

Traduction du document :
Yolande LYFOUNG (AGROOF)

1. DESCRIPTION SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

1.1. ÉTAT DE L'ART

Services écosystémiques rendus par les systèmes racinaires

Les services écosystémiques regroupent les bénéfices quantifiables ou qualitatifs rendus par les fonctions écologiques des écosystèmes sur l'environnement général, comprenant les produits, les services et autres bénéfices que les être humains reçoivent des écosystèmes naturels, réglementés ou, dans d'autres cas, perturbés (Thorp et al. 2010). Les bénéfices peuvent être séparés en quatre catégories : les 'services d'appui' tels que la biodiversité, le cycle biogéochimique, l'habitat ou la production ; les 'services de régulation' tels que les réglementations sur la qualité de l'eau, la conservation des sols, l'érosion et les processus biologiques ; les 'services d'approvisionnement' tels que l'apport en bois, en combustible, en nourriture et fourrage ; enfin les 'services culturels' à vocation éducative ou récréative. Des valeurs monétaires sont attribuées à une petite partie de ces services (Constanza et al 1997; Thorp et al. 2010). Aujourd'hui au cœur des débats, en assignant les valeurs monétaires à ces fonctions écosystémiques, les responsables des politiques publiques et les décideurs politiques sont capables de prendre conscience de leur rôle écologique et de le quantifier (Turner et al 2007, Constanza 2008). Dans le projet Ecosfix, nous étudierons les services d'appui et de régulation que le système racinaire peut apporter. En particulier, nous examinerons l'importance fonctionnelle des racines profondes au regard des racines superficielles (Fig.1), zone où les connaissances sont limitées, laissant supposer que les services sont très sous-estimés. Dans la plupart des études, les traits racinaires sont mesurés sur les 20 premiers cm sous la surface du sol, alors que dans la plupart des écosystèmes du monde, on trouve moins de 30% de la biomasse racinaire à moins de 0,3 m (Fig. 2). Les racines fines et les radicelles superficielles peuvent modifier l'infiltration de l'eau et la structure du sol à la surface du sol et également améliorer la cohésion du sol (et par conséquent la 'fixation') en luttant contre les processus d'érosion (de Baets et al 2005, 2007; Pierret et al 2007, Fig. 1). Les racines profondes traversent plus facilement les zones de cisaillement potentielles (où l'éboulement commence) et améliorent la cohésion, 'fixant' par conséquent le sol (Stokes et al 2009, Fig. 1). Des racines profondes et à durée de vie longue séquestrent également du carbone dans le sol (Jackson et al 2000) et jouent un rôle de redistribution hydraulique (Caldwell et al 1998, Fig. 1). Nous étudierons comment les différentes racines interagissent sur le sol pour fournir chacun des services décrits ci-après :

(i) *Séquestration du carbone*

Séquestrer le carbone dans des écosystèmes terrestres est une approche possible pour réduire l'accumulation de dioxyde de carbone de l'atmosphère (CO₂). Le sol est le réservoir de séquestration de carbone le plus efficace dans de nombreux écosystèmes parce que le temps de renouvellement de la matière organique du sol (MOS) est très long comparé à la plupart des tissus végétaux et parce que la variabilité interannuelle est moindre ou les pertes dues à des dégâts sont moins importantes (érosion, instabilité gravitaire, incendie), particulièrement en profondeur. Toutefois, nous ne connaissons pas encore la quantité de carbone qu'un écosystème peut séquestrer, ni à quel taux, ni comment améliorer la fixation du carbone dans le sol (Jackson et al 2000). L'élément manquant le plus important de nos connaissances concerne la biomasse souterraine, la productivité primaire et la durée de vie des racines. Les radicelles (de diamètre inférieur à 2,0 mm) agissent comme des canalisations conduisant le carbone vers des puits de carbone souterrain (Strand et al. 2008), en même temps qu'elles ancrent le végétal et se chargent de ressources (par interactions avec les communautés microbiennes).

Augmenter la capacité des racines à enfouir en profondeur du carbone devrait conduire à optimiser le stockage, mais le stockage actuel dépendra de la minéralogie du sol et du microclimat. La minéralogie du sol, la chimie du sol, la stabilité des agrégats, et la capacité qualitative du végétal à stocker le carbone dans la MOS à plus ou moins long terme devrait varier selon le type de végétation et la structure.

Le potentiel des sols à absorber le carbone atmosphérique dépend de la longueur de vie des racines (Matamala et al 2003; Strand et al 2008). De grandes différences dans le taux de renouvellement des racines dans les plantations forestières pourraient modifier les prévisions actuelles sur la façon dont l'absorption du carbone dans le sol aidera à ralentir le processus de changement climatique. Par conséquent, certaines couvertures de sol seraient plus efficaces à charger le CO₂ atmosphérique et à le placer dans le sol. Par exemple les pins présentent un taux de renouvellement racinaire lent qui diminue le potentiel à accumuler du carbone dans le sol. A la différence, la production racinaire soutenue d'une forêt de gommiers doux a conduit à une augmentation significative et rapide de l'accumulation de matière organique du sol (Matamala et al. 2003). Afin d'améliorer la fixation du carbone, il serait nécessaire de trouver les techniques ou de choisir les espèces qui produisent plus de racines, dont le taux de renouvellement racinaire est plus important, afin de faciliter le transfert du carbone atmosphérique vers les sols. Néanmoins, développer des stratégies efficaces pour optimiser le stockage du carbone dans les sols demande de comprendre les mécanismes de contrôle de la répartition souterraine végétale, l'efficacité du stockage souterrain du carbone et les retours sur la productivité.

