



**AMENDEMENTS DE
SOL ET PAILLIS POUR
DES PLANTATIONS
D'ARBRES VIABLES ET
RENTABLES EN EUROPE
ET DANS LA RÉGION
MÉDITERRANÉENNE**

GUIDE TECHNIQUE

www.sustaffor.eu



Auteurs :

Jaime Coello, Míriam Piqué

Département d'Aménagement forestier durable

Centre de Recherche Forestière de Catalogne (Centre Tecnològic Forestal de Catalunya, CTFC), Espagne

Collaborateurs :

Pere Rovira et Carla Fuentes (CTFC), Davy Ottevaere (TerraCottem Internacional), Stef Mussche (Terrezu SL), Luc Ruys (Centexbel).

Remerciements :

Au projet FP7 Sustaffor « Unir efficacité et viabilité pour le (re)boisement dans un contexte de changement climatique : nouvelles technologies pour améliorer les caractéristiques du sol et les performances de la plante », financé par le septième programme-cadre de l'Union européenne géré par le REA – Research Executive Agency en vertu de la convention de subvention no 606554. www.sustaffor.eu.

Au partenariat du projet Sustaffor, composé des PME : TerraCottem Internacional (ES), DTC (BE), ECORUB (BE), La Zeloise (BE), Terrezu (ES) et Ceres International (PL) et des entités de R et D : CTFC (ES), Centexbel (BE), CNRS (FR) et EDMA (ES).

Aux employés qui ont participé à l'installation, à l'entretien et au suivi des essais sur le terrain, à la *Sección de Gestión de Montes del Servicio Provincial de Huesca del Departamento de Agricultura, Ganadería y Medio Ambiente del Gobierno de Aragón*, au *Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca, Alimentació i Medi Natural de la Generalitat de Catalunya* de la région de la Cerdagne et aux propriétaires de terrains privés qui ont participé au projet.

Auteurs des photos de la page couverture (de haut en bas et de gauche à droite) : Jaime Coello, Lluís Coll, AGS-CTFC, AGS-CTFC, TerraCottem Internacional, AGS-CTFC.

Auteur des photos dans le document : AGS-CTFC, sauf mention contraire spécifique.

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos	5
1. Le défi de la plantation d'arbres en Europe et en Méditerranée	7
1.1. Quelques règles de base lors de la plantation d'arbres	9
1.2. Principales menaces pour les arbres nouvellement plantés	11
1.3. Comment aborder la lutte contre ces menaces : « les règles du jeu »	13
2. La lutte contre la sécheresse dans les plantations d'arbres	15
2.1. Résumé des principales techniques appliquées contre la sécheresse	17
2.2. Un aperçu des amendements de sol	19
2.2.1 Qu'est-ce qu'un amendement de sol ?	19
2.2.2 Une classification des amendements de sol	19
2.2.3 Principales caractéristiques des amendements de sol synthétiques	20
3. La lutte contre la végétation compétitrice dans les plantations d'arbres	23
3.1. Résumé des principales techniques utilisées contre la végétation compétitrice	25
3.2. Un aperçu des paillis	27
3.2.1 Qu'est-ce qu'un paillis ?	27
3.2.2 Une classification des paillis	28
4. Analyses des coûts des techniques contre la sécheresse et la végétation compétitrice	31
4.1. Analyse des coûts de différentes techniques contre la sécheresse	34
4.1.1. Prémisses de l'analyse	34
4.1.2. Résultats de l'analyse des coûts	35
4.1.3. Analyse de sensibilité	36
4.2. Analyse des coûts de différentes techniques contre la végétation compétitrice	37
4.2.1. Prémisses de l'analyse	37
4.2.2. Résultats de l'analyse des coûts	38
4.2.3. Analyse de sensibilité	39
5. Références et informations supplémentaires	41
6. Annexes	45
Annexe 1. Le projet Sustaffor : développement et évaluation de nouvelles techniques de plantation d'arbres	47
Annexe 2. Étude de cas : application et performances d'un nouvel amendement de sol synthétique	49
Annexe 3. Étude de cas : application et performances d'un nouveau paillis de longue durée de caoutchouc recyclé	51
Annexe 4. Étude de cas : application et performances d'un nouveau paillis biodégradable de biopolymère	53
Annexe 5. Étude de cas : application et performances d'un nouveau paillis biodégradable de jute tissée traitée avec une résine organique	55

AVANT-PROPOS

La plantation d'arbres est un défi complexe qui peut viser de multiples objectifs. À l'échelle mondiale, il existe d'innombrables initiatives, en lien avec la plantation d'arbres, qui ont des finalités diverses telles que : la production, la protection des eaux et des sols, la restauration des écosystèmes forestiers, un usage social ou paysager, etc. Par exemple, seulement dans le cadre de la restauration écosystémique, pour laquelle la plantation d'arbres est une composante fondamentale, l'objectif 15 de la Convention sur la diversité biologique des Nations Unies de 2010 propose de restaurer 15 % des écosystèmes dégradés à l'échelle mondiale. De la même façon, la Déclaration de New York sur les forêts de 2014 prétend restaurer 200 millions d'hectares avant 2030. Au total, il est estimé que le défi de la restauration forestière au niveau mondial touche plus de 2000 millions d'hectares.

Le succès de la plantation d'arbres dépend du respect d'une série d'exigences qui incluent le choix adéquat du matériel végétal (de grande qualité et adapté au site), la manipulation et l'installation correctes des plants, de même que l'application de techniques de plantation adéquates (principalement la préparation du terrain). Une fois les arbres installés, particulièrement pendant les premières années, il est impératif d'éviter l'effet négatif des principaux facteurs qui peuvent mettre en danger les arbres récemment plantés. Dans des conditions climatiques tempérées, comme celles présentes en Europe et en Méditerranée, les principales menaces sont la sécheresse, la végétation compétitrice et la faune.

Ce Guide Technique se concentre sur les deux premières menaces : la sécheresse et la végétation compétitrice. Il présente certaines des principales techniques dont dispose le gestionnaire d'une plantation d'arbres pour atténuer l'effet négatif de ces menaces. Dans le Guide, une emphase particulière est mise sur deux techniques relativement peu utilisées traditionnellement, mais qui, grâce aux dernières avancées techniques, présentent un intérêt croissant d'un point de vue technique, économique et environnemental dans nos conditions : les amendements de sol et les paillis.

Une partie importante du contenu de ce guide inclut la synthèse de certaines des principales conclusions du projet FP7 Sustaffor réalisé de 2013 à 2015. Pendant ce projet, un ensemble de techniques innovatrices contre la sécheresse et la végétation compétitrice dans les plantations d'arbres ont été développées et évaluées dans l'objectif de créer de nouvelles solutions pour améliorer l'efficacité à faible coût et la viabilité de cette activité. Ces techniques sont :

- Un nouvel amendement de sol, qui vise à atténuer l'effet négatif de la sécheresse
- Quatre nouveaux paillis, qui permettent d'atténuer l'effet négatif de la végétation compétitrice. Ces quatre modèles incluent des paillis biodégradables faits de nouveaux biopolymères ou de jute tissée, de même que des paillis de longue durée (réutilisables) fabriqués à partir de caoutchouc recyclé.

Cette recherche a été financée par le Septième programme-cadre de l'UE géré par le REA – *Research Executive Agency* <http://ec.europa.eu/research/rea> (FP7/2007-2013) en vertu de la convention de subvention n° 606554.



A photograph of a forest with tall, thin trees and a dense canopy of green leaves. The ground is covered in green undergrowth. A group of people is visible in the lower part of the image, standing among the trees. The image is split horizontally, with the top half showing the canopy and the bottom half showing the ground and people. A blue rectangular box is overlaid on the right side of the image, containing the title text. The background of the entire image is a solid light green color.

1.

Le défi de la plantation d'arbres en Europe et en Méditerranée

1. Le défi de la plantation d'arbres en Europe et en Méditerranée

1.1. Quelques règles de base lors de la plantation d'arbres

La plantation d'arbres peut viser différents objectifs parmi lesquels la génération de **produits** (bois, fruits, biomasse, liège, champignons, chasse) et le développement de **services environnementaux** (la protection du sol, l'eau et la biodiversité) et **sociaux** (paysage, espace récréatif, jardinage) sont les plus habituels. Le succès de tout projet de plantation d'arbres dépend d'une grande **chaîne complexe de facteurs**, telle que décrite ci-après. Le gestionnaire peut contrôler certains de ces facteurs, alors que d'autres sont imprédictibles.

Les **cinq règles de base de la plantation d'arbres** sont :

- **Caractériser le climat et le sol** : il est nécessaire de connaître adéquatement le climat et le sol du site de la plantation. Souvent, des phénomènes ponctuels ou intermittents (par exemple, un vent particulièrement desséchant, l'inversion thermique dans le fond d'une vallée, la présence de calcaire actif ou une veine de gypse, etc.) peuvent être aussi importants que les caractéristiques générales de la zone : précipitations annuelles et estivales, caractéristiques générales du sol...
- **Travailler au niveau de la microstation** : la zone à planter est rarement homogène. Certaines caractéristiques qui changent à petite échelle comme les différentes physiographies (relief concave ou convexe), l'inclinaison de la pente et l'orientation peuvent avoir une importance capitale pour les conditions du milieu, particulièrement pour la balance hydrique. Il est donc nécessaire d'effectuer un zonage de la surface à planter afin d'adapter le choix des espèces et les techniques de plantation aux différentes microstations.



Photo 1. Les caractéristiques du sol et du climat des versants situés au premier plan sont constantes. Néanmoins, les changements de physiographie et d'orientation amènent, en quelques dizaines de mètres, des conditions (et par conséquent une végétation) très différentes : le versant gauche montre une végétation arbustive dense (disparaissant sur la crête à l'extrême gauche de la photo); le versant droit est à peine couvert de végétation, alors que les zones planes et concaves (le fond de la vallée) sont amplement boisées. La plantation d'arbres doit imiter cette façon de faire de la nature en adaptant les espèces et les techniques aux différentes microstations.

- **Choix du matériel végétal** : en fonction de la caractérisation du climat et du sol (au niveau général et au niveau de la microstation) et de l'observation des espèces présentes dans la zone. Les principaux facteurs de décision sont l'espèce et la variété, la provenance, l'âge et le format. En général, il est accepté que les jeunes plants les plus résilients et satisfaisants sont ceux qui sont sains et vigoureux, qui ont eu un bon apport en nutriments, qui ont avec un système racinaire bien développé et un tronc lignifié. De plus, il est recommandé d'utiliser différentes espèces, si possible avec des caractéristiques fonctionnelles variées (reproduction végétative et germinative, avec des racines profondes et superficielles, fixatrices d'azote atmosphérique...), pour augmenter la capacité du nouveau système à se perpétuer malgré les incertitudes liées à l'évolution du climat et aux autres menaces. D'autres améliorations à considérer incluent la mycorhization des arbres (associés à des champignons symbiotiques) ou la réalisation d'un ensemencement direct, particulièrement intéressant dans le cas des espèces à racine pivotante telles que les espèces méditerranéennes du genre *Quercus*.
- **Préparation du terrain** : l'adéquation de la zone à planter définit en grande partie les probabilités de succès du projet de plantation d'arbres. La préparation du sol vise à faciliter l'acclimatation du jeune plant aux nouvelles conditions, à accroître la capacité de rétention de l'eau et à réduire la compaction du volume de sol occupé par les racines pendant les premières années.

Lorsque la disponibilité en eau est un facteur limitant, la préparation du sol doit être particulièrement intense et profonde pour permettre aux racines d'atteindre, le plus tôt possible, les horizons profonds du sol protégés du dessèchement.



Photo 2 et 3. Lorsque la disponibilité en eau est un facteur limitant, la préparation du sol doit être particulièrement intense et profonde pour permettre aux racines d'atteindre, le plus tôt possible, les horizons profonds du sol protégés du dessèchement.

- **Préparation et exécution de la plantation d'arbres** : il faut respecter les saisons pour assurer le succès de la plantation d'arbres. Dans les régions où l'influence méditerranéenne est forte, avec des hivers doux et des étés secs, il est préférable de planter les arbres en automne pour permettre aux racines de se développer le plus longtemps possible pendant la période la plus humide de l'année et ainsi leur permettre de tolérer plus facilement la période sèche. De la même façon, dans les régions où les hivers sont plus froids et sans sécheresse marquée, il est préférable de planter les arbres au printemps pour éviter les dommages causés par les gelées. D'autres facteurs clés qui peuvent entraîner l'échec de la plantation sont reliés à la manipulation des plants avant et pendant la plantation. Avant de planter les arbres, les phases les plus critiques sont l'extraction des plants de la pépinière (particulièrement s'ils sont présentés à racines nues), leur transport vers la zone de plantation (qui doit être réalisé à l'aide de véhicules spécialement équipés) et leur entreposage, jusqu'au moment de la plantation. Ce dernier doit être le plus bref possible et les plants doivent être en tout temps protégés de l'insolation et du vent. L'exécution de la plantation est particulièrement critique, ce qui implique que le travail doit être effectué par des professionnels expérimentés qui garantissent une installation correcte des plants. Ils doivent être plantés complètement verticaux, sans plier ni abimer les racines. Le collet doit se retrouver à égalité avec le sol et le sol doit être compacté de façon adéquate pour éliminer les poches d'air sans abimer les racines.

