

Article de recherche

Reçu: 22 Juin 2026 /Accepté: 23 Juillet 2026

Étude de l'interaction génotype-environnement sur les paramètres de vigueur de quelques provenances chez l'alfa en Algérie

S. Boudjada*, K. Boubetra., K. Maamar Kouadri., B. Makhoulouf

Institut National de la Recherche Forestière (INRF). Station expérimentale de la valorisation des ressources forestières. INRF Baraki

* Auteur correspondant : boudjada_samia@inrf.dz

ملخص

زرعت شتلات الحلفاء من سبعة مصادر في موقعين مختلفين شرق (موجبارة) وجنوب ولاية الجلفة (واد سدار). وتمت المراقبة لمدة ثلاث سنوات. وقيست سمات حيوية مثل طول أطول نصل ورق (Hglimb)، وقطر الكتلة (Diam)، وعدد الحزم (Nbrin). واستخدمت طريقة لا معلمية لتقييم تأثيرات التفاعلات بين النمط الوراثي والبيئة (المصدر والموقع). وأظهرت النتائج أن معاملات كندال (C_k) لم تكن ذات دلالة إحصائية لجميع السمات الثلاث، مما يُبرز أهمية تقييم معايير التفاعل. علاوة على ذلك، تتفاعل هذه السمات مع البيئة ($IR > 7\%$) في معظم المصادر، باستثناء مصدر منطقة أولاد جلال بالنسبة لقطر الكتلة (Diam) وطول أطول نصل ورق (Hglimb)، ومصدر منطقة سيدو بالنسبة لعدد الحزم (Nbrin) ($IR = 0\%$). لا يُفضل هذا التفاعل بين النمط الجيني والبيئة اختيار الأصل في أي من الموقعين.

كلمات مفتاحية: التفاعل بين النمط الوراثي والبيئة؛ الحلفاء؛ المصادر الوراثية؛ صفات الحيوية؛ انتخاب المصادر؛ التكيف البيئي.

Abstract

Alfa plants from seeds seedlings originating from 7 different provenances were transplanted into two distinct sites, located to the east (Moudjebara) and south (Oued Sdar) of Djelfa, respectively. Monitoring was conducted over a three-year period. Several traits were measured, including the length of the longest leaf blade (Hglimb), tuft diameter (Diam), and number of tillers (Nbrin). A non-parametric method was used to evaluate genotype x environment interactions (provenances x sites). The results showed that the Kendall coefficients (C_k) for all three traits were not statistically significant, hence the importance of evaluating the interactivity parameters. In addition, significant genotype x environment interactions ($IR > 7\%$) were detected for most provenances across the two sites, except for the Ouled Djellal provenance with respect to tuft diameter (Diam) and longest leaf blade length (Hglimb), and the Sebdo provenance for number of tillers (Nbrin) ($IR = 0\%$). These results suggest that the genotype x environment interaction limits the identification of consistently superior provenances across the two experimental sites.

Keywords: Genotype-environment interaction; alfa grass; Provenances; Vigor traits; Provenance selection; Environmental adaptation.

Résumé

Des plants d'Alfa issus à partir des semis de sept provenances ont été transplantés dans deux sites différents situés respectivement à l'Est (Moudjebara) et au Sud (Oued Sdar) de Djelfa. Le suivi a été réalisé pendant trois années. Des caractères de vigueur ont été mesurés tels que la longueur du plus grand limbe (Hglimb), le diamètre de la touffe (Diam) et le nombre des brins (Nbrin). Une méthode non paramétrique a été réalisée pour évaluer les effets d'interaction génotype-environnement (provenances-sites). Les résultats ont montré que pour les trois caractères les coefficients de Kendall (C_k) sont non significatifs d'où l'intérêt d'évaluer les paramètres d'interactivité. En outre, ces caractères interagissent avec l'environnement ($IR > 7\%$) pour la majorité des provenances à l'exception de la provenance Ouled Djellal pour les paramètres diamètre de la touffe (Diam) et la longueur du plus grand limbe (Hglimb) et la provenance Sebdo pour le nombre de brins (Nbrin) ($IR = 0\%$). Cette interaction génotype -environnement n'avantage pas la sélection des provenances dans les deux sites.

Mots clés : Interaction génotype-environnement ; alfa ; Provenances ; Caractères de vigueur ; Sélection des provenances ; Adaptation environnementale.

1. Introduction

Stipa tenacissima L. (alfa) est une poacée herbacée, pérenne et xérophytique, caractéristique des écosystèmes steppiques. Elle présente un port cespiteux et se développe sous forme de touffes généralement circulaires. Son diamètre dépend principalement de l'âge des individus ainsi que des conditions climatiques et édaphiques du milieu. Ce taxon constitue l'un des éléments les plus largement représentés de la flore méditerranéenne, se distinguant par une aire de distribution remarquable tant par la surface occupée que par l'abondance de ses populations (Abdelkrim, 1988). Effectivement, il est largement réparti dans divers habitats des pays du bassin méditerranéen occidentale notamment en Algérie, au Maroc, en Tunisie, en Libye, en Espagne, aux îles Baléares ; au Portugal et en Italie (Djebaili, 1988).

