

Utilisation du minerai de fer Jerissa comme amendement ferreux pour la correction de la chlorose ferrique du chêne liège et du pin d'Alep sur substrat sableux en pépinière

I. GRIOUT¹, M. NOURI², A. HATIRA¹

(Reçu le 30/01/2020; Accepté le 09/04/2019)

Résumé

Ce travail porte sur la caractérisation du minerai de fer Jerissa et étudie l'efficacité de son application comme un amendement minéral de sol alcalin pour la correction de la chlorose ferrique chez les jeunes plants forestiers en pépinière. Pour cela, un essai a été conduit en pots sur le chêne liège (*Quercus suber*) et le pin d'Alep (*Pinus halepensis*) cultivés sur un substrat sableux. Le protocole expérimental est en blocs aléatoires complets, deux amendements ferreux (sidérite (ST) et Hématite/Goéthite (HT)) avec trois doses croissantes (25, 50 et 100 mg/pot) et 8 répétitions pour chacune. Un suivi des hauteurs et des diamètres au collet des plants a été réalisé au cours de l'essai et des analyses de teneur en fer dans les plants et les substrats pour confirmer la possibilité de leur utilisation comme amendement ont été effectués. Les résultats obtenus ont montré que l'application du minerai de fer Jerissa comme ajout ferreux provoque une faible amélioration de statut nutritionnel du fer des plants par rapport aux résultats obtenus par le témoin EDDHA/Fe, ce qui pourraient s'expliquer par la faible solubilité de fer naturel dans l'eau.

Mots clés: Minerai de fer, Jerissa, substrat, pépinière forestière, valorisation, amendement

The uses of iron ore Jerissa as ferric amendment to correct the ferric chlorosis in *Quercus suber* and *Pinus halepensis* on a sandy substrate in the nursery

Abstract

This work aim is to characterize the iron ores from Jerissa and to study the effectiveness of their application as a mineral amendment in alkaline soils to correct ferric chlorosis in young forest seedlings in nurseries. For this purpose, an experiment was conducted in pots on cork oak (*Quercus suber*) and Aleppo pine (*Pinus halepensis*) grown on a sandy substrate. The experimental design is a complete randomized blocks, two ferrous amendments (siderite (ST) and Hematite/Goethite (HT)) in three application rates (25, 50 and 100 mg/pot) and 8 replications for each. Plant height, stem diameters, iron content in the plants and substrate to confirm the possibility of their use as an amendment were measured. The application of iron ore Jerissa (ST and HT) as a ferrous addition to a mineral-poor sandy substrate caused a slight improvement in the nutritional status of iron in plants (cork oak and Aleppo pine) compared to the control (EDDHA/Fe), which could be explained by the low solubility of natural iron in water.

Keywords: Iron ore, Jerissa, substrat, forest nursery, valorization, amendment

INTRODUCTION

En Tunisie, les forêts constituent un patrimoine national aussi bien sur le plan environnemental qu'écologique ou économique et social, jouissent d'une politique volontariste de reboisement et de conservation pour un développement durable (Mohammed *et al.*, 2006). En 2011, les différentes ressources forestières et pastorales couvraient une superficie de 1 210 000 ha, soit un taux de couverture de 16%. Les rendements de production des jeunes plantes forestières dans les pépinières restent en dessous des potentialités en comparaison avec les rendements moyens enregistrés dans d'autres pays. Le chêne liège et le pin d'Alep sont considérés parmi les arbres forestiers les plus importants en Tunisie compte tenu de leur importance socio-économique d'une part et de la place qu'ils occupent dans le plan national de reboisement.

Le pin d'Alep (*Pinus halepensis*) est très commun dans les régions méditerranéennes. Cette espèce forestière rustique est qualifiée comme une essence méditerranéenne par excellence, vu qu'elle possède l'amplitude écologique la plus vaste (Nahal, 1962). En Tunisie, elle a une grande

valeur économique, écologique et sociale (Khouja, 1997). Les forêts de pin d'Alep ou pinède en Tunisie occupe une aire très étalée, couvrant 300 mille hectares, soit 36 % de la superficie totale des forêts tunisiennes.

Le chêne-liège (*Quercus suber*) est une espèce forestière endémique du bassin méditerranéen occidental et de la côte atlantique (Ben Jamaa et Abdelmoula, 2004). La superficie mondiale des forêts de chêne-liège (*Quercus suber*) est de l'ordre de 2 306 000 ha dont 37,5% en Afrique du Nord avec 376 000 ha au Maroc, 400 000 ha en Algérie et 90 000 ha en Tunisie (Bendaanoun, 1996; Nouri, 2009). Les forêts de chêne liège (*Quercus suber*) ont aussi des valeurs écologiques et économiques. En effet, elles permettent la protection et l'entretien des sols et des eaux, la protection contre les incendies, la recharge des nappes phréatiques et le contrôle des eaux de ruissellement et la disponibilité d'habitats pour la biodiversité (Letreuch-Belarouci *et al.*, 2010; Ben Jemaa *et al.*, 2006).

Généralement, dans le bassin méditerranéen, 20 à 50 % des arbres souffrent de la chlorose ferrique (Jaegger *et al.*, 2000). La chlorose est due principalement à un taux trop

¹ Département de Géologie, Faculté des Sciences Mathématiques, Physiques et Naturelles de Tunis, Tunisie

² Institut National de Recherche en Génie Rural, Eaux et Forêts (INGREF), Ariana, Tunisie

élevé des ions bicarbonates dans la solution du sol et à un pH élevé du sol (entre 7,5 et 8,5). Ces conditions affectent les processus métaboliques au niveau de la rhizosphère et des feuilles ce qui limite la biodisponibilité du fer dans les deux compartiments (Mengel, 1995).

Plusieurs auteurs ont montré que la carence en fer agit directement sur la quantité et la qualité du fruit produit. Sang *et al.* (1997) et Pestana *et al.* (2001, 2003) ont montré que la carence en fer entraîne un retard de la maturité et une diminution de la qualité pomologique des fruits.

En plus, plusieurs facteurs affectent la disponibilité d'élément fer dans la rhizosphère dans les pépinières. On peut citer notamment la qualité de l'eau d'irrigation, les propriétés physico-chimiques du substrat (texture, pH, capacité d'échange cationique, porosité, capacité de rétention en eau, aération, teneur en eau du substrat), le lessivage engendré par l'irrigation et par les précipitations (pertes en éléments nutritifs) et le coût des fertilisants. Selon Tagliavini et Rombolà (2001), la prédiction de l'état de la nutrition en fer se base sur la prédiction de tous ces paramètres. En effet, la fertilisation pour les forestiers tunisiens est généralement basée sur les apports des macroéléments (N, P et K) en négligeant les oligo-éléments. Cela malgré que la majorité des sols tunisiens sont caractérisés par un taux élevé en calcaire actif (Mtimet, 2016) et les eaux d'irrigation ainsi que la solution des sols sont généralement à pH alcalins.

