

Relation entre les traits fonctionnels des végétaux des ravines marneuses et leurs capacités à résister au déracinement.

Soizig Le STRADIC

Master Biologie des Organismes, des Populations et des Ecosystèmes
Université de Rennes 1, 35042 Rennes Cedex, France

Pen en er Huen,
56400 Plumergat
soizig_lestradic@hotmail.com

Résumé — Des ouvrages de génie biologique, sous forme de barrières végétales installées dans le lit des ravines marneuses ont permis de stopper les sédiments issus de l'érosion, formant des atterrissements sur lesquels la végétation s'est développée spontanément. Il est désormais important de savoir si la végétation colonisatrice sera efficace dans le contrôle de l'érosion. L'objectif de cette étude est de faire le lien entre les traits fonctionnels des végétaux poussant dans les ravines marneuses restaurées (Alpes du Sud, France) et leur capacité à résister au déracinement. Des tests de résistance ainsi que le prélèvement d'une dizaine d'individus ont été réalisés pour 6 espèces ligneuses emblématiques de cette région. 26 traits fonctionnels ont été calculés ou mesurés manuellement ou à l'aide du logiciel WinRhizo. Les résultats indiquent une différence de force de résistance entre les espèces, la bugrane (*Ononis fruticosa*) étant l'espèce la plus résistante contrairement au pin (*Pinus nigra*) ou encore à la stéhéline (*Stachelina doubia*). Suite à l'analyse des traits fonctionnels il semble qu'il y ait une relation entre le pourcentage de racines fines, la surface spécifique des racines, le ratio root/shoot et la propension des espèces à résister à l'arrachement. Ces traits sont donc des traits susceptibles d'être utilisés pour prédire la résistance au déracinement des plantes.

Mots clés : Tests de déracinement, ancrage des racines, morphologie racinaire, WinRhizo, érosion.

INTRODUCTION

Les paysages de bad-lands des bassins versants marneux des Alpes du sud sont issus d'une forte érosion et d'un ravinement des terrains, générés par des facteurs géologiques, climatiques et humains. Limiter l'érosion comporte divers enjeux : d'une part diminuer le risque de crue torrentielle menaçant les populations locales et d'autre part limiter le transport des importantes quantités de sédiments générant l'envasement de la Durance.

Les ouvrages de génie biologique piègent les sédiments formant ainsi des atterrissements sur lesquels la végétation se développe spontanément (Rey, 2005) ce qui permet de limiter l'érosion (Snelder and Bryan, 1995 in Rey, 2003).

Une contrainte, telle que l'érosion hydrique que l'on observe dans les ravines, ralentit la vitesse de production de toute ou une partie de la végétation (Grime 1979), le maintien des communautés végétales dans ces habitats repose en partie sur la capacité de résistance que peuvent développer les plantes face à une telle contrainte. Il est donc important de savoir si cette végétation colonisatrice des atterrissements sera efficace dans le contrôle de l'érosion, d'une part en résistant aux contraintes de déracinement et d'ensevelissement, et d'autre part en limitant l'érosion, en fixant le sol et en piégeant les sédiments.

La végétation se développant dans ces régions hostiles doit dans un premier temps être capable de résister à l'arrachement qui peut être provoqué soit par un ruissellement torrentiel soit par des charges solides transportées par les eaux. L'efficacité de la végétation pour lutter à l'arrachement peut être décrite grâce aux traits fonctionnels des végétaux. Les traits fonctionnels sont des attributs mesurables des plantes présentant une relation avec une fonction de la plante (Lavorel *et al.*, 2005). Ces traits sont souvent liés à la morphologie, l'écophysiologie, la biogéochimie ou la démographie (Weiher *et al.*, 1999).

La stabilité des plantes ainsi que leur résistance au déracinement sont conditionnées essentiellement par les caractéristiques décrivant la taille du

système racinaire telles que la profondeur, la largeur, le volume ou le diamètre basal de la plante. Une augmentation de la taille du système racinaire est, la plupart du temps, synonyme d'une augmentation de la puissance d'ancrage de la plante (Dupuy *et al.*, 2005, Stokes *et al.*, 1996, Schutten *et al.*, 2005). Un indice topologique élevé, traduisant un fort degré de ramification du système racinaire (Fitter, 1987), est également régulièrement associé à un meilleur ancrage (Dupuy *et al.*, 2005, Stokes *et al.*, 1996). Les traits de la biologie des racines (longueur spécifique des racines (SRL), densité des tissus racinaires (DTR), ...), qui sont plus souvent utilisés pour caractériser la capacité d'acquisition de la ressource par la plante (Craine *et al.*, 2002 ; Craine *et al.*, 2003) que pour caractériser sa résistance au déracinement, n'ont encore jamais été utilisés lors d'étude de la résistance au déracinement. Cependant certains auteurs ont émis l'hypothèse que des espèces avec des tissus plus denses possèdent un meilleur ancrage au sol (Bailey, 2002).

Le lien entre les traits fonctionnels des végétaux et leur capacité à résister au déracinement a davantage été étudié chez des espèces arborées et matures (Nicoll, 1996, Stokes *et al.*, 1997) ainsi qu'à l'aide de modèles numériques (Dupuy *et al.*, 2005), que chez de jeunes plantules d'espèces ligneuses et herbacées. Or, dans le cas de la restauration écologique de ravines marneuses, il est important de connaître la résistance des plantes aux contraintes extérieures dès les premiers stades de développement de la végétation juste après l'intervention humaine. De nouvelles expérimentations doivent donc être réalisées.

L'objectif de ce stage est de rechercher un lien entre les traits fonctionnels des végétaux poussant dans ces ravines marneuses et leur capacité à résister aux contraintes érosives. Pour cela, des tests de déracinement *in situ* et des mesures de traits fonctionnels ont été réalisés sur six espèces caractéristiques de la région afin de vérifier les hypothèses suivantes, à savoir :

- il existe des différences de résistance au déracinement entre les espèces au stade plantule,
- il est possible de prédire cette résistance à l'aide d'un ou plusieurs traits fonctionnels.

