

## Volet 2 | Thème 2. Facteurs de réussite des renouvellements forestiers

## Question 4. Comment limiter le stress de transplantation pour assurer l'installation des plants en contexte de changement climatique ?

## Sommaire

<b>4.1 Contexte et problématique</b> .....	<b>636</b>
<b>4.2 Matériel et méthodes</b> .....	<b>638</b>
<b>4.3 Le projet de plantation</b> .....	<b>638</b>
<b>4.4 Caractérisation du stress de transplantation</b> .....	<b>639</b>
<b>4.5 Réponses à la question posée</b> .....	<b>640</b>
4.5.1 Quel choix d'essence/provenance adapté au contexte de plantation ? .....	640
4.5.2 Godet ou racines nues : quels sont les avantages et inconvénients ?.....	641
4.5.3 Quels critères de qualité et de robustesse des plants et quelles opérations de culture permettent de limiter le stress de transplantation ? .....	642
4.5.4 De la pépinière à la mise en terre : comment assurer le transport et le stockage ? .....	645
4.5.5 Quel rôle peuvent jouer les travaux de préparation avant plantation ? .....	645
4.5.6 Quels outils pour améliorer la reprise dans des conditions de déficit hydrique accru ?.....	646
4.5.7 Quel rôle peut jouer le couvert végétal ? .....	648
<b>4.6 Besoins de recherche</b> .....	<b>648</b>
<b>4.7 Références bibliographiques</b> .....	<b>650</b>

## Rédacteurs

Vincent **Boulanger**, Office national des forêts, Recherche développement innovation, Fontainebleau (77), France

Stéphane **Brault**, Office national des forêts, Recherche développement et innovation, Fontainebleau (77), France

Laurent **Lelasseur**, Office national des forêts, Recherche développement et innovation, Fontainebleau (77), France

Malaurie **Puyal**, Office national des forêts, Recherche développement et innovation, Fontainebleau (77), France

Jonathan **Pitaud**, Office national des forêts, Recherche développement innovation, Champenoux (54), France

Catherine **Collet**, Université de Lorraine, AgroParisTech, INRAE, UMR Silva, Nancy (54), France

Sabine **Girard**, CNPF-IDF, Lyon (69), France

### 4.1 Contexte et problématique

En France métropolitaine, la plantation forestière concerne environ 40 000 ha chaque année, en moyenne sur la période 2005-2020 (voir Volet 2, Thème 1, « Question 1. Quelle est l'évolution des ventes de plants forestiers et des surfaces plantées en France depuis 30 ans ? ») et permet de répondre à différents enjeux. Elle est indispensable pour restaurer les peuplements partiellement ou totalement endommagés dont les arbres ne produisent plus les graines requises pour assurer la régénération naturelle. Elle est également incontournable quand il s'agit d'afforester une ancienne parcelle agricole. Elle permet enfin d'engager des changements d'essences qui peuvent s'avérer nécessaires pour adapter la forêt au changement climatique. Elle contribue ainsi à assurer la pérennité de l'approvisionnement des industries du bois, notamment en produits issus de la ressource résineuse. Les scénarios prospectifs prévoient une augmentation significative des surfaces plantées dans les décennies à venir, en France et dans le monde (Ginisty *et al.*, 2020 ; Payn *et al.*, 2015), que ces

plantations soient réalisées dans des objectifs de production de bois ou de conservation des écosystèmes forestiers.

Sur la période 2007-2020, 60 millions de plants ont été vendus en moyenne chaque année, (voir Volet 2, Thème 1, « Question 1. Quelle est l'évolution des ventes de plants forestiers et des surfaces plantées en France depuis 30 ans ? ») et, selon l'enquête annuelle de plantation menée par le DSF depuis 2007 (voir « Question 3. Quelle a été l'évolution des taux de succès des plantations de l'année au cours des quinze dernières années ? »), environ 12 % des plants plantés sont morts au cours de leur première année. Nous ne disposons pas d'estimation à l'échelle nationale de la mortalité des plants au-delà de la première saison de végétation, mais les études ponctuelles s'accordent sur une tendance générale caractérisée par une mortalité qui peut être élevée en première saison et qui décroît progressivement dans les années qui suivent (del Campo *et al.*, 2021 ; Vyse, 1981). Outre le fait qu'elle est plus forte, la mortalité en première année semble plus idiosyncratique que la mortalité des années suivantes (Dumas *et al.*, 2021). Alors que la mortalité après quelques années (4 à 10 ans) est déterminée par des facteurs dont les variations sont tendanciellées sur le long terme comme le climat local, la fertilité du sol ou les densités locales d'ongulés (Cole *et al.*, 2018 ; Dumas *et al.*, 2021 ; Sikström *et al.*, 2020), les causes de la mortalité de première année sont liées à des événements ponctuels difficiles à prédire comme la météo de l'année ou les attaques biotiques, le risque de mortalité étant accru par l'inadéquation des plants au site de plantation ou un itinéraire technique inadapté (del Campo *et al.*, 2021 ; Margolis *et Brand*, 1990).

Lors de la plantation, les plants qui ont été élevés dans les conditions très favorables de la pépinière, sont transplantés dans un milieu bien moins propice à leur développement et auquel ils doivent s'adapter. La transplantation constitue un stress que le plant doit surmonter rapidement pour survivre au-delà de quelques semaines ou quelques mois (Grossnickle, 2012, 2005). Par ailleurs, en gestion courante, la première année se distingue des années suivantes car elle fait généralement l'objet d'une garantie de la part du reboiseur, qui s'engage alors à assurer le remplacement des plants morts dans les cas où la survie des plants est inférieure à 80 % en fin de saison de végétation (Ministère de l'urbanisme des logements et du transport *et al.*, 2012). En deçà de ce seuil, la plantation est considérée comme ayant échoué et cet échec est alors imputé aux choix techniques des opérateurs. Ces choix techniques, qui comprennent l'essence de plantation, le type de plants, les conditions de transport et de stockage des plants et l'itinéraire technique de plantation, doivent être raisonnés pour réduire l'impact des différents facteurs de mortalité. Des erreurs dans ces choix techniques peuvent conduire à une augmentation du stress de transplantation et un échec du projet de plantation.

L'enquête annuelle de plantation du DSF montre une augmentation des échecs de plantation les années caractérisées par des printemps et des étés secs. De façon similaire, les études réalisées dans les régions d'Europe méridionale font état de difficultés de plantation bien plus marquées qu'en zone tempérée (del Campo *et al.*, 2020; Rey Benayas *et al.*, 2015). Les scénarios climatiques pour les décennies à venir augurent de difficultés croissantes pour les planteurs forestiers et, pour assurer le succès des plantations dans un contexte de contraintes vraisemblablement accrues et multiples, il est nécessaire de développer des méthodes qui permettent de réduire le stress de transplantation.

L'objectif de cette synthèse est d'analyser les facteurs à l'origine du stress de transplantation et d'identifier les leviers techniques permettant aux plants de surmonter ce stress et donc d'améliorer la reprise des plants et leur survie au cours de la première année. En premier lieu, nous positionnerons la phase de transplantation dans le projet de plantation complet, nous caractériserons le stress de transplantation, puis nous analyserons les différentes méthodes envisagées pour améliorer la reprise des plants et nous dégagerons des pistes de recherche.

## 4.2 Matériel et méthodes

Étant donné l'étendue de la question posée, cette synthèse prend la forme d'une revue narrative. Elle fait un bilan des connaissances à partir d'une sélection de publications, et propose de nouvelles pistes de recherche. Les publications sélectionnées concernent majoritairement les forêts tempérées et autant que possible des synthèses d'études ponctuelles et articles de position.

## 4.3 Le projet de plantation

L'opération de plantation est un projet que les sylviculteurs anticipent plusieurs mois avant l'étape ultime de mise en terre des plants (Bastard *et al.*, 2018 ; Faure *et al.*, 2014). Le diagnostic initial des caractéristiques du site va permettre au forestier d'évaluer l'opportunité de reboisement, de choisir l'essence de reboisement, et de déterminer les travaux nécessaires. Le choix et la qualité de réalisation des travaux préparatoires à la plantation va agir directement sur les contraintes et atouts pour l'accueil des plants mis en terre. La préparation mécanisée des sols préalable à la plantation n'est pas obligatoire mais elle devient souvent incontournable pour décompacter un sol tassé par suite d'opérations de récolte des bois ou réduire une végétation concurrente ; or son efficacité dépend du respect d'un cahier des charges en partie contingent aux conditions climatiques, imposant alors une contrainte organisationnelle forte sur les opérateurs.

Hormis dans le système de gestion « coupe-rase-plantation », les plantations sont par construction ciblées sur les zones difficiles. Elles interviennent couramment suite à un échec de régénération naturelle, qui reflète des conditions locales globalement défavorables au développement des jeunes arbres. Un autre cas de figure est le changement d'essence par plantation appliqué aux peuplements considérés comme vulnérables ou la restauration des peuplements dépérissants. Ces peuplements se trouvent eux aussi sur stations contraignantes. Les chantiers de plantation concernent donc une proportion plus forte de contextes de contraintes marquées (régime hydrique, caractéristiques physico-chimiques des sols, exposition aux sécheresses, pression des ongulés), contraintes qui, en outre, sont généralement exacerbées par les changements climatiques.

Depuis leur milieu de culture en pépinière jusqu'à la mise en terre sur la parcelle cible, les plants vont suivre une chaîne de transplantation, dont chacune des étapes constitue un risque en cela qu'elle place les plants en dehors de leurs conditions optimales de vie et peut porter atteinte à leur intégrité structurelle et fonctionnelle. Cette chaîne de transplantation (depuis leur milieu d'élevage jusqu'au site de plantation) joue un rôle critique dans l'assurance pour le forestier de planter des plants dans le meilleur état physiologique possible afin de maximiser leur potentiel de reprise. Les contraintes que les étapes de transport et stockage font peser sur les plants sont liées à leur temporalité (durée plus ou moins longue) et aux conditions physiques dans lesquelles elles se déroulent. Ainsi, la maîtrise des conditions de transport et la disponibilité des personnels à réception des plants pour leur mise en jauge (racines nues) ou entreposage sous aspersion (godets) est un point clé, d'autant plus critique avec les dérèglements climatiques qui provoquent chaleurs précoces ou gels tardifs.

