



Pôle Grenoblois d'étude et de recherche
pour la prévention des Risques Naturels



Laboratoire d'Ecologie Alpine

Programme de recherche 2009

Financé par le Conseil général de l'Isère

Rapport scientifique

Génie végétal en milieu alpin
Evaluation des capacités de bouturage et de la résistance à la
sécheresse de *Myricaria germanica*

Coordinatrice :

Catherine Lavaine

Cemagref de Grenoble (UR EM)
Ecole Normale supérieure de Lyon (UMR 5600)

Participants :

André Evette
Cemagref de Grenoble (UR EM)

&

Hervé Piégay
Ecole Normale supérieure de Lyon (UMR 5600)

Sommaire

I Remerciements.....	4
II Contexte et objectifs.....	4
II.1 Erosion de berge et génie végétal.....	4
II.2 Sécheresse.....	4
II.3 Techniques de génie végétal et contraintes exercées par le milieu.....	4
II.4 Intérêt de nouvelles espèces.....	5
III Etude bibliographique de l'écologie et des caractéristiques de <i>Myricaria germanica</i> et de <i>Salix Purpurea</i> , l'espèce témoin.....	6
IV Expérimentations, protocoles et résultats.....	11
IV. 1 Présentation des méthodes expérimentales.....	11
IV.2 Comparaison des caractéristiques végétales entre expérimentations.....	11
IV. 3 Expérimentation en tubes.....	13
IV. 3. 1 Objectifs et hypothèses.....	13
IV. 3. 2 Protocole expérimental.....	13
IV. 3. 3 Résultats et discussion.....	14
IV. 3. 4 Conclusion de l'expérimentation en tubes.....	20
IV. 4 Expérimentation en berge.....	22
IV. 4. 1 Objectifs et hypothèses.....	22
IV. 4. 2 Protocole expérimental.....	22
IV. 4. 3 Résultats et discussion.....	24
IV. 4. 4 Conclusion de l'expérimentation en berge.....	25
IV. 5 Expérimentation en rhizotron.....	26
IV. 5. 1 Objectifs et hypothèses.....	26
IV. 5. 2 Protocole expérimental.....	26
IV. 5. 3 Résultats et discussion.....	28
IV. 5. 4 Conclusion de l'expérimentation en rhizotron.....	31
VI Traduction opérationnelle.....	33
VII Valorisation effectuée.....	34
VIII Bibliographie.....	35
Annexe 1.....	37

Résumé

L'érosion des berges de rivière, bien qu'étant un phénomène naturel, peut être limitée en présence d'enjeux anthropiques riverains par l'installation d'une couverture végétale dense et pérenne, communément appelée « ouvrage de génie végétal ». L'hégémonie des saules, espèces classiquement utilisées, ainsi que les contraintes stationnelles des milieux alpins (xéricité du substrat et perturbations mécaniques importantes) orientent la recherche vers l'étude de nouvelles espèces, potentiellement utilisables en génie végétal.

L'espèce inféodée aux milieux rivulaires alpins que représente *Myricaria germanica* est ici retenue pour ses facultés d'ancrage, sa résistance à l'ensevelissement et son appareil aérien très rétenteur en particules fines. Le projet présenté ici a pour objectif principal d'apporter des connaissances afin d'utiliser cette espèce en génie végétal.

Trois séries d'expérimentations ont été menées sur des boutures de cette espèce : une sur une berge de cours d'eau et deux dans des containers.

Les résultats montrent que cette espèce présente un taux de reprise au bouturage compatible avec une utilisation en génie végétal. Les expérimentations présentées dans ce rapport montrent également une résistance à la sécheresse accrue par rapport à celle des saules, quelle que soit la durée et l'intensité de cette sécheresse. Certaines des expérimentations indiquent que *M. germanica* présente un comportement racinaire pour l'accès à la nappe phréatique assez similaire à celui des saules, ce qui suggère une exploitation rapide de la nappe phréatique et un enracinement profond. Ses facultés de résistance à la sécheresse, sa répartition naturelle en zone alpine, sur des substrats grossiers et pauvres en matière organique en font de plus une candidate intéressante pour son implantation sur des ouvrages en milieu alpin. L'utilisation de *M. germanica* en génie végétal permettrait également d'augmenter la biodiversité sur ces ouvrages, biodiversité considérée comme un facteur de stabilité des ouvrages du fait de la variété des formes aériennes et racinaires alors présentes.

I Remerciements

Les auteurs remercient le Pôle Grenoblois des Risques Naturels pour son soutien financier indispensable à la réalisation des différentes études présentées dans ce document. Ils remercient également Jacky Girel pour ses remarques judicieuses concernant l'écologie de la plante étudiée ici.

II Contexte et objectifs

II.1 Erosion de berge et génie végétal

L'érosion de berge est un phénomène naturel qui participe activement aux processus de dynamique fluviale et de diversification des habitats des cours d'eau. Elle ne doit être contrée que lorsque les milieux riverains accueillent des infrastructures importantes pour la collectivité que l'on est tenu de protéger. Pour ce faire, une des techniques employées par les gestionnaires en complément ou en remplacement du génie civil est l'implantation d'une couverture végétale dense et pérenne sur la zone en érosion afin de fixer la berge.

Un des principaux objectifs des protections de berge en génie végétal est de mimer les dynamiques de végétation que l'on observe classiquement sur les marges des rivières naturelles (Adam, Debiais et al. 2008). Ceci permet une meilleure intégration des ouvrages sur le plan paysager, tout en favorisant la biodiversité et en se protégeant contre l'érosion. Les gestionnaires diversifient ainsi souvent les espèces ligneuses en distinguant, lors de l'implantation des espèces, une zone de haut de berge (avec des espèces de milieu plus xérique ou moins tolérante à l'inondation et aux fortes vitesses d'écoulement) et une zone de pied de berge (avec des espèces de milieu humide mieux adaptées aux contraintes physiques).

II.2 Sécheresse

L'organisation des végétaux ripicoles est largement régie par les conditions hydro-climatiques, elles-mêmes sensibles aux changements globaux. Ces changements vont modifier les contraintes exercées sur les végétaux. Ces contraintes peuvent par exemple correspondre à des sécheresses résultant d'un abaissement de la nappe phréatique (sécheresse phréatique) ou d'un déficit de précipitations (sécheresse météorologique) et bien souvent à une action simultanée des deux phénomènes (Panu and Sharma 2002).

Les sécheresses, quelles qu'elles soient, sont caractérisées par deux principaux paramètres : la durée et l'intensité.

II.3 Techniques de génie végétal et contraintes exercées par le milieu

Les techniques de génie végétal s'appliquent particulièrement bien sur les berges de cours d'eau européens. De toutes les techniques, la plus simple et la plus commode à mettre en place reste le bouturage de ligneux, essentiellement de saules arbustifs.

Les saules sont couramment utilisés dans les techniques de génie végétal mises en œuvre pour la stabilisation des berges fluviales du fait de leurs caractéristiques écologiques particulièrement adaptées aux milieux alluviaux (Kuzovkina-Eischen 2003; Kuzovkina and Volk 2009). En effet, l'excellent taux de reprise des saules et leur capacité de multiplication végétative (Gray and Sotir 1996; Graf, Böll et al. 2003), leur tolérance à l'inondation et à l'anoxie (Kramer, Vreugdenhil et al. 2008), la résistance relative à la sécheresse de certaines de ces espèces (Van Splunder, Voesenek et al. 1996; Yang, Zhao et al. 2004; Niinemets and Valladares 2006), la biomasse et la structure de leur chevelu racinaire (Rytter and Hansson 1993; Crow and Houston 2004) et leur résistance à l'arrachement (Karrenberg, Blaser et al. 2003) en font d'excellentes espèces stabilisatrices de berges.

Cependant, les sécheresses susmentionnées durant les premiers mois suivant l'installation des boutures est considérée comme l'un des principaux facteurs limitant le succès des techniques de génie végétal (Pezeshki, Li et al. 2007). En effet, lors de la création d'ouvrages sur berges, des problèmes zonaux et temporels de disponibilité en eau se posent pour les jeunes boutures, dépendant de l'intensité et de la durée des sécheresses. La rapidité de développement du front racinaire et donc l'exploitation de la nappe phréatique, ainsi que les capacités de résistance au stress hydrique conditionnent donc en grande partie la réussite et la pérennité des boutures.

II.4 Intérêt de nouvelles espèces

La composition habituelle des ouvrages de protection de berge en espèces liées à des habitats frais et/ou humides, comme les saules et espèces associées est ainsi une contrainte forte lors des épisodes de sécheresse. L'utilisation d'espèces plus adaptées aux milieux secs apparaît ainsi intéressante. Par ailleurs, il est également pertinent d'élargir le nombre d'espèces utilisées pour promouvoir la diversité paysagère ainsi qu'une certaine mixité de racines et de formes. Ces mixités sont en effet connues pour augmenter la résistance d'un ouvrage à l'érosion (Miller and Jastrow 1990; Scott 1998; Körner and Spehn 2002). D'autres espèces potentiellement stabilisatrices de berges peuvent dès lors être sélectionnées pour répondre à ces différentes exigences.

Cependant les espèces ligneuses pressenties se doivent de présenter des traits biologiques intéressants pour un ouvrage de génie végétal et qui soient semblables à ceux des saules. Leur rapport de biomasses aérienne sur souterraine doit être faible, pour une bonne tenue des sols et leur taux de reprise au bouturage doit être élevé pour permettre un bon développement du couvert végétal. Leurs tiges et racines doivent aussi être résistantes vis-à-vis des contraintes mécaniques (arrachement), tolérer l'alternance « découverture /ensevelissement » sédimentaire, les inondations et l'anoxie, et avoir la faculté de coloniser un substrat grossier, voire nu (Schiechtel 1973; Schiechtel and Stern 1996).

Myricaria germanica a ainsi été retenue car c'est une espèce compagne des saules dans les saussaies préalpines et les galeries et fourrés riverains méridionaux. Elle est principalement présente sur les bancs des rivières en tresses et est actuellement en récession dans l'Arc Alpin du fait de la chenalisation des cours d'eau. Elle peine à se maintenir dans les milieux chenalés, qui ne présentent plus d'habitats propices à son implantation. Cette espèce riparienne est susceptible de présenter des caractéristiques semblables aux espèces traditionnellement utilisées en génie végétal et de résister à la sécheresse du fait de son implantation naturelle sur des substrats grossiers, réputés peu rétenteurs en eau.

Toutefois les caractéristiques biologiques et mécaniques de *Myricaria germanica* sont encore amplement méconnues et cela justifie une étude préliminaire de ces caractéristiques.

Les objectifs de cette étude sont donc de tester les capacités de *Myricaria germanica* pour un usage en génie végétal, en prenant comme référence celles des saules. On a ainsi cherché à répondre aux questions suivantes :

- Quel est le taux de reprise au bouturage de cette espèce ?
- Quelles sont les modalités et les vitesses de développement des biomasses aériennes et racinaires comparativement à celles du saule pourpre, sous différentes conditions de disponibilité en eau ?

III Etude bibliographique de l'écologie et des caractéristiques de *Myricaria germanica* et de *Salix Purpurea*, l'espèce témoin

Le matériel végétal étant le même dans les trois expérimentations (mêmes génotypes et même espèce) et afin de ne pas être redondant, celui-ci sera présenté avant les protocoles propres à chaque expérimentation.

Myricaria germanica

Le biotope de *M. germanica* se compose d'un sol constitué de matériaux grossiers et pauvres en matière organique (Rameau, Mansion et al. 2008). Les éléments fertilisants ne sont guère retenus du fait de la granulométrie grossière. La nappe alluviale peut être facultative, *M. germanica* étant considérée comme phréatophyte facultatif. La plante étant héliophile, les sites à *M. germanica* se doivent d'être découverts et ensoleillés. De même, ils doivent présenter des crues régulières avec remaniements sédimentaires (Fig. 1). Ces perturbations sont nécessaires à la reproduction sexuée de cette espèce et à son maintien dans le milieu considéré car l'arasement des saulaies par les crues lui permet de ne plus entrer en concurrence pour la lumière avec les saules.



Fig. 1 : *M. germanica* dans son milieu naturel (Romanche, Isère), Crédit : Vanpeene, S.

La répartition actuelle de *M. germanica* en France se borne aux bancs et aux marges des rivières en tresses des Alpes, des Pyrénées, de la vallée de la Durance et des bords du Rhin (Rameau, Mansion et al. 2008). Cette espèce, en cours de régression dans l'arc alpin et protégée dans le reste de l'Europe (Autriche, Allemagne, Suisse et Italie) est observée essentiellement dans des milieux à forte valeur patrimoniale, ayant fait l'objet d'inventaire ZNIEFF. Elle a cependant une forte amplitude altitudinale, on la retrouve en effet de 300 m à 2350 m d'altitude (Kammerer 2003; Rameau, Mansion et al. 2008).

Cette espèce héliophile, du fait d'un taux de croissance plus faible que celui des saules, entre en concurrence avec ceux-ci dès que le milieu se stabilise. Elle ne parvient donc à se maintenir que si la dynamique fluviale est conservée et par là-même la chenalisation limitée (Girel 2010).

Ses caractéristiques biologiques et mécaniques découlent directement de son caractère pionnier. En effet, elle se régénère aisément et rapidement par bouturage (Bill, Spahn et al. 1997; Kudrnovsky 2002) (Fig. 2). Les rapports de biomasses aériennes sur souterraines de jeunes plantules sont très faibles car la plante investit massivement ses ressources dans la production de racines afin de s'ancrer efficacement et de monopoliser les ressources hydriques (Benkler and Bregy 2010). Il en découle un système racinaire puissant et profond (Kudrnovsky 2002; Kammerer 2003) (Fig. 3).



Fig. 2 (à gauche) : Bouture de *M. germanica* âgée de trois mois, crédit Lavaine, C.

Fig. 3 (à droite) : Racine pivot de *M. germanica* en milieu naturel, Vénéon, Isère, crédit Lavaine, C.

Son feuillage très souple lui permet de ne pas opposer de résistance à l'écoulement des crues et ainsi de résister à l'arrachement (Fig. 4). L'importance ramification aérienne lui permet également de piéger efficacement les sédiments (effet peigne) et de protéger les sols (effet tapis). Elle résiste à l'ensevelissement provoqué par les crues via l'émission de tiges à partir du collet (Muller 1995; Bill, Spahn et al. 1997) (Fig.5).



Fig. 4 (à gauche) : Tiges de *M. germanica* couchées par les crues et repoussant à la perpendiculaire des précédentes, crédit Lavaine, C.

Fig. 5 (à droite) : Tiges émises à partir du collet après ensevelissement de *M. germanica*, crédit Lavaine, C.

Enfin, comme chez tous les *Tamaricaceae*, famille à laquelle *M. germanica* appartient, il existe une certaine résistance à la sécheresse liée à la morphologie de l'appareil aérien. Celui-ci se caractérise par une surface évaporative très faible résultant de la réduction et de la disposition en écailles des feuilles (Bill, Spahn et al. 1997) (Fig. 6).

Salix purpurea

L'espèce utilisée comme témoin (*Salix purpurea*) présente une large amplitude écologique. Elle est en effet ubiquiste à l'échelle française. Son biotope est varié mais elle reste bien sûr inféodée aux milieux ripariens jusqu'à 2300 m d'altitude. Il arrive cependant que cette espèce soit retrouvée, du fait de sa grande tolérance aux facteurs abiotiques, le long

des chemins et en bordure des bois. Elle s'installe sur les sols argileux, caillouteux et/ou sableux, les alluvions grossières. Comme toute plante pionnière, elle est héliophile et à l'instar de la plupart des plantes ripariennes, la nappe alluviale est obligatoire pour son développement et son maintien dans le milieu colonisé (Fig. 7).



Fig.6 (à gauche) : Bouture de *M. germanica* avec les feuilles en écailles visibles, crédit Lavaine, C.

Fig. 7 (à droite) : Bouture de *S. purpurea*, crédit Lavaine, C.

Les deux espèces présentées ici ont été échantillonnées en période de dormance végétative (février 2010 pour l'expérimentation en berge et en rhizotron et février 2009 pour l'expérimentation en tubes où les boutures ont enregistré deux cycles de sécheresse) et sur le même site. Il s'agit de la zone de Plan du Lac, sur les bancs et la berge du Véneon, communes de Vénosc et Saint Christophe en Oisans, département de l'Isère (Fig. 8 & 9), altitude 1185 m.

Pour l'expérimentation en tubes, 12 génotypes ont été prélevés. Parmi ces génotypes, six ont été pris en plus grande quantité afin d'alimenter les expérimentations en berge (six génotypes) et en rhizotron (cinq génotypes).

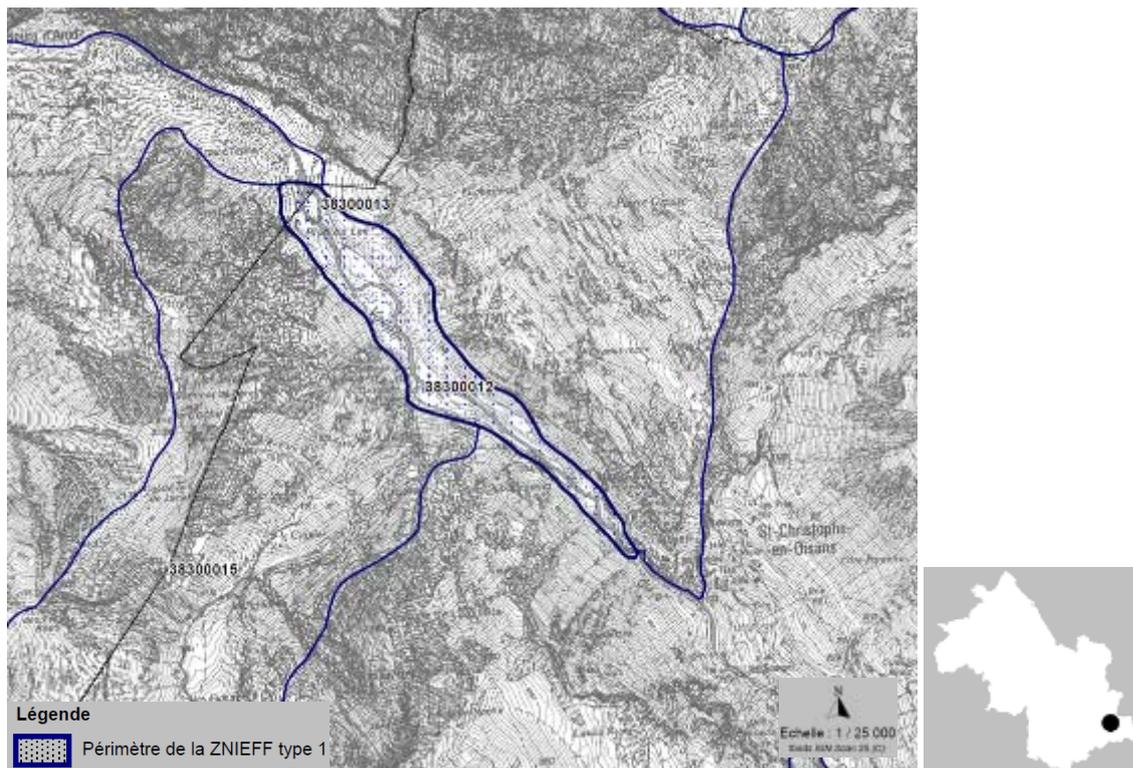


Fig. 8 : Carte de Plan du Lac, crédit Direction Régionale de l'Environnement, Rhône-Alpes



Fig. 9 : Vue générale de l'atterrissement où ont été prélevées les boutures, crédit Lavaine, C.