MATERIEL ET METHODES

Le site d'étude : les bassins versants du Saignon, de Naples et du Brusquet

Les observations et les mesures ont été réalisées sur deux sites des Alpes du Sud françaises: sur les bassins versants du Saignon et de Naples ainsi que sur le bassin versant du Brusquet. Ces bassins appartiennent au grand bassin versant de la Durance et présentent donc des caractéristiques similaires à différents niveaux. Ces bassins sont composés de marnes noires qui sont des roches sédimentaires constituées d'un mélange de calcaire et d'argile, ce sont des terrains très érodibles (Rey, 2002) et les pluies torrentielles y façonnent de nombreuses ravines. Le climat est de type montagnard-subméditerranéen, avec 4 à 5 mois froids ($T^{\circ} < 7^{\circ}C$), sachant que la moyenne annuelle est de $10,2^{\circ}C$ (Vallauri, 1997). La pluviométrie annuelle moyenne est comprise entre 787 mm/an et 894 mm/an, il n'y a pas de mois sec. L'altitude varie entre 730 et 1474 m (Rey, 2002).

La strate arborée est dominée essentiellement par *Pinus nigra* (pin noir d'Autriche) provenant d'un reboisement massif au XIXe siècle pour lutter contre l'érosion. La strate arbustive, quant à elle, est constituée notamment par *Sorbus aria*, *Acer opalus*, *Juniperus communis*, *Genista cinerea* et *Buxus sempervirens*, la strate sous-arbustive d'*Ononis fructicosa* et d'*Hippophae rhamnoides* et la strate herbacée de *Sporobolus heterolepsis* et d'*Aphyllantes monspeliensis* (Vallauri, 1997)

Description du matériel végétal

Six espèces ont été étudiées (Tableau 1). Elles ont été choisies d'une part pour leur relative abondance en terrain marneux et d'autre part parce que les tests de déracinement ont été concluants sur ces plantes.

Tableau 1 : Nom latin et vernaculaire des 6 espèces étudiées, leur famille et leur type végétal

Nom latin	<i>Buxus sempervirens</i>	<i>Juniperus communis</i>	<i>Stachelina dubia</i>	<i>Pinus nigra ssp Nigra</i>	<i>Genista cinerea</i>	<i>Ononis fruticosa</i>
Nom vernaculaire	buis commun	genévrier commun	stéhéline douteuse	pin noir d'Autriche	genêt cendré	bugrane ligneuse
Famille	Buxacées	Cupressacées	Astéracées	Pinacées	Fabacées	Fabacées
Catégorie végétale	arbuste	arbuste	sous-arbrisseau	arbre	arbuste	sous-arbrisseau

Ce sont des arbres, arbustes et arbrisseaux robustes et tenaces, adaptés aux conditions d'érosion. Ils représentent cinq familles et trois types de végétaux, ce qui permet d'illustrer des situations contrastées. In situ, pour les tests de déracinement et les prélèvements, nous avons choisi des individus similaires, assez jeunes, présentant une taille relativement identique.

Echantillonnage des plants et mesures des traits fonctionnels

In situ, des tests de déracinement ont été réalisés sur 12 individus de *Buxus sempervirens*, 11 individus de *Juniperus communis* et *Pinus nigra*, 10 individus *Stachelina dubia* et *Genista cinerea* et sur 5 individus d'*Ononis fruticosa* (Figure 1). La force nécessaire pour déraciner le plant a été enregistrée à l'aide d'un dynamomètre (Alluris, FMI 300). Pour chaque plant, la hauteur du plant et le diamètre basal ont été enregistrés.

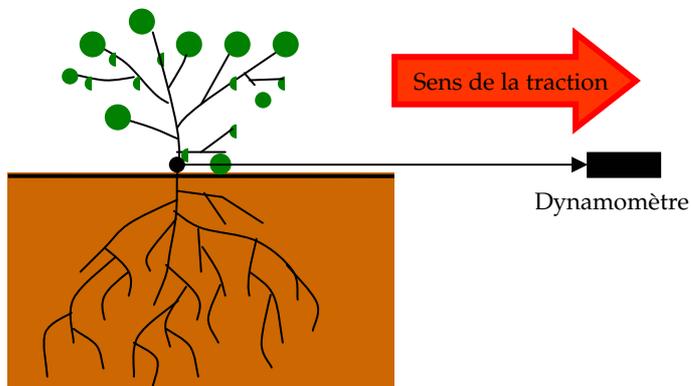


Fig 1 : Schéma du dispositif d'enregistrement de la force (en N) de résistance à l'arrachement d'une plante. Pour chaque espèce des répétitions ont été réalisées dans un souci de représentativité de la population.

Les traits fonctionnels ont été mesurés sur 12 individus d'*Ononis fruticosa*, sur 11 individus de *Pinus nigra*, de *Buxus sempervirens* et *Juniperus communis*, sur 10 plants de *Genista cinerea* et sur 8 individus de *Stachelina dubia*. Chaque plant a été déterré avec soin pour ne pas endommager le système racinaire. Chaque échantillon a été préservé dans un sac en incluant des agrégats de sol humide, et gardé au réfrigérateur jusqu'à son analyse en laboratoire.

Nous avons mesurés de nombreux traits afin de comprendre quelles caractéristiques du système racinaire sont susceptibles d'influencer la capacité de résistance des plants et également afin de mettre en évidence un ou plusieurs

traits facilement mesurables, traduisant la capacité de résistance de la plante dans un objectif de prévision de résistance au déracinement.

La mesure de traits tels la largeur, la profondeur du système racinaire, le diamètre basal, la hauteur des parties aériennes, la masse sèche, le rapport diamètre basal/longueur du pivot, le diamètre basal/hauteur ou la densité du système racinaire permet de traduire l'architecture générale de la plante ce qui conditionne la stabilité de celle-ci (Tableau 2).

Tableau 2 : définition de l'ensemble des traits mesurés pour chaque espèce.

