Ann. Rech. For. Algérie 2026, 16(1):34-45
© Institut National de Recherche Forestière

Article de recherche

Reçu: 02 Décembre 2025 /Accepté: 20 Juillet 2026

Évaluation comparative du paillage organique, de l'arrosage manuel et du Waterboxx® sur la croissance et la survie des jeunes plants de chêne-liège (*Quercus suber* L.) sur sol argileux

S. Guendouze-Moutchou*., I. Lil., H. Himrane

Institut National de la Recherche Forestière INRF) B.P 37 Chéraga, Alger.

* **Auteur correspondant :** moutchouaida@yahoo.fr

ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تأثير ثلاث تقنيات للغرس على النمو النسبي في الارتفاع ومعدل البقاء لدى 86 شتلة فتية من البلوط الفليني *Quercus suber* L. ، تنحدر من خمس مصادر جغرافية، وزُرعت في تربة متوسطة الطينية ذات انحدار ضعيف (5%) بالمعهد الوطني للبحوث الغابية ببينام (الجزائر). استُخدم تصميم تجريبي بالقطع المنشقة لتحليل تأثير كل من المعاملة والمصدر الجغرافي. وشملت المعاملات: (1) الري اليدوي الأسبوعي، المعدّل وفق الظروف المناخية والمرفق بالعزق؛ (2) التغطية العضوية باستعمال أوراق *Casuarina equisetifolia*؛ و(3) تقنية Waterboxx®، الهادفة إلى تحسين إمداد الشتلات بالماء وتقليل احتياجات الري. قُيّمت الأداءات من خلال معدل النمو النسبي في الارتفاع (TCR_h، سم·يوم$^{-1}$) ومعدل البقاء (*TS*). أظهرت المعاملة تأثيرًا عالي المعنوية على معدل النمو (F = 7.67؛ p = 0.001)، وتأثيرًا معنويًا على معدل البقاء (F = 3.66؛ p = 0.03). حققت التغطية أفضل النتائج (TCR_h = 0.00225 سم·يوم$^{-1}$؛ *TS* = 94%)، تلتها تقنية الري (0.00125 سم·يوم$^{-1}$؛ 76%)، في حين سجلت Waterboxx® أدنى أداء (0.0003 سم·يوم$^{-1}$؛ 66%). ولم يُسجل أي تأثير معنوي للمنشأ الجغرافي أو للتفاعل بين المنشأ والمعاملة. وبذلك، تبدو تقنية التغطية العضوية الأكثر ملاءمة للظروف المدروسة.

كلمات مفتاحية: البلوط الفليني؛ *Quercus suber* L.؛ الري اليدوي؛ الغطاء العضوي؛ Waterboxx®؛ معدل النمو؛ معدل البقاء.

Abstract

This study evaluates the effects of three planting techniques on relative height growth and survival of 86 young cork oak (*Quercus suber* L.) seedlings from five geographical provenances, established on moderately clayey soil with a gentle slope (5%) at the INRF of Bainem (Algiers, Algeria). A split-plot experimental design was used to analyze the effects of treatment and provenance. Three treatments were tested: (1) weekly manual watering, adjusted according to climatic conditions and combined with hoeing; (2) organic mulching using *Casuarina equisetifolia* leaves; and (3) the Waterboxx® technique, designed to improve water supply and reduce irrigation requirements. Performance was assessed using relative height growth rate (RHGR, cm·day^{-1}) and survival rate (SR). Treatment had a highly significant effect on RHGR (F = 7.67; p = 0.001) and a significant effect on SR (F = 3.66; p = 0.03). Mulching produced the best results (RHGR = 0.00225 cm·day^{-1}; SR = 94%), followed by watering (0.00125 cm·day^{-1}; 76%), whereas Waterboxx® showed the lowest performance (0.0003 cm·day^{-1}; 66%). No significant effect of provenance or provenance × treatment interaction was observed. Mulching therefore appears to be the most suitable technique under the studied conditions..

Keywords: Cork oak; *Quercus suber* L. manual watering; mulching; Waterboxx®; growth rate; survival rate.

Résumé

Cette étude évalue l'effet de trois techniques de plantation sur la croissance relative en hauteur et la survie de 86 jeunes plants de chêne-liège (*Quercus suber* L.), issus de cinq provenances géographiques, installés sur un sol moyennement argileux à faible pente (5 %) à l'INRF de Bainem (Alger, Algérie). Un dispositif en parcelles divisées a permis d'analyser les effets du traitement et de la provenance. Trois traitements ont été testés : (1) un arrosage manuel hebdomadaire, ajusté aux conditions climatiques et associé au binage ; (2) un paillage organique à base de feuilles de *Casuarina equisetifolia* ; et (3) la technique Waterboxx®, destinée à améliorer l'alimentation hydrique et à réduire les besoins en irrigation. Les performances ont été évaluées par le taux de croissance relative en hauteur (TCR_h, cm·j^{-1}) et le taux de survie (TS). Le traitement a eu un effet hautement significatif sur le TCR_h (F = 7,67 ; p = 0,001) et significatif sur le TS (F = 3,66 ; p = 0,03). Le paillage a donné les meilleurs résultats (TCR_h = 0,00225 cm·j^{-1} ; *TS* = 94 %), suivi de l'arrosage (0,00125 cm·j^{-1} ; 76 %), tandis que le Waterboxx® a enregistré les plus faibles performances (0,0003 cm·j^{-1} ; 66 %). Aucun effet significatif de la provenance ni de l'interaction provenance × traitement n'a été observé. Le paillage apparaît ainsi comme la technique la plus adaptée aux conditions étudiées.

Mots clés : Chêne liège ; *Quercus suber* L. arrosage manuel ; paillage ; waterboxx® ; taux de croissance ; taux de survie.

1. Introduction

Le chêne-liège (*Quercus suber* L.) est une espèce méditerranéenne emblématique à forte valeur écologique et économique, notamment pour la production de liège et son rôle dans la stabilité des écosystèmes forestiers (Quézel et Médail, 2003). Il contribue à la protection des sols contre l'érosion et au maintien de la biodiversité. Bien qu'il présente des adaptations morpho-physiologiques lui permettant de tolérer des conditions climatiques contraignantes, son stade juvénile demeure particulièrement vulnérable, rendant la phase d'installation déterminante pour la réussite des plantations, notamment sous stress hydrique (Matías et al. 2019 ; Camarero et al. 2024). La survie et la croissance des jeunes plants dépendent fortement de la disponibilité en eau, des propriétés du sol et de la variabilité fonctionnelle entre provenances, qui conditionnent leur capacité d'adaptation (Rzigui et al. 2018 ; Ramírez-Valiente et al. 2019).