Enfin, la réussite des plantations est de plus en plus fréquemment scrutée sous l'angle socio-économique. Les attentes sociétales sur la restauration des écosystèmes forestiers après dégradation s'expriment plus librement à travers des groupes d'opinion et d'utilisateurs ; ce n'est plus seulement la durabilité du système de production de bois qui est attendue, mais un ensemble de services écosystémiques (paysages, protection de la qualité de l'air et de l'eau, biodiversité). Le niveau de ces attentes contraste avec la situation des forces vives à même de mettre en œuvre l'ensemble de la chaîne de transplantation, faisant face à une pénurie de personnel et obligeant à une meilleure performance et efficacité. Enfin, le modèle économique d'une plantation forestière est généralement basé sur le réinvestissement d'une part des recettes issues de la récolte, et ne laisse donc que peu de

possibilités pour financer des travaux correctifs en cas d'échec. Les subventions – publiques ou privées – permettent d'assouplir ce modèle économique pour le propriétaire ; toutefois les bailleurs de fonds seront aussi attentifs à la performance des plantations subventionnées, notamment à travers des critères de réussite et obligent donc à envisager la manière de limiter le stress de transplantation pour améliorer la reprise et la croissance des plants.

#### 4.4 Caractérisation du stress de transplantation

De manière générale, le stress de transplantation est un phénomène délétère pour l'implantation d'un jeune arbre nouvellement planté (Grossnickle, 2016). Il résulte de changements dans son environnement (depuis la pépinière jusqu'au site d'implantation définitif) qui ont des impacts sur sa physiologie : absorption-transport-transpiration d'eau et photosynthèse. Le plant est extrait d'un milieu de culture conçu (substrat de culture dans un godet) ou travaillé (terre ameublie pour les plants de pleine terre conditionnés en racines nues) pour optimiser son développement initial, puis installé dans un environnement dont les caractéristiques (humidité, température, nutriments) ne sont plus contrôlées et donc susceptibles d'être moins favorables à son fonctionnement physiologique.

Lorsque les plants sont plantés dans des conditions de sol bien alimenté en eau et présentant une faible évapotranspiration, le système racinaire existant suffit à absorber l'eau nécessaire au fonctionnement de l'appareil aérien et à sa transpiration (Simpson *et* Ritchie, 1997). Le plant est alors fonctionnel et peut ainsi réparer (dans le cas des plants à racines nues) et développer son appareil racinaire dans un premier temps, puis son appareil aérien.

Le stress de transplantation apparaît dès l'instant que les plants ne sont pas totalement intégrés dans le cycle hydrique par lequel l'eau précipitée au sol circule dans les particules de sol (organiques et minérales), est absorbée par les racines du plant puis transpirée par l'appareil aérien (Grossnickle, 2005). Ce sont donc les altérations de la circulation de l'eau dans le continuum sol-plante-atmosphère, voire sol-mycorhize-plante-atmosphère (Rincón *et al.*, 2007) qui génèrent une situation de stress chez le plant. Cette altération peut être plus marquée lorsque les réserves glucidiques du plant ont été fortement altérées (Guehl *et al.*, 1993 ; Puttonen, 1986). Pour le plant, le stress de transplantation se définit comme l'écart de son fonctionnement physiologique par rapport à un fonctionnement optimal.

L'eau apparaît comme la variable déterminant au premier ordre la physiologie du plant et donc le stress de transplantation (Jacobs *et al.*, 2009 ; Rolando *et al.*, 2011, voir Figure 2.4-1) ; la principale cause de mort des plants semble être le dessèchement (voir « Question 3. Quelle a été l'évolution des taux de succès des plantations de l'année au cours des quinze dernières années ? »). Les manifestations extérieures sont généralement des signes de dessiccation des tiges, feuilles ou bourgeons. Elles ont pour conséquence une moindre photosynthèse, et donc une croissance réduite. Un stress intense ou prolongé peut conduire à l'arrêt complet des fonctions physiologiques, la destruction des tissus et entraîner la mort du plant. De manière plus ponctuelle, des déficits en éléments minéraux ou, *a contrario*, la présence d'éléments phytotoxiques (dans le sol ou l'atmosphère) peuvent altérer le fonctionnement physiologique du plant et engendrer un stress.

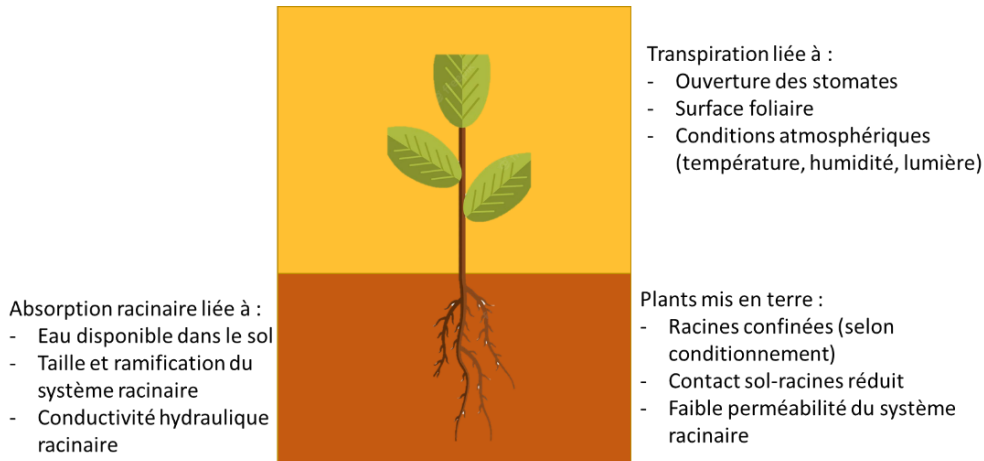


Figure 2.4-1 : Variables déterminant le stress de transplantation pour un plant forestier, d'après Grossnickle (2016)

## 4.5 Réponses à la question posée

### 4.5.1 Quel choix d'essence/provenance adapté au contexte de plantation ?

Empiriquement ou sur la base des outils formels qu'étaient les catalogues de stations, le choix de l'essence plantée se base sur des éléments de son autécologie (climat, sol). Le respect de cette adéquation essence-station permet *a minima* d'éviter les écueils en écartant les incompatibilités connues. Les choix ne se sont pas systématiquement portés sur la meilleure adéquation essence station, il s'agit plus vraisemblablement d'un choix opérationnel qui prend aussi en compte l'ensemble des services attendus de l'essence : récolte de bois et rentabilité d'itinéraire, rôle de stabilisation des terrains, etc. (Faure *et al.*, 2014). La disponibilité des plants constitue un élément pragmatique dans le choix de l'essence.

Désormais, les scénarios de changement climatique annoncés posent des défis à différents horizons temporels pour les projets de plantation. Les outils que sont les modèles de compatibilité climatique et leurs projections à moyen terme selon différents scénarios climatiques (à l'instar de l'outil sylvo-climatique Climessences<sup>423</sup>, ONF et CNPF, 2021) permettent d'appréhender les effets de ces évolutions tendancielles moyennes, ceci à des échelles territoriales plus ou moins grandes. Ainsi, ces outils permettent sinon d'identifier les essences bien adaptées, *a minima* de cibler les essences qui ne seront *a priori* plus compatibles avec les conditions climatiques attendues pour leur âge adulte. Par ailleurs, les accidents climatiques, plus fréquents et plus intenses, constituent des contraintes que doivent surmonter les jeunes arbres plantés, et qui accroissent le stress de transplantation dès à présent. Il s'agit donc ici d'appréhender la niche climatique juvénile des arbres (Ghosh *et al.*, 2016; Koide *et al.*, 2016), et surtout leurs seuils de tolérance aux événements extrêmes, afin d'identifier les essences ou provenances les plus à même de supporter un stress de transplantation accru par des accidents météorologiques. Les travaux menés dans le cadre du projet Replant-CLIC (Tallieu *et al.*, 2022) ont mis en évidence que le comportement des essences au stade juvénile, au niveau de leur résistance à la sécheresse, peut différer par rapport à leur niche écologique générale, définie d'après la répartition des populations d'arbres. Le défi vise donc à identifier des essences non seulement mieux adaptées au stade adulte afin que les peuplements fournissent les services écosystémiques attendus, mais aussi

<sup>423</sup> Accessible ici : <https://climessences.fr/>

celles dont le comportement juvénile s'avère suffisamment robuste pour leur assurer résistance et résilience aux contraintes environnementales du lieu et moment de leur implantation.