Nom du trait	Unité	Formule
<u>Architecture de la plante</u>		
longueur	cm	
longueur du pivot	cm	
longueur des racines	cm	
largeur	cm	
profondeur	cm	
hauteur	cm	
diamètre basal	mm	
volume racinaire	cm ³	
volume racinaire pivot	cm ³	
volume racinaire des racines	cm ³	
MS	g	
MS SR	g	
MS aérienne	g	
topologie		Nb entre-nœuds sur pivot/Nb d'extrémités
% de racines fines	%	L racines fines/L totale
densité racinaire	cm.cm ⁻³	L / V
D / L _r	mm.cm ⁻¹	diamètre basal/longueur pivot
D / H	mm.cm ⁻¹	diamètre basal /hauteur
<u>Traits de la biologie des racines</u>		
SRL	m,g ⁻¹	L / MS
SRL p	m,g ⁻¹	L _p / MS _p
SRL r	m,g ⁻¹	L _r / MS _r
DTR	mg,mm ⁻³	MS / VR
DTR p	mg,mm ⁻³	MS _p / VR _p
DTR r	mg,mm ⁻³	MS _r / VR _r
<u>Allocation de biomasse</u>		
root/shoot		MS _{sr} / MS _{sa}
biomasse		MS _p / MS _r
pivot/biomasse racines		

L = Longueur, V = Volume, MS = Masse sèche, p = pivot, r = racines, sr = système racinaire, sa = système aérien, Nb = nombre

La largeur, la profondeur, la hauteur du système racinaire, le diamètre basal ont été mesurés manuellement. Les systèmes racinaires ont été lavés sous un jet d'eau jusqu'à être libérés des particules de sol (Cornelissen *et al.*, 2003). Les racines ont été triées et réparties entre le pivot (racine principale) et les racines latérales, et conservées ainsi nettoyées dans une solution d'éthanol à 50 % pour les analyses morphologiques. Les mesures de longueur, de volume des racines, de pourcentage de racines fines ont été réalisées à partir d'un système d'analyse d'image. D'après le protocole présenté dans Roumet *et al.* (2006), les racines ont été colorées avec une solution de violet de méthyle (0,5g.l⁻¹) puis scannées avec une résolution de 400 dpi. L'image a été ensuite analysée par le logiciel

WinRhizo 3.1 (Regent Instruments Inc., Canada). Nous avons fixé le seuil de racines fines à 0,4 mm (Le Cain *et al.*, 2006). La masse sèche a été obtenue après le passage à l'étuve pendant 48h à 70°C des parties aériennes et du système racinaire. L'analyse des images après numérisation a permis d'évaluer la topologie des différentes espèces, traduisant le degré de ramification du système racinaire. Cet indice est obtenu par division du nombre d'entre-nœuds de la racine principale par le nombre d'extrémités racinaires (Tableau 2).

A partir des données ainsi obtenues, la longueur spécifique des racines (SRL) et la densité des tissus racinaires (DTR) ont été calculés. Ces traits de la biologie des racines traduisent la quantité de tissus absorbant déployés par unité de masse investie : un SRL élevé est synonyme de longues racines fines ou de faible densité de tissus racinaires. Il s'agit de voir si de longues racines fines sont associées à une résistance plus importante au déracinement ou si au contraire de courtes racines plus épaisses prévalent pour limiter le déracinement.

Enfin la mesure de traits relatifs aux stratégies d'allocation de biomasse tels le rapport biomasse racinaire/biomasse aérienne et le rapport biomasse du pivot/biomasse des racines (Tableau 2), va nous permettre de voir si l'investissement de biomasse dans le système racinaire est lié à la résistance au déracinement.

Analyses statistiques

Une régression linéaire a été réalisée entre le diamètre basal et la force de résistance. Par la suite, pour comparer la résistance au déracinement des différentes espèces nous avons utilisé une analyse de covariance (ANCOVA), avec le diamètre basal en tant que covariable. Des tests de comparaison de Tukey ont permis ensuite de déterminer entre quelles espèces se situaient les différences.

Des régressions ont également été effectuées entre les forces et les traits de chaque espèce afin de mettre en évidence des corrélations.

Enfin, une analyse discriminante pas à pas ascendante a été utilisée afin de déterminer les traits permettant de discriminer les six espèces. Une analyse canonique a permis de calculer et d'interpréter les fonctions discriminantes.

Toutes les analyses ont été réalisées avec Statistica (version 7.1 pour Windows, Statsoft 1984).

RESULTATS

La résistance des plantes au déracinement

Une régression entre la force de résistance observée et le diamètre basal nous indique une forte influence de ce dernier sur la résistance des plantes ($r^2=0,36$, $p<0,0001$).

Grâce à l'analyse de covariance réalisée avec le diamètre basal comme covariable, nous obtenons des moyennes ajustées de force pour chaque espèce (Tableau 3). Il apparaît alors que les 6 espèces diffèrent par leur capacité à résister à l'arrachement ($F(5,52)=15,28$, $p<0,0001$) (Figure 2). L'espèce la plus résistante est *Ononis f.* suivie de *Genista c.*, de *Buxus s.*, de *Juniperus c.*, de *Stachelina d.* et de *Pinus n.* (Figure 2).

Tableau 3 : Résistance moyenne au déracinement de 6 espèces caractéristiques des ravines marneuses. Les moyennes observées sont celles obtenues à partir des échantillons prélevés sur le terrain, les moyennes des moindres carrés sont obtenues suite à l'analyse de covariance (les hypothèses de normalité et d'homoscédasticité ont été vérifiées). Résultat de la régression entre la force de résistance et le diamètre basal pour chaque espèce.

