



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud MAMMERI Tizi-Ouzou
Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques
Département des Sciences Agronomiques

Thèse de doctorat
Spécialité : Agronomie
Option : Pédologie
Présentée par

Malika BOUDIAF NAIT KACI

Biodisponibilité du phosphore dans la
rhizosphère de l'olivier (*Olea europaea* L.)

Présentée devant le jury composé de :

Dr MEDDOUR Rachid	MCA	UMMTO	Président
Pr DERRIDJ Arezki	Professeur	UMMTO	Rapporteur
Pr BELHADJ Safia	Professeur	U. Ziane Achour Djelfa	Examinatrice
Pr DAOUD Youcef	Professeur	ENSA, Alger	Examineur
Pr DELLAL Abdelkader	Professeur	U. Ibn Khaldou Tiaret	Examineur
Dr BENABDELMOUMENE Salah	MC	U. AEK Mira	Invité

Remerciements

Je tiens tout particulièrement à remercier mon directeur de thèse Pr Arezki DERRIDJ de l'université Mouloud MAMMERI de m'avoir accordé sa confiance et accepté d'encadrer ce travail. J'ai apprécié son soutien et ses encouragements malgré les nombreuses difficultés rencontrées. Ses compliments sur mon compte m'ont fréquemment remonté le moral.

Mes plus vifs remerciements vont également au Dr Rachid MEDDOUR de l'université Mouloud MAMMERI qui a accepté de présider le jury et d'examiner ce travail.

J'exprime toute ma gratitude au Pr Youcef DAOUD, de l'ENSA d'Alger pour avoir accepté d'une part d'examiner ce travail et d'autre part d'avoir été à maintes reprises à mon écoute depuis mon magister. Je le remercie pour ses remarques et conseils précieux. Son aide a été précieuse pour mon inscription en thèse, la préparation du protocole expérimental du chapitre IV et ses encouragements pour me lancer dans la partie mycorhizes.

Mes plus vifs remerciements vont au Pr Abdelkader DELLAL, de l'université IBN KHALDOUN de Tiaret pour avoir accepté d'examiner ce travail, de se déplacer à ma soutenance et pour son accueil lors de mon passage dans son laboratoire, son hospitalité et la gentillesse de son équipe m'ont particulièrement marquée.

Je remercie le Pr Safia BELHADJ, de l'université ZIANE ACHOUR de Djelfa pour avoir accepté d'examiner ce travail, de se déplacer à ma soutenance et pour sa disponibilité de travailler avec notre équipe.

Mes plus vifs remerciements vont aussi au Dr Salah BENABDELMOUMENE, de l'Université Abderahmane MIRA de Bejaia, pour avoir accepté notre invitation et d'examiner ce travail.

Merci à Daniel TESSIER, Christian MOUGIN et Mickael HEDDE de UR 251 PESSAC, INRA Centre de Versailles-Grignon pour leur accueil dans l'unité et pour m'avoir donné les moyens nécessaires de travailler dans les meilleures conditions. Je n'oublierai pas la gentillesse de toute l'équipe de PESSAC.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à Marie Pierre TURPAULT, INRA Centre de Nancy, Biogéochimie des Ecosystèmes Forestier, qui a accepté de travailler avec moi sur le chapitre VII, lors de mes stages de courte durée, ainsi que l'équipe qui m'a aidé dans la progression de mon travail.

J'exprime toute ma reconnaissance à Louisa BOUHIRED, Enseignant-chercheur LZR Université de Bab Ezzouar Alger. Elle m'a aidé à une étape décisive de ma thèse, malgré ses soucis de santé, son enthousiasme était contagieux. Une partie du chapitre V a été réalisée au sein de ce laboratoire, mes remerciements vont aussi au directeur Pr Nadia BOUGDOURA.

Ce travail a été réalisé au sein du Laboratoire Ressources Naturelles de l'université Mouloud MAMMERI, j'exprime ma reconnaissance au Dr Aomar BENMOUFFOK ex-Directeur de ce laboratoire, je suis triste, car il n'est plus parmi nous, qu'il me soit ici permis d'avoir une pieuse pensée pour lui.

Mes remerciements vont à Noria SMAIL SAADOUN, Directrice du même laboratoire, très attentive et disponible. J'ai apprécié son soutien, elle a pu estimer ma ténacité à défendre mes opinions à travers mon doux caractère et mon calme. Ses conseils m'ont été d'un grand secours même si j'ai parfois peiné d'avoir fait tant d'aller retour entre les laboratoires et les sites. Je lui ai promis de faire des sorties pour voir les orchidées, une sortie pour chaque séance de microscope.

J'exprime aussi mes remerciements à Mr ALLILI, Mr MADIOU, Mr AIRED, Mr SOUAB, Mr LOUNACI, Mr HADJ KACI et Kamel SIFER, qui répondaient présents à chaque fois que je les ai sollicité.

Je remercie Pr Salima BENHOUHOU et Pr DJILI de l'ENASA pour leur aide et conseils.

Merci à Mr Hocine DOUFENE qui m'a recommandé auprès du Pr Omar BESSAOUD qui m'a accueilli au CIHEAM de Montpellier, ce qui m'a permis de rencontrer des chercheurs en France.

Je remercie Philippe HINSINGER de l'INRA de Montpellier, Bruce VELDE et Pierre BARRE du laboratoire de géologie de l'ENS de Paris, Jacques RANGER, C. NYS et Bernd ZELLER de l'INRA Nancy, pour leur accueil et pour leurs passionnantes discussions sur le phosphore et les sols.

Une pensée pour le regretté Jean Claude FARDEAU, qui m'a aidé depuis le magister et surtout pour m'avoir initiée à la méthode isotopique.

Merci à Zohra BOUZELHA et Sophia MOUAS avec lesquelles j'ai beaucoup travaillé, Nacira ZERROUKI, KADI Amar, Malika MOUFFOK, Boussad METNA, Djafar SMAIL, Kamel MEROUKI et Amine LARBI qui n'ont pas cessé de me soutenir dans les moments de découragement.

Je remercie Djamila ISSAOUN, Kahina SIAD, Malika YAHIAOUI pour leur aide et leur gentillesse. Redouane du département des Sciences du Sol de l'ENSA El Harrach.

Je n'oublierai pas le soutien, l'hospitalité et la gentillesse des familles BELABBAS Djarphar et HAMIDOUCHE Achour, lors de mes stages en France, merci à Zahia et Zohra.

Merci à tous les étudiants (es) de Pédologie qui ont participé activement, sur le terrain et au laboratoire lors de la réalisation de leur mémoire d'ingénieur, à la réalisation des différentes parties de ma thèse. Toutes ces personnes que j'ai eu la chance de rencontrer et avec qui j'ai travaillé, m'ont permis d'évoluer et je les en remercie. Pardon à ceux qui m'ont entendu râler après le colorimètre, le distillateur, la granulométrie, les produits chimiques, préparation des sorties et conditionnement des échantillons et qui ont su me supporter et me soutenir.

Je remercie tous les agriculteurs qui nous ont autorisé l'accès dans leurs vergers afin d'échantillonner les sols, les feuilles et les fruits à tout moment, je n'oublierai jamais leur respect particulièrement Mr HALLADJ et Mr YEFSAH, mes excuses par avance à ceux que j'aurais oublié.

Je dois beaucoup à ma famille, ma sœur, Zahra pour leur soutien indéfectible.

A ma mère

Liste des Tableaux

Tableau II.1. Moyenne des précipitations mensuelles de Tizi-Ouzou pour la période de 1995–2009.....	54
Tableau II.2. Moyenne des précipitations mensuelles de Bouira pour la période de 1995–2009.....	54
Tableau II.3. Températures mensuelles maximales, minimales et moyennes de la région de Tizi-Ouzou.....	54
Tableau II.4. Températures mensuelles maximales, minimales et moyennes de la région de Bouira.....	54
Tableau II.5. Caractéristiques des différentes stations étudiées.....	57
Tableau III.1. Caractéristiques des sols globaux et rhizosphériques des 17 stations étudiées.....	72
Tableau IV.1. Recommandation standard en N.P.K (Sopib, 2009).....	90
Tableau IV.2. Plan de fumure.....	93
Tableau IV.3. Répartition des doses d’engrais dans le dispositif expérimental.....	94
Tableau IV.4 : Caractéristiques chimiques des deux fractions du sol.....	97
Tableau V.1. Caractéristiques des oliveraies étudiées.....	111
Tableau V.2. Propriétés physiques et chimiques des sols étudiés.....	114
Tableau V. 3. Résultats d’analyse de variance de l’effet station sur les symbiotes.....	125
Tableau VI.1. Abondance moyenne des invertébrés dans les trois oliveraies.....	136
Table1. Characteristics of the three studied sites.....	141
Table2. Mean (standard error) soil characteristics of the 6 studied groves.....	142
Table3. Results (F values) of 3-factors analyses of variance performed on log transformed macro-invertebrate densities.....	143
Table4. Mean density (+/- SEM) of macro-invertebrates in studied orchards.....	145
Tableau VII.1. Données de base sur les sites étudiés.....	151
Tableau VI.2. Caractéristiques pédologiques des vergers étudiés.....	153
Tableau VI.3. Caractéristiques physique, chimiques et biochimiques des sols des deux espèces.....	155

Liste des figures

Figure I.1. Cycle annuel de l'olivier (Leal, 2009).....	9
Figure I.2. Processus physiologiques et chimiques influençant l'assimilation et la transformation du P dans la rhizosphère (Richardson 1994 in Richardson et <i>al.</i> , 2010).....	16
Figure I. 3. Cycle du phosphore dans le sol (Fardeau et Conesa, 1994).....	17
Figure I.4. Fonctionnement de l'endoderme lors de la nutrition minérale (Nabors, 2009).....	19
Figure I. 5. Symptômes de carence en phosphore sur les feuilles de l'olivier.....	20
Figure I.6. Interface sol-racine (Monrozier et Bally, 2002).....	21
Figure I. 7. (A) poils absorbants d'une racine de radis ; (B) capacité des poils absorbants à pénétrer les espaces capillaires délimités par les particules de sol ; (C) prospection et augmentation du volume de sol extractible par les racines (Charpentier et <i>al.</i> , 2008).....	22
Figure I. 8. A- coupe d'une racine de blé et de sa rhizosphère ; B- interface racines-sol de la digitale (<i>Digitaria sanguinalis</i>), les poils absorbants sont clairement visibles en contact intime avec les particules du sol (Mc Cully,1995).....	23
Figure I. 9. Schéma des exsudations racinaire par diffusion passive (Nguyen, 2007).....	25
Figure I.10. Sécrétion du mucilage par l'apex d'une racine primaire de maïs de 1mm de diamètre observée pendant 1, 3 et 9 minutes (Waligora, 2010).....	26
Figure I.11. Représentation schématique des fonctions de la racine impliquées dans les modifications des propriétés physiques dans la rhizosphère (Hinsinger et <i>al.</i> , 2005).....	28
Figure I.12. Représentation schématique des fonctions de la racine impliquées dans les modifications des propriétés chimiques dans la rhizosphère (Hinsinger et <i>al.</i> , 2005).....	29
Figure I.13. Carte du pH rhizosphérique d'une racine de colza (Les zones d'acidifications avec un pH inférieur à 5.7 représentées en rouge et les zones d'alcalinisation avec un pH supérieur à 6.9 en bleu. Image en couleur fausse; échelle 1cm (longueur de l'apex) (Jaillard et Hinsinger, 1993).....	30
Figure I.14. Schéma des dialogues moléculaires au niveau de la rhizosphère (Besserer, 2008).....	32

Figure I.15. Rôle des mycorhizes dans le sol (Malloch, 2003).....	33
Figure I.16. Principales formes de mycorhizes (Le Tacon, 1985).....	34
Figure I.17. Colonisation d'une racine par des endomycorhizes à vésicules et à arbuscules.....	36
Figure I.18:a) Formation d'appressorium et pénétration (Reinhardt et Didier, 2007) et b) Arbuscule occupant la cellule (Reinhardt et Didier, 2007).....	37
Figure I.19. Champignons endomycorhigènes (<i>Glomus</i> sp.) au microscope photonique, arbuscules (A) et vésicules (V).....	37
Figure I.20. Schéma des processus d'échanges lors d'une symbiose mycorhizienne (Duhoux et Nicole, 2004).....	38
Figure I.21 : a) effet des mycorhizes sur la croissance de l'olivier après 16 semaines ; b). stress hydrique de 2 mois sur oliviers de 4 mois, sans et avec traitement mycorhizien (de Rougemont, 2007).....	41
Figure I.22. Hyphe septé et foncé et microsclérotés d'une racine de pin (Horton et <i>al.</i> , 1998).....	42
Figure I.23. Rôle des invertébrés du sol dans l'écosystème terrestre (I.R.D., 2010).....	44
Figure II. 1. Situation géographique des régions d'études.....	53
Figure II.2. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (a) région de Tizi-Ouzou et (b) Bouira.....	55
Figure II.3. Comparaison de l'intensité de la couleur d'une série de dosage du phosphore assimilable.....	61
Figure III.1. Etat des oliveraies de Kabylie.....	64
Figure III.3 : a)Variation de pH ; b) de taux de calcaire ;c)de la teneur en carbone organique d) de la capacité d'échange cationique et e) de l'azote totale dans les sols globaux et rhizosphériques des différentes stations.....	75
Figure III.4. Variation du taux de P assimilable des sols globaux et rhizosphériques.....	76
Figure III.5. Variation du taux de P assimilable des sols globaux et rhizosphériques.....	77
Figure III.6. Variation du taux de phosphore total des sols globaux et rhizosphériques des différentes oliveraies.....	79
Figure III.7. Variation du phosphore foliaire dans les oliveraies.....	81

Figure IV.1. Utilisation des NPK dans la plante (Vanhaecke, 2006).....	88
Figure IV.2. Gestion de la rhizosphère pour maximiser les processus d'acquisition des nutriments dans l'interface racinaire afin d'augmenter la productivité (Zhang et al., 2010).....	91
Figure IV.3. Photo aérienne de l'olivieraie fertilisée.....	92
Figure IV.4. Schéma du dispositif expérimental dans l'olivieraie de Tizi Rached A.....	93
Figure IV.5. Variation de la densité racinaire après apport des engrais : a) arbre témoin, b) arbre traité avec la D3.....	95
Figure IV.6. Enrichissement des sols rhizosphérique en : a) pH; b) carbone organique ; c) azote total ; d) N-NH_4^+ ; e) N-NO_3^- et f) et en N minéral dans les deux fractions du sol.....	99
Figure IV.7. Appauvrissement de la rhizosphère en : a) phosphore total et b) phosphore assimilable.....	103
Figure IV.8 : a) relation entre NH_4^+ G et NH_4^+ Rh et b) Nmin rh et $\text{N-NO}_3\text{rh}$	104
Figure IV.9. Relation entre : a) P total G et P total Rh ; b) P total G et P assimilable Rh ; c) P assimilable G et P assimilable Rh et d) P total Rh et P assimilable Rh.....	105
Figure V. 1. Conservation des racines dans l'éthanol à 70°.....	112
Figure V. 2. Schématisation de la méthode d'observation et de calcul de la fréquence de colonisation par les champignons mycorrhizogènes et les champignons fongés septés.....	113
Figure V.3. Coupe transversale d'une racine mycorhizée [0.5-1]mm olivieraie de Bouira (Gx742).....	115
Figure V.4 . Différentes structures caractéristiques des mycorhizes à arbuscules dans les racines de l'olivier : a) Vésicules portées par des hyphes mycéliens sur un fragment racinaire (G x 40), b) Vésicules de formes variables et hyphes mycéliens d'un fragment de racine (G x 400), c) Formation d'appressoria sur la surface d'une racine et enroulement intracellulaire d'hyphes mycéliens (G x 68,25), d) Arbuscules collapsés à l'intérieur de cellules corticales (G x 400). Ap : Appressoria, H : Hyphe mycélien, He : Hyphe enroulé à l'intérieur de la cellule, V : Vésicule.....	116
Figure V.5. Différentes structures des champignons mycorrhizogènes et fongés et septés observés dans les racines de l'oliveraie de Guendoul : a) enroulement intracellulaire d'hyphes du champignons mycorrhizogène G x400, b) formation de sclérotés associées aux filaments du champignon mycorrhizogène Gx400 et c) champignon fongé et septé d'un fragment racinaire Gx100.....	117
Figure V.6. Différentes structures de champignons dans la station de Nezla : a) formation d'un arbuscule à l'intérieur d'une cellule racinaire Gx 400, b) les sclérotés du champignon fongé et septé	

d'un fragment racinaire Gx 400 et **c)** association des filaments mycorhiziens avec le champignon foncé septé.....118

Figure V. 7. Colonisation du système racinaire des oliviers de Tizi Rached Y par les différentes structures des champignons mycorrhizogènes à arbuscule et des endophytes foncés et septés : **a)** arbuscules intracellulaires d'une jeune racine Gx 400, **b)** formation d'une ramification racinaire Gx 100 et **c)** évolution du champignon foncé septé au sain d'une racine Gx 100.....119

Figure V. 8. Champignons des racines des oliviers de la station de Bouira : **a)** évolution des filaments dans les racines Gx 400, **b)** enroulement des hyphes du champignon mycorrhizogène dans les cellules corticales Gx400, **c)** arbuscules dans les cellules du cortex Gx 1000 et **d)** vésicule intracellulaire Gx 1000.....121

Figure V. 9. Moyennes des taux d'infection par les champignons mycorrhizogènes à arbuscules (MA) et par les Endophytes foncés et septés dans les stations étudiées.....123

Figure V.10. Variation du taux de mycorhization dans les différents vergers.....126

Figure VI.1. Répartition des macro invertébrés dans par niveau les sols sous olivier.....137

Figure VII.1. Caractéristiques chimiques des sols globaux et rhizosphériques des deux espèces a) pH (a), CaCO_3 (b), CEC (c) et Carbone (d).....158

Figure VII. 2. Variation de l'azote total des sols de l'olivier et du figuier.....159

Figure VII. 3. Potassium assimilable dans la rhizosphère de l'olivier et du figuier.....159

Figure VII.4. Variation des teneurs en phosphore dans les sols rhizosphériques et les sols globaux sous l'olivier et figuier, a) POls ; b) Pt.....161

Figure VII.5. Relation entre : a) l'azote total global et l'azote rhizosphérique ; b) l'argile global et l'argile rhizosphérique et c) variation du calcaire et du pH dans les sols rhizosphériques.....163

Figure VII.6. Relation entre ; a) le POls global et le POls rhizosphérique et b) le Ptot global et le Ptot rhizosphérique.....164

Figure VII.7. Amélioration de la teneur en l'azote total à proximité des racines du figuier.....164

Figure VII.8 Enrichissement de la rhizosphère du figuier en phosphore assimilable.....165

Figure VII.9. Variation du phosphore total des sols rhizosphériques de l'olivier et du figuier.....165

Figure VII.10. Variation du phosphore soluble des sols rhizosphériques.....166

Figure VII.11. ACP de l'interaction des caractéristiques physico-chimiques et la biomasse racinaire.....168

Valorisation des travaux

Les résultats obtenus durant cette thèse ont fait objet de :

Publications nternationales

1. Hierarchization of factors driving soil macrofauna in north Algeria groves.

Biotechnology Agronomy Society Environement, BASE 2014, 18 (1).

Auteurs : **Boudiaf Nait Kaci Malika**, Hedde Mickaël, Mouas Bourbia Sophia , Derridj Arezki

2. Potassium status in bulk and rhizospheric soils of olive groves in north Algeria.

Geoderma 197-198 (2013) 161-168.

Auteurs : Sophia Mouas Bourbia, Pierre Barré, **Malika Boudiaf Nait Kaci**, Arezki Derridj , Bruce Velde.

Communications internationales

1. **Boudiaf Nait Kaci M.**, Mouas-Bourbia S. et Derridj A.

Influence des propriétés physiques et chimiques des sols sur la répartition de la pédofaune sous oliveraies de Kabylie Nord de l'Algérie. AFES-INH,2007, Actes des 9es Journées Nationales de l'Etude des sols, 3-4-5-2007. Institut National d'Horticulture UMR SAGAH, ANGERS. J.P. Rossignol ed.363-364pp.

2.Mouas-Bourbia S., Bouzelha-Belabbas Z., **Boudiaf Nait Kaci M.**, Daoud Y., Derridj A. N et K distribution in Olea europea's rhizosphere. Rhizosphère 2 International Conférence Montpellier-France 26-31 August 2007.

3. **Boudiaf NaitKaci M.**, Mouas-Bourbia S., Daoud Y. et Derridj A.

Dynamic of phosphorus in Olea europea's rhizosphere. Rhizosphère 2 International Conférence Montpellier-France 26-31 August 2007.

4. **Boudiaf Nait Kaci M.**, Mouas-Bourbia S., Daoud Y. et Derridj A.