Dans un contexte de changement climatique marqué par l'augmentation des températures et la réduction de la disponibilité hydrique, la réussite des reboisements méditerranéens devient de plus en plus incertaine (IPCC, 2023 ; Kaci et al. 2026). Ces contraintes sont particulièrement marquées dans les zones à limitations édaphiques, où l'établissement des plants est souvent compromis par le stress hydrique et la mortalité précoce (Rouibah et al. 2018 ; Guedira et al. 2019). Dans ce contexte, plusieurs techniques de restauration assistée ont été développées afin d'améliorer la reprise des plantations.

Parmi celles-ci, le paillage organique constitue une approche agroécologique susceptible de limiter l'évaporation, de stabiliser la température du sol et d'améliorer les conditions hydriques de la rhizosphère, favorisant ainsi la croissance et la survie des jeunes plants (Wang et al. 2021 ; Zhang et al. 2023 ; Innusa et al. 2024). Le dispositif Groasis Waterboxx® a été proposé comme une solution innovante pour favoriser l'installation des plants en milieux contraignants, en assurant un apport progressif en eau, complété par la collecte de condensation et une diffusion lente vers la zone racinaire (Groasis, 2020 ; Jaramillo et al. 2022 ; Lund et al. 2024). Ce dispositif est supposé favoriser l'enracinement et limiter le stress hydrique durant la phase post-plantation. En complément, un arrosage manuel espacé peut constituer une stratégie intermédiaire favorisant le développement racinaire et la résistance au déficit hydrique (Morillas et al. 2023).

Les études intégrant simultanément ces techniques au sein d'un même dispositif expérimental en conditions méditerranéennes et sur sols moyennement argileux en pente restent limitées dans la littérature scientifique. La présente étude vise ainsi à évaluer les effets du paillage organique, du Waterboxx® et de l'arrosage manuel espacé sur la croissance et la survie de jeunes plants de chêne-liège. L'objectif est d'identifier les techniques les plus efficaces pour améliorer la réussite des reboisements et contribuer à l'optimisation des stratégies de restauration forestière dans un contexte de changement climatique.

2. Matériel et Méthodes

2.1. Site expérimental

L'étude a été réalisée en plein champ dans un espace naturel situé à Bainem (36°48′12,8″ N ; 02°57′ 29,08″ E), couvrant une superficie de 172 m^2. La parcelle est orientée au Nord-Est, avec des coordonnées géographiques de latitude 36°48′12,8″ et de longitude 02°57′29,08″, à une altitude de 183 m. Le climat de la région est méditerranéen subhumide, caractérisé par des hivers doux et humides ainsi que des étés chauds et secs, conditions qui favorisent la croissance des plantes (Seltzer, 1946).

Les analyses physico-chimiques du sol ont été réalisées au laboratoire de pédologie de l'Institut National de Recherche Forestière (INRF). Le sol présente une texture argilo-sableuse, caractérisée par une forte proportion d'argile (60,95 %), associée à des teneurs en sable (25,38 %) et en limon (13,67 %), selon la classification texturale standard (triangle textural USDA)

Le sol est non calcaire (0 % de calcaire total), légèrement alcalin (pH = 8,14) et présente une faible conductivité électrique (0,12 dSm^{-1}), indiquant une absence de salinité. Le terrain présente

une pente de 5 %. Ces caractéristiques édaphiques influencent la rétention en eau, la structure du sol et, par conséquent, le développement et la croissance des jeunes plants.

2.2. Matériel végétal et provenance

Quatre-vingt-six plants de chêne liège (*Quercus suber* L.) âgés de 10 mois, en provenance de la pépinière de l'Institut National de Recherche Forestière (INRF) ont été utilisés dans cette étude. Les glands ayant servi à la production de ces plants ont été récoltés sur cinq localités géographiques distinctes : Béjaïa, Guelma, Médéa, Skikda et Tissemsilt. En raison du nombre limité de plants disponibles pour chaque provenance, un effectif restreint a été retenu pour l'expérimentation. Les plants ont été transplantés sur le site expérimental de l'INRF, le 3 mars 2025, chacun étant placé dans un potet d'environ 20 cm de profondeur.

2.3. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental correspond à un plan factoriel en parcelles divisées (Split-plot) a deux facteurs : la provenance des plants avec cinq niveaux et le traitement de plantation avec trois niveaux. Ce dispositif permet d'évaluer simultanément l'influence de l'origine géographique des plants, celle des traitements appliqués ainsi que leurs eventuelles interactions. Les plants de chêne-liège (*Quercus suber* L.) ont été soumis à trois modalités expérimentales : (i) paillage organique, (ii) dispositif Waterboxx®, et (iii) traitement témoin comprenant un arrosage manuel accompagné d'un binage entre deux arrosages successifs. La distribution des effectifs selon les provenances et les traitements est présentée dans le Tableau 1. La différence d'effectifs entre traitements est liée à des contraintes matérielles, notamment au nombre limité de dispositifs Waterboxx®. L'ensemble des plants disponibles a été conservé dans le dispositif expérimental, sans réduction artificielle des effectifs. Cette légère inégalité de réplication a été prise en compte dans les analyses statistiques.

Les jeunes plants de *Quercus suber* témoins ont bénéficié d'un arrosage manuel hebdomadaire immédiatement après la plantation, avec un apport moyen estimé entre 10 et 15 litres par plant, jusqu'à l'apparition de la reprise végétative au début du printemps. Par la suite, le traitement d'arrosage a été appliqué selon un protocole alternant un apport d'eau tous les vingt jours et des opérations de binage réalisées entre deux irrigations afin de favoriser l'infiltration de l'eau et de limiter les pertes par évaporation et de maintenir de meilleures conditions de surface du sol.

Un paillage organique constitué de feuilles sèches de *Casuarina equisetifolia* a été appliqué autour des plants concernés, avec une épaisseur d'environ 5 cm. Ce paillage couvrait la zone racinaire immédiate et visait à conserver l'humidité du sol, à réduire l'évaporation et à atténuer les fluctuations thermiques au niveau du sol.