	N	Moyennes observées	Moyennes des moindres carrés	r ²	p-value
<i>Staehelina doubia</i>	10	126 ± 71	115 ± 18	0,91	< 0,05
<i>Juniperus communis</i>	11	158 ± 81	176 ± 17	0,81	< 0,05
<i>Buxus sempervirens</i>	12	166 ± 80	194 ± 16	0,74	< 0,05
<i>Pinus nigra</i>	11	126 ± 67	118 ± 17	0,92	< 0,05
<i>Genista cinerea</i>	10	267 ± 67	251 ± 18	0,68	0,043
<i>Ononis fruticosa</i>	5	364 ± 105	325 ± 25	0,86	0,06

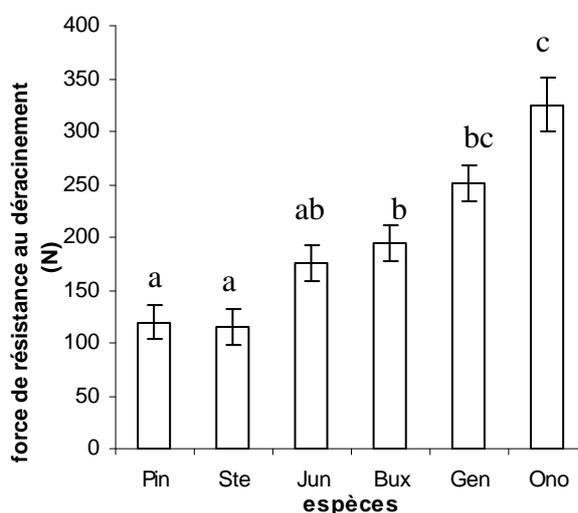


Fig 2 : Moyennes des moindres carrés des forces de résistance au déracinement de six espèces prélevées dans les ravines marneuses des Alpes du Sud. Les barres verticales représentent l'erreur standard, les lettres indiquent les différences significatives (Test Post hoc de Tukey, 95%).

Les traits fonctionnels

Des régressions ont été réalisées entre les moyennes ajustées de force de résistance et les moyennes de différents traits (Tableau 4).

Aucune de ces 12 régressions n'est significative, du fait du peu de points utilisés dans ces analyses. Cependant des tendances se dessinent : il semble que plus le pourcentage de racine fines est important et plus la force de résistance au déracinement est grande, de même plus la biomasse allouée au pivot est importante et plus la force de résistance est importante .

Tableau 4 : Régression entre les moyennes ajustées de force de résistance et les différents traits. r^2 est le coefficient de régression, $p < 0,05$ significatif. En *italiques* les régressions les tendances les plus marquées.

Régression	r^2	r	p-value	Equation de la régression
force vs volume racinaire	0,163	0,404	0,427 n.s	
<i>force vs % racines fines</i>	<i>0,561</i>	<i>0,749</i>	<i>0,087 n.s</i>	<i>$y = 3,77x + 2,9382$</i>
force vs SRL	0,140	0,374	0,465 n.s	
force vs longueur du pivot	0,139	0,373	0,466 n.s	
force vs diamètre basal /longueur pivot	0,364	0,603	0,205 n.s	
force vs DTR	0,329	0,574	0,234 n.s	
force vs poids sec	0,089	0,298	0,565 n.s	
force vs profondeur	0,001	0,032	0,966 n.s	
force vs topologie	0,113	0,336	0,515 n.s	
force vs largeur	0,098	0,313	0,546 n.s	
<i>force vs biomasse pivot/ biomasse racines</i>	<i>0,562</i>	<i>0,750</i>	<i>0,086 n.s</i>	<i>$y = 84,797x + 52,45$</i>

n.s. : non significatif

Analyse discriminante

Parmi les 19 traits de l'analyse, 12 ont un pouvoir discriminant significatif et vont de ce fait pouvoir être utilisés afin de distinguer les espèces entre elles (λ Wilk = 0,00020, F approx.(95,194)=9,7298, $p < 0,0001$) (Tableau 5).

Tableau 5 : Synthèse de l'analyse discriminante (N=19, λ Wilk = 0,00020, F approx.(95,194)=9,7298, $p < 0,0000$). λ Wilk compris entre 0,0 (pouvoir discriminant parfait) et 1,0 (aucun pouvoir discriminant), λ Partiel est le λ Wilk relatif à la contribution unique de la variable donnée à la discrimination entre groupe (une valeur faible correspond à un meilleur pouvoir discriminant). En rouge les traits pour lesquels le pouvoir discriminant est significatif.

	λ Wilk	λ Partiel	niveau p
<i>% de racines fines</i>	<i>0,000420</i>	<i>0,48</i>	<i>0,00</i>
<i>DTR p</i>	<i>0,000274</i>	<i>0,73</i>	<i>0,03</i>
<i>topologie</i>	<i>0,000379</i>	<i>0,53</i>	<i>0,00</i>
<i>diamètre basal / hauteur</i>	<i>0,000212</i>	<i>0,94</i>	<i>0,80</i>
<i>DTR</i>	<i>0,000307</i>	<i>0,65</i>	<i>0,00</i>
<i>volume racinaire pivot</i>	<i>0,000332</i>	<i>0,60</i>	<i>0,00</i>
<i>Root / shoot</i>	<i>0,000251</i>	<i>0,80</i>	<i>0,10</i>
<i>largeur</i>	<i>0,000272</i>	<i>0,74</i>	<i>0,03</i>
<i>SRL</i>	<i>0,000320</i>	<i>0,62</i>	<i>0,00</i>
<i>Diamètre basal / longueur pivot</i>	<i>0,000270</i>	<i>0,74</i>	<i>0,03</i>
<i>Biomasse Pivot / Biomasse Racines</i>	<i>0,000336</i>	<i>0,60</i>	<i>0,00</i>
<i>volume racinaire</i>	<i>0,000224</i>	<i>0,89</i>	<i>0,47</i>
<i>diamètre basal</i>	<i>0,000262</i>	<i>0,76</i>	<i>0,05</i>
<i>SRL p</i>	<i>0,000287</i>	<i>0,70</i>	<i>0,01</i>
<i>Profondeur</i>	<i>0,000267</i>	<i>0,75</i>	<i>0,04</i>
<i>Hauteur</i>	<i>0,000239</i>	<i>0,84</i>	<i>0,21</i>
<i>DTR r</i>	<i>0,000284</i>	<i>0,70</i>	<i>0,01</i>
<i>SRL r</i>	<i>0,000242</i>	<i>0,83</i>	<i>0,17</i>
<i>Masse sèche SR</i>	<i>0,000230</i>	<i>0,87</i>	<i>0,34</i>

7 traits n'entrent pas dans l'analyse par manque de significativité (la longueur totale, la longueur du pivot, la longueur des racines, le volume racinaire des racines, la masse sèche aérienne, la masse sèche totale, la densité racinaire).