Variation des propriétés physico-chimiques de la biodisponibilité du phosphore dans les sols sous oliveraies. 9th International Meeting on Soils with Mediterranean Type of Climate IUSS – AFES. Du 22 au 25 octobre 2007, Aix-en-Provence, Bouches-du-Rhône.

5. Mouas-Bourbia S., Mouffok M., **Boudiaf Nait Kaci M.**, Daoud Y. et Derridj A.

Altération des phyllo silicates en relation avec la libération du potassium non échangeable dans la rhizosphère de l'olivier. 9th International Meeting on Soils with Mediterranean Type of Climate IUSS – AFES. Du 22 au 25 octobre 2007, Aix-en-Provence Bouches-du-Rhône.

6. Mouas-Bourbia S., **Boudiaf Nait Kaci M.**, Daoud Y. et Derridj A.

Modification des propriétés chimiques et de la biodisponibilité du potassium dans les sols rhizosphériques et globaux sous oliveraies du nord de l'Algérie (Kabylie). 9th International Meeting on Soils with Mediterranean Type of Climate IUSS – AFES. Du 22 au 25 octobre 2007, Aix-en-Provence (Bouches-du-Rhône).

7.**Boudiaf Nait Kaci M.**, Mouas-Bourbia S., Korriche D., Slamani F. et Derridj A.

Variation saisonnière de la faune du sol sous oliveraies et figueraies, impact des propriétés physiques et chimiques sur la biodiversité. 1^{ères} Journées Nationales d'Agronomie sur les sols de l'Algérie. Etat actuel des connaissances et perspectives de recherche. Du 02 au 03 juin

2009. Université 20 Aout 1955 de Skikda Algérie.

8. Boudiaf Nait Kaci M., Mouas-Bourbia S. et Derridj A.

Biodisponibilité du phosphore dans la rhizosphère en relation avec l'espèce. Cas de l'olivier et du figuier. 1^{ères} Journées Nationales d'Agronomie sur les sols de l'Algérie. Etat actuel des connaissances et perspectives de recherche. Du :02 au 03 juin 2009. Université 20 Aout 1955 de Skikda, communication orale.

9. Boudiaf Nait Kaci M., Mouas Bourbia S. et Derridj A.

Biodisponibilité du phosphore dans la rhizosphère de l'olivier sous climat semi-aride : Cas de trois oliveraies de Ain-Ouassara Wilaya de Djelfa. Séminaire international sur la protection et préservation des écosystèmes sahariens « 1ECO-SYS09 ». Université Kasdi Merbah Ouargla. Du 13 au 15 décembre 2009. Communication orale.

10. Mouas Bourbia S., Boudiaf Nait Kaci M., Yahiaoui M., Kiouas H., Issaoun D. et Derridj A.

Propriétés chimiques et biodisponibilité de l'azote et du potassium dans la rhizosphère de l'olivier dans un agrosystème aride. Séminaire international sur la protection et préservation des écosystèmes sahariens « 1ECO-SYS09 ». Université Kasdi Merbah Ouargla. Du 13 au 15 décembre 2009. Communication affichée

11. Boudiaf Nait Kaci M., Mouas-Bourbia S., Saadoun-Smail N. et Derridj A.

Effet de la mycorhization de l'olivier (*Olea europea* L.) et du figuier (*Ficus carica* L.) sur la rhizosphère dans la région de Bouira (Algérie). 1^{er} Congrès International : Symbiose Mycorhizienne, Ecosystèmes & Environnement en Milieu Méditerranéen (MYCOMOD) du 11 au 13 Octobre 2010 Marrakech - Maroc

12. Boudiaf Nait Kaci M., Hedde M. et Derridj A.

Effet du climat sur l'abondance des bioindicateurs des sols des oliveraies : Cas des vergers de Tizi-Ouzou - Bouira – Djelfa. Colloque international sur la «Biosurveillance des Écosystèmes». Université Ibn Khaldoun Tiaret 11-12 mars 2012.

13. Boudiaf Nait Kaci M. ; Hedde M., Renouf E., Mouas-Bourbia S., Derridj A.

Dynamique saisonnière des macroinvertébrés des sols de vergers Kabyles : Effet du climat. Communication affichée, 11^{èmes} Journées d'Etude des Sols, Versailles (France) du 19 au 23 Mars 2012.

14. Boudiaf Nait Kaci M., Bouhired L., Siad K. et Derridj A.

Détermination des mycorhizes sous une jeune oliveraie (*Olea europea* L.) au nord de l'Algérie JFM Nancy le 05/06/07 Septembre 2012.

Communications nationales

1. Mouas-Bourbia S., Boudiaf Nait Kaci M. , Bouzelha-Belabbas Z., Daoud Y. et Derridj A., 2005. Variation du taux de matière organique et de quelques propriétés physiques et chimiques de sols rhizosphériques et globaux sous oliveraies . Impact sur le stockage du carbone dans le sol. 2^{ème} Séminaire Scientifique et Technique sur l'Environnement UMM Tizi-Ouzou.

2. Boudiaf Nait Kaci M., Mouas-Bourbia S , Gharbi K , Messaoud N. , Daoud Y. et Derridj A., 2006 Variation des propriétés physiques, chimiques et de la biodisponibilité du phosphore dans la rhizosphère de l'olivier. 3^{ème} Séminaire Scientifique et Technique sur

l'Environnement UMMTO Tizi-Ouzou.

3. Mouas-Bourbia S., **Boudiaf Nait Kaci M.**, Charef K. , Merouane K., Daoud Y. et Derridj A., 2006. Impact de la racine de l'olivier sur les propriétés physiques et chimiques des sols et la distribution du potassium. 3^{ème} Séminaire Scientifique et Technique sur l'Environnement UMMO Tizi-Ouzou.

4. Mouas-Bourbia S., **Boudiaf Nait Kaci M.**, Bouzelha-Belabbas Z., Derridj A. Variation du taux de matière organique et de quelques propriétés physiques et chimiques du srh et nrh sous olivier. 2^{ème} Séminaire scientifique et technique sur l'environnement. 05 et 06 juin 2005 Faculté des sciences biologiques et agronomiques U.M.M.T.O.

5. Mouas-Bourbia S., **Boudiaf Nait Kaci M.**, Charef K., Merouane K. et Derridj A., Impact de la racine d'olivier sur les propriétés physiques et chimiques des sols et sur la distribution du potassium. 3^{ème} Séminaire scientifique et technique sur l'environnement. 05 et 06 juin 2006. Faculté des sciences biologiques et agronomiques U.M.M.T.O.

Liste des abréviations

Les sites d'étude

Fre : Fréha

Nez : Nezla

Bou OEB : Bouira Oued El Berdi

Bou SZ : Bouira Sidi Ziane

Tir : Tirmatine

Bdla : Beni Douala

YakH : Yakouren Halladj 1

Tizi Rached Aired : TRA

Tizi Rached Yefsah : TRY

ThC : Thiniri colline Thiniri plaine

Ay 1 : Assi Youssef1

Ay 2 : Assi Youssef2

OuaP : Ouadhia plaine

OuaC : Ouadhia coline

Guen : Guendoul

Caractéristiques des sols.

Rh : sol rhizosphérique.

NRh : sol non rhizosphérique

G : sol global : sol distal

P : phosphore

POls : phosphore assimilable dosé par la méthode Olsen

Pt : phosphore total.

Psol : Peau : phosphore soluble extrait avec l'eau.

Pf : phosphore foliaire.

C : Carbone organique.

A% : Argiles.

W.R.B. : World Reference Base

Groupes d'invertébrés

ARA : Arachnides

CHI : Chilopodes

COL : Coléoptères

DIP: Diptères

GAS: Gastéropodes

HET: Héteroptyères

HOM: Homoptères

HYM: Hyménoptyères

ISO: Isopodes

LEP: Lepidoptères

OPI: Opillions

ORT: Ortoptyères

VDT : Vers de terre

DSE : Dark septate endophyte

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I. Synthèse bibliographique

1. Cadre de l'étude : La rhizosphère de l'olivier.....	5
1.1. Présentation de l'olivier.....	5
1.2. Production oléicole nationale.....	6
1.3. Rôle socio-économique.....	6
1.4. Gestion durable	6
1. 5. Question scientifique.....	7
2. Classification botanique de l'olivier.....	8
2.1. Caractéristiques de l'olivier.....	8
2.1.1. Cycle végétatif de l'olivier	8
2.1.2. Le système racinaire de l'olivier	9
2.1.3. Exigences de l'olivier.....	10
2.2. Exigences nutritionnelles en éléments majeurs.....	10
2.2.1. L'azote.....	11
2.2.2. Le potassium.....	11
2.2.3. Le phosphore.....	12
2.3. Fertilisation de l'olivier.....	13
3. Cycle biogéochimique du phosphore dans un agrosystème.....	14
3.1. Sources minérales du phosphore.....	14
3.2. Cycle du phosphore.....	15
3.2.1. Phosphore adsorbé sur les hydroxydes de fer et d'aluminium.....	15
3.2.2. Phosphore minéral.....	15
3.2.2.1. Phosphore cristallisé avec le fer, l'aluminium et le calcium.....	15
3.2.2.2. Phosphore inclus.....	16
3.2.3. Phosphore organique.....	17
3.2.4. Minéralisation du phosphore organique.....	18
3.3. Absorption du phosphore par les racines.....	18
3.4. Carences en phosphore.....	19
4. Interface sol-racine : La rhizosphère.....	20
4. 1. Définition de la rhizosphère.....	21
4.2. Interception racinaire.....	23
4.3. Ampleur spatiale de la rhizosphère.....	24
4.4. Fonctions de la rhizosphère.....	24
4.4.1. La rhizodéposition et l'effet rhizosphérique.....	24
4.4.2. Les exsudations.....	25
4.4.3. Les lysats.....	26
4.4.4. Les mucilages.....	26
4.5. Impact de l'activité racinaire sur la rhizosphère.....	27
4.5.1. Les modifications des propriétés physiques.....	27

4.5.2. Les modifications des propriétés chimiques.....	28
5. Biologie de la rhizosphère.....	31
5.1. Les associations symbiotiques.....	32
5.2. La mycorrhizosphère.....	33
5.2.1. Les mycorhizes.....	34
5.2.2. La symbiose mycorhizienne.....	34
5.2.3. Différents types de mycorhizes.....	34
5.2.3.1. Les ectomycorhizes.....	35
5.2.3.2. Les endomycorhizes	35
5.2.3.3. Les ectendomycorhizes.....	37
5.2.4. La mycorhization et l'amélioration de la nutrition minérale.....	37
5.2.4.1. Amélioration de la nutrition phosphatée.....	38
5.2.4.2. Amélioration de la nutrition azotée et potassique.....	38
5.2.4.3. Amélioration de la nutrition hydrique.....	39
5.2.4.4. Production d'hormones.....	39
5.2.4.5. Résistance au calcaire et à la salinité.....	39
5.2.4.6. Protection contre les polluants et les pathogènes.....	39
5.2.4.7. Amélioration de la structure du sol.....	40
5.2.5. Les mycorhizes chez l'olivier.....	40
5.2.5.1. Endomycorhization contrôlée et croissance chez l'olivier.....	40
5.2.5.2. Endomycorhization et résilience au stress hydrique chez l'olivier.....	41
5.3. Les endophytes (DSE).....	42
5.4. Faune du sol.....	43
6. Influence des espèces sur la rhizosphère : cas de l'olivier / figuier.....	45
7. Le figuier.....	46
7.1. Classification botanique du figuier.....	46
7.2. Exigences écophysologiques du figuier.....	47
7.3. Morphologie et cycle végétatif du figuier.....	47
8. Objectifs de la thèse.....	48
9. Démarche suivie.....	50

Chapitre II. Matériels et méthodes

1. Les sites étudiés.....	52
1.1. La géologie des régions d'étude.....	52
1.2. Le climat.....	52
1.2.1. La pluviométrie.....	53
1.2.2. Les températures.....	54
1.2.3. L'évapotranspiration.....	55
1.2.4. Le diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen.....	55
2. Choix des vergers d'échantillonnage.....	55

2.1. Les oliveraies.....	56
2.2. Les figueraies.....	56
3. Les sols étudiés.....	56
3. 1. Les observations « in situ » et les descriptions.....	56
3.2. Le matériel végétal.....	58
3.3. La faune du sol.....	58
3.4. Les analyses au laboratoire et les méthodes utilisées.....	59
3.4.1. La granulométrie.....	59
3.4.2. pH eau	59
3.4.3. Calcaire total.....	59
3.4.4. Le carbone organique	59
3.4.5. La capacité d'échange cationique.....	60
3.4.6. Les formes d'azote.....	60
3.4.7. Les formes phosphatées dans le sol.....	61
3.4.8. Phosphore foliaire.....	62
3.4.9. Dénombrement de la faune des sols.....	62
3.4.10. Etude des racines... ..	62
3.5. Analyses statistiques	62

Chapitre III. Evaluation du statut phosphaté des oliveraies: Relation formes de phosphore dans la rhizosphère et diagnostique foliaire

Introduction	64
I. Matériel et méthodes.....	67
I. 1. Echantillonnage des sols et du végétal.....	67
I.2. Analyses des sols et du végétal.....	68
I.3. Analyses statistiques.....	69
II. Résultats	70
II.1. L'analyse physique.....	70
II.2. Résultats des analyses chimiques et l'effet rhizosphérique.....	70
II.2.1. Le pH	70
II.2.2. Calcaire total.....	71
II.2.3. Le carbone organique.....	71
II.2.4. La capacité d'échange cationique	73
II.2.5. L'azote total.....	74
II.3. Distribution des formes du phosphore dans la rhizosphère de l'olivier.....	76
II.3.1. Le phosphore soluble dans l'eau.....	76
II.3.2. Le phosphore assimilable Olsen.....	77
II.3.3. Le phosphore total.....	79
II.3.4. Phosphore foliaire	80
II.4. Impacts sur les pratiques culturales.....	81
III. Conclusion et perspectives.....	81

Chapitre IV. Variation du phosphore biodisponible à l'interface sol-racine de *Olea europaea* après application d'engrais phosphatés

Introduction.....	85
I. La fertilisation.....	86

I.1. Fertilisation phosphatée.....	86
I. 2. Les engrais.....	87
I. 2. 1. Caractéristiques des engrais minéraux	87
I. 2. 2. Emploi d'engrais minéraux	87
I. 2. 3. Facteurs influençant l'application des engrais.....	88
I. 2. 4. Efficience des engrais.....	88
I. 3. Fertilisation de l'olivier.....	89
I. 3. 1. La fertilisation d'implantation	90
I. 3. 2. La fertilisation de culture	90
I. 3. 3. La fertilisation de production	90
I. 4. Fertilisation et gestion de la rhizosphère	90
II. Présentation de l'oliveraie fertilisée.....	91
III. Matériel et méthodes.....	92
III.1. Plan de fumure.....	92
III. 2. Le mode d'apport de la fumure.....	93
III. 3. Le dispositif expérimental.....	93
III. 4. Echantillonnage.....	94
IV. Analyses des échantillons.....	94
V. Analyses statistiques.....	94
VI. Résultats et discussion.....	95
VI.1. Effet de la fertilisation sur le système racinaire	95
VI.2. Résultats de l'analyse chimiques des sols	96
VI.2.1. Effet des doses d'engrais sur les propriétés de la rhizosphère	96
VI.2.2. Effet racine sur la rhizosphère après fertilisation	98
VI.2.3. Appauvrissement de la Rh en phosphore après application des engrais	101
VI. 2. 4. Intérêt agronomique de la localisation des engrais pour les oliveraies	106
VII. Conclusion.....	108

Chapitre V. Identification des symbioses dans la rhizosphère de l'olivier

1.Introduction	109
2. Matériels et méthodes	111
2.1. Echantillonnage des racines.....	111
2.2.Tri et conservation des racines	111
2.3.Coupes anatomiques	112
2.4.Technique de coloration de Philips et Hayman	112
2.5.Ecrasement et observation des racines.....	113
2.6.Estimation des pourcentages de colonisation par les champignons MA et FS	113
2.7. Caractéristiques physique et chimique des sols.....	114
2.8.Analyse statistique.....	114
3. Résultats et discussion	114
3.1. Propriétés physiques et chimiques des stations étudiés	114
3.2. Observation des coupes anatomiques des racines de l'olivier	115
3.3. Observations des racines colorées avec la technique de Philips et Hayman.....	116
3.4. Calculs des taux d'infection par les champignons MA et par le champignon FS.....	122
4. Importance de la colonisation des racines de l'olivier par les champignons mycorrhizogènes.....	122
5..Incidence du mutualisme sur le statut phosphaté de l'olivier.....	126

5.1 .Les MA	126
5.2.Les EFS	128
6.Approche écologique de la mycorhization au niveau des sols étudiés	129
7. Conclusion	131

Chapitre VI. Biodisponibilité du phosphore dans la rhizosphère de l'olivier en relation avec les macroinvertébrés du sol

A. Etude 1 : Abondance des macroinvertébrés dans les sol sous olivier

1. Introduction.....	133
2. Matériels et méthodes	135
2.1. Echantillonnage des sols et de la faune	135
2.2. Analyse statistique.....	135
3. Résultats et discussion.....	135
3.1. Abondance de la macrofaune du sol dans les vergers d'olivier.....	135

B. Abondance des macroinvertébrés dans les sol en relation avec l'espèce : Hierarchization of factors driving soil macro fauna in North Algeria groves

1. Introduction	140
2. Material and methods	141
2.1. Study sites	141
2.2. Soil sampling and characterisation.....	141
2.3. Invertebrate sampling and identification.....	141
2.4. Statistical analyses.....	142
3. Results	142
3.1. Soil characteristics.....	142
3.2. Macro-invertebrate density and diversity	142
4. Discussion.....	143
4.1. Hierarchy of factors	143
4.2. Effects on macro fauna groups	144
5.Conclusion	148

Chapitre VII. Biodisponibilité du phosphore dans la rhizosphère en relation avec l'espèce : cas de l'olivier et figuier

1. Introduction	149
2. Matériel et méthodes	150
2.1. Sites étudiés et échantillonnage des sols	150
2.2. Echantillonnage des racines	151
2.3. Analyse au laboratoire.....	152
2.3.1. Analyse des sols.....	152
2.3.2. Etude des racines.....	152
2.4. Analyse statistique.....	152
3. Résultats et discussion.....	153
3.1. Variation des propriétés du sol sous les différents vergers.....	153
3.2. Impact de la racine sur les propriétés physique et chimiques des sols.....	154
3.3. Impact de l'activité racinaire sur le statut phosphaté de la rhizosphère	160
3. 4. Comparaison entre les sols des deux espèces.....	162
3.5. Biomasse racinaire des deux espèces	166
3.6. Coupes anatomiques réalisées sur les racines d'oliviers et de figuiers	169

3.7. Approche écologique de la mycorhization au niveau des sols étudiés	170
4. Conclusion	171
Discussion générale et perspectives.....	172

Références Bibliographiques

Article en en co-auteurs

Introduction Générale

L'olivier (*Olea europea* L.) est une espèce rustique qui connaît un regain d'intérêt en Algérie. Il s'adapte parfaitement aux étés longs et secs, avec une importance socio-économique considérable, étant donné sa place dans la vie quotidienne des populations (Ruano et *al.*, 2004 ; Santos et *al.*, 2007 ; Fayez et *al.*, 2011). Utilisé pour définir l'aire climatique méditerranéenne, l'olivier fait figure d'élément vivace dans les mentalités et représentations de cette région (Angles, 2001 ; Benhayoun et *al.*, 2007).

Avec 98 % des oliveraies qui existent dans le monde, le pourtour Méditerranéen rassemble aujourd'hui l'essentiel de la production mondiale d'huile d'olive (Ogerbri, 2003). Les vergers oléicoles ont été longtemps marginalisés et la baisse des rendements enregistrés ne manque pas d'être inquiétante. L'oliveraie algérienne subit des contraintes diverses limitant la production, telle que les incendies, le vieillissement des arbres, l'irrégularité des facteurs météorologiques, le manque d'entretien des vergers, la fertilisation peu maîtrisée, particulièrement la phosphatée, et le non-respect du calendrier de lutte contre les parasites (Mabel, 2007).

Le phosphore (P) est un élément essentiel pour tous les organismes vivants. Chez les végétaux, il joue un rôle majeur dans de nombreux processus biologiques comme la croissance, la photosynthèse et la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique (Frossard et *al.*, 2004). C'est un élément chimique indispensable dans le vivant, il est porteur d'informations génétiques en particulier dans les acides nucléiques, les molécules responsables du transfert biochimique d'énergie et les phospholipides qui constituent les membranes cellulaires. De ce fait, le phosphore a plusieurs rôles agronomiques, en plus d'activer la croissance des bourgeons et des racines, il stimule la synthèse des glucides et leurs mises en réserve dans les graines et les fruits. C'est un facteur de précocité et de résistance au froid (Attiwill et Adams, 1993 ; Comeford et *al.*, 2002).