#### 4.5.2 Godet ou racines nues : quels sont les avantages et inconvénients ?

Deux conditionnements de plants sont proposés pour les plants forestiers, selon leur méthode d'élevage. Les plants élevés en pleine terre sont livrés « racines nues » après arrachage. Les plants élevés hors sol sont livrés avec la motte de substrat dans lequel ils ont germé et été élevés ; l'appellation plant « en godet » peut être considérée comme générique, elle comprend les plants élevés en conteneurs (individuels ou en plaques alvéolées) et les « plants en motte », élevés sans contenant mais directement dans des plaques d'un mélange tourbe-écorce-vermiculite. La production de plants en godets présente surtout les avantages d'un élevage réalisé en conditions contrôlées : rapidité de germination et croissance, uniformité, souplesse dans la saison de plantation (Aung *et al.*, 2019 ; Stein *et al.*, 1975). Dans une revue très détaillée, Grossnickle *et al.* (2016) ont synthétisé les résultats publiés sur la performance respective des deux conditionnements, tant pour l'élevage en pépinière que pour la reprise après plantation. Il ressort de cette synthèse que les plants en racines nues sont généralement plus grands que ceux en godet, en raison d'un élevage à plus faible densité et sur une durée plus longue (donc plus âgés). Les plants en godet présentent un rapport biomasse de tige/biomasse de racine plus faible et un système racinaire mieux ramifié (et non affecté par l'arrachage) leur conférant *a priori* un meilleur potentiel de croissance racinaire et par là même une meilleure résistance aux épisodes de sécheresse. Les plants en racines nues sont plus vulnérables lors de leur manipulation, transport et au moment de la mise en terre, ce qui peut affecter leur performance. Réciproquement, les plants en godet sont moins vulnérables à ces opérations et ils ont l'avantage d'être installés avec leur substrat de culture, au contact direct des racines, qui leur assure un stock d'eau et de nutriments immédiatement disponibles pour le plant au moment de sa reprise. Notons toutefois que le conditionnement en godet peut aussi engendrer des problèmes sur la croissance des racines et l'architecture d'ensemble du système racinaire (enroulement dans le conteneur d'élevage, difficulté à croître en dehors du substrat) et par là même sur les performances à court et moyen terme des plants (Riedacker, 1978 ; Verger *et al.*, 1995) Ces déformations, liées à l'utilisation de godets non adaptés ou à la prolongation de la durée de culture des plants dans les godets, peuvent généralement être évitées par l'utilisation de godets aux bords cannelés.

De toutes ces différences morphologiques ou physiologiques, peuvent résulter des comportements spécifiques aux deux types de plants. Sur les sites de plantation à forte contrainte de sécheresse, toutes essences confondues, les plants en racines nues ont en moyenne des taux de reprise significativement plus faibles que les plants en godet. En revanche, sur les sites ne présentant pas de contrainte, les deux types de conditionnement donnent des taux de reprise semblables. Passée la phase d'implantation (intégration fonctionnelle du plant en terre), le conditionnement initial semble ne plus avoir d'effet sur la survie et la croissance des plants. Néanmoins, les études comparant les deux types de conditionnement toutes choses égales par ailleurs sont peu mises en œuvre en France. Les types de conditionnement proposés par les pépiniéristes sont souvent uniques pour une essence donnée (racines nues ou godet) ; les modalités de chaque conditionnement peuvent toutefois varier, mais sont rarement plantés en comparaison sur un même site. Dans le cas du douglas, la comparaison des plants conditionnés en racines nues et en godet n'a pas révélé de différence sur les critères de survie, croissance et stabilité ; les plants en godet, généralement plus petits et plus jeunes, se sont révélés plus sensibles aux dégâts d'hylobes, et les plants en racines nues plus sensibles à la qualité de la mise en terre (Girard *et al.*, 2019). Des travaux menés sur les résineux – pins, sapins et épicéas, concluent également à l'absence d'effet du type de conditionnement des plants (Jäärats *et al.*, 2016 ; Kolevska *et al.*, 2020). Dans un essai après incendie, sur station contraignante, les plants en godets semblent

donner de meilleurs résultats que les plants en racines nues, et les plants issus de gros godets présentent une meilleure croissance (Sardin *et al.*, 2001).

#### 4.5.3 Quels critères de qualité et de robustesse des plants et quelles opérations de culture permettent de limiter le stress de transplantation ?

Les caractéristiques morphologiques, physiologiques et fonctionnelles agissant sur la survie et la croissance des plants après plantation a été synthétisée dans deux publications successives (Grossnickle, 2012 ; Grossnickle *et MacDonald*, 2018). Le Tableau 2.4-1 en synthétise les principales conclusions.

Tableau 2.4-1 : Caractéristiques des plants agissant sur leur survie et leur croissance après plantation.

		Survie	Croissance
Morphologie	Hauteur de tige	Une grande tige permet au plant de s'affranchir de la concurrence d'autres espèces mais présente de plus grands besoins physiologiques en eau et donc une sensibilité accrue aux risques de dessèchement.	Une grande tige a un plus fort potentiel de croissance, mais en situation de stress hydrique, elles ont aussi plus de besoins physiologiques. Les plants moins grands peuvent avoir un avantage en situation de déficit hydrique.
	Diamètre au collet	Le diamètre est très corrélé à la masse racinaire. Il constitue un bon indicateur de la capacité d'absorption d'eau du sol et de transport vers l'appareil aérien ; les plants les plus « gros » ont une meilleure capacité à surmonter les épisodes de sécheresse.	Les plants plus gros ont plus de potentiel de croissance initiale en l'absence de limitation par l'eau et les nutriments, et sont moins sensibles aux effets de la chaleur et de la sécheresse et ont donc une meilleure croissance.
	Rapport dimensionnel tige/racine	Ce rapport traduit l'équilibre entre besoins en eau (tige-feuilles) et capacité d'absorption (racines). Un rapport de longueur entre 1 et 3 est recommandé pour les plants racine nue, et entre 1 et 2 pour les plants en godets (Haase, 2011). La réduction de volume des racines (habillage du plant) ou le raccourcissement de la tige peuvent permettre d'ajuster ce rapport avant plantation, mais cette opération présente des risques liés aux blessures infligées.	Un rapport bas est bénéfique en situation sèche, mais en cas d'engorgement hivernal les plants avec un rapport élevé ont une capacité de croissance meilleure lors de la reprise de végétation. Un système racinaire bien développé (masse, ramification, longueur) favorise la croissance et la capacité à surmonter le stress de transplantation (Thompson, 1985) .
Physiologie	Induction de résistance à la sécheresse	La réduction des apports en eau en fin d'élevage permet d'induire la formation des bourgeons, ralentir la croissance en pépinière, augmenter la résistance au déficit hydrique par ajustement osmotique et fermeture des stomates, diminuer les risques de cavitation après plantation.	Cette opération augmente la tolérance aux épisodes secs par ajustement des propriétés physico-chimiques des tissus, et limite la sensibilité par le développement de tissus de protection et par l'activation des mécanismes de résistance. Elle permet de soutenir la croissance en cas de stress hydrique.

		<p>Les conséquences après plantation sont : une restauration plus rapide de la capacité photosynthétique, un meilleur contrôle de la transpiration, et une plus forte croissance racinaire.</p> <p>Cette opération n'est pas nécessaire lorsque plantation se fait en conditions optimales ? C'est une opération délicate à mener dont l'effet sur la reprise peut s'avérer négatif si elle est trop intense.</p>	<p>L'effet est fugace et disparaît en général avec le débourrement et la formation de nouveaux tissus (racine, tige, feuilles) mais n'est pas systématique.</p>
	<b>Induction de résistance au froid</b>	<p>L'objectif est de durcir les structures pour réduire les dommages du froid sur le plant. La réduction de la durée d'éclaircissement des plants en fin d'élevage permet d'induire la formation des bourgeons et la lignification des tissus. Elle permet d'augmenter la résistance des plants pendant leur stockage et transport, et d'implanter des plants en dormance, donc de réduire le stress de transplantation. Le taux de survie est amélioré, mais ce traitement peut augmenter le risque de débourrement précoce et donc la sensibilité aux gels tardifs.</p>	<p>L'effet sur la croissance du plant est incertain.</p>
	<b>Statut nutritionnel</b>	<p>Réduire l'apport nutritionnel en fin d'élevage ralentit la croissance et favorise le stockage de minéraux qui seront mobilisables par le plant après plantation, en attendant qu'il restaure ses capacités d'absorption dans le sol.</p> <p>Fertiliser après l'arrêt de croissance permet également de favoriser le stockage de nutriments par le plant et de favoriser sa reprise au printemps.</p> <p>Les risques associés à ces pratiques sont faibles, tant que les concentrations sont en deçà de seuils de toxicité. Néanmoins, ces pratiques augmenteraient l'appétence des plants pour les herbivores</p>	<p>Il n'y actuellement pas de consensus sur les effets (positifs ou négatifs) de la fertilisation sur la croissance.</p> <p>Le stockage de nutriments permet d'augmenter les quantité et disponibilité des réserves au moment de la reprise de croissance. Efficacité plus grande en pépinière avant enlèvement qu'après plantation en fertilisation de site de plantation.</p> <p>La bonne qualité nutritionnelle du plant permet une meilleure exploitation des réserves du plant et absorption des nutriments du sol en environnement stressant, d'où meilleure résistance aux épisodes de sécheresse et de froid et l'assurance d'une croissance correcte.</p>
<b>Performance</b>	<b>Potentiel de croissance racinaire (PCR)</b>	<p>Le stress de transplantation est directement lié à la capacité d'absorption de l'eau, et donc à la capacité du plant à développer des racines après sa mise en terre.</p>	<p>Le PCR est un bon prédicteur de la croissance initiale de l'appareil aérien. Il constitue une caractéristique intrinsèque au plant, mais les valeurs de référence</p>



		<p>Le PCR peut être mesuré, néanmoins les mesures sont lourdes à mettre en œuvre. Son contrôle par les méthodes culturales est complexe : Il est corrélé à la taille des plants et à la ramification du système racinaire. Le conditionnement en gros godets, et à forte surface de contact (substrat/godet) favorise le PCR. Pour les plants en racine nue, il est important de veiller à l'intégrité du système racinaire pour assurer un bon PCR.</p>	<p>présentent de grosses variations entre espèces et selon les saisons.</p>
--	--	--	---

La dimension des plants, qu'elle soit évaluée par la hauteur de la tige, le diamètre au collet ou la surface foliaire, apparaît comme un attribut important de la qualité des plants. De très nombreuses études ont comparé les performances de plants différant dans leur dimensions, avec des résultats parfois contradictoires (Gardiner *et al.*, 2019 ; Pinto *et al.*, 2012 ; Rose *et al.*, 1993). Une méta-analyse récente (Andivia *et al.*, 2021) recensant 86 espèces d'arbres dans 142 sites de plantation à travers le monde montre que les grands plants ont en moyenne un taux de survie plus élevé que des plants plus petits du même âge, et que cet effet est plus marqué pour les gymnospermes que les angiospermes.