Les arbres agroforestiers ont un fort potentiel de séquestration supplémentaire de carbone pour de multiples raisons : des systèmes racinaires plus profonds, comparé aux arbres forestiers, dû à la compétition entre cultures (Mulia et Dupraz, 2006) et une séquestration du carbone facilitée par les sols agricoles pauvre en carbone (Peichl et al., 2006). Récemment, une synthèse sur le potentiel des systèmes agroforestiers à séquestrer du carbone, a conclu qu'un potentiel de 2 tC/ha/an est envisageable (Hamon et al 2009), ce qui peut se révéler plus efficace que la séquestration du carbone supplémentaire qui se produit dans les forêts existantes.

(ii) Fixation du sol et érosion superficielle

Des approches empiriques liées au modèle universel de perte en terre révisé (RUSLE, <http://www.ars.usda.gov/Research/docs.htm?docid=5971>) ont montré le rôle prédominant de la couverture de sol dans la protection de celui-ci contre l'érosion hydrique superficielle. On a accordé une plus grande attention ces dernières décennies à la contribution de la couverture du sol, par exemple aux parties aériennes des végétaux, aux résidus des végétaux et au gravier, visant la réduction du détachement des particules du sol (impact de l'éclaboussement, par exemple; Morgan 1996, Marques et al. 2007, Morgan and Duzant, 2008) plutôt qu'à la recherche des caractéristiques intrinsèques du sol, sa texture, sa densité apparente, composition chimique et organique, la stabilité des agrégats, sa capacité d'infiltration et sa force de cisaillement. On a réalisé encore moins d'études sur comment ces facteurs pouvaient être influencés par les racines et par conséquent comment les racines pouvaient jouer un rôle fixateur vis-à-vis du sol. Non seulement ce domaine est resté largement inexploré mais les rares études ont conduit à des résultats contradictoires. Par exemple, en étudiant l'impact des gouttes de pluies sur le sol, Zhou et Shangguan (2008) ont indiqué que les racines étaient responsables à 96% de la diminution de l'exportation des sédiments, à partir de simulations de parcelles soumises à des pluies, alors que Pierret et al. (2007) ont découvert que, sur les pentes raides au Laos, le détachement du sol peut s'accroître lorsque la densité de la longueur des racines augmente. Lorsqu'on prend en considération la production de sédiment d'un bassin versant, il est crucial de prendre en compte le détachement du sol mais également l'érosion par ravinement et le mouvement gravitaire (Valentin et al 2005). Pour ce dernier processus, les effets sont difficiles à démontrer en raison du faible nombre de données disponibles (De Baets et al 2006, 2007). Les racines

des végétaux jouent, pense-t-on, un rôle essentiel sur le contrôle de l'érosion, la recherche quantitative sur l'importance du rôle protecteur des racines a toujours été limité principalement en raison de difficultés méthodologiques (Reubens et al 2005, 2007). Globalement, on considère que les racines modifient l'érosion du sol de la façon suivante (Gyssels et al 2005, Fig. 1):

- La perte en sol sur des terrains nouvellement préparés est généralement faible les premières années après le défrichement, puisque les racines des végétaux antérieurs créent des agrégats stables mais l'érosion augmente rapidement à mesure que les racines pourrissent et les agrégats se désagrègent (Ryan 1995; Turkelboom et al 1997).
- Les racines pénétrant le sol créent des macropores qui facilitent la diffusion de l'eau et des gaz, contribuant ainsi à un système de pores continus dans le sol qui améliorent sa capacité d'infiltration (Glinski et Lipiec, 1990). Li et al (1992) ont rapporté que l'infiltration du sol augmente après que les racines améliorent la porosité non-capillaire du sol et facilitent la formation d'agrégats stables à l'eau. Dans ces circonstances, la capacité accrue d'infiltration peut réduire le volume de ruissellement de surface et par conséquent l'érosion du sol. Toutefois, cela peut se compliquer dans de nombreuses situations car les racines peuvent aussi augmenter l'hydrophobicité du sol, réduisant l'infiltration dans la rhizosphère (Hallett et al 2003).
- Les racines qui se développent dans le sol occupent un espace qui était occupé auparavant par un espace poreux et des particules. Du fait que le diamètre des racines est généralement plus large que celui des pores, les particules du sol sont repoussées de chaque côté et la densité apparente du sol peut gagner jusqu'à 8 mm autour de la racine en développement (Glinski et Lipiec, 1990). Toutefois les radicelles inférieures à 1 mm de diamètre peuvent diminuer de façon significative la densité apparente du sol et accentuer la porosité (Li et al 1992; 1993). Cet effet dépend du diamètre racinaire et de la nature du sol et est probablement sujet à une grande variabilité car les racines se développent de préférences dans des pores préexistants et/ou un sol moins dense que la densité apparente moyenne (Passioura, 1991; Moran et al., 2000). On pense communément que, pour qu'un sol modifie sa résistance globale à l'érosion, il doit comporter un nombre important de racines dans sa partie supérieure, mais cela reste à étudier ainsi que la morphologie et la géométrie de ces racines.

