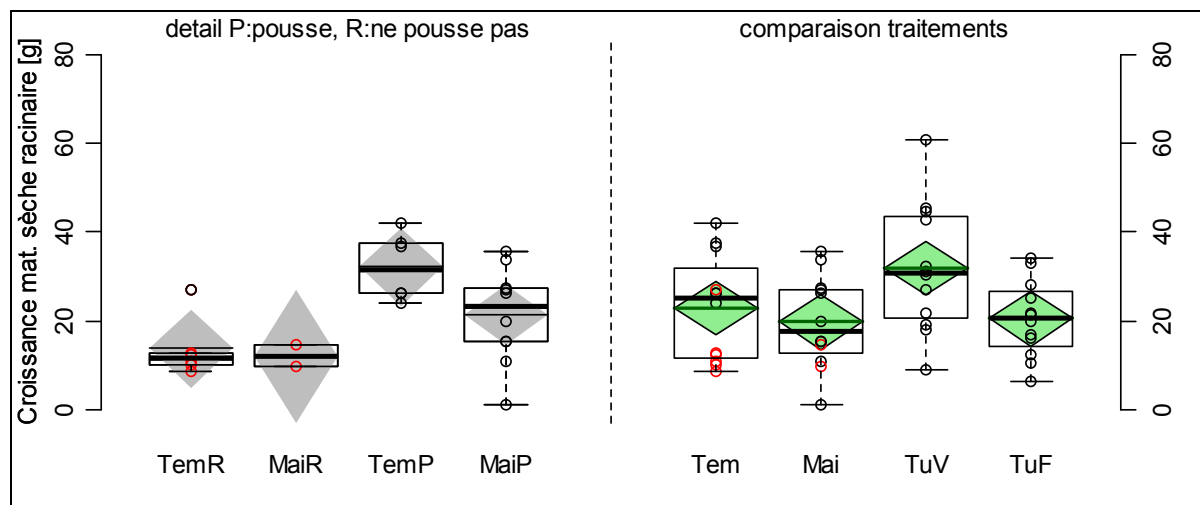


Figure 12 - Croissance mat. sèche racinaire [g] entre mars et septembre 2011

```
lm(formula = yy ~ MOD + BLOC, data = data)
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
MOD      5   2281    456.2   3.832 0.00809 **
BLOC     11    998     90.8   0.762 0.67288
Residuals 31   3690    119.0
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

L'influence du facteur BLOC est clairement non significative. L'analyse des modalités sera alors faite sans ce facteur.

La table suivante montre la signification d'une sélection de contrastes. Le premier contraste SER-TemP concerne la différence entre les arbres témoin qui ont poussé et les autres arbres qui ont poussés.

Le second contraste compare les arbres protégés par tubes aux arbres protégés par gaines (qui ont poussé).

Puis suivent trois comparaisons de paires de modalités qui comparent les deux types de tubes, les témoins qui ont poussé à ceux qui n'ont pas poussé, et les arbres protégés par gaines qui ont poussé à ceux qui n'ont pas poussé.

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
SER-TemP	-7.575	4.681	-1.618	0.0784
TU-MaiP	4.977	3.977	1.251	0.1089
TuF-TuV	-11.395	4.314	-2.642	0.0192 *
TemP-TemR	18.394	6.100	3.015	0.0118 *
MaiP-MaiR	9.105	8.184	1.112	0.1361

Tableau 5 - Croissance mat. sèche racinaire [g]: Contrastes sélectionnés.

#### 4.7. CROISSANCE EN MATIERE SECHE AERIENNE

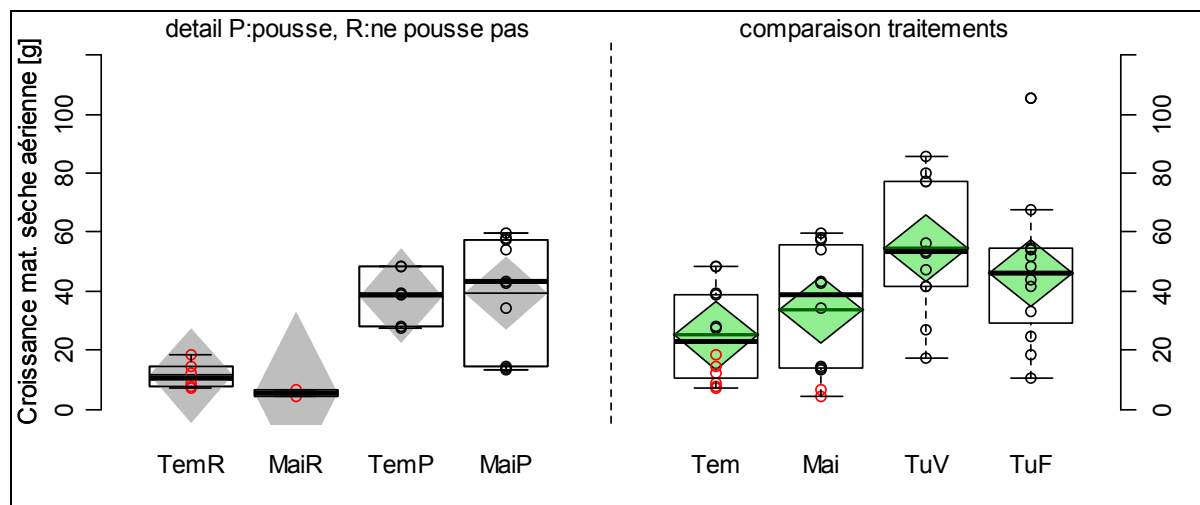


Figure 13 - Croissance mat. sèche aérienne [g] entre mars et septembre 2011