Les deux premières fonctions de l'analyse canonique expliquent respectivement 56 % et 22,9% de la variance soit un total de 78,9%. La première fonction nous permet de discriminer au mieux les 6 espèces (Figure 5), tout d'abord *Stachelina d.* suivi de *Pinus n.*, de *Genista c.* et de *Juniperus c.*, de *Buxus s.*

et enfin d'*Ononis f.*. Sur la figure 6 sont reportés les coefficients de la structure factorielle (Tableau 6) représentant les corrélations entre les variables et la première fonction discriminante. Cette fonction discriminante 1 est marquée par des coefficients négatifs pour DTRp, DTR et la topologie et par des coefficients positifs pour le pourcentage de racines fines, le rapport biomasse racinaire/biomasse aérienne (root/shoot), la SRL et la SRLr.

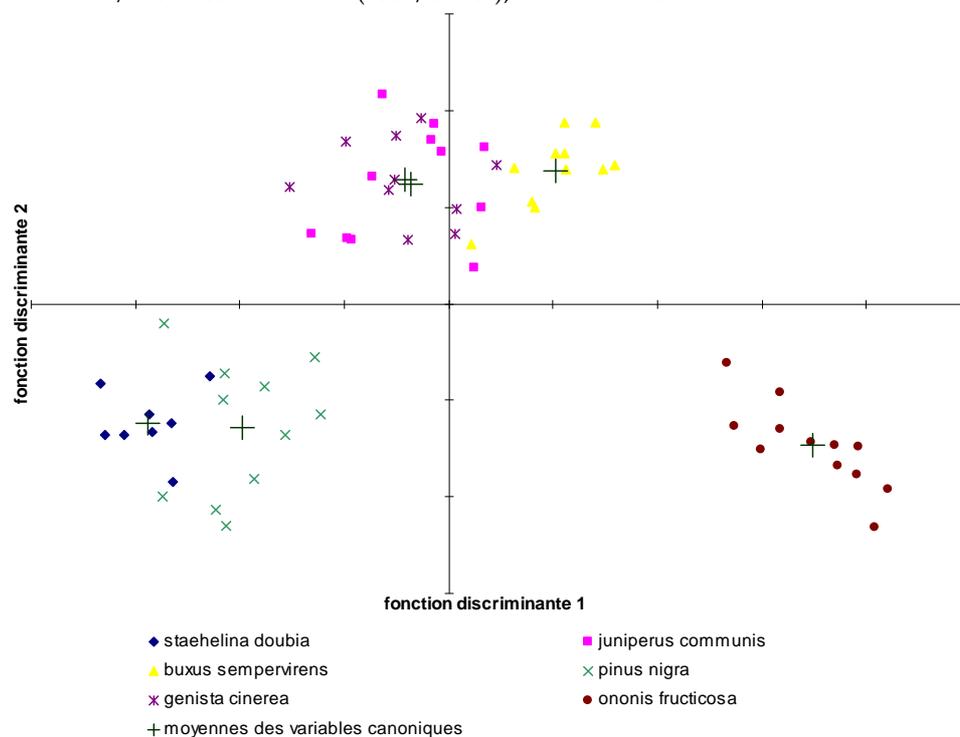


Figure 5 : Représentation des scores canoniques moyens de chaque espèce le long de la fonction 1.

Tableau 6 : Coefficient de la structure factorielle. En *italiques* les variables les plus corrélées à la fonction 1.

	Fonction 1	Fonction 2
% racines fines	<i>0,32</i>	<i>0,34</i>
DTR p	<i>-0,29</i>	<i>0,34</i>
topologie	<i>-0,13</i>	<i>-0,14</i>
diamètre basal / hauteur	<i>-0,11</i>	<i>-0,28</i>
DTR	<i>-0,26</i>	<i>0,20</i>
volume racinaire pivot	<i>0,01</i>	<i>-0,29</i>
Root / shoot	<i>0,18</i>	<i>0,01</i>
SRL	<i>0,16</i>	<i>0,23</i>
volume racinaire	<i>-0,06</i>	<i>-0,19</i>
diamètre basal	<i>-0,12</i>	<i>-0,27</i>
profondeur	<i>0,00</i>	<i>-0,20</i>
SRL r	<i>0,21</i>	<i>0,09</i>
Masse sèche SR	<i>-0,10</i>	<i>-0,15</i>

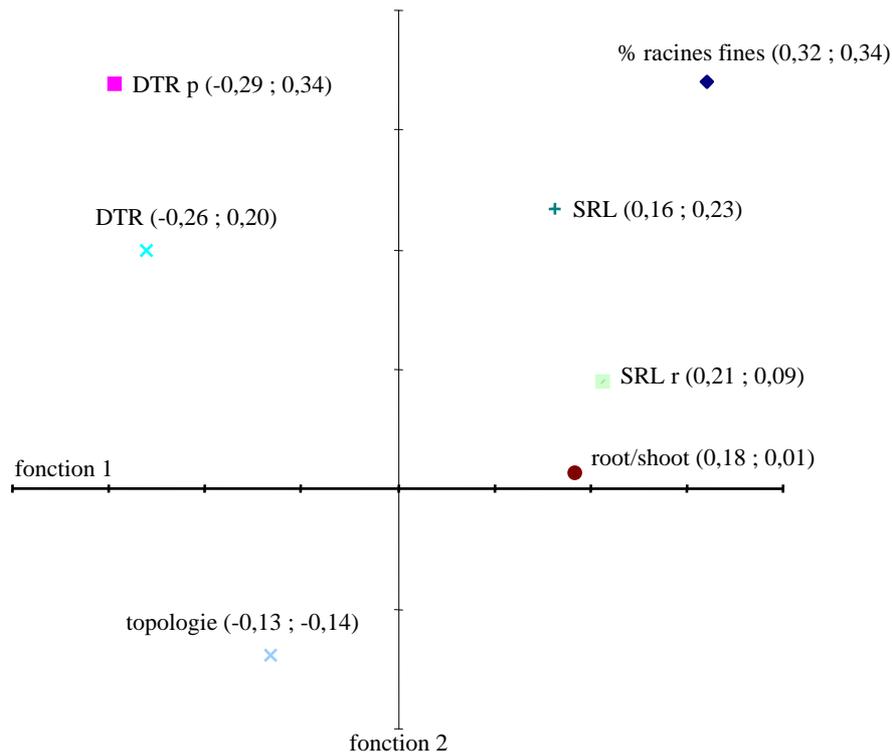


Figure 6 : Représentation des coefficients de la structure factorielle des 7 traits les plus corrélés avec la fonction 1 et la fonction 2. Entre parenthèses (coefficient de corrélation avec la fonction 1 ; coefficient de corrélation avec la fonction 2).