(iii) *Fixation du sol et légère instabilité gravitaire du substrat*

Lorsque les forces gravitationnelles agissant sur la pente dépassent sa capacité de résistance, des mouvements gravitaires du substrat ou effondrement du versant et des glissements de terrain se produisent (cf Norris et al 2008). La végétation peut aider à prévenir le léger glissement de terrain de deux façons : (1) en modifiant le régime hydrique du sol par l'évapotranspiration ; et (2) en fournissant un renfort racinaire dans le sol, particulièrement en profondeur. La plupart des glissements de terrain se produisent lorsque les sols sont saturés c'est-à-dire à l'automne et en hiver, dans les régions tempérées et pendant la saison des pluies pour les climats tropicaux (Sidle et al 1985; Sidle and Ochiai 2006). Les modèles de stabilité des versants comprennent désormais l'effet de la végétation, en général à travers un paramètre supplémentaire de cohésion (Pollen and Simon 2005; Greenwood 2006; Kokutse et al 2010). Ce paramètre de cohésion est calculé à partir de données mesurées sur les systèmes racinaires sur le terrain, souvent pendant les mois d'été où le travail de terrain est plus facile mais aussi lorsque la croissance racinaire et la biomasse sont le plus développées, ce qui fausse les résultats (Stokes et al 2009). Les différences environnementales et climatiques, l'humidité du sol par exemple (Hales et al 2009), l'altitude (Genet et al 2010, en soumission), les plans et les espèces (Genet et al 2005) affectent la force mécanique des racines, un des facteurs qui régit le renfort racinaire et la cohésion du sol (Wu 1976). La gestion forestière et la composition des espèces (Genet et al 2008, 2010) affectent également de façon importante la densité racinaire et, par conséquent, la cohésion du sol, particulièrement lorsque des opérations d'éclaircissage conduisent à une configuration spatiale des arbres qui est loin d'être optimale (Danjon et al 2008). Actuellement, quelques données existent montrant des scénarios de gestion forestière optimisée qui prennent en compte la dynamique spatiale et temporelle des systèmes forestiers situés sur des versants abrupts. On ne comprend pas encore comment le mélange des espèces affecte la stabilité de la pente, par des modifications de la croissance

et des traits racinaires induits par la cohabitation des espèces (Mulia and Dupraz 2006; de Kroon 2007).

(iv) Redistribution hydraulique (dans des systèmes à l'enracinement profond)

La redistribution hydraulique, ou ascenseur hydraulique, est le processus par lequel les végétaux peuvent apporter passivement de l'eau située dans des couches profondes et humides du sol vers les couches supérieures plus sèches (Caldwell et al 1998). Bien que cela suscite depuis peu l'intérêt croissant de la recherche, on n'en comprend toujours pas le mécanisme et ses implications sur le fonctionnement des écosystèmes (Prieto et al 2010). Nous avons donc besoin d'évaluer son importance sur les cultures et les systèmes forestiers. Si nous supposons que les quantités d'eau impliquées par ce transfert sont importantes, l'ascenseur hydraulique pourrait modifier de façon significative la compétition entre les végétaux en ce qui concerne la transpiration. D'un autre côté, si les quantités d'eau remontées sont faibles, elles pourraient néanmoins avoir un impact assez fort sur l'environnement : l'eau transportée d'un lieu humide vers un lieu sec pourrait avoir de multiples fonctions, (a) elle pourrait aider à la mobilisation des nutriments qui sont hors de portée dans le sol sec ou (b) servir à diminuer la résistance du sol à la pénétration des racines ou (c) permettre aux racines de survivre dans des conditions très arides et d'être réactives au retour de la pluie. Par conséquent, si l'on suit ce scénario, l'ascenseur hydraulique est utile, non pas à déplacer de grandes quantités d'eau, mais à apporter de l'eau dans le but d'atteindre à des ressources difficiles d'accès (les nutriments).