Le développement racinaire ressort comme un facteur déterminant pour limiter le stress de transplantation (Grossnickle, 2005), *a fortiori* lorsque les plants sont soumis à des événements de sécheresse engendrant un stress hydrique à la suite de leur mise en terre. Les critères morphologiques des plants, les seuls mesurables lors de la réception, sont des proxys (indicateurs) de fonctions physiologiques déterminantes pour la survie et la croissance des jeunes plants, et donc pour la résistance et résilience des plants au stress de transplantation. La notion de potentiel de croissance racinaire (PCR) a été développée dans les années 1980 (Ritchie *et Dunlap*, 1980), pour proposer des indicateurs mesurables de la capacité du plant à reprendre rapidement un fonctionnement actif et sa croissance après sa transplantation sur le site. Le PCR est évalué par la mesure de la croissance racinaire des plants installés en minirhizotrons dans des conditions standardisées (Davis *et Jacobs*, 2005 ; Landis *et al.*, 2010). De nombreux travaux, ont montré que le PCR est un bon estimateur de la reprise des plants (Del Campo *et al.*, 2007 ; Généré *et al.*, 2004 ; Levy *et McKay*, 2003). Néanmoins, sa mesure est complexe à réaliser (opération sur 15 à 20 jours) et il n'est pas envisageable de mettre cette approche en œuvre pour évaluer des lots de plants arrivant sur une parcelle. Il est néanmoins utilisé en Amérique du Nord pour certifier des catégories de plants vendus par les pépiniéristes, et garantir une capacité de reprise intrinsèque aux plants de chaque catégorie. Le PCR est également mobilisé en recherche pour estimer les effets des méthodes de culture sur la capacité de reprise des plants, sans avoir à planter les plants et à les suivre pendant une saison de végétation (Cabral *et O'Reilly*, 2008 ; Jacobs *et al.*, 2008).

En outre, il existe des techniques simples d'analyse des plants (concentration en glucides et potentiel hydrique) qui permettent de conforter les critères morphologiques pour certifier la qualité des plants livrés (Aussenac *et al.*, 1988 ; Landis *et al.*, 2010) et par là même s'assurer de la résistance des plants à des stress de transplantation.

#### 4.5.4 De la pépinière à la mise en terre : comment assurer le transport et le stockage ?

Ce domaine est peu couvert par les études scientifiques, l'innovation est venue des constats des praticiens soucieux d'améliorer la qualité de leurs produits et prestations (Génééré, 1997). Faire sortir les plants des pépinières au moment où leur activité physiologique est réduite au maximum – cette limitation des besoins en eau en particulier les rend aussi plus aptes à supporter la transplantation - permet de limiter le stress lié aux changements d'environnements. Protéger les plants du dessèchement, du gel et des fortes chaleurs est impératif après leur sortie de pépinière pour limiter les variations des conditions environnementales subies par les plants. Dans le cas des plants à racines nues, les racines sont particulièrement vulnérables à l'exposition aux rayons directs du soleil : après 10 min d'exposition le taux de reprise perd 20 %, et même jusqu'à 70 % après 30 min d'exposition (Christian Ginisty, communication personnelle). L'utilisation de l'emballage en sacs plastique des plants racines nues est largement plébiscitée pour limiter les pertes en eau, en particulier au niveau racinaire, l'état hydrique des plants au moment de leur mise en terre étant un point critique du taux de reprise (Génééré, 1997). Pour cette même raison, à leur arrivée sur le chantier, tous les plants – quel que soit leur conditionnement – doivent être plantés dans les délais les plus courts possibles. Si cela n'est pas possible, il faut envisager des solutions de stockage ou d'entreposage qui limiteront au maximum la dégradation de la qualité physiologique des plants (jauge, hangar, chambre froide, etc.)

Dans le cas de plants livrés en motte ou en plaque de culture, il faudra veiller à maintenir leur substrat humide au cours de cette période avec un système d'arrosage doux et régulier. Il peut être intéressant pour des gestionnaires utilisant de grosses quantités de plants en racines nues chaque année d'investir dans des équipements de type chambre froide pour conserver dans les meilleures conditions les plants qui ne peuvent être plantés rapidement ainsi que dans des véhicules adaptés (remorques avec des étagères permettant le transport de plaques de culture par exemple) pour alimenter régulièrement les chantiers si cela n'est pas possible à partir des pépinières de production. Ces stratégies de stockage permettent de gagner en souplesse dans les opérations de plantations, notamment en permettant d'alimenter progressivement les chantiers en évitant d'entreposer les plants dans de mauvaises conditions avant leur plantation. Enfin, ces stratégies de stockage au froid permettent de retarder le débourrement des plants et évitent même un débourrement précoce qui augmente l'exposition aux risques liés aux gelées tardives du printemps.

#### 4.5.5 Quel rôle peuvent jouer les travaux de préparation avant plantation ?

La préparation mécanisée du site (PMS) avant plantation, c'est-à-dire le travail du sol (pour décompacter le sol ou créer un billon) et l'enlèvement de la végétation concurrente, réalisé à l'aide d'un engin mécanisé, est une pratique courante, visant à faciliter l'installation et la croissance des plants. Le premier effet de la PMS est de contrôler le développement de la végétation spontanée dans le voisinage immédiat des plants. La mise en lumière des sites avant la plantation (échecs multiples de régénération naturelle, dépérissement du peuplement) a pour conséquence de favoriser une végétation spontanée, parfois très dense, dont la présence empêche l'acte de plantation et dont la dynamique de recolonisation viendrait fortement concurrencer les plants (Balandier *et al.*, 2006). Dans ces conditions, le contrôle de la végétation concurrente est indispensable pour permettre l'installation rapide des plants. De très nombreuses expérimentations en France et dans le monde montrent que le recours à la PMS permet de réduire significativement le développement de la végétation concurrente et ainsi d'améliorer la reprise des plants (Löff *et al.*, 2012a).

La PMS permet également de réduire certaines contraintes édaphiques qui peuvent augmenter le stress de transplantation. Dans certains sites de plantation, les sols ont été tassés par des opérations mécanisées antérieures. La compaction du sol réduit la porosité des matériaux et donc la circulation d'eau et d'air au sein du sol, qui a pour effet direct de rendre plus difficile la prospection racinaire par les plants (Ampoorter *et al.*, 2011) et donc d'accroître les risques de stress de transplantation. Dans ces conditions, la PMS permet de réduire la compaction des horizons superficiels et d'augmenter le volume de sol facilement prospectable par les racines des plants (Collet *et al.*, 2021 ; Lacey *et al.*, 2001). Dans les sites à engorgement temporaire, l'eau présente dans les horizons supérieurs du sol constitue une contrainte forte à la croissance racinaire et la réalisation de billons à l'aide de la PMS permet de surélever les plants et de leur offrir un volume de sol propice au développement rapide des systèmes racinaires (Sutton, 1993).

La PMS vise à rendre les conditions propices aux travaux de plantation et à la reprise des plants, en réduisant des contraintes majeures à la mise en place d'un système racinaire fonctionnel. Le guide « Réussir la plantation forestière » (MAAF, 2014) rappelle cependant que la PMS n'est pas automatique et qu'elle doit être mobilisée après un diagnostic précis des conditions de la zone à planter. Les techniques développées et outils associés sont nombreux, ce qui leur permet d'être choisis en adéquation avec les caractéristiques du site, pour assurer la reprise des plants tout en minimisant les perturbations du sol induites par l'opération.

La PMS permet d'améliorer significativement la reprise des plants et leur croissance en première année, notamment dans les situations de fortes contraintes (del Campo *et al.*, 2021 ; Löf *et al.*, 2012b). Des travaux récents (Dumas *et al.*, 2021) issus des réseaux expérimentaux Alter et Pilote<sup>424</sup> analysant la mise en œuvre de divers outils de PMS en France, montrent que la PMS permet d'améliorer très fortement la survie des plants dans les plantations réalisées les années avec des printemps et des étés secs (dans certains sites taux de survie en première année de 85 % et 25 % pour les plants installés avec et sans PMS, respectivement), alors qu'elle n'a pas d'effet significatif dans les plantations réalisées les années avec des été pluvieux (survie des plants supérieure à 85 %, avec ou sans PMS). L'enquête annuelle de plantation du DSF montre que, les années avec une météorologie favorable, la survie des plants est élevée et peu variable. Lors des années plus contraignantes (sécheresse marquée et/ou répétées), la survie des plants est en moyenne plus faible mais montre surtout une variabilité importante, laissant à penser que les conditions dans lesquelles la plantation a été réalisée (gestion des plants après sortie de pépinière, travaux de préparation et de plantation) jouent sur la résistance des plants face à des contraintes météorologiques (Tallieu *et al.*, 2022).

#### 4.5.6 Quels outils pour améliorer la reprise dans des conditions de déficit hydrique accru ?

Le développement de solutions techniques pour améliorer la reprise des plantations dans des conditions de fort déficit hydrique est un enjeu crucial pour le maintien et la restauration des écosystèmes forestiers, notamment dans les milieux à l'aridité marquée (Ramón Vallejo *et al.*, 2012). Une panoplie de méthodes visant à augmenter la disponibilité en eau du sol pour les jeunes plants qui ont prouvé leur efficacité en milieu aride, est actuellement disponible (Chirino *et al.*, 2009 ; Piñeiro *et al.*, 2013) et mériterait d'être testée en France, pour analyser dans quelle mesure ces méthodes permettraient d'améliorer la reprise des plants dans les conditions de sécheresse printanière et estivale accrues.