Espèce emblématique des steppes nord africaines, en Algérie, l'alfa est structuré en vaste écosystème steppique où il caractérise hautement les paysages des Hautes Plaines intercalées entre les deux Atlas Tellien et Saharien (Gounot, 1969 ; Lehouérou, 1969 ; Celles, 1975 ; Djebaili, 1978-1988). Ces derniers couvrent en générale une superficie de 20 millions d'hectares, limitées au nord par l'isoyete 400 mm et au sud par l'isoyete 100 mm qui marque la limite méridionale de l'extension de l'alfa (Djebaili, 1978-1984 ; Pouget, 1980). La large répartition de l'alfa dans les milieux variés et sous les conditions écologiques contrastées témoigne de sa grande plasticité écologique. Espèce rustique et bien adaptée aux conditions d'aridité et de sécheresse tout en présentant une bonne résistance au froid.

L'alfa a longtemps joué un rôle majeur sur les plans écologique, économique, culture, industriel et social. Ainsi les fibres d'alfa ont été utilisées dans l'artisanat local (sperterie) et dans l'industrie papetière. Le papier obtenu à partir de l'alfa était largement reconnu et valorisé pour ses qualités. Ce produit bénéficiaient d'une forte demande sur les marchés nationaux et internationaux. En outre, cette espèce présente un bon fourrage en période de disette. Cette essence a été donc soumise depuis des décennies à de fortes pressions qui affectent son développement et sa génération. L'habitat de

cette espèce a subi une importante dégradation qui s'est régressé en un siècle, de 4 millions à 2 millions hectares (Trabut, 1889 ; CNTS, 1990). De plus l'insuffisance des mesures d'aménagement et de gestion des espaces steppiques compromet gravement la pérennité des ses populations naturelles et de leur cortège floristique. Ceci engendre donc des phénomènes de désertification et en particulier le changement climatique accéléré et ardu.

Compte tenu de son extension spatiale et de ses multiples intérêts écologiques et socio-économiques, l'alfa a fait l'objet de nombreux recherches depuis la fin du XIX^e siècle. Ces travaux ont concerné divers aspects phytoécologiques (Trabut, 1889 ; Lehouérou, 1969 ; Djebaili, 1978 ; Achour, 1983 ; Aidoud, 1983 ; Slimani, 2012), phytogéographique et phytosociologique (Celles, 1975 ; Djebaili, 1984 ; Abdelkrim, 1984 ; Lehouérou, 1995), fonctionnels (Lehouérou, 1975 ; Harche, 1978 ; Nedjaoui, 1980-1990 ; Aidoud 1983) et cytosystématiques (Labadie, 1979 ; Bensettiti, 1985 ; Tazairt, 1992).

Par ailleurs, la dégradation rapide des nappes alfatières a très tôt suscité des préoccupations quant à leur régénération et à leur conservation. Des essais de culture d'alfa ont pour cela été initiés (Bourahla et Guittoneau, 1978 ; Malos et Meziani, 1978 ; Boudjada et Bendjaffer, 1994).

Bien que ces travaux présentent un intérêt scientifique certain, ils demeurent néanmoins insuffisants et méritent d'être approfondies par des études portant sur l'amélioration et sélection des populations et sur la diversité génétique pour élaborer avec assurance des programmes de régénération des écosystème de l'alfa, leur conservation et leur gestion (naturelle ou artificielle) véritablement efficaces. Ces derniers travaux sont peu nombreux et ont débuté les années 2000 pour l'alfa d'Algérie (Boudjada, 2003 ; Boudjada et al. 2009, Boussaid et al. 2010 ; Chaouch et al. 2022).

Par ailleurs, les connaissances relatives à la variabilité biogéographique de l'alfa restent limitées, alors que la valence écologique de cette espèce à travers l'ensemble de son aire de répartition laisse supposer l'existence de populations différenciées, présentant des caractéristiques adaptatives et mor-

phologiques distinctes (Boudjada et al. 2009).

A cet effet, et à l'égard de l'importance socio-économique et écologique de l'alfa, l'Institut National de Recherche Forestière (INRF) a mis en place un programme de recherche sur la régénération et mécanisation de l'alfa ainsi que l'amélioration en matière de survie et de croissance entre les différentes provenances d'alfa en Algérie.