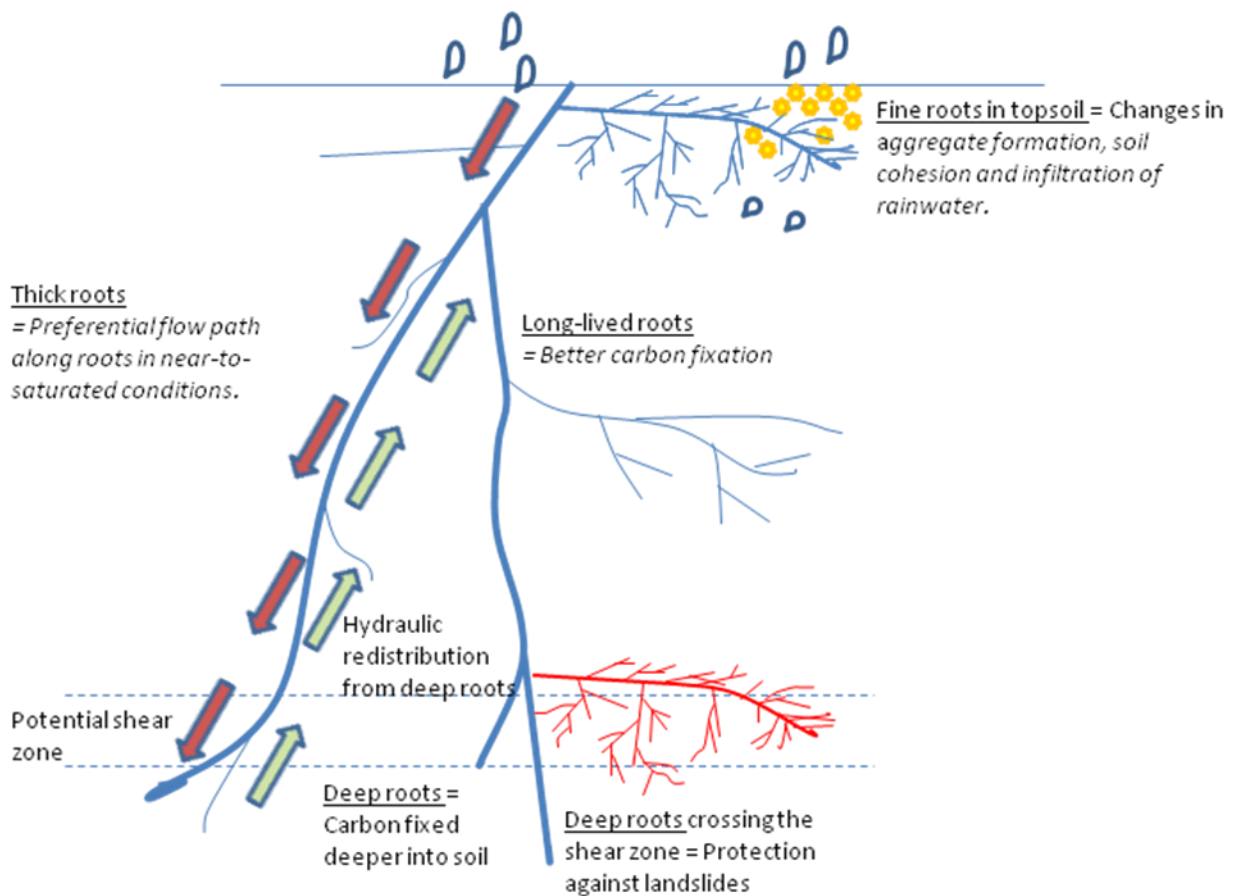


Fig. 1. En fonction de la profondeur de la racine dans le profile de sol, le rôle et la fonction différent, influençant par conséquent le service apporté

1.2. OBJECTIFS ET CARACTERE AMBITIEUX/NOVATEUR DU PROJET

Afin d'améliorer notre compréhension fondamentale de la façon dont les racines jouent sur la formation du sol/processus d'instabilité gravitaire, servent d'ascenseur hydraulique et transportent le carbone dans des puits de carbone souterrains, nous étudierons le rôle, la fonction et la forme des racines fines et des radicelles situées dans la partie supérieure du sol en comparaison avec les racines situées dans des couches plus profondes. Les processus physiologiques et dynamiques des racines situées près de la surface ont été bien documentés (cf. Gregory 2006), mais on ne sait pas si les racines profondes ont les mêmes fonctions. Les questions suivantes seront alors abordées :

- 1) **Quel est le rôle, la fonction et la forme des racines situées dans les couches profondes du sol comparées à celles des couches supérieures ?**
- 2) **Est-ce que le rôle la fonction et la forme diffèrent selon les espèces, les conditions des sites ou les saisons ?**
- 3) **Quels sont les services écosystémiques que les racines profondes et superficielles apportent et comment pourrions-nous en améliorer l'efficacité ?**

La séquestration du carbone et la conservation du sol sont très affectées par les conditions climatiques, l'utilisation des terres (Guo et Gifford 2002) et la composition de la communauté végétale (Fornara et Tilman 2008; Hollingsworth et al 2008; Pohl et al 2009). Ces dernières années, les liens entre la composition de la communauté végétale et les services écosystémiques ont bénéficié d'un intérêt grandissant de la part de la presse scientifique. Des expériences sur la biodiversité ont montré qu'il existait un lien de causalité entre le nombre d'espèces et la séquestration du carbone (Tilman et al 2006; Fornara et Tilman, 2008). Toutefois, il semble qu'il y ait actuellement un consensus, sur le fait que ce ne soit pas tant le nombre d'espèces mais la structure fonctionnelle de la communauté végétale qui détermine véritablement le fonctionnement de l'écosystème et ses services (Lavorel et Garnier 2002; Garnier et al 2004; Diaz et al 2006). Similairement, en agroforesterie, la cohabitation des espèces améliore la production dans et hors sol (Mulia et Dupraz 2006). Toutefois, les mécanismes qui régissent les modifications de la production, particulièrement dans les systèmes racinaires ne sont toujours pas compris (de Kroon 2007). **Dans le projet *Ecosfix*, nous étudierons comment les traits racinaires fonctionnels et structurels diffèrent spatialement dans des communautés végétales très différentes [forêt naturellement régénérée et agroforêt]. Nous utiliserons alors ces données pour déterminer les différents types de services que l'on peut attribuer aux racines des végétaux dans ces communautés.** Une telle étude n'a jamais été conduite par le passé, même si ces données paraissent aujourd'hui plus que nécessaires, à une époque où l'intensification écologique requiert de nouveaux concepts pour améliorer la production et le rendement.