Le phosphore est un élément nutritif essentiel pour les plantes au même titre que l'azote et le potassium. Il est toutefois un élément critique à cause de sa faible concentration dans le sol (teneur moyenne 600 ppm de P total) et de faible solubilité (moyenne 0,05 mg P.L⁻¹ de solution du sol). Il existe dans le sol sous des formes organiques et inorganiques. Les formes inorganiques sont associées à des composés amorphes ou cristallins d'aluminium et de fer dans les sols acides et à des composés de calcium dans les sols alcalins. Les formes de P organiques sont associées à la matière organique du sol. Ainsi, les ressources minérales en phosphore peuvent être importantes mais peu biodisponibles dans les sols, présentant ainsi des pouvoirs fixateurs très élevés (Aerts et Chapin, 2000 ; Achat, 2009).

Le phosphore limite la production végétale dans de nombreux sols, la solution appliquée depuis longtemps est l'utilisation de fertilisants. Des essais de fertilisation conduits dans différents agrosystèmes ont montré qu'un apport de phosphore permettait d'augmenter la croissance des arbres. En effet, la raréfaction des ressources en phosphore alliée à l'augmentation des besoins des cultures rendent nécessaire la valorisation d'autres sources de phosphore. Dans ce contexte de limitation des intrants en phosphore dans les sols déficients, il est nécessaire de raisonner différemment la production végétale. Une voix repose sur le concept d'intensification écologique, selon lequel il s'agit d'utiliser les organismes du sol et de l'agrosystème pour accroître la biodisponibilité de cet élément pour la plante. Pour cela, de nombreuses études menées sur l'olivier ont été consacrées à son adaptation aux différents bioclimats et à l'effet du stress hydrique. Mais bien peu de travaux à notre connaissance se sont intéressés à l'étude des processus *in situ* dans la rhizosphère de l'olivier. A l'instar, des travaux qui ont déjà montré que les paramètres du sol présentent des corrélations significatives avec la canopée et le diamètre de l'arbre chez cette espèce. Néanmoins, la biodisponibilité du phosphore du sol de l'agrosystème oliveraie reste peu connue. Or, cette évaluation est indispensable, car elle représente la base des recommandations visant à maintenir la fertilité des sols et la production de biomasse, tout en limitant les apports afin de respecter l'environnement. Cette déficience est principalement liée à une pratique de fertilisation inexistante. En sol fertile équilibré, les besoins de l'olivier en phosphore, dont l'alternance est maîtrisée, sont de l'ordre de 30 unités de P_2O_5 /ha/an. Le reste doit être apporté par la fumure avant le départ de la végétation, car l'absorption du phosphore est liée à la période de la croissance racinaire printanière (Denis, 2000).

Les recherches effectuées ces dernières années ont montré la multitude et l'interactivité des mécanismes mis en œuvre par les racines pour mobiliser le phosphore du sol. Les racines peuvent induire la dissolution de minéraux peu solubles ou la désorption d'ions chimisorbés et de mobiliser des quantités de phosphore considérées comme peu disponibles sur la base de seuls critères chimiques (Arvieu, 1998 ; Achat, 2009). Elles prélèvent le phosphore du sol à leur proximité immédiate : la rhizosphère. La rhizosphère correspond au volume de sol directement en contact avec les racines vivantes des plantes qui est influencé par leur activité (Chen et *al.*, 2006 ; Zhu et *al.*, 2006). Elle est réduite, mais constitue un important sous système de la pédosphère (Shi et *al.*, 2004 ; Richardson et *al.*, 2009). C'est un compartiment essentiel des écosystèmes terrestres en raison de son influence capitale sur les cycles biogéochimiques

(Raynauds, 2010). Les processus de la rhizosphère des arbres sont l'un des facteurs importants de leur développement et qui vont aussi décider de leur pérennité, par une influence favorable sur les cycles biogéochimiques des nutriments (Dinesh et *al.*, 2010). La rhizosphère fait aujourd'hui l'objet de recherches dans différentes disciplines scientifiques, elle constitue une zone d'interaction et d'échange dynamique entre le sol, la solution du sol et la plante, ainsi que son cortège de microorganismes (Chaignon, 2001 ; Richardson et *al.*, 2009). Elle est un des aspects biologiques qui se trouve actuellement parmi les priorités de la recherche appliquée. Elle représente le volume de sol qui entoure la racine et qui est directement influencé par l'activité racinaire. Cette dernière est définie par Besserer (2008), comme étant une niche écologique constituée par le voisinage proche des racines et caractérisée par une forte densité de microorganismes. Leurs interactions avec les racines sont régies par une multitude d'échanges de signaux chimiques. L'intensification écologique, repose sur la mobilisation des processus écologiques afin de favoriser certaines fonctions éco-systémiques dont la mise en œuvre présuppose la compréhension de ces processus et en particulier comment ils participent au fonctionnement du système sol-eau-plantes-microorganismes (Husson, 2012).

Les faibles teneurs en phosphore dans les sols d'oliveraies algériennes limitent la production oléicole. Pour la région d'étude, il s'agit de savoir comment atteindre un état de fertilité durable dans des conditions économiquement et écologiquement acceptables. Une gestion raisonnée de la fertilisation requiert l'évaluation de la biodisponibilité du phosphore présent ou apporté dans les sols. Pour la relance et le développement des cultures de l'olivier qui connaît des baisses de rendement d'année en année ; l'élément phosphore, mérite une attention particulière, lorsque l'on connaît son rôle dans la nutrition des végétaux et dans la qualité de la production. De nombreux travaux ont déjà souligné l'importance du phosphore dans la nutrition minérale des végétaux. Ce qui nous a amené à l'étudier dans une partie des vergers oléicoles de l'Algérie septentrionale.

L'intérêt fondamental d'étudier les sols des vergers de Kabylie (souvent carbonatés) réside dans l'incertitude qui demeure quand à la nature même du processus géochimique contrôlant la disponibilité du phosphore. Son originalité réside dans l'étude des interactions rhizosphériques à partir d'échantillons de terrain ; i.e. à partir d'échantillons de sol non rhizosphériques et rhizosphériques collectés *in situ*, peu remaniés, ce qui permettra de vérifier les observations citées dans la littérature, et de suivre l'évolution des interactions rhizosphériques au cours du temps.

Plusieurs expériences ont été conduites pour répondre aux objectifs de cette thèse ; l'étude du statut phosphaté dans la rhizosphère de l'olivier afin de déterminer la nature des mécanismes rhizosphériques impliqués dans la disponibilité du P à l'interface sol/racine. Etudier les effets de propriétés physiques et chimiques du sol sur les mécanismes rhizosphériques, ceci afin d'en préciser les principaux déterminants, c'est la présentation de l'ensemble des sols des différents vergers étudiés. La racine de *Olea europaea* induit des modifications physiques, chimiques et biologiques dans le sol qui lui est accolé, ceci en vue de s'adapter aux contraintes pédoclimatiques. Dans un contexte de ressources en eau et engrais restreintes et au vu de la cherté des engrais qui sont souvent importés, on se doit de réfléchir à des actions innovatrices pour une meilleure valorisation de cette culture (Centritto et al., 2005). C'est ainsi que le besoin d'analyses écologiques des communautés d'organismes de ces sols s'impose (Bonkowski et al., 2000). Dans le cadre de l'étude des racines fines de l'olivier les objectifs sont de déterminer la distribution verticale et horizontale des racines ; établir le lien entre la distribution des racines et celle des nutriments. Au delà des connaissances nouvelles recherchées dans le domaine des interactions sol-plante pour le phosphore, il y a eu la mise en place d'une véritable méthode d'étude de ces interactions, méthode dont l'utilisation doit se poursuivre afin de mieux en appréhender les limites et les possibilités. De ce fait, une meilleure connaissance du fonctionnement biologique des sols de l'olivier sur les changements des propriétés physiques et chimiques est nécessaire. La convergence climatique et topographique fait du nord de l'Algérie une région idéale pour comprendre l'effet de l'altitude, du matériau parental, ainsi que l'effet de leur interaction sur l'abondance et la diversité des arthropodes dans les sols.

L'objectif de ce travail est de déterminer i) l'effet du statut initial des sols, calcaires ou non, neutres, basiques ou acides, riches ou déficients en éléments nutritifs, afin de comprendre la capacité de l'olivier à s'adapter aux différents types de sols ; ii) d'une fertilisation localisée, afin de valider ou pas l'hypothèse que la racine améliore l'effet des apports d'engrais azotés, potassiques et phosphatés avec ce mode d'apport ; iii) mettre en évidence les champignons mycorrhizogènes, les endophytes ainsi que la macrofaune pour comprendre leur impact sur le maintien des oliviers dans des conditions pédoclimatiques difficiles ; iv) comparer la rhizosphère de l'olivier à celle d'une autre espèce rustique telle que le figuier (*Ficus carica* L.), avec la hiérarchisation des facteurs édaphiques et disposer d'un nouveau moyen de culture raisonnée et intégrée, biologique et naturelle, permettant de manière durable à chaque verger de développer son meilleur potentiel.

Chapitre I. Synthèse bibliographique

1. Cadre de l'étude : La rhizosphère de l'olivier

1.1. Présentation de l'olivier

Le berceau de l'olivier (*Olea europea* L.) doit se situer en Asie mineure où il était cultivé sous une forme primitive au début du néolithique. A partir du sixième siècle avant Jésus Christ, sa culture s'est étendue à tout le bassin Méditerranéen. Dans la littérature, l'olivier est abordé assez systématiquement à partir de deux thématiques privilégiées: sa symbolique immémoriale et son économie millénaire (C.O.I., 2009 ; Le Dantec, 2012). Les dernières recherches génétiques montrent que l'origine de l'olivier cultivé, n'est peut être pas orientale. Elle pourrait être simultanée à l'est et à l'ouest du bassin méditerranéen (Mendil et *al.*, 2006 ; Ribeiro et *al.*, 2006).

La culture de l'olivier occupe en 2005 dans le monde 7,5 millions d'hectares pour une production de 14,9 millions de tonnes d'olives avec un rendement de 20 quintaux/ha (F.A.O., 2005). L'olivier occupe une place fondamentale de par le produit qu'il fournit, l'huile d'olive et l'olive de table, dans l'alimentation humaine. Sur la période (2000-2006), la production mondiale moyenne annuelle s'élève à 2.778.800 tonnes d'huile d'olive et à 1 638 300 tonnes d'olives de table. La production mondiale d'huile d'olive est passée de 1 453 000 tonnes en 1990 à 2 820 000 tonnes en 2006 (C.O.I., 2006). C'est l'une des espèces fruitières qui connaît un regain d'intérêt en Algérie et dans le bassin méditerranéen, en témoigne la multitude des vergers plantés ces dernières années, en particulier dans le cadre de la valorisation des terres situées dans les régions semi aride et aride (Cimato et *al.*, 2010 ; Chartzoulakis, 2005).

L'Algérie est un pays du pourtour méditerranéen dont le climat est des plus propices à l'oléiculture. En raison de ses capacités d'adaptation à tous les étages bioclimatiques, allant des zones de montagnes aux zones arides et sahariennes, l'olivier assure des fonctions multiples de lutte contre l'érosion, de valorisation des terres agricoles et de fixation des populations dans les zones marginales (Ouaouich et Chimi, 2007 ; Santos et *al.*, 2007). L'olivier a une grande importance économique et sociale, il constitue à l'échelle nationale une des principales essences fruitières. Le profil variétal est constitué essentiellement de deux variétés très répandues *Chemlal* et *Sigoise*. Cette faible biodiversité contraste avec celle des milieux de production (Bendarradji et *al.*, 2007).

L'appauvrissement des sols en nutriments, la topographie, les conditions climatiques, ainsi que le manque de techniques culturales appropriées ont eu comme effet la dégradation du verger oléicole (Morizot, 1993). Un programme de plantation en intensif est mis en œuvre pour rattraper le retard accusé par l'Algérie dans l'oléiculture par rapport aux autres pays du

Maghreb, et ce, en dépit de la disponibilité de ressources naturelles considérables lui permettant d'occuper une place de choix sur le marché mondial (Mabel, 2007).

1.2. Production oléicole nationale

Les quatre premiers pays producteurs ; Espagne, Italie, Grèce et Turquie assurent 80% de la production mondiale d'olives et les dix premiers, tous situés dans la zone méditerranéenne (Aragüés et *al.*, 2010). L'Algérie quand à elle occupe la huitième place, avec une production de 3 164 207 tonnes/an (F.A.O., 2006). En 2000, la culture de l'olivier en Algérie occupait une superficie de 168 080 hectares de terrain soit 33% des 500000 hectares de superficie arboricole nationale. En 2009, le nombre d'olivier planté en Algérie a atteint le nombre de 34 603 111 arbre ayant engendré une production de 4 751 820 qtx d'olives avec une moyenne de rendement de 23,2 kg d'olives par arbre donc un rendement de 77% (Ahmim, 2008).

L'oléiculture occupe essentiellement les zones à fortes contraintes. L'olivier est concentré au Nord, particulièrement dans le Tell. Il subit des contraintes diverses limitant la production, telle que les incendies, le vieillissement des arbres, à cela s'ajoute l'irrégularité des facteurs météorologiques, le manque d'entretien des vergers, la fertilisation peu maîtrisée et le non respect du calendrier de lutte phytosanitaire (Badiaa, 2010).

1.3. Rôle socio-économique

L'olivier fait figure d'élément vivace dans les mentalités et représentations méditerranéennes où se concentre 98% de la production oléicole mondiale (Francia Martinez et *al.*, 2006 ; Aragüés et *al.*, 2010). Les Grecs et les Berbères l'ont élevé au rang d'arbre légendaire mythique, en raison de ses nombreux bienfaits : corps gras, remède et source d'éclairage. La consommation de l'huile d'olive a atteint des records en Grèce qui est estimée à 20 l/an/hab, alors que l'Algérie (Kabylie), l'Italie et l'Espagne ont atteint une consommation de 10 l/an/hab (Moujahid et *al.*, 2004). La culture de l'olivier joue un rôle important dans l'économie des pays producteurs. Cette dernière et les productions qui en sont tirées absorbent une main-d'œuvre conséquente et très nombreuses sont les familles qui tirent l'essentiel de leurs revenus des activités oléicoles (Denis, 1975).

1.4. Gestion durable

Depuis des temps immémoriaux, l'olivier constitue pour les pays méditerranéens un lien fort entre les individus (Benhayoun et *al.*, 2007 ; Francia Martinez et *al.*, 2006 ; Santos et *al.*, 2007). Utilisé pour définir l'aire climatique méditerranéenne, l'olivier fait figure d'élément

vivace dans les mentalités et représentations de cette région (Benhayoun et *al.*, 2007). Aujourd'hui, avec 98% des oliviers qui existent dans le monde, le pourtour méditerranéen rassemble l'essentiel de la production mondiale d'huile d'olive (Ogerbri, 2003). Conformément aux prévisions du Plan National de Développement Agricole (PNDA) et si la moyenne annuelle des nouvelles plantations réalisées en 2001-2002 se maintient, la surface oléicole algérienne devrait atteindre près de 310000 ha, en 2010 (Mabel, 2007). Il s'agit d'augmenter la production et les récoltes sans augmenter les coûts d'exploitation (*fertilisation*) et en garantissant la productivité sur le long terme (*maintien de la fertilité*).

1. 5. Question scientifique

Le phosphore limite la production végétale dans de nombreux sols (Vance et *al.*, 2003). La solution appliquée depuis longtemps est l'utilisation de fertilisants. Des essais de fertilisation conduits dans différents agrosystèmes ont montré qu'un apport de phosphore permettait d'augmenter la croissance des arbres. En effet, la raréfaction des ressources en phosphore alliée à l'augmentation des besoins des cultures rendent nécessaire la valorisation d'autres sources de phosphore (St Clair et Lynch, 2010). Dans ce contexte de limitation des intrants en phosphore dans les sols déficients, il est nécessaire de raisonner différemment la production végétale. Une voix repose sur le concept d'intensification écologique, selon lequel il s'agit d'utiliser les organismes du sol et de l'écosystème pour accroître la biodisponibilité de cet élément pour la plante. De nombreuses études menées sur l'olivier ont été consacrées à son adaptation aux différents climats et à l'effet du stress hydrique (Palese et *al.*, 2010 ; Benlloch-Gonzalez et *al.*, 2008), de la fertilisation (López-Granados et *al.*, 2004 ; Morales-Sillero et *al.*, 2009). Mais bien peu de travaux à notre connaissance se sont intéressés à l'étude des processus *in situ* dans la rhizosphère de l'olivier.

Des études ont déjà montré que les paramètres du sol présentent des corrélations significatives avec la canopée et le diamètre de l'arbre chez l'olivier (Gálvez et *al.*, 2004). Cependant, peu d'études ont été consacrées à l'étude de la biodisponibilité du phosphore du sol de l'agrosystème oliveraie. Or, cette évaluation est indispensable car elle représente la base des recommandations visant à maintenir la fertilité des sols et la production de biomasse (enjeu économique) tout en limitant les apports (raisonnement de la fertilisation, enjeu environnemental). L'objectif général de la thèse porte sur l'évaluation de la biodisponibilité du phosphore dans la rhizosphère de l'olivier et dans une moindre mesure celle du figuier dans la région de Kabylie. Avec l'hypothèse que les racines pourraient influencer les propriétés physiques, chimiques, biologiques et la biodisponibilité du phosphore de différents

types de sols d'oliveraies de Kabylie. La connaissance de l'interface sol-racine, permet une meilleure prise en compte des besoins des plantes. Afin de comprendre la « Durabilité du système de production des cultures pérennes dans un environnement changeant – analyse, évaluation adaptation».

2. Classification botanique de l'olivier

L'olivier (*Olea europea* L.) appartient (Spichiger et al., 2002), à l'embranchement des Phanérogames, sous embranchement des Angiospermes, classe des Eudicotylédones, ordre des Lamiales, famille des Oléacées et au genre *Olea*.

Argenson et al., (1999) signalent que certaines classifications décomposent l'espèce *Olea europea* L. en deux sous espèces :

- *Olea europea* L. subsp. *europea* ou l'olivier cultivé, constitué par un grand nombre de variétés améliorées multipliées par bouturage ou par greffage.
- *Olea europea* L. subsp. *oléastre* qui se présente sous la forme d'un buisson épineux à fruit généralement petit. Cette forme est répandue autour de la méditerranée.

2.1. Caractéristiques de l'olivier

L'olivier se distingue des autres espèces fruitières par sa très longue longévité pouvant donner des arbres plusieurs fois centenaires (Bardoulat, 2005). Il est également réputé pour sa rusticité lui permettant de se développer et de fructifier sous des conditions de climat semi-aride et sur des sols parfois très pauvres. Il est aussi un arbre qui se multiplie très facilement par voie végétative (Loussert et Brousse, 1978), l'une de ces espèces méditerranéennes qui peuvent être soit forestières, soit arboricoles (Seigue, 1985).

2.1.1. Cycle végétatif de l'olivier

Au cours de son cycle annuel de développement l'olivier passe par les phases suivantes :

1. janvier-février : induction, initiation et différenciation florale.
2. courant mars : croissance et développement des inflorescences à l'aisselle des feuilles qui portent les rameaux de l'année précédente.
3. avril : pleine floraison.
4. fin avril- début mai : fécondation et nouaison des fruits.
5. juin : début de développement et grossissement des fruits
6. septembre : véraison.
7. octobre : maturation du fruit et son enrichissement en huile.

8. mi-novembre - janvier : récolte des fruits.

La période la plus intense du cycle annuel se déroule de mars à juin (Fig.I.1). Au cours de cette phase, les besoins en nutriments de l'arbre sont les plus intenses (Si Bennasseur, 2005).

2.1.2. Le système racinaire de l'olivier

Les racines de l'olivier ont une importante capacité d'exploitation du sol. Leur développement est étroitement lié aux caractéristiques physicochimiques du sol, au climat et au mode de conduite de l'arbre. L'olivier présente des racines fasciculées (Loussert et Brousse, 1978 ; Leal, 2009). L'olivier développe un système racinaire peu profond 60 à 100 cm à développement latéral, dont les racines principales débordent peu l'aplomb du feuillage, alors que les racines secondaires et les radicelles peuvent explorer une surface de sol considérable permettant l'alimentation de l'arbre en cas de sécheresse (Amouretti et Comet, 2005). Seules les radicelles émises au cours de l'année permettent l'absorption de l'eau. Les racines de l'olivier sont capables d'extraire de l'eau en exerçant une importante force de succion de l'ordre de -25 bars sur le sol, contre -15 bars en général pour les autres espèces fruitières, lui permettant de prospérer là où d'autres se flétriraient (Civantos, 1988).