1.2. Principales menaces pour les arbres nouvellement plantés

Le respect des cinq règles mentionnées précédemment est indispensable pour que le projet de plantation d'arbres soit viable. Il s'agit de la **première phase** du processus. La **seconde phase**, qui s'étend pendant (au moins) la phase juvénile des arbres, est liée à **l'atténuation de l'effet des principales menaces** qui peuvent mettre en péril le futur des arbres. Dans les zones tempérées, comme celles prédominant en Europe et en Méditerranée, les principales menaces pour la plantation d'arbres, particulièrement pendant les premières années, sont :

- **Sécheresse:** particulièrement dans les régions d'influence méditerranéenne où le climat est caractérisé par une période sèche qui coïncide avec la période la plus chaude de l'année. Il en résulte que les écosystèmes souffrent d'un déficit hydrique dont l'intensité présente une grande variabilité géographique et interannuelle. En raison de l'augmentation des températures et d'une plus grande irrégularité dans le régime des précipitations, les projections climatiques pour les prochaines décennies indiquent que l'impact de la sécheresse pourrait être de plus en plus important dans les zones méditerranéennes. Par conséquent, dans un futur rapproché, même les zones qui présentaient traditionnellement une sécheresse légère ou nulle pourraient être exposées à des limitations hydriques. La pente, la physiographie convexe, l'orientation sud et certaines caractéristiques du sol telles que la faible profondeur, une texture sablonneuse ou une pierrosité élevée sont d'autres facteurs qui peuvent exacerber l'effet négatif d'une période de sécheresse.



Photo 4. La sécheresse est particulièrement nuisible pour les jeunes plants ayant un système racinaire peu développé

- **Végétation compétitrice :** la végétation spontanée (herbacées, ronces, etc.) peut entrer en compétition avec les arbres nouvellement plantés pour l'eau, les nutriments du sol et la lumière. En plus de l'effet négatif direct sur les arbres, cette végétation peut rendre difficile la gestion de ces derniers puisqu'elle peut cacher les arbres à la vue pendant les premiers mois ou premières années. Cette menace est particulièrement importante dans les zones de productivité moyenne ou élevée où la prolifération de la végétation spontanée est particulièrement intense.



Photos 5 et 6. À gauche : chêne vert (à l'intérieur du rectangle rouge) à l'ombre des herbacées qui sont quatre fois plus hautes. À droite : employés libérant un arbre de la concurrence pour évaluer son état

- **Dommages causés par la faune** : les populations grandissantes d'ongulés (particulièrement les chevreuils, les sangliers et les cerfs), ajoutées aux espèces de pâturage extensif (mouton, chèvre, vache), peuvent mettre en péril le succès d'une plantation d'arbres. Le risque que représente cette menace dépend des espèces (d'arbres et de faune) impliquées et de facteurs difficiles à prévenir tels que l'abondance et les mouvements possibles des différentes espèces animales pendant la période où les arbres sont particulièrement vulnérables.



Photos 7 et 8. Dommages causés par la faune. À gauche : un jeune plant de pin déraciné par un sanglier. À droite : annélation d'un jeune cerisier par un chevreuil

L'impact de ces trois menaces sur un arbre jeune peut donner lieu, en quelques jours ou semaines (minutes, dans le cas de la faune), à une perte de vigueur, une diminution de la croissance et finalement à la mort. Ces trois menaces doivent être prises en compte lors de la conception d'un projet de plantation d'arbres en prévoyant les techniques adéquates permettant de les combattre pendant les premières années de la plantation. **Ce guide se concentre sur les deux premières menaces (sécheresse et végétation compétitrice), plus particulièrement sur les amendements de sol et les paillis visant à atténuer leurs effets négatifs**

Comment aborder la lutte contre ces menaces : « les règles du jeu »

Afin de mener avec succès le projet, la plantation d'arbres doit être complétée par l'application d'une série de techniques visant à atténuer l'effet négatif des menaces décrites précédemment. Ces techniques doivent **remplir les conditions** suivantes :

- **Efficacité à faible coût et prévisibilité** : en considérant le cycle de la technique en entier: acquisition, transport, installation ou application, entretien et élimination, la plantation d'arbres doit être complétée avec succès au moindre coût possible. De plus, les techniques dont l'application est imprévisible (par exemple, les mesures correctives appliquées en cas d'urgence) sont moins intéressantes que celles dont l'application peut se prévoir et se planifier à l'avance.
- **Viabilité** : la pression croissante de l'opinion publique envers la mise en œuvre de pratiques plus viables et respectueuses de l'environnement définit la législation et les politiques en vigueur et, par conséquent, les techniques et les méthodes qui peuvent être employées. L'impact environnemental d'une technique fait référence à son cycle de vie complet, ce qui inclut les matières premières utilisées pour sa fabrication (qui doivent être renouvelables ou recyclées de préférence), son utilisation et son entretien (doit être de faible impact et avoir un coût en énergie et en combustible le plus faible possible) et son élimination une fois qu'elle a terminé sa fonction (de préférence, lorsqu'il y a lieu, les produits employés doivent être biodégradables et inoffensifs, ou bien recyclables).
- **Fonctionnement autonome et effet soutenu** : il convient de minimiser la dépendance aux interventions répétées de l'application. Il faut aussi minimiser l'investissement dans la main d'œuvre qui représente un des plus importants facteurs conditionnant le coût total d'un projet de plantation d'arbres. De plus, l'effet positif de la technique doit se prolonger le plus longtemps possible.

L'optimisation de l'investissement est un principe fondamental. En général, lors de la plantation d'arbres, il est plus efficace d'assurer le succès d'un nombre raisonnable d'arbres par hectare plutôt que de diluer les ressources disponibles dans un nombre excessif d'arbres dont il n'est pas possible de garantir le succès. Par conséquent, **la plantation d'arbres doit se planifier à long terme**. Il faut choisir une densité initiale adéquate, faire un zonage permettant de profiter des microstations les plus adéquates, réaliser une préparation du sol méticuleuse, utiliser des plants de qualité maximale et des techniques de plantation efficaces, viables et autonomes. De cette façon, il est possible de garantir le succès du projet tout en minimisant les interventions d'entretien.





2.

La lutte contre la sécheresse
dans les plantations d'arbres

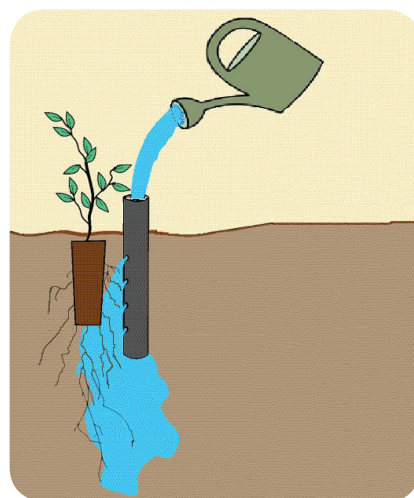
2. La lutte contre la sécheresse dans les plantations d'arbres

2.1. Résumé des principales techniques appliquées contre la sécheresse

La disponibilité de l'eau est le facteur le plus limitant pour le développement végétal dans la majorité des écosystèmes, incluant ceux d'influence méditerranéenne. Par conséquent, une grande variété de techniques visant à augmenter le volume d'eau disponible pour un arbre planté ont été développées. Le Tableau 1 décrit une sélection des techniques les plus utilisées, de manière individuelle ou combinée, en Europe et en Méditerranée.



Photos 9 et 10. À gauche : la cuvette d'arrosage, un système simple pour concentrer l'eau de pluie près d'un arbre. À droite : citerne d'arrosage et tracteur pour effectuer des arrosages d'appoint ou d'urgence



Photos 11 et 12. À gauche : système d'irrigation par gravité constitué d'un réservoir d'eau connecté à un système de goutte à goutte. À droite : schéma d'un système de micro-irrigation constitué d'un tube semi-enterré de PVC percé de petits orifices.
Martínez de Azagra & Del Río (2012)

Tableau 1. Principales techniques utilisées contre la sécheresse dans les plantations d'arbres. Adapté de Coello et al. (2015) et basé sur Mansourian et al. (2005), Chirino et al. (2009), Coello et al. (2009), Oliet & Jacobs (2012), Vallejo et al. (2012), Piñeiro et al. (2013) et Stanturf et al. (2014).

Type de technique	Technique	Description	Niveau de réalisation des objectifs			Utilisation dans des zones inaccessibles pour la machinerie traditionnelle (par ex. : tracteur agricole)
			Efficace à faible coût et prévisible	Viable	Autonome et effet soutenu	
Préparation du sol spéciale	Collecte d'eau : cuvette d'arrosage, microbassin	Modification de la microtopographie pour concentrer le ruissellement	x / o	o	+	Oui
	Préparation du sol à une grande profondeur	Préparation du sol à une grande profondeur (> 60–80 cm) pour favoriser la rétention de l'eau et l'accès des racines aux couches profondes	o	x / o	+	Oui
Arrosage artificiel	Arrosage d'urgence ou d'appoint avec citerne	Arrosage avec citerne et tuyau d'arrosage	x / o	x	x	Non
	Arrosage avec réservoir ou pompe et goutte à goutte	Goutte à goutte, à chaque arbre ou rangée d'arbres, connecté à un réservoir ou une prise d'eau	x	x	x	Non
	Micro-irrigation	Irrigation localisée réalisée en profondeur à partir d'éléments préinstallés à côté de l'arbre : tubes, récipients en terre cuite ou de plastique perforés ou avec une mèche	x / o	o	x / o	(dépend de la technique)
Amendements de sol	Amendements de sol	Produit mélangé avec le sol pour améliorer ses propriétés physiques, particulièrement la capacité de rétention de l'eau	+	o	+	Oui

x: faible o: moyen +: élevé

2.2. Un aperçu des amendements de sol

2.2.1 Qu'est-ce qu'un amendement de sol ?

Comme mentionné dans le Tableau 1, **un amendement de sol est un produit incorporé au sol pour améliorer les propriétés physiques du sol (et, dans certains cas, les propriétés chimiques aussi), en imitant le fonctionnement de la matière organique.** Le fondement de cette technique est de compenser une carence du sol qui pourrait être limitante pour le développement initial des arbres, plus particulièrement une texture déséquilibrée (trop légère ou trop pesante), un niveau insuffisant de nutriments, une capacité d'échange cationique insuffisante ou un niveau insuffisant de stabilité des agrégats.

Un amendement de sol prétend améliorer les propriétés du sol suivantes :

- **Capacité de rétention de l'eau** : les sols de texture légère (très sablonneux) sont peu agglomérés et ils ont une faible capacité de rétention de l'eau et des nutriments, ce qui peut être critique pour un arbre jeune pendant une période sèche.
- **Perméabilité et structure du sol** : les sols de texture pesante (très argileux) ont tendance à se compacter, limitant ainsi l'aération et la perméabilité (mouvement de l'air et de l'eau à travers le sol). Il en résulte un risque de développement inadéquat des racines et de problèmes sanitaires causés par l'inondation ou l'asphyxie. Les amendements de sol peuvent être appliqués autant pour promouvoir l'infiltration (pénétration de l'eau dans le sol) que la percolation (mouvement de l'eau à travers le sol).
- **Nutriments du sol** : les amendements de sol peuvent apporter des nutriments (minéraux ou matières organiques, de libération rapide ou lente), améliorer la capacité de rétention des nutriments (particulièrement dans les sols légers) ou augmenter la disponibilité des nutriments déjà présents dans le sol (calcaire, magnésium, potassium, ammonium...) par l'augmentation de la capacité d'échange cationique (CEC).

Les amendements de sol facilitent l'**acclimatation des arbres** au site de plantation, augmentent leur survie et leur vigueur initiale et préviennent le risque de stagnation de la croissance qui pourrait mettre en danger le développement futur de l'arbre. De plus, cette technique est compatible avec d'autres techniques utilisées contre la sécheresse mentionnées dans le Tableau 1.

2.2.2 Une classification des amendements de sol

Les principaux types de produits utilisés en tant qu'amendement de sol incluent :

- **Amendements organiques** : compost, humus, tourbe, charbon à usage agricole ou « biochar » et résidus d'activités agricoles (restes des récoltes ou du processus industriel), d'élevages (déjections), forestières (copeaux, sciures) et urbaines (boues d'épuration, résidus solides).
- **Amendements d'origine minérale** : gypse, calcaire, argile, vermiculite, perlite.
- **Amendements synthétiques** : produits qui incluent des polymères hydroabsorbants artificiels.

