

## Article de recherche

Reçu: 19 novembre 2023 /Accepté: 29 avril 2024

# Optimisation du substrat de culture pour *Quercus suber* L. avec un plan de mélange et la fonction de désirabilité

K. Hamadache\*

Institut National de Recherche Forestière (INRF), BP 37, Chéraga, Alger, Algérie.

\* Auteur correspondant : [hamadacheinrf17@gmail.com](mailto:hamadacheinrf17@gmail.com)

## ملخص

هدف هذه الدراسة هو تحليل تأثير خلطات مختلفة من الأساسيات على نمو شتلات البلوط الفليني (*Quercus suber* L.). باستخدام تصميم خلط ووظيفة الرغبة، تم تقييم خلطات الأساسيات المكونة من الرمل (SB) وبقايا الزيتون (GO) ونفايات الفلين (DL). تشمل القياسات الارتفاع الساقى، وطول الجذور، وكتلة الجذور الجافة. كان تفاعل GO-DL حاسماً لارتفاع ساق الشتلات البلوط الفليني. كانت نسبة أعلى من GO مقارنة ب DL مرتبطة بتقليل نمو الساق. بالإضافة إلى ذلك، كانت تفاعلات SB-DL و GO-DL و SB-DL تؤثر بشكل كبير على نمو الجذور. كانت نسبة أعلى من DL تفضل نمو الجذور بشكل أفضل. من خلال تحسين تركيب الأساس، تم تحديد أربع حلول واعدة لتعزيز نمو شتلات البلوط الفليني. تمهيداً للممارسات تكاثر أكثر فعالية.

**كلمات مفتاحية:** البلوط الفليني، وظيفة الرغبة، تحسين، تصميم الخلط.

## Abstract

The aim of this study is to analyze the impact of different substrate mixtures on the growth of cork oak seedlings (*Quercus suber* L.). Using a mixture design and desirability function, substrates composed of sand (SB), olive pomace (GO), and cork waste (DL) were evaluated. Measurements included stem height, root length, and dry root biomass. The interaction between GO and DL was crucial for the stem height of cork oak seedlings. A higher proportion of GO compared to DL was associated with a reduction in aboveground growth. Furthermore, SB-DL and GO-DL interactions significantly influenced root growth. A higher proportion of DL favored better root growth. By optimizing substrate composition, four promising solutions were identified to enhance the growth of cork oak seedlings. This approach paves the way for more efficient propagation practices.

**Keywords:** desirability function, optimization, mixture design, *Quercus suber* L., growing substrate.

## Résumé

L'objectif de cette étude est d'analyser l'impact de différents mélanges de substrats sur la croissance des plants de chêne-liège (*Quercus suber* L.). En utilisant un plan de mélange et la fonction de désirabilité, les mélanges de substrats constitués de sable (SB), de grignons d'olive (GO) et de déchets de liège (DL) ont été évalués. Les mesures effectuées incluent la hauteur de la tige, la longueur des racines et la biomasse sèche des racines. L'interaction GO-DL a été déterminante pour la hauteur des tiges des plants de chêne-liège. Une proportion accrue de GO par rapport au DL a été associée à une réduction de la croissance de la partie aérienne des plants. De plus, les interactions SB-DL, ainsi que GO-DL, ont significativement influencé la croissance des racines. Une proportion plus élevée de DL a favorisé une meilleure croissance racinaire. En optimisant la composition du substrat, quatre solutions prometteuses sont calculées pour améliorer la croissance des plants de chêne-liège. Cette approche ouvre la voie à des pratiques de multiplication plus efficaces.

**Mots clés :** fonction de désirabilité, optimisation, plan de mélange, *Quercus suber* L., substrat de culture.

## 1. Introduction

Lorsqu'ils sont mis en terre, les plants forestiers subissent un stress hydrique initial dû au manque de contact direct des racines avec le sol environnant (Heiskanen, 1999). Les racines doivent se développer rapidement dans le sol adéquat pour permettre une absorption d'eau suffisante et un ancrage efficace. La croissance du système racinaire dépend à la fois des caractéristiques du sol et des caractéristiques physiologiques et morphologiques des plants (Grossnickle, 2005). Une forte biomasse racinaire, équilibrée avec une biomasse foliaire, favorise un taux de survie élevé (Lamhamedi et al. 1994). De nombreux facteurs tels que le conteneur de culture, le substrat, l'irrigation et la fertilisation influent également sur la croissance des plants (Lamhamedi et al. 2001 ; Lamhamedi et al. 2005).

Les composants du substrat de culture en pépinière ont un impact direct sur les propriétés physiques et chimiques, qui à leur tour affectent la disponibilité de l'eau, de l'oxygène et des éléments minéraux pour les plants (Allaire-Leung et al. 1999). Une carence de l'un de ces éléments peut limiter plusieurs processus tels que la respiration, la croissance, la nutrition minérale et la production de produits de la photosynthèse (Grossnickle, 2000). L'amélioration de la masse volumique des substrats de fibre de bois augmente leur teneur en eau disponible (Gruda et Schitzler, 2004).