---

<sup>424</sup> Voir ici : <https://www6.inrae.fr/renfor/Reseaux-d-experimentation>

Historiquement, les premières méthodes résidaient dans l'utilisation de substrats de croissance à base de tourbe, vermiculite, perlite, argile ou tout autre composant ayant une forte capacité de rétention de l'eau. Ce substrat est apporté dans le conteneur de culture du plant (pour les plants en godet) ou ajouté dans le trou de plantation (pour les plants en racines nues). Plus récemment, l'ajout d'hydrogels a permis d'augmenter considérablement la teneur en eau du substrat et d'améliorer l'alimentation hydrique des jeunes plants. Les hydrogels sont des polymères hydro-absorbants qui peuvent gonfler et absorber jusqu'à 5 000 fois leur poids en eau et ensuite diffuser progressivement cette eau dans le milieu de culture (Chirino *et al.*, 2009). Leur utilisation permet de limiter l'intensité et la durée de la sécheresse, réduisant significativement le stress de transplantation ; la survie et la croissance de plants forestiers installés dans des conditions de sécheresse édaphique marquée est donc améliorée (Crous *et al.*, 2016). Néanmoins, leurs effets varient fortement selon le type d'hydrogel, les espèces plantées et les conditions de plantation (Piñeiro *et al.*, 2013 ; Yu *et al.*, 2012). Des effets secondaires négatifs ont également été rapportés : formation de vides dans le substrat lié à la rétractation de l'hydrogel en période sèche qui peuvent limiter la croissance et le fonctionnement des racines des plants (Ramón Vallejo *et al.*, 2012) ; ou encore gonflement du substrat en hiver causé par le gel de l'eau contenue dans l'hydrogel, qui peut provoquer un déchaussement des plants. La durée d'efficacité des hydrogels est limitée dans le temps, en général quelques mois ou quelques saisons de végétation (Chirino *et al.*, 2009 ; Coello *et al.*, 2018 ; Oliveira *et al.*, 2011).

La mycorhization des plants, souvent classée dans les méthodes de pré-conditionnement des plants en pépinière, permet d'améliorer à la fois l'alimentation hydrique et minérale des plants. Elle est souvent associée à des apports nutritionnels par amendement (Piñeiro *et al.*, 2013) ou des ajouts d'hydrogel (Beniwal *et al.*, 2011 ; Repáč *et al.*, 2022). Deux synthèses récentes (Maltz *et Treseder*, 2015 ; Policelli *et al.*, 2020) montrent que la mycorhization augmente l'abondance des mycorhizes dans l'écosystème et améliore significativement la reprise des plants. Choisir l'espèce mycorhizienne inoculée n'est pas trivial : elle doit être compatible avec l'essence plantée et être adaptée au site de plantation. Ces auteurs montrent également que les inocula d'espèces provenant d'écosystèmes voisins de la parcelle plantée semblent plus efficaces que les inocula commerciaux qui sont plus généralistes. Il apparaît néanmoins essentiel de consolider les choix de souches mycorhiziennes *via* des expérimentations de long terme, sans se limiter à une appréciation de l'état physiologique des plants à un stade juvénile (Le Tacon *et al.*, 1997).

Les régulateurs de croissance sont des composés chimiques naturel (phytohormones) ou de synthèse (imitant les phytohormones) qui permettent d'améliorer les performances agronomiques des plantes et d'augmenter la résistance aux déficits hydriques (Weyers *et Paterson*, 2001). De nombreux travaux ont analysé les effets de différents régulateurs sur la capacité des plants forestiers à résister aux contraintes en milieu contrôlé, mais peu d'études ont porté sur des plantations en conditions naturelles (Chirino *et al.*, 2009 ; Small *et Degenhardt*, 2018) et celles-ci ont montré des résultats contrastés (Chirino *et al.*, 2009 ; Santacruz-García *et al.*, 2022) qui, pour l'instant, ne permettent pas d'extrapoler les résultats prometteurs obtenus en conditions contrôlées.

Une dernière approche consiste à augmenter la quantité d'eau arrivant dans le voisinage immédiat des plants. Si l'irrigation des plants semble peu réaliste avec la géographie des plantations forestières et peu compatible avec une gestion économe de la ressource, des méthodes directement inspirées de techniques de culture ancestrales qui permettent de collecter et recycler l'eau arrivant sur le site de plantation ont été développées avec succès en zone aride pour améliorer les succès des plantations forestières : les micro-barrages qui permettent de collecter les eaux de ruissellement et de les diriger vers chaque plant installé, et le captage de brouillard qui permet de récupérer les gouttelettes d'eau dans l'air et de les faire s'écouler au pieds des plants (Chirino *et al.*, 2009 ; Löf *et al.*, 2006 ; Ramón Vallejo *et al.*, 2012).

#### 4.5.7 Quel rôle peut jouer le couvert végétal ?

De façon très générale, les plants de jeunes arbres doivent cohabiter avec d'autres espèces végétales et la concurrence qu'elles peuvent causer (Goldberg *et* Barton, 1992 ; Gurevitch *et al.*, 1992). Toutefois, ces interactions ne se limitent pas à de la compétition (effet négatif d'une espèce ou communauté sur une espèce cible) ; des effets de facilitation (effet positif d'une essence ou communauté sur l'espèce cible) peuvent également intervenir. C'est la résultante des effets de concurrence et de facilitation, variable selon les espèces en présence, leur stade de développement et des conditions environnementales qui va être réellement déterminante pour la survie et croissance des plants. Le type de végétation accompagnatrice influe fortement sur la résultante de ces interactions : les graminoides (graminées, carex, joncacées), ainsi que de nombreuses herbacées de faible stature, ont des effets globalement négatifs alors que les plantes ligneuses basses montrent plus fréquemment des effets positifs (Balandier *et al.*, 2006). D'une façon générale, les effets facilitateurs de la végétation sont plus visibles dans les stades initiaux quand les individus cibles (les jeunes plants) sont les plus fragiles et les effets négatifs deviennent prépondérants quand les individus deviennent plus âgés et grandissent (Gómez-Aparicio, 2009). Par ailleurs, la « théorie de gradient de stress » (*stress gradient hypothesis, SGH*) stipule que l'équilibre entre les effets dépend du niveau de contrainte du milieu et, que dans les milieux fortement contraints (notamment les milieux arides), les effets positifs deviennent prépondérants (Bertness *et* Callaway, 1994).

C'est ainsi que des méthodes utilisant les « plantes nurses » ont été développées pour faciliter l'installation des jeunes plants, tout particulièrement en zone aride (Gómez-Aparicio *et al.*, 2004 ; Rodríguez-Trejo *et al.*, 2003). Ces plantes nurses agissent principalement en réduisant le rayonnement radiatif parvenant au plant et en augmentant l'humidité relative de l'air autour du plant, améliorant les bilans énergétique et hydrique du plant, qui peuvent s'avérer critiques si le plant a une alimentation hydrique limitée.

En France, les études réalisées dans les décennies passées s'accordent sur l'effet globalement négatif de la végétation accompagnatrice et du couvert adulte sur la survie initiale des jeunes plants (Collet *et al.*, 1999 ; Frochot *et al.*, 1986). Néanmoins, dans des conditions climatiques plus sèches prédites par les modèles climatiques pour les années à venir, la mise au point d'itinéraires de plantation utilisant les plantes nurses qui soient adaptés au contexte forestier français est une voie pour l'amélioration du succès des plantations.

#### 4.6 Besoins de recherche

L'ensemble de ces éléments ici synthétisés permet de dégager quelques grandes problématiques relatives à la limitation du stress de transplantation, et par-là même, la réussite des plantations. Certains points mériteraient des investigations plus poussées non seulement du côté de la recherche appliquée mais aussi à travers des innovations dans la stratégie des opérations de plantations.

Améliorer les conditions d'accueil du plant en forêt constitue un des premiers axes d'investigation. Les conclusions de travaux de recherche assez complets relatifs aux effets du travail du sol sur la reprise et croissance des plants sont présentées précédemment. Les effets d'apports d'amendements ou de fertilisants sur la survie et la croissance des plants ont été très largement étudiés et mériteraient un travail de synthèse bibliographique sous forme de revue systématique afin d'aborder le sujet dans sa complétude. L'une des questions critiques de ce travail bibliographique est par exemple celle des interactions entre essence plantée, type de sol et type de fertilisant ou d'amendement. Nous avons mentionné précédemment l'existence de produits destinés à améliorer la disponibilité de l'eau au voisinage du plant (réteneurs d'eau d'origine naturelle et polymères hydroabsorbants) dont l'usage en forêt tempérée dans le but de tamponner les effets d'épisodes de sécheresse n'ont pas encore été

formellement testés. Des travaux expérimentaux visant non seulement la performance technique (capacité à limiter le stress hydrique des plants) en milieu forestier, mais également leur efficience – c'est-à-dire en considérant les éléments économiques, environnementaux et sociaux (notamment l'ergonomie d'utilisation), sont nécessaires pour éclairer les reboiseurs dans leurs choix d'itinéraires techniques.