Les plants soumis au dispositif Waterboxx® ont été installés conformément aux recommandations du fabricant. Chaque unité, d'une capacité d'environ 15 litres, repose sur un système de diffusion progressive de l'eau vers la zone racinaire au moyen d'une mèche reliée au réservoir, permettant un apport hydrique lent et continu (Groasis, 2020).

2.4. Paramètres mesurés

Les taux de survie et de croissance relative en hauteur ont été calculés par provenance et par traitement sur l'ensemble de la période de suivi, correspondant à 125 jours, durant laquelle les premiers symptômes de flétrissement sont apparus chez certains plants équipés du dispositif Waterboxx®. Le

Tableau 1. Répartition des plants de *Quercus suber* par provenance et par traitement expérimental

Provenance	Témoin (T)	Paillage	Waterboxx®	Total
Bejaia	6	8	4	18
Guelma	5	8	4	17
Médéa	7	7	3	17
Skikda	8	8	3	19
Tissemsilt	7	4	4	15
Total	33	35	18	86

Tableau 2. Répartition des plants et du taux de survie selon la provenance et le traitement.

Provenance	Nt T	Nv T	TS (%) T	Nt P	Nv P	TS (%) P	Nt WB	Nv WB	TS (%) WB
Béjaia	6	4	66,67	8	8	100,00	4	3	75,00
Guelma	5	5	100,00	8	8	100,00	3	2	66,67
Médéa	7	4	57,14	7	6	85,71	3	2	66,67
Tissemsilt	8	7	87,50	8	7	87,50	4	2	50,00
Skikda	7	5	71,43	4	4	100,00	4	3	75,00

Nt : nombre total de plants ; Nv : nombre de plants vivants ; TS : taux de survie ; T : témoin ; P : paillage ; WB : Waterboxx®.

taux de survie (TS) a été estimé selon l'Équation (1).

$$TS(\%) = \left(\frac{Ns}{Nt}\right) * 100 \quad (1)$$

Où N_s représente le nombre de plants survivants et N_t, le nombre total de plants initialement plantés. Ce paramètre traduit la capacité de résistance des plants face aux conditions de sécheresse.

Le taux de croissance relative en hauteur (TCR_h) a été utilisé pour évaluer l'effet des traitements sur la croissance aérienne des plants. Il exprime la capacité des jeunes plants à produire de la biomasse en hauteur en tenant compte de leur taille initiale, ce qui en fait un indicateur robuste de performance physiologique (Kozlowski et al. 1991). Il a été calculé à partir de la variation de la hauteur de la tige principale entre la première mesure (t_1) et la dernière mesure (t_2), selon une approche logarithmique permettant de standardiser la croissance dans le temps (Hunt, 1982), selon l'Équation (2) :

$$TCR_h = \frac{\ln(H_f) - \ln(H_i)}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

Où H_i et H_f correspondent respectivement aux hauteurs initiale et finale de la tige principale mesurées aux temps t_1 et t_2 . La durée de suivi considérée (t_2 - t_1) était de 125 jours.

2.5. Traitement des données

Les données ont été analysées à l'aide du logiciel Statistica 8.0. Une analyse de variance (ANOVA) à deux facteurs a été réalisée afin d'évaluer l'effet des traitements et des provenances sur les performances des plants. Les comparaisons de moyennes ont été effectuées au seuil de signification de 5 % ($p < 0,05$). Une analyse complémentaire non paramétrique (test de Kruskal-Wallis) a également été réalisée afin de vérifier la robustesse des résultats obtenus.

3. Résultats

3.1. Répartition des effectifs expérimentaux

Le Tableau 2 présente la répartition des effectifs expérimentaux selon les différentes provenances et traitements. Il indique pour chaque combinaison provenance-traitement, le nombre de plants installés (N_t), le nombre de plants vivants (N_v) ainsi que le taux de survie (TS) correspondant. Ces effectifs constituent la base des analyses statistiques ultérieures appliquées aux paramètres de croissance et de survie.

3.2. Analyse statistique (ANOVA)

L'analyse de la variance réalisée sur les deux variables de réponse (TCR_h et TS) montre que le facteur provenance n'a pas d'effet significatif sur les paramètres étudiés ($p = 0,72$ pour TCR_h ; $p = 0,78$ pour TS). Les différences entre provenances ne contribuent donc pas de manière notable à la variabilité observée (Tableau 3).

En revanche, le facteur traitement exerce un effet significatif sur les deux variables. Pour le taux de croissance relative en hauteur (TCR_h), il est hautement significatif ($F = 7,67$; $p = 0,001$) tandis que pour le taux de survie (TS), l'effet est significatif au seuil de 5 % ($F = 3,66$; $p = 0,03$). L'interaction provenance × traitement n'est pas significative pour

Tableau 3. Résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) des effets de la provenance, des traitements et de leur interaction sur le taux de croissance relative en hauteur (TCR_h) et le taux de survie (TS) des plants de chêne liège.

Source de variation	TCR_h			*TS*		
	ddl	F	P	ddl	F	P
Provenances	4	0,51	0,72	4	0,43	0,78
Traitement	2	7,67	0,001**	2	3,66	0,03*
Provenances x traitement	8	1,07	0,39	8	0,6	0,76

ddl : degré de liberté ; F : valeur du test Fisher ; * : significatif au seuil de 5% (p<0,05) et** hautement significatif au seuil de 1% (p<0,01)

les deux variables étudiées (p > 0,05), indiquant que l'effet des traitements est indépendant de l'origine des plants. Ces résultats montrent que les variations observées sont principalement attribuables aux techniques de plantation, tandis que l'effet provenance demeure non significatif.

3.3. Synthèse des résultats (moyennes et écart-types)

Le Tableau 4 présente les moyennes et écarts-types des paramètres étudiés, taux de croissance relative en hauteur et taux de survie (TCR_h et *TS*) selon les différents traitements. Les résultats montrent que le traitement par paillage présente les valeurs moyennes les plus élevées pour le taux de croissance relative en hauteur (0,00225 cmj^{-1}) et de survie (94,64 %). Le traitement Waterboxx® présente les valeurs les plus faibles pour les deux paramètres, tandis que l'arrosage manuel occupe une position intermédiaire. Ces résultats confirment les tendances observées dans l'analyse de variance.