Pour optimiser la composition du substrat de culture pour les jeunes plants du chêne liège (*Quercus suber*), une approche utilisant un plan de mélange et la fonction de désirabilité est appliquée. Ce plan d'expérience permet de créer un ensemble de mélanges de substrats qui couvrent une gamme variée de proportions des composants, offrant ainsi une vue d'ensemble des effets de chaque mélange sur la croissance des parties racinaires et aériennes des plants. La fonction de désirabilité permet de trouver la combinaison de substrats qui maximise les critères désirés et offre les meilleures conditions de croissance. Les résultats obtenus permettront d'optimiser la composition du substrat, ce qui contribuera à améliorer la croissance des plants et de maximiser la réussite de leur transplantation sur le terrain, favorisant ainsi leur adaptation, leur survie et leur croissance ultérieure.

## 2. Matériel et méthodes

### 2.1. Matériel végétal

Les graines du chêne-liège (*Quercus suber* L.) proviennent de la forêt de l'Akfadou. Elles ont été semées dans différents mélanges de substrats, conformément à un plan d'expérience pour les mélanges (section 2.2), à l'intérieur d'une serre en verre maintenue à une température de  $25 \pm 1^\circ\text{C}$ .

### 2.2. Matériaux utilisés pour le mélange des substrats

Le sable (SB) est un sable alluvionnaire, avec une granulométrie de  $\text{mm} < D \leq 4 \text{ mm}$  et une masse volumique apparente de  $1,41 \text{ kg/m}^3$ . Il contient 0,03% de  $\text{CaSO}_4$  et 3,04% de  $\text{CaCO}_3$ .

Les grignons d'olives (GO) sont des résidus solides issus de la première pression, composés de pulpes et de noyaux. Cet effluent semi-solide a une teneur en eau d'environ 65%, un pH légèrement acide, une teneur très élevée en matière organique et une grande proportion de graisses.

Les déchets de liège (DL) sont un substrat léger ( $200$  à  $400 \text{ kg/m}^3$ ) avec une porosité et une teneur en air à PF1 élevées (respectivement 80 à 90% et 27 à 61% du volume). Sa rétention et sa disponibilité en eau sont faibles (7 à 22% du volume pour la disponibilité). C'est un matériau plutôt acide (pH de 5,5 à 6,5) avec une capacité d'échange de cations relativement élevée (160 à 200 meq/L). Les teneurs en éléments minéraux solubles sont faibles pour l'azote ( $\text{NH}_4$  : 6,5 mg/L et  $\text{NO}_3$  : 63 mg/L) et le phosphore (12,8 mg/L), mais plus élevées pour le potassium (300 mg/L).

### 2.3. Plan d'expérience pour la confection des mélanges

Le domaine d'étude est un espace en trois dimensions. Quatre niveaux de variation des matériaux constituant le mélange ont été retenus (0,0%, 33,3%, 66,7% et 100,0%). Chaque expérience est répétée trois fois et concerne une combinaison de ces différents niveaux selon un plan de Blank

Spreadsheet à trois blocs pour contrôler l'hétérogénéité. Cette dernière est liée à la température dans la serre, qui augmente de la porte d'entrée vers le fond. Les trois blocs sont disposés perpendiculairement à la source d'hétérogénéité.

Le plan Blank Spreadsheet est constitué de 13 points (mélanges ou expériences). Les résultats obtenus grâce à l'application de ce plan seront utilisés pour ajuster des modèles de troisième ordre pour chaque réponse mesurée.

## 2.4. Réponses mesurées

Les paramètres mesurés comprennent la hauteur de la tige (en cm), la longueur des racines (en cm; moyenne de 3 racines les plus développées) et la biomasse des racines (en g de matière sèche : MS). Les longueurs sont déterminées à l'aide d'une règle graduée, tandis que la biomasse est obtenue en pesant la matière après son passage dans une étuve ventilée à 105°C pendant 24 heures.

## 2.5. Modélisation statistique

Contrairement aux plans d'expériences classiques, les plans de mélange se distinguent par le fait que les niveaux des facteurs sont interdépendants. En effet, lorsqu'on teste un mélange avec 50% de sable, par exemple, la somme des deux autres facteurs ne doit pas dépasser 50%. Le mélange est composé de  $q$  constituants, où  $x_i$  représente la proportion du  $i^{\text{ème}}$  composant. Les contraintes suivantes s'appliquent :

$$0 \leq x_i \leq 1, i = 1, 2, \dots, q \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^q x_i = 1 \quad (2)$$

Pour cette étude, le modèle de troisième ordre "spécial cubique" est retenu (équation 3).

$$Y = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i < j < k} \beta_{ijk} x_i x_j x_k \quad (3)$$

Où  $\beta_i$ ,  $\beta_{ij}$  et  $\beta_{ijk}$  représentent les coefficients de l'équation de régression calculés par la méthode des moindres carrés (Goupy et Creighton, 2006). Les variables  $x_i$ ,  $x_j$  et  $x_k$  représentent respectivement les proportions du  $i^{\text{ème}}$ ,  $j^{\text{ème}}$  et  $k^{\text{ème}}$  composant du mélange.

## 2.6. Analyses statistiques et diagnostics

Pour évaluer la pertinence du modèle dans la description précise du phénomène, il est nécessaire de calculer les statistiques d'ajustement, de réaliser un diagnostic et une analyse de variance (ANOVA) du modèle.

La statistique d'ajustement prise en compte comprend le coefficient de détermination  $R^2$  et le  $R^2_{adj}$ . La valeur de  $R^2$  augmente avec le nombre de variables, même si elles ne sont pas statistiquement significatives (Myers & Montgomery, 2009). Il est donc important de considérer  $R^2_{adj}$ , qui diminue lorsque le nombre de termes non significatifs dans le modèle augmente.