Les récents épisodes de très fortes chaleurs combinées à des déficits de précipitations très marqués interrogent les forestiers sur l'opportunité des plantations dans le recrû. Jusqu'alors, les résultats des travaux de recherche ont dans l'ensemble conclu à un effet négatif du couvert sur la survie et croissance des plants : les effets de la concurrence pour l'eau et la lumière sont plus dommageables que la protection conférée par l'ombrage. L'intensité des vagues de chaleur constatées ces dernières années, ainsi que la formalisation de la notion de microclimat forestier (De Frenne *et al.*, 2021) invitent à revisiter ces résultats et possiblement faire changer le paradigme associé. Ainsi, la stratégie serait vue en deux temps distincts. Une première phase de quelques années pendant laquelle l'objectif est d'assurer, sous couvert, la survie du plant et le développement d'un appareil racinaire lui assurant une bonne capacité d'absorption de l'eau. Puis dans une seconde phase, un apport de lumière plus conséquent permettra la croissance du plant. Il s'agit alors d'évaluer le degré de couvert permettant de garantir la survie de plants en conditions de fortes contraintes hydriques et thermiques puis d'identifier le moment idoine pour engager l'ouverture de couvert et les techniques sylvicoles pertinentes pour limiter les risques de dégâts aux plants causés par l'abattage des arbres. Ce changement de paradigme nécessite d'envisager des projets de grande ambition, mêlant travaux expérimentaux et retour d'expérience sur la base de chantiers à large échelle, dans des contextes écologiques variés, pour un panel d'essences contrastées.

Un second axe de travail vise à améliorer l'agilité des opérations de plantation en travaillant sur les plants et la logistique associée. Les opérations de plantations font face à la fois à des contraintes conjoncturelles telles que le manque de main d'œuvre ou le manque de ressources en graines pour certaines essences, et à des contraintes tendanciellles comme les accidents météorologiques dont l'intensité et la fréquence croissantes sont la manifestation du changement climatique. Ainsi, des travaux de recherche et développement sur les techniques de pré-aoûtement, ou d'induction d'arrêt de croissance pourraient permettre d'améliorer la gestion des stocks en rendant les opérations d'arrachage des plants en pleine terre moins sensibles aux étés indiens (chaleurs automnales). Pour les plants en godets d'essences feuillues, ces améliorations permettraient d'augmenter la durée potentielle de plantation par anticipation de la phase d'aoûtement. Réciproquement, les techniques visant à ralentir le débourrement des plants en fin d'hiver ou début de printemps permettrait d'augmenter de quelques semaines la période pendant laquelle l'état physiologique des plants est propice à leur mise en terre. Les éléments de connaissance précédemment réunis ont révélé que la vulnérabilité des plants était largement exacerbée par les contraintes stationnelles ; à l'inverse se pose la question, dans les environnements à faible niveaux de contraintes, de la résilience des plants à des opérations de plantations conduites en dehors d'un cahier des charges standard. Des travaux visant à évaluer les risques associés à la plantation hors saison (plants non aoûtés, ou déjà débourrés), en fonction des essences et des contraintes stationnelles, permettrait aux reboiseurs d'ajuster les calendriers de leurs chantiers.

Synthèse des deux premiers axes, un troisième axe de recherche développement et innovation émerge autour du concept de ciblage des plants. Régulièrement évoqué dans la littérature scientifique anglosaxonne sous les termes de « *target plant concept* » (Davis and Pinto, 2021) ce concept s'appuie l'intégration des connaissances sur la biologie végétale appliquée aux plants, à la connaissance écologique des sites de plantation et aux enjeux socio-économiques associés à l'utilisation des plants. Basé sur une démarche d'amélioration continue et de gestion adaptative, ce concept est utilisé pour

définir les caractéristiques particulières des plants les mieux adaptés à leur lieu de plantation afin que les pépinières produisent les types de plants adéquats (voir Figure 2.4-2). Il s'agit là d'un autre changement radical de paradigme à envisager : ne plus produire des plants standards mais produire des types de plants aux caractéristiques variées afin qu'ils soient orientés vers l'environnement de plantation où ils seront les plus performants. Cette approche globale des projets de plantation permet d'intégrer l'ensemble des éléments de la chaîne de plantation susceptibles d'être améliorés, dans le but de réduire la vulnérabilité des plants aux contraintes météorologiques. Elle stimulera l'innovation à travers une plus grande exigence dans la conception des chantiers de plantations : diagnostic avant plantation, connaissances sur les avantages et inconvénients de différents types de plants, choix des méthodes de préparation de site. Réciproquement, ce concept permettra de revisiter les méthodes de production des pépinières et notamment de mieux valoriser les plants et lots de plants aux caractéristiques non standard, afin de les valoriser au mieux. Un travail d'analyse de la filière du reboisement permettrait d'identifier dans un premier temps les interactions déjà existantes au sein des acteurs du reboisement, et les points d'innovation potentielle et leurs échéances possibles. Dans un second temps, il s'agira de bâtir des travaux de recherche et/ou programmes d'innovation visant à combler les lacunes identifiées. Ce cadre de travail visera à resserrer les liens au sein de la filière des reboiseurs et nécessitera de construire des rapports entre acteurs, dépassant le cadre strictement commercial, pour aboutir à des avancées techniques et logistiques permettant de mieux valoriser les plants forestiers produits et ainsi limiter la pression sur la ressource en graines.

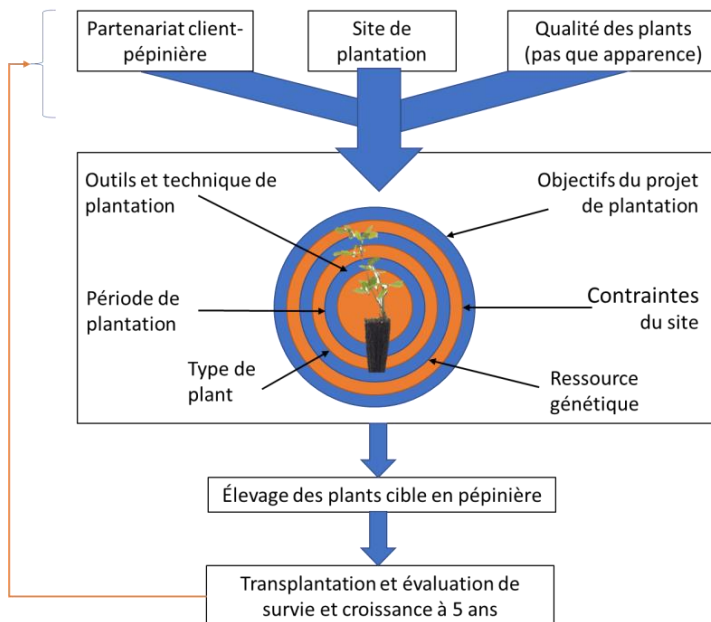


Figure 2.4-2 : Concept de ciblage des plants, d'après Haase et Davis (2017) et Dumroese et al. (2016)

## 4.7 Références bibliographiques

- Ampoorter, E., Schrijver, A. de, Frenne, P. de, Hermy, M., Verheyen, K., 2011. Experimental assessment of ecological restoration options for compacted forest soils. *Ecological Engineering* 37, 1734–1746.
- Andivia, E., Villar-Salvador, P., Oliet, J.A., Puértolas, J., Dumroese, R.K., Ivetic, V., Molina-Venegas, R., Arellano, E.C., Li, G., Ovalle, J.F., 2021. Climate and species stress resistance modulate the higher survival of large seedlings in forest restorations worldwide. *Ecological Applications* 31, e02394. <https://doi.org/10.1002/eap.2394>

- Aung, A., Youn, W.B., Seo, J.M., Dao, H.T.T., Han, S.H., Cho, M.S., Park, B.B., 2019. Effects of three biomaterials mixed with growing media on seedling quality of *Prunus sargentii*. *Forest Science and Technology* 15, 13–18. <https://doi.org/10.1080/21580103.2018.1557564>
- Aussenac, G., Guehl, J.-M., Kaushal, P., Granier, A., Grieu, P., 1988. Critères physiologiques pour l'évaluation de la qualité des plants forestiers avant plantation. *Revue forestière française* 60, 131. <https://doi.org/10.4267/2042/25926>
- Balandier, P., Collet, C., Miller, J.H., Reynolds, P.E., Zedaker, S.M., 2006. Designing forest vegetation management strategies based on the mechanisms and dynamics of crop tree competition by neighboring vegetation. *Forestry* 79, 3–27.
- Bastard, R., Conche, J., Duez, F., Fendorf, J., Gallet, P., Gauvin, J., Guillon, A., Hugues, S., Leblanc, M., Lehmann, F., Micheneau, C., Moyses, F., Paquet, D., Poupart, F., Pousset, F., Sardin, T., Touffait, R., Ulrich, E., 2018. Guide technique : réussir les plantations de chênes sessile et pédonculé, travaux sylvicoles. ONF. Direction générale, Paris.
- Beniwal, R.S., Hooda, M.S., Polle, A., 2011. Amelioration of planting stress by soil amendment with a hydrogel–mycorrhiza mixture for early establishment of beech (*Fagus sylvatica* L.) seedlings. *Annals of Forest Science* 68, 803–810. <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0077-z>
- Bertness, M.D., Callaway, R., 1994. Positive interactions in communities. *Trends in Ecology & Evolution* 9, 191–193. [https://doi.org/10.1016/0169-5347\(94\)90088-4](https://doi.org/10.1016/0169-5347(94)90088-4)
- Cabral, R., O'Reilly, C., 2008. Physiological and field growth responses of oak seedlings to warm storage. *New Forests* 36, 159–170. <https://doi.org/10.1007/s11056-008-9090-y>
- 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, V.R., 2009. Ecological restoration in degraded drylands: The need to improve the seedling quality and site conditions in the field, in: *Forest Management*. pp. 85–158.
- Coello, J., Ameztegui, A., Rovira, P., Fuentes, C., Piqué, M., 2018. Innovative soil conditioners and mulches for forest restoration in semiarid conditions in northeast Spain. *Ecological Engineering* 118, 52–65. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.04.015>
- Cole, E., Lindsay, A., Newton, M., Bailey, J.D., 2018. Eight-year performance of bareroot Douglas-fir and bareroot and plug western larch Seedlings following herbicide applications, northeast Oregon, USA. *New Forests* 49, 791–814. <https://doi.org/10.1007/s11056-018-9653-5>
- Collet, C., Frochot, H., Ningre, F., 1999. Développement de jeunes chênes soumis à une compétition souterraine. *Revue forestière française* p.298-308.
- Collet, C., Vast, F., Richter, C., Koller, R., 2021. Cultivation profile: a visual evaluation method of soil structure adapted to the analysis of the impacts of mechanical site preparation in forest plantations. *Eur J Forest Res* 140, 65–76. <https://doi.org/10.1007/s10342-020-01315-2>
- Crous, C.J., Malan, F.S., Wingfield, M.J., 2016. Securing African forests for future drier climates: applying ecophysiology in tree improvement. *Southern Forests* 78, 241–254. <https://doi.org/10.2989/20702620.2016.1207131>
- Davis, A.S., Jacobs, D.F., 2005. Quantifying root system quality of nursery seedlings and relationship to outplanting performance. *New Forest* 30, 295–311. <https://doi.org/10.1007/s11056-005-7480-y>
- Davis, A.S., Pinto, J.R., 2021. The Scientific Basis of the Target Plant Concept: An Overview. *Forests* 12, 1293. <https://doi.org/10.3390/f12091293>
- De Frenne, P., Lenoir, J., Luoto, M., Scheffers, B.R., Zellweger, F., Aalto, J., Ashcroft, M.B., Christiansen, D.M., Decocq, G., De Pauw, K., Govaert, S., Greiser, C., Gril, E., Hampe, A., Jucker, T., Klings, D.H., Koelemeijer, I.A., Lembrechts, J.J., Marrec, R., Meeussen, C., Ogée, J., Tyystjärvi, V., Vangansbeke,