On a rarement considéré les traits fonctionnels des systèmes racinaires modifiant la fixation du carbone même si les systèmes racinaires représentent la porte d'entrée du carbone vers le sol (Jackson et al 2000). La production racinaire, le renouvellement et la décomposition sont des processus clé dans le cycle du carbone du sol mais on a rarement utilisé des rhizotrons mis en place sur un certain nombre d'années pour les étudier, même si ce prérequis expérimental est aujourd'hui reconnu comme étant d'une grande importance si l'on veut obtenir des résultats précis (Strand et al 2008). On a démontré que la séquestration du carbone dépend fortement de la biomasse des racines fines et des radicelles (Fornara et Tilman 2008), alors que la croissance, le renouvellement et la décomposition sont principalement lié à la qualité de la racine, c'est-à-dire à la morphologie (longueur spécifique, diamètre, densité des tissus) et à la composition chimique (concentrations en azote et en fibres) (Eissenstat 1997; Klumpp et Soussana 2009; Silver et Miya 2001; Vivanco et Austin 2006; Zhang et al; 2008). La biomasse racinaire diffère selon la profondeur du sol, mais on connaît peu de chose sur les variations des traits racinaires dans les racines profondes et superficielles. **Notre objectif est donc**

de tester si les traits racinaires diffèrent selon le profil du sol, d'étudier le rôle des racines profondes et superficielles dans la fixation du carbone et le parcours dans le sol du carbone lié à la racine. Nous nous concentrerons sur la dynamique de croissance du système racinaire à différentes profondeurs et sur la relation avec le sol avoisinant par exemple sur l'extraction de l'eau et la respiration racinaire dans la matière organique du sol (MOS). Pour l'incorporation du carbone dans les sols, nous pratiquerons et adapterons des échantillonnages selon les profils de sol, qui seront représentatifs d'une fonction d'un trait racinaire et du type de couvert végétal. Il existe très peu de données de ce type (sur la compréhension de la relation entre les traits racinaires à travers le système racinaire et l'incorporation du carbone dans le sol, en profondeur), c'est pourquoi ces données nouvelles nous permettront d'avoir une meilleure compréhension des processus fondamentaux et pourront être utilisées dans des modèles de quantification du carbone. Ces études se dérouleront dans des divers contextes climatiques, géographiques, saisonniers et environnementaux (composition des espèces). En ce qui concerne les conditions saisonnières, dans les forêts tempérées, on a très peu d'éléments sur la dynamique de croissance racinaire pendant l'hiver, même si nous montrons que l'activité de croissance peut être remarquablement élevée même lorsque les températures du sol avoisinent zéro degré (Cadre 1, Fig ii). Les injections de carbone, l'hiver, des racines vers le sol peuvent probablement se produire, mais cela n'est pas pris en compte dans les modèles de quantification du carbone. **Nous pouvons alors supposer que, dans les forêts tempérées, la séquestration du carbone par les racines est sous estimée et *Ecosfix* devra parcourir un long chemin pour rectifier ce manque fondamental de connaissance scientifique, ce qui devrait conduire à des implications d'une portée considérable pour la recherche sur le changement climatique.**

La conservation des sols comprend l'étude de l'instabilité gravitaire du substrat et des processus d'érosion dus à l'eau. L'utilisation des parties aériennes des végétaux mais également des éléments souterrains pour la conservation des sols participe revêt une importance nouvelle, tandis que les chercheurs et les ingénieurs recherchent de nouvelles techniques pour prévenir la perte en sol sur les versants fragiles, agricoles, marginaux et forestiers (lorsque les populations et les infrastructures en aval en sont menacées). Les pays en voie de développement en particulier bénéficieraient d'un guide pratique et d'outils d'aide à la décision rattachés au projet *Ecosfix*, comme un concept d'ingénierie écologique et économique (Stokes et al 2007; Norris et al 2008). On a laissé entendre que la connaissance que nous avons sur la façon dont les racines améliorent (ou pas) la fixation du sol est proportionnellement similaire aux connaissances que nous avons de la mécanique du sol il y a 75 ans (Barker 1995). Dans le projet *Ecosfix*, nous nous efforcerons de déterminer quels traits fonctionnels/structurels des racines superficielles et profondes améliorent la cohésion du sol (et par conséquent la fixation du sol). Peu de données sont actuellement disponibles et elles sont limitées à des situations très précises (Burylo et al 2009; Stokes et al 2009). **Par des expériences et des modèles intégrés, *Ecosfix* devrait pouvoir fournir des données précises et permettre aux propriétaires, exploitants et aux agroforestiers de mieux déterminer l'association des espèces, les compositions spatiales et temporelles et les stratégies de gestion en ne perdant pas de vue la perte en sol des terrains en pente.**