Le diagnostic de régression se fera de manière graphique en analysant les figures de la distribution normale des résidus (Normal Plot of Residuals) et de la variation des résidus en fonction des expériences réalisées (Residuals vs Run Plot). Ce diagnostic permettra de voir s'il y a lieu de faire une transformation des données, suppression des valeurs aberrantes ou la modification du modèle en supprimant les termes statistiquement non significatifs.

La signification statistique du modèle, des facteurs et de leurs interactions est déterminée par une analyse de variance (ANOVA) et le test de Fisher (valeur  $F$ ).

Si les statistiques d'ajustement, l'ANOVA et le diagnostic sont satisfaisants, le modèle obtenu peut être utilisé dans l'étude et l'optimisation.

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel Design Expert 13, version démo, pour générer les différents diagrammes et effectuer l'optimisation.

## 2.7. Optimisation multi-réponses par la fonction de désirabilité

La désirabilité est basée sur la transformation des différentes réponses obtenues,  $Y_i$ , en fonction de la désirabilité,  $d_i(Y_i)$ , pour les échelles respectives,

afin d'obtenir une valeur sans échelle variant de 0 à 1 (Harrington, 1965 ; Derringer et Suich, 1980). La valeur 0 est attribuée lorsque les facteurs produisent une réponse indésirable, tandis que la valeur 1 est associée à une performance optimale pour les facteurs étudiés. Deux types de transformations sont pris en compte en fonction des objectifs : une transformation unilatérale pour la maximisation ou la minimisation de  $Y_i$ , et une transformation bilatérale pour atteindre une valeur cible,  $t_i$ , pour  $Y_i$  (équation 4).

$$d_i(Y_i) = \begin{cases} 0, & Y_i < l_i \\ \left(\frac{Y_i - l_i}{t_i - l_i}\right)^s, & l_i \leq Y_i \leq t_i \\ \left(\frac{Y_i - u_i}{t_i - u_i}\right)^t, & t_i \leq Y_i \leq u_i \\ 0, & Y_i > u_i \end{cases} \quad (4)$$

Où  $l_i$  et  $u_i$  représentent respectivement les limites inférieure et supérieure de la réponse étudiée ( $l_i < t_i < u_i$ ). Les paramètres  $s$  et  $t$  sont des poids attribués par l'utilisateur en fonction du degré de désirabilité souhaité pour une réponse donnée entre  $l_i$  et  $u_i$ .

La fonction de désirabilité globale ( $D$ ) est calculée en prenant la moyenne géométrique des valeurs de désirabilité individuelle pour chaque réponse  $d_i(Y_i)$ , comme indiqué dans l'équation 5 :

$$D = \left( \prod_{i=1}^n d_i(Y_i) \right)^{\frac{1}{n}} \quad (5)$$

Dans le but d'améliorer la croissance, toutes les réponses sont maximisées.

### 3. Résultats et discussion

#### 3.1. Résultats de l'application du plan de mélange

Le Tableau 1 présente les données expérimentales pour les différentes combinaisons de facteurs dans une expérience. Les facteurs étudiés sont le bloc, le pourcentage dans le mélange de SB, GO et DL.

Le Tableau 1 permet de visualiser les variations des réponses en fonction des combinaisons de fac-

teurs. Il peut être utilisé pour identifier des tendances ou des relations entre les facteurs et les réponses mesurées. Cependant, une analyse statistique, est nécessaire pour évaluer la significativité des effets des facteurs. Plusieurs types de modèles seront ajustés pour chacune des réponses et les plus pertinents seront choisis.

#### 3.2. Choix des modèles

Le Tableau 2 compare différents modèles ajustés pour trois variables de croissance des plants de chêne-liège : la hauteur de la tige, la longueur des racines et la biomasse des racines. Les modèles examinés sont : linéaire, quadratique, spécial cubique et cubique. Après le choix des modèles les plus pertinents pour chaque réponse, une analyse de la variance sera réalisée afin de déterminer les facteurs ou les interactions ayant le plus d'influence sur les réponses étudiées.

Pour la hauteur de la tige, le modèle linéaire présente une probabilité significative de 0,012, indiquant qu'il est statistiquement significatif. Cependant, le modèle cubique présente également une probabilité significative de 0,031. En termes de  $R^2adj$ , le modèle cubique (4,77) est légèrement meilleur que le modèle quadratique (0,19).

Pour la longueur des racines, le modèle quadratique est significatif avec une probabilité de 0,004, tandis que le modèle linéaire montre une probabilité de 0,04. Cependant, le  $R^2adj$  est plus élevé pour le modèle quadratique (0,37).

En ce qui concerne la biomasse des racines, aucun des modèles n'est significatif, car toutes les probabilités sont supérieures à 0,05. De plus, les valeurs de  $R^2adj$  pour tous les modèles sont très faibles, indiquant que ces modèles n'expliquent pas pertinemment la variabilité de la biomasse des racines.

Le modèle cubique semble être le meilleur choix pour la hauteur de la tige et le modèle quadratique pour la longueur des racines. Pour la biomasse des racines, aucun des modèles ne semble être approprié pour expliquer sa variabilité. Cependant, puisque dans certains cas un modèle peut être non significatif dans sa globalité mais peut présenter des facteurs ou interactions significatives, c'est le modèle quadratique qui sera retenu pour la biomasse des racines, vu qu'il présente les meilleurs paramètres.