3.4. Résultats du test post hoc

Le test post-hoc de Newman–Keuls appliqué au taux de croissance relative en hauteur (TCR_h) révèle une différence hautement significative entre le paillage et le Waterboxx® (p = 0,001), indiquant une meilleure performance du paillage pour la croissance des plants. Les autres comparaisons (arrosage–paillage et arrosage–Waterboxx®) ne présentent pas de différences significatives (p > 0,05). Concernant le taux de survie (*TS*), le test met également en évidence une différence significative entre le paillage et le Waterboxx® (p = 0,037), confirmant l'avantage du paillage pour la survie. En revanche, les autres comparaisons ne sont pas significatives (p > 0,05).

3.5. Validation non paramétrique

Afin de vérifier la robustesse des résultats obtenus par l'ANOVA, un test non paramétrique de Kruskal–Wallis a été appliqué au taux de croissance relative en hauteur TCR_h. Les résultats montrent un effet significatif du traitement (H = 9,02 ; p = 0,011), confirmant ainsi les conclusions de l'ANOVA et renforçant la fiabilité des résultats obtenus.

3.6. Effet des traitements sur les provenances (analyse descriptive)

Bien que l'analyse de variance n'ait mis en évidence aucun effet significatif de la provenance ni d'interaction provenance × traitement, des différences

Tableau 4. Moyenne ± écart-type du taux de croissance relative en hauteur (TCR_h) et du taux de survie (TS) des plants de chêne liège selon les traitements.

Traitement	TCR_h (cm j^{-1})	*TS* (%)
Paillage	0,00225 ± 0,0008	94,64 ± 11,9
Arrosage	0,00125 ± 0,0003	76,55 ± 13,76
Waterboxx®	0,00031 ± 0,0001	66,64 ± 6,66

descriptives ont été observées entre provenances au sein des différents traitements (Figure 1).

Ces variations sont présentées à titre exploratoire et peuvent fournir des indications sur la variabilité phénotypique potentielle en termes de croissance et de survie des jeunes plants face aux différents régimes hydriques appliqués.

3.7. Taux de survie et croissance en hauteur des provenances sous paillage

Le paillage se distingue par le taux de croissance relative moyen le plus élevé (≈ 0,00225 cm·j^{-1}), indiquant une croissance optimale, associé à un taux de survie élevé (94,64 %) (Tableau 4). Les performances en croissance aérienne et en vitalité sont élevées pour l'ensemble des provenances. Les valeurs montrent une légère variabilité, avec un maximum d'environ 0,004 cm·j^{-1} pour Skikda, tandis que Guelma présente la valeur la plus basse (≈ 0,001 cm·j^{-1}). Les taux de survie sont élevés pour Guelma, Béjaïa et Skikda (100 %), tandis que Médéa et Tissemsilt enregistrent respectivement 85 % et 87 %. Globalement, ce traitement soutient à la fois une croissance élevée et une excellente survie pour toutes les provenances étudiées

3.8. Taux de survie et croissance en hauteur des provenances sous arrosage

L'arrosage manuel affiche un taux de croissance en hauteur modéré (≈ 0,00125 cm·j^{-1}) et un taux de survie intermédiaire de 76,55 %, traduisant un effet positif mais limité dans le temps. Concernant la croissance, toutes les provenances présentent des taux de croissance relative en hauteur (TCR_h) faibles. Le sol nu est sujet à une forte évaporation et à une moindre rétention d'humidité (Figure 2, b). Toutes les provenances montrent des performances variables. Les provenances continentales (Guelma, Tissemsilt, Médéa) présentent des taux de survie globalement élevés, avec une valeur maximale observée chez Guelma (100 %). En revanche, les provenances littorales subhumides (Skikda et Béjaïa) affichent des taux de survie plus modérés, autour de 65–70 %. Globalement, le traitement d'arrosage assure une survie correcte mais ne permet pas une croissance significative.

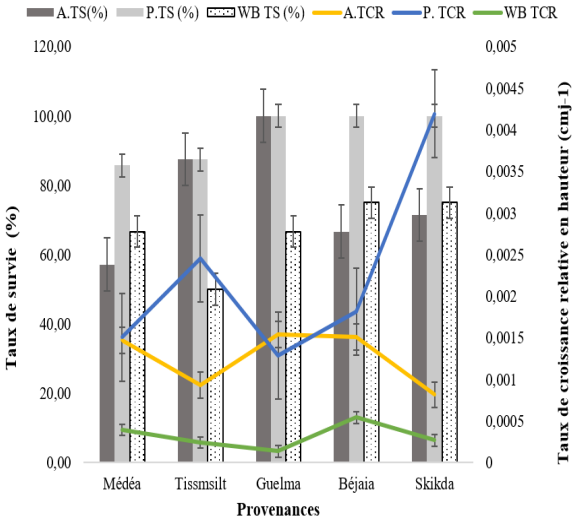


Figure 1. Comparaison des taux de survie et de croissance relative des provenances de chêne-liège sous différents traitements de plantation (TCR : taux de croissance relative, TS : taux de survie, A : arrosé, P : paillé, WB : waterboxx®).

3.9. Taux de survie et croissance en hauteur des provenances en waterboxx

La plantation avec le dispositif Waterboxx® a présenté une croissance relative en hauteur plus faible (≈ 0,00031 cm·j^{-1}) ainsi qu'un taux de survie réduit (66,64 %) par rapport aux autres traitements. En période estivale, la forte évaporation, associée aux propriétés du sol à texture argileuse, a favorisé sa compaction et sa fissuration sous les cuves, malgré la présence d'eau dans les réservoirs (Figure 2c - d). Cette situation a pu limiter la diffusion de l'eau vers la zone racinaire et induire un stress hydrique persistant chez les plants.

Les taux de survie sont hétérogènes entre provenances. Les populations littorales de Skikda et Béjaïa enregistrent les meilleures valeurs (75 % chacune), suggérant une meilleure capacité à tirer parti de l'apport hydrique régulier mais limité du dispositif. À l'inverse, la provenance Tissemsilt présente le taux de survie le plus faible (50 %), tandis que Médéa et Guelma montrent des niveaux intermédiaires (66,67 %). Ces contrastes suggèrent que l'efficacité du Waterboxx dépend en partie des stratégies d'adaptation propres à chaque provenance.