Gardant pour ligne directrice l'amélioration de la gestion, *Ecosfix* se propose de comprendre l'importance fonctionnelle d'un des éléments les plus méconnus de la continuité sol-plant-atmosphère : la partie distale du système racinaire. Dans la mesure où la conductance hydraulique axiale des racines varie relativement selon leur position dans le système racinaire, il n'est pas toujours possible d'établir un lien direct entre l'exploration racinaire et la capacité d'un végétal à extraire de l'eau (Passioura 1972; Li et al 2002; Pierret et al 2006). Ainsi, au-delà d'une simple quantification de l'enracinement profond, l'objectif ambitieux et original d'*Ecosfix* est qu'il se concentre sur une analyse fonctionnelle des modèles d'enracinement y compris d'absorption d'eau. De récentes études

basées sur l'utilisation des isotopes stables de l'eau montre que les syst racinaires de certaines espèces pérennes et annuelles sont susceptibles de redistribuer l'eau mobilisée au sein de leur rhizosphère (Zegada-Lizarazou and Iijima 2004). Néanmoins, la quantité d'eau mobilisée par ce mécanisme et l'importance fonctionnelle restent indéterminées (Durand et al 2007). Nous relèverons ce défi et **évaluerons l'importance fonctionnelle de la redistribution hydrique (qu'elle soit verticale ou latérale) réalisée par des espèces présentant un enracinement profond au sein d'une population multi-spécifique et les bénéfices que les espèces associées présentant un enracinement superficiel peuvent tirer de ce processus.**

Certains aspects d'*Ecosfix* tournent autour de l'utilisation de modèles et de méthodes génériques. Afin de valider le croisement et couplage des modèles et les résultats fournis, les données saisies dans les modèles proviendront d'un réseau existant de sites expérimentaux (Fig2.). Ces '*Ecosites*' reposent sur un éventail de différents types de structures forestières complexes sous divers climats et présentant soit des instabilités gravitaires (légers glissements de terrain) soit des processus d'érosion dus à l'eau. Les partenaires du projet ont identifié les caractéristiques de tous ces sites qui font l'objet de suivi depuis un certain nombre d'années et, point particulièrement intéressant, les mesures de la dynamique de la croissance racinaire sont en cours sur trois sites (voir Cadre 1 ; Chamrousse, France, [Mao et al. 2010]; Aquiares, Costa Rica, [Roupsard et al. 2010; Gómez-Delgado et al., 2010] et Luang Prabang, Laos, [Pierret et al. 2007]). Sur le dernier site (Restinclières, France), l'architecture racinaire des espèces présentes a été mesurée en détail dans l'optique de comprendre la séquestration et la production du carbone des arbres et des cultures (Mulia and Dupraz, 2006). Il sera néanmoins nécessaire de poursuivre par des mesures supplémentaires sur chaque site afin de compléter la liste des paramètres requis pour les modèles. **L'utilisation d'un réseau existant de sites connus est un point fort du projet : rassembler les données pour une cause commune, cela n'a jamais été entrepris auparavant sur les traits racinaires (à notre connaissance).** La comparaison des résultats sur une échelle globale et sous différents climats nous permettra de déterminer comment différents types de forêts séquestrent du carbone. Nous soulignons le fait que le travail à réaliser sur site est limité, et a pour but d'harmoniser les données à analyser et à utiliser dans les modèles de quantification du carbone, de stabilité de la pente et d'érosion.

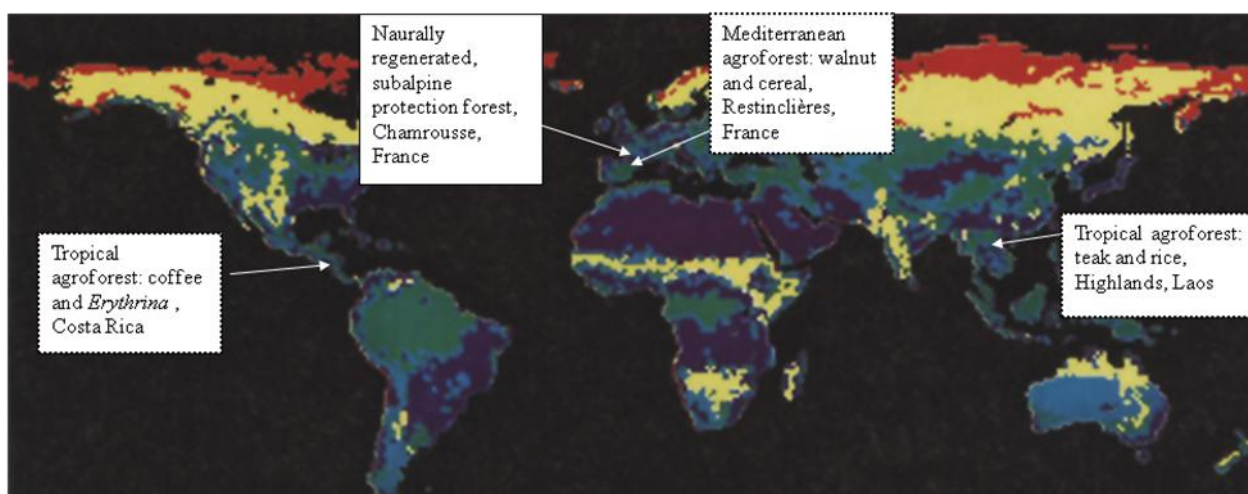


Fig. 2. Carte montrant la localisation géographique des *Ecosites*. Fieldsites are located in areas (purple, blue, green) where > 30% root biomass is found at depths > 0.3 m. Yellow and red areas indicate that 80 – 100% root biomass is found < 0.3 m beneath the soil surface (Jackson et al 1996). Either substrate mass movement occurs at a site (Chamrousse, France and Laos) and/or water erosion occurs (Restinclière, France, Costa Rica and Laos).