**Tableau 1.** Plan d'expérience pour la composition des substrats et leur impact sur la croissance des plants de chêne-liège élevés en pépinière.

| Bloc | Expérience | Matériaux (%) |       |       | Réponses                |                             |                               |
|------|------------|---------------|-------|-------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
|      |            | SB            | GO    | DL    | Hauteur<br>Tige<br>(cm) | Longueur<br>racines<br>(cm) | Biomasse<br>racines<br>(g MS) |
| 1    | 1          | 100,0         | 0,0   | 0,0   | 16,0                    | 18,5                        | 0,94                          |
| 1    | 2          | 66,7          | 33,3  | 0,0   | 16,0                    | 16,0                        | 1,22                          |
| 1    | 3          | 66,7          | 0,0   | 33,3  | 16,5                    | 22,0                        | 0,68                          |
| 1    | 4          | 33,3          | 66,7  | 0,0   | 17,5                    | 17,0                        | 1,08                          |
| 1    | 5          | 33,3          | 33,3  | 33,3  | 19,0                    | 25,0                        | 2,28                          |
| 1    | 6          | 33,3          | 0,0   | 66,7  | 17,5                    | 29,5                        | 1,26                          |
| 1    | 7          | 0,0           | 100,0 | 0,0   | 12,5                    | 18,5                        | 0,9                           |
| 1    | 8          | 0,0           | 66,7  | 33,3  | 13,5                    | 17,5                        | 1,36                          |
| 1    | 9          | 0,0           | 33,3  | 66,7  | 11,5                    | 16,5                        | 0,98                          |
| 1    | 10         | 0,0           | 0,0   | 100,0 | 15,5                    | 21,0                        | 0,88                          |
| 1    | 11         | 50,0          | 0,0   | 50,0  | 17,0                    | 22,0                        | 0,98                          |
| 1    | 12         | 0,0           | 50,0  | 50,0  | 15,0                    | 22,5                        | 1,72                          |
| 1    | 13         | 50,0          | 50,0  | 0,0   | 15,0                    | 19,5                        | 2,46                          |
| 2    | 14         | 100,0         | 0,0   | 0,0   | 20,0                    | 17,5                        | 1,5                           |
| 2    | 15         | 66,7          | 33,3  | 0,0   | 15,5                    | 15,5                        | 0,86                          |
| 2    | 16         | 66,7          | 0,0   | 33,3  | 20,5                    | 21,5                        | 1,52                          |
| 2    | 17         | 33,3          | 66,7  | 0,0   | 28,0                    | 18,5                        | 1,16                          |
| 2    | 18         | 33,3          | 33,3  | 33,3  | 18,5                    | 23,0                        | 1,56                          |
| 2    | 19         | 33,3          | 0,0   | 66,7  | 16,5                    | 20,0                        | 1,12                          |
| 2    | 20         | 0,0           | 100,0 | 0,0   | 9,0                     | 15,5                        | 0,68                          |
| 2    | 21         | 0,0           | 66,7  | 33,3  | 17,0                    | 25,0                        | 0,8                           |
| 2    | 22         | 0,0           | 33,3  | 66,7  | 22,0                    | 28,0                        | 1,9                           |
| 2    | 23         | 0,0           | 0,0   | 100,0 | 13,5                    | 19,0                        | 1,28                          |
| 2    | 24         | 50,0          | 0,0   | 50,0  | 17,0                    | 23,0                        | 2,22                          |
| 2    | 25         | 0,0           | 50,0  | 50,0  | 13,0                    | 21,0                        | 0,92                          |
| 2    | 26         | 50,0          | 50,0  | 0,0   | 16,0                    | 22,0                        | 1,5                           |
| 3    | 27         | 100,0         | 0,0   | 0,0   | 27,0                    | 15,0                        | 1,56                          |
| 3    | 28         | 66,7          | 33,3  | 0,0   | 15,0                    | 20,0                        | 0,84                          |
| 3    | 29         | 66,7          | 0,0   | 33,3  | 22,0                    | 26,0                        | 1,24                          |
| 3    | 30         | 33,3          | 66,7  | 0,0   | 17,0                    | 17,0                        | 0,4                           |
| 3    | 31         | 33,3          | 33,3  | 33,3  | 15,0                    | 26,0                        | 1,02                          |
| 3    | 32         | 33,3          | 0,0   | 66,7  | 17,0                    | 19,0                        | 1,3                           |
| 3    | 33         | 0,0           | 100,0 | 0,0   | 8,5                     | 17,5                        | 0,9                           |
| 3    | 34         | 0,0           | 66,7  | 33,3  | 20,0                    | 21,0                        | 1,28                          |
| 3    | 35         | 0,0           | 33,3  | 66,7  | 18,0                    | 25,0                        | 1,56                          |
| 3    | 36         | 0,0           | 0,0   | 100,0 | 14,0                    | 18,5                        | 1,0                           |
| 3    | 37         | 50,0          | 0,0   | 50,0  | 20,5                    | 22,0                        | 1,64                          |
| 3    | 38         | 0,0           | 50,0  | 50,0  | 16,0                    | 21,0                        | 2,02                          |
| 3    | 39         | 50,0          | 50,0  | 0,0   | 13,0                    | 20,5                        | 0,76                          |

SB : Sable, GO : Grignon d'olive, DL : Déchets de liège .