- P., Hylander, K., 2021. Forest microclimates and climate change: Importance, drivers and future research agenda. *Global Change Biology* 27, 2279–2297. <https://doi.org/10.1111/gcb.15569>
- Del Campo, A.D., Navarro-Cerrillo, R.M., Hermoso, J., Ibáñez, A.J., 2007. Relationship between root growth potential and field performance in Aleppo pine. *Ann. For. Sci.* 64, 541–548. <https://doi.org/10.1051/forest:2007031>
- del Campo, A.D., Segura-Orenga, G., Bautista, I., Ceacero, C.J., González-Sanchis, M., Molina, A.J., Hermoso, J., 2021. Assessing reforestation failure at the project scale: The margin for technical improvement under harsh conditions. A case study in a Mediterranean Dryland. *Science of the Total Environment* 796. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148952>
- del Campo, A.D., Segura-Orenga, G., Ceacero, C.J., González-Sanchis, M., Molina, A.J., Reyna, S., Hermoso, J., 2020. Reforesting drylands under novel climates with extreme drought filters: The importance of trait-based species selection. *Forest Ecology and Management* 467, 118156. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118156>
- Dumas, N., Dassot, M., Pitaud, J., Piat, J., Arnaudet, L., Richter, C., Collet, C., 2021. Four-year-performance of oak and pine seedlings following mechanical site preparation with lightweight excavators. *Silva Fennica* 55. <https://doi.org/10.14214/SF.10409>
- Dumroese, K.R., Landis, T.D., Pinto, J.R., Haase, D.L., Wilkinson, K.W., Davis, A.S., 2016. Meeting forest restoration challenges: Using the target plant concept. *Reforesta* 1, 37–52. <https://doi.org/10.21750/REFOR.1.03.3>
- Faure, C., Montagnon, F., Fontvieille, F., 2014. Guide technique “Réussir la plantation forestière” (Guide technique). MAAF.
- Frochot, H., Picard, J.-F., Dreyfus, P., 1986. La Végétation Herbacée. *Obstacle Aux Plantations. Revue Forestière Française* 38, 271–279.
- Gardiner, R., Shoo, L.P., Dwyer, J.M., 2019. Look to seedling heights, rather than functional traits, to explain survival during extreme heat stress in the early stages of subtropical rainforest restoration. *Journal of Applied Ecology* 56, 2687–2697. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13505>
- Génére, B., 1997. Les Facteurs influençant la qualité physiologique des plants plantés, et la prise en compte des risques climatiques après plantation. *Revue forestière française* 49, 313. <https://doi.org/10.4267/2042/5629>
- Génére, B., Garriou, D., Omarzad, O., Grivet, J.P., Hagège, D., 2004. Effect of a strong cold storage induced desiccation on metabolic solutes, stock quality and regrowth, in seedlings of two oak species. *Trees* 18, 559–565. <https://doi.org/10.1007/s00468-004-0348-5>
- Ghosh, S., Zhu, K., Gelfand, A.E., Clark, J.S., 2016. Joint Modeling of Climate Niches for Adult and Juvenile Trees. *JABES* 21, 111–130. <https://doi.org/10.1007/s13253-015-0238-x>
- Ginisty, C., Joyeau, C., Guibert, M., Philippe, G., 2020. With a view to reviving forest plantations in France, are seed and seedling producers in a position to meet the demand of reforestation workers? *Sciences Eaux & Territoires* 40. <https://doi.org/10.14758/SET-REVUE.2020.3.08>
- Girard, S., Veuillen, L., Chaumet, M., Thivolle-Cazat, A., 2019. Evaluation et perspectives de développement des plantations de douglas réalisées avec des plants élevés dans des conteneurs inférieurs à 300cc.
- Goldberg, D.E., Barton, A.M., 1992. Patterns and Consequences of Interspecific Competition in Natural Communities: A Review of Field Experiments with Plants. *The American Naturalist* 139, 771–801.
- Gómez-Aparicio, L., 2009. The role of plant interactions in the restoration of degraded ecosystems: a meta-analysis across life-forms and ecosystems. *Journal of Ecology* 97, 1202–1214. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2009.01573.x>

- Gómez-Aparicio, L., Zamora, R., Gómez, J.M., Hódar, J.A., Castro, J., Baraza, E., 2004. Applying Plant Facilitation to Forest Restoration: A Meta-Analysis of the Use of Shrubs as Nurse Plants. *Ecological Applications* 14, 1128–1138.
- Grossnickle, S.C., 2016. Restoration Silviculture: An Ecophysiological Perspective - Lessons learned across 40 years. *REFORESTA* 1–36. <https://doi.org/10.21750/REFOR.1.02.2>
- Grossnickle, S.C., 2012. Why seedlings survive: influence of plant attributes. *New Forests* 43, 711–738. <https://doi.org/10.1007/s11056-012-9336-6>
- Grossnickle, S.C., 2005. Importance of root growth in overcoming planting stress. *New Forest* 30, 273–294. <https://doi.org/10.1007/s11056-004-8303-2>
- Grossnickle, S.C., El-Kassaby, Y.A., 2016. Bareroot versus container stocktypes: a performance comparison. *New Forests* 47, 1–51. <https://doi.org/10.1007/s11056-015-9476-6>
- Grossnickle, S.C., MacDonald, J.E., 2018. Why seedlings grow: influence of plant attributes. *New Forests* 49, 1–34. <https://doi.org/10.1007/s11056-017-9606-4>
- Guehl, J.M., Clement, A., Kaushal, P., Aussenac, G., 1993. Planting stress, water status and non-structural carbohydrate concentrations in Corsican pine seedlings. *Tree Physiology* 12, 173–183. <https://doi.org/10.1093/treephys/12.2.173>
- Gurevitch, J., Morrow, L.L., Wallace, A., Walsh, J.S., 1992. A Meta-Analysis of Competition in Field Experiments. *The American Naturalist* 140, 539–572.
- Haase, D.L., 2011. Seedling root targets. In: Riley, L. E.; Haase, D. L.; Pinto, J. R., tech. coords. *National Proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations - 2010*. Proc. RMRS-P-65. Fort Collins, CO: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station. p. 80–82. 65, 80–82.
- Haase, D.L., Davis, A.S., 2017. Developing and supporting quality nursery facilities and staff are necessary to meet global forest and landscape restoration needs. *REFORESTA* 69–93. <https://doi.org/10.21750/REFOR.4.06.45>
- Jäärats, A., Tullus, A., Seemen, H., 2016. Growth and Survival of Bareroot and Container Plants of *Pinus sylvestris* and *Picea abies* During Eight Years in Hemiboreal Estonia. *Baltic Forestry* 16, 365–374.
- Jacobs, D.F., Salifu, K.F., Davis, A.S., 2009. Drought susceptibility and recovery of transplanted *Quercus rubra* seedlings in relation to root system morphology. *Ann. For. Sci.* 66, 504–504. <https://doi.org/10.1051/forest/2009029>
- Jacobs, D.F., Wilson, B.C., Ross-Davis, A.L., Davis, A.S., 2008. Cold hardiness and transplant response of *Juglans nigra* seedlings subjected to alternative storage regimes. *Ann. For. Sci.* 65, 1. <https://doi.org/10.1051/forest:2008036>
- Koide, D., Higa, M., Nakao, K., Ohashi, H., Tsuyama, I., Matsui, T., Tanaka, N., 2016. Projecting spatiotemporal changes in suitable climate conditions to regenerate trees using niche differences between adult and juvenile trees. *Eur J Forest Res* 135, 125–136. <https://doi.org/10.1007/s10342-015-0921-z>
- Kolevska, D.D., Dimitrova, A., Cokoski, K., Basova, M., 2020. Growth and quality of *Pinus nigra* (Arn.), *Pinus sylvestris* (L.) and *Pinus pinaster* (Aiton) seedlings in two container types. *REFORESTA* 21–36.
- Lacey, S.T., Brennan, P.D., Parekh, J., 2001. Deep may not be meaningful: Cost and effectiveness of various ripping tine configurations in a plantation cultivation trial in eastern Australia. *New Forests* 21, 231–248. <https://doi.org/10.1023/A:1012283106140>
- Landis, T., Dumroese, R.K., Haase, D., 2010. *The container tree nursery manual, volume 7: seedling processing, storage and outplanting.*