La valorisation de ressources naturelles (minerai, roches...) en agriculture constitue un mode de gestion rationnel et contribue à une intégration du minerai dans les sols. En effet, le minerai de fer Jerissa-Kef présente des caractéristiques d'un amendement ou fertilisant minéral bien pourvu en fer, zinc, Cu, manganèse, matière organique et des argiles.

L'objectif de cette étude est de caractériser le minerai de fer Jerissa et d'étudier la possibilité de l'application du fer Jerissa comme un amendement ferreux aux substrats calcaires (sable Laroussa) pour corriger la carence en fer chez les plants forestiers en pépinière. Les plants retenus pour l'essai sont le pin d'Alep (*Pinus halepensis*) et le chêne liège (*Quercus suber*) à cause de leur importance socio-économique et aussi parce qu'ils sont touchés par la chlorose ferrique au niveau de plusieurs pépinières en Tunisie. Spécifiquement, ce travail consiste en un essai d'amendement minéral par le minerai de fer de Jerissa, conduit en pots sur deux espèces (chêne liège et pin d'Alep) cultivées sur un substrat sableux alcalin de Laroussa. Des analyses de plantes, sols et observations ont été réalisées (production de biomasse, analyse physico-chimiques, statut nutritionnel de fer, fer soluble et assimilable) pour étudier l'effet du minerai de fer Jerissa sur le statut nutritionnel en fer des jeunes plants.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Dispositif expérimental

L'essai expérimental s'est effectué sur 15 mois (Janvier 2018 - Avril 2019). Un essai d'amendement minéral par le minerai de fer de Jerissa (Hématite/Goethite et Sidérite) a été conduit en pots sur deux espèces (pin d'Alep (*Pinus halepensis*) et le chêne liège (*Quercus suber*) cultivées

sur un substrat sableux alcalin de Laroussa. Le Protocole expérimental est en blocs aléatoires complets à 8 répétitions. L'essai a démarré le 17 janvier 2018 (Figure 1) et chaque pot était rempli avec 2 kg de substrat et amendé par une dose déterminée de fer (25, 50 et 100 mg/pot). Le but de cet essai consiste à tester l'efficacité du minerai de fer Jerissa comme un amendement ferreux (ST1, ST2, ST3, HT1, HT2, HT3), en comparaison avec un témoin positif avec chélate de fer (EDDHA/Fe) et un témoin négatif sans fer (Tableau 1).

Description des traitements

Les amendements ferriques consistent à appliquer trois doses croissantes soit d'oxy/hydroxyde de fer brut (Hématite/Goethite broyée), soit de carbonate de fer brut (Sidérite broyée) (Tableau 1).

Pour la Sidérite (S), la dose (D) est déterminée par la quantité de Fe recommandée pour les plants forestiers en pépinière. Les doses D1, D2 et D3 sont respectivement égales à 25 mg/pot, 50 mg/pot et 100 mg Fe/pot. Ces quantités de fer sont apportées sous forme liquide (carbonate de fer FeCO₃ mélange avec l'eau distillée) apportés avant semis.

Pour l'Hématite/Goethite (H), la dose est également déterminée par la quantité de fer recommandée pour les plants forestiers en pépinière. Les doses D1, D2 et D3 sont respectivement égales à 25 mg/pot, 50 mg/pot et 100 mg Fe/pot). Une solution de Goethite/Hématite avec l'eau distillée ont été appliqué sur le substrat sableux avant sems.

Le témoin négatif (-): (C-) sans fer

Le témoin positif (+): (C+) avec application de EDDHA/Fe avec un dose selon le besoin du plant forestier.

Tableau 1: Les différents amendements appliqués aux substrats sableux

Amendement	Dose	Fer	Agents
ST1	25 mg/pot	Sidérite	Eau
ST2	50 mg/pot	Sidérite	Eau
ST3	100 mg Fe/pot	Sidérite	Eau
HT1	25 mg/pot	Hématite/goethite	Eau
HT2	50 mg/pot	Hématite/goethite	Eau
HT3	100 mg Fe/pot	Hématite/goethite	Eau
EDDHA/Fe	3 mg Fe/pot	Fe	EDDHA
Témoin (-)	Sans fer	-	-



Figure 1: Dispositif expérimental installé en pépinière

Le semis a été fait manuellement à raison de quatre semences par pot, réduites après émergences à un plant par pot. Les pots ont reçu des quantités uniformes d'eau d'irrigation chaque jour. Chaque pot a reçu une dose homogène de la solution nutritive chaque 15 jour pour garantir une bonne croissance. La solution nutritive adoptée est celle utilisée habituellement en pépinière comme programme de fertilisation (Tableau 2). Dans la présente expérimentation, la solution a été préparée en fonction du nombre de plants en essai, afin que tous les plants reçoivent la même quantité d'eau et d'éléments nutritifs.

Un suivi de croissance végétative a été effectué durant la période de l'essai (15 mois).

Tableau 2: Solution nutritive d'un apport pour l'ensemble des traitements

Éléments nutritifs	Quantité (g)
Nitrate de potassium (KNO ₃)	0,4920
Nitrate d'ammonium (NH ₄ NO ₃)	0,7872
Acide phosphorique (H ₃ PO ₄)	0,2432
Engrais composé azote-phosphore-potassium (NPK)	0,3328
Sulfate du Magnésium (Mg SO ₄)	0,8256

À la fin de l'expérience, la destruction des pots par la séparation des plants et les substrats. Des analyses ont été réalisées afin d'évaluer l'efficacité de l'amendement minéral (minerai de fer) appliqué sur un substrat calcaire pour corriger la chlorose ferrique chez le chêne liège et le pin d'Alep.

Caractéristiques de substrat sableux et du minerai de fer Jerissa

Substrat pédologique

Le substrat utilisé provient de la carrière de sable Laroussa - Siliana. Un échantillon composite de sable a été analysé pour le pH, granulométrie, calcaire actif (Tableau 4) ainsi que sa composition minéralogique (RX) et chimique en minéraux (SAA et ICP).

Ce sable est du type extra siliceux et les impuretés qu'il contient sont constituées principalement de silicate divers comme la tourmaline, le grenat, les micas blancs et le disthène avec une faible quantité d'oxyde de fer. Ses teneurs en SiO₂ qui varient de 97% à 98% (Tableau 3).