**Tableau 2.** Comparaison des modèles de régression pour les variables de croissance des plants de chêne-liège.

| Réponses             |             | Modèles  |             |                 |         |
|----------------------|-------------|----------|-------------|-----------------|---------|
|                      |             | Linéaire | Quadratique | Spécial Cubique | Cubique |
| Hauteur de la tige   | Probabilité | 0,0121*  | 0,3945      | 0,8659          | 0,0312* |
|                      | $R^2$       | 0,229    | 0,298       | 0,299           | 0,492   |
|                      | $R^2_{adj}$ | 0,1834   | 0,1853      | 0,159           | 0,3231  |
| Longueur des racines | Probabilité | 0,0424*  | 0,0037**    | 0,2515          | 0,9228  |
|                      | $R^2$       | 0,170    | 0,459       | 0,482           | 0,491   |
|                      | $R^2_{adj}$ | 0,1208   | 0,3713      | 0,3787          | 0,3216  |
| Biomasse des racines | Probabilité | 0,4762   | 0,1811      | 0,5107          | 0,9121  |
|                      | $R^2$       | 0,043    | 0,180       | 0,192           | 0,207   |
|                      | $R^2_{adj}$ | -0,0136  | 0,0478      | 0,0304          | -0,0568 |

\* statistiquement significatif.

### 3.3. Diagnostic graphique des modèles choisis

D'après la [Figure 1](#) (diagnostic graphique), la distribution des résidus suit une loi normale, et les graphiques des résidus studentisés par rapport aux expériences ne montrent pas de valeur aberrante dépassant les deux lignes rouges (seuil).

### 3.4. ANOVA des modèles ajustés et influence de la composition du substrat

L'interaction GO-DL influe significativement sur la hauteur des tiges des plants de chêne-liège ([Tableau 3](#)). L'augmentation de la proportion des GO par rapport au DL réduit la croissance de la partie aérienne chez les jeunes plants de chêne-liège ([Figure 2](#)). Divers facteurs peuvent influencer la hauteur de la tige, tels que la disponibilité des nutriments, l'approvisionnement en eau et l'aération du substrat ([White, 2019](#) ; [Johnson et al., 2020](#)). Dans notre cas, la teneur potentielle en éléments gras dans le GO pourrait influencer négativement la croissance des plants lorsque sa proportion dans le mélange augmente. De plus, la diminution du pH due à l'augmentation du GO pourrait être défavorable pour la croissance des tiges des plants de chêne-liège. De même, les caractéristiques de texture différentes entre le GO et les DL pourraient altérer la capacité du substrat à retenir l'eau et à fournir un support adéquat aux racines, contribuant ainsi à une réduction de la croissance des tiges. Ces hypothèses soulignent l'importance de

prendre en compte divers aspects, tels que la qualité nutritionnelle, la toxicité potentielle, le pH et la texture du substrat, dans la compréhension des mécanismes sous-jacents à l'effet observé. Des études supplémentaires seraient nécessaires pour confirmer et élucider le rôle précis de ces facteurs dans la croissance des plants de chêne-liège.

L'effet des interactions SB-DL et GO-DL est très hautement significatif sur la croissance des racines du chêne-liège. L'augmentation de la proportion du DL par rapport au SB ou au GO améliore la croissance des racines ([Figure 3](#)). Les plantes soumises à un apport supplémentaire de nutriments ont montré des racines plus longues par rapport aux plantes témoins ([Singh et al. 2019](#) ; [Wang et al. 2022](#)). Dans notre cas, il est probable que les déchets de liège (DL) favorisent la croissance en fournissant un apport supplémentaire en nutriments, notamment en potassium (K), qui est connu pour améliorer la vigueur des plantes. Le potassium joue un rôle crucial dans la régulation de diverses fonctions physiologiques, telles que la photosynthèse, la synthèse des protéines, et la résistance aux maladies ([Singh et al. 2019](#) ; [Wang et al. 2022](#)). Cependant, une autre hypothèse plausible est que le DL favorise la croissance des racines en améliorant la porosité du substrat. Le substrat devient potentiellement plus aéré et drainant, ce qui peut favoriser le développement racinaire en offrant un environnement plus favorable à la pénétration des racines et à la circulation de l'eau et des nutriments.

