



Thomas, F. Ripisylve de la Réserve Naturelle de Saint-Mesmin (Mai 2015)

Etude de la croissance de semis de Peuplier noir (*Populus nigra*) et de Saule blanc (*Salix alba*) de Loire soumis aux principaux stress environnementaux

Félix THOMAS

2015

Maître de stage : **Marc VILLAR**, INRA Val de Loire, site d'Orléans (45) – UR AGPF.

Licence professionnelle « Gestion, forêt, préservation de la ressource en eau », Université François Rabelais, Tours



Remerciements

Dans un premier temps, je tiens à remercier M. **Gilles PILATE**, Directeur de l'unité Amélioration Génétique et Physiologie Forestières, de m'avoir permis de réaliser ce stage à l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA) d'Orléans.

Je voudrais remercier tout particulièrement mon maître de stage M. **Marc VILLAR**, Chargé de Recherche, de m'avoir accueilli au sein de ses travaux sur le Peuplier noir où j'ai pu découvrir le monde de la recherche. Je lui suis reconnaissant de m'avoir soutenu et conseillé sur les démarches à mettre en place pour cette étude.

Un grand merci à M. **Anthony DUBOIS**, Agent ONF, pour ses explications sur le castor d'Europe, au niveau de la Réserve Naturelle Nationale de Saint-Mesmin au sein du programme BioMareau, pour son accompagnement tout au long de mes recherches, ainsi que ses nombreux conseils pratiques sur les statistiques. Merci aussi à M. **Yves ROUSSELLE**, Agent ONF, et à Mme **Marie PEGARD**, Doctorante, pour leurs explications sur les corrélations entre variables, les écarts types et la réalisation d'ANOVA.

Je remercie toute l'équipe de l'INRA d'Orléans, Mme **Patricia MONTES**, Technicienne de la Recherche, pour le côté administratif ; M. **Jonathan Riant** et M. **Jacky DESPRAS**, Agents Techniques, pour leur aide à la fabrication de plaques d'ensemencements, à l'automatisation de l'arrosage et la conception d'un rizothron. Je remercie M. **Patrick POURSAT**, Assistant Ingénieur, pour sa surveillance à l'égard des semis et son soutien. Je remercie M. **Christian BRETON**, Chargé de Recherche, pour ses explications sur le scan racinaire et concernant le logiciel WinRHIZO. Je remercie M. **Franck ROGEON**, Documentaliste, pour tous les ouvrages et thèses qu'il a mis à ma disposition et pour ses conseils bibliographiques. Merci beaucoup à Mme **Sibylle GREMAUD**, Stagiaire, d'avoir participé à la rédaction de ce rapport.

Je tiens également à remercier M. **Vincent LEJEUNE**, M. **Mathieu BLIARD** et M. **Thomas SERVOUSE**, Techniciens, pour le fastidieux travail de remplissage des caisses de sable et leurs transports dans les différentes serres. Je remercie aussi chaleureusement M. **Benjamin DIMOURO** et M. **Christophe BOREL**, Techniciens, pour leurs informations concernant les banques de graines et de pollens pour leur conservation et pour la surveillance des semis le week-end. Merci à Mme **Gladys PEAUGER**, Technicienne, pour son aide au « décotonnage » qui fut long et fastidieux.

Je voudrais adresser mes remerciements à M. **Michel CHANTEREAU**, Gestionnaire de la Réserve Naturelle Nationale de Saint-Mesmin, pour son accompagnement et ses explications sur la faune et la flore ligériennes.

Je n'oublie pas de remercier M. **Olivier FORESTIER**, Pépiniériste Guémené penfao, et M. **Franck BRIGNOLAS**, Ecophysiologiste, pour leur regard sur mon expérience et leur mise en garde sur la « fonte des semis » dans les premiers stades de germination

Table des matières

Abréviations	2
Résumé	3
Abstract	3
1. Introduction	4
1.1. Le bassin versant de la Loire	4
1.2. La ripisylve ligérienne, fonctions et menaces	5
1.3. Deux essences pionnières : le Peuplier noir et le Saule blanc	5
1.4. Les différences entre ces deux espèces patrimoniales	6
1.5. Problématiques de stage	7
2. Matériels et méthodes	7
2.1. Expérience <i>ex situ</i>	7
2.1.1. Récolte des graines	7
2.1.2. Test de viabilité des graines	7
2.1.3. Suivi photo	7
2.1.4. Conditions de développement	8
2.2. Expérience <i>in situ</i>	8
2.3. Méthodologie	8
2.3.1. Serre de germination	8
2.3.2. Dispositifs extérieurs	8
2.4. Les mesures	9
2.4.1. Partie aérienne	9
2.4.2. Partie racinaire	10
2.5. Analyse des ratios	10
2.6. Analyse des données	10
3. Résultats	11
3.1. Masse de 1000 graines	11
3.2. Viabilité des graines	11
3.3. Suivi caméra du développement des premiers jours de germination	11
3.4. Pourcentage de survie	11
3.5. Evolution de la partie aérienne	11
3.5.1. Variable de la hauteur de tige	12
3.5.2. Variable de la biomasse aérienne	13
3.6. Evolution de la partie racinaire	14
3.6.1. Variable de la longueur de la racine principale	15

3.6.2.	Variable du système racinaire cumulé.....	16
3.6.3.	Variable de la biomasse racinaire.....	17
3.7.	Les ratios	19
3.8.	Les corrélations entre les variables en condition témoin, en condition de stress inondation et <i>in situ</i>	21
3.8.1.	Corrélation entre biomasse aérienne et biomasse racinaire	21
3.8.2.	Corrélation entre la hauteur de la tige et le système racinaire cumulé	22
3.8.3.	Corrélation entre la hauteur de la tige et la longueur de la racine principale	23
3.9.	Variable intraspécifique.....	24
3.10.	Les limites de l'expérience	25
4.	Discussion générale et perspectives	25
5.	Liste des figures et tableaux	29
6.	Références bibliographiques	30

Liste des annexes :

- Annexe 1 : Bassin versant de la Loire
- Annexe 2 : Les menaces sur la ripisylve ligérienne
- Annexe 3 : Photographies des inflorescences de Peuplier noir et de Saule blanc
- Annexe 4 : Cartographie des prélèvements dans la RNN de Saint-Mesmin
- Annexe 5 : Schéma d'ensemencement sur caisse
- Annexe 6 : Schéma de l'expérience
- Annexe 7 : Protocole expérimental simplifié
- Annexe 8 : Protocole expérimental détaillé
- Annexe 9 : Tableau des effectifs mesurés au cours de l'expérience
- Annexe 10 : Scan racinaire
- Annexe 11 : Photographie de l'expérience complémentaire de suivi de la germination de graine de Saule blanc et de Peuplier noir sur boîte de pétri
- Annexe 12 : Tableau des ratios au cours de l'expérience

Abréviations

- B a : Biomasse de la partie aérienne
- B r : Biomasse de la partie racinaire
- H tige : Hauteur de la tige
- L rp : Longueur de la racine principale
- L src : Longueur du système racinaire cumulé
- PN : Peuplier noir, *Populus nigra L.*
- P value : Probabilité d'obtenir cette valeur du test ANOVA si l'hypothèse nulle était vraie
- SA : Saule blanc, *Salix alba L.*
- SH : Stress hydrique
- SI : Stress inondation
- Sig : Significatif
- ST : Stress thermique
- T : Témoin

Résumé

Ce stage s'inscrit dans l'unité de recherche AGPF qui se trouve à l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA) d'Orléans. Mon maître de stage est M. Marc VILLAR, Chargé de Recherche sur la conservation des ressources génétique du Peuplier noir au niveau national et local.

L'objectif de ce stage de 4 mois est centré sur la biologie de deux espèces forestières de la forêt alluviale de Loire : le Peuplier noir (*Populus nigra*) et le Saule blanc (*Salix alba*). Plus précisément, ce stage vise à étudier les premières semaines de croissance de ces deux espèces pionnières soumises à trois stress environnementaux (le stress hydrique, le stress thermique et le stress inondation).

Le Peuplier noir et le Saule blanc sont deux espèces emblématiques, très représentatives des paysages ligériens. Ils se retrouvent en formation saulaie - peupleraie arborescente principalement le long des cours d'eau et ils constituent un corridor écologique appelé la **ripisylve** de bois tendre.

Lors de ce stage, une expérience *ex situ* a été réalisée, où des graines récoltées, dans la Réserve Naturelle Nationale de Saint-Mesmin (Loiret) sur quatre individus parentaux, ont été semées. Ces graines ont été ensemencées dans des caisses de sable représentatif des bords de Loire.

Cette expérience s'est déroulée sur onze semaines et les stress ont été appliqués après six semaines de croissance. La partie aérienne a été mesurée toutes les semaines tandis que la partie racinaire toutes les trois semaines.

D'après les mesures effectuées, le Saule blanc et le Peuplier noir ont des stratégies différentes sur un substrat sableux quel que soit le stress. Cette expérience illustre la répartition non uniforme de ces deux espèces en bord de Loire.

Abstract

The work presented here is a part of a research project of the INRA Val de Loire at Orléans (National Institute of Agronomic Research) directed by Dr. Marc VILLAR and centered on the study of black poplar (*Populus nigra* sp.) genetic diversity and conservation in its natural environment.

Our goal was to characterize key biological factors influencing the implantation abilities of two wild pioneer species, Black Poplar and White Willow (*Salix alba*), during the very first stages of their development after germination by comparing both their root and stem growth while submitted to different environmental constraints (drought, heat and flooding stress) which could influence their natural regeneration abilities due to forthcoming climatic changes.

Both of these species are highly representative of the Loire landscape as they constitute most of the riparian forests of this river. In order to study their germination and growth abilities, mature seeds sampled from four trees (Saint-Mesmin National Nature Reserve) were germinated in plastic boxes filled with a sand/gravel substrate typical of the Loire river banks. The developing plantlets were submitted to different drought, heat and flooding stresses six weeks after germination in order to analyze the growth of their stems once a week and their roots every three weeks for a total of eleven weeks.

Based on the biomass measurements and whatever the stress considered, White Willows appear to be less competitive than Black Poplars on a sandy substrate. The differences in the growth capabilities of these species during their early stages of development could explain their irregular repartition along the river banks.

1. Introduction

Ce stage de 4 mois (du 04/05/2015 au 20/08/2015) se situe à l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA) Val de Loire à Orléans, dans l'unité de recherche « Amélioration, Génétique et Physiologie Forestières » (AGPF), dirigé par M. Gilles PILATE. Ce stage est réalisé dans le cadre de la licence professionnelle « Gestion, forêt et préservation de la ressource en eau » de l'Université François Rabelais de Tours et l'Arboretum des Barres.

Ce travail a pour objectif de comprendre les bases biologiques de deux espèces pionnières de la ripisylve ligérienne, le Peuplier noir et le Saule blanc, grâce à une expérience *ex situ* simulant les bords de Loire. Il fait suite au constat d'une répartition inégale de ces deux espèces en Loire Moyenne. Notre hypothèse de travail est que les premières semaines de vie des semis sont les étapes clés dans l'installation ou non de ces deux espèces.

Pour commencer, je vous présenterai les caractéristiques du bassin versant de la Loire et sa ripisylve associée pour comprendre le milieu naturel d'établissement de la régénération d'espèces pionnières.

1.1. Le bassin versant de la Loire

Le bassin versant de la Loire est d'une superficie de 117 356 km² et occupe 1/5 du territoire français (Annexe 1). Ce fleuve se divise en 3 parties, la Loire Amont, la Loire Moyenne et la Loire Aval. La ville d'Orléans se situe au milieu de la Loire Moyenne.

La Loire Moyenne se situe entre le Bec d'Allier et le Bec de Maine et couvre un tronçon de la Loire d'environ 500 km. Nous y trouvons majoritairement un chenal principal en anastomose du fait de la présence de nombreuses barres sédimentaires qui ont été végétalisées par des espèces pionnières de la forêt alluviale de bois tendre. Le débit moyen de ce fleuve au niveau d'Orléans est de 356 m³/s (Ministère de l'écologie, Vigicrue, 2015), pouvant varier fortement de 50 m³/s en période d'étiage à plus de 4000 m³/s lors des crues centennales (ex : Q crue = 4800 m³/s en octobre 1907). La Loire possède un régime hydrologique dit pluvio-nival (alimenté par la fonte des neiges du Massif central et les précipitations sur son bassin versant). Le battement de la nappe alluviale associée y est important entre les crues exceptionnelles et l'étiage, et peut atteindre 4 m (Chamaillard, 2011).

Au niveau d'Orléans, la Loire a un lit majeur endigué de 300 m de large en moyenne, pour un lit mineur variant de 200 à 250 m. Cela favorise la submersion des berges et d'îlots abritant la ripisylve car le fleuve n'a plus d'espace d'expansion dans son ancien lit majeur. La température moyenne annuelle est de 10,9 °C. Le climat y est océanique tempéré de type ligérien, avec des vents dominants orientés : Est / Ouest et Sud-Ouest / Nord-Est, ce qui procure un taux d'ensoleillement de plus de 1700 h/an (Météo France, 2015). Les précipitations moyennes annuelles sur Orléans sont de 640 mm/an.

Sa composition géologique se caractérise par un substrat de type alluvions de granulométrie hétérogène sur socle calcaire (2 formations de l'ère tertiaire : sables de Sologne et tables calcaires de Beauce du Miocène). Les bords de Loire au niveau d'Orléans sont constitués de plages sableuses à graveleuses de granularité variant de 0,2 à 30 mm de diamètre. Ces sédiments proviennent de l'altération du granite du Massif central et de l'érosion le long du cours d'eau. Ils arrivent majoritairement de l'Allier car ils sont bloqués par deux importants barrages sur la Loire en amont de Nevers. Au niveau de son lit majeur, nous trouvons des sols non ou peu évolués, dits fluvisols, conséquence des rajeunissements et des décapages réguliers aux cours des crues où le sol est submergé.

1.2. La ripisylve ligérienne, fonctions et menaces

La ripisylve est la forêt alluviale de bois tendre se développant au bord du cours d'eau. Le terme ripisylve vient du latin « *ripa* » : la rive et « *sylva* » : la forêt. Elle forme un écotone (une zone de transition) délimitant d'un côté le milieu aquatique et de l'autre le milieu terrestre. Ce milieu de vie offre de nombreux biotopes accueillant une faune et une flore d'une grande richesse qui forme la biodiversité locale.

La ripisylve est indispensable pour le bon **fonctionnement hydrologique** d'un bassin versant. Elle est capable d'écarter les crues et la nappe alluviale qui lui est associée permet de soutenir l'étiage pendant la saison estivale. Elle a une fonction **épuration** importante car elle capte les nitrates et les phosphates, ruisselant et s'infiltrant dans les sols issus des activités agricoles (cultures céréalières, viticoles et arboricoles) limitrophes du cours d'eau (dans son ancien lit majeur appelé aujourd'hui Val d'Orléans). Elle assure le **maintien des berges** grâce aux maillages des systèmes racinaires des arbres qui la composent sur les berges, évitant ainsi l'érosion trop importante de matière constituant les sols alluviaux. Elle accueille une faune et une flore d'une grande richesse, lui procurant ainsi de nombreux **biotopes naturels**. Nous constatons, au niveau de la Réserve Nationale Naturelle (RNN) de Saint-Mesmin, des habitats d'espèces nicheuses et d'espèces migratrices comme le chevalier guignette, la sterne pierregarin et naine, les grand et petit gravelots ainsi que le bécasseau maubèche. Nous y trouvons également le castor d'Europe (*Castor fiber*) qui s'est installé sur un îlot des îles de Mareau-aux-Prés, depuis sa réintroduction dans les années 80 d'après Villar (2012). Elle est incontournable pour les paysages ligériens et accueille tous les ans de nombreux touristes venus s'y promener. Elle est considérée comme un **patrimoine paysager** des bords de Loire à préserver.

Cette ripisylve est en constante évolution. Elle varie au gré des perturbations liées à la dynamique fluviale, elle-même liée aux conditions climatiques survenues sur le bassin versant d'après Piégay *et al.* (2003).

Le Peuplier noir et le Saule blanc sont emblématiques des cours d'eau français. En 1990, le Peuplier noir est devenu l'espèce prioritaire d'un programme de conservation génétique suite à la conférence ministérielle sur la protection des forêts en Europe. La Réserve Nationale Naturelle de Saint-Mesmin accueille ce programme de conservation génétique du Peuplier noir depuis 1991, assuré par M. Marc Villar.

Dans de la RNN de Saint-Mesmin, on trouve des îles végétalisées à cause des digues qui n'empêchent plus le débordement de la Loire de son ancien lit majeur naturel (Val de Loire aujourd'hui cultivé) ; ainsi qu'à l'extraction de granulats dans le lit mineur du cours d'eau entre 1950 et 1995 ; ce qui a provoqué son rétrécissement et son enfoncement. Ces îles sont des barres sédimentaires (ici barres forcées dues au socle calcaire affleurant le fond du lit dans un méandre) où est apparue une végétation ligneuse, pionnière et autochtone, constituée principalement de Saule blanc et de Peuplier noir (on y trouve également l'Erable negundo et le Saule pourpre).

La Loire est le dernier fleuve de France dit « sauvage », mais elle reste néanmoins touchée par plusieurs activités anthropiques (Annexe 2).

1.3. Deux essences pionnières : le Peuplier noir et le Saule blanc

Cette ripisylve est constituée principalement par la famille des Salicacées pour la strate arbustive et arborée qui se divise en deux genres : le genre *Salix* et le genre *Populus*.

Au niveau d'Orléans (ici sur la RNN Saint-Mesmin), nous nous sommes intéressés à deux espèces : le Saule blanc (*Salix alba*) et le Peuplier noir (*Populus nigra*). Dans la suite de ce rapport, je citerai le Peuplier noir PN et le Saule blanc SA. Ces deux espèces sont dioïques c'est-à-dire qu'un individu est soit mâle soit femelle (Annexe 3).