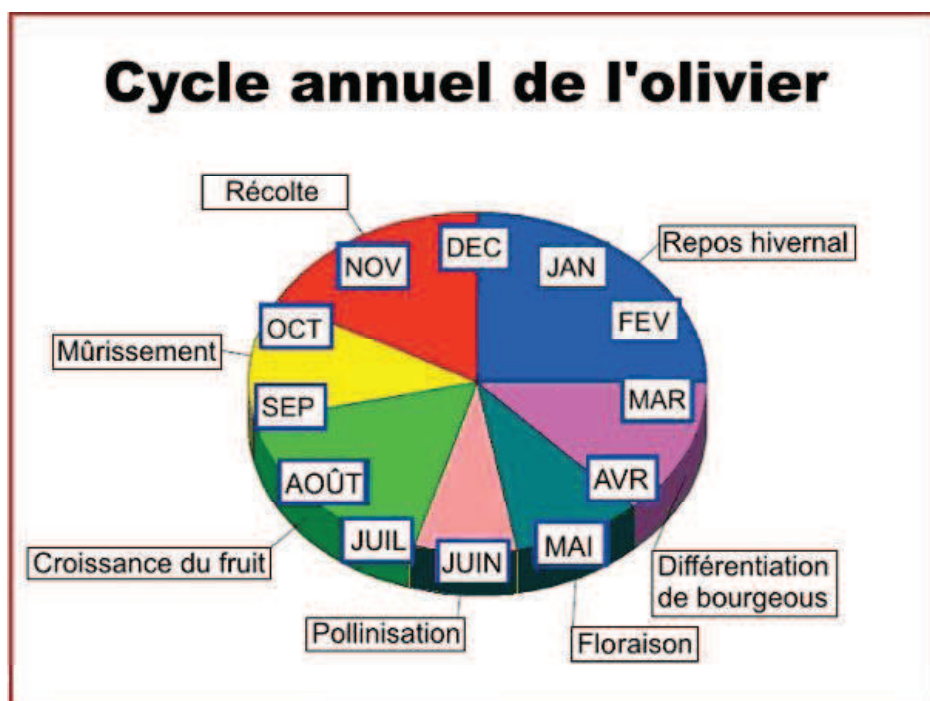


Figure I.1. Cycle annuel de l'olivier (Leal, 2009).

L'aspect définitif du système racinaire dépend des caractéristiques physiques du sol et de la profondeur de la nappe phréatique. On peut aussi trouver des différences variétales qui justifient la réalisation de greffes de pieds qui développent des meilleures racines (Leal, 2009).

2.1.3. Exigences de l'olivier

L'olivier peut pousser et donner un bon rendement sur des terrains variés sols (Brousse et Loussert, 1978 ; Civantos, 1998). Des vergers d'olivier peuvent être productifs dans des sols squelettiques, et présentant une dalle, ainsi que dans des sols présentant des teneurs élevées en sels, et qui ne sont pas productifs à d'autres cultures, il met en valeur les terrains marginaux (Aragüés et *al.*, 2004 ; Si Bennasseur, 2005 ; Aragüés et *al.*, 2010).

La consommation en eau de l'olivier correspond globalement à son évapotranspiration. Celle-ci est directement liée aux conditions climatiques, rayonnement solaire, température, humidité de l'air et vent (Ait Hou, 2003 ; Argenson et *al.*, 1999). Il résiste à des températures allant jusqu'à - 10°C, en repos végétatif. Mais de 0 à - 1°C, les dégâts peuvent être très importants sur la floraison. A 35 - 38°C, la croissance végétative s'arrête et à 40°C et plus, des brûlures l'endommagent et provoquent la chute des fruits surtout en absence d'irrigation (Walali et *al.*, 2003). Avec 600 mm de pluie l'olivier végète et produit normalement. Une pluviométrie inférieure à 200 mm, l'oléiculture sans irrigation est économiquement non rentable (Amouretti et Comet, 2005 ; Aragüés et *al.*, 2005). En conditions d'irrigation, le niveau de production peut dépasser de 25 à 40% celui en culture pluviale (Titouah, 1997). Les vents chauds sont défavorables au cours de la floraison et la fructification, avec une activité photosynthétique fortement réduite (Boussadia et *al.*, 2008 ; Greven et *al.*, 2009). L'olivier étant exigeant en lumière, l'insolation est à considérer dans le choix de l'orientation des arbres, la densité de plantation et les tailles d'éclaircie (Mabel, 2007). Le sol doit être profond, perméable, bien équilibré en éléments fins. Le pH peut aller jusqu'à 8 à 8,5 avec, cependant des risques d'induction de carence en fer et en magnésium dans les sols calcaires (Wallali et *al.*, 2003).

2.2. Exigences nutritionnelles en éléments majeurs

Sans intervention de restitution et de compensation des éléments nutritifs, des déséquilibres graves peuvent se produire sur les arbres. Les déficiences alimentaires en

éléments majeurs tel que l'azote, le phosphore et le potassium ou les carences alimentaires en oligo-éléments, peuvent causer des troubles graves sur le végétal et se traduire par des diminutions de rendement (Loussert et Brousse, 1978). C'est le cas de la plus grande partie des oliveraies du nord de l'Algérie où l'on assiste chaque année à une exportation hors parcelle des éléments nutritifs après la récolte, sans restitution, avec pour conséquence un épuisement des sols.

2.2.1. L'azote

L'azote joue un rôle primordial dans le métabolisme des plantes après l'eau, c'est un facteur de croissance, mais aussi de qualité (Skiredj, 2005). La plupart des systèmes de cultures non légumineuses exigent l'apport d'azote, il est l'élément nutritif le plus déficient dans les systèmes de production agricoles (Moughli, 2000). Il stimule la croissance et l'activation de tous les autres phénomènes tels que la fécondation et le développement du fruit. Les effets positifs de cet élément se résument en l'augmentation du taux de croissance de l'arbre, ce qui entraîne l'augmentation de la surface productrice et le calibre des olives (Ouaouich et *al.*, 2007).

L'olivier absorbe toute l'année l'azote présent dans le sol mais de façon lente : très peu l'hiver, davantage au printemps et en automne. Ses besoins étant très importants de mars à juillet pour l'élaboration des tiges, des feuilles, des fleurs, des fruits et des racines. Ses capacités d'absorption étant faibles, il mobilise ses réserves pour faire face à ses importants besoins. Il reconstitue ses réserves ensuite d'août à novembre (Denis, 2000 ; Chaman, 2005 ; Skiredj, 2005).

2.2.2. Le potassium

Le potassium est un élément essentiel pour les arbres, le plus difficile à maintenir à un niveau adéquat pour le développement de la récolte pour l'olivier (Martinez et Sanchez, 1975). Il augmente la résistance au froid et aux parasites (Loussert et Brousse, 1978), intervient dans l'économie de l'eau (Arquero et al. 2006). Il joue un rôle important dans les différentes fonctions cellulaires comme la synthèse des sucres et des protéines, l'augmentation de la résistance à la déshydratation et le transfert des substances minérales et organiques dans les différents organes de l'arbre. Toutes ces fonctions confèrent au potassium un effet majeur sur le rendement en quantité et en qualité (Ben Mimoun, 2002).

Si certains sols peuvent fournir des quantités appréciables en potassium, il est généralement nécessaire d'apporter des quantités supérieures à la compensation des exportations en raison de sa fixation sur l'argile (Denis, 2000 ; Gargouri and Mhiri, 2002). Le potassium intervient dans la nutrition de l'arbre en période de pleine croissance végétative, à la floraison en favorisant l'épanouissement des fleurs et pendant le grossissement des fruits, il améliore la saveur et la couleur. Pour assurer une bonne alimentation potassique chez l'olivier, il est important d'éviter la compaction et le mauvais drainage du sol (Argenson et *al.*, 1999).

2.2.3. Le phosphore

Le phosphore est un élément essentiel pour tous les organismes vivants. Chez les végétaux, il joue un rôle majeur dans de nombreux processus biologiques comme la croissance, la vigueur des tissus, la photosynthèse et la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique (Frossard et *al.*, 2004 ; Negassa and Leinweber, 2009).

Il permet d'activer la croissance des bourgeons et des racines, il stimule la synthèse des glucides et leurs mises en réserve dans les graines et les fruits. C'est un facteur de précocité et de résistance au froid (White and Hammond, 2008 ; Karemangingo, 2004). Après l'eau et l'azote, la carence en phosphore constitue un facteur limitant de la production végétale (Fardeau, 1989). Il est souvent un élément limitant de la croissance des plants (Vance et *al.*, 2003) et y compris l'olivier (Denis, 2000). Le fait que le phosphore soit un élément limitant est lié d'une part, à sa faible teneur dans les sols et d'autre part, à sa très forte rétention par les constituants du sol qui rend sa biodisponibilité faible (Comerford et *al.*, 2002 ; White and Hammond, 2008 ; St Clair et Lynch, 2010).

L'agriculteur, d'une manière générale, peut, à partir d'une bonne fertilisation phosphatée, contrôler la maturité des fruits (Hinsinger et *al.*, 2009). Pour cette raison, le phosphore est un facteur de qualité car il favorise les différents stades physiologiques de l'olivier surtout lors de la reprise végétative. On note également que le phosphore accroît la résistance au froid, à la sécheresse et aux maladies (Denis, 2000 ; Karemangingo, 2004). Les besoins les plus importants en phosphore pour l'olivier se situent lors de la floraison et de développement des fruits (Loussert et Brousse, 1978 ; Boulila, 2001). Des valeurs optimales pour cet élément sont calculées et varient entre 20 et 280 ppm (Gargouri et *al.*, 2006), avec un seuil critique de 8 ppm de phosphore pour l'olivier cultivé en Tunisie (Gargouri et Mhiri, 2002).

2.3. Fertilisation de l'olivier

En Méditerranée le stress hydrique est un problème environnemental majeur, les ressources hydriques se raréfient d'une manière permanente particulièrement pour l'agriculture. Pour l'oléiculture il existe deux modes de fertilisation en fonction de la conduite des vergers, en culture pluviale ou en irriguée. Ainsi les doses d'engrais à apporter sont en fonction des besoins en eau des oliviers (Civantos, 1999 ; Lopez-Granados et *al.*, 2004). La fertilisation de l'olivier est très difficile car en plus des contraintes pédoclimatiques, il subit une forte alternance de la production (Jordano et *al.*, 1993). Cette alternance est importante chez la variété *Chemlal* en Tunisie (Benrouina et Trioui, 2002). Les rendements sont six fois plus petits entre l'année « on » et l'année « off » respectivement (Sibbett et Ferguson, 2002).

Ainsi, Ferrero et *al.*, (1986) recommandent une dose de 0,6 à 1kg d'azote par arbre et par an en pluvial et en irrigué 0,75 à 1kg d'azote par arbre et par an (Hidalgo et Pastor, 2005 ; Hernandez et *al.*, 2005). Il est à signaler que les apports d'azote peuvent être à l'origine de la contamination des eaux souterraines, alors il est recommandé de limiter la dose d'azote à 0,4 kg d'N par arbre et par an, cette dernière suffit largement pour avoir une bonne production et une huile de qualité (Lopez-Granados et *al.*, 2004 ; Morales Siloro et *al.*, 2009). Il est recommandé de combiner l'apport azoté au sol et la pulvérisation de l'urée afin d'améliorer les rendements et de réduire la pollution des nappes par les nitrates (Fernandez Escobar et *al.*, 2009). Des teneurs de 1 à 1,5 % d'azote total, avec un taux de matière organique de 2 à 3 % offrent un bon développement pour l'olivier (Loussert et Brousse, 1978).

Une chlorose foliaire et des nécroses peuvent se localiser sur les zones du limbe très chlorotiques à cause du blocage du fer et du phosphore par les carbonates de calcium (Loussert et Brousse, 1978). L'irrigation a tendance à augmenter significativement la disponibilité du phosphore pour les plantes, par une diffusion et une dissolution plus rapides (Huguenin-Elie et *al.*, 2003 ; Hernandez et *al.*, 2005). Pour cet élément, la dose préconisée est de 0,8 à 1kg de P_2O_5 /arbre/an soit (environ 2kg de superphosphates à 46%) (Walali et *al.*, 2003). Des concentrations du KH_2PO_4 allant de 2 à 4% peuvent être apportées en pulvérisation foliaire quand le stress hydrique limite l'activité racinaire dans les sols des oliveraies (Arquero et *al.*, 2002). L'apport d'engrais potassiques est calculé à 1kg de K_2SO_4 /arbre/an, avec des pulvérisations foliaires de 10,5g de K/litre durant les stades de développement bien déterminés (Restrepo Diaz et *al.*, 2008). L'olivier a des besoins

importants en bore, cet élément est souvent apporté sous forme de Borax (Hartmann, 1996 ; Fernandez Escobar et *al.*, 1999).

3. Cycle biogéochimique du phosphore dans un agrosystème

Le phosphore est le onzième constituant de la croûte terrestre. Presque entièrement dérivé de l'altération des phosphates de calcium des roches de la surface terrestre, le phosphore rentre dans la constitution des tissus ou il joue un rôle important dans le stockage et le transfert d'énergie. Il est donc essentiel à la vie humaine, animale et végétale (Beaudin et *al.*, 2008). C'est un élément génétique, énergétique et plastique de la matière vivante (UNIFA, 2005 ; Devau et *al.*, 2009). Après l'eau et l'azote, la carence en phosphore constitue un facteur limitant de la production végétale (Fardeau, 1989 ; Vitousek et *al.*, 2010). La disponibilité du phosphore dans le sol est liée à son pool alimentaire. L'alimentation phosphatée s'effectue sur un à deux millimètres au maximum. C'est pourquoi, les réserves labiles doivent toujours être supérieures aux besoins annuels des cultures (Strullu, 1991 ; Morel et *al.*, 1992).

Les prélèvements de phosphore par les végétaux dépendent de nombreux facteurs parmi lesquels il faut citer, les besoins des cultures ; les racines des cultures ; le niveau de phosphore dit assimilable du sol ; l'application d'engrais phosphatés et des autres fertilisants en particulier l'azote ainsi que les possibilités offertes aux ions phosphatés de quitter les particules du sol pour rejoindre les racines via la solution du sol (Tiessen et Frossard, 1991 et Devau, 2010). Pendant l'alimentation des plantes en phosphore les ions phosphoriques adsorbés sont soumis à deux types de forces de liaisons ; les force de rétention de divers adsorbants du sol et les forces d'adsorption racinaires, liées au métabolisme de la plante. Ces forces font que le coefficient de partage entre ces deux parties prenantes dépend aussi bien du sol que de la plante (Gachon, 1968 ; Agrawal et *al.*, 1987 ; Derrah, 1993 ; Li et *al.*, 2007 ; Hinsinger et *al.*, 2009).

3.1. Sources minérales du phosphore

Les gisements de phosphore sont à 80% originaires des dépôts sédimentaires ou marins, à 17% issus des roches magmatiques et à 3% des excréments d'oiseaux marins et d'autres sources organiques (Antoni, 2009).

3.2. Cycle du phosphore

Le cycle du phosphore dans les sols est très différent de celui de l'azote et du soufre dans la mesure où il dépend de l'équilibre entre une phase très insoluble majoritaire et une phase soluble très peu abondante. Le phosphore existe, dans les roches et dans les sols, le plus souvent sous la forme de composés apatitiques : $\text{Ca}_4(\text{CaX})(\text{PO}_4)_3$ où X peut être Cl^- , F^- , OH^- , CO_3^{2-} . Sous l'action des racines, des champignons mycorhiziens et de la matière organique du sol, ces minéraux peu solubles, peuvent libérer en faible quantité des ions HPO_4^{2-} et H_2PO_4^- (Hinsinger et al., 2005 ; Lines-Kelly, 2005). C'est à partir de ce « pool » que se fait le prélèvement de phosphore par les végétaux. Les phosphates apportés par la fertilisation évoluent tous dans le sol vers des formes de moins en moins solubles dont le terme ultime est l'apatite dans les sols riches en calcaire tel que les rendzines ou des phosphates de fer ou d'aluminium dans les sols acides, les sols méditerranéens et tropicaux. C'est le processus de « rétrogradation » du phosphate (Schvartz et al., 2005).

3.2.1. Phosphore adsorbé sur les hydroxydes de fer et d'aluminium

Il existe des charges positives dans le sol, sur les argiles comme les zones de rupture des feuillets et surtout sur les oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium. Les ions PO_4^{3-} sont adsorbés très énergiquement sur ces charges, d'où ils ne peuvent passer en solution que lentement. Certains sols riches en hydroxydes ont un pouvoir fixateur du phosphore trop grand, qui gêne l'utilisation des engrais (Bertrand et Gigou, 2000). L'adsorption du phosphore sur les surfaces d'oxydes et hydroxydes de fer résulte d'une ou deux liaisons covalentes (Praffit et al., 1977). L'adsorption du phosphore est décrite comme un échange de ligands. Elle est plus importante sur la goethite que sur l'hématite (Guivarch, 2001). L'adsorption sur les oxydes d'aluminium (gibbsite) est expliquée par la formation de complexes. Lorsque les concentrations en phosphate dans la solution du sol dépassent les 30 ppm, l'adsorption est remplacée par des réactions de précipitation. Il se forme alors un phosphate d'aluminium (Kaye et al., 1997).

3.2.2. Phosphore minéral

3.2.2.1. Phosphore cristallisé avec le fer, l'aluminium et le calcium

Ces cristaux sont très peu solubles et ne sont remis en solution que très lentement (Bertrand et Gigou, 2000 ; Achat, 2009). Le phosphore lié au calcium est essentiellement composé d'apatite. Cependant, une partie du phosphore labile est apparue adsorbée sur les carbonates (Carreira et al., 1997).

3.2.2.2. Phosphore inclus

C'est le phosphore dans l'une des formes précédentes, mais complètement entouré d'oxydes de fer et d'aluminium et inaccessible aux plantes. Il ne peut être remis en solution que par dissolution de ces oxydes (Bertrand et Gigou, 2000). Ce processus correspond à l'insolubilisation lente mais progressive du phosphate fixé par la réorganisation des molécules des colloïdes (Fig.I.2) qui évoluent vers des formes cristallines (Morel et Fardeau, 1988).

En milieu alcalin, au contraire, les phosphates mono et bicalciques se transforment en phosphate tricalciques, puis en phosphate cristallisés encore plus insolubles de type apatite, c'est le principal obstacle à la nutrition phosphatée en sol calcaire (Smeck, 1985 ; Duchaufour, 1995).

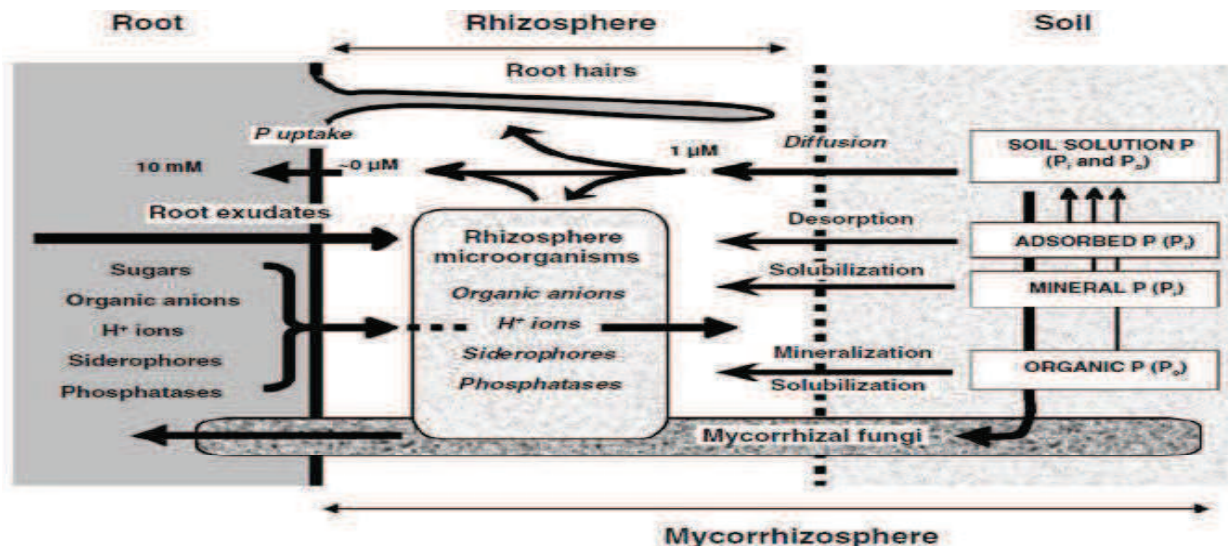


Figure I. 2. Processus physiologiques et chimiques influençant l'assimilation et la transformation du P dans la rhizosphère (Richardson 1994 in Richardson et al., 2010).

Le phénomène est important donc il faut un recours à un amendement organique actif et une forte production de CO₂ qui freinent ce processus en abaissant le pH (Duchaufour, 1995). L'inclusion des ions PO₄³⁻ à l'intérieur des feuillets d'argiles gonflantes (montmorillonite et l'illite) est possible. Il existe une relation linéaire très étroite entre la teneur en argiles et la fixation du phosphore. Pour expliquer d'avantage le comportement des phosphates dans le sol, divers processus basés sur certains travaux sont représentés dans la figure (I.2).