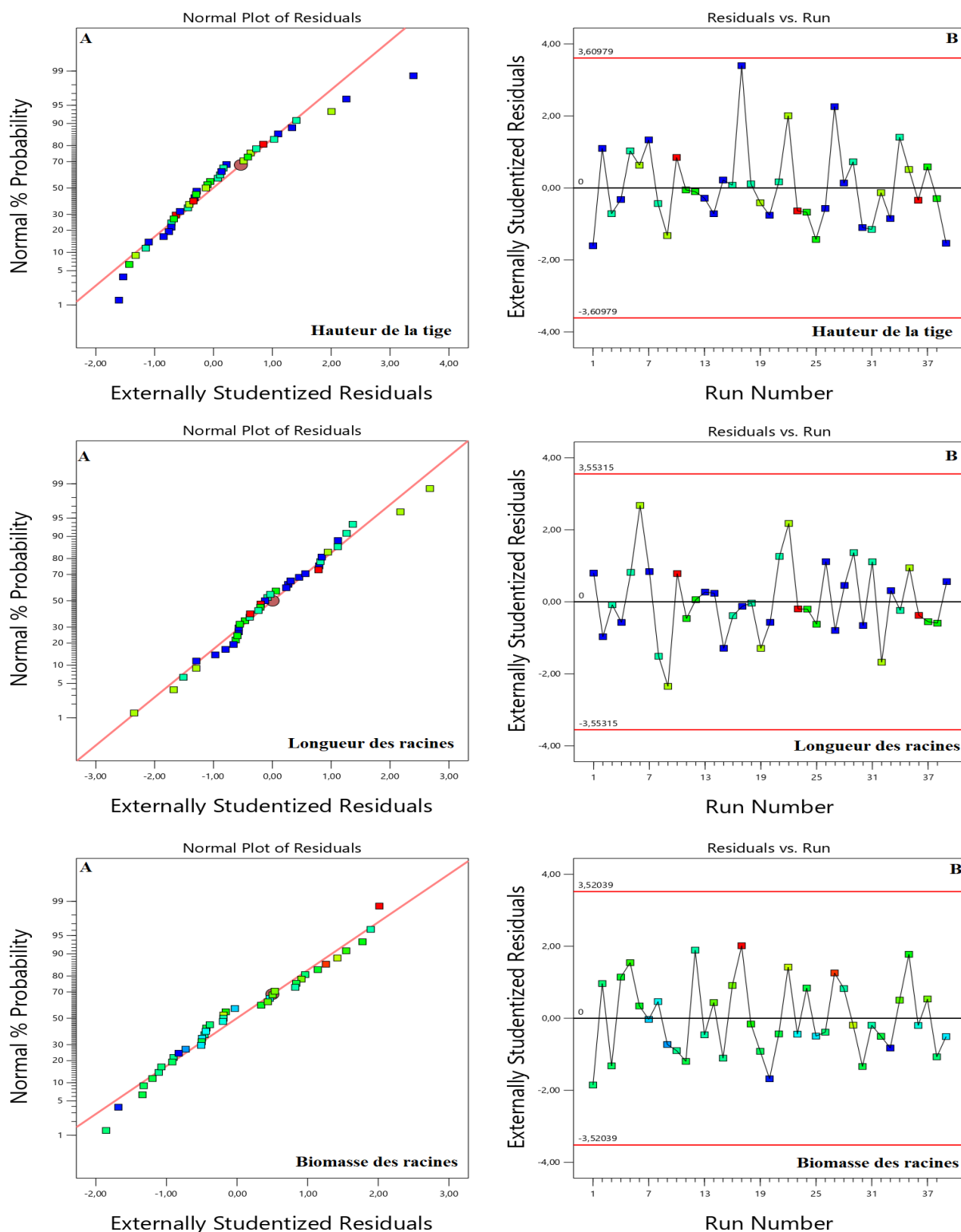
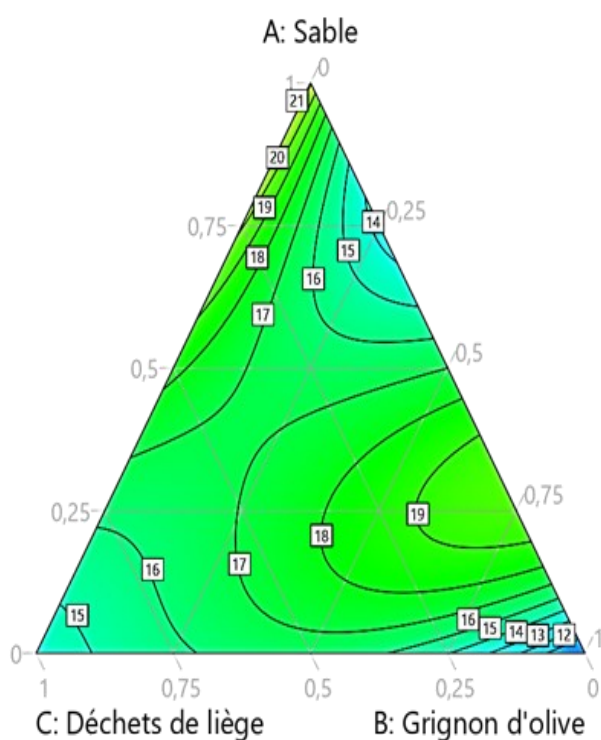
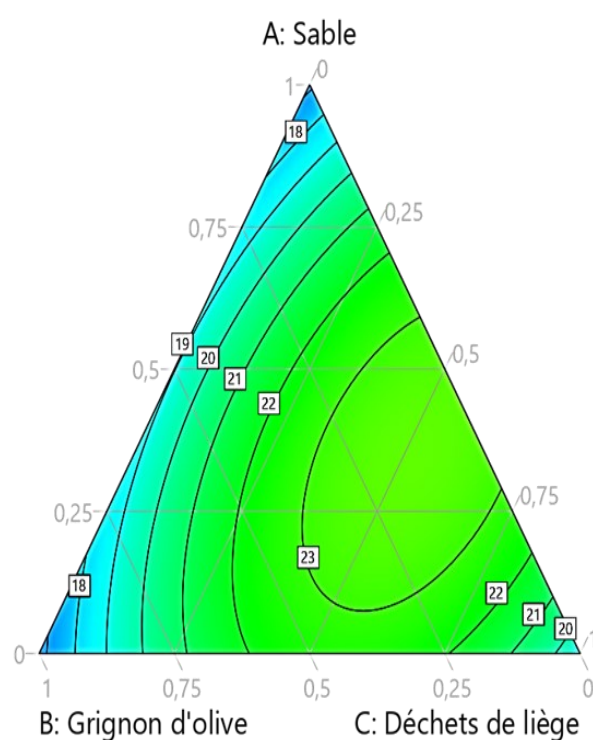