Ce sont toutes les deux des espèces pionnières c'est à dire qu'elles colonisent en premier, naturellement, un milieu nu (dépourvu de végétation) d'après Augier (2005). Ici le substrat est graveleux à sableux, composé essentiellement de sédiments de granulométrie hétérogène. Ces deux espèces sont naturellement en compétition, car elles ont besoin d'être en pleine lumière pour que leur développement soit optimum. Ce sont des espèces héliophiles strictes. Leurs amplitudes trophique et hydrique sont, pour le Peuplier noir méso hygrophile et neutrophile, quant au Saule blanc, large amplitude et humide à inondée d'après Rameau *et al.* (1989). Nous constatons leur présence en cohabitation ou peuplement pur sur les berges et îlots de la RNN de Saint-Mesmin.

Leur régénération peut se faire par voie végétative (bonne capacité de rejet) ou sexuée (ici nous nous intéresserons à la régénération naturelle sexuée) et nécessite des conditions particulières nécessaires à l'établissement des semis en bord de Loire. Elles sont très précises et leur régénération naturelle en dépende. Il est donné le nom de fenêtre de recrutement (recrutement box) à la période de dispersion des graines jusqu'à leur germination d'après Guilloy – Froget (2002) :

1 - La fécondation des fleurs femelles, assurée par le pollen provenant des inflorescences mâles, donnera des graines au début du printemps. Il y a une diversité génétique au sein d'une même espèce qui implique des périodes de floraison différentes entre les individus et donc de dispersion des graines.

2 - La dispersion et la germination des graines (en 2015 la dispersion des graines dans leur coton a commencé le 11 mai) doivent se faire sur un substrat alluvionnaire, type barre sédimentaire fraîche et humide, découvert après une crue ou lors de la baisse du niveau piézométrique de la nappe associée.

3 - La croissance du système racinaire et aérien doit se faire rapidement car la fluctuation de la nappe alluviale est importante pour la survie des plants juvéniles pendant l'été et jusqu'à hiver.

D'après Villar (2011), les années avec succès de régénération de Peuplier noir sont 2004, 2005, 2006, 2009, 2011 et 2013. Les années où le recrutement fut un échec (2007, 2008, 2010, 2012 et 2014) sont dues essentiellement à des crues estivales qui ont submergé les semis d'après les hydrogrammes provenant du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, Vigicrues, station d'Orléans.

1.4. Les différences entre ces deux espèces patrimoniales

En bord de Loire Moyenne, au niveau d'Orléans (RNN Saint-Mesmin), nous avons pu constater, en forêt alluviale, la présence majoritaire du Peuplier noir (PN) par rapport au Saule blanc (SA). Ce constat s'est confirmé par une étude de l'ISS (Intensive Study Site) portée par M. Marc Villar en 2008. Elle a montré que sur 367 écotopes de la ripisylve de 176 ha, sur 53 km de la Loire Moyenne (entre Guilly et Saint-Ay), il y a 22,8 % de SA contre 77,2 % de PN, majoritairement en formation peupleraie arborescente. Ces résultats sont confirmés par les données du projet BioMareau (2012-2015), qui a recensé les PN et SA des îles de Mareau-aux-prés avec 94,2 % de PN contre 5,8 % de SA (Villar, 2011, com. pers.).

Le Peuplier noir semblerait être plus favorisé que le Saule blanc sur la Loire Moyenne.

1.5. Problématiques de stage

Cette étude cherche à répondre aux questions suivantes :

- Quelles sont les différences biologiques après germination de graines entre le Peuplier noir et le Saule blanc lors de leurs premiers mois de développement ?
- Y a-t-il des différences entre les parties aériennes et les parties racinaires de jeunes semis de ces deux espèces pionnières ?
- Ces différences, si elles existent, sont-elles exprimées suites aux principaux stress environnementaux que l'on peut trouver en Loire : stress hydrique, stress thermique et stress inondation ?

2. Matériels et méthodes

2.1. Expérience *ex situ*

Cette expérience a été réalisée *ex situ* en conditions semi-contrôlées. Elle a permis d'étudier le comportement de semis lors des premières semaines de développement pour deux espèces : le Peuplier noir et le Saule blanc.

L'objectif est de se rapprocher des conditions naturelles de bord de Loire.

2.1.1. Récolte des graines

Pour cette expérience, des graines, sur quatre individus mères (deux de Peuplier noir et deux de Saule blanc), ont été récoltées le 13/05/2015 au niveau de la RNN de Saint-Mesmin (Annexe 4). Les graines récoltées, contenues dans le coton du chaton, sont disséquées et conservées au réfrigérateur à 4°C afin de préserver leur viabilité.



Figure 1 : Saule blanc sur la RNN de Saint-Mesmin

2.1.2. Test de viabilité des graines

Un test de viabilité des graines a été effectué en les faisant germer dans une boîte de pétri. Les graines de PN et de SA ont été disposées sur du papier absorbant humidifié puis placées en laboratoire.



Figure 2 : Test de germination sur boîte de pétri

2.1.3. Suivi photo

Un dispositif de suivi photo a été réalisé grâce à une caméra prenant une photo par heure des premiers jours de germination des graines de SA et de PN disposées en quinconce sur une boîte de pétri placée en chambre de culture (23°C, 14h lumière).

2.1.4. Conditions de développement

La germination des graines a été effectuée sous serre de germination le 26 mai 2015. L'expérience a été réalisée sur 30 caisses contenant un substrat sableux. Dans chacune d'elles, les graines ont été semées à une densité de 300 graines/m² au moyen d'une plaque d'ensemencement. Cette densité correspond à une moyenne identique à celle du milieu naturel d'après Chamaillard (2011).



Figure 3 : Dispositif caméra : suivi de la germination

Cela revient à 60 graines/caisse (Annexe 5) pour une surface de caisse de 0,2 m² (dimension : 56 cm x 36 cm x 20 cm).

1800 graines ont été semées pour cette expérience. La disposition des caisses a été randomisée sous la serre de germination.

2.2. Expérience *in situ*

Le 4 juin 2015, nous avons visité les îles de Mareau-aux-prés, zone d'étude du programme BioMareau. La régénération naturelle de Peuplier noir a été constatée sur la partie aval de l'îlot. Le 20 juillet 2015, après avoir eu l'autorisation du gestionnaire de la RNN de Saint-Mesmin, nous avons prélevé 2 x 32 semis de PN sur deux zones A et B (Annexe 4).

Nous avons estimé l'âge des semis prélevés à huit semaines plus ou moins une semaine.

2.3. Méthodologie

Le schéma global de l'expérience est présenté en annexe 6. Le protocole expérimental simplifié est en annexe 7 et le protocole expérimental détaillé est indiqué en annexe 8.

2.3.1. Serre de germination

Au début de l'expérience, les caisses contenant les graines déposées sur le sable ont été bâchées pour garder un taux d'hygrométrie suffisant (supérieur à 60 % et une température inférieure à 25°C). Pour l'arrosage, l'alimentation en eau était manuelle et non limitant.



Figure 4 : Serre de germination

2.3.2. Dispositifs extérieurs

Après 3 semaines de germination, nous avons transféré les 30 caisses sous une ombrière pour ne pas brûler les feuilles des semis lors du passage de la serre de germination à l'extérieur.

Après une semaine d'ombrière, nous avons définitivement transféré les caisses en extérieur. L'arrosage a été automatisé et la quantité d'eau apportée était calculée en fonction de l'évapotranspiration potentielle (ETP) journalière. L'humidité du sable a également été vérifiée dans les caisses. L'arrosage est donc non limitant.



Figure 5 : Ombrière

2.3.2.1. Caisses en condition témoin

Sur les 30 caisses de l'expérience, il y a 2 caisses témoins de PN et 2 caisses témoins de SA après six semaines de croissance

2.3.2.2. Stress hydrique

Le stress hydrique consiste à créer une sécheresse de 3 semaines sur des semis ayant germé depuis six semaines, et de mesurer leur réaction. Ce dispositif de stress a été réalisé sur 4 caisses (2 de PN et 2 de SA) sur lesquelles une bâche transparente a été installée pour éliminer les pluies.

2.3.2.3. Stress thermique

Le stress thermique consiste à simuler une augmentation de température. Cette expérience s'est faite durant 3 semaines sur des semis ayant germé six semaines.

Les caisses ont été installées dans une serre munie d'une bâche transparente sans régulation de température.

Les mesures, exprimées dans le graphique ci-dessous, montrent que l'écart moyen de température entre le stress thermique et le témoin est de 2,9 °C pendant la nuit (20h à 8h) et de 9,2 °C durant le jour (8h à 20h).

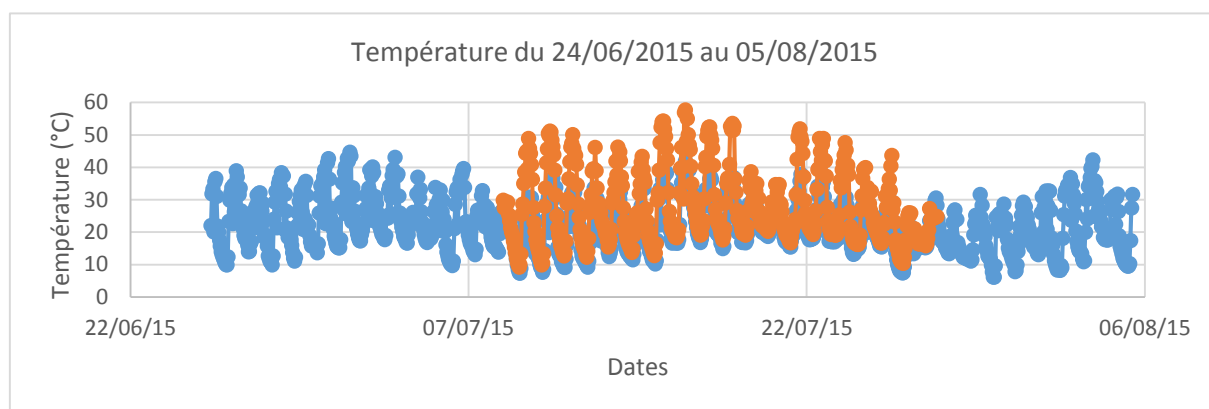


Figure 7 : Evolution de la température en °C en fonction du temps.

- Température témoin extérieure
- Température lors du stress thermique

2.3.2.4. Stress inondation

Le stress inondation consiste à créer une inondation de 3 semaines sur des semis ayant germé six semaines. Les caisses ont été immergées entièrement dans un bassin rempli d'eau (l'eau est changée toutes les semaines).

A l'issue de ces 3 semaines de ces trois stress (hydrique, thermique et inondation), les semis sont remis en conditions initiales.



Figure 8 : Dispositif du stress inondation

2.4. Les mesures

Les mesures ont été effectuées sur les 32 semis centraux pour ne pas prendre en compte l'effet du bord de la caisse. Le nombre d'individus analysés par type de modalité est indiqué en annexe 9.

2.4.1. Partie aérienne

Les hauteurs des tiges (H tige) des 32 semis sur chacune des 30 caisses ont été mesurées, grâce à un réglét, toutes les semaines à partir de la deuxième semaine après germination.

2.4.2. Partie racinaire

2.4.2.1. Architecture racinaire

Pour suivre l'évolution de la croissance racinaire, nous avons prélevé les semis toutes les 3 semaines (après 21, 39 et 63 jours de croissance). Les actions effectuées sont :

- Mesure de la longueur de la racine principale (L_{rp}) à l'aide d'un réglet,
- Réalisation de scans racinaires (Annexe 10) via un scan *EPSON PERFECTION V750PRO*. Les racines sont mises dans un bac transparent carré, de 24 cm de côté et de 1,5 cm de hauteur, rempli d'eau.
- Mesure de la longueur du système racinaire cumulé (L_{src}) qui correspond à la somme de la longueur de toutes les racines secondaires et celle de la racine principale, à l'aide du logiciel WinRHIZO.
- Mesure de la L_{src} pour les 10 premiers centimètres et pour les 10 derniers centimètres pour un cas particulier (stress hydrique).

Le logiciel WinRHIZO est un système d'analyse d'image pour la mesure racinaire. Il a permis d'étudier la morphologie de la racine chez PN et SA, après sélection de la variable L_{src} d'après Wintenberger (2015).

2.4.2.2. Biomasse sèche aérienne et racinaire

Une mesure de la biomasse sèche aérienne (B_a) et de la biomasse sèche racinaire (B_r) a été effectuée après trois heures de séchage en étuve à 70°C. Le calcul de la masse a été effectué à l'aide d'une balance de précision au centième de milligramme près (*METTLER TOLEDO XS105 DualRange*).

2.5. Analyse des ratios

Les ratios entre variables permettent d'étudier l'intensité des liaisons qui peuvent exister entre les variables de la partie aérienne et celles de la partie racinaire. Nous avons fait le choix de comparer les semis en condition témoin après 21, 39 et 63 jours de croissance pour suivre l'évolution des ratios par espèce. Le tableau des ratios est présenté en annexe 12.

Choix des ratios :

- (1) : Le rapport H_{tige} / L_{rp} permet de constater l'importance du pivot au niveau de la racine principale. Il est appelé le « shoot root ratio » et montre la relation entre la hauteur de la tige et la longueur de la racine principale.
- (2) : Le rapport B_a / B_r , permet de constater l'équilibre de la biomasse aérienne avec la biomasse racinaire.
- (3) : Le rapport H_{tige} / L_{src} permet de constater l'importance du maillage (de la ramification) du système racinaire par rapport à la hauteur de la tige.

2.6. Analyse des données

Les données brutes des variables mesurées ont été rentrées sur des tableurs Excel et Excel STAT. Des moyennes par variable et des écarts types ont été réalisés afin d'indiquer la dispersion des données des différents échantillons. Puis des analyses statistiques de type ANOVA avec l'aide de Mme Pegard, étudiante en thèse, qui permettent de vérifier statistiquement les différences significatives entre les deux espèces ont été faites. Des corrélations entre variables des parties aériennes et racinaires ont également été réalisées. Le coefficient de détermination (R^2) est exprimé sur chaque graphe, il est compris entre 0 et 1. Plus R^2 est proche de zéro plus les variables sont indépendantes et le seuil de corrélation est fixé arbitrairement à 0,5. De plus des histogrammes des longueurs des racines principales des deux espèces ont été réalisés afin de distinguer la variabilité des individus au sein d'une population.

3. Résultats

3.1. Masse de 1000 graines

Suite à un tri et une pesée des graines des deux espèces, la masse de 1000 graines de Saule blanc est de 160,3 mg et celle de 1000 graines de Peuplier noir est de 945,5 mg. Le rapport est de 1 à 6 en faveur du Peuplier noir.



Figure 9 : à gauche 1000 graines de PN, à droite 1000 graines de SA

3.2. Viabilité des graines

La germination des graines sur boîte de pétri est de 94 % pour le Peuplier noir et de 75 % pour le Saule blanc.

3.3. Suivi caméra du développement des premiers jours de germination

Une expérience complémentaire a été faite sur boîte de pétri où le développement des graines de Saule blanc et de Peuplier noir a été suivi grâce à une caméra installée au-dessus du dispositif. Nous avons visualisé la croissance des deux espèces grâce à une prise photographique par heure. Concernant nos mesures, le développement se réalise de façon simultanée pour la racine principale et pour la tige du Peuplier noir au bout de 24h ; alors que le Saule blanc privilégie le développement de sa tige après 24h mais pas de sa racine qui commence sa croissance qu'après 150h en moyenne (soit plus de 6 jours). Deux photographies représentatives de l'expérience sont présentées en annexe 11.

3.4. Pourcentage de survie

Après la période du stress hydrique et du stress thermique, le pourcentage de survie des semis de Peuplier noir et de Saule blanc est de 100 %. Cependant, après le stress inondation, il a été constaté la perte de 21,9 % de semis de Peuplier noir et de 31,1 % de Saule blanc. Cette perte peut être due soit à un problème biologique, soit à la méthodologie. Cependant, il n'est pas possible de confirmer ces hypothèses.

3.5. Evolution de la partie aérienne

Dans la suite de cette partie, deux figures représentant l'évolution de la partie aérienne (la hauteur de la tige et la biomasse aérienne) pour le Saule blanc et le Peuplier noir au cours des onze semaines de l'expérience vous sont présentées. Ces graphiques sont accompagnés des tests statistiques de type ANOVA qui permettent de déterminer si il y a des différences significatives entre les espèces et entre les diverses modalités. Les commentaires des figures sont présentés page 14.