IV Expérimentations, protocoles et résultats

IV.1 Présentation des méthodes expérimentales

Le projet initial incluait l'utilisation de chambre à ciel ouvert, cependant les premières expérimentations réalisées avec ce matériel se sont montrées décevantes. De plus, leur utilisation partiellement redondante avec l'expérimentation en tubes et la possibilité d'employer un système de visualisation complémentaire du système racinaire (rhizotron) a conduit à l'abandon de ce matériel au profit de l'acquisition de données plus nombreuses et beaucoup plus précises.

Trois méthodes expérimentales sont ainsi retenues :

- une expérimentation en tubes avec contrôle du paramètre « intensité » de la sécheresse, permettant de travailler sur les parties aériennes et racinaires. L'intensité correspond à deux modalités de sécheresse : une limitante et l'autre non limitante.
- une expérimentation en rhizotron permettant la visualisation du système racinaire (rhizotron) et son étude en fonction du temps.
- une expérimentation *in situ* sur le paramètre « durée » de la sécheresse à partir de boutures plantées en berge, et à différentes distances du niveau de l'eau. La durée correspond au temps nécessaire pour que le front racinaire atteigne la nappe.

Pour chaque expérimentation, des boutures de saule pourpre (*Salix purpurea*), espèce communément utilisée en génie végétal, ont été soumises au même traitement et servent de témoin.

Les trois expérimentations sont présentées séparément car les protocoles et les caractéristiques végétales varient fortement entre expériences. Un soin particulier est apporté au traitement des données en fonction du diamètre des boutures mises en œuvre dans l'expérimentation en tubes et en berge, car le diamètre des boutures de *M. germanica* était en moyenne inférieur à celui des boutures de *S. purpurea*. En effet, il est connu que les réponses biologiques et les taux de reprise et de survie varient en fonction du diamètre de la bouture à l'implantation.

IV.2 Comparaison des caractéristiques végétales entre expérimentations

Les caractéristiques étudiées sont communes à toutes les expérimentations présentées plus bas, ce qui permet de comparer les réponses à la sécheresse de *M. germanica* et l'espèce témoin quelle que soit la méthode expérimentale utilisée. Il s'agit de réponses biologiques caractéristiques de la réponse à la sécheresse qui sont aisément mesurables et utilisées depuis de nombreuses années. En effet, chez tous les ligneux, les réponses physiologiques au stress hydrique sont couramment accompagnées par des manifestations morphologiques (Rood *et al.* 2003). Les effets de la sécheresse sur des individus sensibles se remarquent par exemple par une baisse du diamètre du tronc, du diamètre cumulé des rejets ou des racines, une production de biomasse moindre (Rood, Braatne *et al.* 2003; Llorens, Pennuelas *et al.* 2004; Ohashi, Nakayama *et al.* 2006; Coopman, Jara *et al.* 2008), un ratio de biomasses aérienne sur souterraine abaissé (Chapin III, Schulze *et al.* 1990; Matthews, Reddy *et al.* 1990; Chapin

1995; Passioura 1996; Van Splunder, Voeselek et al. 1996; Pace, Cralle et al. 1999; Fang-Lan, Wei-Kai et al. 2009; Hund, Ruta et al. 2009) et une profondeur racinaire plus élevée (Passioura 1996; Pradhan, Mahata et al. 2003; Hund, Ruta et al. 2009).

Une plante impactée par la sécheresse aura un diamètre cumulé des tiges primaires diminué et/ou une production de biomasses moindre. A contrario, elle aura un ratio de biomasses en faveur des racines et développera plus de racines fines et moins de racines grossières.

Le tableau ci-dessous (Fig. 10) résume les différentes caractéristiques mesurées en fonction des expérimentations.

Caractéristiques mesurées/Expérimentations	Rhizotron		Berge		Tubes	
	<i>Mg</i>	<i>Sp</i>	<i>Mg</i>	<i>Sp</i>	<i>Mg</i>	<i>Sp</i>
viabilité	x	x	x	x	x	x
production de biomasses						x
rapport de biomasses	x	x			x	x
diamètre cumulé			x	x	x	x
hauteur des plants			x	x		
profondeur atteinte	x	x				
abondance racinaire	x	x				
biomasse racinaire à différents horizons	x	x				
nombre de racines à diamètre > à 5/10 mm					x	x

Fig. 10 : Caractéristiques biologiques mesurées dans les différentes expérimentations (*Mg* : *M. germanica* et *Sp* : *S. purpurea*)

IV. 3 Expérimentation en tubes

IV. 3. 1 Objectifs et hypothèses

Cette expérimentation avait pour objectif d'évaluer les taux de reprise au bouturage en l'absence de sécheresse, puis les taux de survie après deux cycles de sécheresse, ainsi que les réponses biologiques de *M. germanica* en fonction de deux intensités de sécheresse.

Il s'agissait de déterminer si cette espèce présente un intérêt comparable aux *Salix sp.* en termes de potentialités d'utilisation en génie végétal et ce, dans un objectif finalisé.

Les hypothèses concernant cette expérimentation présument des fortes potentialités de *M. germanica* en génie végétal alpin. Elles sont ainsi formulées et découlent pour certaines de la bibliographie (Schiechl and Stern 1996):

M. germanica présente un fort taux de reprise au bouturage du fait de son implantation naturelle dans des milieux soumis aux perturbations (Rameau, Mansion et al. 2008)).

Cette espèce doit également présenter une biomasse racinaire importante afin de disposer d'un ancrage efficace en berge (Kudrnovsky 2002) et d'une acquisition de la ressource en eau performante. Ceci peut être avéré par la production de biomasses, les rapports de biomasses en présence et absence de sécheresse.

M. germanica doit bien résister au stress hydrique induit par la sécheresse du fait de sa répartition sur des stations habituellement ensoleillées avec des substrats filtrants constitués de matériaux grossiers et de sa structure foliaire en écailles (Rameau, Mansion et al. 2008). Ce phénomène peut être démontré par les diamètres cumulés des rejets primaires, le nombre de racines primaires et les rapports de biomasses.

IV. 3. 2 Protocole expérimental

L'intensité de la sécheresse a été matérialisée par un déficit d'arrosage sur des boutures plantées dans des tubes contenant un substrat reconstituant un substrat alluvial montagnard (mélange de sable de rivière (85%) et d'amendement organique (15%)) (Fig. 11). Les modalités de sécheresse appliquées correspondent à 25% de la capacité au champ (modalité stressée) et à 100% de la CAC (modalité non stressée). La sécheresse à 25% de la CAC est considérée comme très intense pour la plupart des végétaux. L'expérimentation a été menée pendant deux cycles de végétation. 24 boutures, ont été extraites après deux cycles de sécheresse. Les modalités de sécheresse ont été appliquées au 7 juillet sur une durée de 42 jours, deux années de suite.

Sont présentés successivement : les taux de reprise et survie, les diamètres cumulés des rejets primaires, les biomasses aériennes et souterraines obtenues après sécheresse, le ratio de biomasses et la quantité de racines à diamètre supérieur à 5 et 10 mm. Les analyses statistiques sont essentiellement représentées par des moyennes catégorisées sur lesquelles sont reportés les résultats d'analyse de variance factorielle.



Fig. 11 : Tubes de culture contenant le substrat « alluvial » et des boutures de *M. germanica*, Pépinière Forestière de l'Etat d'Aix-les-Milles, crédit Lavaine, C.

IV. 3. 3 Résultats et discussion

- Taux de reprise et taux de survie :
Les taux de reprise au bouturage observés sont de 84% pour *M. germanica* et de 100% pour *S. purpurea*. Aucune mortalité liée au stress hydrique engendré par les modalités de sécheresse appliquées dans l'expérimentation n'a été notée. Le taux de survie à la sécheresse est donc de 100% pour les deux espèces.

- Diamètre cumulé des rejets primaires (Fig. 12) :

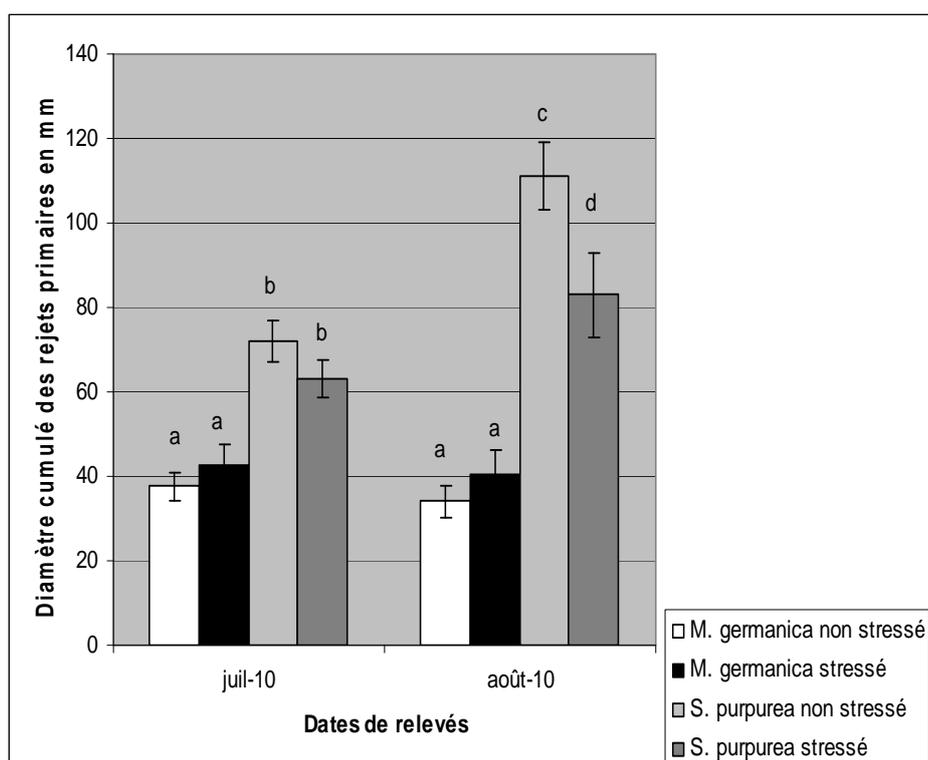


Fig. 12 : Diamètre cumulé moyen des tiges primaires issues de boutures de deux espèces ayant enregistré deux cycles de sécheresse commencés au 7 juillet, les barres verticales représentent les erreurs-types et les différentes lettres représentent une différence significative au seuil $\alpha=95\%$. Le second cycle de sécheresse est appliqué entre les deux relevés.

De manière générale, le diamètre cumulé moyen de *M. germanica* est plus faible que celui de *S. purpurea*. Les erreurs-types ne permettent pas d'observer une différence de comportement avant et après sécheresse chez *M. germanica* quel que soit le lot de boutures stressées en première année d'expérimentation. Au contraire, *S. purpurea*, bien que ne montrant pas de réelle différence avant l'application de la sécheresse, montre après la sécheresse un impact significatif de celle-ci via l'abaissement du diamètre cumulé de ses rejets primaires ($p=0.03$). Le diamètre cumulé des rejets primaires permet donc de considérer *M. germanica* comme une espèce plus résistante à la sécheresse que l'espèce témoin *S. purpurea* (Rood, Braatne et al. 2003; Llorens, Pennuelas et al. 2004; Ohashi, Nakayama et al. 2006; Coopman, Jara et al. 2008) et donc plus à même d'être implantée sur des ouvrages en milieu sec.

- Biomasses aériennes (Fig. 13) :

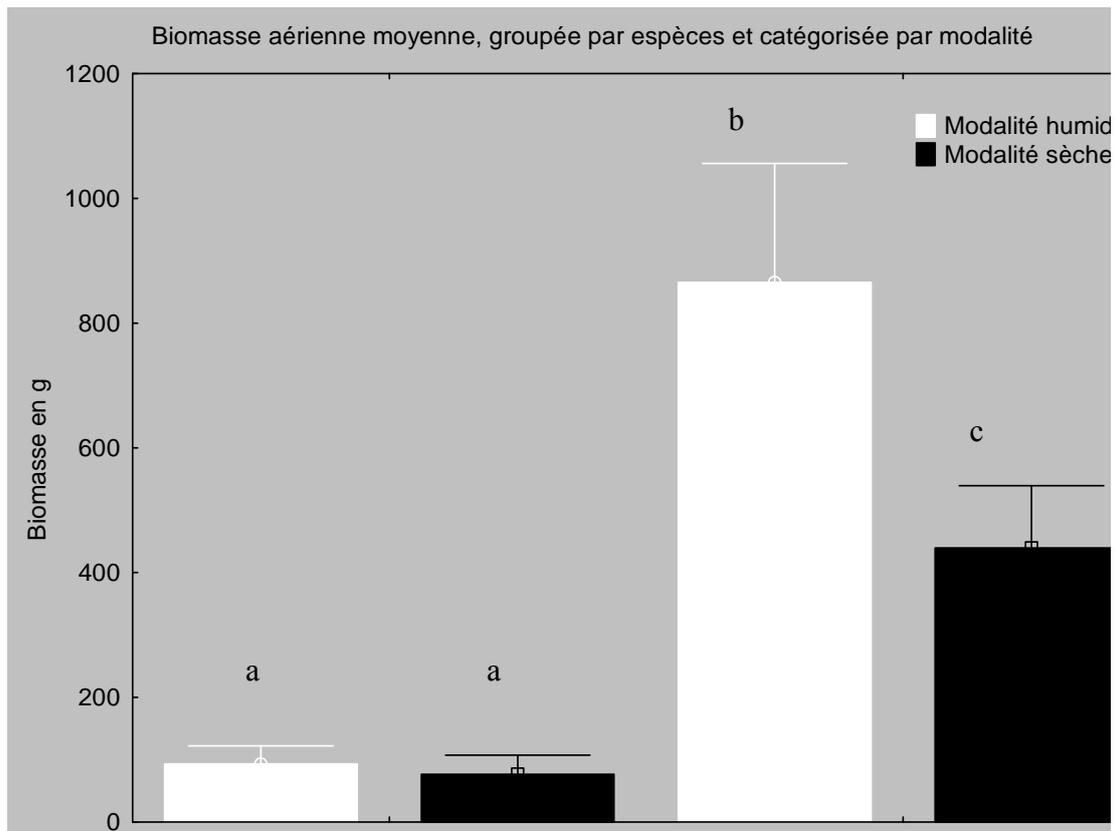


Fig. 13 : Biomasses aériennes moyennes issues de boutures de deux espèces ayant enregistré deux cycles de sécheresse, les barres verticales représentent les erreurs-types et les différentes lettres représentent une différence significative au seuil $\alpha=95\%$.

M. germanica ne montre pas de différence significative entre modalités en ce qui concerne sa production de biomasse aérienne, au contraire de *S. purpurea*, qui subit une baisse importante et significative (p espèce*modalité=0.00). L'absence de variation dans la production de biomasse aérienne chez *M. germanica* indique une absence d'impact de la sécheresse sur cette espèce.

D'une manière générale, *M. germanica* produit beaucoup moins de biomasse aérienne que *S. purpurea*, cela peut être dû au fait que la production de biomasse aérienne et le diamètre de la bouture à l'implantation sont corrélés ($p=0.92$, $r^2=0.27$, $b=0.52$) (faible diamètre pour *M. germanica* en comparaison de *S. purpurea*). La corrélation entre le diamètre des boutures et la production de biomasses a en effet déjà été démontré par Schiechl chez les saules (Schiechl 1980). Cette caractéristique biologique démontre une cinétique de croissance aérienne plus faible de *M. germanica* par rapport à l'espèce témoin, ce qui peut constituer un frein à son utilisation du fait que l'on recherche des espèces couvrant rapidement l'ouvrage, malgré une résistance à la sécheresse bien supérieure à celle de l'espèce témoin.

- Biomasses racinaires (Fig. 14)

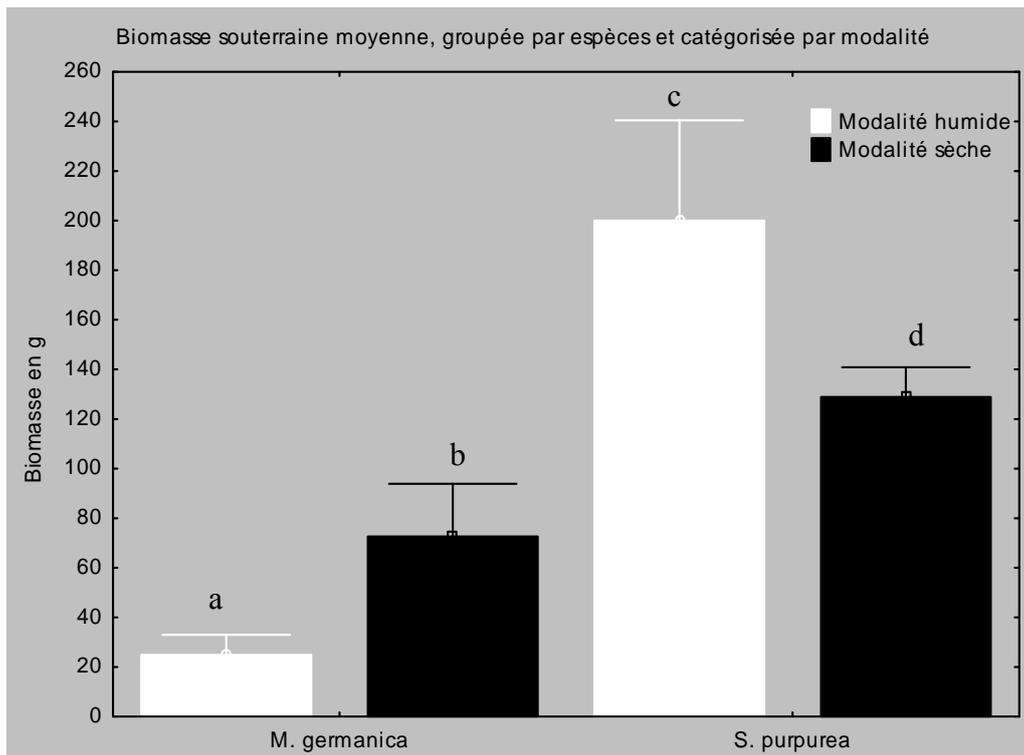


Fig. 14 : Biomasses souterraines issues de boutures de deux espèces ayant enregistré deux cycles de sécheresse, les barres verticales représentent les erreurs-types et les différentes lettres représentent une différence significative au seuil $\alpha=95\%$.