3.2.3. Phosphore organique

La forme organique est d'un intérêt moindre pour la nutrition directe de la plante que la forme minérale (Fig.I.3). Pour être accessible aux végétaux, elle doit au préalable subir une minéralisation (Kroehler et Linkins, 1988 ; Fardeau et *al.*, 1993). Annuellement, environ 1 à 2 % des phosphates utilisables sont fournis (Heck et Hanotiaux, 1982) . La forme organique est le phosphore inclus dans les résidus végétaux et déchets animaux. Cette forme peut atteindre des fois 50 % du phosphore total. D'après Callot et al., (1982), le phosphore est contenu pour moitié environ dans la matière organique, sa teneur est comprise entre 0,02 et 0,5 %, il est pour sa plus grande partie sous une forme difficilement assimilable par les plantes. Les inositol-phosphates (Cosgrove, 1980), les phospholipides ou les acides nucléiques présents dans le sol, chimiquement bien identifiés ne représentent jamais plus de 25 % du phosphore organique total apprécié par les méthodes de calcination (Saunders et Williams, 1955). Les 75% restant actuellement inconnus pourraient correspondre, en réalité, à des associations de matière organique de cations et d'ions phosphates plus qu'à des composés chimiquement définissables (Conesa et Fardeau, 1994).

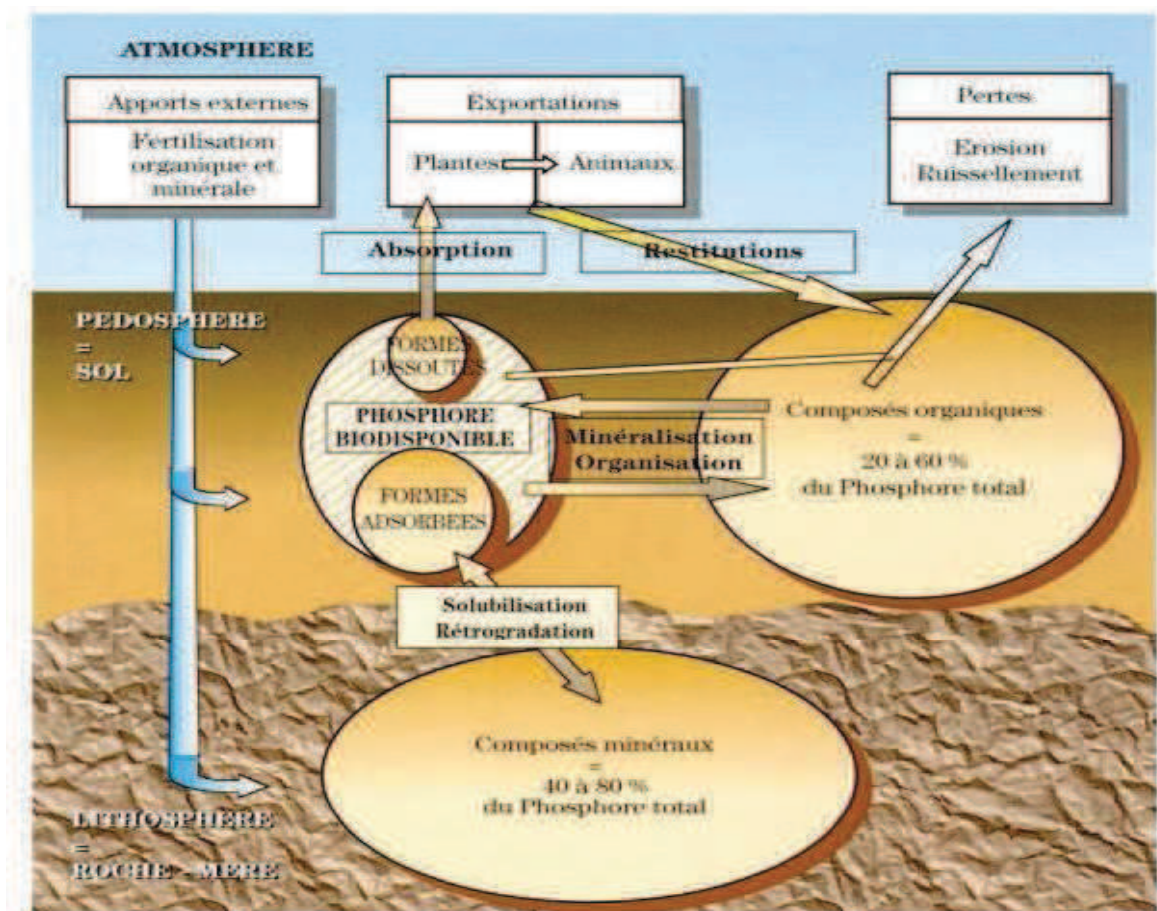


Figure I. 3. Cycle du phosphore dans le sol (Fardeau et Conesa, 1994).

Le phosphore présent dans les corps microbiens, il semble ne représenter que 2 à 3 % du phosphore organique (Brookes et al., 1984). La part du phosphore organique par rapport au phosphore total va de 25 % à 30 % dans les sols cultivés de longue date (Sood et Minhas, 1988 ; Fardeau et Conesa, 1994 ; White and Hammond, 2008). La matière organique contient du phosphore qui est libéré lentement par la minéralisation : pour 60 N, on obtient 5 à 15 P₂O₅ (Bertrand et Gigou, 2000 ; Richardson et al., 2009).

3.2.4. Minéralisation du phosphore organique

La minéralisation du phosphore organique est faite assez rapidement par hydrolyse des liaisons phosphates grâce à diverses phosphatases :



Selon le pH du milieu les ions phosphates sont sous forme PO₄³⁻ (sols alcalins), HPO₄²⁻ (sols neutres) ou H₂PO₄⁻ (sols acides). C'est la forme H₂PO₄⁻ qui est la plus facilement utilisable par les plantes (Davet, 1996 ; White and Hammond, 2008).

3.3. Absorption du phosphore par les racines

L'absorption du phosphore par les racines des plantes se fait essentiellement sous la forme d'orthophosphate H₂PO₄⁻ et HPO₄²⁻ dont la concentration dans la solution du sol est très faible. Les échanges entre les formes solubles et insolubles de phosphore dans le sol sont lents. L'absorption du phosphore par les racines étant plus rapide que sa diffusion dans le sol, il se forme très rapidement une zone d'épuisement autour de la racine (Fig.I.4). L'augmentation de l'orthophosphate absorbé par les racines mycorhizées, résulte principalement de l'accroissement du volume de sol exploré et de la translocation du phosphore du sol vers la racine via le réseau mycélien, ainsi que de la présence de transporteurs d'orthophosphates plus efficaces dans les racines mycorhizées que dans les racines non infectées (Moussain et al., 1997 ; White and Hammond, 2008).

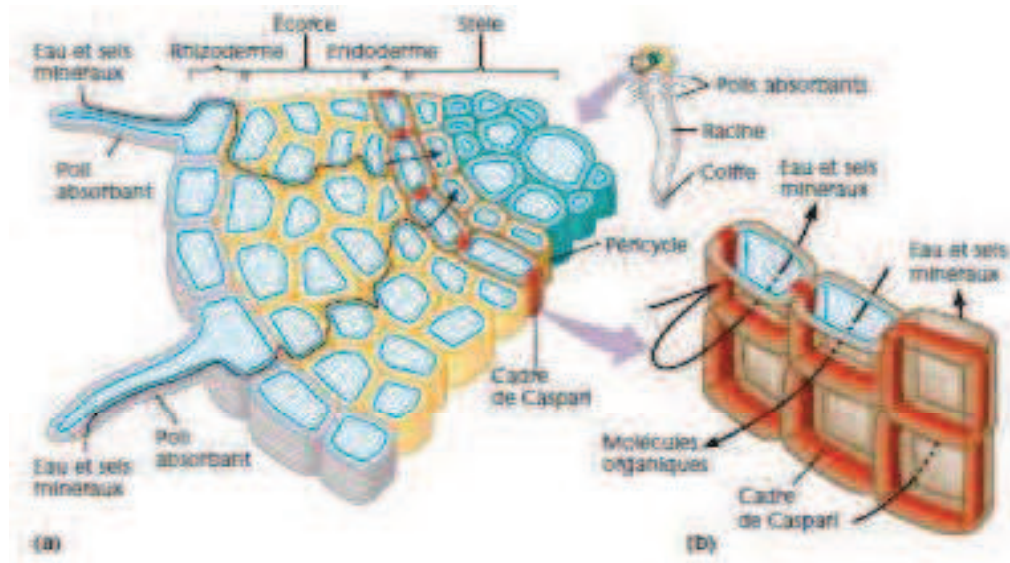


Figure I.4. Fonctionnement de l'endoderme lors de la nutrition minérale (Nabors, 2009).

Dans ce contexte de déficience des sols en phosphore biodisponible, il est nécessaire de raisonner différemment la production végétale. Une voix repose sur le concept d'intensification écologique, selon lequel il s'agit d'utiliser les organismes du sol et de l'écosystème pour accroître la disponibilité de cet élément pour l'environnement et donc aussi sa biodisponibilité pour la plante (Mollier et *al.*, 2008 ; Devau et *al.*, 2011).

Un levier de l'intensification écologique consiste à utiliser les processus physiques, chimiques et biologiques opérant à l'interface sol-racines qui est la rhizosphère afin d'augmenter la concentration en phosphore biodisponible dans la solution du sol, facilitant ainsi la croissance des plantes (Hinsinger et *al.*, 2009).

3.4. Carences en phosphore

Le manque de phosphore retarde la division cellulaire, les entre-nœuds sont courts, les feuilles sont petites et ont souvent des reflets bleuâtres, une coloration pourpre et surtout un ralentissement de la croissance racinaire, ce qui limite les capacités d'explorer le sol pour trouver les éléments minéraux (Loussert et Brousse, 1978 ; Tiessen, 1995 ; Zhao et *al.*, 2007).

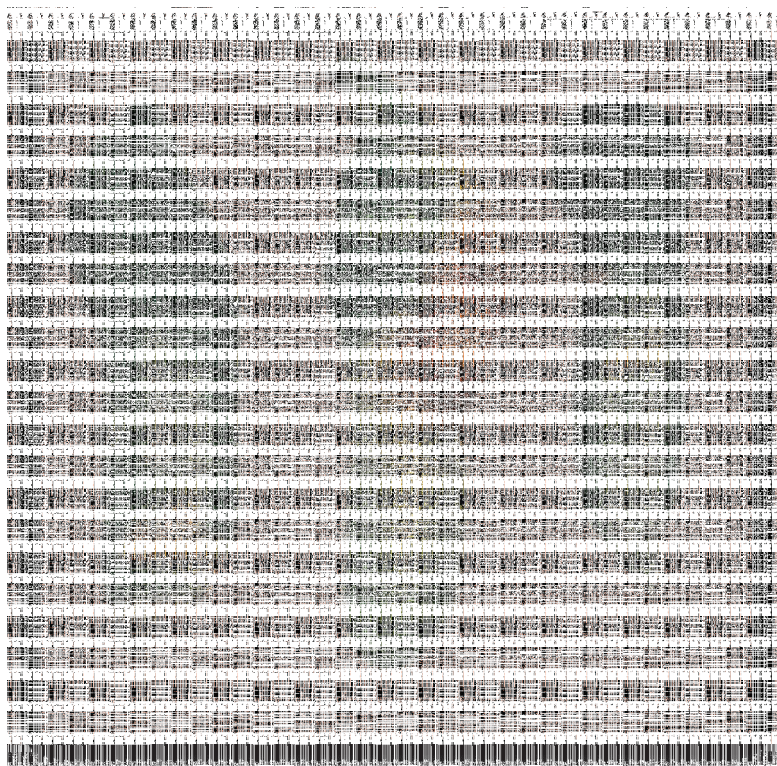


Figure I. 5. Symptômes de carence en phosphore sur les feuilles de l'olivier.

La floraison et la maturation sont retardées. Comme pour l'azote les symptômes apparaissent d'abord sur les feuilles âgées (Bertand et Gigou, 2000). La carence se manifeste sur les végétaux par une réduction de la taille, le port érigé, feuillage sombre, terne, en cas de forte carence la couleur devient rouge-violet (Fig.I.5), prenant des teintes pourprées, une défoliation précoce commençant par la base de la plante (Diehl, 1975). Il en résulte la médiocrité de la qualité des fruits et les chutes de rendement (Abd Elnaïm *et al.*, 1981 ; Bonneau, 1983 ; Kroehler et Linkins, 1988 ; Morel *et al.*, 1992 ; White and Hammond, 2008).

4. Interface sol-racine : La rhizosphère

L'interface entre la racine et le sol est complexe et souvent une frontière mal définie. Des composés sont libérés à partir des racines dans le sol qui changent sa composition chimique et ses propriétés physiques et stimulent la croissance de divers micro-organismes (Fig.I.6). En même temps, les tissus des racines et des produits associés aux racines fournissent aussi un abri physique pour de nombreux micro-organismes (Gregory, 2006 ; Römheld et Neumann, 2006).

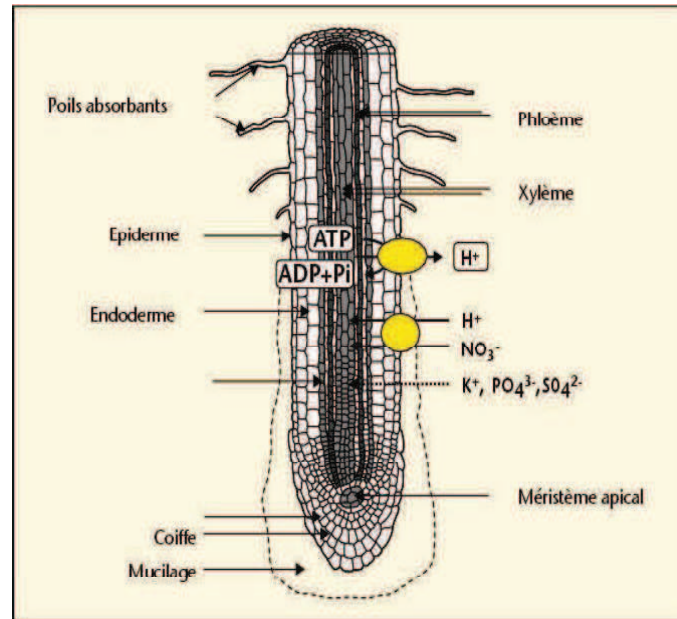


Figure I.6. Interface sol-racine (Monrozier et Bally, 2002).

4. 1. Définition de la rhizosphère

La rhizosphère peut être définie comme la zone du sol immédiatement en contact avec le système racinaire des plantes et qui est sous son influence (Chen et *al.*, 2006 ; Zhu et *al.*, 2006), elle correspond aux premiers millimètres de sol entourant la racine (White and Hammond, 2008) (Fig.I.6 et I.7). Elle a été définie par Hiltner en 1904 (Hinsinger, 1998), *Rhizo* vient du grec *Rhiza* signifie racine et *Sphère* vient du latin *Sfaira* signifie ballon ou globe. Cette sphère définit le champ d'influence du système racinaire. Elle représente un compartiment fondamental des écosystèmes terrestres en raison de son influence majeure sur les cycles biogéochimiques (Shi et *al.*, 2004 ; Raynauds, 2010).

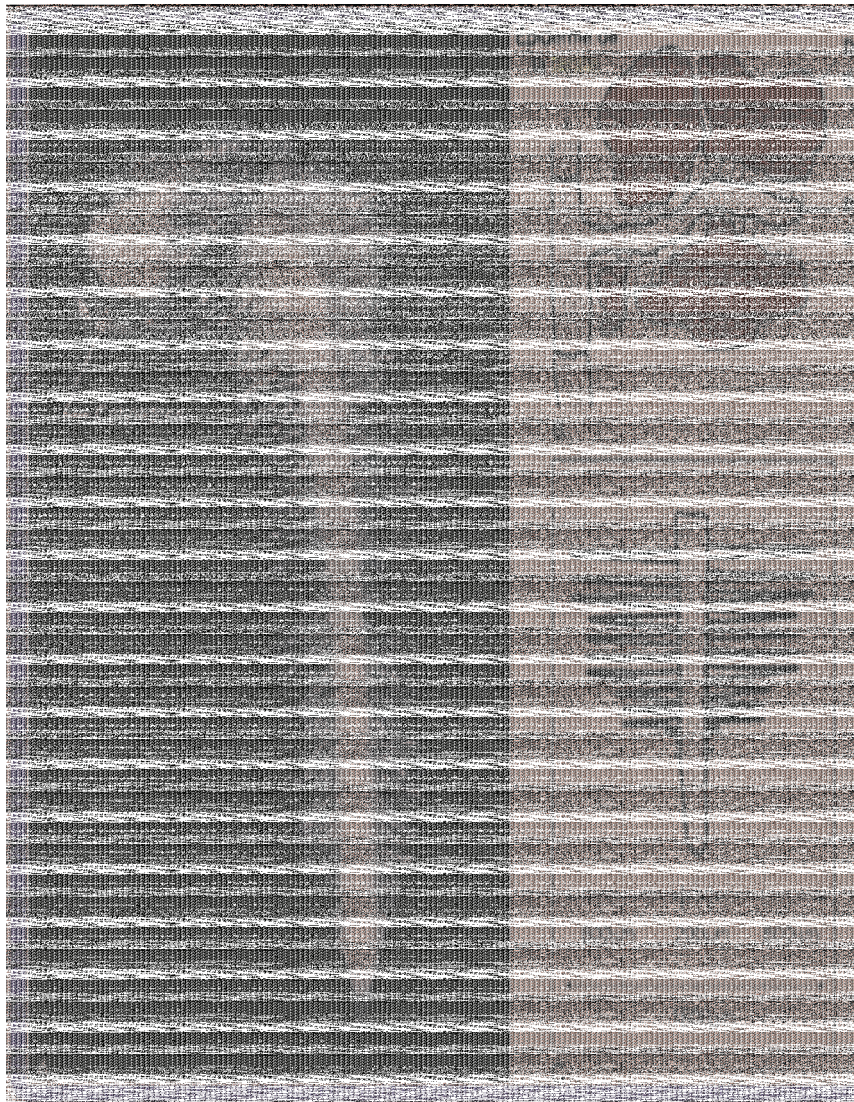


Figure I. 7. (A) poils absorbants d'une racine de radis ; (B) capacité des poils absorbants à pénétrer les espaces capillaires délimités par les particules de sol ; (C) prospection et augmentation du volume de sol extractible par les racines (Charpentier et *al.*, 2008).

Les processus racinaires qui se déroulent dans cette zone tel que la respiration et l'absorption d'eau et de nutriments en font un milieu complexe et hétérogène très singulier en terme de caractéristiques physiques (Hinsinger et *al.*, 2005 ; Gregory 2006 ; White and Hammond, 2008), physico-chimiques (pH, minéraux, potentiel hydrique) ou biologiques (densité et stimulation de l'activité microbienne), en comparaison avec le sol distal (Stengel et Gelin, 1998 ; Römheld et Neumann, 2006 ; Lesuffleur, 2007).

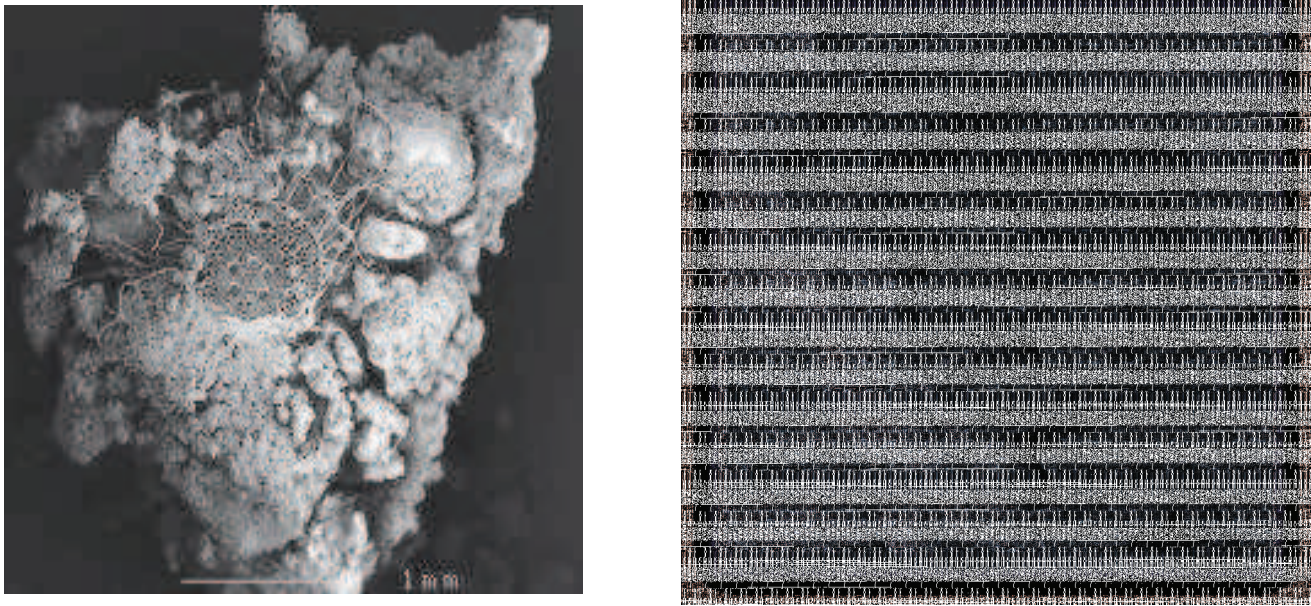


Figure I. 8. A- coupe d'une racine de blé et de sa rhizosphère ; B- interface racines-sol de la digitale (*Digitaria sanguinalis*), les poils absorbants sont clairement visibles en contact intime avec les particules du sol (Mc Cully, 1995).