3.5.1. Variable de la hauteur de tige

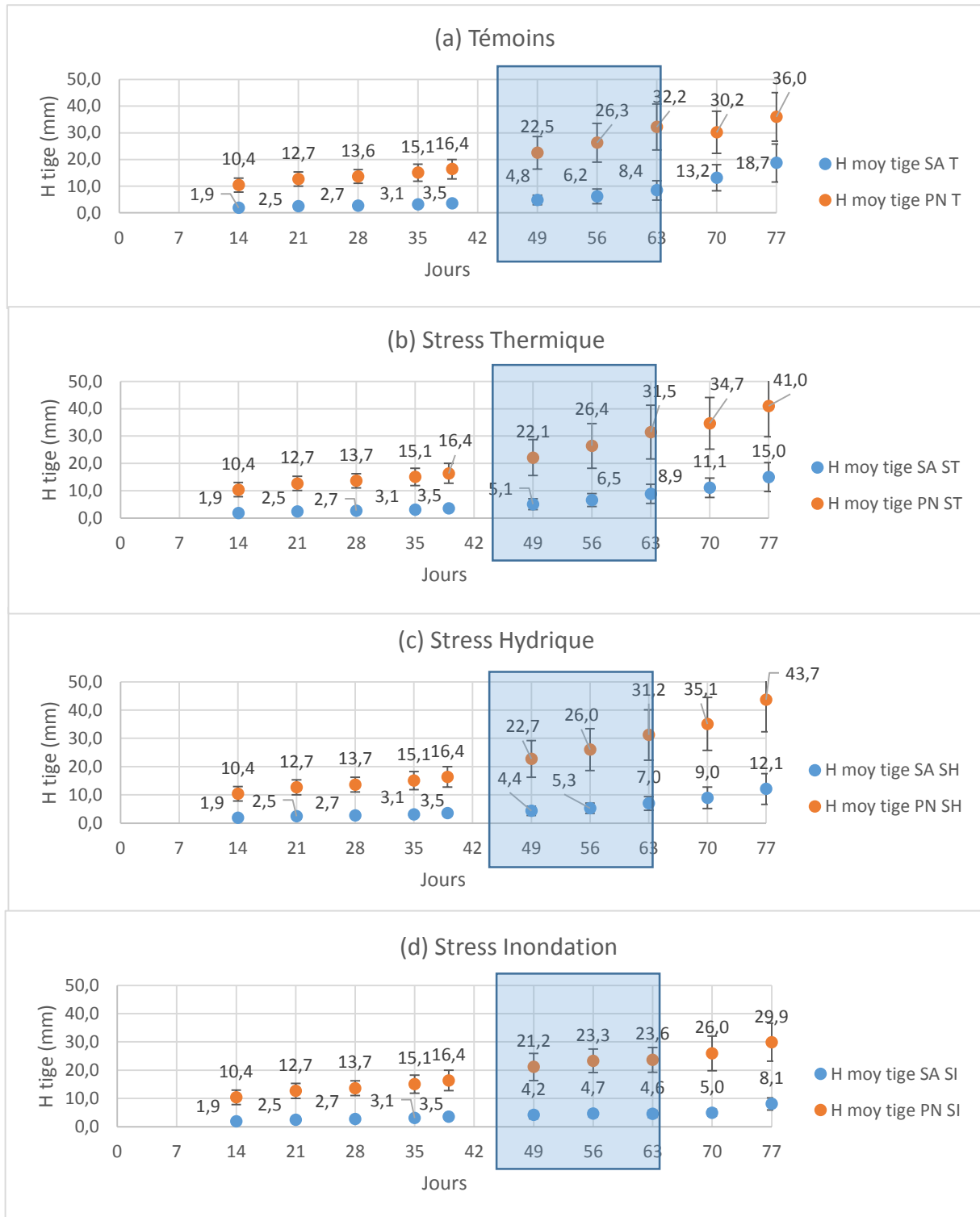


Figure 10 : Evolution des hauteurs moyennes de tiges des semis de Peuplier noir et de Saule blanc en fonction du temps, les stress ayant débuté le 44^e jour jusqu'au 63^e jour représentés par : (□). (a) représente les témoins ; (b) représente le stress thermique, (c) représente le stress hydrique et (d) représente le stress inondation. Légende : H moy tige SA signifie hauteur moyenne de la tige de Saule blanc et H moy tige PN signifie hauteur moyenne des tiges de Peuplier noir. Il est indiqué pour chaque moyenne son écart type.

3.5.2. Variable de la biomasse aérienne

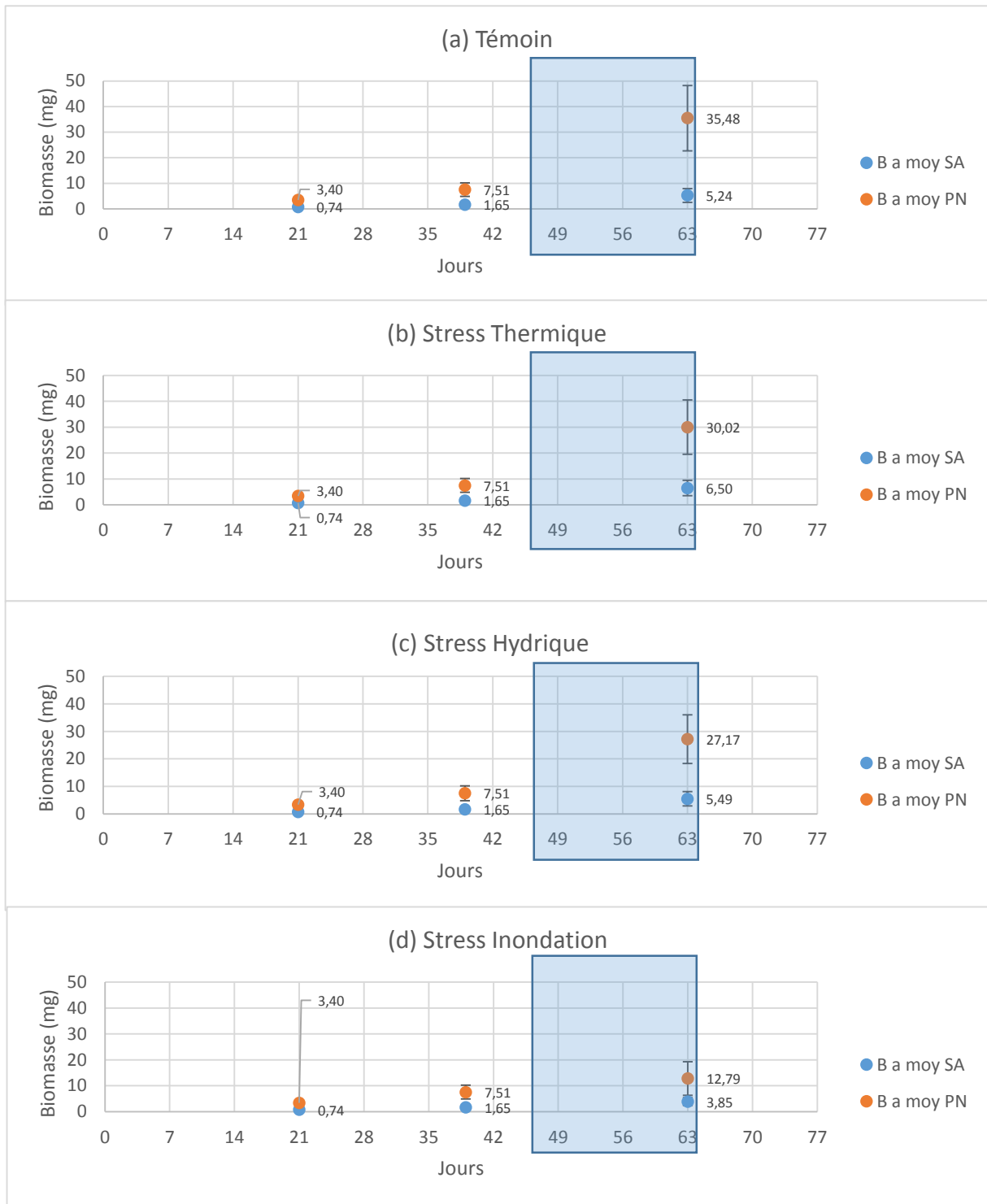


Figure 11 : Evolution des biomasses aériennes moyennes des semis de Peuplier noir et de Saule blanc en fonction du temps, les stress ayant débuté le 44^e jour jusqu'au 63^e jour représentés par : (□). (a) représente les témoins ; (b) représente le stress thermique, (c) représente le stress hydrique et (d) représente le stress inondation. Légende : B a moy SA signifie biomasse de la partie aérienne de Saule blanc et B a moy PN signifie la biomasse de la partie aérienne de Peuplier noir.

Le Peuplier noir et le Saule blanc sont significativement différents entre eux pour l'ensemble des modalités et variables de la partie aérienne d'après les résultats tests statistiques (P value < 2^{e-16}).

Concernant le **Peuplier noir**, les semis ayant subi un **stress hydrique** ont une biomasse aérienne significativement différente des semis en condition témoin (P value = 0,01). En effet leur biomasse aérienne est 1,3 fois inférieure par rapport les semis témoins. En revanche, leur hauteur de tige n'est pas significativement différente de celle des témoins (P value = 0,304). D'autre part, les semis ayant subi un **stress thermique** ont une biomasse aérienne et une hauteur de tige qui ne sont pas significativement différentes (P value = 0,16 et 0,686) des semis témoins. Enfin, les semis ayant subi un **stress inondation** ont une biomasse aérienne et une hauteur de tige significativement différentes (P value < 0,001) des semis en condition témoin. En effet, leur hauteur de tige et leur biomasse aérienne sont de 1,3 à 2,7 fois inférieure par rapport au semis témoins.

Concernant le **Saule blanc**, les semis ayant subi un **stress hydrique** ont une biomasse aérienne et une hauteur de tige qui ne sont pas significativement différentes (P value = 0,98 et 0,99) des semis témoins. D'autre part, les semis ayant subi un **stress thermique** ont une biomasse aérienne qui n'est pas significativement différente (P value = 0,207) des semis témoins. Par contre, ils ont une hauteur de tige significativement différente (P value = 0,013) de 0,9 fois supérieur par rapport au semis témoins. Enfin, les semis ayant subi un **stress inondation** ont une biomasse aérienne qui n'est pas significativement différente (P value = 0,184) des semis témoins ; alors que la hauteur de tige est significativement différente (P value = 0,036) des semis témoins. La hauteur de tige des semis en condition témoin est 1,8 fois plus importante que les semis ayant subi un stress inondation.

Tableau 1 : Test statistique de type ANOVA, analysant la variance entre les échantillons de Peuplier noir et de Saule blanc entre eux et en fonction de trois types de stress en comparaison des semis témoins. Légende : Sig = significatif ; * = significativement < 5% ; ** = significativement < 1% ; *** = significativement < 1/1000 ; NS = non significativement différent ; P value = probabilité d'obtenir cette valeur du test ANOVA si l'hypothèse nulle était vraie ; B a = biomasse aérienne et H tige = hauteur de la tige.

Après stress (63 ^e jour)		Variables			
Espèces	Modalités	B a		H tige	
		Sig	P value	Sig	P value
PN	T vs SI	***	<0.001	***	<0.001
	T vs ST	NS	0.160	NS	0.686
	T vs SH	**	0.010	NS	0.304
SA	T vs SI	NS	0.184	*	0.036
	T vs ST	NS	0.207	*	0.013
	T vs SH	NS	0.980	NS	0.990

Après stress (63 ^e jour)		Variables			
Modalités	Espèces	B a		H tige	
		Sig	P value	Sig	P value
T	SA vs PN	***	<2 ^{e-16}	***	<2 ^{e-16}
SH		***	<2 ^{e-16}	***	<2 ^{e-16}
ST		***	<2 ^{e-16}	***	<2 ^{e-16}
SI		***	1.5 ^{e-08}	***	<2 ^{e-16}

3.6. Evolution de la partie racinaire

Dans cette partie, trois figures sur l'évolution de la partie racinaire sont présentées : (i) la longueur de la racine principale, (ii) la longueur du système racinaire cumulé et (iii) la biomasse racinaire pour le PN et le SA au cours des onze semaines de l'expérience. Ces graphiques sont accompagnés des tests statistiques qui visent à montrer s'il y a des différences significatives des variables analysées entre ces espèces et entre les différentes modalités. Les commentaires des figures sont présentés page 18.

3.6.1. Variable de la longueur de la racine principale

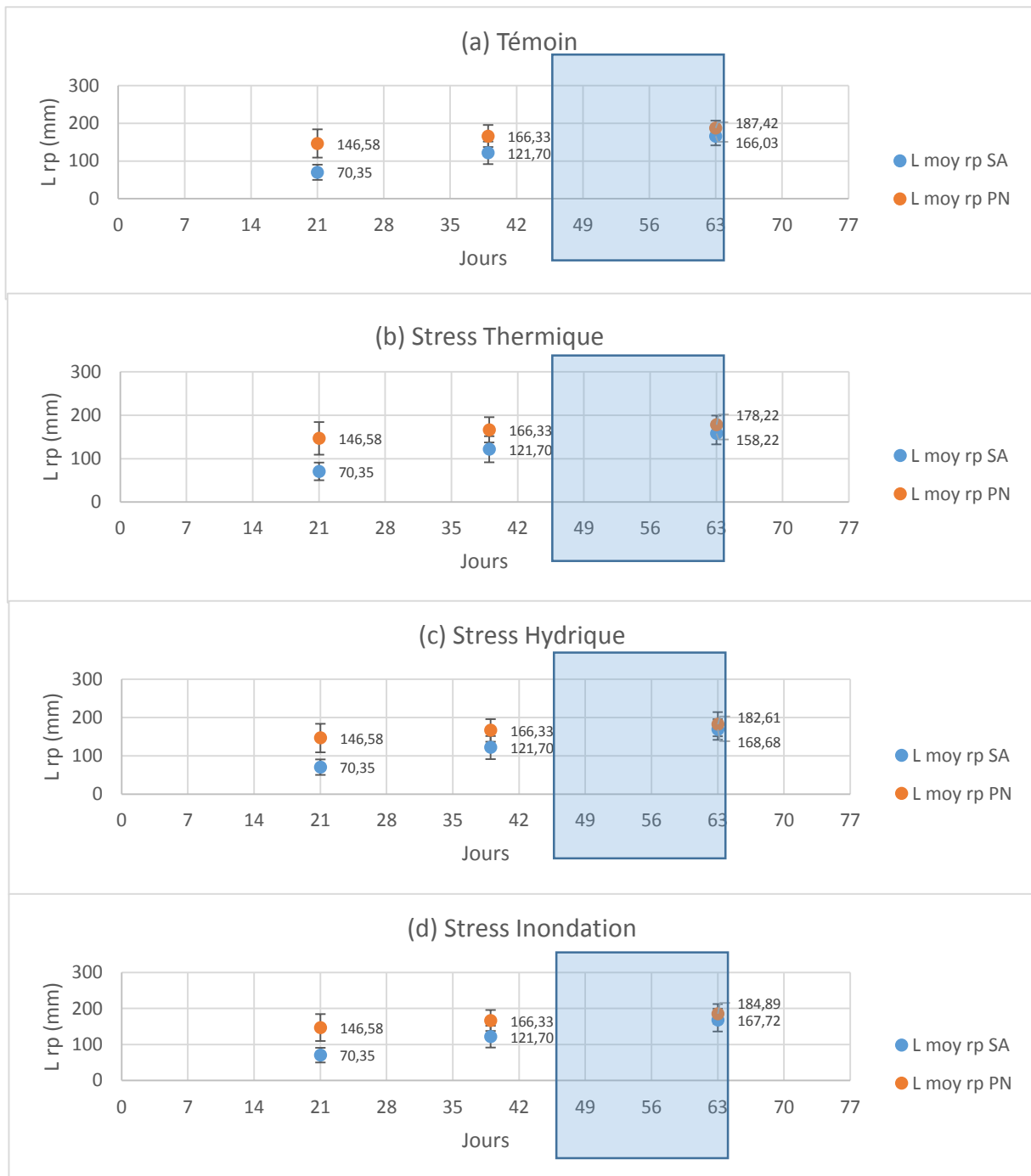


Figure 12 : Evolution des longueurs moyennes des racines principales des semis de Peuplier noir et de Saule blanc en fonction du temps, les stress ayant débuté le 44^e jour jusqu'au 63^e jour représentés par : (□). (a) représente les témoins ; (b) représente le stress thermique, (c) représente le stress hydrique et (d) représente le stress inondation. Légende : L moy rp SA signifie la longueur moyenne de la racine principale de Saule blanc et L moy rp PN signifie la longueur moyenne de la racine principale de Peuplier noir.

3.6.2. Variable du système racinaire cumulé

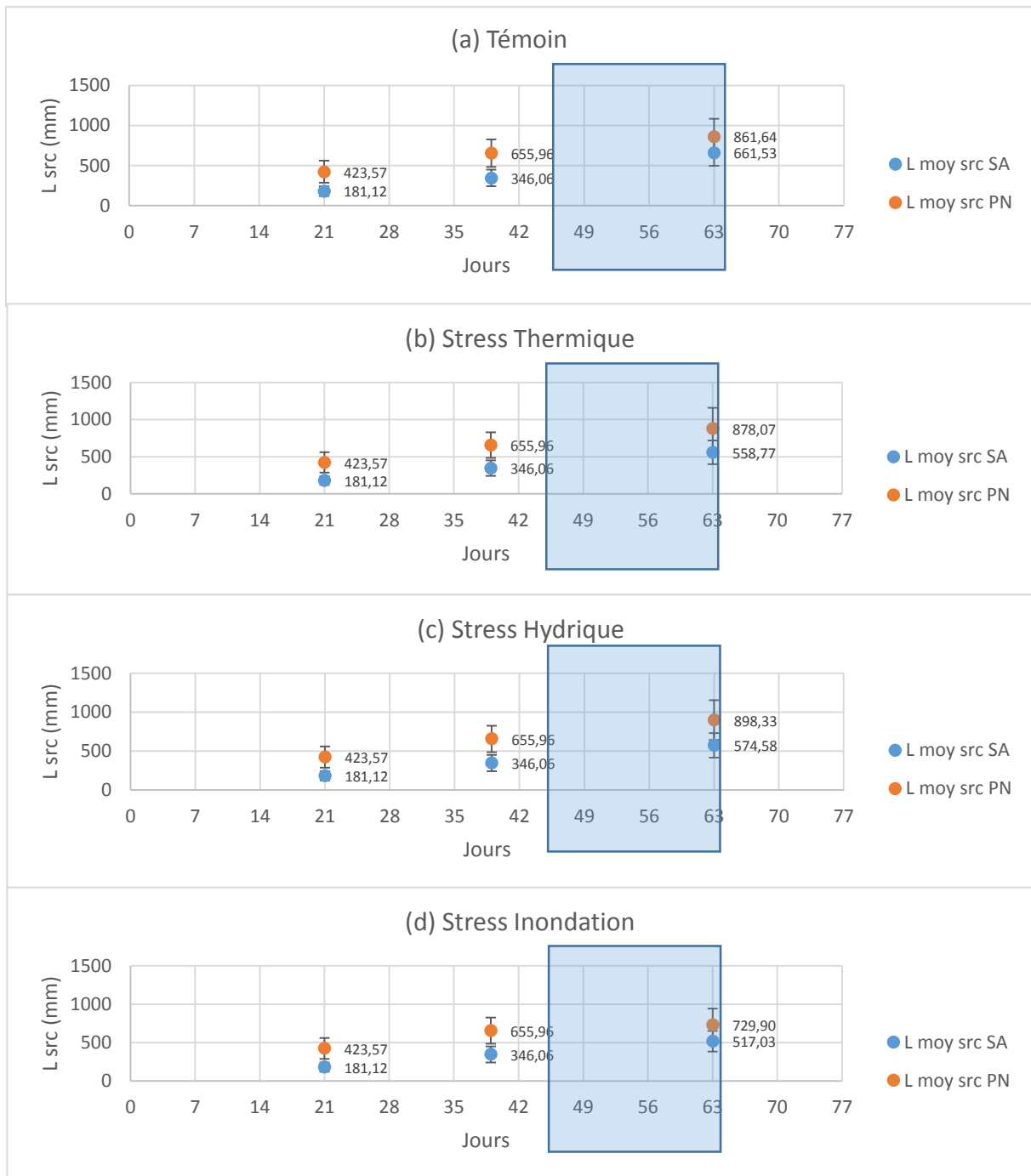


Figure 13 : Evolution des longueurs moyennes des systèmes racinaires cumulés des semis de Peuplier noir et de Saule blanc en fonction du temps, les stress ayant débuté le 44^e jour jusqu'au 63^e jour représentés par : (□). (a) représente les témoins ; (b) représente le stress thermique, (c) représente le stress hydrique et (d) représente le stress inondation. Légende : L moy src SA signifie la longueur moyenne du système racinaire cumulé de Saule blanc et L moy src PN signifie la longueur moyenne du système racinaire cumulé de Peuplier noir.