Figure 2. Etat des plants de chêne liège en fin 'expérimentation sous paillage (a), arrosage (b) et waterboxx (c) et (d)

4. Discussion

Les résultats montrent que les techniques de plantation influencent fortement la survie et la croissance des jeunes plants de *Quercus suber* dans un contexte de stress hydrique estival et de sol moyennement argileux. Aucun effet significatif de la provenance ni de l'interaction provenance × traitement n'a été observé.

Cette absence d'effet peut s'expliquer par la forte plasticité phénotypique des jeunes plants, qui peut limiter l'expression des différences génétiques en conditions de terrain (Lasky et al. 2012 ; Ramírez-Valiente et al. 2015). Chez le chêne-liège,

la différenciation entre populations reste généralement faible aux stades précoces et dépend fortement des conditions environnementales (Sampaio et al. 2021). Les variations non significatives entre provenances suggèrent néanmoins un effet génétique sous-jacent modulé par l'environnement (Ramírez-Valiente et al. 2010 ; 2014 ; Matías et al. 2019). Ces résultats s'inscrivent dans un contexte d'interactions génotype × environnements marqués, où les stratégies d'adaptation locale au stress hydrique jouent un rôle important (Fontes et al. 2022 ; Camarero et al. 2024).

Certaines limites doivent toutefois être prises en compte dans l'interprétation des résultats. L'absence de mesures directes de l'humidité du sol constitue une limite importante, le stress hydrique ayant été estimé indirectement à partir des conditions climatiques et des observations de terrain. Des mesures hydriques plus précises auraient permis de mieux quantifier les relations entre disponibilité en eau et performances des plants. Par ailleurs, l'étude s'est principalement appuyée sur le taux de croissance en hauteur et le taux de survie. D'autres paramètres morphologiques tels que le nombre de feuilles, le diamètre au collet ou la surface foliaire n'ont pas été mesurés en raison de contraintes logistiques et des conditions de terrain. Bien que ces variables puissent apporter des informations complémentaires sur la vigueur des plants, les indicateurs retenus restent couramment utilisés pour évaluer l'établissement initial des jeunes arbres dans des études écologiques similaires. Enfin, la plasticité des jeunes plants et les conditions édaphiques du site, caractérisées par un sol moyennement argileux sujet au compactage estival, ont probablement influencé les résultats. La durée de suivi (125 jours) a permis d'évaluer la phase initiale d'installation des plants, mais des observations plus longues seraient nécessaires pour confirmer ces tendances à long terme.

4.1. Effets de l'arrosage espacé sur la croissance et la survie des plants

La distribution de l'eau dans le sol joue un rôle déterminant aux premiers stades de croissance, comme l'ont montré Al-Atrash (2023) et Yissau et al. (2023). Dans notre étude, les performances sous arrosage restent inférieures à celles observées sous paillage, avec une croissance plus faible, ce qui souligne la sensibilité des jeunes plants de chêne-liège au dessèchement rapide du sol entre deux irrigations (Figure 2b). Les taux de survie, bien que relativement élevés (57 à 100 %), restent également inférieurs à ceux obtenus sous paillage.

Des travaux antérieurs ont montré qu'un arrosage espacé induit un stress hydrique récurrent, limitant le développement racinaire et les ajustements physiologiques (Aranda et al. 2007 ; Gauthey et al. 2024). Malgré cela, la croissance demeure globalement faible et peu différenciée.

Ces résultats s'inscrivent dans le cadre de la plasticité phénotypique déjà mise en évidence chez le chêne-liège (Pérez-Ramos et al. 2010 ; Rzigui et al. 2018) et concordent avec les observations de Varsamis et al. (2022), qui soulignent l'influence de la fréquence d'arrosage sur les réponses adaptatives des jeunes plants. Par ailleurs, la faible différenciation observée entre provenances rejoint les résultats rapportés chez *Quercus robur* (Hietz et al. 2022) et suggère que, durant les premiers stades de développement, la plasticité phénotypique prédomine dans l'expression des traits fonctionnels (Valladares et al. 2007 ; Sampaio et al. 2021).

Enfin, bien que le chêne-liège présente une structuration génétique en lien avec les contraintes abiotiques (Ramírez-Valiente et al. 2010 ; Prats et al. 2019 ; Silva et al. 2023), ces effets apparaissent faiblement exprimés à ce stade précoce de développement.

4.2. Effets du paillage sur la croissance et la survie des plants

Le paillage organique a nettement favorisé la croissance des jeunes plants, avec un taux de croissance relative en hauteur plus élevé (0,00250 cm j^{-1}) et une survie élevée (94 %) comparativement aux deux autres traitements (Tableau 4). Ce résultat est cohérent avec celui de Zhang et al. (2023) et confirme le rôle régulateur du paillage sur le microclimat du sol, notamment en termes d'humidité et de température. Plusieurs études ont montré que ce type de couverture réduit les températures extrêmes du sol (Shirish et al. 2013 ; Kader et al. 2017, 2019 ; Wang et al. 2021) et améliore la disponibilité en eau (McMillen, 2013), favorisant ainsi l'enracinement et la croissance initiale en conditions de forte évapotranspiration. Des travaux récents confirment également son intérêt en situation

de stress hydrique (Varsamis et al. 2022 ; Borges et al. 2024 ; Innusa et al. 2024).

Cependant, l'efficacité du paillage dépend étroitement des conditions édapho-climatiques ainsi que du type de matériau utilisé. Mechergui et Pardos (2018) et Mechergui et al. (2021) ont montré que la réponse de *Quercus suber* varie selon ces facteurs, avec des effets parfois limités sur la croissance et la survie des jeunes plants.

Dans notre étude, l'utilisation de feuilles de *Casuarina equisetifolia* comme paillage a favorisé l'établissement des plants. Cet effet peut s'expliquer par une réduction de l'évaporation, une meilleure conservation de l'humidité du sol et l'amélioration des conditions du milieu racinaire. Dans ces conditions, les taux de croissance observés ont été relativement élevés, en particulier chez les provenances de Skikda (0,008 $cm \cdot j^{-1}$) et de Tissemsilt (0,004 $cm \cdot j^{-1}$). Par ailleurs, les provenances de Skikda, Béjaïa et Guelma ont atteint un taux de survie de 100 %.