DISCUSSION

Cette étude montre une forte influence du diamètre basal sur la force de résistance : plus le diamètre augmente et plus l'ancrage est efficace. Ce résultat est en accord avec les conclusions d'autres auteurs (Anderson *et al.*, 1989, Dupuy *et al.*, 2005). Cependant, même si le diamètre basal est corrélé à la force de résistance à l'arrachement, ce trait est fortement lié à l'âge de la plante et présente une trop grande variabilité intra et inter spécifique. De ce fait, il ne permet pas de prédire de façon satisfaisante quelles vont être les espèces susceptibles de mieux résister au déracinement.

Les résultats de l'ANCOVA démontrent clairement qu'il existe des différences significatives de résistance à l'arrachement entre les espèces ligneuses se développant spontanément dans ces ravines. Ainsi, il apparaît que des espèces telles *Pinus n.* ou *Stachelina d.* sont moins résistantes que *Genista c.* ou *Ononis f.* Certaines espèces doivent donc posséder des mécanismes d'ancrage plus performants que d'autres, ce qui confirme notre première hypothèse.

Les régressions réalisées entre les moyennes de traits et les moyennes de force ajustées laissent apparaître des tendances. Il semble qu'il existe une corrélation entre la force de résistance et le pourcentage de racines fines et entre la force et le rapport biomasse du pivot sur biomasse des racines, bien qu'aucun résultat ne soit significatif ; trop peu d'espèces ont été étudiées pour pouvoir affirmer de façon définitive que ces traits ont un pouvoir prédictif.

Grâce à l'analyse discriminante, nous avons pu identifier les traits fonctionnels les plus pertinents pour pouvoir distinguer nos espèces entre elles.

Il est possible d'assimiler la fonction 1 à un gradient croissant de résistance au déracinement (Figure 7) puisque les groupes obtenus suite à l'analyse canonique concordent avec les groupes obtenus grâce à l'analyse de covariance.

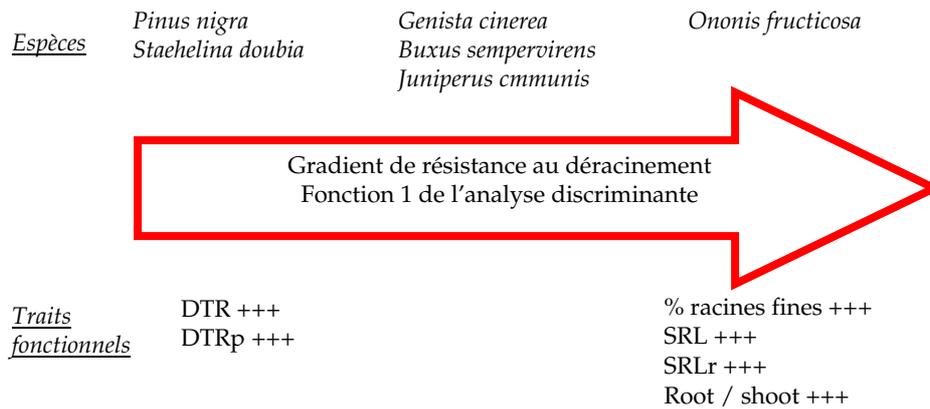


Figure 7 : liens entre les traits fonctionnels des six espèces végétales et leur résistance au déracinement.

Le pourcentage de racines fines ressort comme étant le trait le plus efficace pour discriminer nos espèces. De plus, nous retrouvons un fort pourcentage de racines fines chez les espèces les plus résistantes comme la bugrane et le buis. Des études ont montré que les racines latérales participent à l'ancrage (Stokes *et al.*, 1996) et qu'une coopération entre racines est possible: la résistance de la plante correspondrait à la somme des résistances de chaque racine (Bailey *et al.*, 2002, Ennos, 1993). Ainsi, plus il y a de racines fines, meilleur est l'ancrage.

Cette observation est à mettre en relation avec la SRL, trait également plus élevé chez les espèces les plus résistantes. Une SRL élevée est synonyme de longues racines fines (Cornelissen *et al.*, 2003). De plus, d'après Genet *et al.* (2005), la diminution du diamètre des racines est associée à une augmentation du contenu en cellulose, ce qui a pour effet direct d'augmenter la force de tension des racines. La cellulose est un polymère de glucose, dont la structure en microfibrilles est très résistante, et qui entre dans la composition de la paroi primaire des plantes. Ainsi les racines fines seraient plus résistantes parce que plus riches en cellulose, ce qui expliquerait pourquoi le pourcentage de racines fines est aussi important dans la résistance des plantes.

De plus, les résultats indiquent une corrélation négative entre SRL et DTR (forte SRL souvent associée à une faible DTR), ce qui est conforme aux résultats rencontrés dans la littérature (Craine *et al.*, 2002, Cornelissen *et al.*, 2003). Ce sont les espèces les moins résistantes, comme le pin ou la stéhéline, qui possèdent des DTR assez importantes.

Enfin, on remarque que les espèces qui résistent le mieux au déracinement ont un rapport biomasse racinaire/biomasse aérienne positif élevé. Une allocation de biomasse plus importante dans les racines est donc favorable à un meilleur ancrage.

Ces résultats nous permettent donc de faire le parallèle entre les traits fonctionnels des végétaux et leur résistance au déracinement (Figure 7) et nous laissent penser qu'il est possible de prévoir la résistance des plantes au déracinement à partir des traits fonctionnels ce qui tend à confirmer notre seconde hypothèse.