3.6.3. Variable de la biomasse racinaire

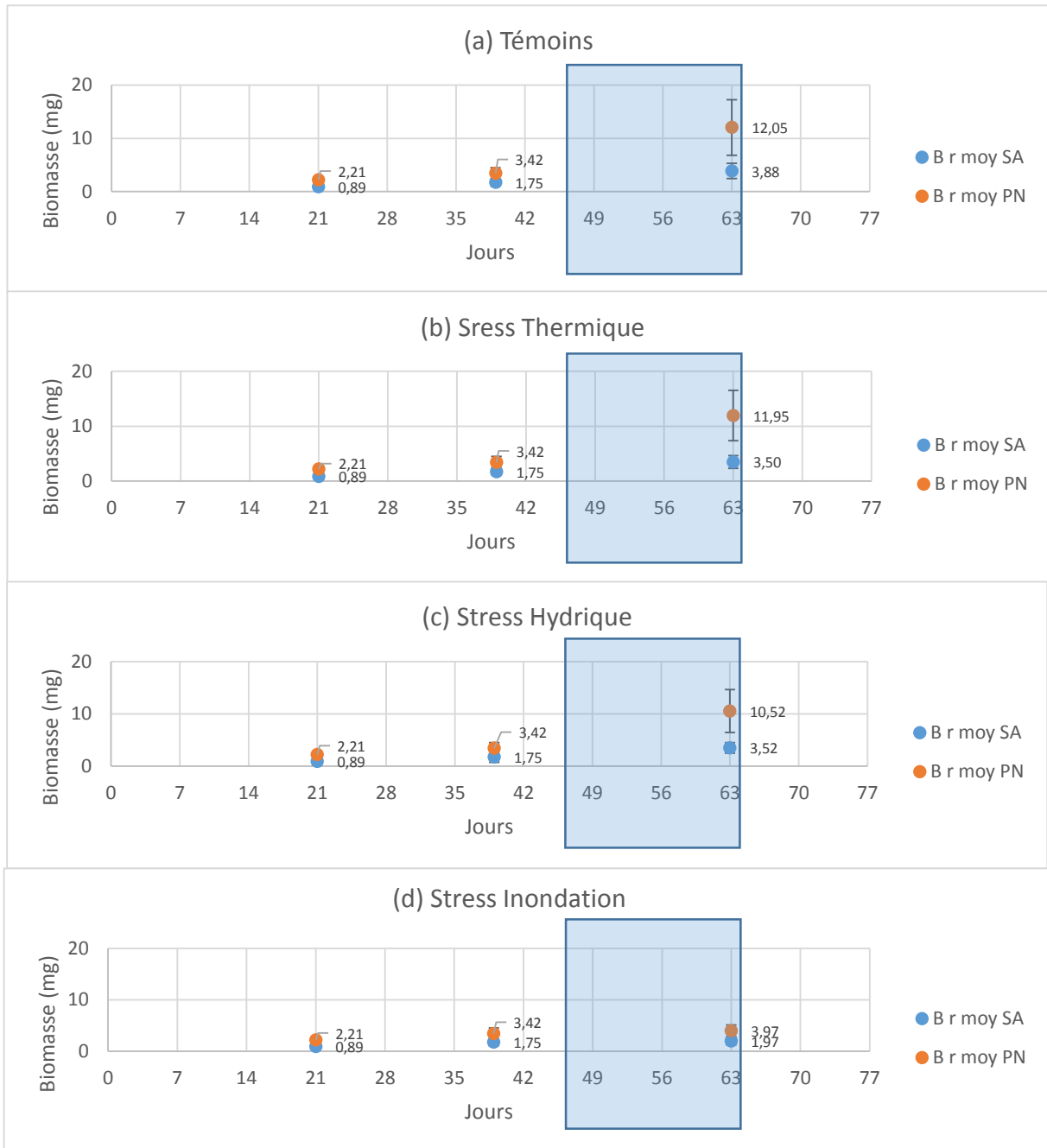


Figure 14 : Evolution des biomasses racinaires moyennes des semis de Peuplier noir et de Saule blanc en fonction du temps, les stress ayant débuté le 44^e jour jusqu'au 63^e jour représentés par : (□). (a) représente les témoins ; (b) représente le stress thermique, (c) représente le stress hydrique et (d) représente le stress inondation. Légende : B r moy SA signifie biomasse de la partie racinaire de Saule blanc et B r moy PN signifie la biomasse de la partie racinaire de Peuplier noir.

Le Peuplier noir et le Saule blanc sont significativement différents pour chaque modalité et pour les trois variables de la partie racinaire d'après les tests statistiques (P value $< 2^{e-16}$).

En **condition témoin**, l'écart entre la longueur de la racine principale se réduit au cours du temps entre les deux espèces. La racine principale du Saule blanc mesure 16,6 cm en moyenne au 63^e jour et commence à rattraper celle du Peuplier noir qui est de 18,7 cm. En revanche, l'écart entre la biomasse racinaire se creuse entre les deux espèces au cours du temps, écart de 1,7 mg au 39^e jour et écart de 8,2 mg au 63^e jour. Cependant, l'écart entre le système racinaire cumulé reste stable au cours du temps, écart au 21^e jour est de 24 cm et de 20 cm pour le 63^e jour.

Concernant le **Peuplier noir**, les semis ayant subi un **stress hydrique** ont une biomasse racinaire, une longueur de la racine principale et une longueur de leur système racinaire cumulé qui ne sont pas significativement différentes des semis témoins (P value = 0,499 ; 0,891 et 0,944). D'autre part, les semis ayant subi un **stress thermique** ont une biomasse racinaire, une longueur de la racine principale et une longueur de leur système racinaire cumulé qui ne sont pas significativement différentes des semis témoins (P value = 1 ; 0,516 et 0,994). Enfin, les semis ayant subi un **stress inondation** ont une biomasse racinaire significativement différente (P value $< 1^{e-04}$) des semis témoins. En effet, leur biomasse racinaire est 3 fois moins importante que les semis témoins. En revanche, ils ont une longueur de la racine principale et une longueur de leur système racinaire cumulé qui n'est pas significativement différentes des semis témoins (P value = 0,983 et 0,217).

Concernant le **Saule blanc**, tout d'abord, les semis ayant subi un **stress hydrique** ont une biomasse racinaire, une longueur de la racine principale et une longueur du système cumulé qui ne sont pas significativement différentes des semis témoins (P value = 0,618 ; 0,981 et 0,128). Ensuite, les semis ayant subi un **stress thermique** ont une biomasse racinaire et une longueur de la racine principale qui ne sont pas significativement différentes (P value = 0,571 et 0,663) des semis témoins. Alors que leur longueur du système racinaire cumulé est significativement différente (P value = 0.047) des semis en condition témoin. Cette longueur du système racinaire cumulé est 1,2 fois inférieure des semis témoins. Enfin, les semis ayant subi un **stress inondation** ont une biomasse racinaire et un système racinaire cumulé significativement différent des semis témoins (P value $< 1^{e-04}$ et P value = 0,004), leur système racinaire cumulé et la biomasse racinaire sont respectivement de 1,3 à 1,9 fois moins importante des semis témoins.

Tableau 2 : Test statistique de type ANOVA, analysant la variance entre les échantillons de Peuplier noir et de Saule blanc entre eux et en fonction de trois types de stress en comparaison des semis témoins. Légende : Sig = significatif ; * = significativement $< 5\%$; ** = significativement $< 1\%$; *** = significativement $< 1/1000$; NS = non significativement différent ; P value = probabilité d'obtenir cette valeur du test ANOVA si l'hypothèse nulle était vraie ; B a = biomasse aérienne et H tige = hauteur de la tige.

Après stress (63 ^e jour)		Variables					
		B r		L rp		L src	
Modalité	Espèces	Sig	P value	Sig	P value	Sig	P value
T	SA vs PN	***	2.5^{e-11}	***	0.0007	***	0.0002
SH		***	5.9^{e-13}	*	0.065	***	1.2^{e-07}
ST		***	8.7^{e-15}	***	0.001	***	5.2^{e-07}
SI		***	6.1^{e-10}	*	0.041	***	9.1^{e-05}

Après stress (63 ^e jour)		Variables					
		B r		L rp		L src	
Espèces	Modalités	Sig	P value	Sig	P value	Sig	P value
PN	T vs SI	***	<1 ^{e-04}	NS	0.983	NS	0.217
	T vs ST	NS	1.000	NS	0.516	NS	0.994
	T vs SH	NS	0.499	NS	0.891	NS	0.944
SA	T vs SI	***	<1 ^{e-04}	NS	0.996	**	0.004
	T vs ST	NS	0.571	NS	0.663	*	0.047
	T vs SH	NS	0.618	NS	0.981	NS	0.128

Les trois variables racinaires analysées pour le **stress hydrique** n'ont pas été significativement différentes pour les deux espèces par rapport aux semis témoins. Il a alors été analysé séparément la stratification des racines secondaires en surface et en profondeur. La caisse a été divisée en deux dans la profondeur en distinguant la longueur du système racinaire cumulé dans les dix premiers centimètres (L src [0 ; 10]) et dans les dix derniers centimètres (L src [10 ; 20]). Les résultats sont illustrés dans le tableau 3 ci-après.

Tableau 3 : comparaison entre les systèmes racinaires cumulés des deux espèces concernant les 10 premiers et les 10 derniers centimètres pour le stress hydrique et en condition témoin :

Espèces et stress / Mesure L src (mm)	Peuplier noir Stress hydrique	Peuplier noir témoin	Saule blanc Stress hydrique	Saule blanc témoin
L src [0 ; 10]	421,59	445,09	329,26	380,49
L src [10 ; 20]	476,73	416,55	245,32	281,04

Le développement des racines secondaires est plus important dans les 10 derniers centimètres par rapport aux 10 premiers centimètres pour le Peuplier noir ayant subi un stress hydrique, contrairement aux semis témoins. Concernant le Saule blanc, lors du stress hydrique, ses racines secondaires sont moins développées sur la totalité de la profondeur de la caisse en comparaison des semis témoins.

Le Saule blanc a une stratégie différente au niveau de ses racines secondaires par rapport au Peuplier noir pour les trois types de stress. Cela pourrait s'expliquer par l'utilisation d'un substrat plus favorable au Peuplier noir qu'au Saule blanc qui préfère les substrats plus limoneux d'après Rameau *et al.* (1989).

3.7. Les ratios

Les ratios permettent de constater les liaisons entre la partie aérienne et la partie racinaire entre les deux espèces. Les valeurs de ces ratios permettent de connaître la partie favorisée pour les semis des deux espèces en condition témoin.

Résultats après 21 jours de croissance :

- (1) : Le shoot root ratio montre que la racine principale est favorisée chez le Peuplier noir et chez le Saule blanc par rapport à leur tige.
- (2) : Le rapport B a / B r montre que la biomasse de la partie racinaire est privilégiée chez le PN, alors que chez le SA, la biomasse aérienne est privilégiée pendant les trois premières semaines.
- (3) : Le rapport H tige / L src montre que la partie racinaire est privilégiée et que la ramification pour les deux espèces est importante par rapport à la croissance de la tige.

Résultats après 39 jours de croissance :

- (1) : Le shoot root ratio reste constant pour les deux espèces par rapport au 21^e jour, favorisant le développement de la racine principale.
- (2) : Le rapport B_a / B_r augmente pour les deux espèces après six semaines de croissance, signifiant que la biomasse de la partie aérienne est favorisée pour les deux espèces.
- (3) : Le rapport H_{tige} / L_{src} est constant au cours du temps pour le PN et pour le SA.

Résultats après 63 jours de croissance :

- (1) : Le shoot root ratio reste constant pour les deux espèces tout au long de l'expérience.
- (2) : Le rapport B_a / B_r augmente pour les deux espèces, indiquant que la biomasse de la partie aérienne est favorisée pour les deux espèces.
- (3) : Le rapport H_{tige} / L_{src} est toujours constant au cours du temps pour les deux espèces, nous indiquant donc une ramification régulière au cours de l'expérience.

Les ratios de l'expérience *ex situ* montrent :

- (1) : Le shoot root ratio montre qu'au cours de l'expérience la racine principale est toujours favorisée par rapport à la tige pour les deux espèces. Concernant le Peuplier noir, la moyenne du ratio est de 0,1 et tandis que pour le Saule blanc, la moyenne du ratio est de 0,04
- (2) : Le rapport B_a / B_r montre que la biomasse de la partie aérienne est de plus en plus privilégié par rapport à la partie racinaire pour les deux espèces car ce ratio augmente au cours des 63 jours. Concernant le Peuplier noir, le ratio est de 1,53 pour le 21^e jour, de 2,28 pour le 39^e jour et de 2,95 pour le 63^e jour. Pour le Saule blanc, le ratio est de 0,83 le 21^e jour, de 1,01 le 39^e jour et de 1,8 le 63^e jour.
- (3) : Le rapport H_{tige} / L_{src} reste faible et constant au cours du temps pour le PN et pour le SA, mettant en évidence une ramification constante et régulière pendant l'expérience. Concernant le Peuplier noir, la moyenne du ratio est de 0,03 et pour le Saule blanc, la moyenne est de 0,01.

Les ratios de l'expérience *in situ* (Annexe 11) montrent :

(1), (2), (3) : les ratios sont similaires entre les peupliers de l'expérience *ex situ* et ceux prélevés *in situ*. Tout d'abord, le shoot root ratio est de 0,1 pour le peuplier *ex situ* et de 0,2 pour celui *in situ*. Ensuite, le ratio de la B_a / B_r est de 2,25 pour le peuplier *ex situ* et de 2,15 pour celui *in situ*. Enfin, le ratio H_{tige} / L_{src} est de 0,03 pour les peupliers *ex* et *in situ*.

Cela montre que le dispositif *ex situ* est cohérent et représentatif des bords de Loire pour ce type de substrat. Nous avons estimés l'âge des semis *in situ* à 8 semaines de croissance sur le terrain, ce qui concorde avec les résultats des ratios.

Le Peuplier noir privilégie donc sa racine principale et ses racines secondaires par rapport à sa tige au cours de son développement mais sa biomasse aérienne est plus importante que la biomasse racinaire. Le Saule blanc quant à lui privilégie toute sa partie racinaire durant les six premières semaines, puis il favorise sa biomasse aérienne par la suite par rapport à sa biomasse racinaire.

3.8. Les corrélations entre les variables en condition témoin, en condition de stress inondation et *in situ*

Les corrélations permettent d'étudier les liens qui peuvent exister entre les variables de la partie aérienne et celles de la partie racinaire. Dans la suite de ce rapport, je vous présente trois figures qui représentent les graphiques de corrélation réalisés avec les mêmes variables que les ratios utilisés précédemment. Nous avons fait le choix d'utiliser les données du 63^e jour de croissance pour les semis en condition témoin, pour les semis ayant subi un stress inondation et également les semis de peuplier noir prélevés *in situ*.

3.8.1. Corrélation entre biomasse aérienne et biomasse racinaire

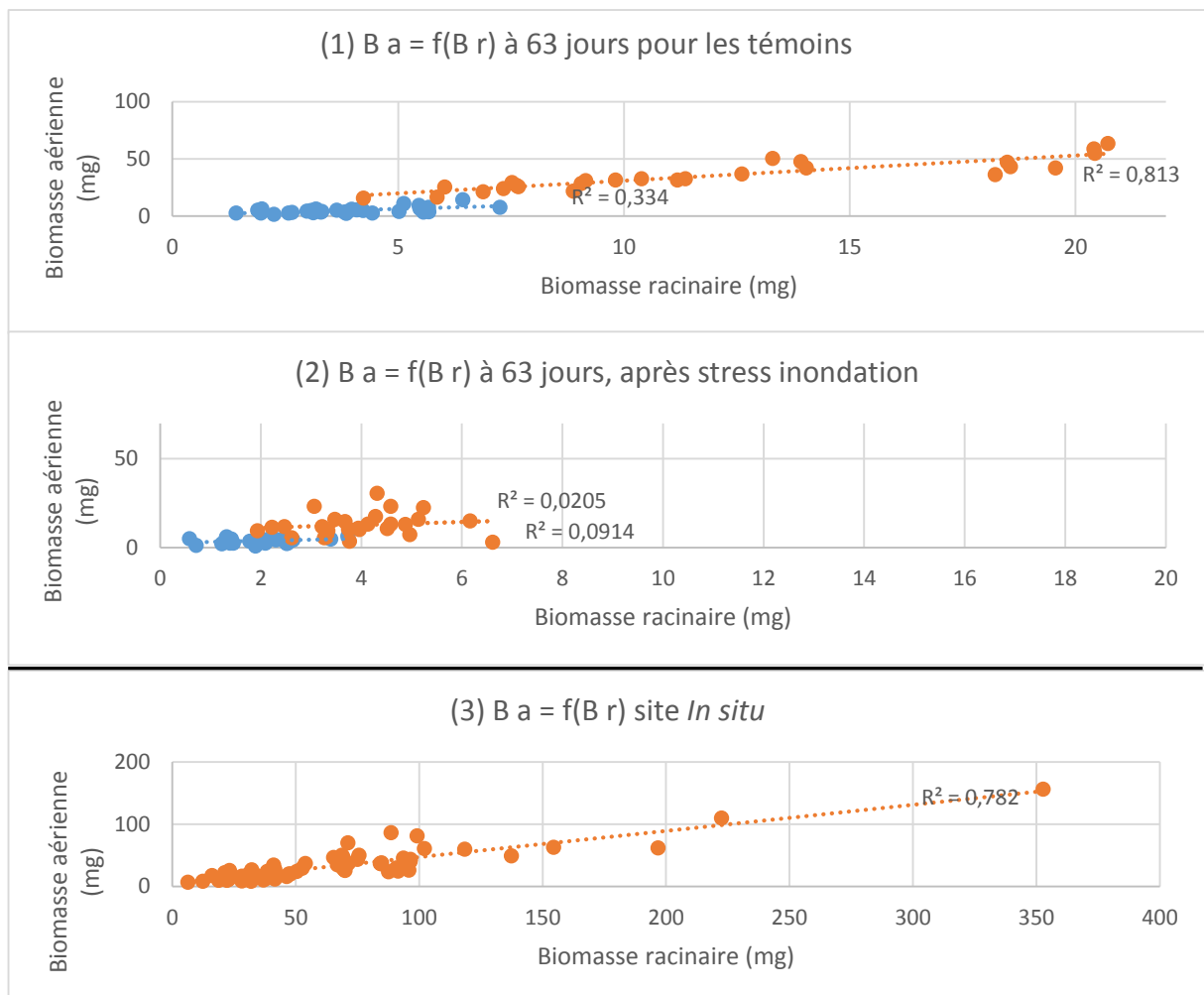


Figure 15 : Corrélation entre les biomasses aériennes et les biomasses racinaires.