Ce présent travail est essentiellement basé sur la pratique des tests de provenances, qui représentent un moyen d'explorer leur comportement avec le milieu et au sein d'une espèce. Auparavant, ces tests de provenances sont d'un avènement déjà ancien ; les premiers auraient été mis en œuvre en France par de Vilmorin dès 1820, mais c'est en Suède qu'ils prirent toute leur ampleur et gagnèrent en rigueur expérimentale (Wright, 1976). Dans notre étude, ces activités débutent par une récolte de graines à partir de populations, naturelles ou artificielles, réparties, dans la mesure du possible, sur toute l'aire naturelle de l'espèce. Les plants issus de la germination de ces graines sont installés dans un ou plusieurs sites expérimentaux. La disponibilité de deux sites ou plus a permis d'analyser les effets d'interaction génotype x environnement à l'aide d'une approche non paramétrique.

Cette méthode rend possible l'évaluation de la stabilité des provenances ainsi que leur niveau d'interaction avec les conditions environnementales des deux sites. Les résultats obtenus contribuent à l'identification des provenances les plus stables et les mieux adaptés, constituant ainsi une base scientifique pour leur sélection et leur utilisation dans les programmes de restauration et de lutte contre la désertification.

2. Matériel et Méthodes

2.1. Échantillonnage

La récolte des caryopses d'alfa a été effectuée en fin juin et a concerné 07 provenances Ain Oussera (Djelfa), El Aricha (Tlemcen), El biod (Naama), Mécheria (Saida) , Oued Sdar (Djelfa), Ouled Djellal (Biskra) et Sebdou (Tlemcen), réparties sur l'ensemble de l'aire de l'espèce en Algérie (Tableau 1)

2.2. Protocole de récolte

Les panicules de chaque provenance ont fait l'objet d'un prélèvement aléatoire effectué sur une aire de 1 à 2 hectares. La récolte a porté sur 30 touffes, distantes d'au moins 30 m les unes des autres afin de réduire la probabilité d'échantillonnage des individus génétiquement apparentés.

2.3. Semis et dispositifs de pépinière

Les semis, rassemblés par provenance et ont été placés selon un dispositif en randomisation totale. Ces derniers ont été réalisés dans l'enceinte de la station de recherches forestières de Djelfa (environ 1000 m d'altitude), localisée à Moudjebara. Elle se situe dans l'étage bioclimatique semi-aride à variante froide.

2.4. Plantation en champs

Les plants produits en pépinière, ont été transférés puis mis en terre sur deux sites expérimentaux de la région de Djelfa, localisés à Oued Sdar (20 km au

Tableau 1. Caractéristiques géographiques des provenances récoltées

Provenances	Wilaya	Latitude nord	Longitude	Altitude (m)	Bioclimat
Ain Oussera	Djelfa	35°34'N	2°55' E	688	Arde frais
El Aricha	Tlemcen	34°12'N	1°16' W	1250	Arde froid
El Biod	Naama	33°53'N	0°08' W	1040	Arde froid
Mécheria	Saida	33°33'N	0°16' W	1127	Arde frais
Oued Sdar	Djelfa	34°40'N	3°17' E	1139	Semi-aride froid
Ouled Djellal	Biskra	34°06'N	5°05' E	210	Arde chaud
Sebdou	Tlemcen	34°38'N	1°20' W	925	Semi-aride froid

sud de Djelfa) et à Moudjebara (15 km à l'est de Djelfa).

Ces deux sites sont caractérisés par un bioclimat semi-aride froid et un sol peu érodé, pauvre et tributaire de la couverture alfatière (Boudjada, 2003). Il s'agit d'un sol brun calcaire à croûte selon la classification française (Kadi Hanifi, 1998).

La parcelle expérimentale d'Oued Sdar a été installée sur des glaciés à alfa et armoise blanche ; par contre, celle de Moudjebara est introduite dans une zone de reboisement de pin d'Alep.

2.4.1. Dispositif expérimental

Les deux sites expérimentaux ont été conduits selon un dispositif de protocole identique. Cette homogénéité méthodologique permet de réaliser des comparaisons inter-sites pertinentes, notamment pour l'étude des interactions génotype $\times$ environnement. Ce dispositif de plantation pour les deux sites utilisés est de type en blocs incomplets complètement aléatoires.

2.4.2. Observations et mesures

Au cours de la période de suivi, des observations et des mesures ont été réalisées sur les plants d'alfa afin d'évaluer leurs caractères de vigueur, notamment la hauteur du plus grand limbe (Hglimb), le diamètre à la base de la touffe (Diam) et le nombre de brins (Nbrin).

2.5. Analyse statistique

Vu le nombre de sites limité (deux sites) et que les données ne satisfont pas les conditions des tests paramétriques, notamment la normalité de la distribution et/ou l'homogénéité des variances, l'analyse de l'interaction génotype $\times$ environnement abordée est donc la méthode non paramétrique. Cette dernière permet d'évaluer si le classement des moyennes des caractères observés des provenances change d'un site à l'autre, ce qui est un indicateur de l'interaction génotype $\times$ environnement.