Les modèles classiques de nutrition phosphatée des plantes ne tiennent pas compte des interactions rhizosphériques (Hinsinger et *al.*, 2005 ; Mollier et *al.*, 2008), ce qui est lié au fait que les processus racinaires tels que l'exsudation de protons, de ligands organiques ne sont pas bien connus ainsi que leurs effets sur le sol (Devau et *al.*, 2009).

4.2. Interception racinaire

Le terme « interception racinaire » est utilisé pour décrire les nutriments à la surface des racines qui n'ont pas besoin d'être déplacés pour pouvoir être prélevés par ces dernières (Fig. I.8). La croissance racinaire permet d'accéder directement aux nutriments du sol (Drenou, 2006). La quantité de nutriments disponibles du fait de cette interception correspond, environ, à la quantité présente dans un volume de sol correspondant au volume de racines. Or, le volume du système racinaire représente une très faible proportion du volume de sol (1%) et, par conséquent, seule une très faible proportion des nutriments disponibles est rendue accessible par l'interception racinaire (Barber, 1995 ; White and Hammond, 2008 ; Achat, 2009).

4.3. Ampleur spatiale de la rhizosphère

L'architecture de la rhizosphère est étroitement liée à celle du système racinaire, elle change selon l'espèce et le génotype (Hinsinger et *al.*, 2005); son volume peut diminuer de 30% quand l'architecture des racines est plus groupée en masse compacte (Doussan et *al.*, 2003). L'extension spatiale de la rhizosphère dépend des interactions sol-racine (Darrah, 1993 et Hinsinger, 1998). Elle subit une évolution spatio-temporelle en fonction de la croissance, de l'activité racinaire et de la nature du végétal (Hinsinger et Gregory, 1998 ; Turpault et *al.*, 2005). La rhizosphère est un concept à géométrie variable, allant d'un millimètre si l'on considère le transfert d'éléments peu mobiles tels que le phosphore et le potassium (Calvet, 2003 ; Richardson et *al.*, 2009), elle peut atteindre plusieurs centimètres dans le cas de l'eau et des éléments mobiles tels que les nitrates (Darrah, 1993; Hinsinger, 2001). On distingue différentes régions telles que l'endorhizosphère, l'ectorhizosphère et le rhizoplan, les limites de ces régions sont elles-mêmes souvent difficiles à définir (Lynch, 1990 ; Gregory, 2006 ; Hinsinger et *al.*, 2009).

4.4. Fonctions de la rhizosphère

4.4.1. La rhizodéposition et l'effet rhizosphérique

La rhizodéposition est la libération de composés organiques par les racines des plantes (Lynch and Wipps, 1990 ; Nguyen, 2003). Les flux de carbone rhizodéposés ont fait l'objet de nombreuses études dans la mesure où la photosynthèse chez les plantes est la source majeure de ce carbone pour le sol. Ce processus est maintenant considéré comme l'une des interactions majeures des plantes avec leur milieu, et particulièrement des racines avec le sol, la microflore et la microfaune du sol (Jones et *al.*, 2004). Toute modification des caractéristiques physiques, chimiques et biochimiques du sol provoquée par l'activité racinaire est appelée l'effet rhizosphérique (Hinsinger et *al.*, 2005). Ce phénomène est du au prélèvements des nutriments et à la libération des composés organiques, certains libérés de façon active (sécrétion, mucilages), d'autres de façon passive (Fig.I.9) (exsudats, lysats, mucilages) (Marschner, 1995 ; Gregory, 2006 ; Jones et *al.*, 2009). La rhizodéposition représente une perte d'énergie pour la plante mais un apport trophique pour les micro-organismes telluriques, qui peuvent rendre disponibles pour la plante des nutriments nécessaires à leur croissance (Bazot, 2005 ; Waligora, 2010).

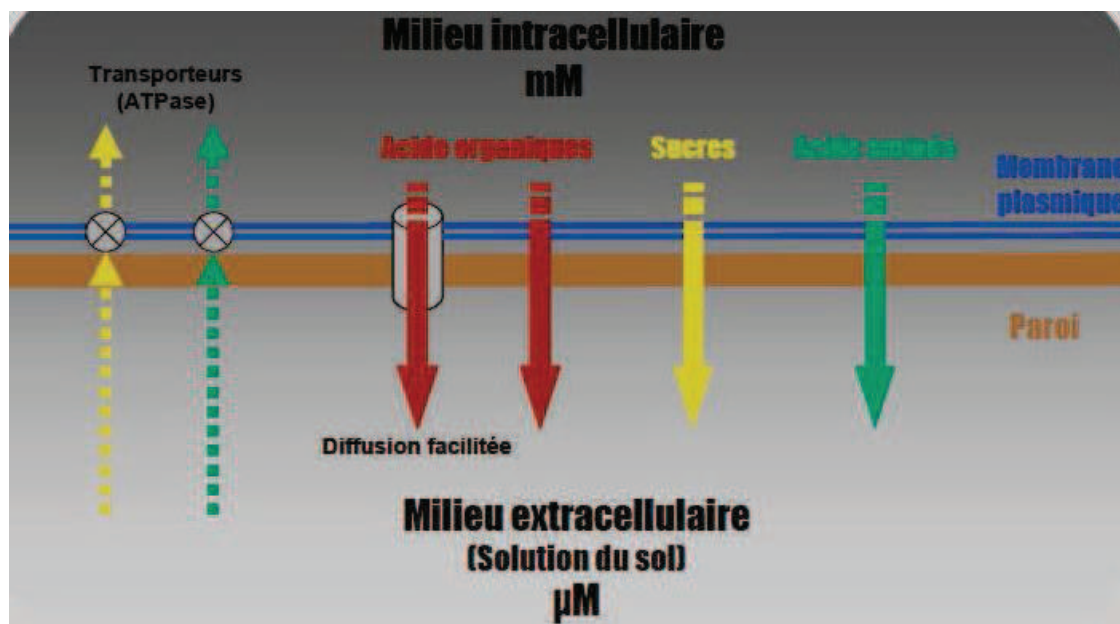


Figure I. 9. Schéma des exsudations racinaires par diffusion passive (Nguyen, 2007).

4.4.2. Les exsudations

L'exsudation a d'abord été définie comme la libération supposée passive de composés solubles de faible poids moléculaire (Rovira et *al.*, 1979 ; Lynch et Whipps, 1990 et Nguyen, 2003). Une partie significative des photosynthétats de la plante est directement libérée dans le sol sous forme de molécules organiques appelées "rhizodépôts", ces derniers représentent entre 5 à 40 % des produits de la photosynthèse (Nguyen, 2001), ainsi la racine modifie son l'environnement en les libérant. La composition et la quantité des composés organiques libérés change selon le végétal (Turpault et *al.*, 2005).

Les rhizodépôts constituent un élément majeur de perturbation de la microflore tellurique qui en retour, influence la croissance et la santé des plantes (Waligora, 2010). C'est pourquoi, Jones et *al.*, (2004) caractérisent l'exsudation racinaire comme le fait de racines métaboliquement actives et qualifient de "lyse" la perte de C par des racines ayant perdu toute activité métabolique. L'exsudation libère 10 à 100 fois plus de C que la desquamation de la coiffe, la sécrétion de mucilage et la disparition des poils absorbants (Viollet, 2010). Il est montré que le flux de rhizodéposition est plus important chez les plantes pérennes que chez les plantes annuelles (Bazot, 2005).

4.4.3. Les lysats

Les lysats représentent un apport important de matière organique (Gobat et *al.*, 2003). Ils constituent le contenu cellulaire libéré suite à l'autolyse par dégénérescence des poils absorbants, des parois cellulaires, des cellules épidermiques et corticales âgées (Mc Cully, 1999 ; Stengel et Gelin, 1998 ; Gobat et *al.*, 2003).

4.4.4. Les mucilages

Ce sont des composés viscoélastiques (Fig.I.10), formés de polysaccharides et autres protéines qui sont les principaux exsudats racinaires de poids moléculaires élevés, produits par les cellules de la coiffe et du rhizoderme (Watt et *al.*, 1993 ; Read et Grégory, 1997).

Les mucilages végétaux sont assez rapidement métabolisés par des organismes de la microflore rhizosphérique du fait qu'elles apportent des quantités importantes de carbone et secrètent d'autres polysaccharides résistant à la dégradation enzymatique (Lesuffleur, 2007). Ils présentent des propriétés viscoélastiques qui sont supposées jouer plusieurs rôles importants comme, l'adhésion des cellules de la coiffe avec les particules du sol, ce qui facilite leur desquamation, protégeant ainsi le méristème racinaire des blessures liées à la progression de la racine à travers les particules du sol, ce qui permet d'assurer la continuité du flux d'absorption d'eau et d'éléments minéraux.

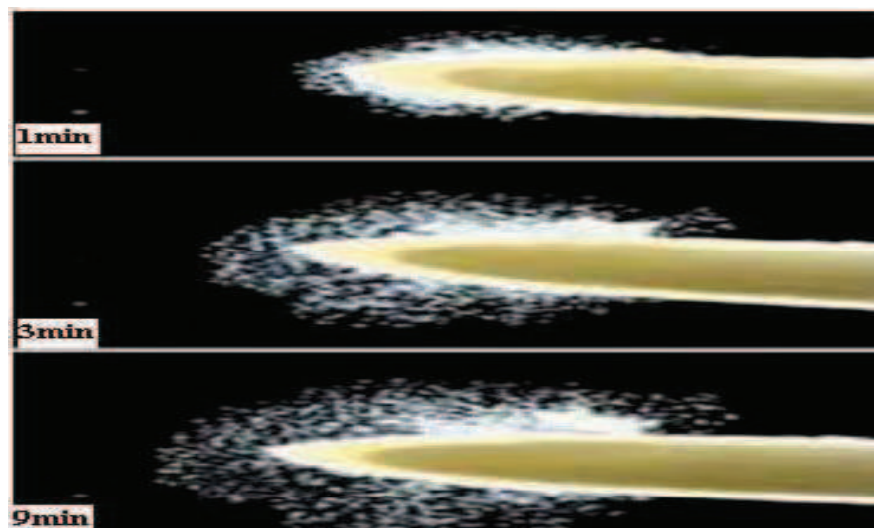


Figure I.10. Sécrétion du mucilage par l'apex d'une racine primaire de maïs de 1mm de diamètre observée pendant 1, 3 et 9 minutes (Waligora, 2010).

Cette continuité est facilitée par les phospholipides aux propriétés contenues dans le mucilage (Nguyen, 2007 ; Waligora, 2010). Les mucilages participent à l'augmentation des interactions entre les microorganismes du sol et les racines notamment dans les régions sèches (dessiccation et ré-humidifications), ils assurent une agrégation des particules argileuses (Watt *et al.*, 1993 ; Stengel et Gelin, 1998 ; Barnier, 2009). En dehors du mucilage de très nombreuses molécules sont sécrétées activement dans le sol par la racine. Ces molécules sont généralement des métabolites secondaires, des enzymes, des polypeptides et des protéines. Elles interviennent dans plusieurs processus tels que :

L'acquisition d'éléments minéraux, elles permettent de rendre certains éléments minéraux biodisponibles (Tarafdar et Claassen, 1988) ; les relations entre les plantes, certains composés sécrétés par les racines présentent des propriétés phytotoxiques qui inhibent le développement d'autres espèces végétales; d'autres composés favorisent les relations bénéfiques entre les plantes et les microorganismes (Walker *et al.*, 2003 et Bais *et al.*, 2004).

4.5. Impact de l'activité racinaire sur la rhizosphère

4.5.1. Les modifications des propriétés physiques

La végétation est considérée comme l'un des six principaux facteurs de la formation du sol (Jenny, 1941 in Gregory, 2006). L'une des fonctions des racines est d'exploiter physiquement les fentes et les fissures dans les roches et, par des cycles répétés d'humectation-dessiccation et de modifications chimiques dans la rhizosphère (Fig. I.10), pour augmenter le volume du sol à coloniser (Gregory, 2006). La croissance des racines peut exercer des forces considérables qui changent les propriétés physiques tels que la densité et la porosité du sol (Gregory et Hinsinger, 1999), les espaces poreux qu'occupent ces racines peuvent être modifiés sous la pression qu'elles exercent (Callot *et al.*, 1982 ; Hinsinger *et al.*, 2005). Les racines se développent dans les zones de faible résistance et progressent préférentiellement dans les pores, et les microfissures ou des galeries d'origine animale. Elles déforment le sol en augmentant radialement, ainsi le volume qu'elles occupent est équivalent au volume des pores perdus, cela induit la diminution de la porosité de 20 à 24 % dans le sol à proximité des racines (Bruand *et al.*, 1996 et Gregory, 2006).

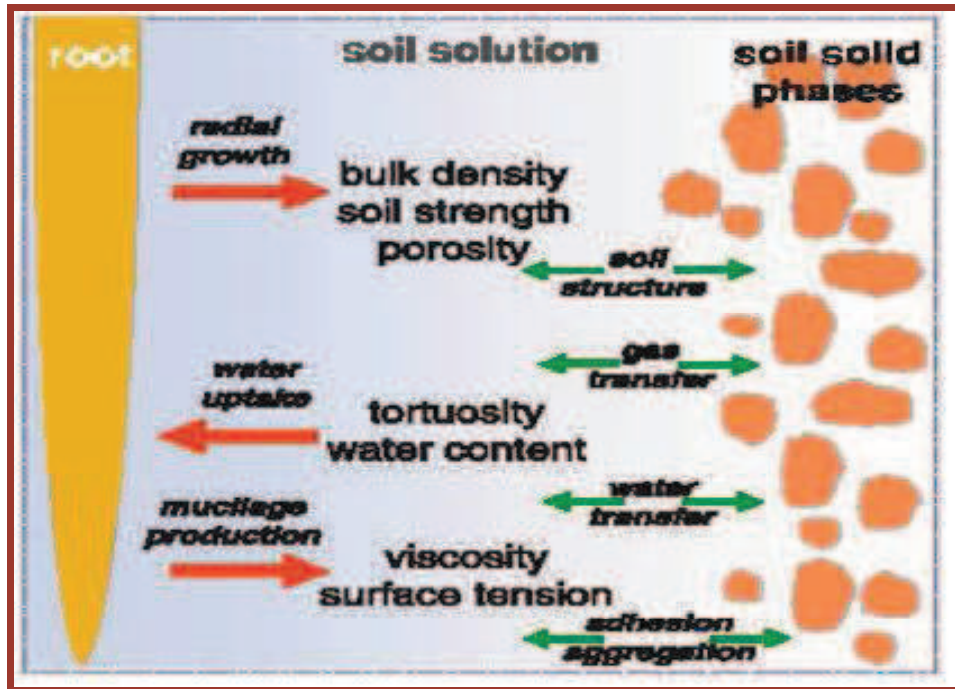


Figure I.11. Représentation schématique des fonctions de la racine impliquées dans les modifications des propriétés physiques dans la rhizosphère (Hinsinger et *al.*, 2005).

4.5.2. Les modifications des propriétés chimiques

La plante modifie la composition physico-chimique et microbienne du sol proche de la racine, en absorbant des nutriments et excréant des produits (Marchner, 1995 ; Volker et Guter, 2006) (Fig. I.11). La racine peut ainsi libérer des sécrétions, des mucilages, des cellules mortes, de l' O_2 et du CO_2 dans leur entourage, ce qui a pour effet de changer le potentiel redox et de faire baisser le pH (Tremel-Schaub et Feix, 2005). Le prélèvement des nutriments par les racines peut aussi affecter le pH du sol (Fig. I.13). Autrement dit, le pH peut être modifié par l'activité d'échange des racines : pour maintenir leur neutralité électrique, les plantes doivent en effet compenser leur absorption ionique par une excrétion de charges au niveau racinaire. Quand elles prélèvent davantage de cations que d'anions, les racines compensent en relâchant dans la rhizosphère un excès de charges positives sous forme de protons (H^+), ce qui entraîne une acidification du milieu (Fig. I.11 et I.12). Dans le cas contraire, quand la plante prélève davantage d'anions que de cations, les racines relâchent des ions (OH^-) hydroxydes ou bicarbonates (Römheld, 1986 ; Darrah, 1993 ; Hinsinger, 1998 ; Hinsinger et *al.*, 2003). Ainsi, le pH de la rhizosphère peut varier de une à deux unités pH de celui du sol distal (Hinsinger et *al.*, 2005) et un même végétal peut alcaliniser ou acidifier sa rhizosphère (Hoffland et *al.*, 1989). De plus la respiration des racines et de la microflore qui

leur est associée provoque une émission importante de dioxyde de carbone, qui constitue un facteur d'acidification du milieu (Davet, 1996).

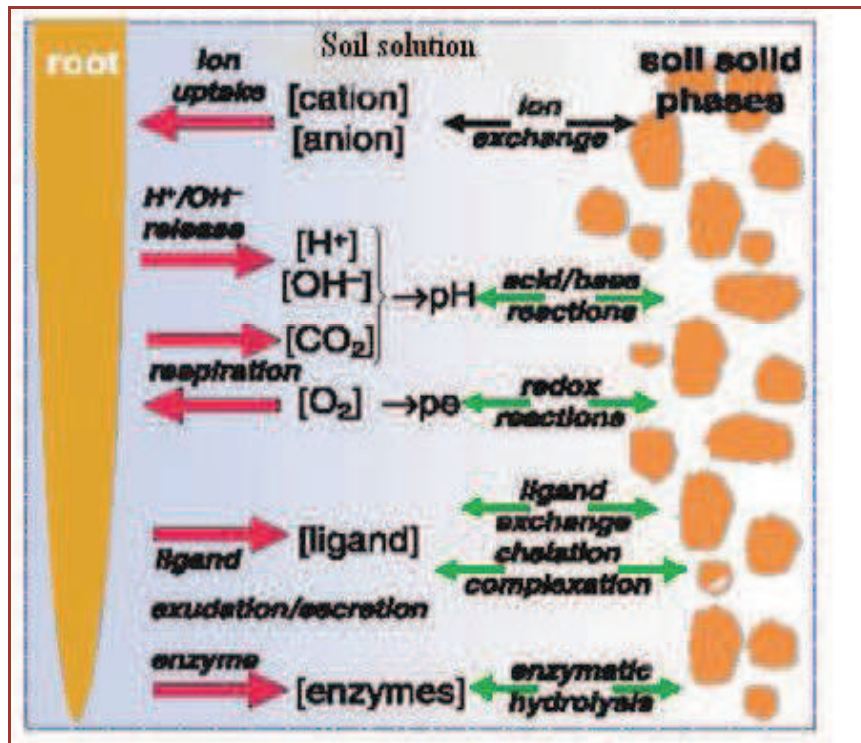


Figure I.12. Représentation schématique des fonctions de la racine impliquées dans les modifications des propriétés chimiques dans la rhizosphère (Hinsinger et *al.*, 2005).

Cette différence peut être due à plusieurs phénomènes tels que les prélèvements des cations K^+ et Ca^{2+} par les racinaires, accompagnés d'excrétion des protons H^+ et acides organiques, qui acidifient le sol (Darrah et Jones, 1994 ; Richardson et *al.*, 2009). Des études ont montré que les plantes qui prélèvent de l'ammonium ou de l'azote moléculaire acidifient leur rhizosphère alors que celles qui prélèvent de l'azote sous forme de nitrate tendent à l'alcaliniser (Römheld, 1986 ; Girard et *al.*, 2005).



Figure I.13. Carte du pH rhizosphérique d'une racine de colza (Les zones d'acidifications avec un pH inférieur à 5.7 représentées en rouge et les zones d'alcalinisation avec un pH supérieur à 6.9 en bleu. Image en couleur fausse; échelle 1cm (longueur de l'apex) (Jaillard et Hinsinger, 1993).