Tableau 3: Composition chimique du substrat de sable par SAA et ICP

	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	Cr	Mn
Sable Laroussa	98,5 %	0,03%	0,23%	0,17%	0,03%	0,17%	0,02%	0,01%	7,4 ppm	9,3 ppm

Tableau 4: Caractéristiques physico-chimiques du sable Laroussa

	pH	CE	Calcaire total	Calcaire actif	MO
Sable	8,9	402 (µS/Cm)	45%	11%	0

MO: matière organique, CE: conductivité électrique

Le sable présente une granulométrie moyenne à grossière, il est très bien classé et l'essai d'équivalent de sable montre un degré de propreté très élevé. L'analyse minéralogique confirme le caractère extra siliceux du sable étudié puisqu'il a une dominance des grains de quartz (Figure 2).

Caractérisation de minerai de fer Jerissa

Le minerai de fer provenait de la mine de Jerissa située à Jerissa au nord-ouest de la Tunisie. Les analyses géochimiques de deux échantillons de fer (Sidérite et Hématite/Goethite) ont été effectuées à la spectrométrie à plasma à couplage inductif et par absorption atomique. Elles ont été complétées par une étude minéralogique basée sur l'analyse diffractométrique aux rayons X selon la méthode de poudre. Ce minerai de fer est composé de l'Hématite-Goethite-Sidérite-Quartz-Calcite et minéraux argileux (Figure 3 a et b).

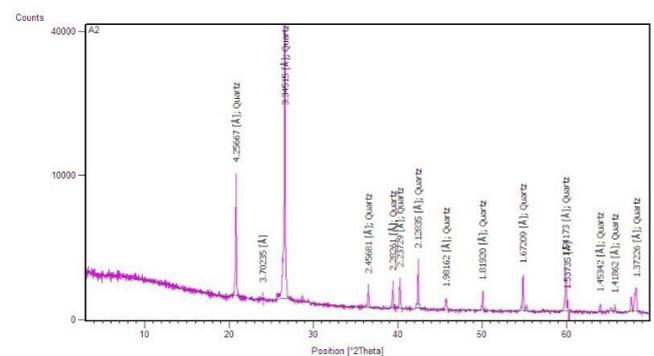


Figure 2: Diffractogramme de rayon X de sable Laroussa

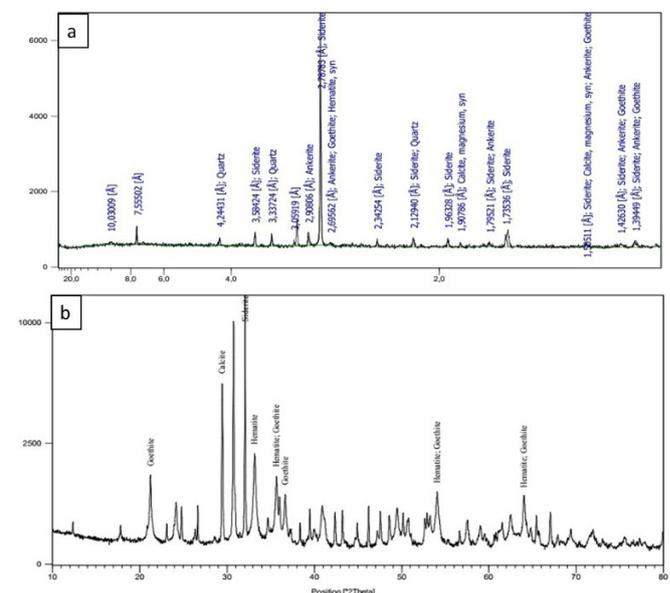


Figure 3: Diffractogramme de rayon X de minéralisation ferrière de Jerissa (a: Sidérite et b: Hématite/goethite)

Mesures et observations

Comportement des plants en pépinière

Hauteurs des tiges et diamètres au collet: La hauteur (cm) des tiges des plants a été mesurée à l'aide d'une règle graduée depuis le collet jusqu'au bourgeon apical et le diamètre (cm) au collet des plants a été mesuré en même temps à l'aide d'un pied à coulisse.

Production de biomasse: la biomasse sèche des parties aériennes et racinaires ont été déterminées après séparation des deux parties puis leur pesée à l'aide d'une balance après étuvage à 80°C pendant 3 jours.

Analyse du substrat et des feuilles

Analyse physico-chimiques: Les mesures du pH et de la conductivité électrique (CE) (mS/cm) du substrat ont été réalisées.

Analyse de fer soluble et assimilable: ont été effectuées par spectrophotométrie d'absorption atomique (SAA).

Analyse foliaire: La séparation des racines, tiges et feuilles des plants a été réalisée (Figure 4). Les trois parties sont lavées à l'eau distillée afin d'éliminer la poussière, ensuite ils sont égouttés, pesés (poids frais) et séchés dans une étuve à 80°C pendant 3 jours. Après séchage, les feuilles, tiges et racines sont broyées à l'aide d'un broyeur à pièces non métalliques afin d'éviter toute contamination avec le fer et pesés pour la deuxième fois (poids sec).

RÉSULTATS

Caractérisation de minerai de fer

Le minerai de fer Jerissa pourrait être valorisé en pépinière car il est riche en fer et en autres oligoéléments. Ce minerai présente des teneurs moyennes de fer de l'ordre de 39,6 % pour l'échantillon de Hématite/Goethite et 52,5 % pour l'échantillon de carbonate de fer. Il est aussi relativement riche en matière organique et en argile (Aissaoui *et al.*,

1988). Le pH était alcalin pour le deux échantillons, avec une valeur de 8,09 pour sidérite et 8,23 pour l'échantillon Hématite/Goethite. La teneur en calcaire total était de 20,3% pour la sidérite et 29,8% pour l'échantillon Hématite/Goethite, le classant très fortement calcaire (Baize, 1988). Du point de vue salinité, le minerai présente une conductivité électrique de l'ordre de 451 μ S/cm et 182 μ S/cm respectivement. Les métaux lourds étaient présents dans le minerai sans pour autant dépasser les normes préconisées pour leur valorisation.

Effet de l'application de l'amendement de fer sur l'évolution de la hauteur et du diamètre des jeunes plants forestiers

Les courbes de croissance des jeunes plants forestiers de chêne liège et de pin d'Alep montrent une croissance végétative normale (Figure 5 A et B).

On remarque que la croissance correspondant aux amendements par sidérite (ST) de chêne liège (CH) (ST1, ST2 et ST3) présente une hauteur moins importante par rapport aux amendements par Hématite/Goethite (HT) (HT1, HT2 et HT3).