La disponibilité géographique et les caractéristiques physico-chimiques de plusieurs de ces produits sont très variables, empêchant par le fait même de généraliser leurs effets et les recommandations d'utilisation. Les prochaines sections se concentrent sur les amendements de sol aux performances plus stables : les amendements de sol synthétiques.



Photos 13 et 14. Certains produits utilisés comme amendement de sol. À gauche : compost (auteur : Normanack). À droite : substrat de pépinière (tourbe)



Photos 15 et 16. À gauche : vermiculite, un amendement minéral (auteur : Forestal Catalana). À droite : amendement synthétique TerraCottem Universal® (auteur : TerraCottem Internacional)

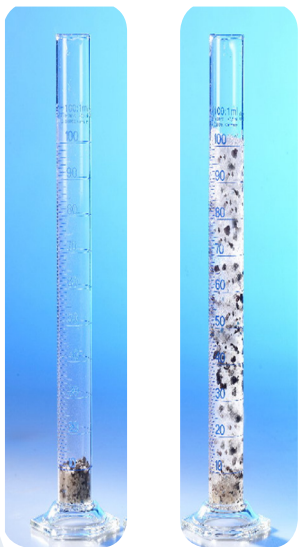
2.2.3 Principales caractéristiques des amendements de sol synthétiques

Les amendements de sol synthétiques s'utilisent principalement dans l'objectif d'**éviter ou de réduire la nécessité de faire de l'arrosage artificiel** pour n'importe quel type de projet de plantation d'arbres, incluant les pépinières forestières. Ces produits incluent des **polymères hydroabsorbants** (aussi connus comme polymères superabsorbants ou hydrogels), qui se commercialisent de façon individuelle ou encore mélangés avec d'autres ingrédients. En entrant en contact avec l'eau (par exemple, lors d'un épisode de pluie), les polymères s'hydratent et peuvent absorber un volume d'eau 50 fois supérieur à leur grosseur. Les semaines suivantes, au fur et à mesure que le sol s'assèche, l'eau emmagasinée dans le polymère peut être utilisée par les racines.

L'élément clé pour la formulation des polymères hydroabsorbants est de réussir à atteindre l'équilibre au niveau de leur capacité hygroscopique (pouvoir d'absorption et de rétention de l'eau) qui doit être :

- Suffisamment forte pour limiter les pertes d'eau par lixiviation (gravité) et par évaporation, demeurant ainsi à la disposition des racines durant de longues périodes de temps
- Suffisamment modérée pour ne pas entrer en compétition avec les racines de l'arbre pour l'humidité du sol pendant les périodes de sécheresse.

Pour améliorer leur performance, ces polymères se **combinent habituellement avec d'autres ingrédients**. De cette façon, l'amendement de sol obtient des propriétés additionnelles qui lui permettent d'améliorer les propriétés physiques et chimiques du sol.



Photos 17 et 18. L'absorption de l'eau par un amendement de sol synthétique fait de polymères hydroabsorbants. À gauche : ajout de 100 g d'eau distillée à 2 g d'amendement de sol TerraCottem Universal®. À droite : après 30 minutes, l'amendement de sol hydraté a absorbé 90 % de l'eau qui sera complètement absorbée en moins de 2 heures (auteur : TerraCottem Internacional)

Les **principaux avantages** des amendements de sol synthétiques incluent leur polyvalence puisqu'ils sont utiles dans tous les types de projets de plantation d'arbres dans des zones ayant des périodes de déficit hydrique, leur application simple et directe lors de la plantation d'un arbre (il faut simplement le mélanger avec la terre du trou de plantation), le faible dosage nécessaire et l'absence d'entretien.

Cependant, les amendements de sol synthétiques présentent un **inconvénient** : la mauvaise perception sociale liée à certaines formulations, comme pour le polymère Polyacrylamide. Le polyacrylamide n'est pas toxique, mais il s'obtient lors de l'union (polymérisation) de molécules du monomère Acrylamide, qui lui est toxique. En conditions naturelles, le polyacrylamide ne peut pas libérer le monomère, mais lors du processus de fabrication du polyacrylamide, il reste des traces du monomère. Si les fabricants ne réalisent pas suffisamment de contrôles de qualité, le polyacrylamide peut inclure un contenu en acrylamide libre supérieur aux limites établies par la loi. La mauvaise perception sociale du polyacrylamide en est la conséquence directe.

L'**Annexe 1** présente le projet Sustaffor dont l'objectif est de développer et d'évaluer une série de techniques de plantation innovatrices visant à améliorer les projets de plantation d'arbres. L'évaluation de l'application et des performances de chacune de ces nouvelles techniques est décrite dans les études de cas des annexes suivantes. L'**Annexe 2** décrit l'étude de cas d'un nouvel amendement de sol synthétique.





3.

La lutte contre la végétation
compétitrice dans les
plantations d'arbres



3. La lutte contre la végétation compétitrice dans les plantations d'arbres

3.1. Résumé des principales techniques utilisées contre la végétation compétitrice

La végétation compétitrice est un facteur particulièrement problématique pour les sites **de productivité moyenne-élevée et pour les arbres plantés récemment**. Au fur et à mesure de leur développement, puisqu'ils disposent d'un système racinaire plus profond et d'une couronne qui fait de l'ombre au sol rendant plus difficile la prolifération de la végétation, les arbres deviennent moins susceptibles à l'effet négatif de la végétation compétitrice. Malgré le fait que le développement de la végétation compétitrice, et par le fait même son effet négatif, dépend en grande partie du climat annuel (favorisé par les printemps humides), l'incidence de ce facteur est plus prévisible que celui de la sécheresse. Par conséquent, lors de la conception d'un projet de plantation d'arbres, il faut prévoir et quantifier la nécessité d'appliquer des techniques contre la végétation compétitrice. Leur utilisation est **obligatoire dans la majorité des conditions** pendant les cinq à dix premières années après la plantation.

Le Tableau 2 décrit les principales techniques utilisées en Europe et dans la région méditerranéenne pour éviter l'effet négatif de la végétation compétitrice sous les arbres plantés.



Photos 19 et 20. À gauche : débroussaillage mécanique manuel avec une débroussailleuse. À droite : débroussaillage mécanique avec un broyeur à axe horizontal actionné par un tracteur (auteur : M Burgess)



Photos 21 et 22. À gauche : désherbage chimique avec sac à dos applicateur (auteur : Servei de Sanitat Vegetal, DARP, Generalitat de Catalunya). À droite : fraisiers et framboisiers cultivés comme couvre-sol

Tableau 2. Principales techniques utilisées contre la végétation compétitrice dans les plantations d'arbres. Adapté de Coello et al. (2015) et basé sur Mansourian et al. (2005), Chirino et al. (2009), Coello et al. (2009), Olet & Jacobs (2012), Vallejo et al. (2012), Piñeiro et al. (2013) et Stanturf et al. (2014).

Type de technique	Technique	Description	Niveau de réalisation des objectifs			Utilisation dans des zones inaccessibles pour la machinerie traditionnelle (par ex. : tracteur agricole)
			Efficace à faible coût et prévisible	Viable	Autonome et effet soutenu	
Débroussaillage mécanique	Débroussaillage manuel	Destruction de la végétation compétitrice à l'aide d'outils ou de machines manuelles (par ex. : débroussailleuse); intervention récurrente avec risque d'endommager les arbres	X	o	X	Oui
	Débroussaillage mécanique à l'aide de machinerie	Destruction de la végétation compétitrice à l'aide de matériel agricole actionné par de la machinerie (par ex. : débroussailleuse ou charrue); intervention récurrente avec risque d'endommager les arbres ou de ne pas libérer l'arbre de la concurrence si n'est pas appliquée suffisamment près	o	X	X	Non
Débroussaillage chimique	Application d'herbicides	Application de produits qui assèchent la végétation compétitrice ou évitent sa germination; intervention récurrente avec un impact environnemental élevé et sujette à des restrictions légales croissantes	+	X	X	Oui
Ombrage ou barrière	Culture de couverture	Ensemencement de plantes rampantes de faible compétitivité près de l'arbre créant une couverture dense qui empêche la germination de végétation spontanée plus agressive; demande une bonne connaissance du terrain et des interactions entre l'arbre et la plante cultivée	X	+	+	Non
	Paillage du sol	Couvrir le sol autour de l'arbre pour empêcher l'établissement ou le développement de végétation compétitrice	o/+	o/+	+	Oui

X: faible o: moyen +: élevé

3.2. Un aperçu des paillis

3.2.1 Qu'est-ce qu'un paillis ?

Il s'agit d'un **dispositif installé au pied d'un arbre** ou suivant une rangée d'arbres dans une plantation dans le but d'**empêcher l'établissement ou la prolifération de la végétation compétitrice près du tronc**. Le paillis (aussi appelé « mulch ») a un triple effet :

- **Empêcher la germination** des graines des espèces compétitrices, ou la **repousse** de ces dernières (effet d'ombrage), et empêcher que de nouvelles graines non désirées **atteignent le sol** et puissent s'installer près de l'arbre (effet de barrière).
- **Atténuer la perte d'eau du sol par évaporation.**
- En maintenant une zone libre de végétation compétitrice autour de l'arbre, il est plus facile de retrouver ce dernier et, par conséquent, les **tâches d'entretien et de suivi** en sont aussi facilitées. Le risque de dommages, par exemple, lors d'un débroussaillage mécanique à l'aide de machinerie est ainsi réduit.

Finalement, les paillis **modifient les conditions du climat et du sol au niveau de la microstation**, plus particulièrement la température et la circulation de l'eau et de l'air entre le sol et l'atmosphère. Par exemple, le débourrement peut être accéléré par le paillis de plastique noir qui augmente rapidement la température à la surface du sol. Les effets sont très variables en fonction de la composition et de l'épaisseur du paillis.



Photo 23. Le paillage du sol permet de maintenir une zone libre de végétation compétitrice autour d'un arbre jeune, même dans des conditions de grande compétition

L'utilisation de paillis permet de **réduire ou d'éviter le besoin d'utiliser des techniques récurrentes contre la végétation compétitrice (débroussaillages)**, ce qui rend les paillis particulièrement intéressants sur les sites et dans les systèmes de gestion où il faut **minimiser les investissements au niveau de l'entretien et de la main d'œuvre**.

3.2.2 Une classification des paillis

Il existe une **grande variété** de produits et de matériaux employés comme paillis, de même que différentes façons de les classer. Le Tableau 3 résume les principaux types de paillis.



Photos 24 et 25. À gauche : paillis à base de copeaux de branches provenant de l'élagage urbain et de jardinage. À droite : paillis à base de copeaux résiduels provenant d'opérations forestières (auteur : L. Coll)



Photos 26 et 27. Paillis de plastique. À gauche : film de polyéthylène noir. À droite : polypropylène blanc tissé