- Le Tacon, F., Mousain, D., Garbaye, J., Bouchard, D., Churin, J.-L., Argillier, C., Amirault, J.-M., Généré, B., 1997. Mycorhizes, pépinières et plantations forestières en France. *Revue Forestière Française* 49, 131–154. <https://doi.org/10.4267/2042/5663>
- Levy, P.E., McKay, H.M., 2003. Assessing tree seedling vitality tests using sensitivity analysis of a process-based growth model. *Forest Ecology and Management* 183, 77–93. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(03\)00095-1](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(03)00095-1)
- Löf, M., Dey, D.C., Navarro, R.M., Jacobs, D.F., 2012a. Mechanical site preparation for forest restoration. *New Forests* 43, 825–848. <https://doi.org/10.1007/s11056-012-9332-x>
- Löf, M., Dey, D.C., Navarro, R.M., Jacobs, D.F., 2012b. Mechanical site preparation for forest restoration. *New Forests* 43, 825–848. <https://doi.org/10.1007/s11056-012-9332-x>
- Löf, M., Rydberg, D., Bolte, A., 2006. Mounding site preparation for forest restoration: survival and growth responses in *Quercus robur* L. seedlings. *Forest Ecology and Management* 232, 19–25.
- MAAF, 2014. Réussir la plantation forestière, 3ème édition, Guide technique.
- Maltz, M.R., Treseder, K.K., 2015. Sources of inocula influence mycorrhizal colonization of plants in restoration projects: a meta-analysis. *Restoration Ecology* 23, 625–634. <https://doi.org/10.1111/rec.12231>
- Margolis, H.A., Brand, D.G., 1990. An ecophysiological basis for understanding plantation establishment. *Can. J. For. Res.* 20, 375–390. <https://doi.org/10.1139/x90-056>
- Ministère de l’urbanisme des logements et du transport, Ministère de l’économie des finances et du budget, Ministère de l’agriculture, 2012. Marché publics de travaux, Cahier des clauses techniques générale, Fascicule n° 34, travaux forestiers de boisement [WWW Document]. Bulletin officiel du ministère en charge de l’environnement. URL [https://www.bulletin-officiel.developpement-durable.gouv.fr/documents/Bulletinofficiel-0030524/F34\\_2012-05-30.pdf](https://www.bulletin-officiel.developpement-durable.gouv.fr/documents/Bulletinofficiel-0030524/F34_2012-05-30.pdf) (accessed 2.10.23).
- Oliveira, G., Nunes, A., Clemente, A., Correia, O., 2011. Effect of substrate treatments on survival and growth of Mediterranean shrubs in a revegetated quarry: An eight-year study. *Ecological Engineering* 37, 255–259. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.11.015>
- ONF, CNPF, 2021. Climesseces [WWW Document]. URL <https://climesseces.fr/> (accessed 2.14.23).
- Payn, T., Carnus, J.-M., Freer-Smith, P., Kimberley, M., Kollert, W., Liu, S., Orazio, C., Rodriguez, L., Silva, L.N., Wingfield, M.J., 2015. Changes in planted forests and future global implications. *Forest Ecology and Management, Changes in Global Forest Resources from 1990 to 2015* 352, 57–67. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.06.021>
- Piñeiro, J., Maestre, F.T., Bartolomé, L., Valdecantos, A., 2013. Ecotechnology as a tool for restoring degraded drylands: A meta-analysis of field experiments. *Ecological Engineering* 61, 133–144. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.09.066>
- Pinto, J.R., Marshall, J.D., Dumroese, R.K., Davis, A.S., Cobos, D.R., 2012. Photosynthetic response, carbon isotopic composition, survival, and growth of three stock types under water stress enhanced by vegetative competition. *Can. J. For. Res.* 42, 333–344. <https://doi.org/10.1139/x11-189>
- Policelli, N., Horton, T.R., Hudon, A.T., Patterson, T.R., Bhatnagar, J.M., 2020. Back to Roots: The Role of Ectomycorrhizal Fungi in Boreal and Temperate Forest Restoration. *Frontiers in Forests and Global Change* 3.
- Puttonen, P., 1986. Carbohydrate reserves in *Pinus sylvestris* seedling needles as an attribute of seedling vigor. *Scandinavian Journal of Forest Research* 1, 181–193. <https://doi.org/10.1080/02827588609382410>

- Ramón Vallejo, V., Smanis, A., Chirino, E., Fuentes, D., Valdecantos, A., Vilagrosa, A., 2012. Perspectives in dryland restoration: approaches for climate change adaptation. *New Forests* 43, 561–579. <https://doi.org/10.1007/s11056-012-9325-9>
- Repáč, I., Parobeková, Z., Belko, M., 2022. Ectomycorrhiza-hydrogel additive enhanced growth of Norway spruce seedlings in a nutrient-poor peat substrate. *Journal of Forest Science* 68, 170–181. <https://doi.org/10.17221/29/2022-JFS>
- Rey Benayas, J.M., Martínez-Baroja, L., Pérez-Camacho, L., Villar-Salvador, P., Holl, K.D., 2015. Predation and aridity slow down the spread of 21-year-old planted woodland islets in restored Mediterranean farmland. *New Forests* 46, 841–853. <https://doi.org/10.1007/s11056-015-9490-8>
- Riedacker, A., 1978. Etude de la déviation des racines horizontales ou obliques issues de boutures de peuplier qui rencontrent un obstacle : applications pour la conception de conteneurs. *Ann. Sci. forest.* 35, 1–18. <https://doi.org/10.1051/forest/19780101>
- Rincón, A., de Felipe, M.R., Fernández-Pascual, M., 2007. Inoculation of *Pinus halepensis* Mill. with selected ectomycorrhizal fungi improves seedling establishment 2 years after planting in a degraded gypsum soil. *Mycorrhiza* 18, 23–32. <https://doi.org/10.1007/s00572-007-0149-y>
- Ritchie, G.A., Dunlap, J.R., 1980. Root growth potential. Its development and expression in forest tree seedlings. *New Zealand Journal of Forestry Science* 10, 218–248.
- Rodríguez-Trejo, D.A., Duryea, M.L., White, T.L., English, J.R., McGuire, J., 2003. Artificially regenerating longleaf pine in canopy gaps: initial survival and growth during a year of drought. *Forest Ecology and Management* 180, 25–36. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00557-1](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00557-1)
- Rolando, C.A., Pammenter, N.W., Little, K.M., 2011. Critical water stress levels in *Pinus patula* seedlings and their relation to measures of seedling morphology. *Southern Forests: a Journal of Forest Science* 73.
- Rose, R., Gleason, J.F., Atkinson, M., 1993. Morphological and water-stress characteristics of three Douglas-fir stocktypes in relation to seedling performance under different soil moisture conditions. *New Forest* 7, 1–17. <https://doi.org/10.1007/BF00037468>
- Santacruz-García, A.C., Senilliani, M.G., Gómez, A.T., Ewens, M., Yonny, M.E., Villalba, G.F., Nazareno, M.A., 2022. Biostimulants as forest protection agents: Do these products have an effect against abiotic stress on a forest native species? Aspects to elucidate their action mechanisms. *Forest Ecology and Management* 522, 120446. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120446>
- Sardin, T., Bourdenet, P., Argillier, C., 2001. Amélioration des techniques de reconstitution en espèces feuillues de la forêt méditerranéenne. *Revue forestière française* 53, 542. <https://doi.org/10.4267/2042/5270>
- Sikström, U., Hjelm, K., Hanssen, K.H., Saksa, T., Wallertz, K., 2020. Influence of mechanical site preparation on regeneration success of planted conifers in clearcuts in Fennoscandia – a review. 35. <https://doi.org/10.14214/sf.10172>
- Simpson, D.G., Ritchie, G.A., 1997. Does RGP predict field performance? A debate. *New Forests* 13, 253–277. <https://doi.org/10.1023/A:1006542526433>
- Small, C.C., Degenhardt, D., 2018. Plant growth regulators for enhancing revegetation success in reclamation: A review. *Ecological Engineering* 118, 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.04.010>
- Stein, W.I., Edwards, J.L., Tinus, R.W., 1975. Outlook for Container-Grown Seedling Use in Reforestation. *Journal of Forestry* 73, 337–341. <https://doi.org/10.1093/jof/73.6.337>
- Sutton, R.F., 1993. Mounding site preparation: A review of European and North American experience. *New Forest* 7, 151–192. <https://doi.org/10.1007/BF00034198>

- Tallieu, C., Collet, C., Renaud, J.-P., Pitaud, J., 2022. Conception d'indices météorologiques pour prendre en compte le risque de sécheresse estivale dans la garantie de reprise des plantations (Rapport du programme "Reprise des plantations en climat changeant (Replant-CLIC)"). INRAe.
- Thompson, B.E., 1985. Seedling morphological evaluation: what you can tell by looking., in: Evaluating Seedling Quality: Principles, Procedures, and Predictive Ability of Major Tests. Forest Research Laboratory, Oregon State University, pp. 59–72.
- Verger, S., Ginisty, C., 1995. Plants résineux en conteneurs pour la zone tempérée. Bulletin technique de l'Office National des Forêts 9–19.
- Vyse, A., 1981. Growth of Young Spruce Plantations in Interior British Columbia. The Forestry Chronicle 57, 174–180. <https://doi.org/10.5558/tfc57174-4>
- Weyers, J.D.B., Paterson, N.W., 2001. Plant hormones and the control of physiological processes. New Phytologist 152, 375–407. <https://doi.org/10.1046/j.0028-646X.2001.00281.x>
- Yu, J., Shi, J. g., Dang, P. f., Mamedov, A. i., Shainberg, I., Levy, G. j., 2012. Soil and Polymer Properties Affecting Water Retention by Superabsorbent Polymers under Drying Conditions. Soil Science Society of America Journal 76, 1758–1767. <https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0387>