Ces différences entre provenances sont cohérentes avec les travaux de Ramírez-Valiente et al. (2010, 2014, 2015), qui mettent en évidence l'influence de la variabilité génétique des traits morphologiques sur l'efficience d'utilisation de l'eau chez *Quercus suber*.

4.3. Impacts du Waterboxx® sur la croissance et la survie des plants en relation avec le compactage du sol

Parmi les trois techniques testées, le dispositif Waterboxx® a montré des performances inférieures à celles rapportées sur sols légers et bien drainés (Tapia et al. 2019 ; Lund et al. 2024). Le taux de mortalité (33 %) et les faibles croissances observées semblent liés aux contraintes du sol argileux, notamment son compactage estival (Figure 2 c-d). Dans ces conditions, la faible conductivité hydraulique limite la redistribution de l'eau et son accessibilité aux racines (Jourgholami et al. 2016 ; Frene et al. 2024), tandis que la résistance mécanique du sol freine l'élongation racinaire et l'exploration du profil (Bengough et al. 2011 ; Lipiec et al. 2012a), affectant ainsi les structures absorbantes et la rhizosphère (Lipiec et al. 2012b ; Liang et al. 2024).

Ces résultats confirment que l'efficacité du Waterboxx® dépend fortement des conditions pédoclimatiques et du contexte d'application, comme l'ont montré Jaramillo et al. (2022), suggérant une forte interaction dispositif–sol plutôt qu'un effet intrinsèque du système. Dans ce contexte de stress hydrique prolongé défavorable au chêne-liège (Camilo-Alves et al. 2017), les provenances littorales (Skikda et Béjaïa) présentent néanmoins une meilleure réponse au Waterboxx (Figure 1), probablement liée à une meilleure exploitation des apports hydriques intermittents, déjà observée chez des populations mésiques de *Quercus suber* (Morillas et al. 2023). Cet avantage pourrait aussi être associé à des réserves plus importantes dans les glands, favorisant l'installation racinaire et la survie en conditions sèches (Ramírez-Valiente et al. 2019 ; Mechergui et al. 2021).

À l'inverse, les provenances continentales (Médéa, Tissemsilt, Guelma) présentent une survie et une croissance plus faibles, traduisant une stratégie plus conservatrice en conditions de stress (Reich, 2014). Des comportements similaires ont été rapportés en zones méditerranéennes, notamment au Maroc (Zine El Abidine et al. 2020) et au Portugal (Vizinho et al. 2023), où la limitation hydrique accentue la sensibilité des jeunes plants. Ces résultats s'inscrivent dans la variabilité adaptative du chêne-liège, qui ne répond pas uniformément à la sécheresse mais selon des stratégies propres à chaque provenance (Ramírez-Valiente et al. 2010 ; Ramírez-Valiente et al. 2014 ; Varela, 2015 ; Prats et al. 2019), comme observé également chez d'autres espèces de chênes tels que *Quercus robur* et *Quercus petraea* (Fontes et al. 2022).

5. Conclusion

Les résultats obtenus à travers cette expérimentation ont montré que la croissance et la survie des jeunes plants de *Quercus suber* variaient en fonction de la provenance et de la technique de plantation. Le paillage organique à base de feuilles de *Casuarina equisetifolia* a soutenu les performances globales, en conservant une humidité du sol stable, au profit de toutes les provenances. L'arrosage intermittent par contre a avantagé les provenances capables de mobiliser rapidement l'eau, tandis que le Waterboxx a été moins efficace sur ce sol argileux, en raison de la faible disponibilité de l'eau pour les racines en saison estivale.

Dans les sols argileux et en conditions subhu-

mides, le paillage apparaît comme la stratégie la plus fiable et durable. L'arrosage peut être préconisé pour les provenances les plus adaptées aux variations hydriques, tandis que le Waterboxx devrait être réservé aux sols plus légers et bien drainés.

Le choix de provenances adaptées aux conditions locales, associé à des techniques de gestion du sol favorisant la rétention d'eau, notamment le paillage organique et l'aménagement de micro-cuvettes, apparaissent comme des éléments essentiels pour assurer le succès des plantations et améliorer la résilience des jeunes chênes liège face à la contrainte hydrique.

Remerciements

Les auteurs adressent leurs sincères remerciements à M. Mohamed Sbabdji, directeur de l'Institut National de Recherche Forestière, pour ses orientations scientifiques et ses conseils précieux ayant contribué à la réalisation de cette étude. Ils expriment également leur gratitude à Mlle Ahlem Abdelbaki pour la collecte des données de terrain, ainsi qu'à toutes les personnes ayant participé aux travaux de terrain.

References

Al-Atrash, E. N., Abd El-Kader, M. E., El-Atriby, M. A., & Eid, A. T. (2023). Studies on water requirements of *Paulownia* hybrid T121 seedlings. *Fayoum Journal of Agricultural Research and Development, 37*(3), 462–477. https://doi.org/10.21608/fjard.2023.309029

Aranda, I., Párdos, M., Puértolas, J., Jiménez, M. D., & Pardos, J. A. (2007). Water-use efficiency in cork oak (*Quercus suber*) is modified by water and light availability. *Tree Physiology, 27*(5), 671–677. https://doi.org/10.1093/treephys/27.5.671

Bengough, A. G., McKenzie, B. M., Hallett, P. D., & Valentine, T. A. (2011). Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *Journal of Experimental Botany, 62*(1), 59–68. https://doi.org/10.1093/jxb/erq350

Borges, R. O. P., Burns, B. M. B., Moraes, B. C. P., Costa, G. P. B., & Carvalho, A. M. de. (2024). Impacts of organic mulching on soil properties. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, 11*(29), 1241–1254. https://doi.org/10.21438/rbgas(2024)112913

Camarero, J. J., Gazol, A., Valerians, C., Colangelo, M., & Rubio-Cuadrado, Á. (2024). Growth responses to climate and drought in relict cork oak populations as a benchmark of the species tolerance. *Forests, 15*(1), 72. https://doi.org/10.3390/f15010072

Camilo-Alves, C. S. P., Vaz, M., Clara, M. I. E., & Ribeiro, N. M. (2017). Chronic cork oak decline and water status. *New Forests, 48*(6), 753–772. https://doi.org/10.1007/s11056-017-9595-3