(1) : Corrélation entre la biomasse aérienne et la biomasse racinaire témoin (63 jours)

(2) : Corrélation entre la biomasse aérienne et la biomasse racinaire ayant subi un stress inondation (63 jours)

(3) : Corrélation entre la biomasse aérienne et la biomasse racinaire pour les semis de PN sur les sites A et B des îles de Mareau-aux-prés (*in situ*).

● : *Saule blanc* (SA)

● : *Peuplier noir* (PN)

R^2 : coefficient de détermination.

3.8.2. Corrélation entre la hauteur de la tige et le système racinaire cumulé

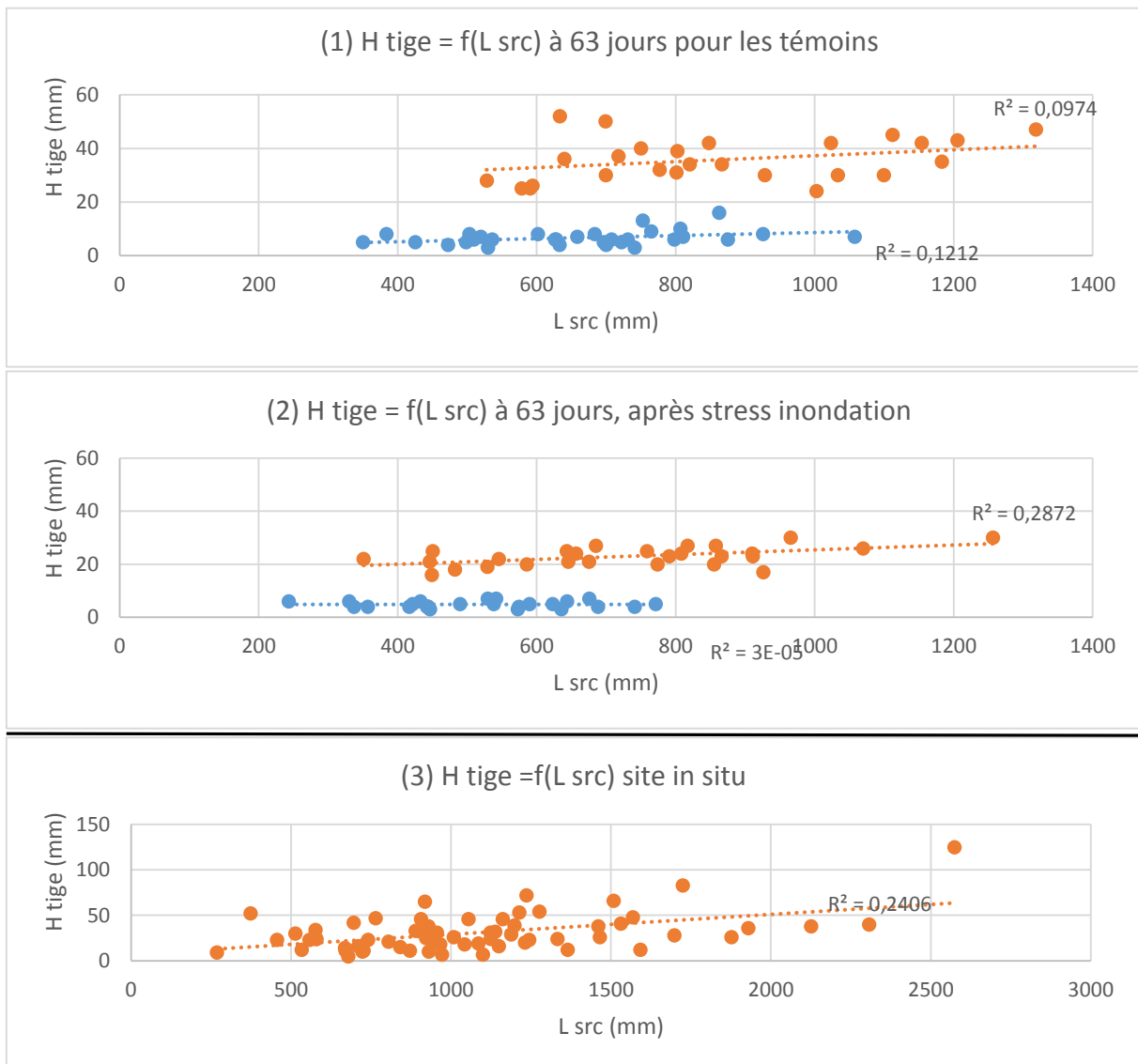


Figure 16 : Corrélation entre les hauteurs de la tige et les systèmes racinaires cumulés.

(1) : Corrélation entre les hauteurs de la tige et le système racinaire cumulé témoin (63 jours)

(2) : Corrélation entre les hauteurs de la tige et le système racinaire cumulé ayant subi un stress inondation (63 jours)

(3) : Corrélation entre les hauteurs de la tige et le système racinaire cumulé pour les semis de PN sur les sites A et B des îles de Mareau-aux-prés.

- : Saule blanc (SA)
- : Peuplier noir (PN)

3.8.3. Corrélation entre la hauteur de la tige et la longueur de la racine principale

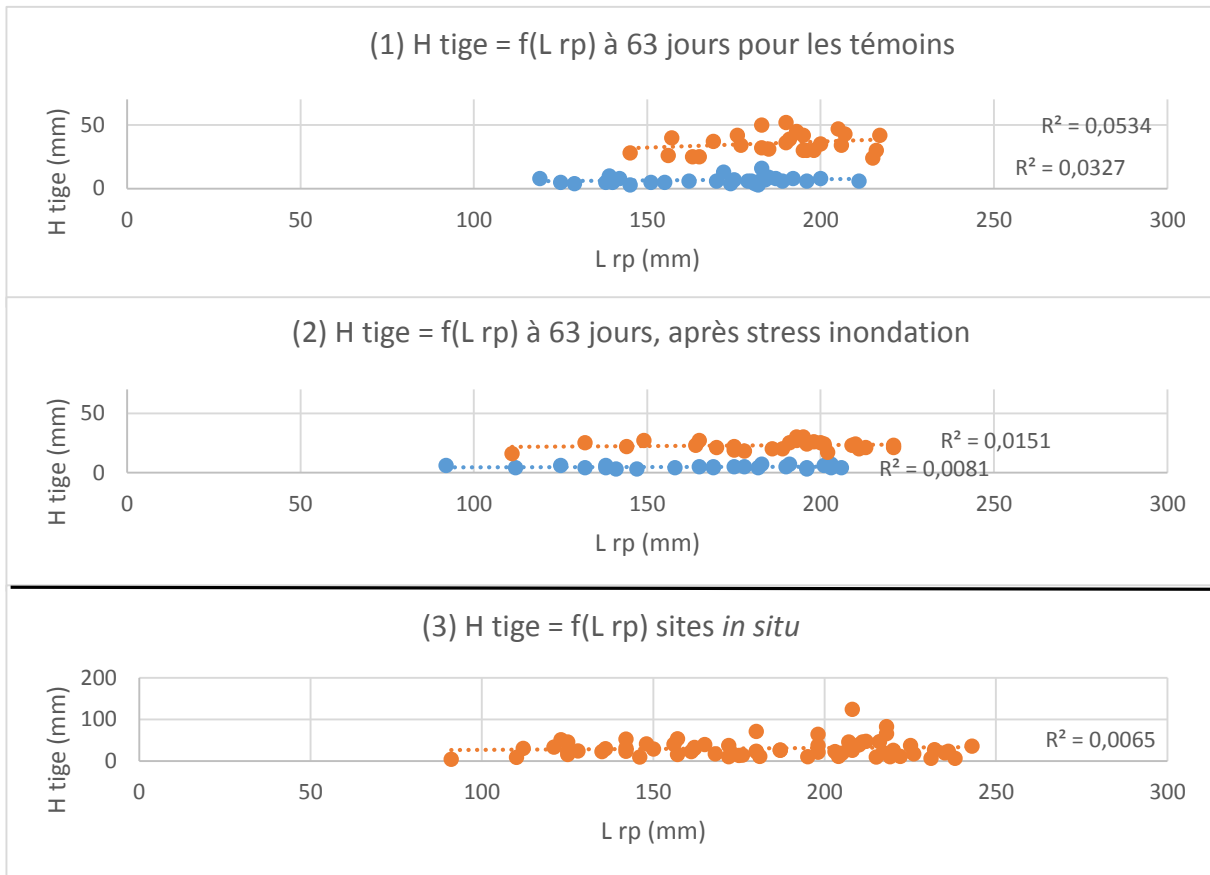


Figure 17 : Corrélation entre la hauteur de la tige et la longueur de la racine principale.

(1) : Corrélation entre la hauteur de la tige et la longueur de la racine principale témoin (63 jours)

(2) : Corrélation entre la hauteur de la tige et la longueur de la racine principale ayant subi un stress inondation (63 jours)

(3) : Corrélation entre la hauteur de la tige et la longueur de la racine principale pour les semis de PN sur les sites A et B des îles de Mareau-aux-prés.

- : Saule blanc (SA)
- : Peuplier noir (PN)

Les graphiques de corrélation ont été réalisés au bout de 63 jours de croissance. Nous avons choisi de représenter les données des semis en **condition témoin**, des semis ayant subi un **stress inondation** et des semis prélevés *in situ*. Le comportement des semis en condition de stress hydrique et de stress thermique n'est pas présenté, étant similaire au témoin. Les variables corrélées sont les mêmes que celles utilisées pour les ratios.

D'après nos mesures réalisées le 63^e jour sur les semis en condition témoin, il y a une corrélation entre **la biomasse aérienne et la biomasse racinaire** et cela pour les deux espèces. Le Saule blanc a un coefficient de détermination $R^2 = 0,334$ et le Peuplier noir de $0,813$ (la corrélation est plus importante chez le Peuplier noir que chez le Saule blanc). Le coefficient R^2 est comparable pour les semis prélevés *in situ* ($R^2 = 0,782$) par rapport à ceux *ex situ* ($R^2 = 0,813$) car ils sont tous les deux supérieurs à $0,5$. Cela peut confirmer la représentativité de l'expérience par rapport aux conditions naturelles de bord de Loire.

En revanche, concernant les semis des deux espèces ayant subi un **stress inondation**, R^2 est très faible par rapport aux semis en condition témoin. Le Saule blanc a un $R^2 = 0,091$ et le Peuplier noir a un $R^2 = 0,021$. Le stress inondation a provoqué une indépendance de la croissance racinaire par rapport au développement de leur partie aérienne.

D'après les mesures réalisées le 63^e jour, la corrélation entre **la hauteur de la tige et la longueur du système racinaire cumulé**, montre pour le Peuplier noir témoin a un $R^2 = 0,097$ et en condition de stress inondation $R^2 = 0,287$. Concernant le Saule blanc témoin, $R^2 = 0,121$ et en condition de stress inondation $R^2 = 3 \times 10^{-5}$. La corrélation entre **la hauteur de la tige et la longueur de la racine principale**, $R^2 = 0,053$ pour le Peuplier noir témoin et le $R^2 = 0,015$ pour le PN ayant subi un stress inondation. Concernant le SA témoin, le $R^2 = 0,033$ et pour le SA ayant subi un stress inondation, le $R^2 = 0,008$.

Cela se confirme pour les semis de Peuplier noir prélevés *in situ* qui ont un coefficient de détermination $R^2 = 0,241$ pour la corrélation H tige / L src et $R^2 = 0,006$ pour la corrélation H tige / L rp. Les semis de PN *ex* et *in situ* sont comparables.

Il y a donc une indépendance entre le développement des racines et celui de la croissance de la tige pour le Peuplier noir et pour le Saule blanc.

3.9. Variable intraspécifique

Dans cette figure 18, nous présentons les valeurs individuelles des semis en condition *ex situ* (trois caisses de PN et trois caisses de SA), et de 64 semis de PN prélevés en milieu naturel. Cela illustre la distribution de la variable de la longueur de la racine principale qui peut exister au sein d'une population de semis de Peuplier noir et de Saule blanc.

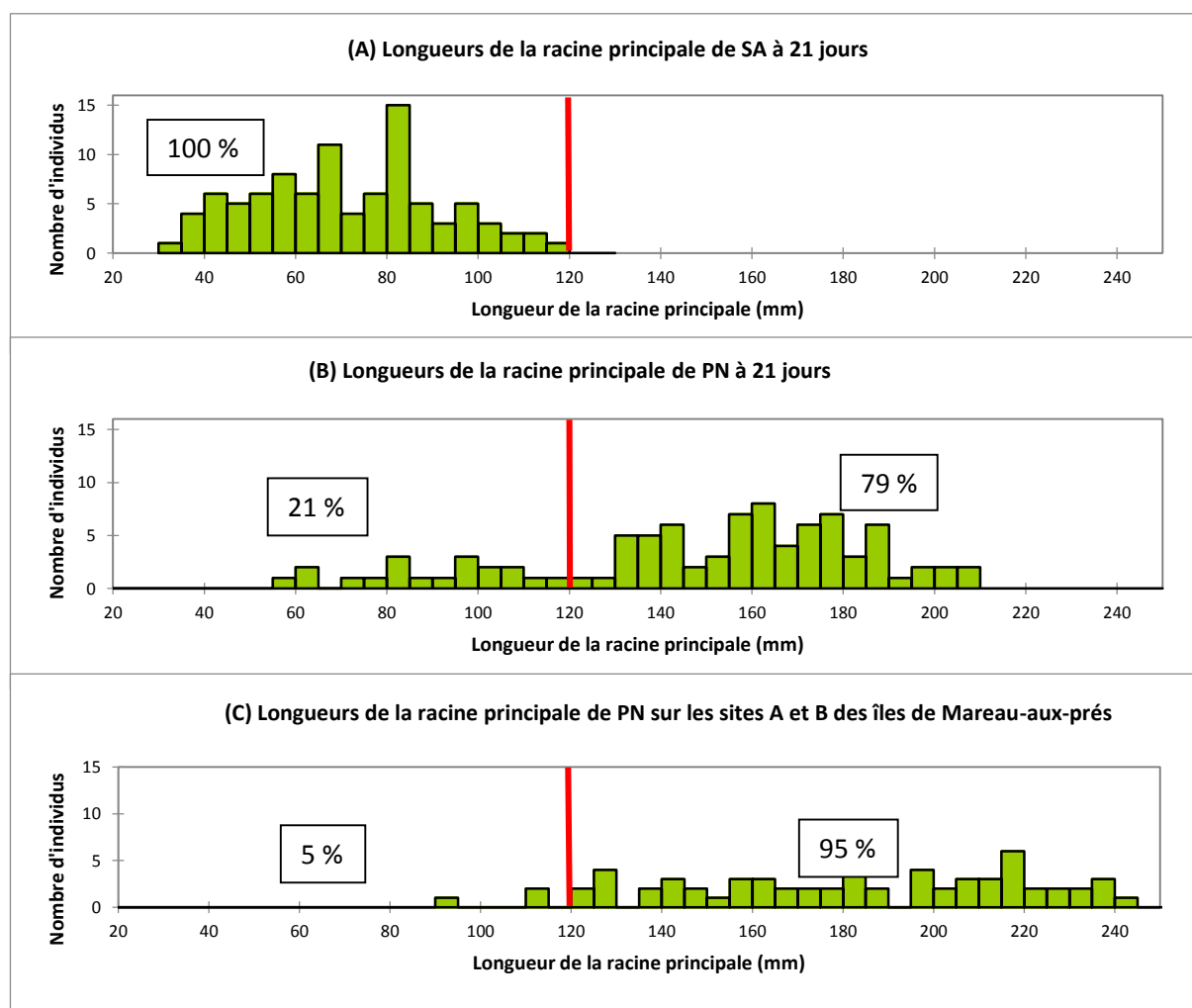


Figure 18 : Comparaison de la longueur de la racine principale entre le Saule blanc (A) à 21 jours ($n = 94$), le Peuplier noir (B) à 21 jours de croissance ($n = 91$) et le Peuplier noir (C) prélevé *in situ* le 20/07/2015 ($n = 64$).