Cette analyse est basée sur l'indice de Kendall (1955), qui permet de mesurer l'association de rangs entre deux environnements, ordonnés par niveau de performance décroissant. Il constitue une première étape dans l'analyse de l'interaction génotype $\times$ environnement ; il vise à évaluer le de-

gré de concordance du classement des génotypes entre les différents environnements : un coefficient de Kendall significatif traduit une bonne concordance des classements, indiquant une interaction génotype $\times$ site faible ou non significative. En revanche, un coefficient (C_k) non significatif indique des changements de classement des génotypes d'un site à l'autre, ce qui témoigne de l'existence d'une interaction. Le coefficient fournit une appréciation globale de cette interaction. C'est pour cette raison qu'il est complété par le calcul de l'indice d'interactivité (IR), qui quantifie, pour chaque génotype, sa contribution relative à l'interaction génotype $\times$ environnement. Un IR élevé indique une forte sensibilité aux variations du milieu, tandis qu'un IR faible ou nul indique un comportement plus stable face aux changements du milieu. Donc, à partir du coefficient de concordance de Kendall, l'auteur a développé de nouveaux concepts, tant au niveau individuel qu'au niveau global, afin de dériver des paramètres dédiés à l'analyse de l'interaction génotype $\times$ environnement, dont la significativité statistique peut être estimée (Harfouche, 2000). L'équation du coefficient de Kendall est la suivante :

$$C_k = 1 - \frac{D(x, y)}{n(n-1)/2} \quad (1)$$

Où D : le nombre de discordances total entre les deux classements, x : le site 1, y : le site 2 et n : le nombre de provenances, c'est-à-dire de rangs.

Ce coefficient peut varier de -1 à +1 ; on teste sa significativité en le comparant aux valeurs théoriques données par une table spéciale (Kendall, 1955). Si la signification existe au seuil de 5 %, les autres paramètres de calcul de l'interaction génotype $\times$ site se dérivent comme suit :

La discordance globale ou brute $d_i(x, y)$ d'un génotype i donné se décompose en discordance nette $D_i(x, y)$, générant des changements de classement, et en discordance cachée $\partial_i(x, y)$, qui, elle, ne suit pas les changements de classement (Harfouche, 2000).

$$d_i(x, y) = D_i(x, y) + \partial_i(x, y) \quad (2)$$

La discordance globale ou brute s'exprime également comme :

$$d_i(x, y) = d_i^-(x, y) + d_i^+(x, y) \quad (3)$$

$d_i^-(x, y)$ est la discordance à gauche du génotype

i par rapport à son classement dans les deux sites x et y , et $d_i^+(x, y)$, sa discordance à droite.

En égalisant les deux équations ci-dessus, on obtient :

$$d_i^-(x, y) + d_i^+(x, y) = D_i(x, y) + \partial_i(x, y) \quad (4)$$

D'où :

$$D_i(x, y) = d_i^-(x, y) + d_i^+(x, y) - \partial_i(x, y) \quad (5)$$

La discordance nette observée par un génotype i quelconque représente ainsi la fraction de la discordance globale attribuable à ce génotype, traduisant son implication dans l'interaction $G \times E$ vraie (changement de classement) (Harfouche, 2000).

Relativement, cette discordance nette d'un génotype i peut être considérée comme un indice de mesure de son interactivité vis-à-vis des variations environnementales ; cet indice d'interactivité relative (IR) est exprimé comme suit :

$$IR = \frac{D_i(x, y)}{\sum_{i=1}^n D_i(x, y)} \times 100 \quad (6)$$

Où $0 \leq IR \leq 100$. En biologie, l'indice IR permet de renseigner sur la stabilité des génotypes d'un site à l'autre ; plus il est élevé, plus le génotype est instable (Harfouche, 2000).

Tableau 2. Taux des coefficients de concordance de Kendall pour les trois caractères de vigueur étudiés (Hglimb, Diam, Nbrin).

Caractères	Ck de Kendall	Règle de décision
Hglimb	0,05 NS	Interaction P X S significative
Diam	0,24 NS	Interaction P X S significative
Nbrin	0,14 NS	Interaction P X S significative

3. Résultats et discussion

3.1. Coefficient de concordance de Kendall

Les valeurs du coefficient de concordance de Kendall (C_k) sont consignées dans le Tableau 2.