Ces mécanismes qui induisent des changements de pH dans la rhizosphère peuvent provoquer la dissolution de certains minéraux comme les carbonates, oxydes, phosphates, silicates, et libérer, entre autres, les éléments traces immobilisés dans ces minéraux. Enfin, il est important de souligner que la plante n'acidifie pas toujours sa rhizosphère, surtout lorsqu'elle pousse sur un sol acide où certains éléments nutritifs sont très peu mobiles (exemple : P est fortement fixé aux oxydes de Fe et Al), et où risque de toxicité du à Al et Mn (Marschner, 1995). Cependant, Calvaruso et *al.*, (2006), ont montré que des changements physico-chimiques de la rhizosphère, induits par les racines et la microflore qui leur est associée, influencent significativement les processus d'altération et le prélèvement de nutriments par les racines. A cela s'ajoute l'excrétion d'enzymes telles que la déshydrogénase, la phosphatase et la nitrogénase, pour libérer les éléments minéraux, comme la libération du phosphore organique à l'aide de la phosphatase par des procédés catalytiques d'hydrolyse (Rao et Tak, 2001 ; Alguacil et *al.*, 2005).

Les éléments présents en grandes quantités dans la solution du sol, comme le calcium ou le magnésium, sont transférés à l'interface sol-racine par un flux de mass qui est supérieur à la

demande (Lorenz et *al.*, 1994 ; McLaughlin et *al.*, 1998). Ces ions peuvent alors s'accumuler dans la rhizosphère et conduire dans les sols calcaires à des précipités de carbonates de calcium, autour des racines (Jaillard, 1985).

5. Biologie de la rhizosphère

L'environnement biologique de la rhizosphère se caractérise par des interactions complexes entre les racines, les micro-organismes et la faune du sol. Ces interactions peuvent être symbiotiques, saprophytiques, neutres ou pathologiques. Elles dépendent de l'approvisionnement constant en carbone qui est facilement utilisé comme une source d'énergie par les micro-organismes. Les rhizodépôts représentent une source d'énergie et d'éléments nutritifs qui stimulent la croissance des communautés hétérotrophes (Stengel et Gelin 1998 ; Gregory 2006). Cette activité biologique augmente dans les zones proches des racines et diminue vers l'extérieur (rhizoplan>sol rhizosphérique>sol global) (Darrah 1993 ; Bonkowski et al., 2000 ; Nguyen 2009). Ces microorganismes sont très abondants dans le sol et particulièrement actifs dans la rhizosphère en liaison avec l'exsudation du carbone organique par les racines. C'est précisément la stimulation de leur activité qui a fait émerger le concept de la rhizosphère (Hiltner, 1904 in Hinsinger, 1998). La colonisation de la rhizosphère par plusieurs microorganismes aboutit à un équilibre entre les différentes populations principalement dues à la compétition pour les sources de carbone et d'azote (Suty, 2010).

Les populations sont des éléments clés du continuum sol-plante où ils sont immergés dans un cadre sur les interactions qui affectent le développement des plantes (Wakelin et al., 2004; Barea et *al.*, 2005; Vassilev et *al.*, 2006). Il ya de nombreuses interactions entre la plante-microflore, la microflore du sol-macrofaune et la plante-microflore. Certaines relations sont positives et d'autres négatives : cas de maladies parasitaires (Silver et Nkwline, 2009). Ils peuvent avoir des effets négatifs, positifs ou neutres sur la croissance racinaire des plantes, en fonction des espèces de plantes et des conditions environnementales. A travers de processus déjà décrits pour les racines (modifications de pH et de potentiel redox et la complexation) (Kabata-Pendias, 1992). L'équilibre fonctionnel de l'arbre vise à favoriser de développement des organes responsables de l'acquisition de la ressource limitée, pour minimiser l'effet de la contrainte et assurer un meilleur fonctionnement global de l'arbre (Bloom et *al.*, 1985 ; Becel, 2010).

5.1. Les associations symbiotiques

La grande majorité des végétaux terrestres vivent en collaboration avec de nombreux microorganismes du sol, parmi lesquels, les champignons mycorrhizogènes (Fig. I.14). Les associations mycorhiziennes, entre les racines des plantes et les champignons, sont très fréquemment rencontrées dans presque tous les écosystèmes naturels. Ces symbioses racine-champignon jouent un rôle essentiel dans l'absorption des éléments minéraux (Guinberteau et Courtecuisse, 1997 ; Smith et *al.*, 2003 ; Redon, 2009).

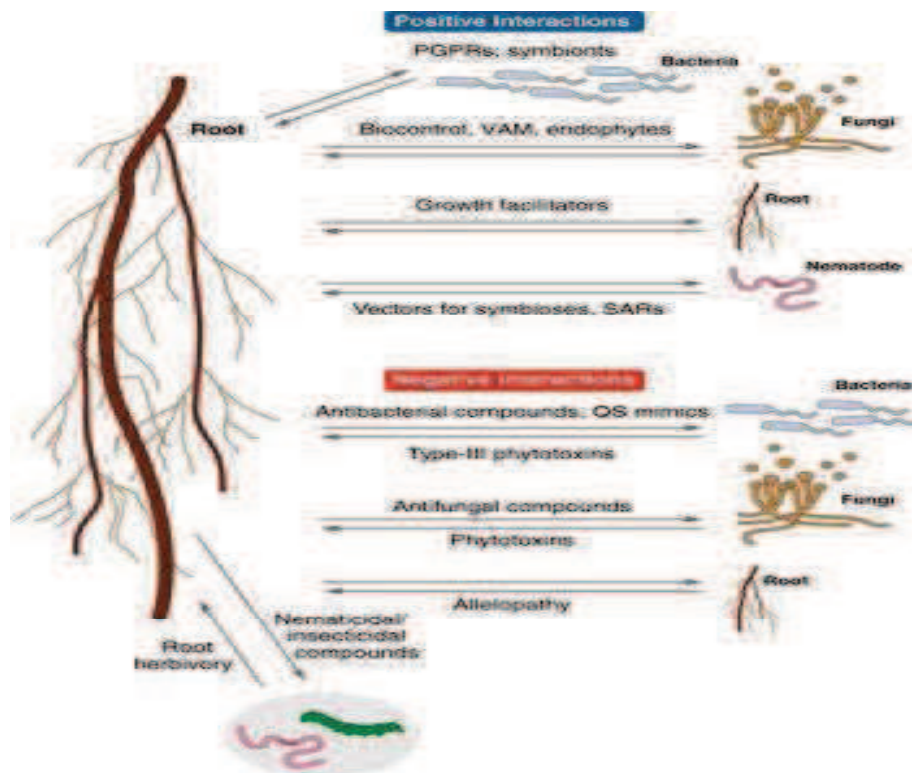


Figure I.14. Schéma des dialogues moléculaires au niveau de la rhizosphère (Besserer, 2008).

Il a été démontré qu'une gestion appropriée des mycorhizes en agriculture permet une réduction substantielle de l'apport d'intrants chimiques tout en maintenant les rendements à leur meilleur. Comme le champignon améliore la nutrition de la plante par une utilisation accrue des minéraux du sol, une diminution de 15 à 25 % et plus d'apport de fertilisants au sol peut être envisagée (Dubreuil, 2004 ; Smith and Read 2007).

A ce jour, les cycles de production des plantes, les pratiques agricoles et la gestion des écosystèmes ont été conçus et mis en œuvre en ignorant complètement l'existence des

mycorhizes et leurs multitude effets bénéfiques. Les champignons mycorhiziens sont pourtant omniprésents et jouent des rôles fondamentaux dans tous les aspects de la vie végétale et la préservation des écosystèmes. La mycorhization de l'olivier lui offre de meilleures conditions de croissance et de santé végétale par l'amélioration de la nutrition minérale et une tolérance aux conditions de stress tels que la sécheresse, la salinité et la pression de pathogènes (Rougemont, 2007 ; Besserer, 2008).

5.2. La mycorhizosphère

La rhizosphère d'une racine mycorhizée n'est pas la même que celle d'une racine non mycorhizée (Fig.I.15), de sorte qu'il est plus juste de parler de mycorhizosphère qui est due au flux de carbone qui va de la plante au réseau hyphal mycorhizien externe rayonnant dans le sol, puis dans le sol environnant. En effet l'efficacité du système racinaire à explorer le sol pour l'absorption des nutriments est plus importante lorsque les plantes présentent des symbioses avec des champignons mycorhizogènes (Schroder et Hartmann, 2003). Ainsi, ces plantes voient leur rhizosphère augmenter grâce aux réseaux mycéliens qui exploitent un plus grand volume de sol. Aux sécrétions racinaires s'ajoutent les exsudats propres aux champignons tel que les acides organiques et les antibiotiques (Davet, 1996 ; Prescott *et al.*, 2003 ; Oburger *et al.*, 2010).



Figure I.15. Rôle des mycorhizes dans le sol (Malloch, 2003).

5.2.1. Les mycorhizes

Il s'agit d'un type de symbiose extrêmement répandu dans la nature qui associe les racines d'une plante vasculaire à un mycélium. Les racines de plus de 80 % des espèces végétales sont mycorhizées (Guinberteau et Courtecuisse, 1997). Le phénomène de mycorhization aboutit à la constitution d'un organe mixte à morphologie et physiologie parfaitement intégrée, qui joue un rôle essentiel dans la nutrition des deux partenaires (Strullu, 1991 ; Durrieu, 1993 ; Duhou et Nicole, 2004).

5.2.2. La symbiose mycorhizienne

Les associations mycorhiziennes, entre les racines des plantes et les champignons, sont très fréquemment rencontrées dans presque tous les écosystèmes naturels. Environ 90% des plantes terrestres sont en effet capables de former des mycorhizes. Ces associations racine champignon forment une symbiose qui joue un rôle essentiel dans l'absorption des éléments minéraux dans les écosystèmes terrestres. Les deux partenaires s'échangent mutuellement des éléments nécessaires à leur bon développement : les champignons hétérotrophes fournissent des éléments minéraux à la plante en échange de molécules carbonées issues de la photosynthèse (Duhoux et Nicole, 2004 ; Redon, 2009).

5.2.3. Différents types de mycorhizes

Selon Le Tacon (1985) et Durrieu (1993), les mycorhizes se distribuent entre trois grands types morphologiques principaux (Fig. 16) : les ectomycorhizes ; les endomycorhizes et les ectendomycorhizes.

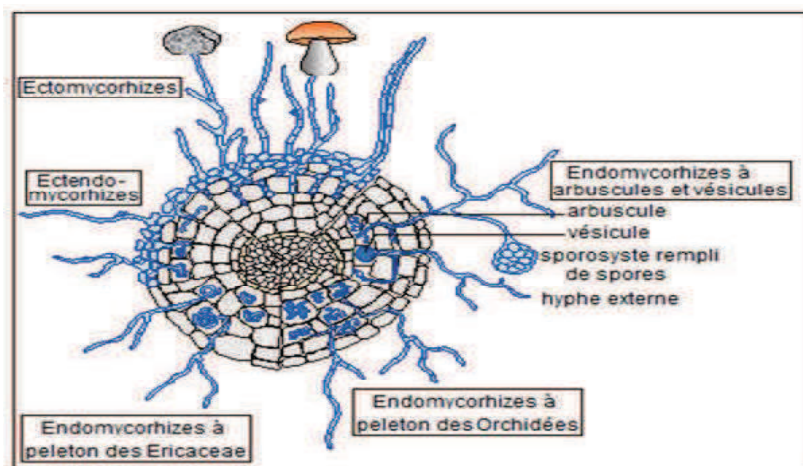


Figure I.16. Principales formes de mycorhizes (Le Tacon, 1985).

5.2.3.1. Les ectomycorhizes

Ce sont des associations où le champignon entoure les cellules vivantes des racines, mais ne les pénètre pas, le mycélium progresse entre les cellules du cortex racinaire pour former le réseau intercellulaire de Hartig qui fonctionne comme interface entre le champignon et la plante. En plus de ce réseau, les ectomycorhizes développent un manteau, ou gaine, formé d'hyphes qui recouvrent la surface de la racine (Fig.I.16). Des cordons mycéliens s'écartent du manteau vers le sol environnant. Habituellement, les poils absorbants ne se développent pas sur les ectomycorhizes, et les racines sont courtes et souvent ramifiées (Robert et Catesson, 2000). Les champignons ectomycorhiziens, des Ascomycètes et Basidiomycètes sont nombreux (plus de 5000 espèces) et s'associent surtout aux espèces ligneuses. Les arbres qui dépendent de cette symbiose ne représentent pas plus de 3% des taxa végétaux, mais ils constituent cependant les essences dominantes des forêts des régions boréales, tempérées et montagneuses (Duhoux et Nicole, 2004 ; Raven et *al.*, 2007; Selosse, 2007).

Chez les endomycorhizes, le champignon pénètre dans la racine, traverse la paroi des cellules corticales et produit des digitations appelées arbuscules ou des vésicules. Ces arbuscules et vésicules repoussent la membrane plasmique des cellules corticales et peuvent ainsi absorber des nutriments (Damas, 2013).

Dans les deux cas, la plante bénéficie d'une meilleure absorption des sels minéraux, comme le phosphore, ce qui se traduit par l'absence de poils absorbants. De plus, la plante est protégée des attaques pathogènes et des nématodes. Parallèlement, le champignon bénéficie des sucres et d'autres molécules organiques produites par la plante (González-Guerrero, 2005).

5.2.3.2. Les endomycorhizes

Les endomycorhizes s'associent à plus de 90% des plantes terrestres (Fig. I.17). On les observe chez la plupart des plantes herbacées, et surtout chez un grand nombre d'arbres et arbustes, soit au total près de 220 000 espèces (Gerbault, 2009).

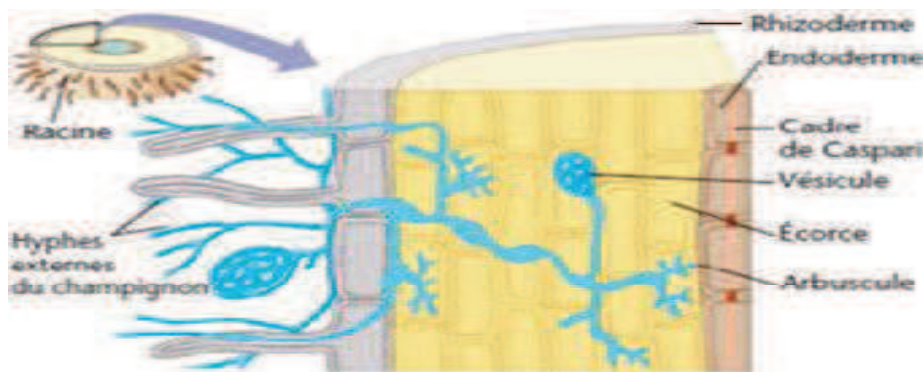


Figure I.17. Colonisation d'une racine par des endomycorhizes à vésicules et à arbuscules.

L'endomycorhize fut la première symbiose mycorhizienne avec les plantes. De fait, ce fut celle qui permit aux végétaux de sortir de l'eau il y a 400 millions d'années (Dechamplain et Gosselin, 2002). Dans cette association, les hyphes fongiques pénètrent les cellules corticales externes des racines de la plante, dans lesquelles ils se développent intracellulairement et forment des pelotes, des renflements et de petites ramifications (Prescott et al., 2003 ; Damas, 2013).

On distingue trois grands types d'endomycorhizes (Durrieu, 1993): les endomycorhizes à pelotons d'hyphes cloisonnés ; les endomycorhizes éricoïdes et les endomycorhizes des orchidées et les endomycorhizes à arbuscules et vésicules (EMA).

Les champignons EMA sont des symbiotes obligatoires appartenant aux Glomeromycota (Duhoux et Nicole, 2004). Les hyphes du champignon issus de la germination des spores multinucléées et qui ne peuvent croître qu'en présence d'exsudats racinaires chargés de substances phénoliques telles les flavonoïdes, pénètrent dans les cellules corticales de la plante, où ils forment des structures très ramifiées appelées arbuscules (Fig. I.17 et I.18a et b) où se font la plupart, et peut être la totalité des échanges entre la plante et le champignon, on remarque alors une hypertrophie cellulaire. Les hyphes intra et intercellulaires sont à l'origine des vésicules, formations globuleuses de grande taille, multinucléées, riches en lipides et en calcium (Fig. I.19). Le nombre de vésicules est différent suivant les partenaires fongiques et suivant les plantes hôtes. Dans cette association, les points de pénétration sont situés en arrière de la zone d'élargissement, les tissus méristématiques ou sénescents ne sont pas envahis et les poils absorbants sont rares (Strullu, 1991 ; Robert et Catesson, 2000 et Raven et al., 2007).

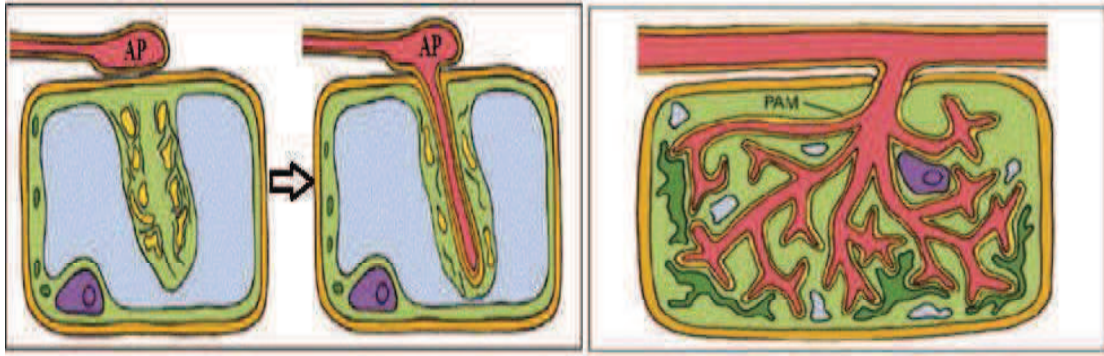


Figure I.18. a) Formation d'appressorium et pénétration (Reinhardt et Didier, 2007) **et b)** Arbuscule occupant la cellule (Reinhardt et Didier, 2007).

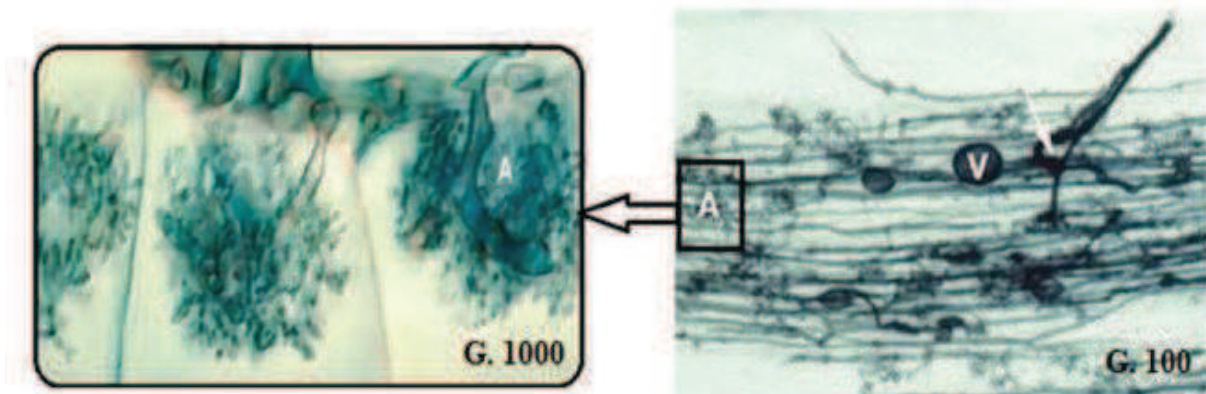


Figure I.19. Champignons endomycorhigènes (*Glomus* sp.) au microscope photonique, arbuscules (A) et vésicules (V).

5.2.3.3. Les ectendomycorhizes

Comme le nom l'indique, ce sont des formes intermédiaires. Elles forment un manchon fongique autour des racines et un réseau de Hartig intercellulaire mais en plus les hyphes pénètrent à l'intérieur des cellules. Ces hyphes intracellulaires sont soit sous forme de pelotons (mycorhizes arbutoïdes) soit sous forme d'hyphes très courts (mycorhizes monotropoïdes). Ces champignons ectendomycorhiziens sont des basidiomycètes (Nultsh et Miesch, 1998 et Redon, 2009).

5.2.4. La mycorhization et l'amélioration de la nutrition minérale

L'avantage de la mycorhization est de permettre à l'arbre (en passant par le réseau d'hyphes de champignons) d'augmenter sa capacité à puiser des ressources minérales en couvrant un très grand territoire (Fig. I.20), comparativement aux seules racines des végétaux (Dechamplain et Gosselin, 2002).

5.2.4.1. Amélioration de la nutrition phosphatée

L'absorption du phosphore par les racines des plantes se fait essentiellement sous la forme d'orthophosphates (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-}), leur concentration dans la solution du sol est très faible.