```
lm(formula = yy ~ MOD + BLOC, data = data)
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
MOD      5  10329   2065.9    5.388 0.00112 **
BLOC     11   3876    352.3    0.919 0.53489
Residuals 31  11886    383.4
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

L'influence du facteur BLOC est clairement non significative. L'analyse des modalités sera alors faite sans ce facteur.

La table suivante (Tableau 6) montre la signification d'une sélection de contrastes. Le premier contraste SER-TemP concerne la différence entre les arbres témoin qui ont poussé et les autres arbres qui ont poussés.

Le second contraste compare les arbres protégés par tubes aux arbres protégés par gaines (qui ont poussé).

Puis suivent trois comparaisons de paires de modalités qui comparent les deux types de tubes, les témoins qui ont poussé à ceux qui n'ont pas poussé, et les arbres protégés par gaines qui ont poussé à ceux qui n'ont pas poussé.

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
SER-TemP	8.316	8.583	0.969	0.1850
TU-MaiP	11.374	7.291	1.560	0.0631
TuF-TuV	-8.557	7.909	-1.082	0.1604
TemP-TemR	26.799	11.184	2.396	0.0268 *
MaiP-MaiR	33.623	15.006	2.241	0.0152 *

Tableau 6 - Croissance mat. sèche aérienne [g]: Contrastes sélectionnés.