Cadre 1. Description des sites expérimentaux du projet *Ecosfix*

Restinclières, Hérault, France

Le Domaine de Restinclières (Fig i) est le site expérimental principal en Europe. Il est situé à 15km au nord de Montpellier (43,42°N – 3,51°E) et a été mis en place en 1995 par SYSTEM sur 54 ha de terres agricoles. Plus de 30 différentes espèces d'arbres sont en culture intercalaire avec des céréales sur des terres alluvionnaires et avec la vigne sur des terres en pente. Les sols alluvionnaires sont sujets aux crues soudaines et aux ruissellements intenses provenant des collines avoisinantes. Les sols en pente subissent un ruissellement important lors de pluies intenses méditerranéennes particulièrement à l'automne. Restinclières est une des sites clés de démonstration du réseau national d'agroforesterie géré par l'AFAP. Plusieurs modèles de compétition arbre-culture ont été développés et validés sur le site. Le climat est un climat sub-humide méditerranéen avec une température moyenne de 14,5 °C et des précipitations annuelles moyennes de 951 mm.

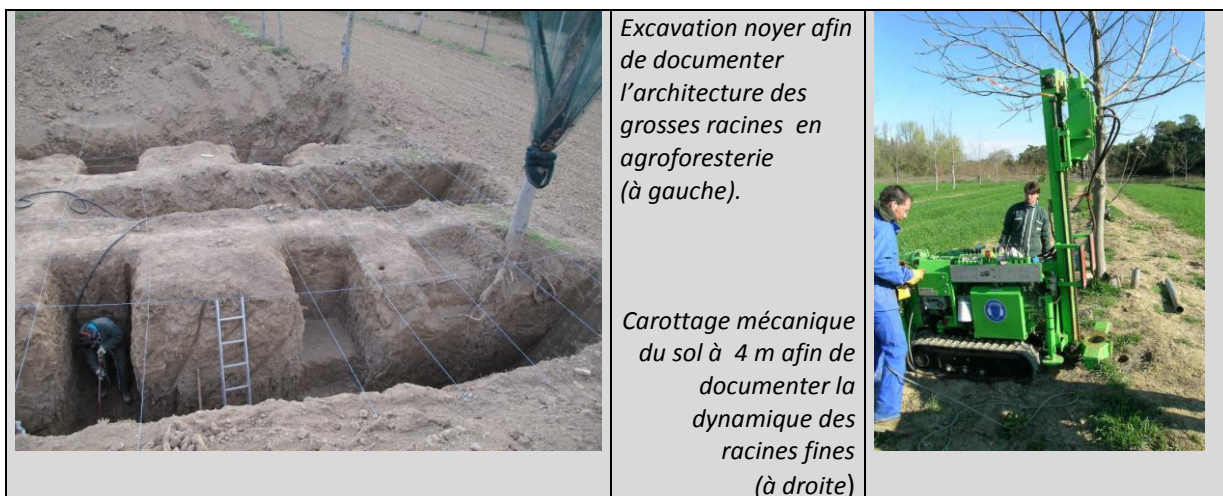


Fig i) une parcelle agroforestière noyer à Restinclières (à gauche)

Suivi du flux de sève et du transfert hydrique dans les racines pivotantes et superficielles pour documenter l'effet d'ascenseur hydraulique chez des noyers d'une parcelle agroforestières (à droite)



Sur les sols alluvionnaires, le blé dur est en culture intercalaire avec le noyer hybride (*Juglans nigra* × *Juglans regia* NG23). La nappe phréatique souterraine temporaire joue un rôle important dans la prévision du schéma racinaire et du renouvellement, avec une variation de profondeur enregistrée entre 0,5 et 4,5 m. Même sur les sols alluvionnaires, la formation spontanée de terrasses a été observée en moins de 10 ans grâce aux lignes d'arbres. La dynamique du schéma racinaire des arbres et des cultures a été documentée depuis la plantation des arbres. L'humidité du sol, la densité des racines fines, le prolongement des grosses racines, la biomasse issue de l'arbre (souterraine et à la surface du sol), la productivité des cultures sont suivis depuis la plantation des arbres. C'est le site où le rôle du schéma des racines profondes sur l'agroforesterie a été démontré pour la première fois. (Mulia and Dupraz, 2006)



Chamrousse, Isère, France

La dynamique de croissance racinaire (Fig ii) fait l'objet d'une étude en cours dans une forêt adulte, mixte, naturellement régénérée d'épicéas de Norvège (*Picea abies* (L.) Karst.) et de sapins blancs (*Abies alba* Mill.) qui poussent à 1730 m d'altitude (Bachat-Boulod forest, 45° 06' 16'' N; 5° 53' 07''