Entre modalités et entre espèces, les différences de production de biomasse racinaire sont significativement différentes : *M. germanica* en produit plus alors que *S. purpurea* en produit beaucoup moins en condition sèche (p espèce*modalité=0.00). *M. germanica* produit beaucoup moins que *S. purpurea* en condition humide, mais l'écart se réduit en condition sèche. De plus, la production de biomasse racinaire et le diamètre de la bouture à l'implantation sont corrélés ($p=0.66$, $r^2=0.36$, $b=0.60$), ce qui signifie que le faible diamètre de *M. germanica* la conduit à produire normalement moins de biomasse que *S. purpurea*. Le faible écart, cependant significatif, entre les deux espèces en modalité sèche suggère une plus forte production de biomasse racinaire à diamètre de bouture égal pour *M. germanica*. Cette caractéristique biologique montre que *M. germanica* remplit une des qualités demandées aux espèces de génie végétal : elle produit en effet des racines –certes en quantité moindre par rapport au saule témoin- mais en quantité accrue en cas de sécheresse.

- Ratio de biomasses (Fig. 15) :

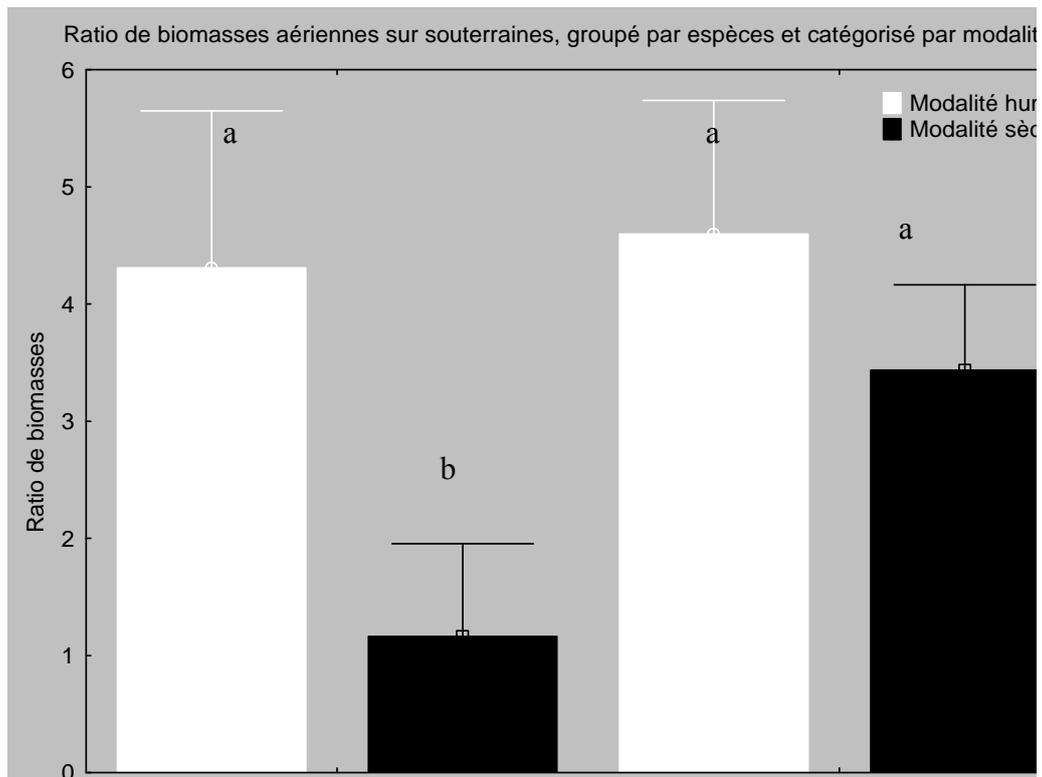


Fig. 15 : Ratio des biomasses aériennes sur souterraines issues de boutures de deux espèces ayant enregistré deux cycles de sécheresse, les barres verticales représentent les erreurs-types.

Une baisse significative du ratio de biomasses est observée au sein de chaque espèce en modalité sèche (p espèce*modalité = 0.04). Celle-ci est bien plus faible chez *S. purpurea* que chez *M. germanica*, ce qui suggère une meilleure acclimatation à la sécheresse de cette dernière par allocation racinaire préférentielle des ressources et également une meilleure exploitation des ressources en eau. Ceci est caractéristique des espèces vivant sur des sols bien drainés (Kudrnovsky 2002; Kammerer 2003). Une allocation racinaire dominante témoigne d'un plus fort investissement dans les systèmes propres à l'acquisition de la ressource en eau et à l'ancrage. Cette caractéristique représente un avantage en génie végétal car l'espèce présentera moins de résistance à l'écoulement et résistera mieux à l'arrachage.

- Nombre de racines à diamètre supérieur à 10 mm (Fig. 16) :

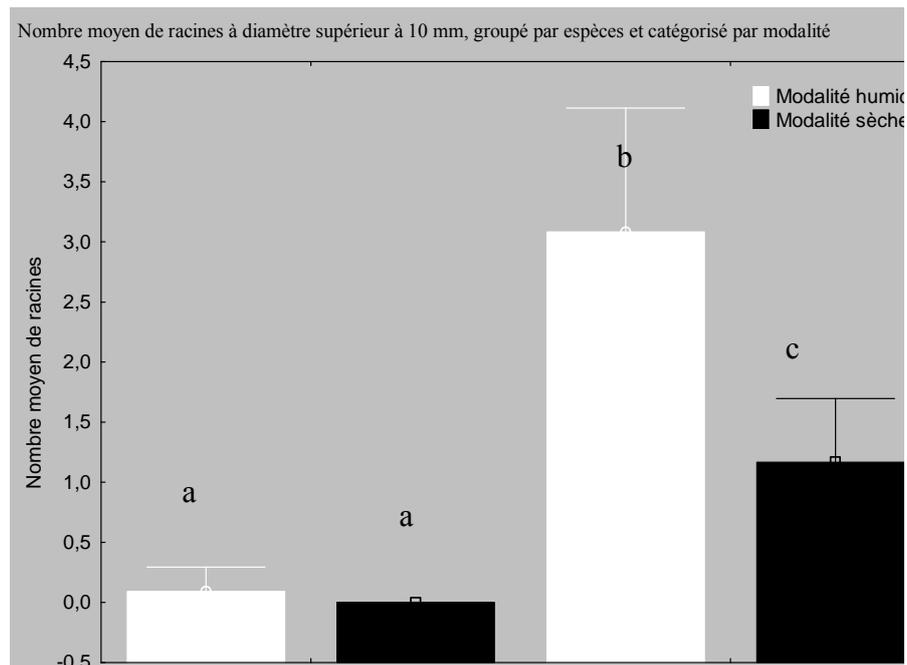


Fig. 16 : Nombre moyen de racines à diamètre supérieur à 10 mm issues de boutures de deux espèces ayant enregistré deux cycles de sécheresse, les barres verticales représentent les écarts-types.

La quantité de racines à diamètre supérieur à 10 mm chez *M. germanica* au bout de 16 mois de culture étant proche de 0 et non significative, elle ne sera pas étudiée. De plus, dans le cas de *M. germanica* en modalité sèche, aucun écart-type n'est observé du fait qu'aucune bouture n'a émis de racines à diamètre supérieur à 10 mm. A contrario, la quantité de racines chez *S. purpurea* baisse de façon significative en modalité sèche (p modalité pour *S. purpurea* = 0.00), ce qui dénote d'une allocation préférentielle des ressources au système racinaire propre à l'acquisition d'eau que sont des racines plus fines (Passioura 1983). Cette caractéristique permet de différencier les deux espèces uniquement en termes de développement de racines épaisses et donc de racines charpentières. En effet, du fait que *M. germanica* n'en a pas beaucoup produit par rapport à *S. purpurea* en 16 mois de culture indique une émission de grosses racines moins rapide que chez une espèce classiquement utilisée en génie végétal. Cela peut poser problème si l'on utilise uniquement *M. germanica* dans le cas d'une stabilisation de berge dans un milieu très contraint. L'introduction de plusieurs espèces, présentant des profils racinaires contrastés prend tout son sens dans cette situation. Cependant, ces espèces ne doivent pas être implantées trop près de *M. germanica* et ne doivent pas non plus produire une trop grande quantité de biomasse aérienne de façon verticale, étant donné que *M. germanica* est peu compétitive pour la lumière.

- Nombre de racines à diamètre supérieur à 5 mm (Fig. 17) :

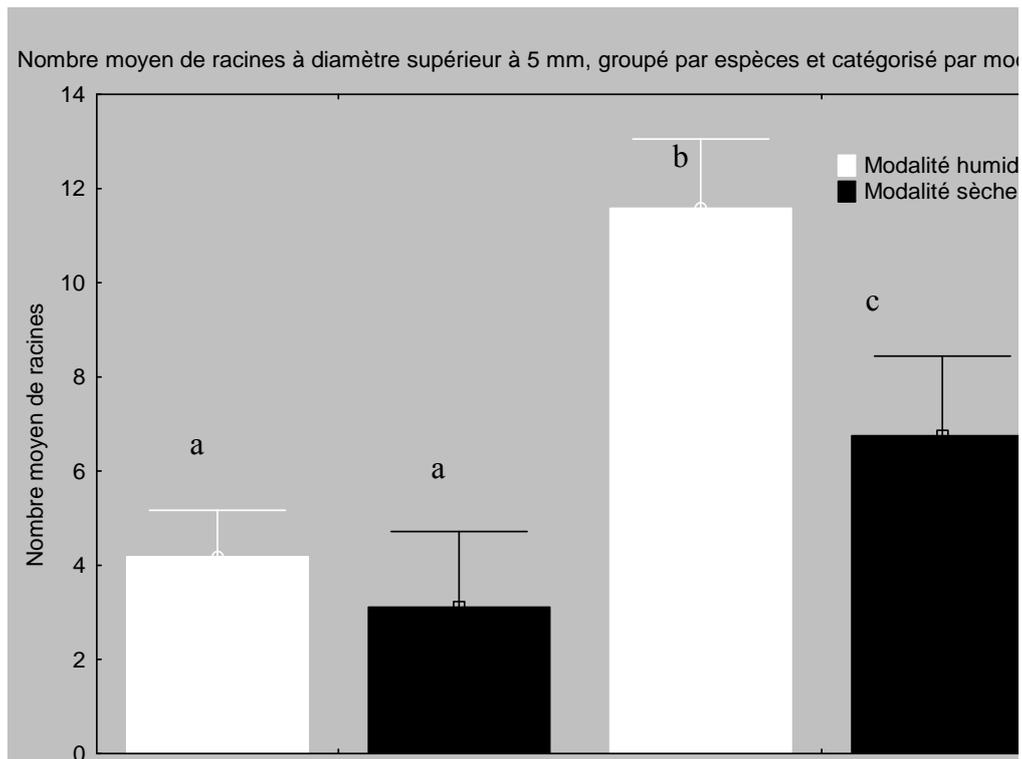


Fig. 17 : Nombre moyen de racines à diamètre supérieur à 5 mm issues de boutures de deux espèces ayant enregistré deux cycles de sécheresse, les barres verticales représentent les écarts-types.

M. germanica ne présente pas de différence significative entre modalités dans le nombre de racines à diamètre supérieur à 5 mm, a contrario de *S. purpurea* (p modalité pour *S. purpurea*=0.00), qui alloue alors une part préférentielle de ses ressources à la production de racines fines en modalité sèche pour capter davantage d'eau (Passioura 1983). L'absence de variation significative dans le nombre de racines à diamètre important pour *M. germanica* peut souligner une absence de besoin de s'acclimater à la sécheresse subie, ce qui place cette espèce comme potentiellement utilisable en génie végétal de milieu sec.

IV. 3. 4 Conclusion de l'expérimentation en tubes

Dans cette expérimentation, *M. germanica* présente un taux de reprise compatible avec une utilisation en génie végétal (84%). De plus, les diamètres cumulés des tiges primaires, les ratios de biomasses et le nombre de racines primaires à diamètre important montrent que *M. Germanica* résiste mieux au stress hydrique induit par la sécheresse que *S. purpurea*. *M. germanica* pourrait donc être utilisée en génie végétal de milieu sec (berge constitué d'un substrat très filtrant comme c'est le cas en milieu montagnard).

Cependant la croissance plus lente de *M. germanica* par rapport à *S. purpurea* comme le montre la figure 18, le nombre de racines avec un diamètre supérieur à 10 mm quasi nul et les productions de biomasses plus faibles, constitue un frein à une utilisation dans les mêmes conditions que *S. purpurea* en génie végétal. Cette espèce devra dès lors être réservée à certaines situations, à proximité non immédiate des saules pouvant lui faire de la concurrence

pour la lumière. *M. germanica* sera idéalement en bas de berge de milieux très perturbés (type cours d'eau alpin).



Fig.18 : différence de vitesse de développement des boutures avec au premier plan : boutures de *M. germanica* et au second plan : boutures de *S. purpurea*. Les boutures ont le même âge et ont été implantées en même temps, crédit Lavaine, C.

IV. 4 Expérimentation en berge

IV. 4. 1 Objectifs et hypothèses

Un dispositif expérimental *in situ* a été installé sur l'Arc, cours d'eau soumis à de fortes sécheresses estivales. Le paramètre de la sécheresse abordé ici est la durée, ce qui correspond au temps nécessaire au front racinaire pour atteindre la nappe. La durée de sécheresse est donc abordée ici synchroniquement, plusieurs épaisseurs de substrat correspondant à la hauteur de berge étant testées. Plus la distance entre la nappe phréatique et le front racinaire est importante, plus la bouture sera en situation de stress prolongé. Cette distance est ainsi un indicateur de la durée de la sécheresse. A cet effet, des boutures de *M. germanica* ont été implantées à différentes hauteurs de berge afin de voir si la plante supporte l'ensemble du gradient de xéricité présent naturellement sur une berge ou si elle affectionne les stations les plus basses, en comparaison avec *S. purpurea*.

Les hypothèses rattachées à cette partie sont donc formulées ainsi :

M. germanica doit présenter un taux de reprise élevée quel que soit la hauteur d'implantation du fait de sa répartition naturelle dans des milieux soumis aux perturbations (Rameau, Mansion et al. 2008)).

L'espèce ne doit pas dépasser *S. purpurea* en termes de hauteur à cause de ses tiges grêles et flexibles.

IV. 4. 2 Protocole expérimental

Un dispositif expérimental simulant un ouvrage de génie végétal a été installé sur la berge de rive droite de l'Arc sur le site de la Pépinière Forestière de l'Etat d'Aix-les-Milles (Fig. 19). Le plan de situation (Fig. 20) précise la localisation. 48 boutures de *M. germanica* (Mg) et 48 de *S. purpurea* (Sp) ont été implantées à huit hauteurs différentes de berge d'un ouvrage expérimental, sept boutures par hauteur de berge. Les boutures ont été irriguées pendant le mois suivant leur mise en place, à raison d'un arrosage d'une heure deux fois par semaine. L'irrigation a cessé immédiatement après la reprise effective de la plupart des boutures.

Les analyses statistiques consistent uniquement en moyennes.



Fig. 19 : Dispositif expérimental âgé de 5 mois, Pépinière Forestière de l'Etat d'Aix-les-Milles, crédit Evette, A.

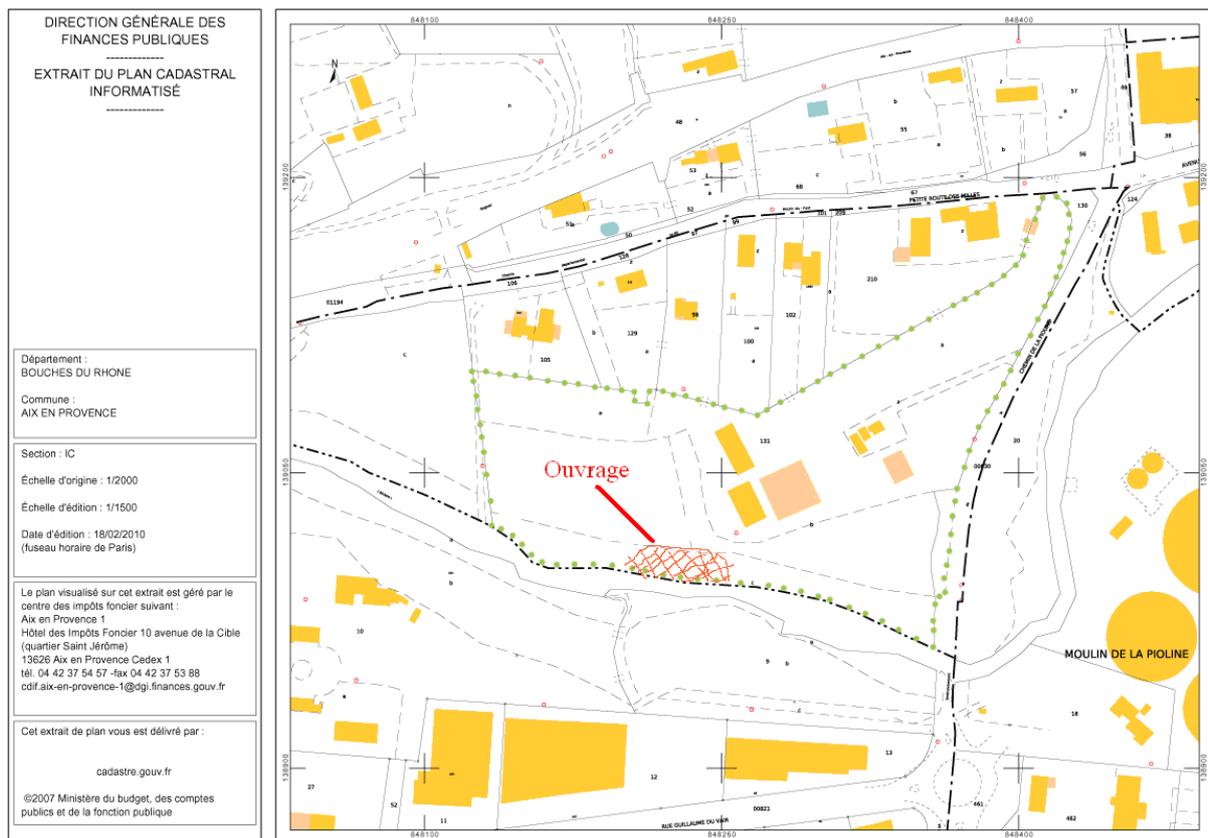


Fig. 20 : Plan de situation de l'ouvrage sur les parcelles de la Pépinière Forestière de l'Etat

IV. 4. 3 Résultats et discussion

Etant donné qu'il s'agit d'une expérimentation qui vient de démarrer, seuls les taux de reprise à trois mois et les hauteurs des plants en fonction de la distance à l'eau à 5 mois sont présentés ici. Malgré tout, nous disposerons de résultats à venir car cette station sera suivie sur plusieurs années.