Pour les plants pin d'Alep (PA), on observe que la croissance correspondant aux amendements par sidérite (ST1 et ST2) montrent une croissance meilleure que les plants amendés par HT. Ces résultats montrent aussi qu'EDDHA/Fe (chélate de fer) a amélioré la croissance végétative du le début, ce qui peut engendrer une meilleure végétation et donc une meilleure nutrition de fer pour la biomasse aérienne. Cependant, la différence entre le traitement par le chélate de fer (EDDHA/Fe) et les différents amendements (HT et ST) est significative.

L'évolution du diamètre des plants est présentée dans la figure 6 (A et B). Les courbes correspondant à l'évolution du diamètre des différents jeunes plants ont une allure croissante. Les différences entre les amendements (ST et HT) pour chêne liège et pin d'Alep sont statistiquement non significatives.

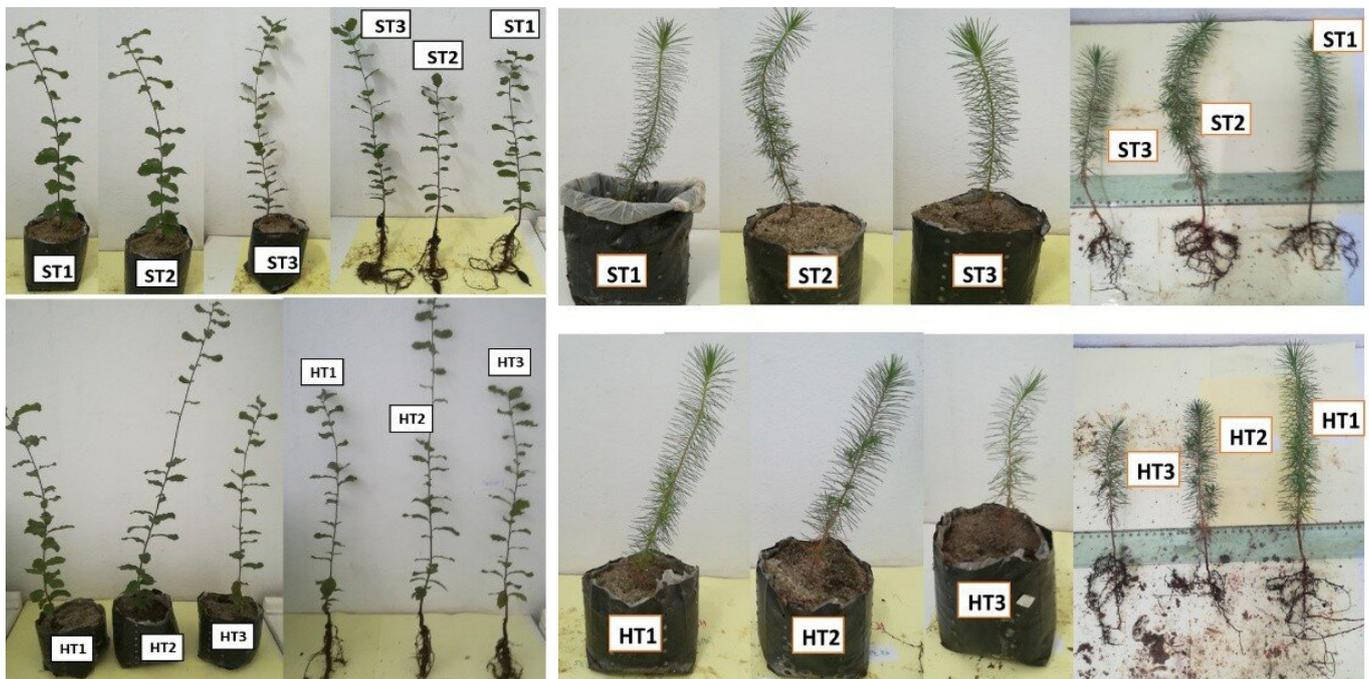


Figure 4: photos des différents plants amendés (ST et HT) à la fin de l'expérience

Effet de l'application de l'amendement ferreux sur la biomasse des plants

Les rendements en biomasse des plants correspondant aux différents amendements sont présentés par la figure 7. L'apport de l'amendement par ST (ST1, ST2, ST3) et par HT (HT1, HT2 et HT3) ont engendré une légère augmentation des rendements de pin d'Alep par rapport au témoin sans fer tandis que le traitement avec EDDHA/Fe a entraîné une augmentation remarquable du rendement de biomasse fraîche. Cependant, l'analyse statistique montre qu'il n'y a pas de différence significative entre les amendements par sidérite et Hématite/Goethite pour les différentes doses.

Concernant les plantes de chêne liège, l'amendement avec Sidérite (ST1, ST2 et ST3) a engendré une légère augmentation des poids frais par rapport aux plantes amendés par HT (HT1, HT2 et HT3), malgré l'amendement par HT a enregistré la longueur la plus grande que les plants traités par ST. L'analyse statistique a montré qu'il y a de différence significative entre le traitement par EDDHA/Fe et les différents amendements par ST et HT (Figure 7 B).

Fer dans les plants (chêne liège et pin d'Alep)

Pin d'Alep

L'apport de doses croissantes de l'amendement minéral naturel de HT aux substrats sableux a engendré une alimentation de Fe par les plants avec un taux de Fe faible par rapport au témoin positif (EDDHA/Fe). Il semble que le fer naturel, qui a une solubilité très faible, a fourni moins de fer soluble aux racines ce qui justifie les faibles teneurs en Fe dans la partie aérienne des plants. Les résultats obtenus montrent que les aiguilles des plants traités par HT1 (dose: 25 mg Fe/pot) a enregistré la quantité de fer la plus

haute (23,2 mg/Kg⁻¹) par rapport aux aiguilles des plants traités par HT2 et HT3 (17,4 et 10,7 ppm respectivement) (Figure 8).

Concernant les plants de pin d'Alep traités par ST, ils ont enregistré des quantités de fer au niveau de aiguilles qui sont inversement proportionnelles aux doses appliquées. C'est-à-dire que les plants amendés par la faible dose (25 mg/pot: ST1) ont engendré la teneur en fer la plus importante (16 ppm). Par contre, les plants amendés par 100 mg/pot (ST3) de fer ont enregistrés seulement 10 ppm.