Tableau 3. Une classification des paillis

Type	Principaux sous-types	Avantages	Inconvénients
Paillis de particules : couche composée de fragments empilés	Particules organiques : résidus ou sous-produits d'activités agricoles ou forestières, compostés ou non (paille, copeaux, bois raméal fragmenté, écorce des arbres, etc.)	- Matières premières renouvelables; possibilité de valoriser des résidus - Biodégradable, le paillis ne nécessite pas d'être retiré (application unique) - Grande valeur esthétique - Températures extrêmes adoucies - Effets positifs possibles sur la fertilité et sur la matière organique du sol au fur et à mesure qu'il se dégrade	- Hétérogénéité : les propriétés varient en fonction du matériau utilisé, de la grosseur et de la forme des particules et de l'épaisseur utilisée - Application difficile dans les zones de fortes pentes - Les particules légères (par ex. la paille) peuvent demander d'être remplacées dans les zones venteuses - Hygroscopicité : les particules absorbent de l'eau et doivent rester humides pour être perméables, ce qui est un problème dans les zones où les précipitations sont de faibles intensités - Problèmes sanitaires possibles dus à la prolifération de champignons
	Particules inorganiques : pierres	- Matériau gratuit s'il est abondant dans la zone - Paillis totalement perméable, sans hygroscopicité - Si les pierres sont poreuses (par ex. plusieurs pierres d'origine volcanique), l'apport en eau peut être favorisé par la rosée - Le paillis n'a pas besoin d'être retiré, tant que les pierres ne limitent pas la croissance	- Paillis non commercial : viable seulement dans les zones pierreuses et avec des pierres adéquates, préférablement plates et peu denses - Hétérogénéité : les propriétés du paillis dépendent de la grosseur et de la forme des pierres et de l'épaisseur du paillis - Dans les zones en pente, le glissement des pierres peut causer des blessures aux employés et des dommages aux arbres
Paillis sous forme de toile : couche unique et continue	Paillis de plastique : film de polyéthylène ou tissu de polypropylène, d'une durée de vie de 5 à 7 ans	- Performance homogène et consistante - Grande variété d'options sur le marché (couleur, densité, forme, matériau, format, protection UV) adaptables au site de plantation - Matériau léger et bon marché (à l'achat, pour le transport et pour l'installation) - Possibilité de mécaniser l'installation : couvrir des rangées d'arbres - Film de polyéthylène : bonne atténuation de l'évaporation de l'eau du sol - Polypropylène tissé : bonne perméabilité	- Il est nécessaire de le retirer (opération coûteuse) pour ne pas contaminer la zone de la plantation - Matière première non renouvelable et non recyclable après son utilisation - Grand impact visuel - Polypropylène tissé : risque de prolifération de la végétation compétitrice entre les fibres du paillis
	Paillis de longue durée : fait d'un matériau durable (par ex. des plaques de bois ou de caoutchouc)	- Durabilité très prolongée : intéressante pour un usage à moyen ou long terme (par ex. jardinage ou zones vertes); possibilité de le réutiliser dans différents projets de plantation - Peut ne pas nécessiter de fixation au sol, grâce à sa haute densité - Peut être composé de matières premières renouvelables, recyclées et recyclables	- En fonction de la matière première, il peut être nécessaire de le retirer - Acquisition et transport coûteux
	Paillis biodégradable : fait de biopolymères, de fibres végétales (tissées ou sous forme de feutre), papier traité, carton...	- Matières premières renouvelables; possibilité de valoriser des résidus - Biodégradable, ne nécessite pas d'être retiré (application unique) - Grande valeur esthétique (en fonction du modèle) - Effets positifs possibles sur la fertilité et sur la matière organique du sol au fur et à mesure qu'il se dégrade - Disponibilité croissante des produits sur le marché	- Matériau plus dense et/ou plus cher que le plastique - La durabilité des nouveaux produits peut être en attente de validation - Les feuilles de papier traité (par ex. avec de la paraffine) ou de carton peuvent être difficiles à installer

Les Annexes 3, 4 et 5 décrivent respectivement trois études de cas sur l'application et les performances de trois nouveaux paillis de sol : i) paillis de longue durée à base de caoutchouc recyclé; ii) paillis biodégradable fait d'un nouveau biopolymère et iii) paillis biodégradable de jute tissée traitée avec de la résine organique.





4.

Analyses des coûts des techniques
contre la sécheresse et la
végétation compétitrice



4. Analyses des coûts des techniques contre la sécheresse et la végétation compétitrice

Ce chapitre discute d'une série d'**analyses des coûts d'application de différentes techniques contre la sécheresse et la végétation compétitrice**. Les techniques considérées incluent celles qui sont les plus communément utilisées contre chaque menace, de même que quelques techniques innovatrices, incluant les amendements de sol et les paillis, en relation avec les techniques présentées dans les Annexes 2 à 5.

L'objectif de ces analyses est de comparer les **coûts engendrés par l'application de chaque technique** individuellement afin de faciliter la prise de décisions concernant l'option la plus viable au niveau d'un projet de plantation d'arbres. Chaque analyse des coûts a été complétée par une brève analyse de sensibilité qui démontre comment les résultats de l'analyse sont affectés par les variations des facteurs de calculs (par ex. le prix de la main d'œuvre).

Les analyses ne tiennent pas compte des autres coûts liés à la plantation d'arbres (préparation du sol, acquisition du plant, exécution de la plantation, etc.). De plus, il est assumé que toutes les techniques analysées contre la sécheresse ou contre la végétation compétitrice ont le même effet sur les arbres et qu'il est indispensable d'appliquer une ou l'autre de ces techniques pour que le projet de plantation d'arbres obtienne des résultats satisfaisants. Par exemple, l'application d'une dose précise d'amendements de sol ou d'un nombre déterminé d'arrosages d'appoint correspond à une gestion optimale permettant que le projet de plantation d'arbres soit un succès. L'effet positif possible de l'application de paillis sur l'humidité du sol, la modulation des températures extrêmes ou l'amélioration de la fertilité du sol par rapport au débroussaillage n'ont pas non plus été pris en compte.

Les prix et les rendements utilisés dans les analyses se basent sur l'expérience réelle sur le terrain et sur le *Prontuario forestal* (Colegio de Ingenieros de Montes, 2005). Ces chiffres, de même que le reste des prémisses utilisées dans les analyses (mentionnées ci-dessous), **doivent être interprétés et adaptés aux circonstances particulières de chaque gestionnaire** et aux facteurs intrinsèques de chaque projet :

- Capacité de planifier et d'appliquer des interventions récurrentes
- Disponibilité de la machinerie et des employés
- Patron de répartition temporelle de l'investissement : il est possible d'opter pour concentrer l'investissement au début du projet pour ensuite le minimiser postérieurement afin de prioriser un investissement stable et connu (par exemple des mesures préventives telles que les amendements de sol et les paillis). Une autre option serait de distribuer l'investissement durant les premières années, en l'ajustant à l'incertitude de l'évolution de la zone plantée. Pour cela, la mise en place d'un suivi régulier et, par conséquent, l'utilisation de mesures correctrices, comme les arrosages d'appoint et les débroussaillages répétés, sont nécessaires.

La section 4.1 décrit une analyse des coûts de différentes techniques contre la sécheresse et la section 4.2 décrit une analyse des coûts de différentes techniques contre la végétation compétitrice. Dans les deux cas, trois **scénarios de plantation d'arbres** sont utilisés afin de représenter différentes conditions :

- a) Site de la plantation plat, accessible et facilement praticable. Chaque trajet aller et retour des employés qui appliquent ou installent les techniques contre la sécheresse ou la végétation compétitrice dure 40 minutes.
- b) Site avec une pente modérée (10-20 %) et une accessibilité intermédiaire : chaque trajet aller et retour dure 80 minutes.
- c) Site avec une pente forte (30-50 %) et difficile d'accès : chaque trajet aller et retour dure 120 minutes.

Les autres prémisses de l'analyse sont :

- Prix de la main d'œuvre : 18 €/h, journée de travail de 8 h incluant le trajet aller et retour vers le site où la plantation est réalisée.
- Coûts et rendements marginaux non considérés (coûts unitaires plus faibles ou meilleurs rendements lorsque le nombre d'arbres plantés est plus élevé). L'effet possible de la densité utilisée n'a pas non plus été pris en compte.

4.1. Analyse des coûts de différentes techniques contre la sécheresse

Cette analyse compare les coûts d'application de **deux types de techniques contre la sécheresse** :

- **Arrosages d'urgence ou d'appoint** : une ou deux interventions. Le coût des interventions supplémentaires peut être calculé à partir des chiffres mentionnés.
- **Amendement de sol, tel que décrit dans l'Annexe 2, pour deux doses différentes** : 40 g/arbre (dose pour les jeunes plants de petite ou de moyenne taille) et 100 g/arbre (dose pour les jeunes plants de grande taille).

4.1.1. Prémisses de l'analyse

Prémisses reliées aux arrosages d'appoint

- Les arrosages d'appoint se font pendant les 3 premières années après la plantation. Les taux d'intérêt ne sont pas considérés dans les calculs.
- L'intervention est réalisée par une équipe de 3 personnes (conducteur du tracteur avec citerne + 2 opérateurs pour les tuyaux d'arrosage). Le rendement de cette équipe sur un site plat est de 150 arbres/h (24 secondes/arbre). Il est assumé que ce rendement ne sera pas affecté par la taille des arbres, bien que le rendement soit réduit pour les arbres plus grands qui nécessitent un plus grand volume d'eau.
- L'utilisation d'un arrosage d'appoint dans les scénarios b) (pente modérée, accessibilité intermédiaire) et c) (pente forte, difficile d'accès) suppose une réduction du rendement respectif de 25 % et de 50 % par rapport au scénario a) (plat, bonne accessibilité).
- Le coût de l'équipement (tracteur, citerne, tuyau d'arrosage, combustible) est de 22 €/h.
- Le temps nécessaire pour planifier chaque arrosage d'appoint, incluant le suivi pour évaluer la nécessité de l'intervention et pour la gestion des employés, est de 3 h (1 personne).
- Le temps nécessaire pour remplir la citerne d'eau, monter et démonter les tuyaux d'arrosage et les autres activités intrinsèques à chaque arrosage est de 1 h (1 personne).
- Le coût de déplacement pour réaliser chaque arrosage d'appoint se calcule en considérant une vitesse moyenne de 30 km/h, un coût d'amortissement de l'équipement de 0,40 €/km et une durée du trajet telle que mentionnée pour chaque scénario (40, 80 et 120 minutes pour les scénarios a), b) et c) respectivement). Par conséquent, le coût de chaque déplacement (aller et retour) est de 8 €, 16 € et 24 €, respectivement.

Prémisses reliées à l'application de l'amendement de sol

- Le coût d'acquisition de l'amendement de sol est de 10 €/kg. Par conséquent, le coût unitaire est de 0,4 €/arbre si la dose utilisée est de 40 g/arbre et de 1,0 €/arbre si la dose utilisée est de 100 g/arbre.
- Le rendement de l'application de l'amendement de sol sur un site plat est de 240 arbres/h (15 secondes/arbre) pour une dose de 40 g/arbre et de 144 arbres/h (25 secondes/arbre) pour une dose de 100 g/arbre. Le rendement de l'application a été calculé comme le temps supplémentaire nécessaire lors de la plantation d'un arbre avec amendement par rapport à la plantation du même arbre sans amendement.
- L'application de l'amendement de sol pour les scénarios b) et c) suppose une réduction dans le rendement de l'intervention de 10 % et de 25 % respectivement par rapport au scénario a).

4.1.2. Résultats de l'analyse des coûts

Coûts d'application des arrosages d'appoint et des amendements de sol

Le Tableau 4 décrit les coûts d'application des arrosages d'appoint (une ou deux interventions durant les trois premières années) et d'un amendement de sol tel que décrit dans l'Annexe 2 (doses de 40 g/arbre et de 100 g/arbre) pour les trois scénarios de plantation. Deux tailles de plantation ont été analysées pour chaque scénario, soit 300 arbres et 1000 arbres.

Tableau 4. Coût total et coût unitaire (€/arbre) estimés en fonction des prémisses décrites dans la section 4.1.1 pour l'application de différentes techniques contre la sécheresse pour trois scénarios de référence et pour la plantation de 300 et de 1000 arbres.

Scénario	Nombre d'arbres	Type de coûts	Techniques contre la sécheresse			
			1 AA Tracteur + citerne	2 AA Tracteur + citerne	AS 40 g/arbre (Hauteur du jeune plant : 15-60 cm)	AS 100 g/arbre (Hauteur du jeune plant : ≥100 cm)
a) Site plat et accessible	300 trees	Total	245	490	145	340
		Unitaire	0,8	1,6	0,5	1,1
	1.000 trees	Total	630	1 255	480	1.135
		Unitaire	0,6	1,3	0,5	1,1
b) Pente modérée (10-20 %), accessibilité intermédiaire	300 trees	Total	310	620	150	350
		Unitaire	1,0	2,1	0,5	1,2
	1.000 trees	Total	825	1 655	495	1.160
		Unitaire	0,8	1,7	0,5	1,2
c) Pente forte (30-50 %), difficile d'accès	300 trees	Total	380	760	155	Ne s'applique pas ⁽¹⁾
		Unitaire	1,3	2,5	0,5	
	1.000 trees	Total	1 045	2 090	515	
		Unitaire	1,0	2,1	0,5	

AA: arrosage d'appoint; AS: amendement de sol

⁽¹⁾ Puisque l'utilisation de jeunes plants de grande taille dans le cadre du scénario c) n'est pas considérée viable, la possibilité d'appliquer 100 g/arbre pour ce scénario n'est pas considérée.

Conclusions de l'analyse des coûts

- L'application de l'**amendement de sol à la dose recommandée pour les jeunes plants de petite ou moyenne taille (40 g/arbre) est moins coûteuse que l'arrosage d'appoint. La différence est plus importante lorsque l'accessibilité se détériore.** Par ailleurs, lorsque la plantation d'un nombre élevé d'arbres sur des sites plats et faciles d'accès est considérée, le coût unitaire d'un arrosage d'appoint se rapproche du coût d'application de l'amendement de sol.
- L'application de l'amendement de sol à la dose recommandée pour les jeunes plants de grande taille (100 g/arbre) est plus coûteuse qu'un arrosage d'appoint, bien que le coût soit similaire dans le cas des plantations d'un petit nombre d'arbres dans des zones d'accessibilité intermédiaire.
- L'application de deux arrosages d'appoint est le type d'intervention le plus coûteux.