Frene, J. P., Pandey, B. K., & Castrillo, G. (2024). Under pressure: Elucidating soil compaction and its effect on soil functions. *Plant and Soil, 502*, 267–278. https://doi.org/10.1007/s11104-024-06573-2

Fontes, C. G., Pinto-Ledezma, J., Anna, L., Jacobsen, A. L., Pratt, R. B., & Cavender-Bares, J. (2022). Adaptive variation among oaks shaped by climate of origin. *Functional Ecology, 36*(2), 326–340. https://doi.org/10.1111/1365-2435.13964

Gauthey, A., Bachofen, C., Chin, A., Cochard, H., Gisler, J., Mas, E., Meusburger, K., Peters, R. L., Schaub, M., Tunas, A., Zweifel, R., & Grossiord, C. (2024). Twenty years of irrigation acclimation is driven by denser canopies and not by plasticity in twig- and needle-level hydraulics in *Pinus sylvestris*. *Journal of Experimental Botany*. Advance online publication. https://doi.org/10.1093/jxb/erae066

Guedira, A., Dahmani, J., Elantry, S., El Gharbaoui, M., El Harchaoui, H., & Ouajdi, M. (2019). Évaluation de deux parcelles de régénération artificielle de chêne-liège (*Quercus suber* L.) après vingt-cinq ans de plantation dans la forêt de la Maâmora (« Canton E »). *Le Journal de Botanique, 87*, 109–121. https://doi.org/10.3406/jobot.2019.1923

Groasis , B. (2020). *Groasis Ecological Water Saving Technology Planting Manual*. Groasis.

Hietz, P., Rungwattana, K., Scheffknecht, S., & George, J. P. (2022). Effects of provenance, growing site, and growth on Quercus robur wood anatomy and density in a 12-year-old provenance trial. *Frontiers in Plant Science*, *13*, 795941.

Hunt, R. (1982). *Plant growth curves: The functional approach to plant growth analysis*. Edward Arnold.

Innusa, B. N., Burney, O. T., & Jacobs, D. F. (2024). Response of live oak regeneration to planting density, fertilizer, and mulch. *Forests, 15*, 1594. https://doi.org/10.3390/f15091594

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009325844

Jaramillo, D. P., Calle-Loor, A., Gualoto, E., Bolinas, C., & Cevallos, D. (2022). Adoption of sustainable agriculture practices through participatory research: A case study on Galápagos Islands farmers using water-saving technologies. *Plants, 11*, 2848. https://doi.org/10.3390/plants11212848

Jourgholami, M., Khoramizadeh, A., & Zenner, E. K. (2016). Effects of soil compaction on seedling morphology, growth, and architecture of chestnut-leaved oak (*Quercus castaneifolia*). *iForest – Biogeosciences and Forestry, 10*, 145–153. https://doi.org/10.3832/ifor1724-009

Kaci, M., Papadakis, D., & Petrovic, A. (2026). Drought–competition synergy drives cork oak (*Quercus suber* L.) decline in semi-arid forests. *Journal of Arid Environments, 235*, 105593. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2026.105593

Kader, M. A., Senge, M., Mojid, M. A., & Nakamura, K. (2017). Mulching effects on soil moisture and temperature. *International Soil and Water Conservation Research, 5*(4), 302–308. https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2017.08.001

Kader, M. A., Singha, A., Begum, M. A., Jewel, A., Khan, F. H., & Khan, N. I. (2019). Mulching as a water-saving technique in dryland agriculture. *Bulletin of the National Research Centre, 43*, 1–6. https://doi.org/10.1186/s42269-019-0186-7

Kozlowski, T. T., Kramer, P. J., & Pallardy, S. G. (1991). *The physiological ecology of woody plants*. Academic Press.

Lasky, J. R., Des Marais, D. L., McKay, J. K., Richards, J. H., Juenger, T. E., & Keitt, T. H. (2012). Characterizing genomic variation of *Arabidopsis thaliana*: The roles of geography and climate. *Molecular Ecology, 21*(22), 5512–5529. https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2012.05709.x

Liang, H., Yang, L., He, X., Wu, Q., Chen, D., Liu, M., & Shen, P. (2024). Rhizosphere ventilation effects on root development and bacterial diversity of peanut in compacted soil. *Plants, 13*, 790. https://doi.org/10.3390/plants13060790

Lipiec, J., Hajnos, M., & Świeboda, R. (2012a). Estimating effects of compaction on pore size distribution of soil aggregates by mercury porosimeter. *Geoderma, 179–180*, 20–27. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.02.014

Lipiec, J., Horn, R., Pietrusiewicz, J., & Siczek, A. (2012b). Effects of soil compaction on root elongation and anatomy of different cereal plant species. *Soil and Tillage Research, 121*, 74–81. https://doi.org/10.1016/j.still.2012.01.013

Lund, H. M., Geary, B., Ruebelmann, K., Koide, R. T., Calder, B., & Madsen, M. J. (2024). The use of Groasis Waterboxx devices to improve mineland reclamation efforts by increasing transplant survival and growth of five native woody species. *Restoration Ecology, 32*(5), e14165. https://doi.org/10.1111/rec.14165

Matías, L., Pérez-Ramos, I. M., & Gómez-Aparicio, L. (2019). Drought sensitivity in cork oak populations. *Environmental and Experimental Botany, 163*, 78–85. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.04.011

McMillen, M. (2013). *The effect of mulch type and thickness on the soil surface evaporation rate* [Master's thesis, California Polytechnic State University].

Mechergui, T., & Pardos, M. (2018). Effects of moderate water stress and shading on survival, growth and resource allocation of two cork oak (*Quercus suber* L.) provenances. *Revue d'Écologie (La Terre et la Vie), 73*(2), 180–190. https://hal.science/hal-03532560

Mechergui, T., Pardos, M., & Jacobs, D. F. (2021). Effect of acorn size on survival and growth of *Quercus suber* L. seedlings under water stress. *European Journal of Forest Research, 140*, 175–186. https://doi.org/10.1007/s10342-020-01323-2

Morillas, L., Leiva, M. J., Pérez-Ramos, I. M., Cambrollé, J., & Matías, L. (2023). Latitudinal variation in the functional response of *Quercus suber* seedlings to extreme drought. *Science of the Total Environment, 887*, 164122. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164122

Pérez-Ramos, I. M., Gómez-Aparicio, L., Villar, R., García, L. V., & Marañón, T. (**2010**). Seedling growth and morphology of three oak species along field conditions. *Journal of Vegetation Science, 21*(3), 419–437. https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2009.01165.x

Prats, K. A., Brodersen, C. R., & Ashton, M. S. (2019). Influence of dry season on *Quercus suber* L. leaf traits in the Iberian Peninsula. *American Journal of Botany, 106*(5), 656–666. https://doi.org/10.1002/ajb2.1280

Quézel, P., & Médail, F. (2003). *Écologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen*. Elsevier.