D'après les histogrammes de la longueur de la racine principale, la distribution de la variabilité pour le PN *ex situ* est proche de celle pour le PN *in situ*. Les mesures montrent que 79 % des individus de Peuplier noir *ex situ* ont une longueur de la racine principale supérieure à 12 cm, tandis que 95 % le Peuplier noir *in situ* sont dans ce cas. La distribution de la variable de la longueur de la racine principale pour le PN *ex situ* est de 5,5 à 21 cm et pour le PN *in situ* de 9 à 24 cm. Le dispositif expérimental peut être comparable au milieu naturel.

Le Saule blanc par contre a une plage de distribution de la variable de la longueur de sa racine principale comprise entre 3 et 12 cm ce qui correspond à 100 % de la population étudiée. Cette plage de distribution est 2 fois inférieure à celle du PN. Le SA semble donc plus sensible à d'importante fluctuation de la nappe alluviale car il concentre tous ces individus sur une faible plage de valeur. En milieu naturel, le SA sera défavorisé par rapport au PN face à un stress hydrique.

3.10. Les limites de l'expérience

Cette expérience simule les conditions de régénération naturelles de semis de deux espèces pionnières : *Populus nigra* et *Salix alba*. Cependant, les conditions ne peuvent toutes être remplies, voici les différences avec le milieu naturel :

- L'arrosage se fait par le haut et non par capillarité comme avec une nappe alluviale,
- L'eau de l'aquifère utilisée pour l'expérience n'a pas les mêmes éléments nutritifs que l'eau de la Loire,
- La densité des semis en cohorte sur barre sédimentaire n'est pas identique que celle de l'expérience. En caisse les individus sont également espacés (5 cm entre chaque semis),
- L'intensité lumineuse n'est pas identique entre les différents stress, ni durant les trois premières semaines de germination sous serre,
- Pour le stress inondation : la force d'arrachage due au débit n'est pas prise en compte dans cette expérience, ni l'enfouissement des semis dû à la mise en mouvement des sédiments du fond du lit qui peuvent recouvrir les semis. De plus, l'eau est stagnante et non courante, et cela joue sur sa température.
- La profondeur des caisses est de 20 centimètres. La croissance racinaire est donc contrainte par le fond de la caisse.
- L'expérience *ex situ* a été réalisée uniquement avec un substrat sableux.

4. Discussion générale et perspectives

Cette expérience *ex situ* est basée sur le constat d'une répartition non uniforme de Saule blanc et de Peuplier noir en Loire. Elle vise à comprendre les différences biologiques qu'ils existent en milieu naturel entre ces deux espèces et leurs réponses aux conditions environnementales.

1. Validation de l'expérience *ex situ* vers l'*in situ* :

L'expérience *ex situ* est-elle représentative du milieu naturel des bords de Loire ?

Les valeurs des ratios et des corrélations montrent une forte similarité entre les semis de **Peuplier noir** *ex situ* et *in situ*. De plus, les résultats des histogrammes représentant les valeurs individuelles de dispersion de la variable de la longueur de la racine principale après 21 jours

de croissance, indiquent que le dispositif expérimental *ex situ* est représentatif des conditions naturelles de Loire.

2. Comparaison des deux espèces en condition témoin :

Quelles sont les différences biologiques entre le Peuplier noir et le Saule blanc ?

La germination, pour le Peuplier noir, débute après 24h, développant sa partie aérienne et racinaire de façon synchronisée. En revanche, le Saule blanc, commence le développement de sa partie racinaire qu'une semaine après germination.

Cette différence de stratégie pourrait s'expliquer par la différence de masse des graines de Peuplier noir et de Saule blanc. En effet, la masse d'une graine de Peuplier noir est six fois plus importante que celle du Saule blanc. Ces valeurs sont en accord avec celles de Karrenberg et Suter (2003). Ce rapport traduirait une différence de réserve nutritive entre les deux espèces. Le Saule blanc adopterait donc une stratégie différente de celle du Peuplier noir après germination où il développerait en priorité ses cotylédons afin de mettre en place la photosynthèse avant le développement de son système racinaire.

Concernant la vitesse de croissance racinaire, le Peuplier noir se développe de manière plus rapide que le Saule blanc tout au long de l'expérience. La croissance de son système racinaire dans les trois premières semaines est en moyenne 2 fois plus rapide que chez le Saule blanc. Le Peuplier noir a donc une stratégie différente par rapport au Saule blanc du fait de sa réactivité immédiate dans le développement de sa racine et de sa tige. Cela pourrait alors le favoriser pour un ancrage au substrat sableux.

En raison de son plus faible ancrage, le Saule blanc serait plus sensible à une remontée de la ligne d'eau. Cette hypothèse permettrait d'expliquer le constat d'une répartition non uniforme du Peuplier noir et du Saule blanc sur la Loire.

De plus, d'après les résultats des histogrammes représentant la distribution de variable de la longueur de la racine principale après 21 jours de croissance. La plage des valeurs des individus de Peuplier noir est deux fois plus importante que celle de distribution du Saule blanc. Le Peuplier noir semble donc avantagé sur le Saule blanc lors d'une baisse importante de la nappe.

Des quadrats ont été réalisés en milieu *in situ* sur les îles de Mareau-aux-Prés le 11 août 2015 et ont montré des différences de densité en fonction des substrats. La densité moyenne de peuplier étant de 175 semis/ m² par rapport à une densité moyenne de saule de 116 semis/ m² pour un substrat sableux. En revanche, pour un substrat sablo limoneux la densité de saule est plus importante que celle du peuplier (152 semis/ m² contre 45 semis/ m²).

D'après Rameau (1989), le Saule blanc germe sur un substrat constitué de matériaux alluviaux argilo-limoneux et le Peuplier noir sur des matériaux alluviaux grossiers (sables, graviers, limons). Le Saule blanc préférerait donc des substrats plus riches en limon, c'est pourquoi il semblerait défavorisé face au Peuplier noir lors de l'expérience *ex situ* qui a été réalisé entièrement sur un substrat sableux.

Par la suite, un suivi de cette régénération naturelle de semis de peuplier et de saule sera réalisé par M. Villar.

3. Quels comportements adoptent-ils en cas de stress environnementaux ?

Tableau 4 : récapitulatif des comportements des variables concernant les semis de PN et de SA ayant subi des stress environnementaux par rapport aux semis en condition témoin.

Classement en 3 catégories :

■ : Supérieur ; = : Equivalent ; ■ : Inférieur

Variables mesurées au 63 ^{ème} jour	Espèces	Stress thermique	Stress hydrique	Stress inondation
H tige	PN	=	=	-
	SA	=	-	-
L rp	PN	=	=	=
	SA	=	=	=
L src	PN	=	=	=
	SA	-	=	-
B r	PN	=	=	-
	SA	=	=	-
B a	PN	=	-	-
	SA	=	=	=

Le **stress hydrique** simulant une sécheresse pendant la saison estivale n'a pas influencé significativement le développement du système racinaire pour les deux espèces lors de l'expérience *ex situ*. Cependant, lorsque l'on s'intéresse à la stratification du système racinaire, le Peuplier noir semble favoriser le développement de ses racines secondaires dans les dix derniers centimètres, cherchant probablement à garder le contact avec la frange capillaire, alors qu'il semble freiner le développement de sa biomasse aérienne. Tandis que le saule s'adapterait en ralentissant la croissance de hauteur de sa tige par rapport à sa partie racinaire.

En milieu naturel, lors d'une sécheresse impliquant une baisse de la nappe, le Peuplier noir pourrait alors être avantagé sur le Saule blanc grâce à sa vitesse de croissance racinaire supérieur lors de la première semaine de développement. De plus, le Peuplier noir possède une distribution de la variable de la longueur de sa racine principale deux fois plus importante que le Saule blanc. Cette distribution est indispensable pour une accroche au substrat et pour une alimentation en eau suffisante, permettant alors la survie des semis. Le Peuplier noir serait donc avantagé sur le Saule blanc lors d'une baisse brutale de la nappe alluviale.

En effet, d'après Piégay *et al.* (2003), la vitesse de décroît de la nappe ne doit pas dépasser 4 cm/j pour que la survie des semis soit assurée. Cette année la vitesse moyenne de la baisse du niveau de la Loire entre le 4 mai le 20 août 2015 était de 2,3 cm/j (Ministère de l'écologie, Vigicrue, 2015). Cette vitesse a donc été favorable à l'installation des semis de Peuplier noir et de Saule blanc sur la Loire au niveau de la RNN de Saint-Mesmin.

L'application du stress hydrique pour l'expérience *ex situ* n'a pas eu d'effet significatif sur le développement de la partie racinaire des semis de Peuplier noir et de Saule blanc. Cela peut s'expliquer par le fait que la période du stress de 3 semaines a été de trop courte durée pour voir un impact sur les semis. De plus, un géotextile a été installé au fond de la caisse pour laisser passer l'eau mais pas le sable, ce qui a créé une rétention d'eau qui a permis aux semis de tenir pendant les 3 semaines de stress. Dans une future expérience, il pourrait être intéressant de mettre au fond de la caisse un fin grillage pour retenir le sable et laisser passer l'eau de manière plus efficace.

Le **stress thermique** simule une augmentation de la température pouvant dépasser les 55°C, ce qui est fréquent sur la Loire durant la saison estivale. Le Peuplier noir ne semble pas influencé par cette hausse de température. En effet, dans l'expérience *ex situ*, le développement de sa partie aérienne et racinaire reste constant si l'alimentation en eau est régulière. Le Saule blanc quant à lui, semble ralentir le développement de ses racines secondaires et favorise le développement de sa partie aérienne.

Lors du stress thermique pour l'expérience *ex situ*, l'arrosage était non limitant, les conditions de croissance étaient donc optimales pour les deux espèces. De plus d'après les observations en milieu naturel, une canicule de quatre jours où la température a dépassé les 50°C sur le sable a été noté (Villar, com. pers.). Cette canicule ne semble pas avoir affecté les semis de Peuplier noir et de Saule blanc actuellement présents sur les îles de Mareau-aux-Prés.

Le **stress inondation** simule une crue estivale submergeant les semis installés après six semaines de croissance, laissant le temps aux semis de se développer avant le stress. D'après l'expérience *ex situ*, il y a très peu de mortalité si cette inondation se fait après six semaines de croissance (taux de survie de 70 à 85 % si le stress est d'une durée de trois semaines). Cependant, il n'est pas possible de confirmer si cette mortalité est due à la méthodologie mise en place ou à la biologie des espèces. Une inondation causerait sur le Peuplier noir un arrêt du développement de sa partie aérienne mais ses racines secondaires poursuivraient de façon ralentie leurs développements. A la différence du Saule blanc, qui aurait pour conséquence de favoriser sa biomasse aérienne mais stopperait la croissance de sa tige et de sa partie racinaire.

Le Saule blanc augmenterait sa biomasse aérienne lors d'un stress inondation, alors que le Peuplier noir favoriserait le développement de ses racines secondaires pour surement augmenter son accroche au substrat. Les semis des deux espèces sont en période de végétation, ils freinent une partie de leur développement lors d'une crue puis reprennent leur croissance après la décrue. Lors de l'expérience *ex situ*, la période de stress inondation a été de trop courte durée pour constater une mortalité importante. En effet, d'après Vreugdenhil *et al.* (2006), ces deux espèces peuvent survivre à une submersion d'une période de douze semaines où une mortalité supérieure à 50 % a été analysée à partir de neuf semaines de stress inondation, lors de la première année d'installation des semis.

4. Conclusion :

D'après l'expérience *ex situ*, le Saule blanc et le Peuplier noir ont des stratégies de développement de leur partie aérienne et racinaire différentes. Le Saule blanc semblerait être moins avantageux dans le développement de sa partie aérienne et racinaire que le Peuplier noir sur un substrat sableux face aux conditions de stress environnementaux. En effet, sa vitesse de croissance racinaire est plus faible que celle du Peuplier noir, il aurait donc un ancrage plus faible. Cela expliquerait en partie la répartition non uniforme de ces deux espèces sur des barres sédimentaires et berges de Loire.

A la fin de mon stage, il reste encore quatre caisses de Peuplier noir et quatre de Saule blanc qui continuent leur développement en dispositif extérieur. M. Villar suivra la croissance de la partie aérienne et racinaire jusqu'à l'hiver de ces semis restant.

5. Liste des figures et tableaux

FIGURE 1 : SAULE BLANC SUR LA RNN DE SAINT-MESMIN	7
FIGURE 2 : TEST DE GERMINATION SUR BOITE DE PETRI	7
FIGURE 3 : DISPOSITIF CAMERA : SUIVI DE LA GERMINATION	8
FIGURE 4 : SERRE DE GERMINATION	8
FIGURE 5 : OMBRIERE	8
FIGURE 6 : DISPOSITIF EXTERIEUR	9
FIGURE 7 : EVOLUTION DE LA TEMPERATURE EN °C EN FONCTION DU TEMPS.	9
TEMPERATURE TEMOIN EXTERIEURE	9
TEMPERATURE LORS DU STRESS THERMIQUE	9
FIGURE 8 : DISPOSITIF DU STRESS INONDATION	9
FIGURE 9 : A GAUCHE 1000 GRAINES DE PN, A DROITE 1000 GRAINES DE SA	11
FIGURE 10 : EVOLUTION DES HAUTEURS MOYENNES DE TIGES DES SEMIS DE PEUPLIER NOIR ET DE SAULE BLANC EN FONCTION DU TEMPS, LES STRESS AYANT DEBUTE LE 44 ^E JOUR JUSQU'AU 63 ^E JOUR.....	12
FIGURE 11 : EVOLUTION DES BIOMASSES AERIENNES MOYENNES DES SEMIS DE PEUPLIER NOIR ET DE SAULE BLANC EN FONCTION DU TEMPS, LES STRESS AYANT DEBUTE LE 44 ^E JOUR JUSQU'AU 63 ^E JOUR.....	13
FIGURE 12 : EVOLUTION DES LONGUEURS MOYENNES DES RACINES PRINCIPALES DES SEMIS DE PEUPLIER NOIR ET DE SAULE BLANC EN FONCTION DU TEMPS, LES STRESS AYANT DEBUTE LE 44 ^E JOUR JUSQU'AU 63 ^E JOUR.....	15
FIGURE 13 : EVOLUTION DES LONGUEURS MOYENNES DES SYSTEMES RACINAIRES CUMULES DES SEMIS DE PEUPLIER NOIR ET DE SAULE BLANC EN FONCTION DU TEMPS, LES STRESS AYANT DEBUTE LE 44 ^E JOUR JUSQU'AU 63 ^E JOUR.....	16
FIGURE 14 : EVOLUTION DES BIOMASSES RACINAIRES MOYENNES DES SEMIS DE PEUPLIER NOIR ET DE SAULE BLANC EN FONCTION DU TEMPS, LES STRESS AYANT DEBUTE LE 44 ^E JOUR JUSQU'AU 63 ^E JOUR.....	17
FIGURE 15 : CORRELATION ENTRE LES BIOMASSES AERIENNES ET LES BIOMASSES RACINAIRES.	21
FIGURE 16 : CORRELATION ENTRE LES HAUTEURS DE LA TIGE ET LES SYSTEMES RACINAIRES CUMULES.....	22
FIGURE 17 : CORRELATION ENTRE LA HAUTEUR DE LA TIGE ET LA LONGUEUR DE LA RACINE PRINCIPALE.	23
FIGURE 18 : COMPARAISON DE LA LONGUEUR DE LA RACINE PRINCIPALE ENTRE LE SAULE BLANC (A) A 21 JOURS (N = 94), LE PEUPLIER NOIR (B) A 21 JOURS DE CROISSANCE (N = 91) ET LE PEUPLIER NOIR (C) PRELEVE IN SITU LE 20/07/2015 (N = 64).	24
Tableau 1 : Test statistique de type ANOVA, analyse de la variance pour tester la validité d'une hypothèse. Pour la partie aérienne.....	14
Tableau 2 : Test statistique de type ANOVA, analyse de la variance pour tester la validité d'une hypothèse. Pour la partie racinaire.....	18
Tableau 3 : comparaison entre les systèmes racinaires cumulés des deux espèces pour les 10 premiers centimètres et les 10 derniers centimètres pour le stress hydrique et en condition témoin.....	19
Tableau 4 : récapitulatif des comportements des semis de PN et de SA ayant subi des stress environnementaux par rapport aux semis en condition témoin.....	28