4.1.3. Analyse de sensibilité

Le prix de la main d'œuvre est un des facteurs de calcul affectant le plus les résultats de l'analyse économique et variant le plus entre les différentes régions dans le contexte européen et méditerranéen. Le Tableau 5 décrit une analyse de sensibilité où il est possible d'observer comment la variation des prix de la main d'œuvre (12, 18 et 24 €/h) affecte les résultats de l'analyse économique décrite dans le Tableau 4.

Tableau 5. Coût unitaire (€/arbre) de l'application de différentes techniques contre la sécheresse en fonction de différents prix de la main d'œuvre pour la plantation de 300 et de 1000 arbres pour les trois scénarios évalués.

Scénario	Nombre d'arbres	Techniques et prix de la main d'œuvre											
		1 AA Tracteur + citerne			2 AA Tracteur + citerne			AS 40 g/arbre (Hauteur du jeune plant : 15-60 cm)			AS 100 g/arbre (Hauteur du jeune plant : ≥100 cm)		
			18 €/h	24 €/h	12 €/h	18 €/h	24 €/h	12 €/h	18 €/h	24 €/h	12 €/h	18 €/h	24 €/h
a) Site plat et accessible	300	0,6	0,8	1,0	1,2	1,6	2,1	0,5	0,5	0,5	1,1	1,1	1,2
	1000	0,5	0,6	0,8	0,9	1,3	1,6	0,5	0,5	0,5	1,1	1,1	1,2
b) Pente modérée (10-20 %), accessibilité intermédiaire	300	0,8	1,0	1,3	1,6	2,1	2,6	0,5	0,5	0,5	1,1	1,2	1,2
	1000	0,6	0,8	1,0	1,3	1,7	2,1	0,5	0,5	0,5	1,1	1,2	1,2
c) Pente forte (30-50 %), difficile d'accès	300	1,0	1,3	1,6	1,9	2,5	3,2	0,5	0,5	0,6	Ne s'applique pas ⁽¹⁾		
	1000	0,8	1,0	1,3	1,6	2,1	2,6	0,5	0,5	0,6			

AA: arrosage d'appoint; AS: amendement de sol

⁽¹⁾Puisque l'utilisation de jeunes plants de grande taille pour le scénario c) n'est pas considérée viable, la possibilité d'appliquer 100 g/arbre pour ce scénario n'est pas considérée.

Conclusions de l'analyse de sensibilité

- **Le coût de l'application des amendements de sol dépend du prix de la main d'œuvre dans une moindre mesure que le coût de l'application d'arrosages d'appoint.** La variation du coût d'application de chacune de ces techniques lors de l'augmentation du prix de la main d'œuvre de 12 à 24 €/h est de 30 % et de 70 % respectivement.
- **L'intérêt de l'amendement de sol par rapport à l'arrosage d'appoint est d'autant plus évident lorsque le prix de la main d'œuvre est élevé (24 €/h).** Dans ce cas-là, le coût d'application de 100 g/arbre d'amendement est similaire au coût d'un arrosage d'appoint pour de petites quantités d'arbres plantés sur des sites d'accès intermédiaire. Cependant, si le prix de la main d'œuvre est faible (12 €/h), le coût d'application d'un arrosage d'appoint diminue jusqu'à devenir similaire à celui de l'application de 40 g/arbre d'amendement de sol sur les sites accessibles.

4.2. Analyse des coûts de différentes techniques contre la végétation compétitrice

Cette analyse compare les **coûts d'application de différentes techniques contre la végétation compétitrice** au niveau de l'arbre individuel. Des **techniques de référence (débroussaillage mécanique et chimique et paillis de plastique)** et des **techniques innovatrices (paillis de longue durée et paillis biodégradable, à différents coûts d'acquisition)** ont été sélectionnées. La période de référence de l'analyse représente les cinq premières années d'un projet de plantation de 1000 arbres.

4.2.1. Prémisses de l'analyse

Prémisses générales

- Le taux d'intérêt est de 1,5 %.
- Le temps nécessaire pour planifier chaque intervention d'entretien (débroussaillage, retrait du paillis de plastique ou de longue durée), incluant le suivi pour évaluer la nécessité de l'intervention et la gestion des employés, est de 3 h (1 personne).
- Le coût de déplacement pour la réalisation de chaque intervention d'entretien est calculé en considérant l'utilisation d'un véhicule conventionnel (coût unitaire : 0,30 €/km), une vitesse moyenne de 60 km/h et une durée du trajet telle que mentionnée pour chaque scénario (40, 80 et 120 minutes pour les scénarios a), b) et c) respectivement). Par conséquent, le coût de chaque déplacement (aller et retour) est de 12 €, 24 € et 36 € respectivement.
- Indépendamment de la technique utilisée contre la végétation compétitrice au niveau de l'arbre (il est considéré que toutes ces techniques s'appliquent sur une surface carrée de 100 x 100 cm et que l'arbre se trouve au centre de cette surface), il faut considérer l'application d'autres interventions supplémentaires, comme des débroussaillages mécaniques avec machinerie, au niveau de toute la superficie plantée. Le coût de ces interventions supplémentaires n'a pas été calculé.

Prémisses reliées au débroussaillage mécanique et chimique

- Le coût de l'équipement utilisé lors du débroussaillage mécanique (débroussailleuse, combustible, équipement de protection individuelle) est de 6,0 €/h. Le rendement de l'intervention est de 60 arbres/h (60 secondes/arbre).
- Le coût de l'équipement utilisé pour le débroussaillage chimique (sac à dos applicateur, herbicide, équipement de protection individuelle) est de 3,0 €/h. Le rendement de l'intervention est de 80 arbres/h (45 secondes/arbre).
- Pour chaque scénario de plantation, le nombre de débroussaillages à faire dépend de la productivité du site. Trois niveaux de productivité ont été considérés, ce qui donne lieu à un nombre variable de débroussaillages :
 - * **Productivité élevée** : deux débroussaillages annuels pour les années 1, 2, 3 et 4 et un débroussaillage pour l'année 5.
 - * **Productivité moyenne** : un débroussaillage annuel pour les années 1, 2, 3, 4 et 5.
 - * **Productivité faible** : un débroussaillage l'année 2 et un autre débroussaillage l'année 5.

Prémisses reliées à tous les paillis

- Les paillis s'installent adéquatement et ils ne nécessitent pas d'entretien (repositionnement des unités endommagées ou éliminées par la faune ou par le vent, etc.).

Prémisses reliées au paillis de plastique

- Le coût d'acquisition est de 0,9 €/unité, incluant les piquets métalliques en forme de U pour le fixer au sol.
- Le rendement de l'installation est de 120 secondes/unité (30 unités/h).
- Le paillis est retiré à la fin de l'année 5, avec un rendement de 100 secondes/unité (36 unités/h).

Prémisses reliées au paillis de longue durée

- Deux coûts d'acquisition sont considérés : 4,5 €/unité et 6 €/unité. Le coût des éléments de fixation n'a pas été considéré.
- Le paillis a une durée de vie de 15 ans. Chaque unité peut être installée pour trois projets de plantation d'arbres différents pendant 3 périodes consécutives de 5 ans chacune. Le calcul des coûts est réalisé en considérant que chaque paillis est installé lors des années 1, 6 et 11 et est retiré lors des années 5, 10 et 15. Par conséquent, le coût d'application de chaque paillis pour chaque période de 5 ans est du tiers du coût d'acquisition, de trois installations et de trois retraits. Étant donné sa haute densité, son application n'a pas été considérée dans le cadre du scénario c).
- Le rendement de l'installation et du retrait est de 90 secondes/unité (40 unités/h).

Prémisses reliées au paillis biodégradable

- Deux coûts d'acquisition sont considérés : 2 €/unité et 3 €/unité, incluant les piquets métalliques en forme de U pour le fixer au sol.
- Le paillis fait effet durant 5 ans.
- Le rendement de l'installation est de 120 secondes/unité (30 unités/h).

4.2.2. Résultats de l'analyse des coûts

Coût d'application des débroussaillages et des paillis

Le Tableau 6 décrit les coûts unitaires de l'application (acquisition, installation ou application, retrait) des différentes techniques contre la végétation compétitrice, pendant les 5 premières années d'un projet de plantation d'arbres. Les calculs ont été réalisés pour 1000 arbres en considérant les trois scénarios et les trois niveaux de productivité décrits précédemment.

Tableau 6. Coût unitaire (€/arbre) de l'application de différentes techniques contre la végétation compétitrice pour la plantation de 1000 arbres, en fonction de trois scénarios d'application et de trois niveaux de productivité. Les calculs se basent sur les prémisses décrites dans la section 4.2.1. Le coût total (€) peut être calculé en multipliant le coût unitaire par 1000.

Scénario	Productivité	Techniques contre la végétation compétitrice						
		Débroussaillage mécanique	Débroussaillage chimique	Paillis de plastique 0,9 €	Paillis de longue durée 4,5 € ⁽¹⁾	Paillis de longue durée 6 € ⁽¹⁾	Paillis biodégradable 2 €	Paillis biodégradable 3 €
a) Site plat et accessible	Faible	1,0	0,7	2,2	2,7	3,2	2,7	3,7
	Moyenne	2,6	1,8					
	Élevée	4,6	3,2					
b) Pente modérée (10-20 %), accessibilité intermédiaire	Faible	1,3	0,9	2,6	3,0	3,5	2,8	3,8
	Moyenne	3,3	2,3					
	Élevée	5,9	4,1					
c) Pente forte (30-50 %), difficile d'accès	Faible	1,6	1,1	3,0	Ne s'applique pas pour les sites de pente forte		3,1	4,1
	Moyenne	4,1	2,8					
	Élevée	7,3	5,1					

⁽¹⁾ les coûts montrés correspondent à la moyenne de 3 utilisations de 5 ans chacune (1 acquisition, 3 installations, 3 retraits)

Conclusions des analyses des coûts

- Pour les sites de **faible productivité**, où le nombre de débroussaillages nécessaire est faible (deux ou moins), les paillis ne sont pas une option économique viable.
- Pour les sites de **productivité moyenne**, avec la prévision d'un débroussaillage annuel pendant les cinq premières années, le débroussaillage chimique est l'option la moins coûteuse, bien que pour les sites difficiles d'accès, le coût est similaire à celui du paillis de plastique et du paillis biodégradable à 2 €. Dans le cas où l'utilisation d'herbicide est restreinte, le paillis de plastique est toujours moins cher que le débroussaillage mécanique. De plus, pour les sites accessibles facilement, les paillis biodégradables à 2 € et les paillis de longue durée à 4,5 € ont un coût similaire à celui du débroussaillage mécanique pour les sites facilement accessibles, et inférieur à mesure que l'accessibilité se détériore. Dans le cas d'un site difficile d'accès, le paillis biodégradable à 3 € présente des coûts similaires au débroussaillage mécanique.
- Pour les sites de **productivité élevée**, l'utilisation de paillis est l'option la moins coûteuse. Seulement les modèles les plus chers (paillis de longue durée à 6 € et biodégradable à 3 €) sur les sites accessibles facilement offrent des prix similaires ou légèrement plus élevés que ceux du débroussaillage chimique.
- Le coût d'utilisation des **paillis de longue durée** à 4,5 € présente des coûts similaires à ceux des paillis biodégradables à 2 € sur les sites facilement accessibles, et légèrement plus chers pour les sites d'accessibilité intermédiaire. L'utilisation de paillis de longue durée à 6 € est moins coûteuse que celle de paillis biodégradable à 3 €.
- L'intérêt des **paillis biodégradables** dépend principalement du coût d'acquisition. Les unités à 2 € présentent des coûts similaires à ceux des paillis de plastiques lorsque l'accessibilité est intermédiaire, et plus particulièrement lorsqu'elle est difficile. Les unités à 3 € ne sont pas compétitives par rapport aux paillis de plastiques selon l'analyse réalisée. Les avantages environnementaux des paillis biodégradables représentent un des aspects à tenir en compte, bien qu'il n'ait pas été incorporé dans le modèle, puisqu'ils sont considérés de plus en plus lors de la plantation d'arbres.

4.2.3. Analyse de sensibilité

Tout comme pour l'analyse de sensibilité pour les techniques contre la sécheresse (Tableau 5, le Tableau 7 décrit comment les différents niveaux de prix de la main d'œuvre (12, 18 et 24 €/h) affectent l'analyse des coûts des techniques contre la végétation compétitrice réalisée à la section 4.2.2.

Tableau 7. Coût unitaire (€/arbre) de l'application de différentes techniques contre la végétation compétitrice pour la plantation de 1000 arbres, en fonction de trois prix de la main d'œuvre, de trois scénarios d'application et de trois niveaux de productivité.