Le coefficient de concordance de Kendall (C_k) constitue une première approche dans l'analyse de l'interaction provenances x sites ; il permet d'évaluer pour les caractères (Hglimb, Diam et Nbrin) mesurés sur les différentes provenances dans les deux sites d'étude, si le classement des provenances demeure cohérent entre les environnements ou, au contraire, s'il révèle l'existence d'une

Tableau 3. Analyse de l'interaction provenances - sites. Paramètres d'interactivité pour la hauteur du plus grand limbe (Hglimb)

Paramètres d'interactivité	Ain Oussera	El Aricha	El Biod	Mécheria	Oued Sdar	Ouled Djellal	Sebdou	Total
Ri(1)	5	2	4	6	3	7	1	N/A
Ri(2)	4	5	1	3	6	7	2	N/A
ci(1,2)	1	2	3	1	1	0	5	13
di+(1,2)	1	3	0	0	3	0	1	8
di-(1,2)	2	0	3	3	0	0	0	8
di(1,2)	3	3	3	3	1	0	1	14
Di(1,2)	1	3	3	3	1	0	1	12
di(1,2)	2	0	0	0	0	0	0	2
IR (%)	08,33	25,00	25,00	25,00	08,33	0	08,33	100

Ri(1 & 2) : Rang de la provenance i dans les sites 1 et 2 ; **ci(1,2)** : concordance individuelle ; **di+(1,2)** : discordance individuelle à droite ; **di-(1,2)** : discordance individuelle à gauche ; **di(1,2)** : discordance individuelle brute [(di+(1,2) + (di-(1,2)) ; **Di(1,2)** : discordance individuelle nette [di+(1,2) - di-(1,2)] ; **di(1,2)** : discordance individuelle cryptique [(di(1,2) - Di(1,2)] ; **IR (%)** : interactivité individuelle relative. **N/A** : non applicable pour les rangs $R_i(1)$ et $R_i(2)$, ces valeurs sont des rangs des provenances basés sur les moyennes des caractères étudiés.

Tableau 4. Analyse de l'interaction provenances- sites. Paramètres d'interactivité pour le diamètre de la touffe (Diam)

Paramètres d'interactivité	Ain Ous-sera	El Aricha	El Biod	Mécheria	Oued Sdar	Ouled Djellal	Sebdou	Total
Ri(1)	4	1	6	5	2	7	3	N/A
Ri(2)	2	6	4	3	5	7	1	N/A
ci(1,2)	3	2	1	2	1	0	4	13
di ⁺ (1,2)	0	5	0	0	4	0	0	09
di ⁻ (1,2)	2	0	2	2	1	0	2	09
δi(1,2)	2	5	2	2	5	0	2	18
Di(1,2)	2	5	2	2	3	0	2	16
δi(1,2)	0	0	0	0	2	0	0	2
IR (%)	12,5	31,20	12,50	12,50	18,75	0	12,50	100

Ri(1 & 2) : Rang de la provenance i dans les sites 1et2 ; **ci(1,2)** : concordance individuelle ; **di⁺(1,2)** : discordance individuelle à droite ; **di⁻(1,2)** : discordance individuelle à gauche ; **δi(1,2)** : discordance individuelle brute $[(di^+(1,2) + (di^-(1,2))]$; **Di(1,2)** : discordance individuelle nette $[di^+(1,2) - di^-(1,2)]$; **δi(1,2)** : discordance individuelle cryptique $[(di(1,2) - Di(1,2))]$; **IR (%)** : interactivité individuelle relative. **N/A** : non applicable pour les rangs $R_i(1)$ et $R_i(2)$, ces valeurs sont des rangs des provenances basés sur les moyennes des caractères étudiés.

interaction provenance x site significative. Lorsque ce coefficient est significatif, les classements des provenances obtenus dans les différents sites présentent une forte concordance. Cette stabilité du classement traduit l'absence d'une interaction provenance x site significative. En revanche, un coefficient de kendall non significatif traduit une modification du classement des provenances d'un site à l'autre, révélant ainsi une interaction provenance x site significative.

Les coefficients de Kendall pour les trois caractères

sont non significatifs d'où la justification d'évaluer les paramètres d'interactivité qui sont mentionnés dans les tableaux 3 (Hglimb), 4 (Diam) et 5 (Nbrin) qui permettent de voir lesquelles des provenances contribuent le plus à l'interaction ou non.

3.2. Indice d'interactivité des provenances

L'interactivité des provenances pour les caractères présentés dans les tableaux 3, 4 et 5 est évaluée à

Tableau 5. Analyse de l'interaction provenances- sites. Paramètres d'interactivité pour le nombre des brins constituant la touffe (Nbrin).

Paramètres d'interactivité	Ain Ous-sera	El Aricha	El Biod	Mécheria	Oued Sdar	Ouled Djellal	Sebdou	Total
Ri(1)	4	2	7	5	1	6	3	N/A
Ri(2)	1	5	6	2	4	7	3	N/A
ci(1,2)	3	2	0	2	3	0	2	12
di ⁺ (1,2)	0	3	0	0	3	1	2	09
di ⁻ (1,2)	3	0	1	3	0	0	2	09
δi(1,2)	3	3	1	3	3	1	4	18
Di(1,2)	3	3	1	3	3	1	0	14
δi(1,2)	0	0	0	0	0	0	4	4
IR (%)	21,43	21,43	7,14	21,43	21,43	7,14	0	100