6. Références bibliographiques

- **Augier, F.** (2005). Etude de la diversité génétique et des stratégies de régénération du peuplier noir, *Populus nigra*, aux abords de la réserve naturelle de St-Pryvé-St Mesmin. Coordination RN de St Pryvé St Mesmin, INRA Orléans, DU Entreprise, Université de Grenoble, 84 p.
- **Chamaillard, S.** (2011). Efficience d'utilisation de l'eau chez le peuplier noir (*Populus nigra* L.) : variabilité et plasticité en réponse aux variations de l'environnement. Thèse de doctorat, Université d'Orléans, <http://prodinra.inra.fr/record/178211>
- **Fédération des Conservatoires d'espaces naturels**, (2003). Les zones d'intervention Loire nature par secteurs naturels p. 12. *In* : Recueil d'expériences Loire Nature, pour une gestion durable d'un fleuve et de ses affluents, (2002-2006).
- **Guilloy-Froget, H.** (2002). Evaluation des conditions favorables à l'établissement de *Populus nigra* et *Salix alba* en milieu riverain. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 141 p.
- **Institut Géographique National** (2006). Photographie aérienne panchromatique, IFN, BD ortho, 000-2015-0607-6752-L93. Paris : IGN
- **Karrenberg, S.; Suter A.** (2003). Phenotypic trade-offs in the sexual reproduction of Salicaceae from flood plains. *American Journal of Botany*, 90(5): 749-754
- **Météo France**. Bilan climatique 2015. <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/bilans-climatiques/bilan-2015> [consulté le 20/07/2015]
- **Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie**. Vigicrues, station d'Orléans, Pont Royal. <http://www.vigicrues.gouv.fr/niveau3.php?idspc=10&idstation=574> [consulté le 30.06.2015]
- **Piégay H.; Pautou G.; Ruffinoni C.** (2003). Les forêts riveraines des cours d'eau, écologie: fonctions et gestion. Paris: Institut pour le développement forestier, 463 p.
- **Préfecture du Loiret, Mission Inter Services de l'Eau du Loiret, M.I.S.E.45** (2007). Politique de l'eau dans le département du Loiret. Principales prescriptions, opposition aux déclarations. Les aquifères dans le département du Loiret. Note sur la politique de l'eau dans le département du Loiret. 27:60.
- **Rameau, J.C.; Mansion, D.; Dumé G.** (1989). Flore forestière française, guide écologique illustré.tome 1: Plaines et collines. Paris : Institut pour le développement forestier, Ministère de l'Agriculture et de la Forêt, Direction de l'espace rural et de la forêt : École nationale du génie rural, des eaux et des forêts,1785 p.
- **Stella, J.C.; Battles, J.J.; Mc Bride, J; R.; Orr B.K.** (2010). Riparian seedling mortality from simulated water table recession, and the design of sustainable flow regimes on regulated rivers. *Restoration Ecology*, 18:284-294
- **Villar, M.** (2011). Conservation des ressources génétiques du peuplier noir dans son habitat: bases biologiques, génétiques et écologiques. Habilitation à diriger des recherches, Université d'Orléans, 84 p. <http://prodinra.inra.fr/record/45019>
- **Villar, M.** (2012). Peuplier Noir *Populus Nigra*, projet scientifique biomareau (2012-2015) <http://peupliernoir.orleans.inra.fr/biomareau.html> [consulté le 07/08/2015]
- **Vreugdenhil S.J.; Kramer K.; Pelsma, T.** (2006). Effects of flooding duration, frequency and depth on the presence of saplings of six woody species in north-west Europe. *Forest Ecology and Management*, 236: 47-55
- **Wintenberger, C.** (2015). Evaluation de l'influence de la dynamique hydro-sédimentaire et des travaux d'entretien du lit sur la survie des populations au stade juvénile de *Populus nigra* et *Salix alba* en Loire Moyenne. Thèse de doctorat, Université de Tours, 365 p

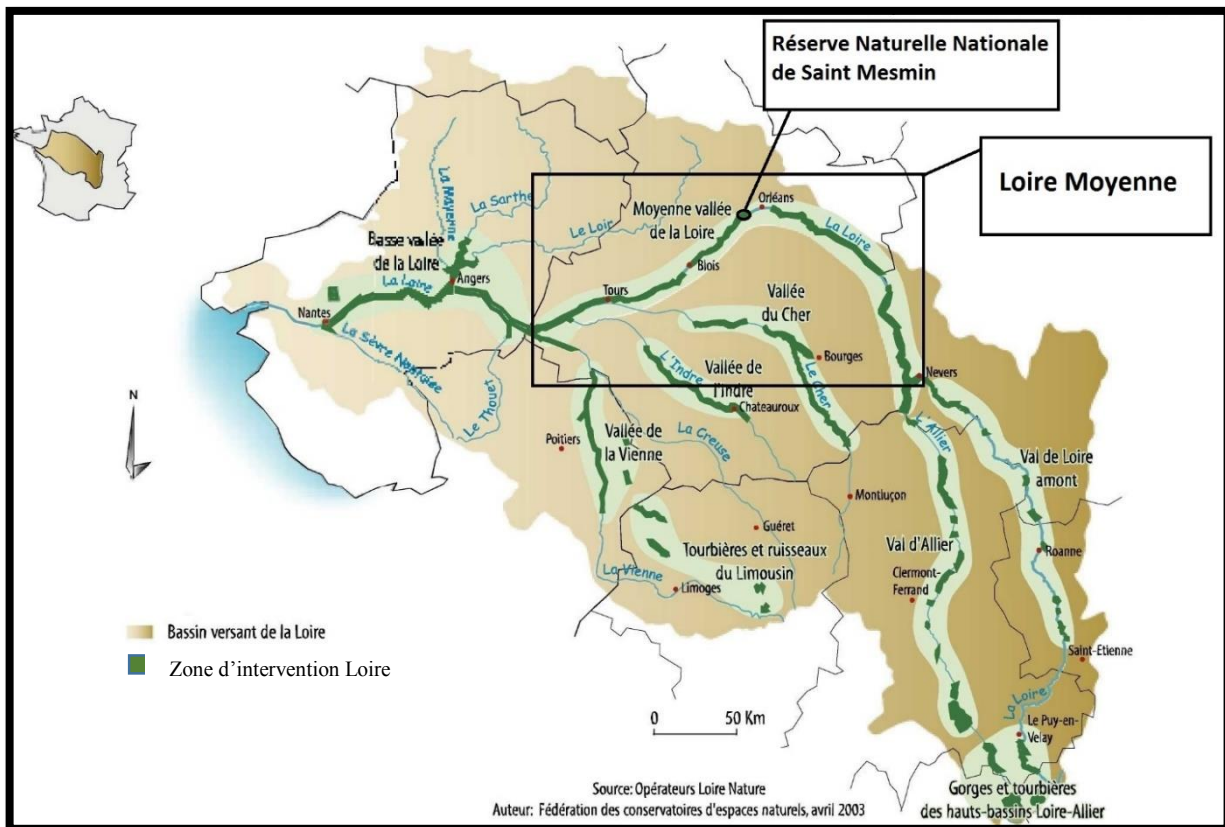
Annexe 1

Bassin versant de la Loire

L'encadré correspond au zonage de la Loire Moyenne.

Localisation de la Réserve Naturelle Nationale de Saint-Mesmin (45, Loiret).

Zones d'intervention Loire nature par secteurs naturels



Référence bibliographique : Fédération des Conservatoires d'espaces naturels (2003).

Annexe 2

Les menaces sur la ripisylve ligérienne :

L'agriculture a une grande place dans ce secteur (les cultures majoritaires en bord de Loire au niveau de la RNN St Mesmin sont des céréales, des vergers et des vignobles). Utilisant de nombreux intrants chimiques et des traitements phytosanitaires qui sont néfastes lorsqu'ils se sont solubilisés et non utilisés par les cultures, ainsi entraînés dans les nappes et les cours d'eau.

Le pompage d'eau pour l'irrigation dans la nappe alluviale joue un rôle important sur le niveau piézométrique de la nappe superficielle d'accompagnement du cours d'eau qui impacte la ripisylve.

Historiquement, entre 1950 et 1995, l'extraction intensive de granulats dans le lit mineur du cours d'eau a provoqué son rétrécissement et son enfoncement. Cela a impliqué une baisse du niveau de la nappe alluviale ce qui a perturbé l'alimentation en eau des communautés végétales riveraines.

De plus, les berges sont endiguées sur tout le linéaire au niveau d'Orléans, provoquant une diminution des échanges latéraux, une diminution de la surface de dépôt des sédiments lors des périodes de crues, une augmentation de la vitesse d'écoulement et donc une contrainte supplémentaire pour l'installation de semis en bord de Loire.

Sur la Loire amont et sur l'Allier, se trouvent trois importants barrages : le barrage de Villerest, le barrage de Naussac et le barrage de Grangent. Ainsi que deux centrales nucléaires gérées par EDF en amont d'Orléans : la centrale de Dampierre et la centrale de Belleville. Les débits sont contrôlés par les gestionnaires des ouvrages hydrauliques (ici l'Etablissement Public Loire) et ont donc un impact important sur le niveau de la nappe alluviale. Le débit objectif fixé par le SDAGE Loire-Bretagne est de 50 m³/s au niveau de Gien (30 km en amont d'Orléans).

Sur les berges se trouvent éparpillés des peuplements de cultivars (Peupliers hybrides). Ces peuplements sylvicoles provoquent la destruction de nombreux habitats, car cette culture est en coupe rase ; et diminuent aussi la diversité génétique car les cultivars peuvent polliniser des Peupliers noirs femelles.

Il a été constaté la forte présence d'une espèce invasive, l'Erable *negundo* (*Acer negundo*), se développant rapidement sur les sites prospectés par le Peuplier noir et le Saule blanc. On la trouve fortement sur la RNN de Saint Mesmin depuis 2011.

Le Castor d'Europe est présent sur la Loire Moyenne (réintroduction dans les années 1980) ; son alimentation est constituée essentiellement de végétaux de la famille des Salicacées dont le Peuplier noir et le Saule blanc.

Le changement climatique suivi par le Groupe d'expert Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) est à prendre en compte pour la pérennité de la ripisylve. Il est prévu une augmentation de température de plus de 2°C en moyenne d'ici 2050 et une augmentation des fréquences de crue et de sécheresse.

Annexe 3

Photographies des inflorescences de Peuplier noir et de Saule blanc



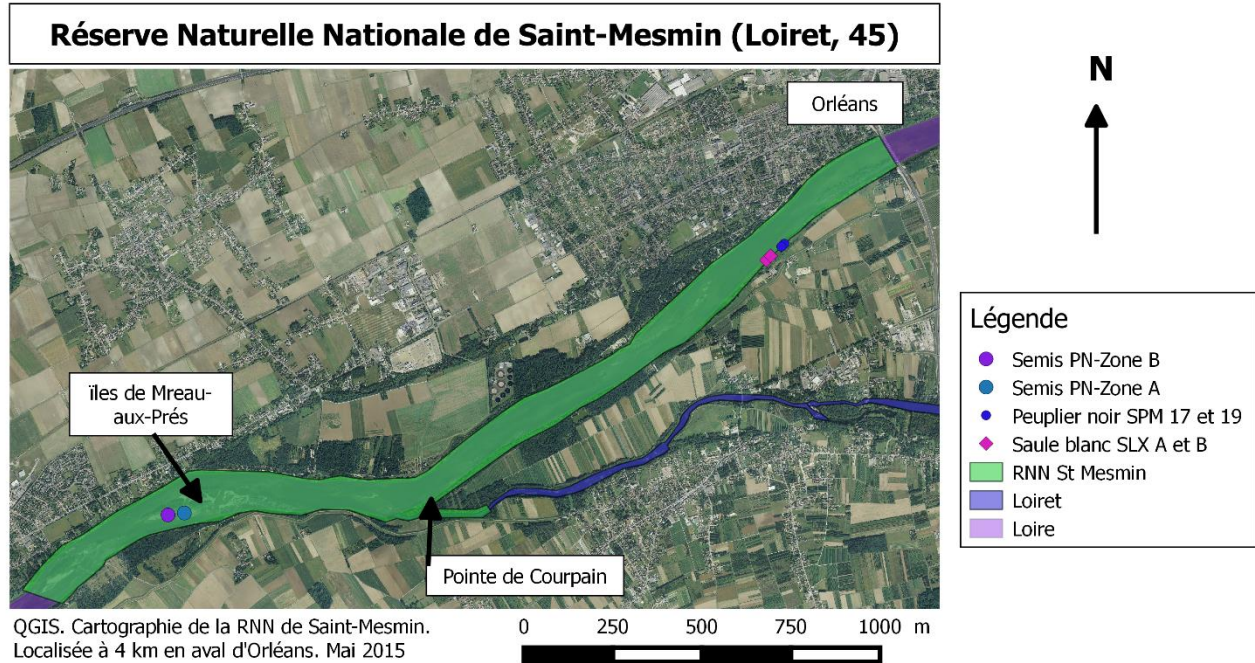
Inflorescence (chaton) de *Populus nigra*,
photographie prise le 13/05/2015 RNN Saint
Mesmin



Inflorescence (chaton) de *Salix alba*,
photographie prise le 13/05/2015 RNN Saint-
Mesmin

Annexe 4

Cartographie des prélèvements dans la RNN de Saint-Mesmin



Données photographiques aériennes. IGN 2006.

Légende :

Pour l'expérience *ex situ*, les graines sont prélevées sur 4 individus (2 de PN : SPM 17 et SPM 19 ; et 2 de SA : SLX A et SLX B).

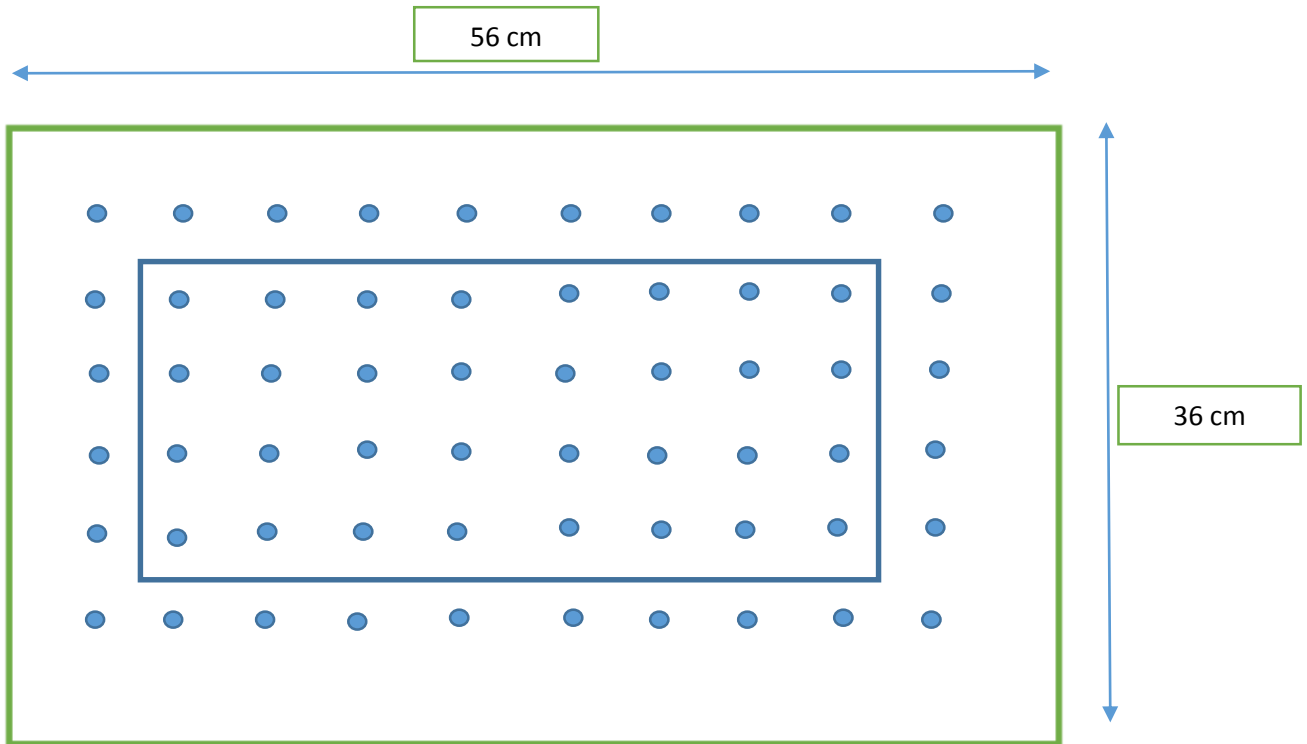
Pour l'expérience *in situ*, les semis de Peuplier noir sont prélevés sur deux zones : A et B.

Annexe 5

Schéma d'ensemencement sur caisse (vu de dessus) :

Espacement de 5 cm entre chaque semis

Mesure des 32 semis centraux.

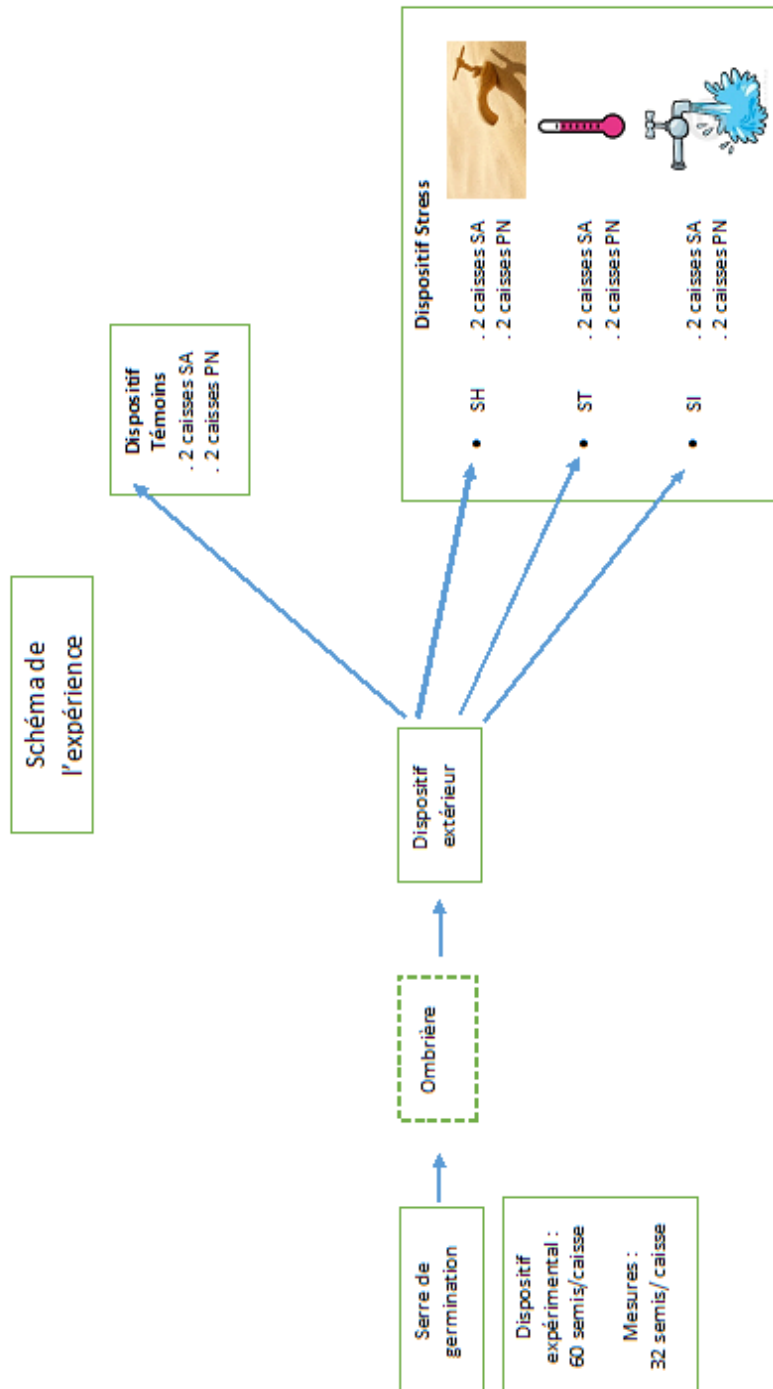


Photographie d'une caisse de sable :