**Figure 1.** Diagnostic graphique de la régression : (A) distribution normale (B) résidus studentisés.

**Tableau 3.** ANOVA pour les réponses de croissance des plants de chêne-liège. (Seuls les facteurs significatifs sont présentés).

| Responses            | ANOVA      |                |    |             |         |          |
|----------------------|------------|----------------|----|-------------|---------|----------|
|                      | Source     | Sum of Squares | df | Mean Square | F-value | p-value  |
| Hauteur de la tige   | GO-DL      | 52,26          | 1  | 52,26       | 4,88    | 0,0358*  |
|                      | Residual   | 289,13         | 27 | 10,71       |         |          |
|                      | Cor. Total | 595,40         | 38 |             |         |          |
| Longueur des racines | SB-DL      | 100,16         | 1  | 100,16      | 12,08   | 0,0015** |
|                      | GO-DL      | 70,98          | 1  | 70,98       | 8,56    | 0,0064** |
|                      | Residual   | 257,11         | 31 | 8,29        |         |          |
|                      | Cor. Total | 475,59         | 38 |             |         |          |
| Biomasse des racines | GO -DL     | 1,10           | 1  | 1,10        | 5,01    | 0,0325*  |
|                      | Residual   | 6,80           | 31 | 0,2193      |         |          |
|                      | Cor. Total | 8,39           | 38 |             |         |          |

**Figure 2.** Diagramme ternaire de la variation de la hauteur de la tige (cm) en fonction des proportions du sable, grignons d'olive et des déchets de liège.**Figure 3.** Diagramme ternaire de la variation de la longueur des racines (cm) en fonction des proportions du sable, grignons d'olive et des déchets de liège.

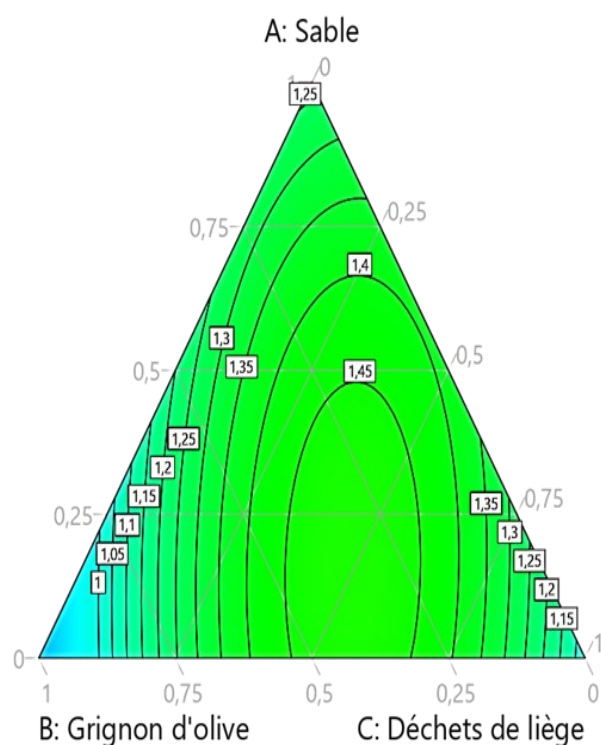


**Figure 4.** Diagramme ternaire de la variation de la biomasse des racines (g/MS) en fonction des proportions du sable, grignons d'olive et des déchets de liège.

L'effet de l'interaction GO-DL est significatif sur la biomasse des racines du chêne-liège ([Tableau 3](#)). La biomasse sèche des racines est améliorée lorsque le substrat présente des proportions d'environ 50%-50% de GO-DL ([Figure 4](#)). Une bonne fertilisation améliore la biomasse racinaire ([Wu et al., 2022](#)). Dans notre cas, les mêmes hypothèses concernant la croissance en longueur des racines peuvent être émises concernant la biomasse.

#### 4. Optimisation multi-réponses

Le [Tableau 4](#) présente quatre solutions optimales, chacune utilisant un mélange différent de SB, de GO et de DL.

#### 5. Conclusion

L'interaction entre les grignons d'olives (GO) et les déchets de liège (DL) s'est avérée déterminante pour la hauteur des tiges des plants de chêne-liège. Une proportion plus élevée de GO par rapport au DL a été associée à une réduction de la croissance de la partie aérienne des plants, soulignant ainsi l'importance de la composition du substrat sur le développement des plants. De plus, les interactions entre le sable (SB) et les déchets de liège (DL), ainsi qu'entre les GO et les DL, ont significativement influencé la croissance des racines. Une proportion plus élevée de DL par rapport au SB ou au GO a favorisé une meilleure croissance racinaire. Ces résultats mettent en évidence l'importance de considérer non seulement les composants individuels du substrat, mais aussi leurs interactions, dans la promotion d'une croissance optimale des plants de chêne-liège. Avec une solution contenant 47,1% de SB, 4,9% de GO, et 47,9% de DL, on observe une hauteur de tige de 17,58 cm, une longueur des racines de 23,47 cm, et une biomasse des racines de 1,41 g/MS. La désirabilité de cette solution est évaluée à 0,6, indiquant une performance globale satisfaisante.