- Taux de reprise (Fig. 21) :

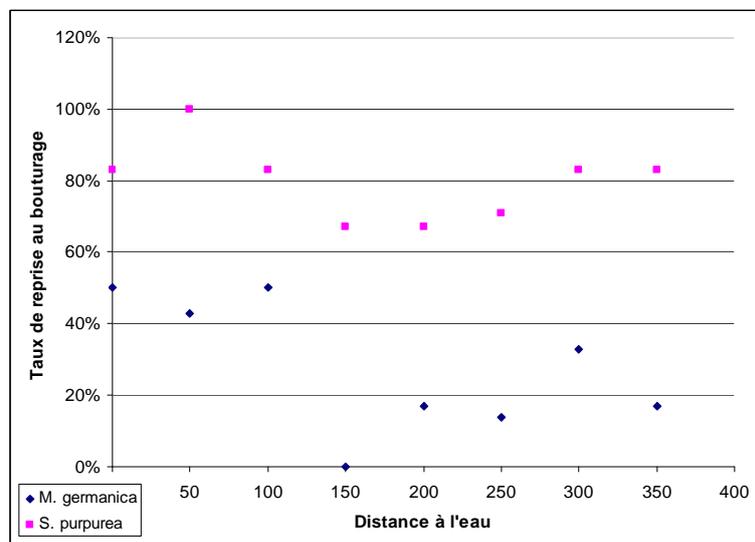


Fig.21 : Taux de reprise des boutures de deux espèces installées sur un ouvrage expérimental en contexte méditerranéen, en fonction de la distance à l'eau en cm

A trois mois, *M. germanica* présente un faible taux de reprise par rapport à *S. purpurea*. Les taux de reprise de *M. germanica* sont plus élevés sur les stations comprises entre le bas de berge et le premier mètre. Par contre *S. purpurea* ne semble pas affecté par la sécheresse matérialisée ici par la distance à l'eau. Ces résultats ne sont pas en accord avec ceux retrouvés dans les expérimentations en tubes (taux de reprise de 84% pour *M. germanica* et 100% pour *S. purpurea*), ce phénomène peut s'expliquer par l'arrivée d'une sécheresse précoce sur l'ouvrage, qui de plus, a été réalisé tardivement par rapport aux préconisations (réalisation en mai alors que la période de repos végétatif était passée).

- Hauteur moyenne à partir du sol (Fig. 22) :

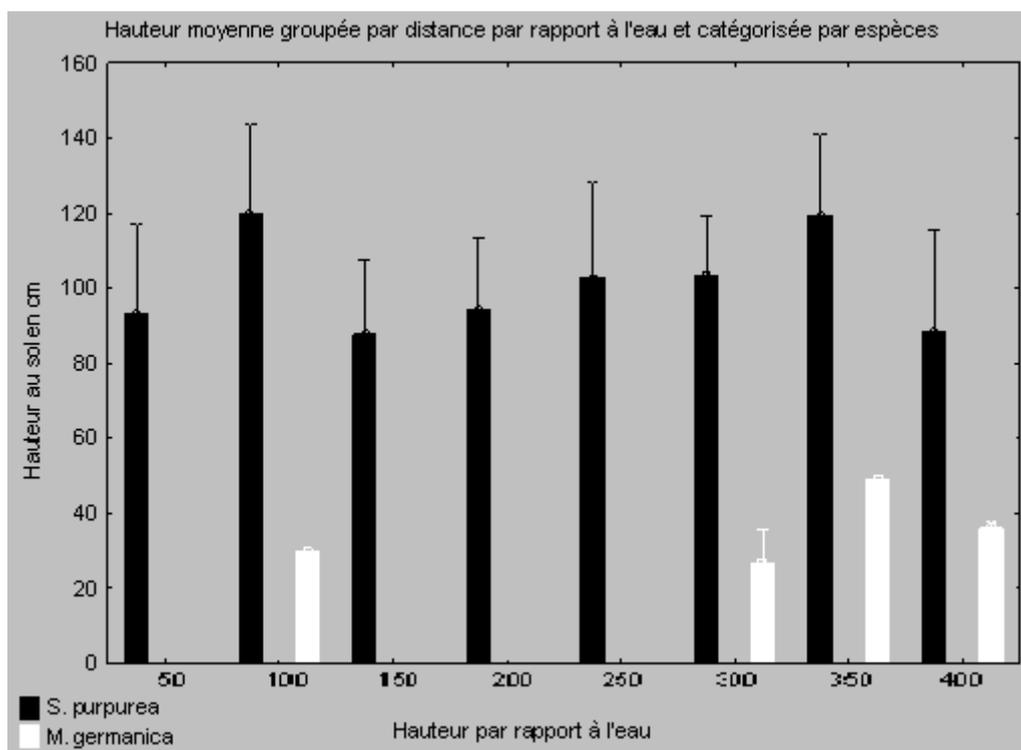


Fig. 22 : Hauteur moyenne des boutures de deux espèces installées sur un ouvrage expérimental en contexte méditerranéen, en fonction de la distance à l'eau, les barres verticales représentent les erreurs-types. L'absence d'histogramme pour *M. germanica* à certaines hauteurs indique des boutures mortes tandis que l'absence d'écart-type indique qu'il ne reste qu'un seul individu à cette hauteur.

Quelle que soit la distance à l'eau, la hauteur au sol de *S. purpurea* ne varie pas. *M. germanica* est significativement plus petit que l'espèce témoin, ce qui induit une forte compétition pour la ressource lumineuse si les deux espèces sont implantées proches l'une de l'autre. *M. Germanica* ne pourra donc pas être implantée sur des ouvrages de génie végétal en compagnie de saules à cinétique de croissance élevée sinon elle tendra à disparaître rapidement. Son usage devra être réservé à une implantation en taches ou en massifs denses et isolés de bas de berge.

IV. 4. 4 Conclusion de l'expérimentation en berge

M. germanica apparaît comme une espèce faiblement compétitrice pour être implantée sur un ouvrage de génie végétal en compagnie d'espèces à forte cinétique de croissance telles que des saules. Cette espèce héliophile risque de végéter puis de disparaître si elle n'a pas accès à la ressource lumineuse. De plus, son taux de reprise au bouturage, finalement assez faible en cas de sécheresse intervenant précocement sur ouvrage, semble conditionner cette espèce au bas de berge.

IV. 5 Expérimentation en rhizotron

IV. 5. 1 Objectifs et hypothèses

Les premières phases de l'enracinement des boutures et la stratégie d'acquisition de l'eau sont actuellement peu connues dans le cas d'espèces peu utilisées en génie végétal comme *M. germanica*, contrairement aux espèces de saules, dont l'enracinement et les stratégies d'acquisition de la ressource ont déjà été largement étudiés (Rytter and Hansson 1993; Van Splunder, Voeselek et al. 1996; Karrenberg, Blaser et al. 2003; Crow and Houston 2004; Yang, Zhao et al. 2004). Cette lacune pose le problème de l'usage même de ces espèces dans les ouvrages de génie végétal. Une caractérisation fine du développement du chevelu racinaire des boutures devrait répondre à ce problème.

Les hypothèses relatives à cette expérimentation sont donc ainsi formulées :

Les boutures de *M. germanica* devraient pénétrer profondément et exploiter la nappe phréatique par ramifications radiculaires du fait de la résistance naturelle de cette espèce à la sécheresse et devraient prospecter dans les deux compartiments : zone vadose et zone saturée. Ceci fait partie des comportements typiques des phréatophytes facultatifs (Nippert, Butler Jr et al. 2009)..

Les boutures de *S. purpurea*, phréatophyte exclusif, devraient tenter d'atteindre la nappe rapidement.

IV. 5. 2 Protocole expérimental

L'expérimentation est conduite en rhizotron, dispositif classiquement utilisé pour l'étude non destructive du système racinaire (Fig. 23). Les racines se plaquent sur la face transparente du dispositif sous l'effet du géotropisme, ce qui permet de les décalquer à intervalle régulier sur une feuille d'acétate lignée horizontalement tous les cm. Ces lignes servent à quantifier le nombre d'intersections entre racines et lignes.

Les rhizotrons sont remplis d'un mélange de sable de rivière (85%) et d'amendement organique (15%) et immergés totalement dans des cuves afin de saturer le substrat. Le niveau de nappe phréatique est alors à 0 (au niveau du haut du substrat).

Quinze boutures de chaque espèce (trois individus de cinq clones différents) ont été prélevées en milieu naturel. Chaque bouture est recoupée à 20 cm et implantée dans une des quatre loges des rhizotrons et irriguées tous les trois jours afin d'éviter le dessèchement des couches supérieures du substrat. De plus, cette irrigation correspond aux conditions normales de pluviométrie observées à cette époque de l'année. Elle est nécessaire car comme les rhizotrons sont inclinés, ils ne reçoivent pas d'eau météoritique.

A la reprise effective des boutures (15 jours), la nappe phréatique est brusquement abaissée à -40 cm, ce qui provoque un stress hydrique chez les plantes, stress hydrique induit par le gradient de sécheresse croissant entre la nappe et la surface. L'irrigation présentée plus haut a été maintenue.

L'expérimentation, conduite sur 81 jours, s'achève par l'extraction des systèmes racinaires et leur étuvage, nécessaire à la quantification des biomasses. Trois tranchées de carottage de 10*10 cm sur l'épaisseur du rhizotron (5 cm) ont été effectuées pour estimer le

comportement racinaire à différents horizons: un à -10 cm (système racinaire très superficiel), à -35 cm (de part de d'autre de la nappe) et à -50 cm (dans la nappe).

Les variables mesurées sont :

- Les taux de reprise,
- les biomasses racinaires en fonction de la profondeur atteinte via trois horizons de carottage,
- l'abondance racinaire qui est estimée grâce au ratio du nombre d'intersections totales sur la profondeur maximale atteinte à chaque temps (vitesse de ramification verticale et analogue à la densité racinaire),
- la profondeur atteinte par le front racinaire (vitesse de descente),
- les ratios de biomasses aériennes sur souterraine, caractéristique des stratégies de résistance aux stress.



Fig. 23 : Rhizotron immergé et contenant *M. germanica* et *S. purpurea* entre autres, Jardin expérimental du Cemagref, Grenoble, crédit Lavaine, C.

Les analyses statistiques consistent en des moyennes (biomasse racinaire, profondeur atteinte et ratio de biomasses) et des analyses de variance en mesures répétées étant donné qu'une mesure aura un impact sur la suivante.

IV. 5. 3 Résultats et discussion

- Taux de reprise

A 15 jours d'expérimentation, 93% des boutures de *M. germanica* et 100% des boutures de *S. purpurea* ont repris. Aucune mortalité n'a été observée après l'abaissement de nappe.

- Biomasses racinaires en fonction de la profondeur atteinte en fin d'expérimentation (Fig. 24) :

Horizon de carottage	<i>M. germanica</i>	<i>S. purpurea</i>
-10 cm	26,22±4.40	26,64±3.47
-35 cm	23,70±3.88	22,04±1.88
-50 cm	10,24±2.59	7,85±2.12

Fig. 24 : Biomasse racinaire produite en fin d'expérimentation en fonction de l'horizon de carottage, données en g±écarts-types, N *M. germanica* =14, N *S. purpurea*=13

S. purpurea produit un peu plus de biomasse racinaire dans l'horizon superficiel et légèrement moins au-delà de la nappe (horizon à -50 cm, la nappe étant matérialisé à -40 cm et couverte par le carottage à -35 cm) par rapport à *M. germanica*. D'une manière générale, les deux espèces présentées ici se comportent de façon similaire en ce qui concerne la répartition des biomasses racinaires en fonction des différents horizons. Il n'existe pas de différence significative dans les biomasses racinaires produites quel que soit l'horizon de carottage. Cette variable nous renseigne sur l'allocation racinaire des espèces en fonction de la profondeur. Etant donné que celle-ci ne varie pas significativement, nous pouvons conclure que ces deux espèces ont le même comportement racinaire même si *S. purpurea* semble adopter un comportement de phréatophyte obligatoire en produisant moins de biomasse dans la nappe (horizon à -50 cm). En effet, une fois la nappe atteinte, les phréatophytes obligatoires ne prospectent plus au même rythme car la ressource recherchée est acquise, ce qui les rend sensible aux abaissements de nappe, au contraire des phréatophytes facultatifs qui continuent de prospecter dans les deux compartiments (Nippert, Butler Jr et al. 2009).

- Abondance racinaire (Fig. 25) :

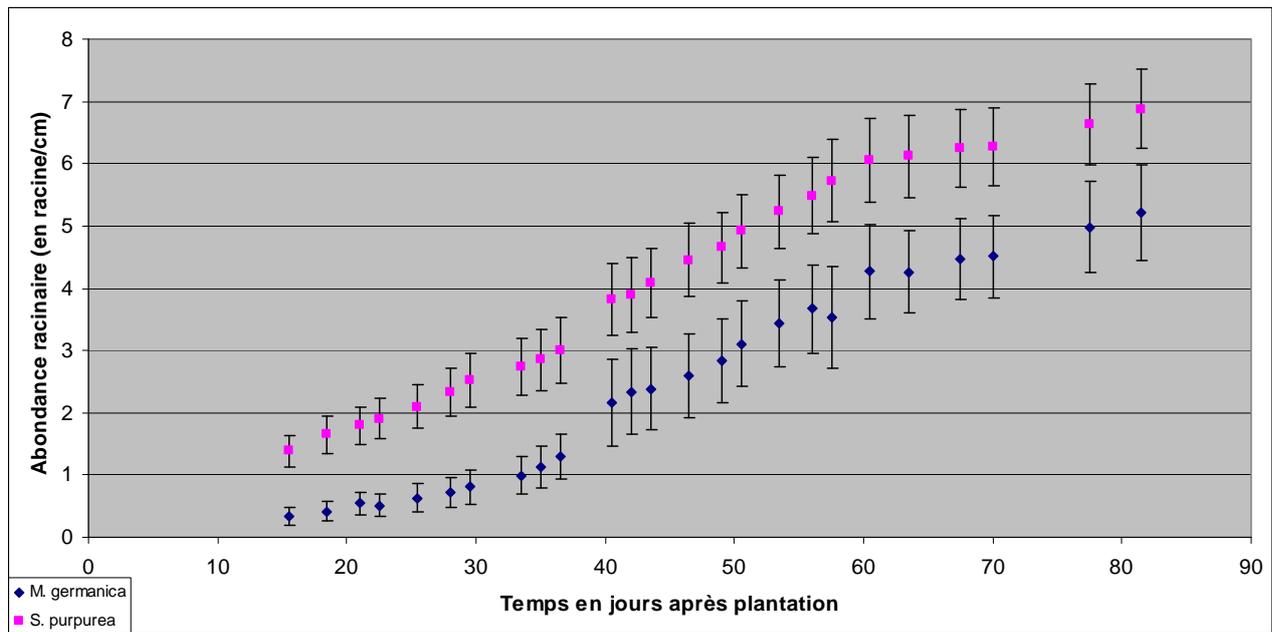


Fig. 25 : Abondance racinaire moyenne en fonction du temps après l'abaissement de nappe au 15^{ème} jour, les barres verticales représentent les erreurs-types, N *M. germanica* =14, N *S. purpurea*=13

Les résultats permettent de différencier significativement les deux espèces quel que soit le stade de développement racinaire suivant l'abaissement de nappe (Anova en mesures répétées, $p(\text{temps d'expérimentation})=0.00$ et $p(\text{espèce})=0.02$) ; *S. purpurea* ayant constamment une abondance racinaire supérieure à *M. germanica*. Cependant la p-value de l'interaction ($p(\text{espèce}*\text{temps expérimentation})= 0,99$ indique que les espèces ont une cinétique de développement racinaire évoluant de façon similaire. Vers le 40^{ème} jour, les espèces montrent une augmentation linéaire et parallèle de l'abondance racinaire puis un léger plateau. Vers la fin de l'expérimentation, l'abondance racinaire augmente de nouveau pour les deux espèces.

L'abondance racinaire étant liée au nombre d'intersections entre les lignes horizontales et les racines, cela signifie que *S. purpurea* se ramifie via une émission radiculaire plus verticale et plus intense que celles de *M. germanica*. Ce comportement est typique des phréatophytes obligatoires qui émettent rapidement des racines en direction de la nappe sans véritable prospection à l'horizontale dans le compartiment vadose. Cette variable ne permet pas de conclure sur le comportement de *M. germanica* : croissance racinaire moins rapide et/ou ramification radiculaire plus horizontale ? Cette variable est à corrélérer avec les biomasses racinaires produites en fonction des différents horizons, ce qui laisse supposer, dans le cas de *M. germanica*, une ramification et une production racinaire supérieures à celles de *S. purpurea* étant donné que dans les deux horizons de carottage inférieurs (bien que les différences ne soient pas significatives), la biomasse de *M. germanica* est plus importante et que la différence est minime dans l'horizon supérieur.