Scénario	Productivité de la zone	Techniques et prix de la main d'oeuvre																				
		Débroussaillage mécanique			Débroussaillage chimique			Paillis de plastique; 0,9 €			Paillis de longue durée; 4,5 € ⁽¹⁾			Paillis de longue durée; 6 € ⁽¹⁾			Paillis biodégradable; 2 €			BPailis biodégradable; 3 €		
		12 €/h	18 €/h	24 €/h	12 €/h	18 €/h	24 €/h	12 €/h	18 €/h	24 €/h	12 €/h	18 €/h	24 €/h	12 €/h	18 €/h	24 €/h	12 €/h	18 €/h	24 €/h	12 €/h	18 €/h	24 €/h
a) Site plat et accessible	Faible	0,8	1,0	1,3	0,5	0,7	0,9															
	Moyenne	1,9	2,6	3,2	1,3	1,8	2,3	1,8	2,2	2,6	2,3	2,7	3,1	2,8	3,2	3,6	2,4	2,7	2,9	3,4	3,7	3,9
	Élevée	3,4	4,6	5,8	2,3	3,2	4,2															
b) Pente modérée (10-20 %), accessibilité intermédiaire	Faible	1,0	1,3	1,7	0,7	0,9	1,2															
	Moyenne	2,5	3,3	4,1	1,7	2,3	2,9	2,0	2,6	3,1	2,5	3,0	3,5	3,0	3,5	4,0	2,6	2,8	3,1	3,6	3,8	4,1
	Élevée	4,4	5,9	7,4	3,0	4,1	5,3															
c) Pente forte (30-50 %), difficile d'accès	Faible	1,2	1,6	2,0	0,8	1,1	1,5				Ne s'applique pas pour les sites de pente forte											
	Moyenne	3,1	4,1	5,1	2,1	2,8	3,6	2,3	3,0	3,7							2,7	3,1	3,4	3,7	4,1	4,4
	Élevée	5,5	7,3	9,1	3,7	5,1	6,5															

⁽¹⁾ les coûts montrés correspondent à la moyenne de 3 utilisations de 5 ans chacune (1 acquisition, 3 installations, 3 retraits)

Conclusions de l'analyse de sensibilité

- **Le coût d'application de paillis dépend dans une moindre mesure du prix de la main d'œuvre que du coût d'application de débroussaillages récurrents.** Dans le cas des paillis biodégradables, la variation du prix de la main d'œuvre de 12 à 24 €/h suppose une augmentation du coût de l'application de 20 %, alors que dans le cas du paillis de plastique ou réutilisable, l'augmentation est de 50 %. Dans le cas des débroussaillages mécaniques et chimiques, l'augmentation du coût d'application est de 65 % et de 75 %, respectivement.
- **Pour les sites de faible productivité,** les paillis ne sont pas une option économiquement intéressante par rapport aux débroussaillages récurrents.
- Pour les sites de **productivité moyenne,** le paillis de plastique présente des coûts intermédiaires situés entre les débroussaillages mécaniques et chimiques pour tous les prix de la main d'œuvre, alors que l'intérêt des autres types de paillis est variable :
 - * Avec un prix faible de la main d'œuvre (12 €/h), le débroussaillage mécanique présente des coûts similaires au paillis biodégradable à 2 € et au paillis de longue durée à 4,5 € pour les sites d'accessibilité intermédiaire ou supérieurs pour les sites difficiles d'accès.
 - * Avec un prix élevé de la main d'œuvre (24 €/h), le débroussaillage chimique a un coût similaire au paillis biodégradable à 2 € pour les sites d'accessibilité intermédiaire ou supérieur pour les sites difficiles d'accès. La même relation est trouvée entre le débroussaillage mécanique et le paillis biodégradable à 3 €.
- Pour les **sites de productivité élevée,** le débroussaillage mécanique demeure la technique la plus coûteuse à tous les niveaux de prix de la main d'œuvre, alors que le débroussaillage chimique est plus cher que le paillis de plastique. L'installation de paillis biodégradable à 2 € est moins coûteuse que l'application d'herbicide, à l'exception des sites facilement accessibles lorsque le prix de la main d'œuvre est faible.
- **Entre les différents paillis,** le paillis de plastique est celui qui donne les meilleurs résultats lorsque la main d'œuvre est peu coûteuse (12 €/h), suivi du paillis réutilisable à 4,5 €. Cependant, si la main d'œuvre est coûteuse (24 €/h), le paillis biodégradable à 2 € présente des résultats similaires au paillis de plastique pour les sites d'accessibilité intermédiaire ou supérieurs pour les sites difficiles d'accès.



5.

Références et informations supplémentaires

5. Références et informations supplémentaires

- Balleux, P. and Van Lerberghe, P. 2006. *Guide technique pour des travaux forestiers de qualité*. Ministère de la Région Wallonne, DGRNE-DNF, Namur (BE). Fiche technique 17, 373 p
- Chalker-Scott, L. 2007 Impact of mulches on landscape plants and the environment — A review. *J. Environ. Hort.* 25, 239–249
- Chirino, E., Vilagrosa, A., Cortina, J., Valdecantos, A., Fuentes, D., Trubat, R., Luis, V.C., Puértolas, J., Bautista, S., Baeza, M.J., Peñuelas, J.L. & Vallejo, R. 2009. Ecological restoration in degraded drylands: the need to improve the seedling quality and site conditions in the field. In S.P. Grossberg, eds. *Forest Management*, pp. 85–158. Hauppauge, NY, USA, Nova Science Publishers, Inc.
- Coello, J., Cortina, J., Valdecantos, A. & Varela, E. 2015. Forest landscape restoration experiences in southern Europe: sustainable techniques for enhancing early tree performance. *Unasylva* 245, 66(3): 82-90
- Coello, J., Piqué, M. & Vericat, P. 2009. *Producció de fusta de qualitat: plantacions de noguera i cirerer: aproximació a les condicions catalanes – guia pràctica*. Barcelona Generalitat de Catalunya, Departament de Medi Ambient i Habitatge, Centre de la Propietat Forestal. 176 pp
- Colegio de Ingenieros de Montes. 2005. *Prontuario forestal*. Paraninfo. Madrid. 1,415 pp
- Kasirajan, S. and Ngouajio, M. 2012 Polyethylene and biodegradable mulches for agricultural applications: a review. *Agr Sust Dev* 32:501-529
- Laestadius, L., Maginnis, S., Minnemayer, S., Patapov, P., Saint-Laurent, C. and Sizer, N. 2011. Mapping opportunities for forest landscape restoration. *Unasylva* 238(62): 47–48
- Maggard, A.O., Will, R.E., Hennessey, T.C., McKinley, C.R. and Cole, J.C. 2012 Tree-based mulches influence soil properties and plant growth. *HortTechnology* 22 (3), 353-361
- Mansourian, S., Lamb, D. & Gilmour, D. 2005. Overview of technical approaches to restoring tree cover at the site level. In S. Mansourian, D. Vallauri and N. Dudley, eds. *Forest restoration in landscapes: beyond planting trees*. New York, USA, Springer (in cooperation with WWF International)
- Martínez de Azagra, A & Del Río, J. 2012. *Los riegos de apoyo y de socorro en repoblaciones forestales*. *Revista Foresta* 54: 32-44
- Oliet, J. & Jacobs, D.F. 2012. Restoring forests: advances in techniques and theory. *New Forests* 43(5): 535–541
- Piñeiro, J., Maestre, F.T., Bartolomé, L. & Valdecantos, A. 2013. Ecotechnology as a tool for restoring degraded drylands: A metaanalysis of field experiments. *Ecological Engineering* 61: 133–144
- Stanturf, J.A., Palik, B.J. & Dumroese, R.K. 2014. Contemporary forest restoration: A review emphasizing function. *Forest Ecology and Management*, 331: 292–323
- Thiffault, N. and Roy, V. 2011 Living without herbicides in Quebec (Canada): historical context, current strategy, research and challenges in forest vegetation management. *European Journal of Forest Research* 130 (1), 117-133
- Vallejo, R., Aronson, J., Pausas, J.G. and Cortina, J. 2006 Restoration of Mediterranean woodlands. In: Van Andel, J. and Aronson, J. (eds). *Restoration ecology: the new frontier*. Blackwell Publishing, Malden, USA. pp. 193-207
- Vallejo, R., Smanis, A., Chirino, E., Fuentes, D., Valdecantos, A. & Vilagrosa, A. 2012. Perspectives in dryland restoration: approaches for climate change adaptation. *New Forests* 43(5): 561–579
- Van Sambeek, J.W. 2010 Database for Estimating Tree Responses of Walnut and Other Hardwoods to Ground Cover Management Practices. In: McNeil, D.L. (ed), VI International Walnut Symposium
- Willoughby, I., Balandier, P., Bentsen, N.S., McCarthy, N. and Claridge, J. (eds.). 2009 *Forest vegetation management in Europe: current practice and future requirements*. COST Office, Brussels.





6.

Annexes

Annexe 1. Le projet Sustaffor : développement et évaluation de nouvelles techniques de plantation d'arbres

Résumé du projet

Le projet Sustaffor, intitulé « Unir efficacité et viabilité pour le (re)boisement dans un contexte de changement climatique : nouvelles technologies pour améliorer les caractéristiques du sol et les performances de la plante », s'est déroulé entre 2013 et 2015. L'objectif principal était de développer et d'évaluer de nouvelles techniques pour améliorer les projets de plantation d'arbres d'un point de vue environnemental, technique et économique

La page web du projet Sustaffor présente une description complète des techniques développées, la recherche effectuée, ainsi que les résultats et les publications associés : www.sustaffor.eu

Les nouvelles techniques

Les techniques développées pendant le projet visent à atténuer l'effet négatif de la sécheresse et de la végétation compétitrice. Elles incluent un nouvel amendement de sol (décrit dans l'Annexe 2), un nouveau paillis de longue durée fait de caoutchouc recyclé (Annexe 3), un nouveau paillis biodégradable à base d'un nouveau biopolymère (Annexe 4) et un nouveau paillis biodégradable fabriqué en jute tissée traitée avec une résine organique (Annexe 5).

Évaluation des techniques dans des conditions réelles : les essais sur le terrain

Les performances des nouvelles techniques ont été évaluées dans un réseau de huit essais sur le terrain installés dans quatre bioclimats très différents du NE de l'Espagne (Tableau 8) en comparaison avec des techniques de référence, c'est-à-dire celles utilisées actuellement pour la même fonction (Tableau 9).

Tableau 8. Principales caractéristiques des essais sur le terrain du projet Sustaffor, établis au printemps 2014.

Bioclimat	Semi-aride	Méditerranéen continental	Méditerranéen humide	Étage montagnard
Municipalité	Mequinenza	Solsona	Banyoles	Fontanals Cerdanya
Altitude (m)	210 m	672 m	215 m	1.430 m
Type de terrain	Forestier, brûlé en 2005	Champ agricole abandonné	Champ agricole abandonné	Terrain de pâturage abandonné
Orientation, pente	Sud et Nord 40 % et 60 %	Plat	Plat	Nord, 30 %
Précipitations moyennes annuelles (estivales)	370 (70) mm	685 (165) mm	870 (215) mm	887 (270) mm
Texture du sol	Limono-sableux	Limono-argileux	Limoneux fin	Limono-sableux
Espèces d'arbres plantées	<i>Pinus halepensis</i>	<i>Juglans x intermedia</i> , <i>Quercus ilex</i> & <i>Tuber melanosporum</i>	<i>Juglans x intermedia</i> , <i>Pinus pinea</i>	<i>Fraxinus excelsior</i> , <i>Betula pendula</i>
Surface de la zone affectée par les techniques contre la végétation compétitrice	40 x 40 cm	80 x 80 cm	80 x 80 cm	40 x 40 cm

Tableau 9. Traitements évalués lors des essais sur le terrain du projet Sustaffor

Type de technique	Description	Code utilisé dans les Annexes 2 à 5
Contre la sécheresse	Nouvel amendement de sol (Annexe 2), en trois doses : 20, 40 et 80 g/arbre	TCU+ 20g,TCU+ 40g, TCU+ 80g
	Amendement commercial TerraCottem Universal®, 40 g/arbre	TCUStd 40g
	Témoin (sans technique contre la sécheresse)	Témoin
Contre la végétation compétitrice	Nouveau paillis de longue durée en caoutchouc recyclé (Annexe 3)	CAOUTCHOUC
	Nouveau paillis de biopolymère (Annexe 4)	BIOPOLYMÈRE
	Nouveau paillis de jute tissée avec résine (Annexe 5)	JUTE
	Paillis biodégradable commercial	Biofilm commercial
	Paillis de film de plastique (polyéthylène)	Plastique
	Application d'herbicide au printemps	Herbicide
	Témoin (sans technique contre la végétation compétitrice)	Témoin

Les Annexes 2, 3, 4 et 5 décrivent les principales conclusions issues de l'application et des performances de ces techniques au niveau de l'arbre et du sol lors de leur utilisation pendant les essais sur le terrain dans le cadre du projet Sustaffor. L'impact environnemental de chaque produit n'a pas pu être évalué pendant le projet, mais une brève analyse de leur viabilité environnementale en fonction de leur composition est ajoutée.