Ri(1 & 2) : Rang de la provenance i dans les sites 1et2 ; **ci(1,2)** : concordance individuelle ; **di⁺(1,2)** : discordance individuelle à droite ; **di⁻(1,2)** : discordance individuelle à gauche ; **δi(1,2)** : discordance individuelle brute $[(di^+(1,2) + (di^-(1,2))]$; **Di(1,2)** : discordance individuelle nette $[di^+(1,2) - di^-(1,2)]$; **δi(1,2)** : discordance individuelle cryptique $[(di(1,2) - Di(1,2))]$; **IR (%)** : interactivité individuelle relative. **N/A** : non applicable pour les rangs $R_i(1)$ et $R_i(2)$, ces valeurs sont des rangs des provenances basés sur les moyennes des caractères étudiés.

l'aide de leur indice d'interactivité individuel (IR) exprimé en pourcentage de l'interaction totale.

3.3. Interactivité des provenances pour la croissance en hauteur

Pour la croissance en hauteur (Hglimb), les provenances Mécheria, El Aricha et El Biod sont les plus interactives avec un indice individuel IR = 25 %/. Cependant pour ce caractère, la provenance Ouled Djellal (Biskra) est la plus stable (IR = 0%), tandis que les provenances Sebdou et Ain Oussera sont les moins interactives (IR = 8,33%) (Tableau 3).

3.4. Interactivité des provenances pour l'accroissement du diamètre

Concernant l'accroissement du diamètre (Diam) des touffes d'alfa, la provenance El Aricha semble être la plus interactive avec un IR = 31.20 %, elle est suivie par la provenance Oued Sdar (IR = 18.75%) et puis les provenances Sebdou, Ain Oussera, Mécheria et El Biod avec un IR = 12.50 % pour chacune. La provenance Ouled Djellal est la plus stable pour ce caractère (IR = 0%) (Tableau 4).

3.5. Interactivité des provenances pour le nombre des brins

Pour le nombre des brins (Nbrin), les provenances les plus interactives sont celles d'Oued Sdar, El Aricha, Ain Oussera et Mécheria où elles enregistrent un IR = 21.43 %. Les moins interactives sont les provenances Ouled Djellal et El Biod avec un IR = 7,14%, par contre la provenance Sebdou est la plus stable (IR=0%) (Tableau 5).

3.6. Interprétation de la variabilité et de la plasticité des provenances

Les résultats obtenus laissent penser que les provenances les plus interactives pourraient être caractérisées par une variabilité génétique relativement réduite pour le caractère étudié. Une telle situation serait susceptible de restreindre leur plasticité phénotypique et, par conséquent, leur aptitude à répondre aux changements du milieu. Toutefois, une forte interaction provenance × site ne permet pas, à elle seule, de conclure à une faible

variabilité génétique. Elle peut également traduire une expression différente du potentiel génétique selon les conditions environnementales.

En général, des études chez certaines espèces cultivées et forestières ont montré que le degré de stabilité des entités génétiques dépendait de leur constitution génétique (lignée pure, provenance, hybride de provenance, clone, etc.) ainsi que de l'importance des différences entre les environnements expérimentaux (Magnussen et Yeatman, 1988 ; Harfouche et Kremer, 2000 ; Harfouche et al., 2000). La plasticité phénotypique correspond à la capacité d'un même génotype ou d'une même population à modifier l'expression de ses caractères en fonction du milieu. Chez le pin maritime, Corcuera et al. (2010) ont montré que les populations et les familles pouvaient présenter une plasticité phénotypique élevée, notamment lorsque les conditions hydriques différaient entre les sites. Ainsi, la stabilité observée chez une provenance ne doit pas nécessairement être interprétée comme le signe d'une faible diversité génétique ; elle peut également résulter d'une réponse relativement homogène aux variations environnementales.

3.7. Implications pour la sélection des provenances

Pour la sélection des provenances, ces analyses témoignent des changements significatifs dans les classements pour la plupart des provenances d'un site d'expérimentation à l'autre, à l'exception de la provenance Ouled Djellal pour les caractères de croissance, la longueur du plus grand limbe (Hglimb) et le diamètre de la touffe (Diam), ainsi que de la provenance Sebdou pour le caractère nombre de brins (Nbrin).

Dans cette partie d'étude, l'importance des effets d'interaction provenance × site ne plaide pas en faveur d'une sélection globale des provenances sur l'ensemble des deux sites expérimentaux. Toutefois, la provenance Ouled Djellal (Biskra) se distingue par une stabilité remarquable (IR = 0 %), tant pour la croissance en hauteur que pour la croissance latérale, traduisant ainsi une réponse homogène aux variations des conditions du milieu. Cette provenance est originaire d'un milieu aride, ce qui confère un intérêt particulier à sa sélection. Sa stabilité de croissance et sa capacité d'adaptation aux conditions environnementales contrai-

gnantes en font un matériel végétal prometteur pour les programmes de lutte contre la désertification et de réhabilitation des écosystèmes stepmiques dégradés. Néanmoins, la sélection d'une provenance destinée à un milieu donné doit tenir compte à la fois de sa performance moyenne, de sa stabilité et de la concordance entre les conditions du site d'origine et celles du site de plantation. Les essais de provenances montrent en effet que les différences de croissance et de tolérance à la sécheresse peuvent varier selon l'environnement, ce qui justifie une sélection adaptée au site plutôt qu'une recommandation uniforme pour l'ensemble des milieux (O'Brien et al., 2007 ; Eilmann et al., 2013 ; Harfouche et al., 2014).