M. germanica semble donc produire plus de racines que *S. purpurea* en cas d'abaissement phréatique, ce qui est une forme d'acclimatation à la sécheresse. Cette espèce pourrait donc être implantée dans des milieux soumis à des variations de niveau de nappe phréatique.

- Profondeur atteinte par le front racinaire au cours du temps (Fig. 26) :

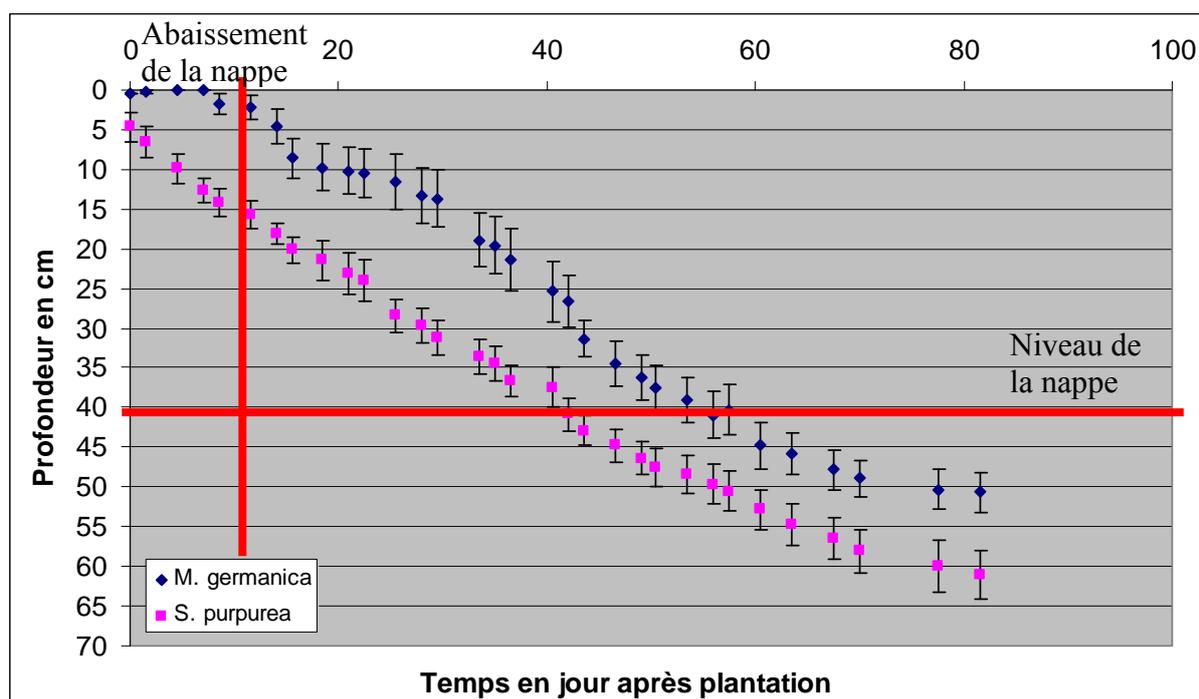


Fig. 26 : Profondeur atteinte au cours du temps, les barres verticales représentent les erreurs-types, N *M. germanica* =14, N *S. purpurea*=13

A l'abaissement de nappe, *M. germanica* amorce la prospection racinaire en direction de la nappe et la prospection devient linéaire, même si elle n'est pas aussi rapide que celle de l'espèce témoin qu'est *S. purpurea*. La cinétique de prospection de *S. purpurea* ne semble pas influencée par l'abaissement de nappe, elle demeure en effet linéaire.

Les résultats précédents (biomasses racinaires en fonction de trois horizons et abondance racinaire) permettent cependant de nuancer les résultats. En effet, les biomasses racinaires indiquent des valeurs très proches entre les deux espèces dans l'horizon supérieur, ce qui indique une quantité racinaire quasi identique. Cela laisse supposer que *M. germanica* descend lentement les quinze premiers jours en l'absence de gradient de sécheresse et que la plante prospecte en effet à l'horizontale, ce qui explique la quantité de biomasse proche de *S. purpurea* mais aussi l'abondance racinaire de *M. germanica* plus faible par rapport à *S. purpurea* (abondance racinaire dépendante du nombre d'intersections entre racines et lignes horizontales).

M. germanica s'avère donc moins sensible à la sécheresse en prospectant dans les deux compartiments, tout en produisant autant de biomasses racinaire que le saule témoin. Cette espèce pourrait être employée dans des ouvrages soumis aux sécheresses phréatiques.

- Ratio de biomasses (Fig. 27) :

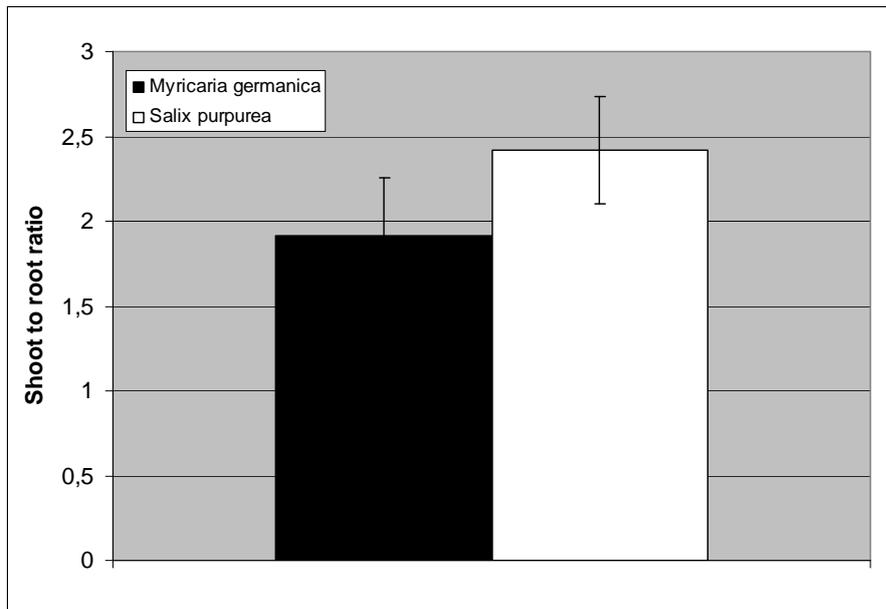


Fig. 27: Ratio de biomasses aérienne sur souterraine, les barres verticales représentent les écarts-types, N *M. germanica* =14, N *S. purpurea*=13

Les ratios de biomasses aérienne sur souterraine ne présentent pas de différence significative entre espèces. Cependant, le ratio de *M. germanica* est inférieur à celui de *S. purpurea*, ce qui dénote d'une allocation racinaire préférentielle, propice à l'acquisition de la ressource en eau. Ces résultats sont en adéquation avec ceux relevés en tubes, que ce soit en sécheresse ou non. *M. germanica* investit dans sa production racinaire, ce qui tend à réduire sa production aérienne. Cette particularité lui confère un système racinaire développé capable de maintenir le substrat et un appareil aérien restreint, opposant peu de résistance aux écoulements. Ce sont des qualités recherchées en génie végétal.

IV. 5. 4 Conclusion de l'expérimentation en rhizotron

Le taux de reprise au bouturage de *M. germanica* (93%) est cohérent avec celui retrouvé dans l'expérimentation en tubes mais pas avec celui de l'expérimentation en berge. Cela rend cette espèce compatible avec une utilisation potentielle en génie végétal, mais en l'absence de sécheresse précoce. Les boutures doivent être implantées en fin de dormance afin de garantir le maximum de reprise et de les mettre à l'abri d'une sécheresse estivale précoce.

De plus, les biomasses racinaires des espèces à différents horizons sont très proches de celles de *S. purpurea* et permettent de placer *M. germanica* dans les espèces à forte production racinaire, ce qui sous-tend un fort ancrage en berge, propriété requise pour un usage en génie végétal.

En l'absence d'étude sur un deuxième niveau de nappe phréatique, il est impossible de conclure formellement sur les comportements racinaires des espèces en fonction de différentes profondeurs phréatiques. Cependant, les différentes variables étudiées précédemment permettent de dégager de grandes tendances et de distinguer les différences de comportement entre espèces. La profondeur atteinte, l'abondance racinaire, les biomasses à trois horizons ainsi que le ratio de biomasses renseignent sur le comportement des espèces en

présence d'un gradient d'humidité matérialisé par une baisse phréatique, situation que l'on retrouve fréquemment sur les marges fluviales alpines.

Ces grandes tendances non confirmées par une expérimentation témoin montrent que les racines des boutures de *M. germanica* pénètrent profondément la nappe phréatique. Cependant, la plante prospecte en premier lieu dans le compartiment non saturé (au dessus de la nappe phréatique) puis le chevelu racinaire se ramifie dans la nappe (variables impliquées : biomasses à différents horizons et densité racinaire) tandis que *S. purpurea* prospecte et se ramifie rapidement en direction de la nappe (variables impliquées : profondeur racinaire et densité racinaire).

Cependant, une fois la nappe atteinte, l'augmentation de la biomasse racinaire de *S. purpurea* se tasse un peu plus que celle de *M. germanica*, ce qui montre un comportement typique des espèces phréatophytes obligatoires cherchant la compensation de l'évapotranspiration, à l'opposé de *M. germanica* qui est un phréatophyte facultatif.

V Conclusion commune aux trois expérimentations

M. germanica est une espèce intéressante à utiliser car elle supporte bien les sécheresses observées fréquemment dans les milieux très perturbés tels que les cours d'eau alpins. De plus, elle présente des aptitudes permettant son usage en génie végétal (taux de reprise au bouturage comparable à celui retrouvé dans les expérimentations en laboratoire de Schiechl (95%) (Schiechl and Stern 1996), rapport de biomasse faible, prospection racinaire intense...). Enfin, l'utilisation de cette espèce permettrait de promouvoir une espèce en régression et d'augmenter la biodiversité des ouvrages de génie végétal. Enfin, l'introduction d'une espèce différente des saules augmenterait la résistance aux perturbations des ouvrages via la mixité de formes aériennes et racinaires qui en découle. Cependant, les difficultés rencontrées par *M. germanica* dans la compétition pour la ressource lumineuse suggèrent de l'employer en taches sur les ouvrages. La mixité des formes aériennes et racinaires n'existeraient donc plus qu'en périphérie des taches.

Tout cela confère à *M. germanica* des perspectives intéressantes dans le domaine du génie végétal.

Cependant, certaines limites liées aux expérimentations et aux caractéristiques propres à l'espèce sont à prendre en considération afin d'appréhender correctement les résultats présentés dans cette étude. En effet, la portée des résultats est essentiellement limitée par une durée des expérimentations relativement courte. La bonne reprise d'une bouture dans un milieu contraignant ne peut être acquise qu'au bout de deux ou trois ans. Les potentialités des espèces ne peuvent donc se vérifier définitivement qu'après plusieurs cycles de végétation. Ensuite, le taux de reprise peu élevé en partie sommitale de la berge due à une sécheresse précoce, la faible compétition de cette espèce pour la lumière demandent à utiliser cette espèce avec une forte densité de boutures et à l'installer en taches monospécifiques. Enfin, le faible diamètre des tiges de *M. germanica*, ainsi que les difficultés d'approvisionnement rendent cette espèce difficile à employer sur beaucoup d'ouvrages de génie végétal.

Afin de compléter les connaissances que nous avons acquises maintenant sur l'espèce, il serait nécessaire de tester *M. germanica* sur des chantiers pilotes de plus grande ampleur et sur de plus longues durées. La quantification de sa résistance à l'arrachage et au cisaillement serait également intéressante.

VI Traduction opérationnelle

Les traductions opérationnelles de cette étude consiste en le suivi du dispositif expérimental reconstituant une partie d'un ouvrage de génie végétal et comportant les deux espèces précitées a été installé en avril 2010 à la Pépinière Forestière de l'Etat d'Aix-les-Milles (Bouches du Rhône). Celui-ci sera étudié durant plusieurs années afin de suivre la croissance, le développement et la compétition interspécifique.

Par ailleurs dans le cadre du projet européen Géni'Alp (<http://www.geni-alp.org/principes.php>) des boutures de *M. germanica* ont été intégrés sur des ouvrages de génie végétal et lors de la végétalisation d'un ouvrage en enrochements sur les berges de l'Arve en Haute-Savoie.

VII Valorisation effectuée

Les travaux présentés ici vont être valorisés dans un article pour la revue « Sciences, Eaux et Territoires », présenté en annexe 1. Cet article inclut *M. germanica* dans un article plus large consacré aux potentialités d'utilisation des *Tamaricaceae* en génie végétal. De plus, une communication a été faite lors du colloque « Génie végétal en rivières d'altitude ou à forte pente : recherches, applications et lacunes » qui s'est tenu le 15 juin 2010 au Cemagref de Grenoble et une présentation de poster a eu lieu au congrès international EECA (Ecological Engineering from Concepts to Applications) qui s'est déroulé du 2 au décembre 2009 à Paris.

Une communication orale aux Rencontres Interdisciplinaires Doctorales de l'Aménagement Durable 2011 va être proposée ainsi que deux articles dans des journaux de rang A : un consacré à l'étude en rhizotron et un autre à l'expérimentation en tubes.

VIII Bibliographie

- Benkler, C. and J. Bregy (2010). *Myricaria germanica*, Experiments regarding seed germination & water stress. Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. **Natural scientific term paper within the project “Integrales Flussgebietsmanagement”**.
- Bill, H. C., P. Spahn, et al. (1997). "The distribution and patch dynamics of the German tamarisk *Myricaria germanica* (L) Desv, in the upper River Isar, Bavaria." Zeitschrift für Ökologie und Naturschutz **6**(3): 137-150.
- Chapin, D. M. (1995). "Physiological and morphological attributes of two colonizing plant species on Mount St. Helens." American Midland Naturalist **133**(1): 76-87.
- Chapin III, F. S., E. D. Schulze, et al. (1990). "The ecology and economics of storage in plants." Annual Review of Ecology & Systematics **21**: 423-447.
- Coopman, R. E., J. C. Jara, et al. (2008). "Changes in morpho-physiological attributes of *Eucalyptus globulus* plants in response to different drought hardening treatments." Electronic Journal of Biotechnology **11**(2): 1-10.
- Crow, P. and T. J. Houston (2004). "The influence of soil and coppice cycle on the rooting habit of short rotation poplar and willow coppice." Biomass and Bioenergy **26**: 497-505.
- Fang-Lan, L. I., B. Wei-Kai, et al. (2009). "Morphological and physiological responses of current *sophora davidii* seedlings to drought stress." Shengtai Xuebao/ Acta Ecologica Sinica **29**(10): 5406-5416.
- Frossard, P. A. and A. Evette (2009). "Le génie végétal pour la lutte contre l'érosion en rivière : une tradition millénaire en constante évolution." Ingénieries - Eau Agriculture Territoires Numéro Spécial : Ecologie de la restauration et ingénierie écologique: 99-109.
- Girel, J. (2010). "Histoire de l'endiguement de l'Isère en Savoie : conséquences sur l'organisation du paysage et la biodiversité actuelle." Géocarrefour **85**(1).
- Hund, A., N. Ruta, et al. (2009). "Rooting depth and water use efficiency of tropical maize inbred lines, differing in drought tolerance." Plant and Soil **318**(1-2): 311-325.
- Kammerer, H. (2003). Artenschutzprojekt Deutsche Tamarisk - Möglichkeiten und Aussichten Einerwiederansiedelung von *Myricaria germanica* im Gesäuse Nationalpark Gesäuse GmbH: 31.
- Karrenberg, S., S. Blaser, et al. (2003). "Root anchorage of saplings and cuttings of woody pioneer species in a riparian environment." Functional Ecology **17**: 170-177.
- Kudrnovsky, H. (2002). Die Deutsche Tamariske an der Isel. Im Auftrag des Österreichischen Alpenvereins. Innsbruck: 25pp.
- Lebourgeois, F., G. Lévy, et al. (1998). "Influence of soil drying on leaf water potential, photosynthesis, stomatal conductance and growth in two black pine varieties." Annals of forest science **55**: 287-299.
- Llorens, L., J. Pennuelas, et al. (2004). "Contrasting Growth Changes in Two Dominant Species of a Mediterranean Shrubland Submitted to Experimental Drought and Warming." Annals of Botany **94**: 843-853.
- Matthews, R. B., D. M. Reddy, et al. (1990). "Response of four sorghum lines to mid-season drought. I. Growth, water use and yield." Field Crops Research **25**(3-4): 279-296.
- Muller, N. (1995). "River dynamics and floodplain vegetation and their alterations due to human impact." Archiv für Hydrobiologie - Supplement **101**(Large Rivers 9): 477-512.

- Nippert, J. B., J. J. Butler Jr, et al. (2009). "Patterns of Tamarix water use during a record drought." Oecologia: 1-10.
- Ogaya, R. and J. Penuelas (2007). "Tree growth, mortality, and above-ground biomass accumulation in a holm oak forest under a five-year experimental field drought." Plant Ecology **189**: 291–299.
- Ogaya, R., J. Penuelas, et al. (2003). "Effect of drought on diameter increment of Quercus ilex, Phillyrea latifolia, and Arbutus unedo in a holm oak forest of NE Spain." Forest Ecology and Management **180**: 175–184.
- Pace, P. F., H. T. Cralle, et al. (1999). "Drought-induced changes in shoot and root growth of young cotton plants." Journal of Cotton Science **3**(4): 183-187.
- Passioura, J. B. (1996). "Drought and drought tolerance." Plant Growth Regulation **20**(2): 79-83.
- Pradhan, S. K., K. R. Mahata, et al. (2003). "Response of upland rice cultivars under varying soil moisture regimes." Indian Journal of Plant Physiology **8**(3): 292-296.
- Rameau, J. C., D. Mansion, et al. (2008). Flore forestière française: guide écologique illustré. Région méditerranéenne. Paris, Institut pour le développement forestier.
- Rytter, R. M. and A. C. Hansson (1993). "Seasonal amount, growth and depth distribution of fine roots in an irrigated and fertilizes Salix viminalis L. plantation." Biomass and Bioenergy **11**(2/3): 129-137.
- Thornley, J. H. M. (1999). "Modelling Stem Height and Diameter Growth in Plants." Annals of Botany **84**: 195±205.
- Van Splunder, I., L. A. C. J. Voesenek, et al. (1996). "Morphological responses of seedlings of four species of Salicaceae to drought." Canadian Journal of Botany **74**: 1988-1995.
- Yang, J., H. Zhao, et al. (2004). "Heat and drought tolerance of two willow species, Salix gordejvii and Salix babylonica: A comparative study." Israel Journal of Plant Sciences **52**(4): 301 - 306

Annexe 1

Les *Tamaricaceae* pourraient-ils se substituer aux saules pour protéger les berges de cours d'eau soumises à des sécheresses prononcées ?