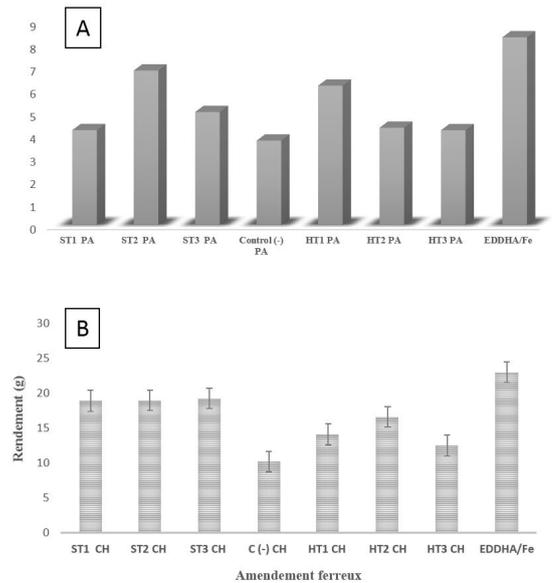


Figure 7: Rendement de poids frais du (A) pin d'Alep (Pinus halepensis) et (B) de chêne liège (Quercus suber)

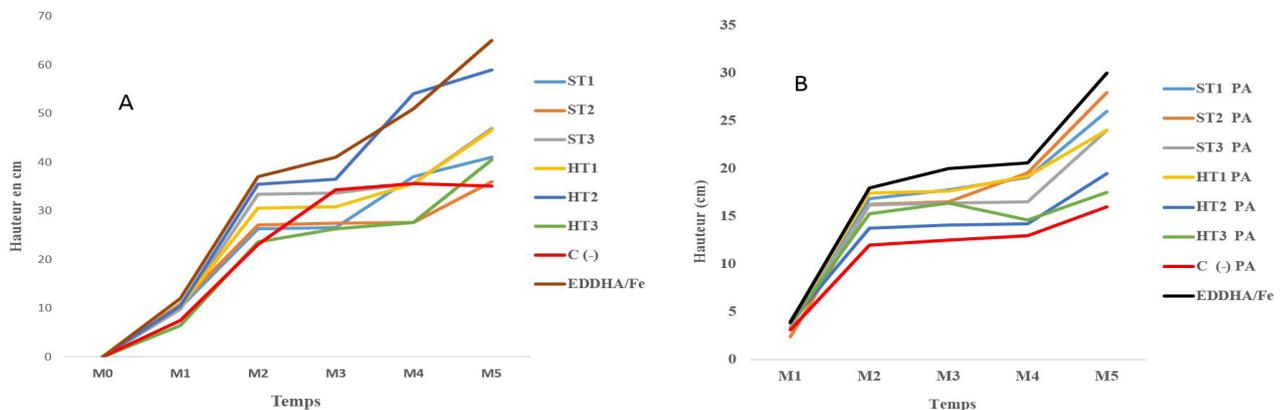


Figure 5: (A): Évolution de la hauteur (cm) des plants du chêne liège (Quercus suber) au cours de l'essai d'amendement minéral pendant 15 mois; B: Évolution de Hauteur des plants du pin d'Alep (Pinus halepensis) au cours de l'essai d'amendement ferrique (15 mois)

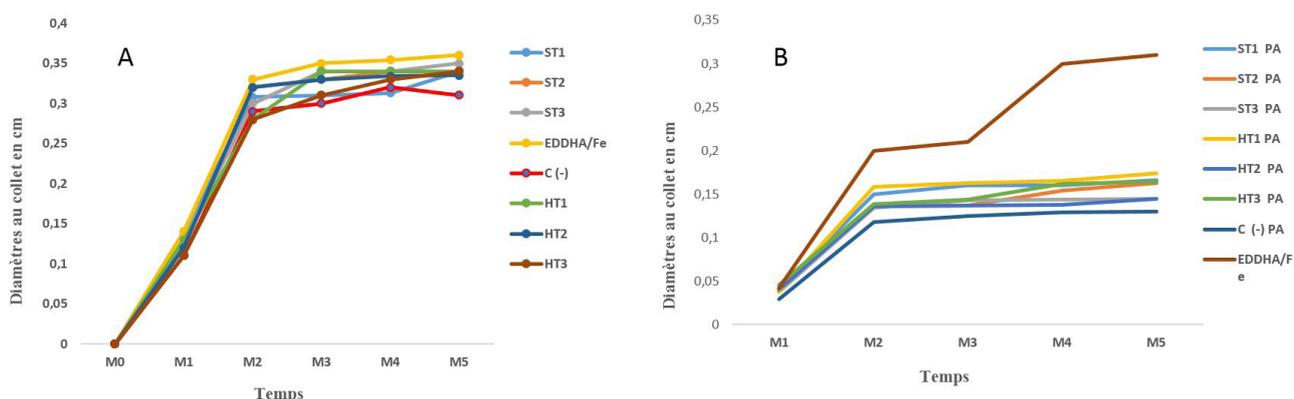


Figure 6: Évolution du diamètres au collet (cm) des plants du chêne liège (Quercus suber) (A) et du pin d'Alep (Pinus halepensis) (B) au cours de l'essai d'amendement minéral

On remarque que quand la dose de fer naturel (Hématite/Goethite ou sidérite) augmente dans le substrat et dans les racines, la partie aérienne des plants reçoit une quantité faible de fer.

Chêne liège

Les résultats de l'analyse de la teneur en fer dans les feuilles sont représentés dans la Figure 8. Les résultats obtenus montrent une teneur en fer croissante dans les feuilles de plants amendés par HT (16,18 et 20 mg/Kg⁻¹) selon la dose appliquée. Les valeurs de fer les plus importantes ont été enregistrées dans les feuilles des plants amendés par la plus forte dose de fer naturel 100 mg/pot (HT3).

Les plants amendés par sidérite ont également engendré des quantités de fer croissantes selon la dose appliquée; 13 mg/Kg⁻¹ de Fe enregistré au niveau des feuilles des plants amendés par ST3 (100 mg/pot), 11 mg/Kg⁻¹ de Fe dans ST2 (50 mg/pot) et 9 mg/Kg⁻¹ dans les feuilles amendés par ST1 (25 mg/Kg⁻¹). Nous remarquons que l'application du chélate de fer a entraîné une augmentation très importante de la quantité de fer dans les feuilles par rapport aux différents amendements par ST et HT. L'amendement des jeunes plants de chêne liège par HT (HT1, HT2 et HT3) sont plus efficace que l'amendement par sidérite mais les deux amendements restent moins efficaces que le chélate de fer (EDDHA/Fe) (Schenkeveld WDC, 2007).

Les analyses des substrats

pH des substrats

Les résultats des mesures de pH des substrats sont illustrés par la figure 9. Le pH initial du substrat utilisé en essai est fortement alcalin (pH =8,9) et le taux de calcaire actif est élevé, ces deux conditions sont favorables à l'apparition de la chlorose ferrique (Wallace et Lunt, 1960; Chen et Barak, 1982; Korcak, 1987; Marschner, 1995; Mengel *et al.*, 2001). Après la plantation et l'application des amendements ferreux (HT et ST) aux substrats, on a observé une diminution de pH par rapport au pH initial du substrat dans les différents pots de pin d'Alep et de chêne liège, ce qui favorise légèrement l'assimilation du fer par les racines des plants.