4. Conclusion

Il est justifié d'utiliser une analyse non paramétrique pour des expériences comportant seulement deux sites expérimentaux de plantation de plusieurs provenances chez l'alfa.

Cette approche permet de mieux comprendre la signification de l'interaction génotype-environnement (GE) (Provenances-sites) en relation avec des concepts de concordance-discordance entre deux distributions de rangs. Grâce à cette démarche, ce type de concept génotype-environnement est considéré comme une probabilité de similarité ou de différence entre deux sites en ce qui concerne l'expression phénotypique liée aux génotypes.

Références

- Abdelkrim, H. (1984). *Approche phytoécologique et phytosociologique de quelques nappes alfatières de la région de Djelfa et Tébessa* [Mémoire de magister, Institut National Agronomique El-Harrach].
- Abdelkrim, H. (1988). Les formations steppiques à alfa (*Stipa tenacissima* L.): Autoécologie, syntaxonomie et importance pastorale. *Colloques Phytosociologiques*, 16, 445-456.
- Achour, H. (1983). *Étude phytoécologique des formations à alfa (Stipa tenacissima L.) du sud Oranais, Wilaya de Saïda* [Thèse de 3e cycle, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene].
- Aidoud, A. (1983). *Contribution à l'étude des écosystèmes steppiques du sud Oranais: Phytomasse, productivité primaire et application pastorale* [Thèse de 3e cycle, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene].
- Bensettiti, F. (1985). Étude caryosystématique de *Stipa tenacissima* L. dans les régions de Djelfa, Boussaâda et Batna. *Annales de l'Institut National Agronomique El-Harrach*, 10(2), 20-29.
- Boudjada, S. (2003). *Contribution à l'étude de la variabilité géographique chez l'alfa (Stipa tenacissima L.)* [Thèse de magister, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene].
- Boudjada, S., & Bendjaffer, A. (1994). *Les recherches sur la régénération et la mécanisation de la récolte des nappes alfatières (Stipa tenacissima L.)* [Rapport]. Institut National de Recherche Forestière.
- Boudjada, S., Harfouche, A., & Chettah, W. (2009). Contribution à l'étude de la variabilité géographique chez l'alfa (*Stipa tenacissima* L.). *Recherche Agronomique*, 23, 7-14.
- Bourahla, A., & Guittoneau, G.-G. (1978). Nouvelles possibilités de régénération des nappes alfatières en liaison avec la lutte contre la désertification. *Bulletin de l'Institut d'Écologie Appliquée*, 1, 19-40.
- Boussaid, M., Beneto, C., Kaid-Harche, M., Naranjo, T., & Zedek, M. (2010). Genetic variation in natural populations of *Stipa tenacissima* from Algeria. *Biochemical Genetics*, 48(9-10), 857-872.
- Celles, J.-C. (1975). *Contribution à l'étude des confins Saharo-Constantinois (Algérie)* [Thèse de doctorat d'État, Université de Nice].
- Centre National de Télédétection Spatiale. (1990). *Cartographie et inventaire des nappes alfatières sur l'ensemble des wilayas* [Rapport]. CNTS.
- Chaouch, K. H., Belhamra, M., Ainouche, A., & Aidoud, A. (2022). Analyse de la similarité génétique des écotypes d'alfa (*Stipa tenacissima* L.) en Algérie. *Revue Agrobiologia*, 12(2), 3122-3137.
- Corcuera, L., Gil-Pelegrín, E., & Notivol, E. (2010). Phenotypic plasticity in *Pinus pinaster* $\delta^{13}\text{C}$: Environment modulates genetic variation. *Annals of Forest Science*, 67(8), Article 812. <https://doi.org/10.1051/forest/2010048>
- Djebaili, S. (1978). *Recherches phytosociologiques et phytoécologiques sur la végétation des hautes plaines steppiques de l'Atlas Saharien* [Thèse de doctorat d'État, Université des Sciences et Techniques du Languedoc].
- Djebaili, S. (1984). *Steppe algérienne, phytosociologie et écologie*. Office des Publications Universitaires.
- Djebaili, S. (1988). Connaissance actuelle sur l'alfa (*Stipa tenacissima* L.). *Biocénose*, 3(1-2), 43-52.
- Eilmann, B., de Vries, S. M. G., den Ouden, J., Mohren, G. M. J., Sauren, P., & Sass-Klaassen, U. (2013). Origin matters! Difference in drought tolerance and productivity of coastal Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.)) provenances. *Forest Ecology and Management*, 302, 133-143. <https://doi.org/10.1016/>