Auteurs : Catherine Lavaine ^{1, 2}, André Evette ¹, Bernard Lachat ³, Patrice Brahic ⁴ & Hervé Piégay ²

1 Cemagref de Grenoble, 2 ENS de Lyon, 3 Biotec Suisse, 4 Pépinière forestière de l'Etat, Aix les Milles

Mots-clés :

Tamaricaceae, *Tamarix gallica*, *Myricaria germanica*, génie végétal, sécheresse, bouture, racine, résistance à l'arrachement

Sommaire

Le génie végétal, un champ encore à explorer.....	Erreur ! Signet non défini.
Du potentiel d'utilisation des <i>Tamaricaceae</i> en génie végétal	Erreur ! Signet non défini.
Quelques éléments d'écologie sur les <i>Tamaricaceae</i> de France.....	Erreur ! Signet non défini.
Pourquoi de telles espèces pour une utilisation en génie végétal ?	Erreur ! Signet non défini.
Caractéristiques biologiques propres aux <i>Tamarix</i>	Erreur ! Signet non défini.
Propriétés anecdotiques mais néanmoins utiles pour certains chantiers de génie végétal de bord de cours d'eau ou de littoral.....	Erreur ! Signet non défini.
Que nous apprennent les expérimentations ? Etude de la production de biomasses et des stratégies d'acclimatation à la sécheresse chez les <i>Tamaricaceae</i> ..	Erreur ! Signet non défini.
Taux de reprise et taux de survie.....	Erreur ! Signet non défini.
Production de biomasses	Erreur ! Signet non défini.
Allocation racinaire et stratégies face à la sécheresse.....	Erreur ! Signet non défini.
Peut-on préconiser des <i>Tamaricaceae</i> en génie végétal ?	Erreur ! Signet non défini.
<i>Modalités d'utilisation</i>	Erreur ! Signet non défini.
Des avantages à utiliser les <i>Tamaricaceae</i> en génie végétal	Erreur ! Signet non défini.
Conclusion et perspectives	Erreur ! Signet non défini.

Le génie végétal, un champ encore à explorer.

L'érosion de berge est un processus naturel qui participe à la diversité des habitats et à l'équilibre hydromorphologique en milieu alluvial (Piégay, Darby et al. 2005). Il est ainsi maintenant reconnu qu'il faut autant que possible laisser divaguer les cours d'eau. Il s'agit ainsi de limiter la protection des berges contre l'érosion aux seuls milieux riverains accueillant des infrastructures importantes que l'on ne peut pas déplacer. Pour ce faire, le génie végétal est aujourd'hui de plus en plus employé. Il peut soit se substituer au génie civil, soit être associé à celui-ci. On parle alors de techniques mixtes combinant matériaux minéraux, comme des enrochements, et végétaux vivants. Le génie végétal tire partie des aptitudes biologiques, physiologiques et physiques des plantes, pour proposer des solutions techniques de lutte contre l'érosion qui soient durables et intégrées (Frossard and Evette 2009). Il va ainsi permettre le développement d'une couverture végétale dense et pérenne sur la zone érodée en vue de sa fixation. En effet, la végétation s'oppose à l'érosion via différents processus, concourant notamment à un renforcement de la berge par les racines. Celles-ci créent un maillage dense et structuré, maintenant efficacement le substrat (Handel, Robinson et al. 1997). Ces techniques procurent par ailleurs des bénéfices écologiques et sociétaux, permettant de préserver une biodiversité spécifique et fonctionnelle via le maintien du corridor écologique, tout en s'intégrant mieux dans le paysage.

Les techniques de génie végétal font très largement appel à l'utilisation de ligneux capables de multiplication végétative à partir de sections de tiges (boutures, plançons, baguettes...). Ces techniques ont fait l'objet de travaux de recherche et ont bénéficié d'une large diffusion dès les années 1980 en Suisse, Autriche et Italie du Nord notamment grâce à Schiechl (Schiechl 1980), et un peu plus tardivement en France (Lachat 1994). Parmi les espèces actuellement utilisées dans ce cadre, les saules occupent une place très importante. Ces espèces sont en effet traditionnellement utilisées, du fait de leur capacité à coloniser des milieux pauvres, de leur fort ancrage, de leurs excellentes capacités de reprise au bouturage, de leur résistance à l'anoxie et aux inondations ou encore de leur structure racinaire (Frossard and Evette 2009).

Deux problèmes se posent aujourd'hui quant à une diffusion plus large de ces techniques sur le territoire métropolitain :

- i) Ces ouvrages manquent souvent de diversité végétale, même si un effort important est mené en ce sens par les praticiens. Les saules occupent en effet une place prépondérante sur les ouvrages de génie végétal, notamment dans la partie basse de la berge. .
- ii) Les savoir-faire sont encore limités à des ensembles biogéographiques bien délimités rendant l'application de ces techniques délicate en dehors de ces ensembles. Il est en effet difficile d'appliquer ces techniques et d'employer des espèces de saule dans des secteurs où les contraintes de xéricité sont plus fortes, notamment dans la zone méditerranéenne caractérisée par une sécheresse marquée durant la période végétative. Par ailleurs, dans d'autres régions où le génie végétal est largement appliqué, le changement climatique devrait entraîner des sécheresses plus marquées susceptibles d'affecter le matériel végétal et notamment les boutures.

La sécheresse durant les premiers mois qui suivent l'installation des boutures est donc considérée comme l'un des principaux facteurs limitant le succès des techniques de génie végétal. Aussi paradoxal que cela puisse paraître, la sécheresse est bien présente sur les berges des cours d'eau, notamment en période estivale et sur la partie supérieure de la berge. Les conditions de sécheresse estivale vont dépendre du volume et de la fréquence des précipitations ainsi que de la position de la nappe phréatique et de sa fluctuation. Dans ce contexte, la survie des individus et donc la réussite de l'ouvrage dépendent de la capacité des boutures à résister à la sécheresse. Les boutures doivent donc, soit posséder des capacités physiologiques propres de résistance au stress hydrique, soit disposer d'une capacité de progression du front racinaire qui puisse leur permettre d'atteindre rapidement la nappe phréatique.

L'utilisation sur ces ouvrages de saules, plutôt inféodés à des milieux humides, peut ainsi limiter leur taux de réussite lors d'épisodes de sécheresse estivale, situations dommageables qui devraient s'aggraver avec le changement climatique.

Dans ce contexte de sensibilité des espèces utilisées au changement climatique, l'objectif est de tester les potentialités d'espèces ripicoles encore peu exploitées que sont les *Tamaricaceae*. Ceux-ci disposent d'une capacité de résistance à la sécheresse tout en ayant des propriétés de stabilisation des berges et de reprise au bouturage proches de celles des saules. Cette étude propose donc de passer en revue les caractéristiques communes de ces deux types d'espèces, mais également d'aborder leur résistance spécifique à la sécheresse.

Dans le présent article nous décrivons les caractéristiques écologiques et biologiques de ces espèces et leur intérêt pour le génie végétal. Ensuite, nous décrivons les résultats d'expérimentations menées sur ces espèces en pots et en berges de cours d'eau. Puis nous donnons quelques clés sur les modalités pratiques d'utilisation de ces espèces dans un ouvrage de génie végétal. Enfin nous concluons sur l'intérêt plus général que l'on peut porter aux *Tamaricaceae*.

Du potentiel d'utilisation des *Tamaricaceae* en génie végétal

Actuellement, l'usage des *Tamaricaceae* en génie biologique concerne surtout la lutte contre l'érosion éolienne. En effet, les *Tamarix* sont utilisés comme brise-vent et fixateurs de dunes au Maghreb et en Chine pour contrôler la désertification. Ils ont même été identifiés comme une espèce-clé pour résoudre ces problèmes (Liu, Zhang et al. 2008)

Leur utilisation en génie biologique sur les bords des cours d'eau reste anecdotique avec quelques rares cas d'ouvrages en Italie et en Espagne. Actuellement, les *Tamaricaceae* sont présentés dans certains guides techniques tels que ceux de Schiechtel (Schiechtel 1980) et Sauli et al. (Sauli, Cornolini et al. 2006).

Sur le continent américain et en Australie, l'introduction d'espèces allochtones du genre *Tamarix* pour la lutte contre l'érosion combinée aux changements d'usage anthropiques des cours d'eau (construction de barrages, pompages...) a conduit à une modification des écosystèmes ripariens, incapables de supporter les capacités de régénération et de résistance aux stress de ces espèces (Stromberg 1998). Cependant, *Tamarix gallica* et *Myricaria germanica* sont des espèces endémiques présentes sur le territoire métropolitain français pour lesquelles on ne rencontre pas de problème d'invasibilité. C'est même actuellement le

contraire puisque *M. germanica* autrefois plus répandu, est en régression à l'échelle alpine, du fait de la chenalisation de nombreux cours d'eau (Girel 2010).

Quelques éléments d'écologie sur les Tamaricaceae de France...

En France, les espèces de *Tamaricaceae* endémiques sont représentées essentiellement par *Tamarix gallica* et *M. germanica*.

Le sol des biotopes de ces deux espèces est généralement constitué de matériaux grossiers et pauvres en matière organique tels que ceux trouvés sur les bancs gravelo-sableux, *T. gallica* affectionnant en plus les sols argileux et quelquefois salés. La présence d'une nappe phréatique n'est pas une condition obligatoire à leur survie car ce sont des espèces phréatophytes facultatives. Ces espèces héliophiles ont de plus une reproduction végétative et sexuée très efficaces avec un fort taux de réussite à la germination.

La distribution géographique de ces deux espèces ne se recouvre pas totalement : *M. germanica* est plutôt une espèce alpine, même si on la retrouve assez bas dans la vallée de la Durance, tandis que *T. gallica* reste inféodée au milieu méditerranéen (avec une remontée dans la vallée du Rhône) et à la façade atlantique.

M. germanica ne peut se maintenir dans son habitat, principalement les marges des rivières en tresse des Alpes, que si la dynamique fluviale est active. En effet, la concurrence des saules et d'autres espèces associées pour l'accès à la lumière lui est défavorable du fait de sa moindre taille. Cette espèce aura tendance à disparaître sur les marges de cours d'eau dont la dynamique fluviale n'existe plus. Enfin, les fourrés de *T. gallica* peuvent remplacer les saulaies lorsque les conditions thermoxériques sont fortes, sur des sols pauvres et soumis à des arrivées d'eau salée et/ou polluée (Arizpe, Mendes et al. 2009).

Ces espèces pourraient être à même de mieux résister que les saules à la sécheresse du fait de leur présence en zone méditerranéenne et de leur faible surface d'évapotranspiration consécutive à la disposition en écailles de leurs feuilles.

Pourquoi de telles espèces pour une utilisation en génie végétal ?

T. gallica et *M. germanica* ont un comportement pionnier, ce qui leur permet de s'adapter à la plupart des perturbations touchant leur écosystème. Ils se régénèrent très facilement et rapidement par bouturage de tiges (Bill, Spahn et al. 1997; Stromberg 1998; Kudrnovsky 2002; Sauli, Cornolini et al. 2006).

De plus, les *Tamaricaceae* résistent remarquablement bien aux contraintes mécaniques. En effet, les *Tamarix* sont extrêmement résistants au cisaillement (au-delà de 400N.m^{-2}) (Sandercock and Hooke 2010) et à l'arrachage par les flots grâce à leurs racines principales très profondes. Il en va de même pour *M. germanica* qui s'oppose à l'érosion des bancs et des berges grâce à son système racinaire puissant (Kudrnovsky 2002).

Leur architecture aérienne constituée de nombreuses branches souples et très ramifiées leur permet également de séquestrer les sédiments fins et de réduire le courant. De plus, cette souplesse permet aux plantes de se coucher en cas de crue, induisant un effet tapis (protections des sols) et un effet peigne (ralentissement du courant et capture de sédiments) et minimise les possibilités d'arrachage par le courant. Le feuillage des *Tamaricaceae* présenterait même une efficacité significativement plus élevée que celles des espèces compagnes (saules et peupliers) dans ces deux processus de protection (Everitt 1980).

Les *Tamaricaceae* survivent aisément à l'ensevelissement par les sédiments lors des crues en émettant des racines adventives à partir de tiges ensevelies pour *T. gallica* et en développant des tiges à partir du collet pour *M. germanica* (Muller 1995; Bill, Spahn et al. 1997).

Enfin, une résistance à l'anoxie (sol saturé) et à l'inondation (submersion) est également essentielle pour les espèces ripariennes. Les *Tamarix* se développent bien dans les sols saturés en eau (Tallent-Halsell and Walker 2002) et ils supportent une submersion totale prolongée. Les *Myricaria* tolèrent une submersion allant jusqu'à deux mois et nécessitent même des inondations périodiques pour se reproduire par voie sexuée (Chen and Xie 2009).

Les *Tamaricaceae* sont pour la plupart phréatophytes facultatifs, ce qui leur confère une grande résistance à la sécheresse ainsi qu'une meilleure efficacité d'extraction d'eau dans les sols que leurs espèces compagnes. Les *Tamarix* et les *Myricaria* s'alimentent ainsi dans la nappe mais également dans le compartiment non saturé et peuvent passer d'une alimentation à une autre sans dommages importants (Smith, Devitt et al. 1998). Cette faculté à utiliser de multiples sources d'alimentation en eau permet de minimiser le stress hydrique.

L'architecture racinaire en elle-même est également particulière et tournée vers l'acquisition de ressources chez les *Tamaricaceae*. En effet, les racines latérales des *Tamarix* servant à capter l'eau sont extrêmement abondantes et étalées (l'extension latérale des racines dépasse souvent de quatre à sept mètres le diamètre de la couronne de l'arbre chez *T. euphratica*) au voisinage de la nappe phréatique. Ceci permet à ces plantes de faire face aux fréquents dessèchements des couches supérieures. En cas d'abaissement de la nappe phréatique, les *Tamarix* émettent rapidement un grand nombre de racines en direction de la nappe afin de palier le manque d'eau (Horton and Clark 2001) tout en prospectant dans la zone non saturée. La croissance racinaire permet ainsi aux individus de retrouver la nappe avant la fin de la période de sécheresse. De la même manière, les *Myricaria*, bien que leurs caractéristiques soient moins renseignés que ceux des *Tamarix* s'approvisionnent indifféremment dans la nappe ou dans la zone vadose¹ (Staffler 1999).

Caractéristiques biologiques propres aux *Tamarix*

Les *Tamarix* présentent une structure racinaire très spécifique. Parmi les espèces méditerranéennes, ils sont ceux qui disposent dans les 20 premiers cm du sol d'une des plus grandes densités de racines de petite et moyenne taille ; ils peuvent ainsi drastiquement réduire l'érosion (De Baets, Poesen et al. 2007; De Baets, Poesen et al. 2008). Ces espèces possèdent par ailleurs une cinétique de croissance aérienne très forte. A titre d'exemple, aux Etats-Unis certains *Tamarix* invasifs ont des dynamiques avec des biomasses 2 à 3 fois supérieure à celle des saules locaux (Tallent-Halsell and Walker 2002). Toutefois de telles différences ne semblent pas observées en Europe, même si la dynamique du *Tamarix* reste importante.

Les *Tamarix* présentent également des adaptations particulières à la sécheresse. Les mouvements d'eau sont sectoriels et chaque racine n'irrigue ainsi qu'une seule partie du houppier. Lorsqu'une racine desséchée meurt, cela n'affecte qu'un seul secteur de la partie aérienne (Waisel 1972). Les *Tamarix* peuvent également coloniser des secteurs présentant une

¹ La zone vadose est la zone non saturée du sol et correspond à la partie du sol située au-dessus de la [nappe phréatique](#). Les pores de cette zone sont partiellement remplis d'eau et de gaz.

nappe phréatique profonde. Des propagations racinaires verticales de plus de 10, voire dans certains cas de 50 m, ont ainsi été observées (Waisel, Eshel et al. 1996; Thevs 2005). Cette profondeur racinaire leur permet également de ne pas entrer en concurrence avec d'autres espèces pour l'eau de subsurface.

Propriétés anecdotiques mais néanmoins utiles pour certains chantiers de génie végétal de bord de cours d'eau ou de littoral

La résistance au sel est commune à tous les *Tamarix*, que les sels soient présents dans le sol ou dans la nappe phréatique. Cependant, la résistance au sel n'est pas à proprement parler une condition indispensable pour une espèce de génie végétal. Néanmoins, une telle faculté permet de disposer d'un ouvrage sur sol salin et ainsi de contrer l'érosion, améliorer les sols et revégétaliser les zones désertiques. De plus, l'accumulation de sel permet aux *Tamarix* de résister à la sécheresse et d'extraire plus facilement de l'eau des zones insaturées par rapport aux peupliers et saules (Glenn, Tanner et al. 1998; Vandersande, Glenn et al. 2001).

Les *Tamarix* sont par ailleurs remarquablement résistants à certains pathogènes comme les champignons lignicoles du genre *Armillaria*, responsables de la pourriture fibreuse chez de nombreuses espèces de ligneux (Bean 1981).

Que nous apprennent les expérimentations ? Etude de la production de biomasses et des stratégies d'acclimatation à la sécheresse chez les *Tamaricaceae*

Le Cemagref a mené des expérimentations visant à analyser les croissances aériennes et racinaires de boutures de *T. gallica* et *M. germanica* sous différentes conditions de sécheresse. Des boutures ont été préférées aux plants car il s'agit du matériel le plus couramment utilisé sur les ouvrages de génie végétal. Afin de pouvoir comparer le comportement de ces espèces avec une espèce de référence en génie végétal, le saule pourpre (*Salix purpurea*) a été utilisé comme témoin.

Cette comparaison porte sur le taux de survie au bouturage, la production et l'allocation racinaire de boutures de ces espèces en condition hydrique non limitante pour un lot de boutures, puis limitante pour un autre lot génétiquement identique.