Fer soluble et disponible dans les substrats amendés

Pin d'Alep

Les résultats de l'analyse de la teneur en fer soluble et disponible des substrats cultivés en jeunes plantes de pin d'Alep sont illustrés par les histogrammes de la figure 10. Les concentrations de fer solubles dans les substrats amendés par HT ont engendré des valeurs supérieures aux substrats amendés par ST mais les deux amendements ont des teneurs en fer supérieures à celles du témoin non traité (sans fer). EDDHA/Fe a montré des résultats en fer soluble élevés par rapport aux autres amendements. La mesure du fer dans la fraction disponible dans les différents substrats amendés par HT et ST a montré des valeurs variant entre 1 et 1,5 mg/l. Les différences entre les amendements (HT et ST) ne sont pas significatives. Par contre, la comparaison entre les amendements ferreux et le témoin sans fer montre que les substrats amendés par le fer de Jerissa ont des teneurs en Fe disponible plus importantes que les substrats non amendés.

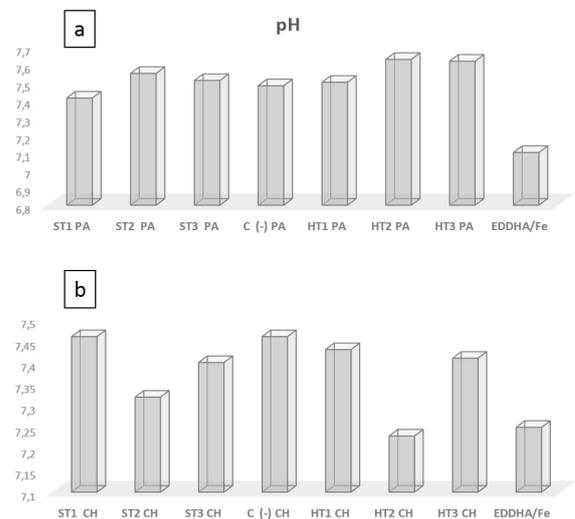


Figure 9: Effet de l'application de l'amendement ferreux sur le pH des substrats cultivés par les plants de chêne liège (a) et de pin d'Alep (b)

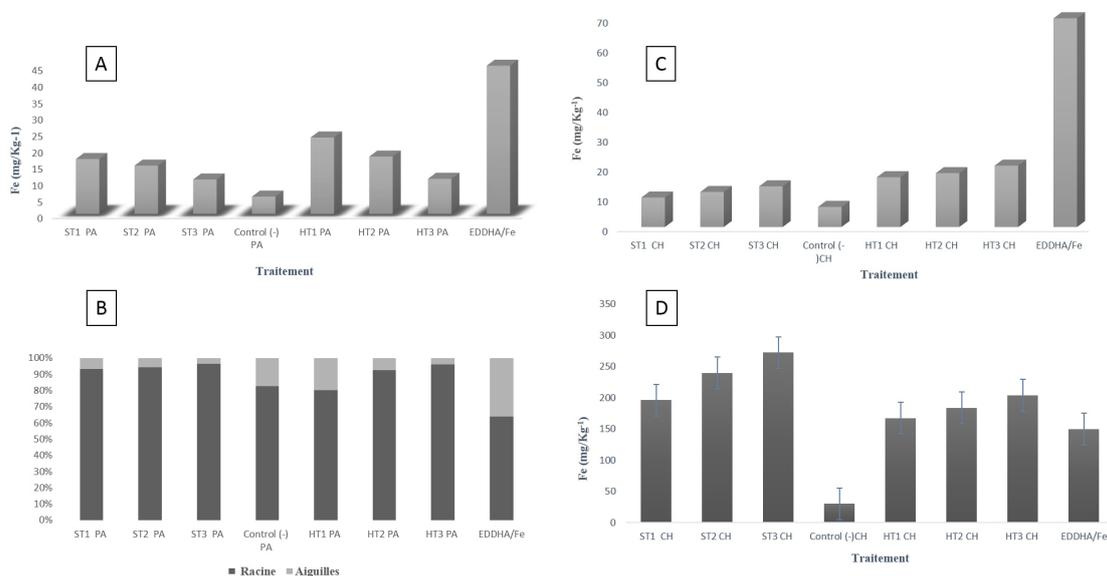


Figure 8: Effet de l'application de l'amendement de fer (HT et ST) sur la teneur en Fe (mg/Kg⁻¹) (A): dans les aiguilles des plants de pin d'Alep, (B) dans les aiguilles et racines des plants de pin d'Alep, (C): dans les feuilles des plants de chêne liège et (D): dans les racines des plants de chêne liège

Chêne liège

Les résultats montrent que le fer soluble varie entre 0,6 et 0,7 mg/L pour les substrats amendés par la sidérite et entre 0,5 et 0,7 mg/L pour les substrats amendés par HT. On constate de faibles valeurs en fer disponible dans les différents substrats cultivées en jeunes plants de chêne liège que varient entre 0,9 et 1,3 mg/L Fe (Figure 10 b).

DISCUSSION

Le choix d'un fertilisant ou d'amendement à la fois rentable et durable est devenu une nécessité de nos jours, cela dans le but de combler les besoins alimentaires de la population mondiale qui ne cessent d'augmenter d'une part et d'autre part pour une meilleure allocation des ressources de milieu qui deviennent de plus en plus rares. L'utilisation appropriée du fer naturel en tant que source de nutrition ferrique de jeunes plantes forestières peut contribuer à remplacer les chélates de fer chimique en vue d'une agriculture durable.

Pour produire un nombre important de jeunes plants forestiers en pépinière, bien équilibrés et capables d'être exploités et utilisés dans un programme de reboisement, nous avons cherché à améliorer et à traiter l'un des problèmes affectant le développement de jeunes plants forestiers qui est la chlorose ferrique. A cet effet, différents amendements ont été appliqués sur un substrat sableux où sont plantés le chêne liège et le pin d'Alep.

Le pH des 16 substrats amendés a varié durant la croissance des plants. Affichant un pH fortement alcalin au début de la culture, ils deviennent légèrement moins alcalins (7,10 à 7,55) en fin de l'essai mais avec des valeurs qui sont restées dans l'intervalle souhaitable pour la culture hors-sol (Andre, 1987).