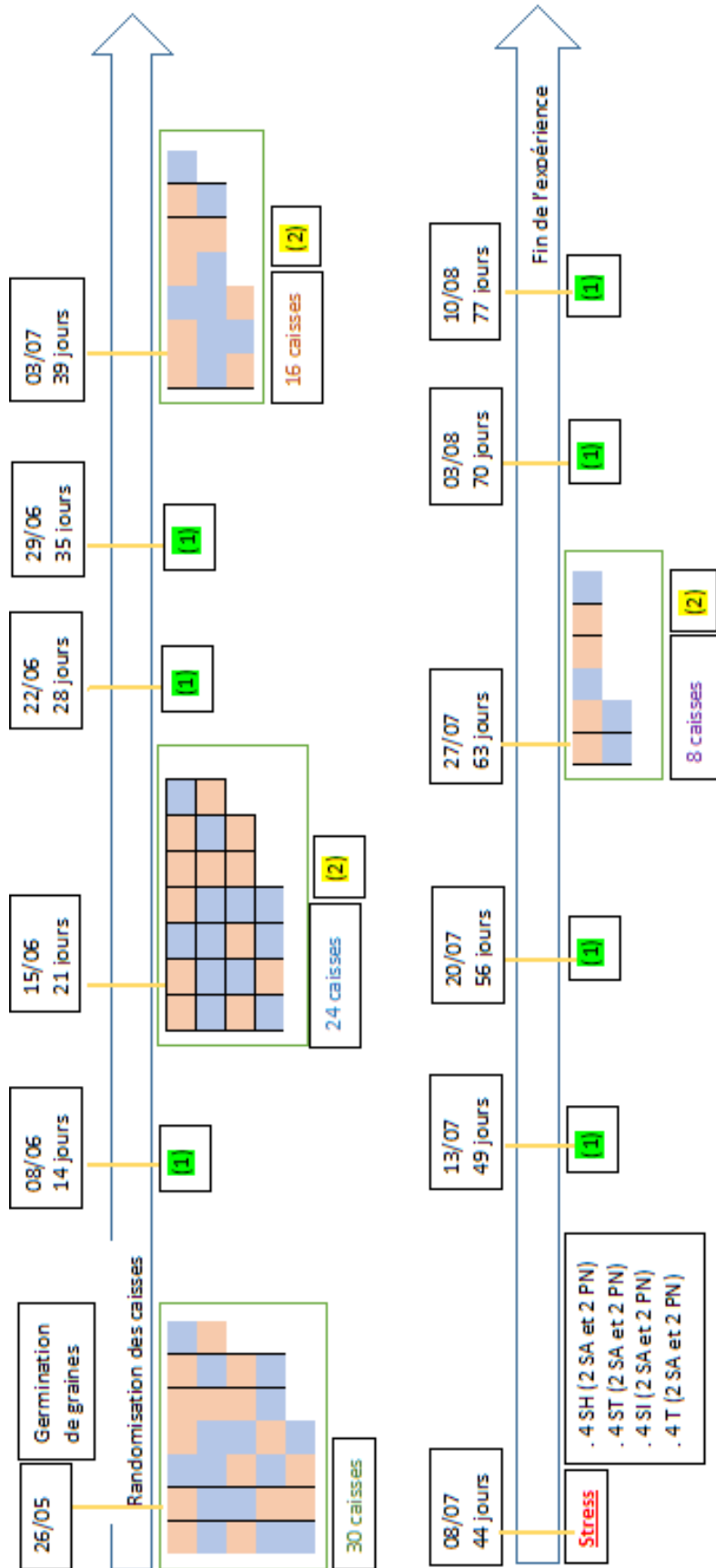
Annexe 6

Schéma de l'expérience



Annexe 7

Protocole expérimental simplifié



Protocole expérimental, synthétisant les types de mesure, les jours de mesure, le matériel végétal et les stress environnementaux.

Légende : SH : Stress Hydrique / ST : Stress Thermique / SI : Stress Inondation / T : Témoin / Mix : Mélange des 2 espèces SA et PN.

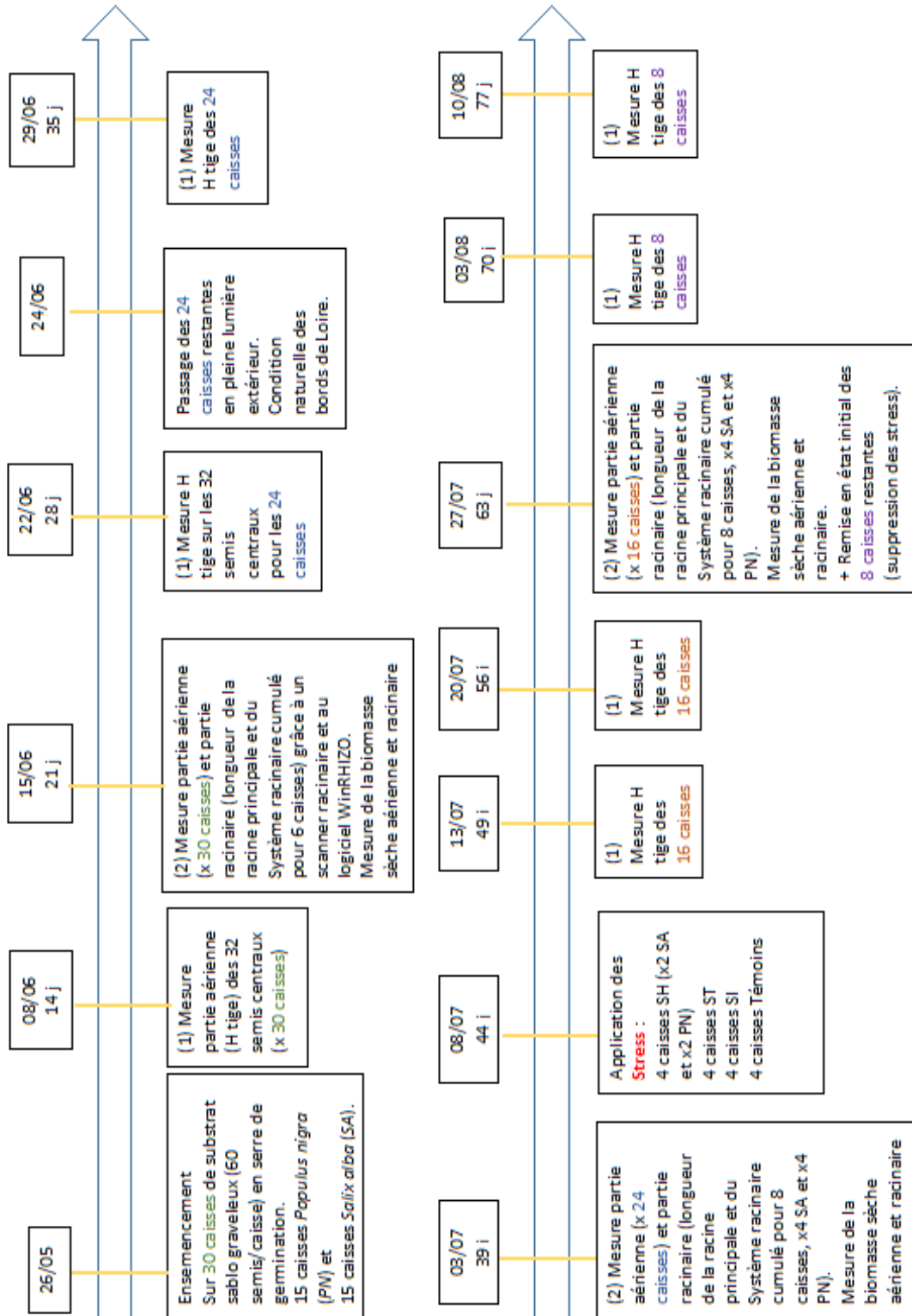
(1) mesure H tige / (2) : mesure H tige, L rp, L src, Biomasse sèche aérienne et racinaire

■ : Peuplier noir, *Populus nigra* (PN)

■ : Saule blanc, *Salix alba* (SA)

Annexe 8

Protocole expérimental détaillé



Annexe 9

Tableau des effectifs mesurés au cours de l'expérience :

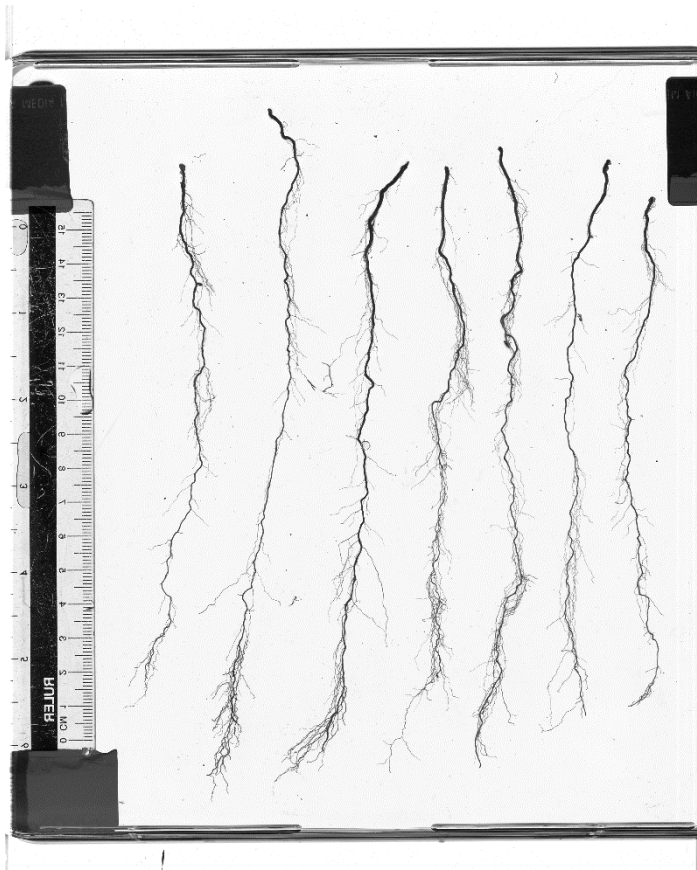
Nb individus mesurés / Modalité	Nb jours / Partie mesurée	Espèce	14	21	28	35	39	49	56	63	70	77
Témoins	Aérien	PN	437	437	346	346	346	53	53	53	27	27
		SA	468	468	374	374	374	61	61	61	30	30
	Racinaire	PN		91			114			26		
		SA		94			128			31		
Stress hydrique	Aérien	PN						60	60	60	29	29
		SA						63	63	63	32	32
	Racinaire	PN								31		
		SA								32		
Stress thermique	Aérien	PN						60	60	60	28	28
		SA						62	62	62	30	30
	Racinaire	PN								32		
		SA								32		
Stress inondation	Aérien	PN						51	51	51	24	24
		SA						47	47	47	22	22
	Racinaire	PN								27		
		SA								25		

Les stress ont été appliqués au 44^e jour. Une partie des caisses utilisées initialement comme témoins ont servi pour les différentes modalités de stress.

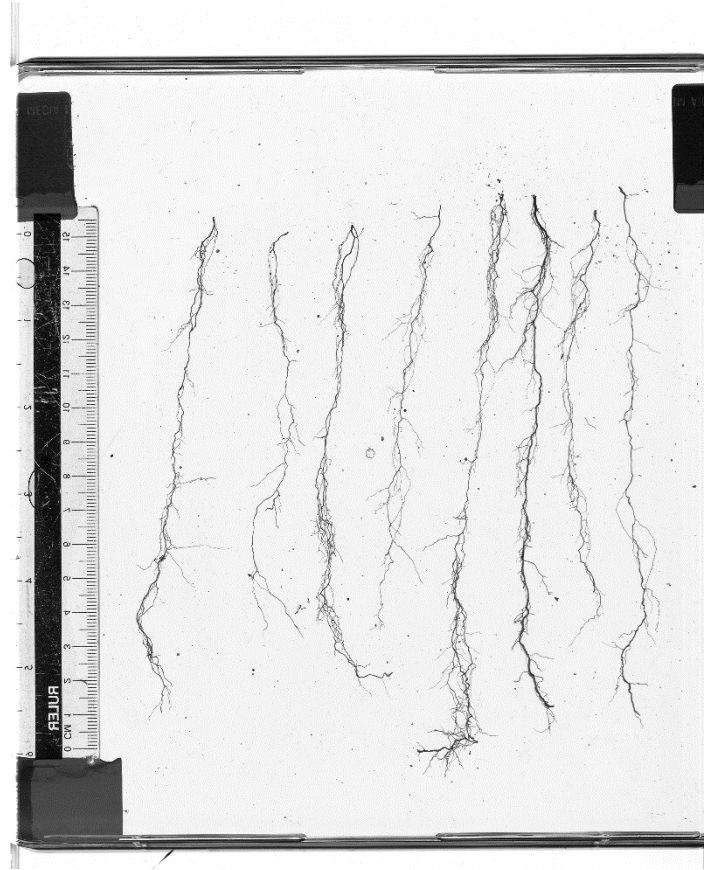
L'analyse du système racinaire étant destructif pour le semis (aux jours 21, 39, 63), les effectifs chutent au cours de l'expérience.

Annexe 10

Exemple de scan racinaire :



Exemple de scan racinaire de *Populus nigra*. Caisse témoin après 63 jours de croissance (individus 1 à 7).



Exemple de scan racinaire de *Salix alba*. Caisse témoin après 63 jours de croissance (individus 1 à 8).

Annexe 11

Tableau des ratios au cours de l'expérience

Tableau des résultats : après 21 jours de croissance :

Moyenne ratio / Espèce	Peuplier noir (x 3 caisses) <i>Populus nigra</i>	Saule blanc (x 3 caisses) <i>Salix alba</i>
H tige / L rp (1)	0,09	0,05
B a / B r (2)	1,53	0,83
H tige / L src (3)	0,03	0,02

Tableau des résultats : après 39 jours de croissance :

Moyenne ratio / Espèce	Peuplier noir (x 4 caisses) <i>Populus nigra</i>	Saule blanc (x 4 caisses) <i>Salix alba</i>
H tige / L rp (1)	0,1	0,02
B a / B r (2)	2,28	1,01
H tige / L src (3)	0,03	0,01

Tableau des résultats : après 63 jours de croissance :

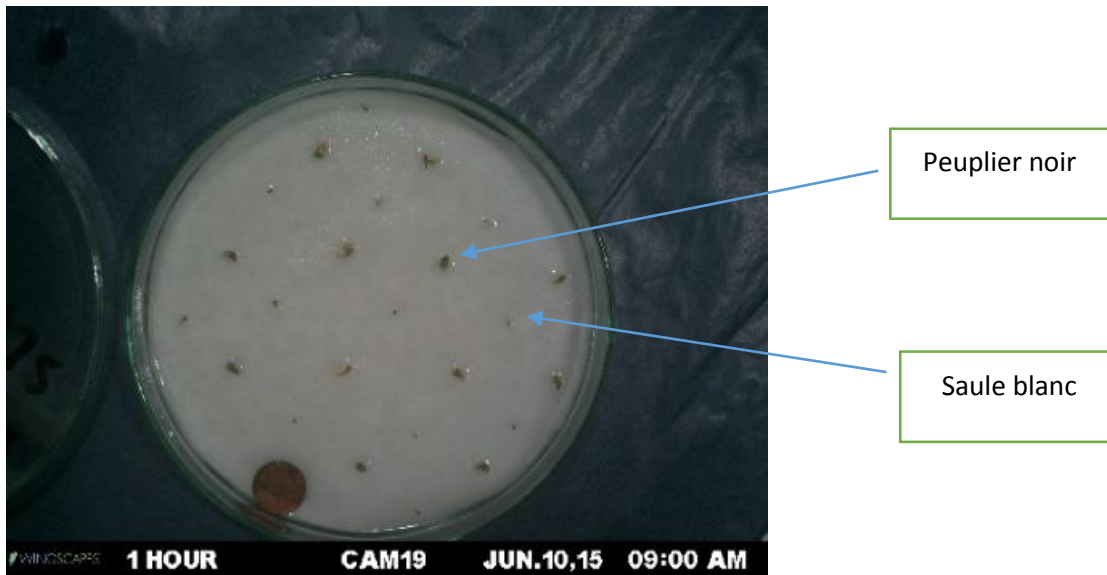
Moyenne ratio / Espèce	Peuplier noir (x 1 caisse) <i>Populus nigra</i>	Saule blanc (x 1 caisse) <i>Salix alba</i>
H tige / L rp (1)	0,15	0,04
B a / B r (2)	2,95	1,8
H tige / L src (3)	0,04	0,01

Tableau des résultats : semis *in situ* RNN de Saint-Mesmin, des îles de Mareau-aux-prés sur 2 zones A et B. 32 semis par sites ; le 20/07/2015 :

Moyenne ratio / Espèce	Peuplier noir <i>Populus nigra</i>
H tige / L rp (1)	0,2
B a / B r (2)	2,15
H tige / L src (3)	0,03

Annexe 12

Photographie de l'expérience complémentaire de suivi de la germination de graine de Saule blanc et de Peuplier noir sur boîte de pétri :



T = 29h : apparition des cotylédons chez *Salix alba* et *Populus nigra* et du début de la racine principale pour *Populus nigra*.



T = 154h : Croissance rapide de la tige et de la racine principale pour PN. Alors que pour SA, la croissance de la racine principale est plus lente.

PN :

V moy c a = 2,4 mm/j

V moy c r = 1,2 mm/j

SA :

V moy c a = 0,6 mm/j

V moy c r = 0,09 mm/j

Légende :

V moy c a (vitesse moyenne de croissance aérienne pour la première semaine de germination)

V moy c r (vitesse moyenne de croissance racinaire pour la première semaine de germination)