Les boutures de *Tamaricaceae* et de *S. purpurea* ont été élevées pendant 16 mois dans des containers circulaires de 100 litres (cf photo 1) afin de limiter la formation de chignons racinaires. Le substrat se rapprochait des caractéristiques pédologiques des marges fluviales alpines et méditerranéennes. Pour simuler une sécheresse estivale intense, les espèces ont été exposées à un déficit de précipitations pendant deux cycles de six semaines. Cette modalité sèche correspond à une sécheresse équivalente à 25% de la capacité au champ (CAC) tandis que la modalité humide correspond à un arrosage jusqu'à ruissellement (100% de la CAC). Les individus ont ensuite été extraits au jet afin de conserver l'intégrité du chevelu racinaire puis étuvés.

Taux de reprise et taux de survie

Après trois mois de culture, les boutures présentent un taux de reprise avec enracinement effectif de 96% pour *T. gallica*, 84% pour *M. germanica* contre 100% pour *S. purpurea*.

La sécheresse imposée aux boutures n'a généré aucune mortalité, le taux de survie est donc de 100% pour toutes les espèces.

Production de biomasses

La figure 1 présente les productions de biomasses selon deux modalités de sécheresse. En condition non-limitante, les quantités de biomasse aérienne de *T. gallica* sont très proches de celles de *S. purpurea*. Leur vitesse de croissance est donc comparable, même s'il semble que le saule produise un peu plus de biomasse. A l'inverse, *M. germanica* pousse significativement plus lentement.

Pour la biomasse racinaire, la figure 1 montre qu'il n'y a pas de différence significative entre *T. gallica* et *S. purpurea*, mais on peut cependant noter que *T. gallica* produit plus de biomasse racinaire que *S. purpurea*. *M. germanica* se retrouve, comme dans le cas de la biomasse aérienne, avec une biomasse souterraine significativement plus faible que les deux autres espèces. Ceci est dû à sa croissance plus lente mais sans doute également au fait que les boutures de *M. germanica* sont d'un diamètre plus faible que les boutures de *T. gallica* et de *S. purpurea*.

En condition limitante, les observations faites précédemment se vérifient également. Cependant, les espèces produisent moins de biomasse racinaire et aérienne, hormis *M. germanica* dont la production de biomasse racinaire apparaît supérieure en condition sèche.

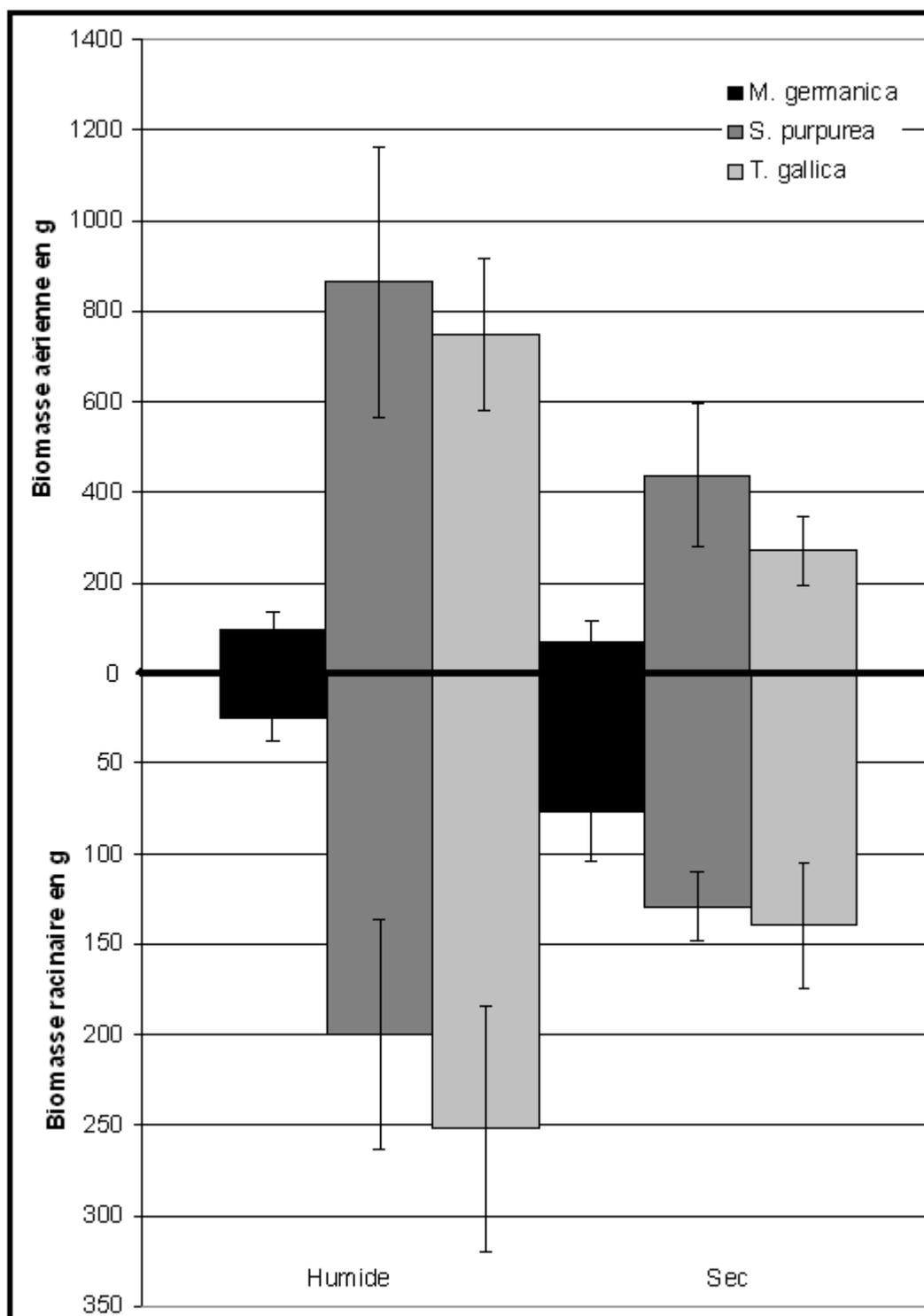


Fig. 1 : Biomasses aérienne et souterraine moyenne d'un saule et de deux *Tamaricaceae* à 16 mois de culture en fonction de deux modalités de sécheresse (N *M. germanica* hum/sec= 11/10, N *T. gallica* hum/sec = 11/12, N *S. purpurea* hum/sec =12/12), les barres verticales représentent les écarts-types.

Allocation racinaire et stratégies face à la sécheresse

La résistance à la sécheresse est essentiellement due à l'appareil racinaire, même si certaines particularités de l'appareil aérien l'expliquent également. En cas de stress hydrique, une allocation préférentielle des ressources aux racines constitue un avantage. La biomasse aérienne se trouve ainsi réduite par rapport à la biomasse racinaire.

La figure 2 montre une allocation racinaire forte en cas de stress hydrique chez les *Tamaricaceae*. En cas de sécheresse, les *Tamaricaceae* (*M. germanica* et *T. gallica*) réduisent significativement leur ratio de biomasses aériennes sur souterraines. Les ressources captées sont ainsi essentiellement allouées au développement racinaire, afin d'agrandir la rhizosphère, et de minimiser la surface aérienne et l'évapotranspiration. Malgré sa moindre production racinaire et aérienne (Figure 1), *M. germanica* enregistre une forte diminution de son ratio de biomasse aérienne sur souterraine, ce qui constitue une certaine forme d'adaptation à la sécheresse, caractéristique des espèces vivant sur les sols filtrants. Par contre *S. purpurea* ne présente pas de différence significative entre les deux modalités. Cependant, les productions de biomasse montrent que sa croissance est moindre en modalité sèche (Fig. 1). On peut donc en déduire que cette espèce est affectée par la sécheresse, mais que contrairement aux *Tamaricaceae*, elle ne montre pas d'adaptation liée à une augmentation d'allocation à la biomasse racinaire.

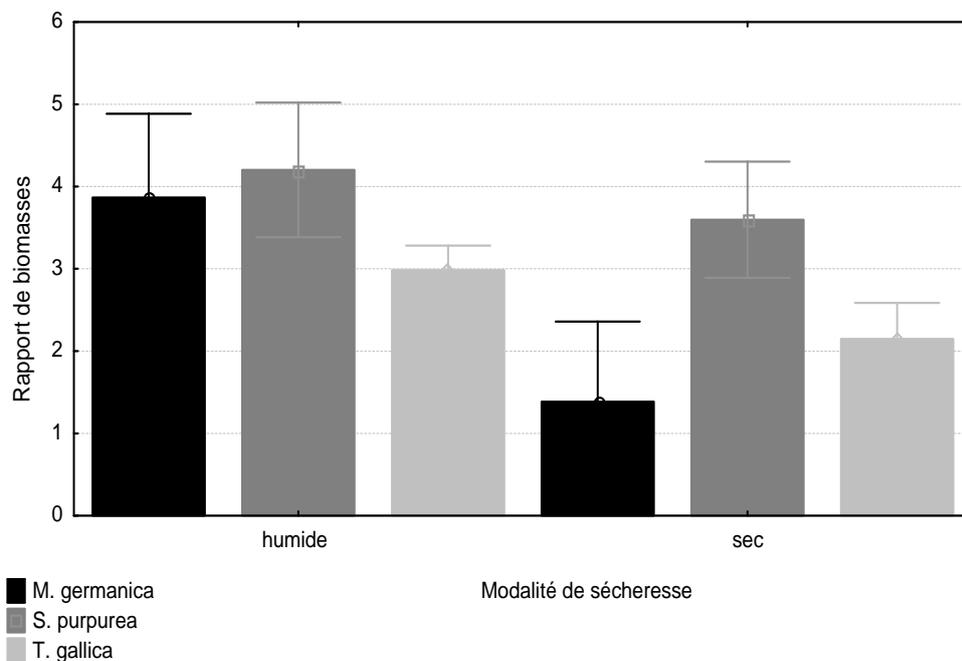


Fig. 2 : Rapport des biomasses aériennes sur souterraines moyennes pour trois espèces en fonction de deux modalités de sécheresse (N *M. germanica* hum/sec= 11/12, N *T. gallica* hum/sec = 11/12, N *S. purpurea* hum/sec = 12/12), les barres verticales représentent les écarts-types.

Afin de vérifier en conditions réelles les potentialités des *Tamaricaceae* pour le génie végétal, un ouvrage expérimental de protection de berge a été réalisé sur l'Arc, cours d'eau de type méditerranéen à la Pépinière Forestière de l'Etat située à Aix-les-Milles. Les premiers résultats indiquent un taux de reprise proche de 100% pour *T. gallica* quelle que soit la profondeur de la nappe (entre 0 et 4 m), tandis que *M. germanica* préfère la moitié inférieure de la berge (50% de reprise). Le faible taux de reprise de *Myricaria* peut s'expliquer par une

sécheresse trop précoce, ce qui n'a pas permis aux boutures de se développer suffisamment pour résister à cette sécheresse. Le suivi sur plusieurs années de ce dispositif devrait permettre d'apporter des éléments de connaissance plus fins quant aux potentialités d'utilisation de ces espèces en génie végétal.

Peut-on préconiser des *Tamaricaceae* en génie végétal ?

Modalités d'utilisation

Il existe peu d'informations sur les modalités d'utilisation des boutures de *Tamaricaceae* en génie végétal.

Quelques prescriptions techniques existent toutefois. Certains préconisent ainsi de planter les boutures de *T. gallica* à 45 cm les unes des autres (Arizpe, Mendes et al. 2009) et de les irriguer les cinq premiers jours (Schiechtel 1980). Etant donné que leur structure ligneuse est proche de celles des saules en terme de diamètre et de longueur des branches, les *Tamarix* peuvent être utilisés dans les mêmes types d'ouvrages que les saules, qu'il s'agisse de fascine vivante, de boutures, de couches de branches à rejets. Et si *T. gallica* présente généralement une meilleure résistance à la sécheresse que les saules, il ne peut toutefois pas être utilisé au-delà de 400 m d'altitude (Arizpe, Mendes et al. 2009).

Concernant *M. germanica*, Staffler préconise une longueur minimale des boutures de *M. germanica* de 25 cm (Staffler 1999). Les tiges fines et fragiles de la plante ne permettent pas de l'utiliser autrement que sous forme de boutures voire de petits fagots. De plus, les difficultés d'approvisionnement -cette espèce étant peu répandue- rendent son usage en génie végétal assez peu fréquent. Enfin, sa croissance étant plus lente que celles des autres espèces, elle doit par ailleurs présenter une densité plus forte sur les ouvrages. Enfin, sa faible compétition pour la lumière la destine plutôt à des zones très perturbées, telles que les bas de berge de rivières dynamiques. On pourrait aussi planter *M. germanica* sous forme de boutures groupées de manière à créer des bosquets ou zones homogènes, ceci permettrait de limiter la compétition pour la lumière avec les saules ou les autres espèces de ligneux.

Les capacités de résistance à la sécheresse et aux inondations de *T. gallica* permettent de le préconiser depuis le haut jusqu'en bas des berges en fonction des conditions. Par contre *M. germanica* est plutôt à privilégier sur les parties basses, en raison de ses faibles taux de reprise en condition sèche et de ses médiocres capacités compétitives..

Des avantages à utiliser les Tamaricaceae en génie végétal

Ces espèces vont contribuer à améliorer la résistance des ouvrages à la sécheresse. Par ailleurs leur association avec des saules peut permettre d'accroître l'efficacité d'un ouvrage. En effet, la mixité racinaire apportée par un plus grand nombre d'espèces augmente la cohésion du sol. Reubens *et al.* ont même suggéré qu'une combinaison de réseaux racinaires peu profonds mais denses et de racines grossières pénétrant profondément le sol pourrait être une solution efficace pour contrôler l'érosion (Reubens, Poesen et al. 2007). De plus, Körner & Spehn ont montré qu'une combinaison de diverses formes de végétation est plus efficace pour le maintien de pente qu'une formation uniforme avec peu d'espèces (Körner and Spehn 2002). On peut supposer qu'il en est de même sur les ouvrages de génie végétal.

D'autre part, la biodiversité observée sur les ouvrages de génie végétal est parfois réduite. Aussi, l'utilisation des *Tamaricaceae* permet de diversifier les ouvrages et notamment les bas de berges largement constitués de saules. D'autre part les *Tamaricaceae* sont également connus pour constituer des sites de nidification prisés par l'avifaune et de nourrissage pour certains insectes, ils permettent ainsi de d'augmenter les capacités d'accueil de l'avifaune de ces milieux.

Les *Tamaricaceae* présentent ainsi un fort potentiel quant à leur utilisation en génie végétal, qu'il s'agisse de leurs capacités à s'installer dans des milieux variés, de leur intérêt en terme de biodiversité, de leur capacités de bouturage ou de la multiplicité des types de techniques auxquelles ils peuvent être intégrés.

Conclusion et perspectives

Les *Tamaricaceae* présentent un potentiel tout à fait important pour le génie végétal. Ils s'adaptent bien aux conditions de sécheresse, se développent rapidement et disposent de bonnes capacités de stabilisation. Leur utilisation dans ce domaine devrait augmenter la diversité spécifique des ouvrages.

Au-delà de ces aptitudes, il est probable que ces espèces aient d'autres atouts permettant de les préconiser dans une logique multifonctionnelle. Elles sont aussi utilisées pour rendre cultivables des terres salines ou réhabiliter des terres polluées par des métaux lourds (Dagar, Singh et al. 2001). Leurs fonctions de remédiation et de filtration des métaux lourds apparaissent ainsi meilleures que celles des peupliers, elles absorbent très bien les sels et nitrates et supportent les sols chargés en arsenic, mercure, plomb, nickel, cadmium... sans présenter de signes d'intoxication visibles. Les *Tamaricaceae* pourraient ainsi à la fois stabiliser les berges et contribuer à améliorer la qualité des sols et de l'eau. Dans les déserts salins d'Asie, les *Tamarix* enrichissent également les sols. Ils capturent et maintiennent leurs propres feuilles mortes ainsi que la matière organique apportée par les vents, créant des îlots fertiles dans les zones arides. De plus, en retenant les matières organiques, ces plantes augmentent l'humidité et la porosité des sols. Les massifs de *Tamarix* constituent alors une zone tampon entre le désert et les zones adjacentes (Li, Yaning et al. 2007).

Quelques références clés

- Adam, P., N. Debiais, et al. (2008). *Le génie végétal, Un manuel technique au service de l'aménagement et de la restauration des milieux aquatiques*, Ministère de l'écologie, du développement et de l'aménagement durables.
- Arizpe, D., A. Mendes, et al., Eds. (2009). *Sustainable riparian zones, a management guide*.
- Bean, W. J. (1981). *Trees and Shrubs Hardy in Great Britain*. London, Murray.
- Benkler, C. and J. Bregy (2010). *Myricaria germanica*, Experiments regarding seed germination & water stress. Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. **Natural scientific term paper within the project "Integrales Flussgebietsmanagement"**.
- Bill, H. C., P. Spahn, et al. (1997). "The distribution and patch dynamics of the German tamarisk *Myricaria germanica* (L) Desv, in the upper River Isar, Bavaria." *Zeitschrift für Ökologie und Naturschutz* **6**(3): 137-150.
- Chapin, D. M. (1995). "Physiological and morphological attributes of two colonizing plant species on Mount St. Helens." *American Midland Naturalist* **133**(1): 76-87.
- Chapin III, F. S., E. D. Schulze, et al. (1990). "The ecology and economics of storage in plants." *Annual Review of Ecology & Systematics* **21**: 423-447.
- Chen, F. Q. and Z. Q. Xie (2009). "Survival and growth responses of *Myricaria laxiflora* seedlings to summer flooding." *Aquatic Botany* **90**(4): 333-338.
- Coopman, R. E., J. C. Jara, et al. (2008). "Changes in morpho-physiological attributes of *Eucalyptus globulus* plants in response to different drought hardening treatments." *Electronic Journal of Biotechnology* **11**(2): 1-10.
- Crow, P. and T. J. Houston (2004). "The influence of soil and coppice cycle on the rooting habit of short rotation poplar and willow coppice." *Biomass and Bioenergy* **26**: 497-505.
- Dagar, J. C., G. Singh, et al. (2001). "Evaluation of forest and fruit trees used for rehabilitation of semiarid alkali-sodic soils in India." *Arid Soil Research and Rehabilitation* **15**(2): 115-133.
- Everitt, B. L. (1980). "Ecology of saltcedar - a plea for research (*Tamarix chinensis*)." *Environmental Geology* **3**(2): 77-84.
- Fang-Lan, L. I., B. Wei-Kai, et al. (2009). "Morphological and physiological responses of current *sophora davidii* seedlings to drought stress." *Shengtai Xuebao/ Acta Ecologica Sinica* **29**(10): 5406-5416.
- Frossard, P. A. and A. Evette (2009). "Le génie végétal pour la lutte contre l'érosion en rivière : une tradition millénaire en constante évolution." *Ingénieries - Eau Agriculture Territoires Numéro Spécial : Ecologie de la restauration et ingénierie écologique*: 99-109.
- Girel, J. (2010). "Histoire de l'endiguement de l'Isère en Savoie : conséquences sur l'organisation du paysage et la biodiversité actuelle." *Géocarrefour* **85**(1).
- Glenn, E., R. Tanner, et al. (1998). "Growth rates, salt tolerance and water use characteristics of native and invasive riparian plants from the delta of the Colorado River, Mexico." *Journal of Arid Environments* **40**(3): 281-294.
- Graf, C., A. Böll, et al. (2003). "Pflanzen im Einsatz gegen Erosion und oberflächennahe Rutschungen." *Merkblatt für die Praxis* **37**: 1-8.
- Gray, D. and R. Sotir (1996). *Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization - A Practical Guide for Erosion Control*. New York, John Wiley and Sons, Inc.
- Handel, S. N., G. R. Robinson, et al. (1997). "Restoration of Woody Plants to Capped Landfills: Root Dynamics in an Engineered Soil." *Restoration Ecology* **5**(1): 178-186.