Photos 28 et 29. Essais sur le terrain dans le cadre du projet Sustaffor. À gauche : conditions semi-arides. À droite : conditions méditerranéennes continentales



Photos 30 et 31. Essais sur le terrain dans le cadre du projet Sustaffor. À gauche : conditions méditerranéennes humides. À droite : conditions de l'étage montagnard

Annexe 2. Étude de cas : application et performances d'un nouvel amendement de sol synthétique

Description du produit

Le produit analysé est un nouveau prototype appelé TerraCottem Universal Plus qui se base sur la technologie de l'amendement de sol développé par la PME TerraCottem Internacional. Cette formulation inclut un mélange synergique de différents ingrédients incluant :

- **Un nouveau polymère hydroabsorbant, sans polyacrylamide**, capable d'absorber et de retenir l'eau qui serait autrement perdue par évaporation ou percolation et qui demeure, de cette façon, disponible pour la plante pendant une période prolongée.
- Une combinaison équilibrée de **fertilisants** à libération lente et rapide, obtenant ainsi une nutrition améliorée du sol sur une période prolongée.
- **Acides humiques** qui stimulent la croissance racinaire et l'absorption des nutriments, améliorent la structure du sol et la CEC et stimulent l'activité microbiologique.
- **Précurseurs de croissance** qui activent la différenciation et le développement des cellules des racines, ce qui favorise la production de biomasse aérienne et racinaire et permet aux racines d'accéder aux couches profondes du sol en peu de temps.
- **Matériaux minéraux** sélectionnés pour leurs propriétés physico-chimiques : effets sur la CEC, capacité de rétention de l'eau et garantie d'une distribution homogène de toutes les composantes.



Photo 32. Aperçu du nouvel amendement de sol TerraCottem Universal Plus (Auteur : TerraCottem Internacional)

Évaluation de son application

- **V- Installation très simple** : se mélange manuellement avec la terre qui servira à remplir le trou de plantation au moment de planter l'arbre, selon la dose recommandée par le fabricant : 40 g/arbre pour les jeunes plants d'une hauteur initiale de 15 à 60 cm et de 100 à 200 g/arbre pour les jeunes plants de 1 à 2 m de hauteur. L'application de cet amendement aux doses mentionnées augmente le temps nécessaire pour la plantation d'un arbre de 15 à 25 secondes, respectivement, incluant la manipulation des boîtes dans lesquelles il est commercialisé.
- **- Chargement des polymères avec de l'eau** : les polymères commencent à absorber de l'eau après une précipitation significative ou lors de l'arrosage d'implantation. Par conséquent, le fonctionnement adéquat de cette technique dépend du choix adéquat du moment de la plantation qui devrait donc être réalisée juste avant une période humide ou alors être complétée par un arrosage d'implantation.

Évaluation de ses performances

- **Résultats très positifs pour les sites où les sols sont pauvres et légers, avec une faible capacité de rétention de l'eau et des nutriments**, comme ceux des conditions semi-arides et de l'étage montagnard décrits dans l'Annexe 1. Dans les deux cas, et particulièrement dans les conditions semi-arides où le déficit hydrique est sévère, cette technique améliore de façon notable tous les indicateurs de l'état des arbres (Figure 1).
- **Effet insignifiant pour les sites de productivité élevée**, avec des sols fertiles, relativement lourds et bien approvisionnés en eau comme dans les conditions méditerranéennes continentales et méditerranéennes humides décrites dans l'Annexe 1.
- **La dose de 40 g/arbre semble la plus adéquate** pour les jeunes plants de petite ou de moyenne taille. Les doses inférieures testées (20 g/arbre) sont moins efficaces dans la majorité des cas, alors que les doses supérieures (80 g/arbre) ne représentent pas une amélioration notable de la performance des arbres.

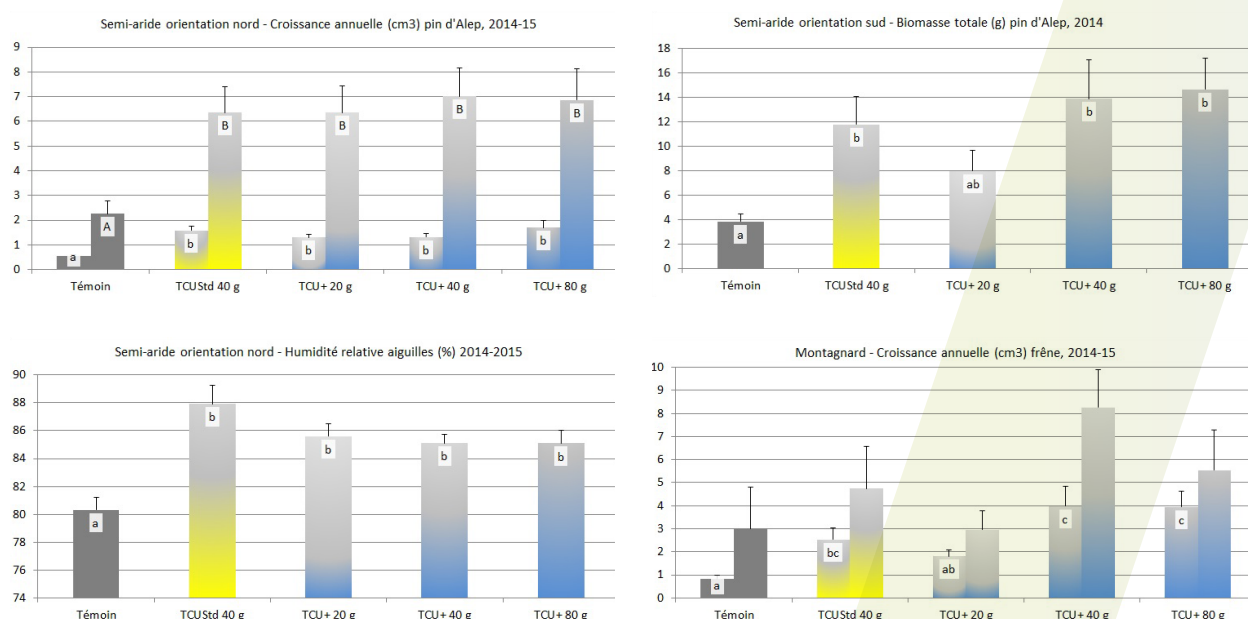


Figure 1. Principaux effets des amendements de sol lors des essais sur le terrain dans le cadre du projet Sustaffor. Les codes de traitements sont ceux indiqués dans l'Annexe 1. Les lettres différentes indiquent des différences significatives entre les traitements ($p < 0,05$), regroupés selon le test de Duncan. Dans le cas de la croissance en volume, les minuscules (a, b) se réfèrent aux données de 2014, alors que les majuscules (A, B) correspondent aux données de 2015.

Impact environnemental

Ce produit semble **inoffensif avec le milieu** puisqu'il n'inclut aucune composante considérée comme toxique. De plus, l'amendement de sol **réduit ou évite la nécessité de faire des arrosages d'appoint**, une intervention qui peut avoir un impact environnemental négatif compte tenu de l'utilisation d'un volume d'eau important en période de sécheresse, de la consommation de combustibles fossiles et de possibles problèmes d'érosion dans les zones en pente causés par le mouvement des employés et des tuyaux d'arrosage sur le site planté.

Annexe 3. Étude de cas : application et performances d'un nouveau paillis de longue durée de caoutchouc recyclé

Description du produit

Ce prototype a été développé par la PME Ecorub. Il consiste en une toile de 1,5 mm d'épaisseur de caoutchouc recyclé noir suffisamment stable pour éviter la nécessité d'être fixée au sol. De plus, elle dispose d'un traitement contre les radiations UV qui permet de prolonger sa durabilité. Elle a une forme circulaire ou carrée, et inclut deux modifications pour faciliter son installation : un trou central et une fente qui va du centre vers la périphérie. Il existe aussi une version plus petite de ce produit pour les pots des pépinières forestières comme une option réutilisable à plusieurs reprises.

Ayant une vie utile estimée à 15 ans, ce paillis peut être utilisé sur un site unique ou alors sur des sites différents pour des périodes plus courtes. Il a été spécialement conçu pour les arbres à des fins d'aménagement paysager ou de jardinage.



Photos 33 et 34. Paillis de sol de longue durée fait de caoutchouc recyclé

Évaluation de son application

- **Installation très simple**, puisqu'il n'est pas nécessaire de le fixer au sol. Même sur les terrains irréguliers, le contact du paillis avec le sol, grâce à sa flexibilité, est bon. Le rendement de l'installation des unités de 80x80 cm ou de 100x100 cm sur un site plat, incluant la manipulation et le transport vers le site, est de 90 secondes par unité. Ce temps se réduit de moitié si l'aire couverte est de 40x40 cm.
- **Haute densité** (2750 g/m²), il s'agit du facteur qui ralentit le plus son installation.
- **Doit être retiré** à la fin de sa vie utile puisqu'il n'est pas biodégradable, ce qui limite son utilisation sur les sites difficiles d'accès, particulièrement s'il doit être réutilisé plusieurs fois.
- **Orientation** : le paillis doit être orienté de façon à ce que la fente radiale se retrouve du côté sous le vent pour prévenir le repliement des rabats à cause du vent dominant.

Évaluation de ses performances

- **Résultats similaires et souvent supérieurs à ceux des autres techniques**, incluant le débroussaillage mécanique et les paillis commerciaux (Figure 2). En comparaison avec les arbres où aucun traitement contre la végétation compétitrice n'a été appliqué, les arbres avec ce paillis montrent, autant dans les sites productifs que dans les sites limitants, des taux de croissance aérienne et/ou souterraine supérieurs.
- **Augmentation de la croissance aérienne par rapport à l'application d'herbicide dans les sites de haute productivité**, avec des résultats similaires à ceux des paillis commerciaux de plastique et de bioplastique.
- **Plus grande humidité du sol** dans les conditions semi-arides par rapport aux arbres où aucun traitement contre la végétation compétitrice n'est appliqué ou lorsqu'un biofilm commercial est installé. Comparativement avec l'application d'herbicide, l'humidité du sol augmente aussi dans les conditions de productivité élevée.

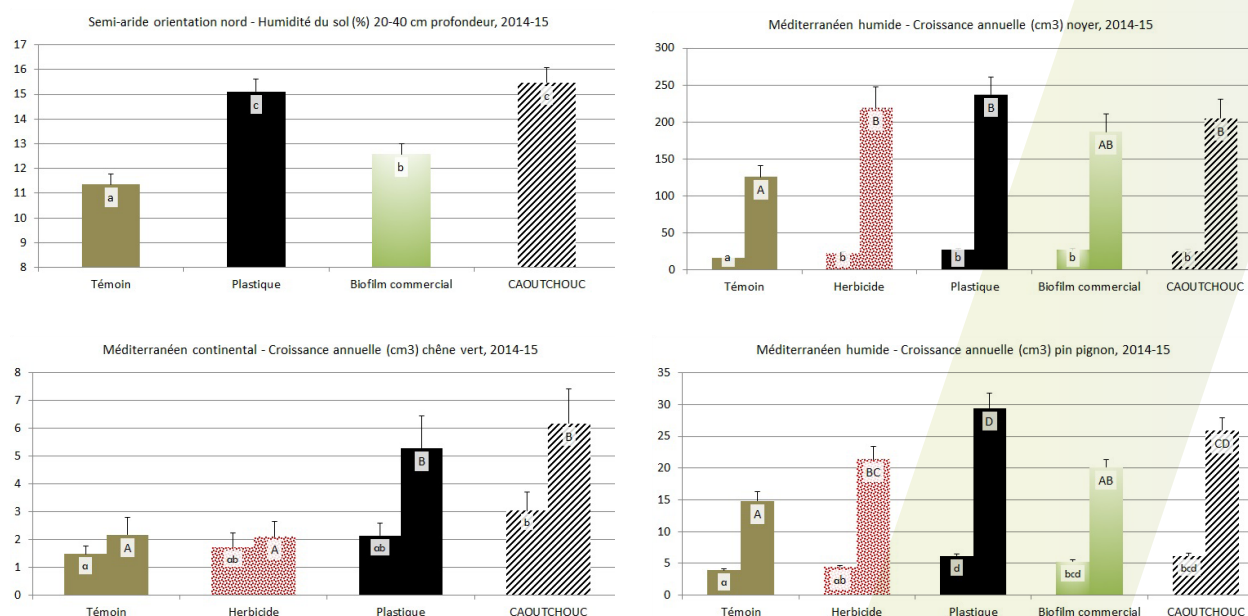


Figure 2. Principaux effets du paillis fait de caoutchouc recyclé lors des essais sur le terrain dans le cadre du projet Sustaffor. Les codes de traitements sont ceux indiqués dans l'Annexe 1. Les lettres différentes indiquent des différences significatives entre les traitements ($p < 0,05$), regroupés selon le test de Duncan. Dans le cas de la croissance en volume, les minuscules (a, b) se réfèrent aux données de 2014, alors que les majuscules (A, B) correspondent aux données de 2015.