E). L'épicéa de Norvège y est dominant et pousse en ilots avec de larges espaces entre les ilots ou la densité racinaire est faible et la stabilité de la pente est compromise. Les dynamiques de régénération des deux espèces font l'objet d'un suivi dans le cadre d'un projet européen du Cémagref, coordonné par l'INRA (projet européen BACCARA). Cette forêt domaniale protège contre le mouvement des substrats et est située au sein d'une zone touristique de sport d'hiver. La végétation du sous-étage est dominée par les espèces suivantes : *Rhododendron ferrugineum* L., *Vaccinium myrtillus* L. et *Vaccinium vitis-idaea* subsp. *vitis-idaea*, *Prenanthes purpurea* L., *Campanula rotundifolia* L., *Campanula rhomboidalis* L., *Hieracium umbellatum* L., *Gentiana lutea* L.,

Potentilla erecta subsp. *erecta*, *Luzula* sp., *Alchemilla* sp. et *Avena* sp

Figure ii) croissance racinaire d'épicéas et de sapin dans un rhizotron en 2010 (Les racines blanchâtres ont moins de 4 semaines). Températures du sol comprises entre +1 et +3°; Températures de l'air comprises entre -20° et +4° et couvert neigeux de 0.75 m (données non publiées).

Luang Prabang, Laos

Houay Pano a été choisi comme bassin versant de référence par le projet MSEC de la République Démocratique Populaire du Laos en 1998 (<http://msec.iwmi.org>). Le bassin versant Houay Pano a été sélectionné parce qu'il est représentatif d'une zone de cultures itinérantes, qu'il est accessible par la route et offre ainsi des facilités de transport. Il est situé près du village de Ban Lak Sip (102° 10' 2'' E;

19° 50' 54" N; dans la province de Luang Prabang (Fig iii), au nord du Laos). Le bassin versant couvre une surface de 62 ha et 9 sous-bassins avec une utilisation des terres contrastée. La forêt primaire climacique à Diptérocarpacées a été défrichée à la fin des années 1960 et a été utilisée depuis lors pour la culture par une pratique de cultures itinérantes, sans intrant. La durée des jachères a diminué de 8,6 ans en 1970 à 3,2 ans en 2003 (Lestrelin et al., 2005; Lestrelin and Giordano, 2007). L'inventaire socio-économique et biophysique initial a été réalisé à la fin de 1998. On observe actuellement une érosion due à l'eau mais également des glissements de terrain. Le bassin versant est situé entre 400 et 800 m a.s.l. Le degré d'inclinaison du terrain est de 30%, variant entre 0 à plus de 100%. Le climat est un climat tropical humide à sec de mousson, avec une moyenne des précipitations annuelles d'environ 1300 mm/an. Les pluies sont fortement saisonnières, avec 77% des précipitations pendant la saison des pluies qui s'étale de mi-mai à mi-octobre, alors que la période de novembre à mars est assez fraîche et particulièrement sèche. Le système de drainage comprend un ruisseau pérenne de deuxième ordre, d'une longueur de 1200 m, de topographie irrégulière qui reçoit les eaux de divers ruisseaux éphémères.



Fig iii) Vue panoramique d'une occupation typique des terres dans un environnement montagneux près de Luang Prabang, Nord du Laos. Au premier plan : une culture de riz de montagne (R) et de teck (T) (*Tectona grandis* L.) tout récemment plantés. Sur chaque côté de la route on peut voir des plantations de Teck au développement rapide. Au dessus se trouvent des champs destinés aux cultures annuelles (principalement riz de montagne, maïs et larmes de Job), qui font partie des systèmes de culture itinérante (par écobuage). Près des crêtes montagneuses, le couvert végétal dense majoritairement sempervirent, correspond soit à des terres depuis longtemps en friches soit à des forêts secondaires (F). La photographie de droite est une illustration du suivi d'un profil d'enracinement profond sous un teck.

Aquiares, Costa Rica

Un bassin versant d'1 km² composé de caféiers, ombragé de façon homogène par de grands *Erythrina poeppigiana* est situé à Aquiares, une des plus grandes plantations de caféiers du pays, certifiée « Forêt tropicale humide », située sur les pentes du volcan Turrialba, entre 1020 et 1280 m d'altitude, très influencée par les conditions climatiques de la côte caraïbe, dépourvue d'intense période sèche. Le bassin versant est équipé d'instruments de mesure : minirhizotrons (Fig iv), canalisations automatiques des mesures de débit, pluviomètres, sondes déterminant l'humidité du

sol, piézomètres, turbidimètres, capteurs de flux de sèves et tour de covariance Eddy (pour les mesures de H₂O et de CO₂). "Coffee-Flux" est un sous projet de CAFNET (EuropAid/121998/C/G):

« Connecter, valoriser, soutenir et soutenir les services environnementaux et les valeurs marchandes des plantations agroforestières de café en Amérique Centrale, en Afrique de l'est et en Inde ». Coffee-Flux contribue au projet FLUXNET (<http://daac.ornl.gov/FLUXNET/>).

Figure iv) Scanner rotatif inséré dans des minirhizotrons pour la capture d'images sur la dynamique de la croissance racinaire.