- Horton, J. L. and J. L. Clark (2001). "Water table decline alters growth and survival of *Salix gooddingii* and *Tamarix chinensis* seedlings." Forest Ecology and Management **140**(2-3): 239-247.
- Hund, A., N. Ruta, et al. (2009). "Rooting depth and water use efficiency of tropical maize inbred lines, differing in drought tolerance." Plant and Soil **318**(1-2): 311-325.
- Kammerer, H. (2003). Artenschutzprojekt Deutsche Tamarisk - Möglichkeiten und Aussichten Einerwiederansiedelung von *Myricaria germanica* im Gesäuse Nationalpark Gesäuse GmbH: 31.
- Karrenberg, S., S. Blaser, et al. (2003). "Root anchorage of saplings and cuttings of woody pioneer species in a riparian environment." Functional Ecology **17**: 170–177.
- Körner, C. and E. M. Spehn (2002). Mountain biodiversity, a global assesment, Parthenon Publishing.
- Kramer, K., S. J. Vreugdenhil, et al. (2008). "Effects of flooding on the recruitment, damage and mortality of riparian tree species: A field and simulation study on the Rhine floodplain." Forest Ecology and Management **255**: 3893–3903.
- Kudrnovsky, H. (2002). Die Deutsche Tamariske an der Isel. Im Auftrag des Österreichischen Alpenvereins. Innsbruck: 25pp.
- Kuzovkina-Eischen, Y. (2003). Stress tolerance and horticultural evaluation of the genus *Salix*. The Ohio State University, The Ohio State University. **Phd Thesis**: 215.
- Kuzovkina, Y. A. and T. A. Volk (2009). "The characterization of willow (*Salix* L.) varieties for use in ecological engineering applications: Co-ordination of structure, function and autecology." Ecological Engineering **35**(8): 1178-1189.
- Lachat, B. (1994). Guide de protection des berges de cours d'eau en techniques végétales. Paris Ministère de l'Environnement.
- Li, Z., C. Yaning, et al. (2007). "Responses of *Tamarix ramosissima* ABA accumulation to changes in groundwater levels and soil salinity in the lower reaches of Tarim River, China." Acta Ecologica Sinica **27**(10): 4247-4251.
- Liu, G., X. Zhang, et al. (2008). "Adaptive growth of *Tamarix taklamakanensis* root systems in response to wind action." Chinese Science Bulletin **53**(SUPPL. 2): 164-168.
- Llorens, L., J. Pennuelas, et al. (2004). "Contrasting Growth Changes in Two Dominant Species of a Mediterranean Shrubland Submitted to Experimental Drought and Warming." Annals of Botany **94**: 843–853.
- Matthews, R. B., D. M. Reddy, et al. (1990). "Response of four sorghum lines to mid-season drought. I. Growth, water use and yield." Field Crops Research **25**(3-4): 279-296.
- Miller, R. M. and J. D. Jastrow (1990). "Hierarchy of root and mycorrhizal fungal interactions with soil aggregation." Soil Biology and Biochemistry **22**(5): 579-584.
- Muller, N. (1995). "River dynamics and floodplain vegetation and their alterations due to human impact." Archiv für Hydrobiologie - Supplement **101**(Large Rivers 9): 477-512.
- Niinemets, Æ. and F. Valladares (2006). "Tolerance to shade, drought, and waterlogging of temperate northern hemisphere trees and shrubs." Ecological Monographs **76**(4): 521-547.
- Nippert, J. B., J. J. Butler Jr, et al. (2009). "Patterns of *Tamarix* water use during a record drought." Oecologia: 1-10.
- Ohashi, Y., N. Nakayama, et al. (2006). "Effects of drought stress on photosynthetic gas exchange, chlorophyll fluorescence and stem diameter of soybean plants." Biologia Plantarum **50**(1): 138-141.
- Pace, P. F., H. T. Cralle, et al. (1999). "Drought-induced changes in shoot and root growth of young cotton plants." Journal of Cotton Science **3**(4): 183-187.

- Panu, U. S. and T. C. Sharma (2002). "Challenges in drought research: Some perspectives and future directions." Défis de la recherche sur les sécheresses: Quelques perspectives et directions futures **47**.
- Passioura, J. B. (1983). "Roots and drought resistance." Agricultural Water Management **7**: 265-280.
- Passioura, J. B. (1996). "Drought and drought tolerance." Plant Growth Regulation **20**(2): 79-83.
- Pezeshki, S. R., S. Li, et al. (2007). "Factors governing survival of black willow (*Salix nigra*) cuttings in a streambank restoration project." Ecological Engineering **29**: 56-65.
- Piégay, H., S. E. Darby, et al. (2005). "A review of techniques available for delimiting the erodible corridor: a sustainable approach to managing bank erosion." River Research and Applications **21**: 773-789.
- Pradhan, S. K., K. R. Mahata, et al. (2003). "Response of upland rice cultivars under varying soil moisture regimes." Indian Journal of Plant Physiology **8**(3): 292-296.
- Rameau, J. C., D. Mansion, et al. (2008). Flore forestière française: guide écologique illustré. Région méditerranéenne. Paris, Institut pour le développement forestier.
- Reubens, B., J. Poesen, et al. (2007). "The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: A review." Trees - Structure and Function **21**(4): 385-402.
- Rood, S. B., J. H. Braatne, et al. (2003). "Ecophysiology of riparian cottonwoods: stream flow dependency, water relations and restoration." Tree Physiology **23**: 1113-1124.
- Rytter, R. M. and A. C. Hansson (1993). "Seasonal amount, growth and depth distribution of fine roots in an irrigated and fertilizes *Salix viminalis* L. plantation." Biomass and Bioenergy **11**(2/3): 129-137.
- Sauli, G., P. Cornelini, et al. (2006). Manuale di Ingegneria Naturalistica Sistemazione dei versanti. R. Lazio. Roma.
- Schiechtl, H. M. (1973). Sicherungsarbeiten im Landschaftsbau. Verlag G.D.W. Callwey, Munich.
- Schiechtl, H. M. (1980). Bioengineering for Land Reclamation and Conservation. Edmonton, Canada, University of Alberta Press.
- Schiechtl, H. M. and R. Stern (1996). Ground Bioengineering Techniques for Slope Protection and Erosion control, Blackwell Science Ltd.
- Schiechtl, H. M. and R. Stern (1996). Ground Bioengineering Techniques. For Slope Protection and Erosion Control, Blackwell.
- Scott, N. A. (1998). "Soil aggregation and organic matter mineralization in forests and grasslands: Plant species effects." Soil Science Society of America Journal **62**(4): 1081-1089.
- Staffler, H. (1999). "Die deutsche Tamariske (*Myricaria germanica* (L.) DESV.). Bepflanzung und Pflege von verbauten Bachböschungen in Südtirol." Mitteilungen der Gesellschaft für Ingenieurbiologie **14**: 2-6.
- Stromberg, J. (1998). "Dynamics of Fremont cottonwood (*Populus fremontii*) and saltcedar (*Tamarix chinensis*) populations along the San Pedro River, Arizona." Journal of Arid Environments **40**(2): 133-155.
- Tallent-Halsell, N. G. and L. R. Walker (2002). "Responses of *Salix gooddingii* and *Tamarix ramosissima* to flooding." Wetlands **22**(4): 776-785.
- Thevs, N. (2005). "Tugay vegetation in the middle reaches of the Tarim River - Vegetation types and their ecology." Archives of Nature Conservation and Landscape Research **44**(1): 63-84.

- Van Splunder, I., L. A. C. J. Voesenek, et al. (1996). "Morphological responses of seedlings of four species of Salicaceae to drought." Canadian Journal of Botany **74**: 1988-1995.
- Vandersande, M. W., E. P. Glenn, et al. (2001). "Tolerance of five riparian plants from the lower Colorado River to salinity drought and inundation." Journal of Arid Environments **49**(1): 147-159.
- Waisel, Y. (1972). Biology of halophytes, Academic Press.
- Waisel, Y., A. Eshel, et al. (1996). Plant Roots: the hidden half. New York, Marcel Dekker, Inc.
- Yang, J., H. Zhao, et al. (2004). "Heat and drought tolerance of two willow species, *Salix gordejvii* and *Salix babylonica*: A comparative study." Israel Journal of Plant Sciences **52**(4): 301 - 306

Photos:

Photo 1 : Expérimentations en containers circulaires (boutures de 4 mois de *M. germanica* à gauche, *T. gallica* à droite, *S. purpurea* au premier plan)





Photo 2 : Racines de *T. gallica* à 16 mois de culture



Photo 3 : Racines de *M. germanica* à 16 mois de culture

Le chevelu racinaire mesure un mètre dans les deux cas (longueur du container), les containers ayant été surélevés et les racines exposées à l'air afin d'éviter la diffusion sur la dalle bétonnées et la colonisation d'autres containers. Les racines de *M. germanica* sont plus fines que celles de *T. gallica*.

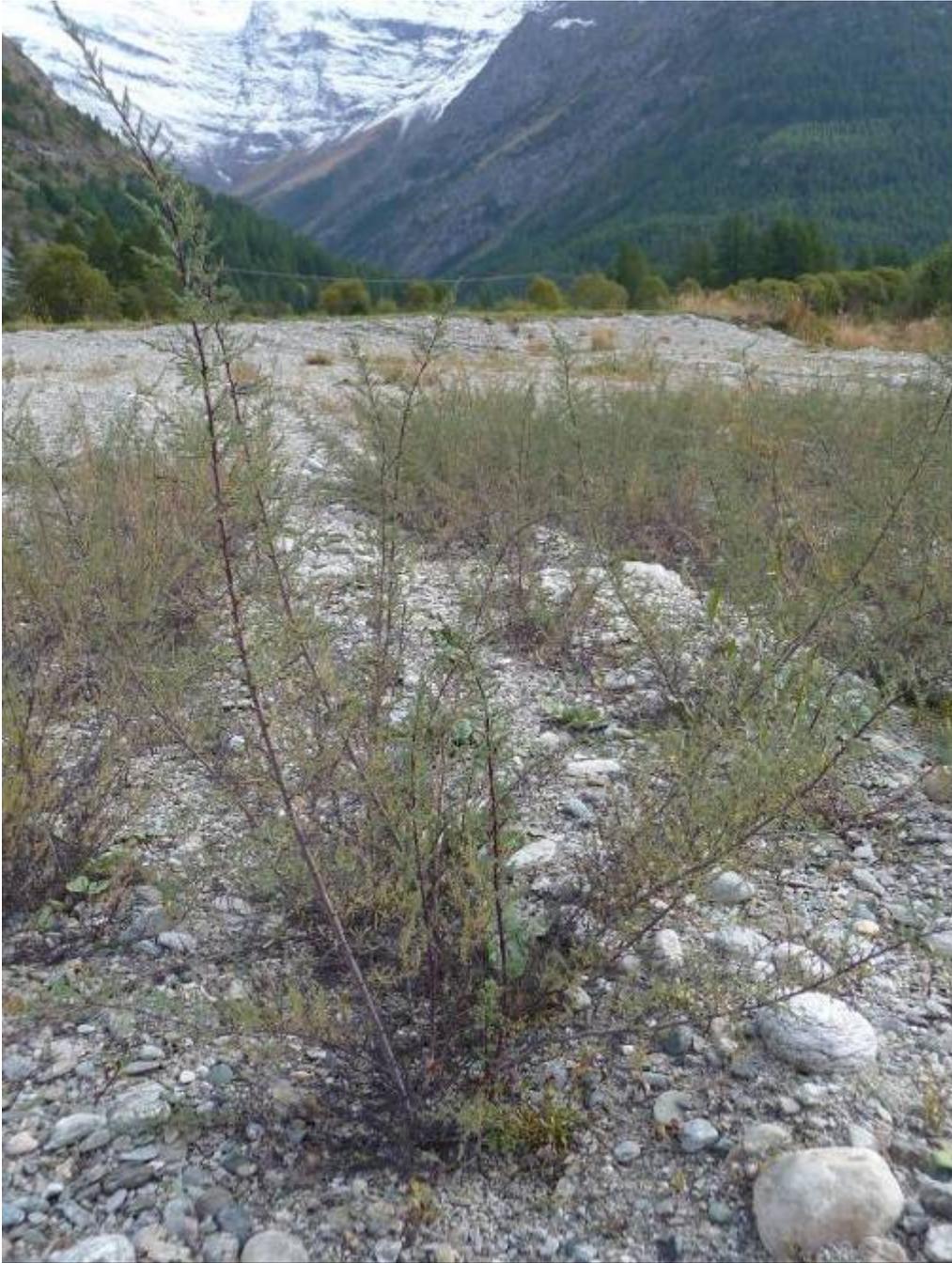


Photo 4 : Semis de *M. germanica* de deux ans sur l'Arc en Haute-Maurienne



Photo 5 : Fourrés de *T. gallica* en bord de cours d'eau dans la région d'Aix-en-Provence

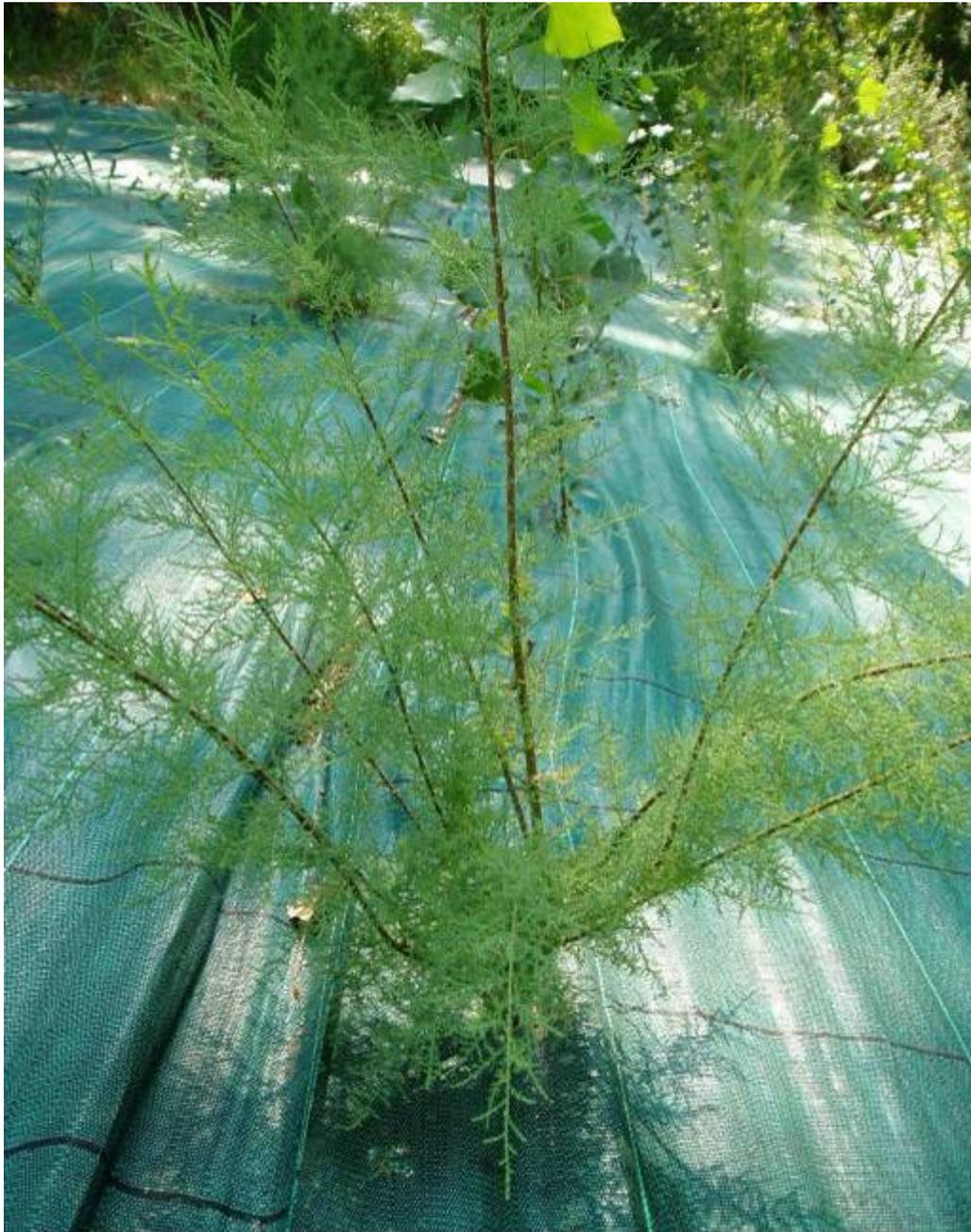


Photo 6 : Bouture de *T. gallica* âgée de 3 mois implanté sur l'ouvrage expérimental de génie végétal, de la Pépinière Forestière de l'Etat à Aix-les-Milles, octobre 2010



Photo 7 : Dispositif de génie végétal avec des boutures âgées de trois mois, Pépinière Forestière de l'Etat d'Aix-les-Milles, août 2010