Impact environnemental

Ce produit est fait à partir d'un **résidu recyclé (caoutchouc)**, ce qui entraîne un bénéfice environnemental intrinsèque. Ce matériau a un avantage certain par rapport aux paillis de plastique qui sont obtenus à partir d'une matière première non renouvelable. De plus, il s'agit d'une technique **de rechange aux débroussaillages mécaniques ou chimiques** qui ont, pour leur part, un impact environnemental significatif.

Du point de vue environnemental, le principal facteur limitant de ce paillis est la **nécessité d'être retiré** puisqu'il n'est pas biodégradable.

Annexe 4. Étude de cas : application et performances d'un nouveau paillis biodégradable de biopolymère

Description du produit

Le prototype analysé est constitué d'un cadre fait d'un **nouveau biopolymère 100 % biodégradable** fixé sur un biofilm commercial noir. La PME DTC procède à l'injection du biopolymère à partir d'un moule. L'objectif du cadre est double :

- Maintenir le paillis déplié, facilitant son installation et évitant sa déformation par le vent.
- Les coins sont conçus pour faciliter sa fixation avec des piquets de biopolymère biodégradables appelés « bio-pin ».



Photos 35 et 36. Nouveau paillis fait de biopolymère, en deux versions. À gauche : cadre fixé sur un biofilm commercial. À droite : paillis fabriqué intégralement à partir du nouveau biopolymère

Évaluation de son application

- **Installation facile grâce au cadre de biopolymère.** La fixation avec des bio-pins est efficace, sauf dans les sols pierreux ou compacts où il est préférable de trouver d'autres solutions telles que des piquets métalliques en forme de U. Le rendement de l'installation des unités de 80x80 ou de 100x100 cm sur un site plat, autant avec des bio-pins (sols non compacts) qu'avec des piquets métalliques en forme de U (n'importe quel type de sol) et incluant le temps de manipulation, est de 110 secondes par unité. Ce temps diminue de moitié si le paillis mesure 40x40 cm.
- **Densité modérée** (550 g/m² avec le biofilm évalué), ce qui facilite sa distribution manuelle sur le site de la plantation.
- La durabilité attendue de ce produit dépend du biofilm utilisé. Le cadre de biopolymère, tout comme la version de paillis fabriquée intégralement à partir du nouveau biopolymère, a une vie utile estimée à 5 ans.

Évaluation de ses performances

- **Résultats similaires et souvent supérieurs à ceux des autres techniques** incluant le débroussaillage chimique et les paillis commerciaux. En comparaison avec les arbres où aucun traitement contre la végétation compétitrice n'est appliqué, les arbres soumis à cette technique présentent un taux de croissance supérieur pour toutes les conditions étudiées (Figure 3).
- **Croissance des arbres majoritairement supérieure à la résultante de l'application d'herbicide ou de paillis commerciaux**, autant sur les sites productifs que limitants.
- **Plus grande humidité du sol** par rapport aux arbres où aucun traitement contre la végétation compétitrice n'est appliqué ou pour lesquels un herbicide est appliqué (conditions très productives). Plus grande humidité aussi en comparaison avec l'application de biofilm commercial (conditions limitantes).

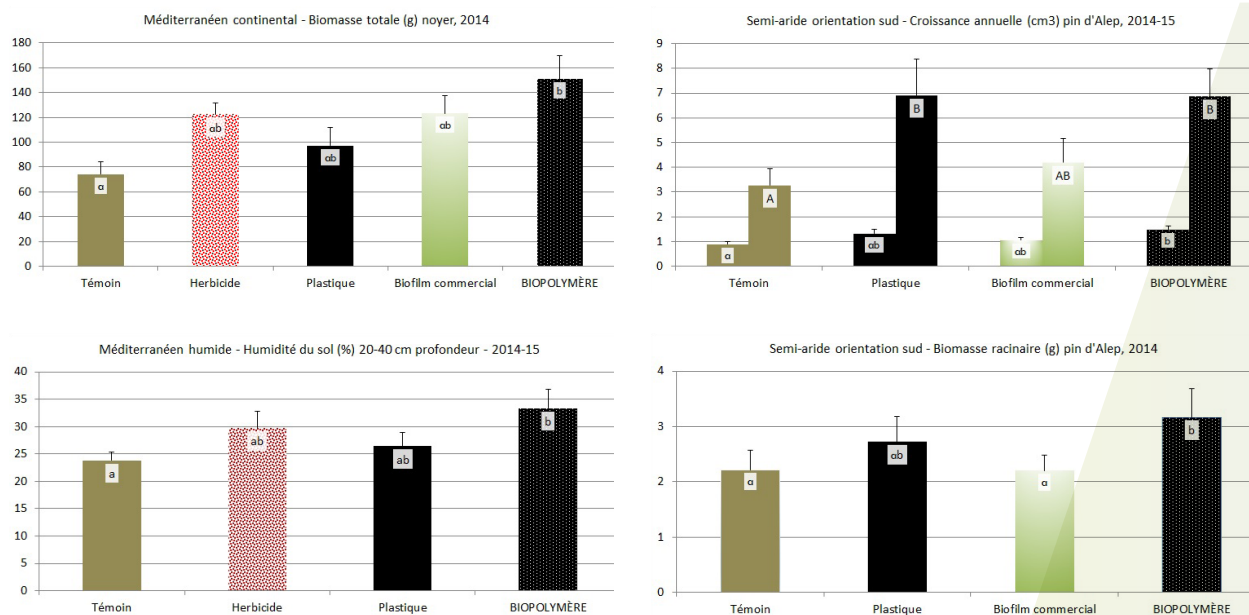


Figure 3. Principaux effets du paillis fait à base du nouveau biopolymère lors des essais sur le terrain dans le cadre du projet Sustaffor. Les codes de traitements sont ceux indiqués dans l'Annexe 1. Les lettres différentes indiquent des différences significatives entre les traitements ($p < 0,05$), regroupés selon le test de Duncan. Dans le cas de la croissance en volume, les minuscules (a, b) se réfèrent aux données de 2014, alors que les majuscules (A, B) correspondent aux données de 2015.

Impact environnemental

Le biopolymère est **100 % biodégradable** et est élaboré à partir de **matières premières renouvelables**. Il est attendu qu'il sera inoffensif avec le milieu, ce qui représente une grande opportunité du point de vue environnemental par rapport aux paillis de plastiques et, particulièrement, par rapport à l'impact environnemental négatif de l'application de débroussaillages mécaniques ou chimiques récurrents.

Annexe 5. Étude de cas : application et performances d'un nouveau paillis biodégradable de jute tissée traitée avec une résine organique

Description du produit

Produit par la PME La Zeloise, le prototype analysé consiste en un **tissu de jute 100 % biodégradable traité avec des résines furaniques pour améliorer sa durabilité**. Le principe du développement de ce produit est de créer un paillis efficace à base de fibres végétales et de résines organiques ayant une grande valeur esthétique.



Photos 37 et 38. Paillis biodégradable de jute traitée avec de la résine organique

Évaluation de son application

- **Installation simple grâce à sa flexibilité** qui permet de l'adapter à tous les types de superficies. La fixation au sol se réalise facilement avec des piquets métalliques en forme de U, ou alors avec des rondelles et des piquets. Le rendement de l'installation des unités de 80x80 cm ou de 100x100 cm sur un site plat, incluant le temps de manipulation, est de 130 secondes par unité. Ce temps diminue de moitié si le paillis mesure 40x40 cm.
- **Densité modérée** (460 g/m²), ce qui facilite sa distribution manuelle dans la zone de plantation.
- La **vie utile** estimée de ce prototype dans les zones soumises à l'insolation et aux radiations UV élevées et à une forte croissance de la végétation compétitrice est d'environ 3 ans. Cette vie utile de 3 ans peut être limitante pour plusieurs applications dans un environnement forestier où il faudrait envisager l'application de paillis ou de traitements complémentaires contre la végétation compétitrice. Dans les environnements moins agressifs, il est possible d'espérer une durabilité plus longue.

Évaluation de ses performances

- **Résultats en termes de production et de physiologie similaires et souvent supérieurs à ceux obtenus par d'autres techniques**, incluant le débroussaillage chimique et les paillis commerciaux. En comparaison avec les arbres où aucun traitement contre la végétation compétitrice n'est appliqué, les arbres soumis à cette technique présentent un taux de croissance supérieur pour toutes les conditions étudiées (Figure 4).
- **Taux de croissance des arbres majoritairement supérieur par rapport à la résultante de l'application d'herbicide ou de paillis de plastiques** sur les sites productifs et **supérieur aux paillis commerciaux de bioplastique** dans toutes les conditions étudiées.

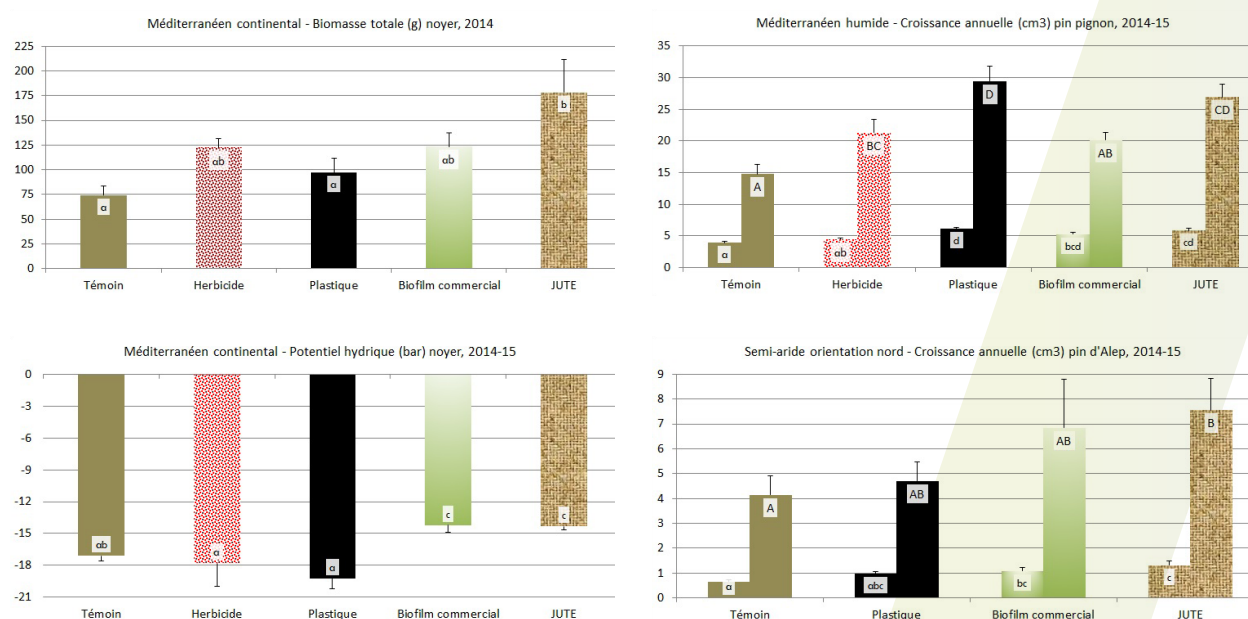


Figure 4. Principaux effets du nouveau paillis de jute tissée lors des essais sur le terrain dans le cadre du projet Sustaffor. Les codes de traitements sont ceux indiqués dans l'Annexe 1. Les lettres différentes indiquent des différences significatives entre les traitements ($p < 0,05$), regroupés selon le test de Duncan. Dans le cas de la croissance en volume, les minuscules (a, b) se réfèrent aux données de 2014, alors que les majuscules (A, B) correspondent aux données de 2015.

Impact environnemental

Ce produit est composé de fibres naturelles et de résines organiques (**matières primaires renouvelables** dans les deux cas) et est **100 % biodégradable et inoffensif**. Tout comme le nouveau paillis de biopolymère décrit dans l'Annexe 4, ce produit présente un avantage environnemental indéniable en comparaison avec les autres techniques contre la végétation compétitrice, que ce soit les paillis de plastiques (matière première non renouvelable) ou plus particulièrement les débroussaillages récurrents qui impliquent l'utilisation d'herbicide ou de machinerie.

La recherche menant à ces résultats a été financée par le septième programme-cadre de l'Union européenne géré par le REA – Research Executive Agency en vertu de la convention de subvention n° 606554