L'évaluation des variables de croissance des plantes et les analyses des teneurs en fer dans les substrats et les plantes (chêne liège et pin d'Alep) au niveau de la pépinière

constituent un outil important afin d'assurer la survie et la croissance des plants durant les différentes phases de reboisement (Duryea, 1985; Ritchie, 1984). La hauteur et le diamètre sont considérés parmi les variables qui constituent de bons indicateurs de développement des jeunes plants en pépinière qui peuvent prédire au mieux la performance des plants après plantation (Johnson et Cline, 1991). Les résultats des mesures de hauteur et de diamètre des plantes révèlent que l'amendement ferreux (ST et HT) avec différentes doses (25,5 et 100 mg/pot) montrent des valeurs très importantes pour le pin d'Alep dont la hauteur est entre 23 et 30 cm et entre 36 et 59 cm pour le chêne liège. En conditions de fertilisation équilibrée, la croissance en hauteur de jeunes plants de pin d'Alep en pépinière peut atteindre 1cm par semaine durant les premières phases de croissance (Lamhamedi *et al.*, 1987).

La relation Hauteur/Diamètre (H/D) nous renseigne sur l'équilibre de croissance en hauteur par rapport à la croissance de diamètre traduisant la vigueur et la stabilité du plant (Cornine *et al.*, 1988). Les plants produits dans les substrats amendés par ST et HT avaient un H/D très important pour les deux plants forestières > 4,50 (Lamhamedi *et al.*, 2000).

Selon Fitter (1986), une bonne disponibilité des éléments nutritifs favorise l'augmentation de la biomasse aérienne par rapport à la biomasse racinaire (PA/PR). En plus, le ratio des biomasses sèches aériennes et racinaires, expliquant l'équilibre entre la surface de transpiration et la surface d'absorption d'un plant (racines), se situait dans la limite admissible pour la production des plants en pots, avec une valeur maximale de 2 g/g, considérée comme satisfaisante (Lamhamedi, 2006; Roméro *et al.*, 1986; Rose *et al.*, 1990). Le meilleur rapport a été obtenu par l'amendement HT1, HT2 et HT3 pour le pin d'Alep.

Après 15 mois de croissance en pépinière, les meilleures concentrations en fer dans les plants pour les deux espèces produites (pin d'Alep et chêne liège) ont été obtenues dans les sables amendés par Hématite/Goethite qui sont significativement supérieures à celles des substrats amendés par la sidérite. L'utilisation de l'amendement Hématite/Goethite a permis d'améliorer la production de plants forestiers et d'obtenir des plants avec des normes de qualité morpho-physiologiques satisfaisantes (statuts notionnel, hauteur, diamètre, biomasse aérienne).

CONCLUSION

La caractérisation géochimique et minéralogique du minerai de fer Jerissa (Tunisie) a été réalisée en vue d'une éventuelle valorisation comme un amendement minéral pour les jeunes plants de pin d'Alep et de chêne liège au niveau des pépinières. La minéralisation ferrifère de cette mine se caractérise par la dominance de l'élément fer et la présence de plusieurs éléments mineurs tel que le manganèse, cuivre, cobalt et Zinc avec de faibles pourcentages ne dépassant pas les normes des métaux lourds dans les sols. Après la caractérisation de minerai de fer, un essai d'application du fer Jerissa (Sidérite et Hématite/Goethite) comme un amendement ferreux aux de substrat à pH basique a été réalisé pour traiter la carence en fer chez deux espèces des plants forestiers en pépinière.

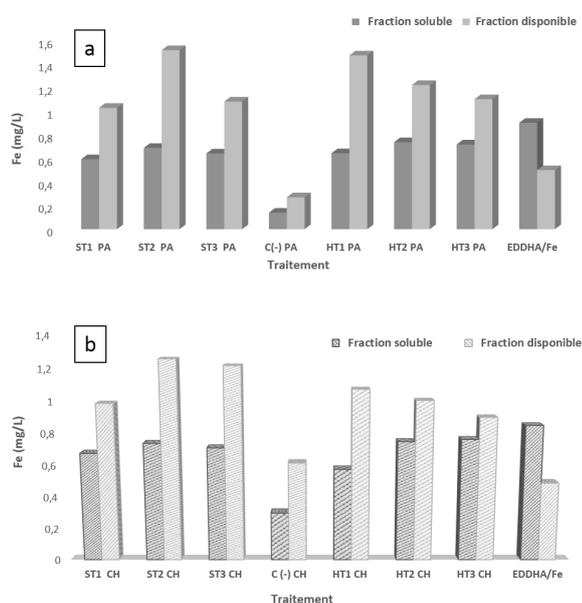


Figure 10: Fraction soluble et disponible de fer dans les substrats cultivés par les plants de pin d'Alep (a) et les plants de chêne liège (b)

Les essais que nous avons effectués sur le minerai de fer Jerissa montrent des résultats intéressants et incitent à valoriser cette ressource naturelle en production de plants forestiers. Ils contiennent des éléments importants (fer et oligoéléments) et ont un effet positif sur les plants. L'application du minerai de fer Jerissa (Sidérite et Hématite/Goéthite) contribue à réduire la chlorose ferrique, qui est l'un des problèmes les plus importants de la production des jeunes plantes forestiers en pépinière. Cependant, ce minerai engendre une concentration faible de fer qui s'explique par la faible solubilité du fer naturel avec l'eau dans le substrat. Cependant, il est important d'améliorer l'efficacité agronomique de ce minerai pour qu'il soit intéressant sur le plan économique. Nos futurs travaux concerneront l'utilisation du minerai de fer comme fertilisant ferrique à l'aide d'agents complexants afin de traiter la chlorose ferrique en sols calcaires.

REMERCIEMENT

Les auteurs tiennent à remercier l'Institut national de Recherches en Génie rural, Eaux et Forêts (INRGREF, Tunisie).