- j.foreco.2013.03.031
- Gounot, M. (1969). *Méthodes d'étude quantitative de la végétation*. Masson et Cie.
- Harche, M. (1978). *Contribution à l'étude de l'alfa (Stipa tenacissima L.) en Algérie: Germination, croissance des feuilles et différenciation des fibres* [Thèse de doctorat, Université de Lille].
- Harfouche, A. (2000). A non-parametric data analysis for studying genotype × environment interaction effects in maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). *Forest Genetics*, 7(4), 253–263.
- Harfouche, A., & Kremer, A. (2000). Provenance hybridization in a diallel mating scheme of maritime pine (*Pinus pinaster*). I. Means and variance components. *Canadian Journal of Forest Research*, 30(1), 1–9.
- Harfouche, A., Bahrman, N., Baradat, P., Guyon, J. P., Petit, R. J., & Kremer, A. (2000). Provenance hybridization in a diallel mating scheme of maritime pine (*Pinus pinaster*). II. Heterosis. *Canadian Journal of Forest Research*, 30(1), 10–16. <https://doi.org/10.1139/x99-179>
- Harfouche, A., Meilan, R., & Altman, A. (2014). Molecular and physiological responses to abiotic stress in forest trees and their relevance to tree improvement. *Tree Physiology*, 34(11), 1181–1198. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpu012>
- Kadi-Hanifi, H. (1998). *L'alfa en Algérie: Syntaxonomie, relation milieu-végétation, dynamique et perspectives d'avenir* [Thèse de doctorat en biologie végétale, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene].
- Kendall, M. G. (1955). *Rank correlation methods*. Charles Griffin & Company.
- Labadie, J. P. (1979). Étude caryosystématique de la flore de l'Algérie. *Naturalia Monspelienis, Série Botanique*, 32, 1–11.
- Le Houérou, H. N. (1969). La végétation de la Tunisie steppique. *Annales de l'Institut National de la Recherche Agronomique de Tunisie*, 42(5), 1–624.
- Le Houérou, H. N. (1975). *The nature and causes of desertification* [Rapport de conférence]. Cambridge Conference on Desertification.
- Le Houérou, H. N. (1995). *Bioclimatologie et biogéographie des steppes arides du Nord de l'Afrique: Diversité biologique, développement durable et désertification* (Options Méditerranéennes, Série B: Recherches et Études, No. 10). CIHEAM.
- Magnussen, S., & Yeatman, C. W. (1988). Height growth and survival of within- and between-provenance crosses in jack pine. *Canadian Journal of Forest Research*, 18(9), 1145–1151. <https://doi.org/10.1139/x88-176>
- Malos, O., & Meziani, S. A. (1978). *Les recherches expérimentales sur l'alfa (Stipa tenacissima L.): Mesure de la production et les effets du sarclage sur cette production* (Projet Alfa, Rapport No. 6). Institut National Agronomique El-Harrach.
- Nedjaoui, D. (1980). *Évolution des éléments biogènes et valeurs nutritives dans les principaux faciès de végétation (Artemisia herba-alba Asso, Lygeum spartum L. et Stipa tenacissima L.) des hautes plaines steppiques de la wilaya de Saïda* [Thèse de 3e cycle, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene].
- Nedjaoui, D. (1990). *Adaptation de l'alfa (Stipa tenacissima L.) aux conditions stationnelles: Contribution à l'étude du fonctionnement de l'écosystème steppique* [Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene].
- O'Brien, E. K., Mazanec, R. A., & Krauss, S. L. (2007). Provenance variation of ecologically important traits of forest trees: Implications for restoration. *Journal of Applied Ecology*, 44(3), 583–593. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2007.01313.x>
- Pouget, M. (1980). *Les relations sol-végétation dans les steppes Sud-algéroises* (Travaux et Documents de l'ORSTOM, No. 116). Éditions de l'ORSTOM.
- Slimani, H. (2012). *Mécanismes de désertification de la steppe des Hautes Plaines d'Algérie: Cas de la steppe d'alfa (Stipa tenacissima L.)* [Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene].
- Tazairt, K. (1992). *Étude de la variabilité morphologique, caryologique et électrophorétique de l'alfa (Stipa tenacissima L.) dans 3 régions d'Algérie selon un gradient longitudinal: Résultats préliminaires d'un essai de révision de la systématique de l'alfa* [Mémoire de magister, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene].
- Trabut, L. (1889). *Étude sur l'halfa*. Imprimerie-Librairie Pierre Jourdan.
- Wright, J. W. (1976). *Introduction to forest genetics*. Academic Press.