Ramírez-Valiente, J. A., Sánchez-Gómez, D., Valladares, F., & Aranda, I. (2010). Phenotypic plasticity and local adaptation in leaf ecophysiological traits of thirteen contrasting cork oak populations under different water availabilities. *Tree Physiology, 30*(5), 618–627. https://doi.org/10.1093/treephys/tpq013

Ramírez-Valiente, J. A., Valladares, F., Sánchez-Gómez, D., Delgado, A., & Aranda, I. (2014). Population variation and natural selection on leaf traits in cork oak throughout its distribution range. *Acta Oecologica, 58*, 49–56. https://doi.org/10.1016/j.actao.2014.04.004

Ramírez-Valiente, J. A., Aranda, I., & Sánchez-Gómez, D. (2015). Understanding the importance of intrapopulation functional variability and phenotypic plasticity in *Quercus suber*. *Tree Genetics & Genomes, 11*, 35. https://doi.org/10.1007/s11295-015-0856-z

Ramírez-Valiente, J. A., Aranda, I., Sánchez-Gómez, D., Rodríguez-Calcerrada, J., Valladares, F., & Robson, T. M. (2019). Increased root investment can explain the higher survival of seedlings of 'mesic' *Quercus suber* than 'xeric' *Quercus ilex* in sandy soils during a summer drought. *Tree Physiology, 39*(1), 64–75. https://doi.org/10.1093/treephys/tpy084

Reich, P. B. (2014). The world-wide 'fast–slow' plant economics spectrum: A traits manifesto. *Journal of Ecology, 102*(2), 275–301. https://doi.org/10.1111/1365-2745.12211

Rouibah, M., Fenineche, H., & Herikeche, M. (2018). Contribution à l'étude de quelques facteurs causant le dépérissement du chêne-liège (*Quercus suber* L.) dans le littoral ouest de Jijel (Algérie). *Agriculture and Forestry Journal, 2*(2), 92–100. https://doi.org/10.5281/zenodo.2536532

Rzigui, T., Jaspar, L., Ben Baaziz, K., Fkiri, S., & Nasr, Z. (2018). Drought tolerance in cork oak is associated with low leaf stomatal and hydraulic conductances. *iForest – Biogeosciences and Forestry, 11*, 728–733. https://doi.org/10.3832/ifor2749-011

Sampaio, T., Gonçalves, E., Faria, C., & Almeida, M. H. (2021). Genetic variation among and within *Quercus suber* L. populations in survival, growth, vigor and plant architecture traits. *Forest Ecology and Management, 483*, 118715. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118715

Seltzer, P. (1946). *Le climat de l'Algérie*. Institut de météorologie et de physique du globe de l'Algérie.

Shirish, P., Kelkar, S., & Bhalerao, S. (2013). Mulching: A soil and water conservation practice. *Research Journal of Agriculture and Forestry Sciences, 1*(3), 26–29.

Silva, J., Araújo, S. d. S., Sales, H., Pontes, R., & Nunes, J. (2023). *Quercus suber* L. genetic resources: Variability and strategies for its conservation. *Forests, 14*, 1925. https://doi.org/10.3390/f14091925

Tapia, P. I., Negoita, L., Gibbs, J. P., & Jaramillo, P. (2019). Effectiveness of water-saving technologies during early stages of restoration of endemic *Opuntia* cacti in the Galápagos Islands, Ecuador. *PeerJ*. https://doi.org/10.7717/peerj.8156

Valladares, F., Gianoli, E., & Gómez, J. M. (2007). Ecological limits to plant phenotypic plasticity. *New Phytologist, 176*(4), 749–763. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02275.x

Varela, M. C. (2015). Reproductive behaviour and clonal stump/root propagation and consequences for sustainable genetic variability in cork oak and holm oak in Portugal. In *Proceedings of the Second International Congress of Silviculture* (pp. 74–80). Accademia Italiana di Scienze Forestali. https://doi.org/10.4129/2cis-mv-rep

Varsamis, G., Adamidis, G. C., Merou, T., Takos, I., Tseniklidou, K., Dimitrakopoulos, P. G., & Papageorgiou, A. C. (2022). Changes in watering frequency stimulate differentiated adaptive responses among seedlings of different beech populations. *Biology, 11*, 306. https://doi.org/10.3390/biology11020306

Vizinho, A., Príncipe, A., Vasconcelos, A. C., Rebelo, R., Branquinho, C., & Penha-Lopes, G. (2023). Using and creating microclimates for cork oak adaptation to climate change. *Land, 12*, 531. https://doi.org/10.3390/land12030531

Wang, B., Niu, J., Berndtsson, R., Zhang, L., Chen, X., Li, X., & Zhu, Z. (2021). Organic mulch and soil conservation. *Scientific Reports, 11*, 6259. https://doi.org/10.1038/s41598-021-85343-x

Yissau, J. A., Abass, R. A., & Majomi, A. A. (2023). Early growth response of *Khaya senegalensis* seedlings to water requirement. *European Journal of Agriculture and Food Sciences, 5*(4). https://doi.org/10.24018/ejfood.2023.5.4.687

Zhang, P., Zhang, Z., Xiao, M., Chao, J., Dai, Y., Liu, G., & Senge, M. (2023). Effects of organic mulching on moisture and temperature of soil in greenhouse production of tomato under unheated greenhouse cultivation in the cold zone of China. *Food Science & Nutrition*, 1–14. https://doi.org/10.1002/fsn3.3460

Zine El Abidine, A., Bouderrah, M., Lamhamedi, M. S., Mounir, F., Has-Marleang, S. J. V., & Ponette, Q. (2020). Choix des essences de reboisement pour la forêt de la Maâmora (Maroc) sur la base de la tolérance des plantes juvéniles à la sécheresse. *Physio-Géo, 15*. https://doi.org/10.4000/physio-geo.11162