En utilisant une approche basée sur un plan de mélange et la fonction de désirabilité, nous avons identifié quatre solutions prometteuses pour améliorer la croissance des jeunes plants de chêne-liège. Ces solutions offrent des perspectives précieuses pour optimiser la composition du substrat

**Tableau 4.** Optimisation de la composition du mélange des substrats.

| Solutions | %SB  | %GO  | %DL  | Hauteur de la tige (cm) | Longueur des racines (cm) | Biomasse des racines (g/MS) | Désirabilité |
|-----------|------|------|------|-------------------------|---------------------------|-----------------------------|--------------|
| 1         | 47,1 | 4,9  | 47,9 | 17,58                   | 23,47                     | 1,41                        | 0,57         |
| 2         | 51,3 | 0,00 | 48,7 | 18,41                   | 23,38                     | 1,38                        | 0,57         |
| 3         | 00,0 | 35,3 | 64,7 | 16,23                   | 22,52                     | 1,46                        | 0,51         |
| 4         | 70,3 | 29,7 | 0,00 | 13,87                   | 18,62                     | 1,27                        | 0,40         |

SB : Sable, GO : Grignon d'olive, DL : Déchets de liège.

et ainsi favoriser l'adaptation et la croissance ultérieure des plants lors de leur transplantation sur le terrain. Cette approche de modélisation ouvre la voie à des pratiques de multiplication végétative plus efficaces des espèces forestières.

## Références

- Allaire-Leung, S. E., Caron, J., & Parent, L. E. (1999). Changes in physical properties of peat substrates during plant growth. *Canadian Journal of Soil Science*, 79(1), 137-139.
- Derringer, G., & Suich, R. (1980). Simultaneous optimization of several response variables. *Quarterly Journal of Methods, Applications and Related Topics*, 12(4), 1980.
- Grunda, N., & Schnitzler, W. H. (2004). Suitability of wood fiber substrate for production of vegetable transplants: I. Physical properties of wood fiber substrates. *Scientia Horticulturae*, 100(1-4), 309-322.
- Goupy, J., & Creighton, L. (2006). *Introduction aux Plans d'expériences*. Dunod: Paris, France.
- Grossnickle, S. C. (2000). *Ecophysiology of Northern Spruce Species: The Performance of Planted Seedlings*. Monograph Publishing Program, National Research Council of Canada.
- Harrington, R. E., & Zimm, B. H. (1965). The Degradation of Polymers by Controlled Hydrodynamic Shear. *Journal of Physical Chemistry*, 69(1), 161-175.
- Heiskanen, J., & Rikala, R. (1998). Influence of different nursery container media on rooting of Scots pine and silver birch seedlings after transplanting. *New Forest*, 16, 24-42.
- Howard, R. J., Rafferty, P. S., & Johnson, D. J. (2020). Plant Community Establishment in a Coastal Marsh Restored Using Sediment Additions. *Springer*, 40, 877-892.
- Lamhamedi, M. S., Labbé, L., Margolis, H. A., Stowe, D. C., Blais, L., & Renaud, M. (2006). Spatial variability of substrate water content and growth of white spruce seedlings. *Soil Science Society of America Journal*, 70(1), 108-120.
- Lamhamedi, M. S., & Bernier, P. Y. (1994). Ecophysiology and field performance of black spruce (*Picea mariana*) seedlings. *Annals of Forest Science*, 51(6), 529-551.
- Lamhamedi, M. S., Renaud, M., Auger, I., & Fortin, J. A. (2021). Granular calcite stimulates natural mycorrhization and growth of white spruce seedlings in peat-based substrates in forest nursery. *Microorganisms*, 8(7), 1088.
- Myers, R. H., & Montgomery, D. C. (2009). *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. John Wiley & Sons, Inc.: New York, NY, USA.
- Nurhafizhoh, Z., Keni, M. F., Ibrahim, S. A. S., & Masri, M. M. (2022). Effect of integrated biofertilizers with chemical fertilizers on the oil palm growth and soil microbial diversity. *Elsevier, Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 39, January 2022, 102237.
- Singh, M., Singh, D., Gupta, A., Pandey, K. D., Singh, P. K., & Kumar, A. (2019). Plant growth promoting rhizobacteria: application in biofertilizers and biocontrol of phytopathogens. In *PGPR amelioration in sustainable agriculture* (pp. 41-66). Woodhead Publishing.
- Wu, P., Liu, F., Wang, J., Liu, Y., Gao, Y., Zhang, X., ... & Jia, Z. (2022). Suitable fertilization depth can improve the water productivity and maize yield by regulating development of the root system. *Agricultural Water Management*, 271, 107784.
- Wang, C., Yue, L., Cheng, B., Chen, F., Zhao, X., Wang, Z., & Xing, B. (2022). Mechanisms of growth-promotion and Se-enrichment in *Brassica chinensis* L. by selenium nanomaterials: beneficial rhizosphere microorganisms, nutrient availability, and photosynthesis. *Environmental Science: Nano*, 9(1), 302-312.
- White, P.J. (2019). Root traits benefitting crop production in environments with limited water and nutrient availability. *Annals of botany*, 124(6), 883-890.