#### 4.8. RAPPORT MASSE SECHE EN SEPTEMBRE 2011: RACINAIRE/TOTALE.

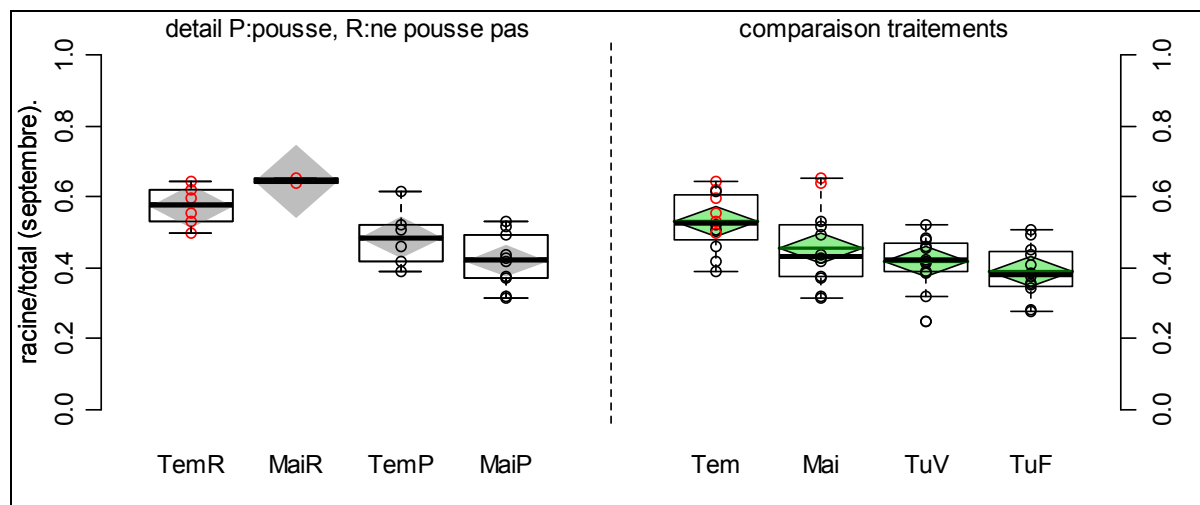


Figure 14 - Racine/total (septembre).

```
lm(formula = yy ~ MOD + BLOC, data = data)
      Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
MOD      5  0.24188  0.04838    9.343 1.66e-05 ***
BLOC     11  0.06088  0.00553    1.069   0.416
Residuals 31  0.16050  0.00518
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

L'influence du facteur BLOC est clairement non significative. L'analyse des modalités sera alors faite sans ce facteur.

La table suivante (Tableau 7) montre la signification d'une sélection de contrastes. Le premier contraste SER-TemP concerne la différence entre les arbres témoin qui ont poussé et les autres arbres qui ont poussés.

Le second contraste compare les arbres protégés par tubes aux arbres protégés par gaines (qui ont poussé).

Puis suivent trois comparaisons de paires de modalités qui comparent les deux types de tubes, les témoins qui ont poussé à ceux qui n'ont pas poussé, et les arbres protégés par gaines qui ont poussé à ceux qui n'ont pas poussé.

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )	
SER-TemP	-0.077	0.032	-2.402	0.026568	*
TU-MaiP	-0.018	0.027	-0.644	0.261401	
TuF-TuV	-0.027	0.030	-0.909	0.199249	
TemP-TemR	-0.087	0.042	-2.083	0.041187	*
MaiP-MaiR	-0.225	0.056	-4.005	0.000124	***

Tableau 7 - Racine/total (septembre) : Contrastes sélectionnés.

#### 4.9. RAPPORT MASSE SECHE EN SEPTEMBRE 2011: RACINAIRE/AERIENNE

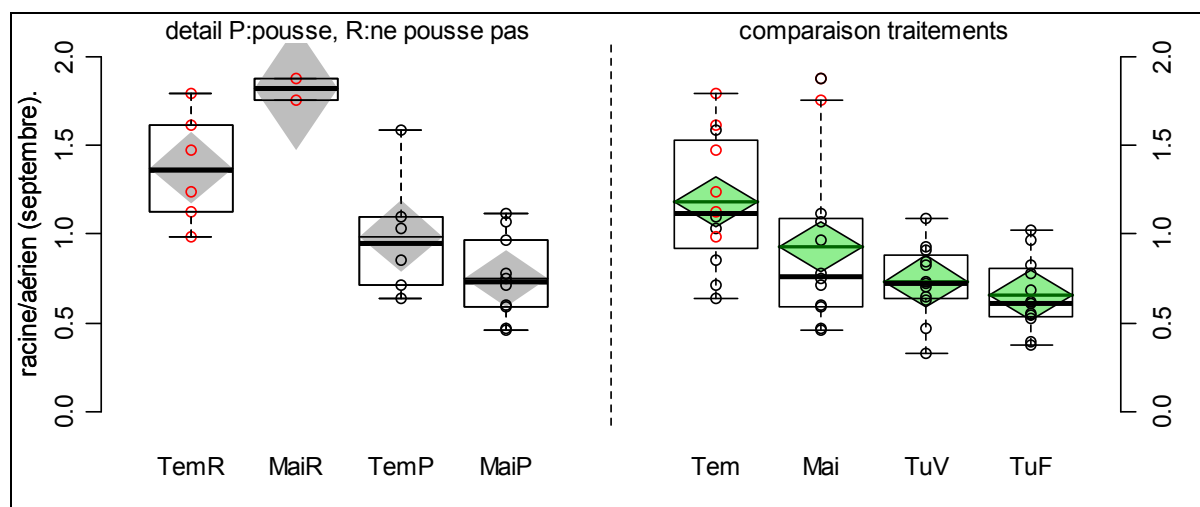


Figure 15 - Racine/aérien (septembre)

```
lm(formula = yy ~ MOD + BLOC, data = data)
      Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
MOD      5  4.300  0.8600  14.776 1.98e-07 ***
BLOC     11  0.694  0.0631   1.084  0.405
Residuals 31  1.804  0.0582
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

L'influence du facteur BLOC est clairement non significative. L'analyse des modalités sera alors faite sans ce facteur.

La table suivante (Tableau 8) montre la signification d'une sélection de contrastes. Le premier contraste SER-TemP concerne la différence entre les arbres témoin qui ont poussé et les autres arbres qui ont poussés.

Le second contraste compare les arbres protégés par tubes aux arbres protégés par gaines (qui ont poussé).

Puis suivent trois comparaisons de paires de modalités qui comparent les deux types de tubes, les témoins qui ont poussé à ceux qui n'ont pas poussé, et les arbres protégés par gaines qui ont poussé à ceux qui n'ont pas poussé.