Le succès de végétalisation des atterrissements est gouverné par les limites de dispersion des espèces, déterminées par le pool potentiel d'espèces ainsi que par la capacité des espèces à s'implanter et à persister (Thompson *et al.*, 2001 ; Bullock *et al.*, 2002, in Pywell *et al.*, 2003). Au sein des ravines marneuses des Alpes du sud, les jeunes plantules qui réussissent à s'implanter doivent être capables par la suite de résister à de fortes contraintes érosives. Une connaissance des traits associés à la persistance de la végétation est potentiellement un grand atout pour les gestionnaires qui auront alors un outil leur permettant d'améliorer les résultats des projets de restauration. (Pywell *et al.*, 2003).

La caractérisation, en terme de traits fonctionnels de la réponse des communautés végétales confrontées à des contraintes environnementales, est également un bon outil pour analyser et prévoir les effets des perturbations sur la diversité d'espèces de plantes et les communautés végétales (Mc Intyre *et al.*, 1999 in Gondard *et al.*, 2003), dans les Alpes du sud mais aussi dans d'autres milieux perturbés. En effet une approche par les traits fonctionnels permet de s'affranchir des classifications taxonomiques qui n'ont de valeurs que dans le milieu où elles ont été établies. La compréhension d'un système précis peut apporter des réponses transposables à des systèmes similaires nécessitant une restauration. Les projets actuels de restauration font face à une contrainte économique, les solutions mises en place doivent être peu onéreuses et efficaces à court terme ; le choix des plantes utilisées est donc crucial. Il paraît important d'inclure dans les projets de restauration des plantes autochtones au milieu que l'on souhaite restaurer pour garantir la pérennité du système mis en place et éviter tout risque d'invasion. Ainsi l'utilisation des traits fonctionnels permet de transposer les résultats à d'autres types d'écosystèmes confrontés à des contraintes similaires et peut permettre d'identifier les espèces clés de la restauration plus facilement.

Cependant, la transposition de tels résultats doit se faire prudemment. Notre étude a été réalisée en terrain marneux, et un des facteurs majeurs intervenant dans la résistance au déracinement est le degré de cohésion du sol (Stokes *et al.*, 1996). Il ne faut pas perdre de vue que la résistance des plantes est la résultante des traits et des propriétés du sol.

Cette première étude doit être approfondie et enrichie par de nouvelles espèces, notamment non ligneuses et de nouveaux traits. Il serait également intéressant de réussir à faire le parallèle entre un ou des traits du système aérien et les caractéristiques du système souterrain, dans un souci de facilité et de simplicité pour prédire la résistance des espèces.

CONCLUSION

Nos résultats ont montré que certaines espèces sont plus performantes pour lutter contre l'arrachement et donc plus adaptées à la survie et à la limitation de l'érosion au sein des ravines marneuses des Alpes du Sud. De plus, il semble que des traits fonctionnels comme le pourcentage de racines fines, la SRL ou le rapport biomasse racinaire/biomasse aérienne, jouent un rôle important dans la capacité de résistance des plantes. Prévoir la résistance à l'aide de ces traits est donc envisageable ceci constituait un atout intéressant pour une gestion efficace des milieux marneux dégradés.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Philippe Cozic de m'avoir accepté au sein de l'unité écosystème montagnard du Cemagref de Grenoble. Merci également à Catherine Roumet de nous avoir accueilli au CEFÉ de Montpellier et de nous avoir prodigué quelques bons conseils. Enfin je tiens à remercier Mélanie Burylo de m'avoir proposé ce stage, pour l'encadrement pendant le stage, les bons coups de pioche sur le terrain, les conseils et toutes les relectures.

BIBLIOGRAPHIE

- Anderson C.J., M.P. Coutts, R.M. Ritchie, D.J. Campbell, 1989. Root extraction force measurements for Sitka spruce, *Forestry*, **62** : 127-137.
- Anderson T. M., W. T. Starmer, M. Thorne, 2007. Bimodal root diameter distributions in Serengeti grasses exhibit plasticity in response to defoliation and soil texture : implications for nitrogen uptake, *Functional Ecology*, **21** : 50-60.
- Bailey P.H.J., J.D. Currey, A.H. Fitter, 2002. The role of root system architecture and root hairs in promoting anchorage against uprooting forces in *Allium cepa* and root mutants of *Arabidopsis thaliana*, **53** : 333-340.
- Chiatante D., M. Sarnataro, S. Fusco, A. Di Iorio, G.S. Scippa, 2003. Modification of roots morphological parameters and root architecture in seedling of *Fraxinus ornus* L. and *Spartium junceum* L. growing on slopes, *Plant Biosystems*, **137** : 47-55.