RÉFÉRENCES

- Aissaoui-Adjali S., Mahjoubi H., Tlig S. (1988). Origine épigénétique commune de la minéralisation en fer (sédiments) de deux types de gisements associés: stratiforme et karstique. Le cas du jbel Jérissa (Tunisie). *C. R. Acad. Sci. Paris, Série II.*, 306: 357-360.
- Andre J.P. (1987). Propriétés chimiques des substrats. Ed. INRA, Paris, France: 127-137.
- Baize D. (1988). Guide des analyses en pédologie 2^{ème} édition revue et augmentée; édition INRA, Paris France.
- Ben Jemaa M. L., Abdelmoula K. (2004). Les feux de forêts dans la subéraie tunisienne. VIV expo 2014: Le chêne-liège face au feu, 2.
- Ben Jemaa M. L., Abid H., Nouioui M. (2006). Impact de la gestion du liège sur l'économie rurale et les incendies des forêts en Tunisie: 1-3.
- Bendanoun M. (1996). La Mamora, un patrimoine national vital pour l'avenir de Salé et de la région. Journée d'étude «Sauvons la Mamora», Salé, 25 Mars 1996, ENFI- MEA-BR, 31.
- Briat J.F., vert G. (2004). Acquisition et gestion du fer par les plantes. *Cahiers d'études et de recherches francophones/Agriculture*, 13: 183-201.
- Chen Y., Barak P. (1982). Iron nutrition of plants in calcareous soils. *Adv Agron.*, 35: 217-240.
- Cornine B., Dominique C. (1988). Les plantations d'alignement le long des routes, chemins, canaux, allées Collection mission du paysage. *Institut pour le Développement Forestier IDF*, 416.
- Duryea M.L. (1985). Evaluating seedling quality: principles, procedures and predictive ability of major tests. Corvallis: Oregon State University.
- Eastaugh C. (2008). Adaptations of forests to climate change: a multidisciplinary review. IUFRO Occasional Paper 21. International Union of Forest Research Organizations (Vienna, Austria), 89.
- Fitter A.H. (1986). The topology and geometry of plant root systems: influence of watering rate on root system topology in *Trifolium pratense*. *Annals of Botany*, 58: 91-101.
- Heller R. (1969). Biologie Végétale II: Nutrition et Métabolisme. Eds Masson et Cie, Paris., 578.
- Jaegger B., Goldbach H., Sommer K. (2000). Release form lime induced iron chlorosis by «Cultan» in fruit trees and its characterisation by analysis. *Acta Hort.*, 531: 107-113.
- Johnson J.D., Cline M.L. (1991). Seedling Quality of Southern Pines. In: Duryea, M.L. and Dougherty, P.M., Eds., Forest Regeneration Manual, Klumer Academic, Netherlands., 143-162.
- Khouja M.L. (1997). Variabilité géographique du pin d'Alep en Tunisie perspectives d'amélioration de la productivité et de la qualité physique du bois. Thèse de Doctorat, UCL, Agro, Faculté des Sciences Agronomiques, Belgique.
- Korcak R.F. (1987). Iron deficiency chlorosis. *Hort. Rev.*, 9: 133-186.
- Lamhamedi M.S., Fecteau B., Godin L., Gingras C. (2006). Guide pratique de production en hors sol de plants forestiers, pastoraux et ornementaux en Tunisie. Livre - PAM-PEV Internationale Ltée (éd.). Longueuil, Canada. 110 p.
- Lamhamedi M. S., Ammari Y., Fecteau B., Fortin A., Margolis H. (2000). Problématique des pépinières forestières en Afrique du Nord et stratégies de développement. *Cahiers d'études et de recherches francophones/Agricultures*, 9: 369-80.
- Lamhamedi M. S., Fortin J. A., Ammari Y., Benjelloun S., Poirier, M., Fecteau B., Bougacha A. et Godin L. (1997). Évaluation des composts, des substrats et de la qualité des plants (*Pinus pinea*, *Pinus halepensis*, *Cupressus sempervirens* & *Quercus suber*) élevés en conteneurs. Projet Banque mondiale N 3601. Direction Générale des Forêts, Tunisie. Pampev Internationale, Montréal, Canada. 121.
- Lamhamedi M.S., Labbé L., Margolis H.A., Stowe D.C., Blais L., Renaud M. (2006b). Spatial variability of substrate water content and growth of white spruce seedlings. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 70: 108-120.
- Lamhamedi, M.S., Fecteau B., Godin L., Gingras C. (2006). Guide pratique de production en hors sol de plants forestiers, pastoraux et ornementaux en Tunisie. Livre - PAM-PEV Internationale Ltée (éd.). Longueuil, Canada, 110.
- Letreuch-Belarouci A., Boumediene M., Letreuch-Belarouci N., Aumasson P. (2010). Stratégie de développement et conservation des subéraies des monts de Tlemcen (Algérie). *Aménagement et gestion*, 28-29, 34 et 38.
- Marschner, H., Römheld, V. (1994). Strategies of plants for acquisition of iron. *Plant and soil*, 165: 261-274.
- Mengel K., Kirby E. A., Kosegarten H. (2001). In Principles of Plant Nutrition (Iron). Kluwer Academic Publisher: Dordrecht, the Netherlands: 849.
- Mtimet A. (2016). Les sols tunisiens à l'épreuve de la durabilité: de la gestion à la gouvernance, 104p.
- Nahal I. (1962). Le Pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.). Étude taxonomique, phytogéographique, écologique et sylvicole. ENEF, École nationale des eaux et forêts, Nancy (FRA), 477-688.
- Nouri M. (2009). Facteurs pédo-climatiques et évolution de la subéraie Tunisienne: propriétés physico-chimiques et hydrodynamiques des sols dans les forêts de chêne liège (*Quercus suber* L.). Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques de l'INAT: 173.

Pestana M., P.J. Correla, A. de Varennes, J. Abadía, E.A. Faria, (2001). The use of floral analysis to diagnose the nutritional status of orange trees. *Journal of plant nutrition*, 24: 1913-1923.

Pestana M., Varennes A., Araujo Faria E. (2003). Diagnosis and correction of iron chlorosis in fruit trees. *J. Food Agric. Environ.*, 1: 46-51.

Ritchie G.A., Dunlap J.R. (1980). Root potential, its development and expression in Forest tree seedlings. *New Zealand Journal of Forest Science*, 10: 218-248.

Romero A. E., Ryder J., Fisher J. T., Mexal J. G. (1986). Root systems modification of container stock for arid land plantings. *For. Ecol. Manag.*, 16: 281-290.

Rose R., Carlson W. C., Fisher J.T., Mexal J. G. (1990). The target seedling concept. In: Proceedings, Target Seedling Symposium, Combined Meeting Western Nursery Association. 1990 August 13-17; Roseburg, OR. Gen. Tech. Rep. 200. Fort Collins, CO: USDA Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, 1-8.

Sang M., Pascal J., Machin J. (1997). Prognosis and correction of iron chlorosis in peach trees. Influence on fruit quality. *J. Plant Nutrient.*, 20: 1567- 1572.

Schenkeveld W.D.C., Reichwein A.M., Temminghoff E.J.M., Riemsdijk W.H.V. (2007). The behaviour of EDDHA isomers in soils as influenced by soil properties. *Plant Soil.*, 290: 85-102.

Tagliavini M., Rombolà A.D. (2001). Iron deficiency and iron chlorosis in orchard and vineyard ecosystems. *Europ. J Agronomy.*, 15: 71-92.

Wallace A., Lunt O.R. (1960). Iron chlorosis in horticultural plants. *Proc. Am. Hort. Sci.*, 75: 819-841.