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )	
SER-TemP	-0.273	0.108	-2.528	0.0224	*
TU-MaiP	-0.054	0.092	-0.589	0.2794	
TuF-TuV	-0.077	0.100	-0.774	0.2342	
TemP-TemR	-0.385	0.141	-2.736	0.0170	*
MaiP-MaiR	-1.068	0.189	-5.654	6.24e-07	***

Tableau 9 - Racine/aérien (septembre) : Contrastes sélectionnés.

## 5. BRÈVES CONCLUSIONS

---

Les résultats principaux de cette analyse sont :

- Comme souhaité (procédure de stratification), aucune hétérogénéité des mesures en hauteur, diamètre et masse fraîche au moment de la plantation a pu être détectée entre les ensembles d'arbres alloués aux quatre traitements.
- Les arbres non protégés qui n'ont pas montré de retard de croissance ont atteint un élancement (hauteur/diamètre) inférieur et un pourcentage de biomasse racinaire supérieur aux arbres protégés.
- Parmi les arbres protégés, ceux sous tubes non ventilés ont atteint les élancements les plus élevés dus à une croissance en diamètre moins forte que chez les autres arbres.
- Les tubes à effet de serre accélèrent la croissance en hauteur au prix d'une configuration plus fragile comparée aux arbres non protégés. La protection par gaine en mailles obtient des résultats entre ceux des arbres non protégés et ceux protégés par tubes.
- La ventilation des tubes pourrait encourager la croissance en diamètre.

## 6. BIBLIOGRAPHIE

---

**BERGEZ JE, DUPRAZ C.** 2000. Effect of ventilation on growth of *Prunus avium* seedlings grown in treeshelters. *Agricultural and Forest Meteorology* **104** : 199-214.

**COUTAND C, DUPRAZ C, JAOUEN G, PLOQUIN S, ADAM B.** 2008. Mechanical stimuli regulate the allocation of biomass in trees : demonstration with young *Prunus avium* trees. *Annals of Botany* **101**: 1421-1432.

**DUPRAZ C.** 1997. Les protections de plants à effet de serre : ce qu'en pensent les arbres. *Revue Forestière Française* **49** : 417-432.

**DUPRAZ C, GUITTON JL, BERGEZ JE, DE MONTARD FX.** 1993. Broadleaved tree plantation on pastures : the treeshelter issue. In : *Proceedings of the 4th International Symposium, Windbreaks and Agroforestry*. Viborg, Denmark : Hedeselskabet, 106-111.

**JACOBS MR.** 1954. The effect of wind sway on the form and development of *Pinus radiata* D. Don. *Australian Journal of Botany* **2** : 35-51.

**JAFFE M.** 1973. Thigmomorphogenesis : the response of growth and development to mechanical stimulation with special reference to *Bryonia dioica*. *Planta* **114** : 143-157.

**LE BOULENGE E.** 2013. Prédiction de calibration de biomasses non mesurables, UCL, 31 p.

**MÄKELÄ A, SIEVANEN R.** 1992. Height growth strategies in open-grown trees. *Journal of Theoretical Biology* **159** : 443-467.

**SVIHRA P, BURGER D, HARRIS R.** 1996. Treeshelter effect on root development of redwood trees. *Journal of Arboriculture* **22** : 174-179.

## 7. HISTOIRE PHOTOGRAPHIQUE



**Photo 9** : 32 arbres sont prélevés au hasard dans chaque botte de plants



**Photo 10** : Les plants sont triés et divisés en 4 classes de hauteur



**Photo 11** : Pour chaque traitement, on prépare 4 bottes de 12 arbres en jauge



**Photo 12** : A la plantation, la hauteur totale du plant est mesurée à la règle



**Photo 13** : La mesure du diamètre du plant est effectuée au pied à coulisse numérique à 15 cm au dessus du collet



**Photo 14** : Avant plantation, un trait de peinture est positionné à 15 cm de hauteur au-dessus du collet



**Photo 15** : Pesage des plants avant plantation dans les conteneurs



**Photo 16** : La limite du collet se situe au niveau de la zone de changement de coloration de la tige



**Photo 17** : La hauteur totale du plant doit être mesurée à partir du collet jusqu'à la base du bourgeon terminal de la tige





**Photo 18** : Notre dispositif en fin de 1<sup>ère</sup> année de croissance



**Photo 19** : Extraction soignée des conteneurs



**Photo 20** : Nettoyage du racinaire



**Photo 21** : Pesage des racines, tiges, feuilles et branches fraîches avant séchage



**Photo 22** : Séchage au four durant 3 jours à 103°C



## 8. PARTENAIRES

---

Projet de R&D  
conduit avec le  
soutien financier  
de :



En partenariat  
avec :



Avec l'appui  
technique de :