- Chiatante D., S. G. Scippa, A. Di Iorio, M. Sarnataro**, 2003. The Influence of Steep Slopes on Root System Development, *Journal of Plant Growth Regul.*, **21** : 247–260.
- Cornelissen J.H.C., S. Lavorel, E. Garnier, S. Diaz, N. Buchmann, D.E. Gurvich, P.B. Reich, H. ter Steege, H.D. Morgan, M.G.A. van der Heijden, J.G. Pausas, H. Poorter**, 2003. A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide, *Australian Journal of Botany*, **51** : 335-380.
- Craine J.M., D. Tilman, D. Wedin, P. Reich, M. Tjoelker, J. Knops**, 2002. Functional traits, productivity and effects on nitrogen cycling of 33 grassland species, *Functional Ecology*, **16** : 563-574.
- Craine J.M., D.A. Wedin, F.S. Chapin, P.B. Reich**, 2002. Relationship between the structure of root systems and resource use for 11 North American grassland plants, *Plant Ecology*, **165** : 85–100.
- Craine J.M., W.G. Lee**, 2003. Covariance in leaf and root traits for native and non native grasses along an altitudinal gradient in New-Zealand, *Oecologia*, **134 (4)** : 471-478.
- Craine, J.M., W.G. Lee, W.J. Bond, R.J. Williams, L.C. Johnson**, 2005. Environmental constraints on a global relationship among leaf and root traits of grasses, *Ecology*, **86 (1)** : 12-19.
- Dupuy L., T. Fourcaud, A. Stokes**, 2005. A numerical investigation into factors affecting the anchorage of roots in tension, *European Journal of Soil Science*, **56** : 319-327.
- Ennos A.R.**, 1993. The scaling of root anchorage, *Journal of Theoretical Biology*, **161** : 61-75.
- Fitter A.H.**, 1987. An architectural approach to the comparative ecology of plant root systems, *New Phytologist*, **106** : 61-77.
- Genet M., A. Stokes, F. Salin, S.B. Mickovski, T. Fourcaud, J.F. Dumail, R. Van Beek**, 2005. The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots, *Plant and Soil*, **278** :1-9.
- Gondard H., S. Jauffret, J. Aronson, S. Lavorel**, 2003. Plant functional types: A promising tool for management and restoration of degraded lands, *Applied Vegetation Science*, **6(2)** : 223-234.
- Grime J. P.**, 1979. *Plant Strategies, Vegetation Processes, and Ecosystem Properties*, John Wiley & Sons, 456p.
- Gyssels G., J. Poesen**, 2003. The importance of plant root characteristics in controlling concentrated flow erosion rates, *Earth Surface Processes and Landforms*, **28** : 371-384.
- Lavorel S., S. Diaz, J.H.C Cornelissen, E. Eric, S.P. Harrison, S. McIntyre, J.G. Pausas, N. Perez-Harguindeguy, C. Roumet, C. Urcelay**, 2005. Plant functional types: are we getting any closer to the holy Grail? In: Canadell J., Pitelka LF, Pataki D (eds) *Terrestrial Ecosystems in a Changing World*. IGBP book series. Springer-Verlag, in press.
- LeCain D.R., J.A. Morgan, D.G. Milchunas, A.R. Mosier, J.A. Nelson, D.P. Smith**, 2006. Root biomass of individual species, and root size characteristics after five years of CO₂ enrichment on native shortgrass steppe, *Plant and Soil*, **279** : 219–228.
- Leishman M.R., M Westoby**, 1992. Classifying plants into groups on the basis of associations of individual traits-evidence from Australian semi-arid woodlands, *Journal of Ecology*, **80** : 417-424.
- Nicoll B.**, 1996. Adaptive growth of tree root systems in response to wind action and site conditions, *Tree Physiology*, **16** : 891-898.
- Pywell R.F., J.M. Bullock, D.B. Roy, L. Warman, K.J. Walker, P. Rothery**, 2003, Plant traits as predictors of performance in ecological restoration, *Journal of applied ecology*, **40** : 65-77.
- Rey F.**, 2002. Influence de la distribution spatiale de la végétation sur la production sédimentaire de ravines marneuses dans les Alpes du Sud, Cemagref, Grenoble, 182p. (Thèse de doctorat de l'université de Grenoble I)
- Rey F.**, 2003. Influence of vegetation distribution on sediment yield in forested marly gullies, *Catena*, **50** : 549-562.
- Rey F.**, 2005. Efficacité des ouvrages de génie biologique pour le piégeage des sédiments dans des ravines incises dans des marnes (Alpes du Sud, France), *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 1.
- Roumet C., C. Urcelay, S. Díaz**, 2006. Suites of root traits differ between annual and perennial species growing in the field, *New Phytologist*, **170 (2)** : 357–368.

- Schenk H.J., R.B. Jackson**, 2002. Rooting depths, maternal root spreads and below-ground/above-ground allometrics of plants in water-limited ecosystems, *Journal of Ecology*, **90** : 480-494.
- Schutten J., J. Dainty, A.J. Davy**, 2005. Root anchorage and its significance for submerged plants in shallow lakes, *Journal of Ecology*, **93** : 556-571.
- Scippa G.S., M. Di Michele, A. Di Iorio, A. Costa, B. Lasserre, D. Chiatante**, 2006. The Response of *Spartium junceum* Roots to Slope: Anchorage and Gene Factors, *Annals of Botany*, **97(5)** : 857-866.
- Stokes A., B.C. Nicoll, M.P. Coutts, A.H. Fitter**, 1997. Responses of young Sitka spruce clones to mechanical perturbation and nutrition: effects on biomass allocation, root development, and resistance to bending, *Canadian Journal of Forest Research*, **27** : 1049-1057.
- Stokes A., J. Ball, A.H. Fitter, P. Brain, M.P. Coutts**, 1996. An experimental investigation of the resistance of model root systems to uprooting, *Annals of Botany*, **78** : 415-421.
- Vallauri D., C. Chauvin, E. Mermin**, 1997. La restauration écologique des espaces forestiers dégradés dans les Alpes du Sud. Chronique de 130 ans de restauration et problématique actuelle de gestion des forêts recrées en pin noir. *Revue Forestière Française*, **49(5)** : 433-449
- Weiher E., A. Van Der Werf, K. Thompson, M. Roderick, E. Garnier, O. Eriksson**, 1999. Challenging theophrastus : a common core list of plant traits for functional ecology, *Journal of Vegetation Science*, **10** : 609-620.

ORIGINE DU TRAVAIL

Ces résultats sont publiés en accord avec Mélanie Burylo qui a supervisée ce travail. Elle réalise actuellement une thèse, au Cemagref de Grenoble, sur les relations entre les traits des espèces végétales et leurs fonctions de protection contre l'érosion dans les milieux marneux restaurés de montagne, au sein de laquelle s'inscrit ce travail.

Relationship between functional traits of plants growing in marly gullies (Southern Alps, France) and their uprooting resistance.

Abstract —Bioengineering works, constituted as vegetation barriers and installed in the gully beds have been efficient to trapping sediments, thus creating sediment deposits upstream, on which vegetation have been grown up spontaneous. Now, we would like to know if that natural colonization will be efficient to control erosion. The aim of this study is to investigate the relationship between functional traits and the uprooting resistance of this vegetation growing in restored marly gullies (Southern Alps, France). Uprooting tests were carried out on 6 woody species. Moreover, for each species, nearly 10 plants were chosen for analysis of 26 functional traits realised thanks to the software WinRhizo. The results show significant differences between species for pull-out resistance, *Ononis fruticosa* being the most resistant species contrary to *Pinus nigra* or *Stachelina dubia*. The other results show a relationship exist between the percentage of fine roots, the specific root length, the root/shoot and the ability to resist of uprooting. So, these traits can be useful to predict the pull-out resistance of plants.

Key words : Uprooting resistance, root anchorage, root morphology, WinRhizo, erosion.