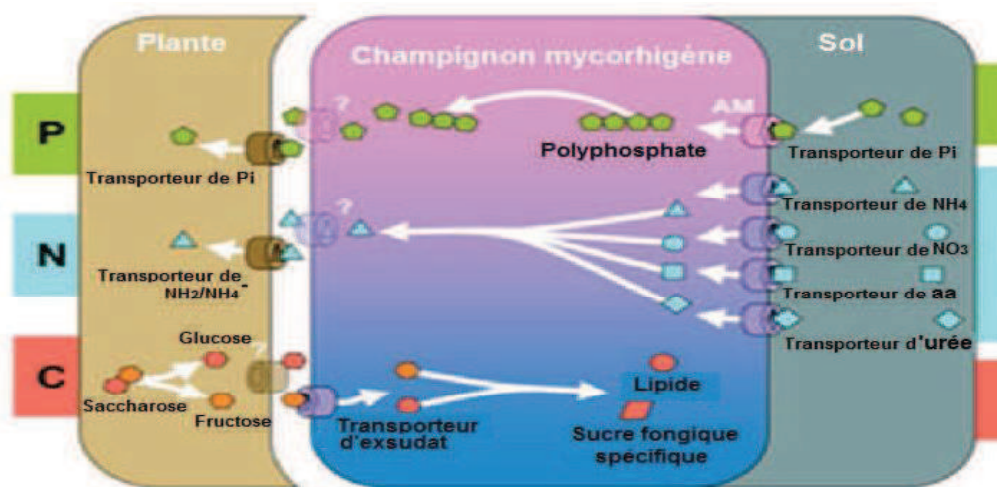


Figure I. 20. Schéma des processus d'échanges lors d'une symbiose mycorhizienne (Duhoux et Nicole, 2004).

Les champignons mycorhiziens peuvent accumuler le phosphore sous forme mobilisable et le transférer à la plante (Fig.I.20), ou utiliser les formes organiques ou minérales non assimilable du sol en accroissant la taille du pool assimilable au voisinage de la racine par l'excrétion d'enzymes (phosphatases) dégradant les phosphates organiques (Mousain et al.,1997 ; Duhoux et Nicole, 2004). Ainsi que de grandes quantités d'acides organiques (Oburger et al., 2010), en particulier de l'acide oxalique qui est un puissant chélatant qui piège les cations comme le calcium, libérant ainsi les phosphates (Le Tacon et Selosse, 1997 ; Neumann et Römheld 2007).

5.2.4.2. Amélioration de la nutrition azotée et potassique

Duhoux et Nicole, (2004), ont montré que les champignons contribuent à l'amélioration de la nutrition azotée chez la plante-hôte de deux façons : la mise à disposition de la plante (Fig. I.20), par la machinerie enzymatique du champignons, de certaines formes d'azotes (acides aminés, peptides et protéines) mal utilisées par la plante seule ou par augmentation des quantités d'azote minéral (NO_3^- et NH_4^+) absorbé par le système mycorhizien.

Des recherches ont démontrés que certaines ectomycorhizes peuvent pénétrer à l'intérieur de cristaux de feldspaths en les dissolvants et ainsi y puiser du potassium. Ces champignons

sont particulièrement utiles dans des sols où la rétention de minéraux n'est plus possible (Dechamplain et Gosselin, 2002).

5.2.4.3. Amélioration de la nutrition hydrique

Des études physiologiques et cellulaires ont montré que les structures mycéliennes sont bien adaptées aux mouvements de l'eau entre les champignons et les plantes. Chez les ectomycorhizes, les rhizomorphes sont capables de puiser l'eau à plusieurs centimètres des racines mycorhizées et de la mettre à la disposition de la plante (Strullu, 1991 ; Meyer et *al.*, 2004). Chez les Angiospermes endomycorhizées, on peut observer une augmentation de la transpiration et de la conductance foliaire qui expliquerait l'amélioration de la conductivité hydrique des racines (Nouaïm et Chaussod, 1996).

5.2.4.4. Production d'hormones

Les champignons mycorhiziens peuvent produire des composés hormonaux et notamment de l'acide indole-3-acétique (AIA) qui intervient probablement dans l'établissement de l'association symbiotique en stimulant la formation de racines courtes réceptives à l'infection (Karabaghli et *al.*, 1997).

5.2.4.5. Résistance au calcaire et à la salinité

La mycorhization pourrait jouer un rôle dans la résistance des plantes aux effets du stress salin, ce qui pourrait se traduire par une amélioration de la nutrition hydrominérale (Manga et *al.*, 2008). Sur des sols calcaires, les champignons mycorhiziens protègent les racines contre le calcium qui va être toxique pour la plante en limitant l'absorption de cet élément en excréant dans le milieu des acides organiques qui vont le chélater dans le sol, ou en limitant son transfert à la racine en le stockant dans ces structures dans les parois des racines ou dans la vacuole qui est un compartiment de détoxification bien connu (Genet, 2008 ; Oburger et *al.*, 2010).

5.2.4.6. Protection contre les polluants et les pathogènes

Les mycorhizes protègent les arbres des effets toxiques des polluants, notamment les métaux lourds non décomposables comme le plomb, le cadmium, le nickel, le mercure ou le chrome et des substances radioactives tel le strontium et le césium, en les retenant dans le manteau fongique ainsi réduire leur concentration à l'intérieur de la plante (Egli et Brunner, 2002). L'association mycorhizienne est un moyen de lutte biologique contre les organismes pathogènes telluriques en réduisant la teneur des substrats carbonés du milieu rhizosphérique

en utilisant les exsudats racinaires, ses propres besoins, en formant des obstacles mécaniques difficiles à franchir pour certains micro-organismes, en synthétisant des inhibiteurs du développement de certains micro-organismes du sol et enfin et surtout, en produisant des substances antibiotiques (chloromycorrhizin A, mycorrhizin A) qui peuvent protéger la plante (Dalpé, 2005).

5.2.4.7. Amélioration de la structure du sol

Les mycorhizes à arbuscules jouent un rôle important sur les interactions écologiques du sol et sur la préservation de la structure du sol par stabilisation des agrégats (Rillig, 2004). Cette stabilisation se produit par deux mécanismes : le premier se fait par le mycélium des mycorhizes qui vient lier les agrégats du sol entre eux et le deuxième est constitué par le relâchement d'une substance chimique appelée glomaline, qui lie les particules de sol entre elles (Douds, 2004).

5.2.5. Les mycorhizes chez l'olivier

L'olivier est une plante particulièrement mycotrophe. Dès le stade de la pépinière jusqu'à l'état adulte productif, la mycorhization lui offre une assurance de meilleures conditions de croissance et de santé végétale par un meilleur accès aux sels minéraux et à l'eau, et par une meilleure tolérance à des conditions de stress tels que la sécheresse, la salinité des eaux ou du sol, et pression de pathogènes (de Rougemont, 2007). Il a été mis en évidence la grande dépendance de l'olivier vis-à-vis des mycorhizes pendant sa croissance ainsi que leur efficacité (Khelfane-Goucem, 2001). L'installation d'une frange de couverture végétale au centre de la zone située entre les oliviers (avant la pluie automnale) permet la protection du sol contre l'érosion, la réduction de son évaporation et l'amélioration de ses propriétés physico-chimiques. La couverture de graminées naturelles est recommandée vue qu'elle assure en plus de la protection contre l'érosion et l'amélioration de la fertilité, l'augmentation de l'infiltration de l'eau dans le sol. Cependant, le contrôle mécanique freine la concurrence avec l'olivier et présente un intérêt particulier dans le cas de l'olivier biologique (Castro et Gomez, 2006 *in* Aghrab, 2007).

5.2.5.1. Endomycorhization contrôlée et croissance chez l'olivier

L'endomycorhization de l'olivier en pépinière, améliore sa nutrition et donc sa croissance (Fig.I.21a) via le réseau dense d'hyphes que forme le mycélium fongique, facilitant l'accès et le transfert d'azote, phosphore et oligoéléments par augmentation de la surface d'échange.

Pour les sels minéraux peu mobiles tels que le phosphate calcique une zone d'épuisement de la concentration se forme près de la racine. Les hyphes ayant un diamètre plus fin que les racines, atteignent des zones où cette concentration n'est pas encore épuisée. Ainsi les substances difficilement assimilables, à cause de leur nature ou parce qu'elles sont bloquées par l'alcalinité du sol, sont plus facilement métabolisées (de Rougemont, 2007).

5.2.5.2. Endomycorhization et résilience au stress hydrique chez l'olivier

La mycorhize est un phénomène d'amélioration de la résilience d'une plante (capacité d'un organisme de supporter des chocs et retrouver sa fonction originale). Non seulement la tolérance au stress hydrique est plus élevée mais aussi la récupération après une phase de stress est améliorée (Fig. I.21b). Pour faire face à une haute salinité des ajustements osmotiques du mycélium protègent la plante contre la dessiccation (Ruiz-Lozano et *al.*, 1996).



Figure I.21. a) effet des mycorhizes sur la croissance de l'olivier après 16 semaines ; b). stress hydrique de 2 mois sur oliviers de 4 mois, sans et avec traitement mycorhizien (de Rougemont, 2007).

5. 3. Les endophytes (dark septate endophytes : DSE)

Dans le sol, les racines sont également colonisées par des champignons endophytes (Rodriguez et *al.*, 2009 ; Rai et *al.*, 2012). Ceux-ci incluent les endophytes foncés septés qui sont ubiquistes et dont on connaît mal le rôle dans la croissance des plantes et le maintien des communautés végétales (Peterson et *al.*, 2008). Certaines études ont montré un effet positif de ces champignons endophytes foncés septés sur l'amélioration de la nutrition minérale et de la résistance des plantes dans certains milieux qui subissent des stress biotiques et abiotiques (Besserer, 2008 ; White and Hammond, 2008).

Les champignons DSE sont pour la plupart des ascomycètes présents de plus en plus dans toutes les plantes et sont extrêmement abondants. Ils ont des hyphes pigmentés à la mélanine qui les protège des conditions extrêmes de l'environnement. Le degré de pigmentation dépend de la provenance, de l'âge et des conditions de croissance du champignon. Ils forment des microsclérotés à l'intérieur des cellules végétales (Fig. I.22) et parfois un réseau de Hartig très fin chez les conifères. Ils forment des infections internes localisées dans le feuillage, la tige et les racines et se développent entre et dans les cellules de l'épiderme, du cortex et parfois même dans les tissus vasculaires (Horton et *al.*, 1998 ; Faeth, 2002 ; Addy et *al.*, 2005).

La relation entre les EFS et la plante reste ambiguë, ils peuvent se présenter comme pathogènes bénins, comme saprotrophes sur des tissus racinaires, ou comme champignons mutualistes (Addy et *al.*, 2005 ; Rodriguez et *al.*, 2009). La relation peut aller du mutualiste vers le pathogène en fonction de l'espèce végétale et des conditions de sa croissance (Jumpponen, 2001 ; Rai et *al.*, 2012). La forme pathogène se manifeste lorsque le champignon EFS envahit le cylindre central, bouche ou détruit les tissus conducteurs et provoque le flétrissement et le rabougrissement de la plante (Barrow, 2003).

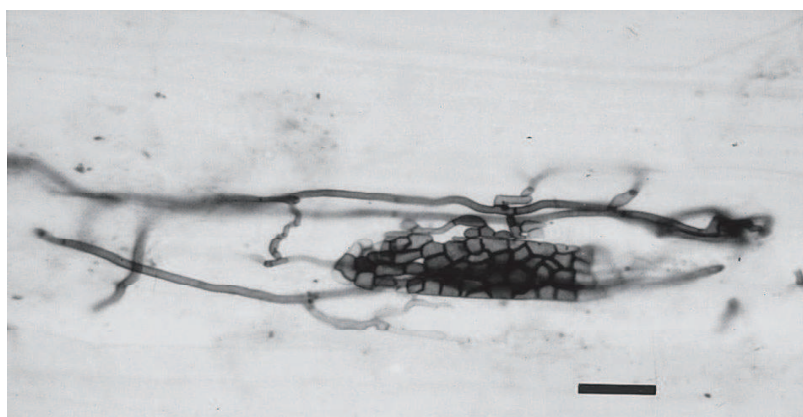


Figure I.22. Hyphe septé et foncé et microsclérotés d'une racine de pin (Horton et *al.*, 1998).

Les champignons EFS peuvent établir des associations bénéfiques avec la plante. Ces derniers possèdent des vacuoles pouvant renfermer des polyphosphates et sont capables de transférer de l'azote à la plante hôte en échange du carbone (Peterson *et al.*, 2008). Selon Wu et Guo (2007), il est possible que les EFS soient capables de sécréter des enzymes qui permettent de dégrader efficacement la matière organique et ainsi mettre à disposition de la plante des éléments nutritifs et aussi des substances régulatrices de croissance.

Les endophytes peuvent aussi produire des mycotoxines tel les alcaloïdes qui protègent les plantes contre les herbivores (Faeth, 2001). Le rôle écologique des champignons EFS est actuellement en suspens. Leur présence généralisée dans les écosystèmes froids ou secs, leur capacité de fonctionner comme champignons mycorrhiziens et leur colonisation interne par des structures actives suggèrent que ces endophytes sont des composantes importantes des écosystèmes stressés (Barrow, 2003).

5.4. Faune du sol

La population du sol est nombreuse, bien que très variable d'un sol à un autre et d'une saison à une autre, le poids de matière vivante à l'hectare serait en moyenne de 2,5 tonnes, mais ce chiffre peut osciller de 1 à 5 tonnes et peut l'être encore plus selon l'importance des apports organiques, aliments des animaux et de la flore du sol. La faune est variée, une grande diversité d'espèces, de tailles, de modes de nutrition et de source d'énergie caractérisent les êtres vivants qui la composent (Culliney, 2013). Le biofonctionnement des sols regroupe un ensemble de fonctions assurées par les organismes vivants dans ce sol (Fig. I.23) et qui sont en interaction avec les composantes physiques et chimiques de celui-ci, permettant la dynamique de la matière organique et de l'eau, ainsi que le recyclage des nutriments (Antunes *et al.*, 2008 ; Decaens, 2010 ; Kumaraswamy et Udayakumar, 2011). Les organismes vivants du sol sont de taille variable, comprenant les micro-organismes, les invertébrés et les racines (Dai *et al.*, 2003 et Hishi *et al.*, 2008). Les micro-organismes assurent des fonctions essentielles comme la biodégradation de la matière organique et les cycles biogéochimiques. Malgré cette importance écologique, ceux-ci restent très mal connus (Cluzeau *et al.*, 2009 ; Maron-Rios *et al.*, 2010).

Les invertébrés du sol présentent une diversité taxonomique importante. Ils comprennent des organismes de petite taille comme les nématodes, qui vivent dans les films d'eau autour des particules de sol, des organismes de taille intermédiaire comme les acariens et les collemboles qui vivent dans la porosité existante, et des organismes de grande taille comme

les vers de terre et certaines larves d'insectes qui créent leur propre porosité en se déplaçant dans les sols (Uvarov et Scheu, 2004 ; Aubert et *al.*, 2005).

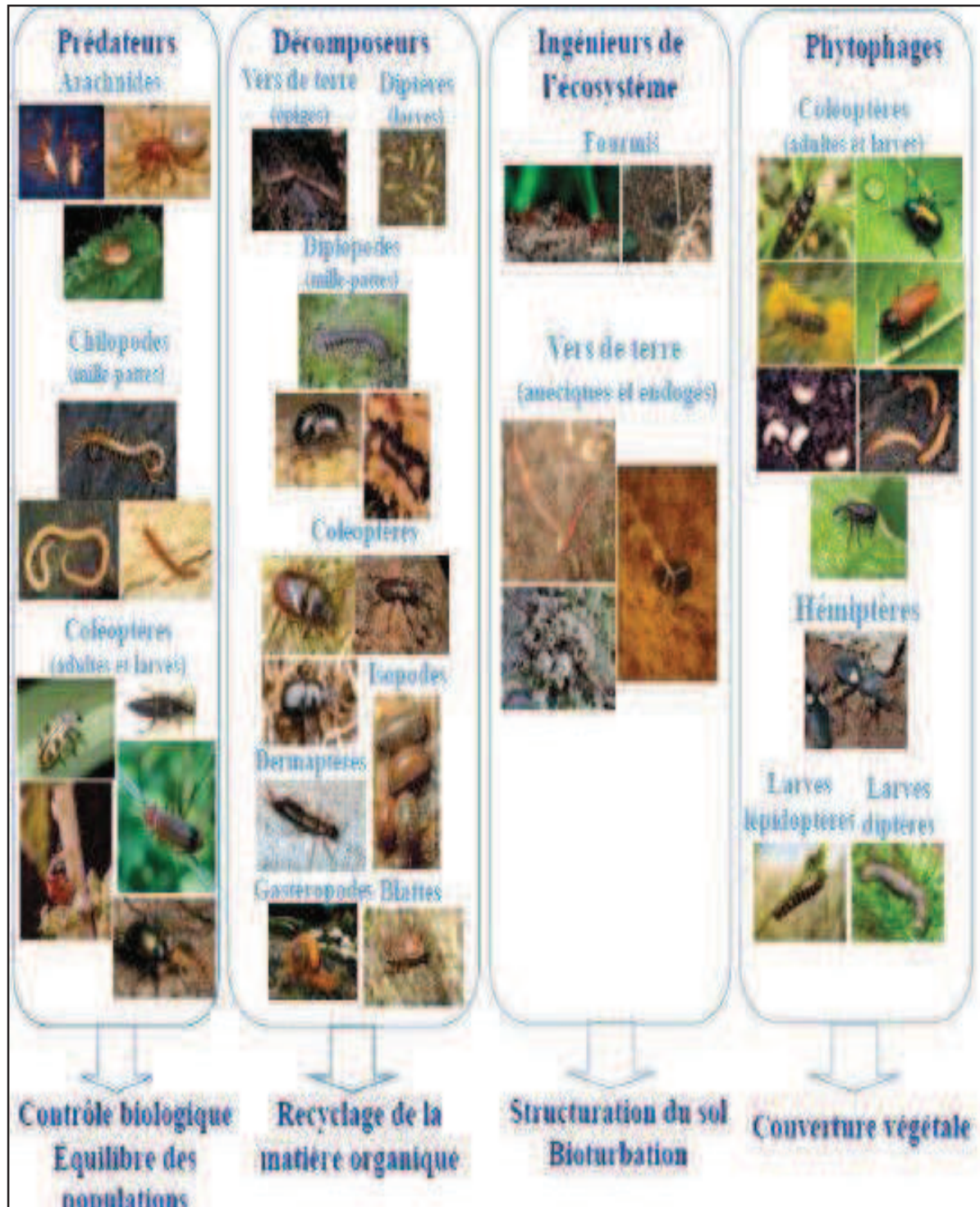


Figure I.23. Rôle des invertébrés du sol dans l'écosystème terrestre (I.R.D., 2010).

Le rôle bénéfique de ces êtres vivants dans le fonctionnement et l'écologie des sols est encore mal connu dans la gestion du sol. Ils sont pourtant des indicateurs de la qualité des sols et doivent être considérés comme une ressource permettant d'améliorer ces agroécosystèmes (Morris et Campos, 1999 ; Herrick, 2000 et Rebek *et al.*, 2002). Les sols constituent donc des écosystèmes à part entière à la base de la production végétale et la qualité agronomique des sols repose à la fois sur des composantes physico-chimiques mais aussi biologiques. Les systèmes de production agricole doivent donc tenir compte de ces composantes biologiques par des pratiques culturales adaptées. La nécessité d'études sur le terrain de l'influence des pratiques agricoles sur les organismes vivants du sol a été souligné à plusieurs reprises (Filser *et al.*, 2002 et Bedano *et al.*, 2006).

La réduction de la biodiversité en raison de la perte d'habitat et la dégradation des écosystèmes a fait qu'il est essentiel d'établir des priorités d'utilisation des terres pour leur conservation (Wilson *et al.*, 2006). Ces priorités ont été suggérées sur une gamme d'échelles géographiques principalement à travers des points chauds de la diversité ou d'endémismes, identifiés pour la préservation (Shanas *et al.*, 2011). Dans les milieux méditerranéens, les conditions climatiques et pédologiques agissent fortement sur la réduction de la dynamique de la succession des communautés (Fadda *et al.*, 2008). Les politiques mises en œuvre et adoptées ont conduit à une dégradation des agroécosystèmes pour lesquels actuellement on tente de restaurer les fonctions (Santos *et al.*, 2007). Dans un contexte de ressources en eau et engrais restreintes et au vu de la cherté des engrais qui sont souvent importés, on se doit de réfléchir à des actions innovatrices pour une meilleure valorisation de ces cultures. C'est ainsi que le besoin d'analyses écologiques des communautés d'organismes de ces sols s'impose (Bonkowski *et al.*, 2000). De ce fait, une meilleure connaissance du fonctionnement biologique des sols de l'olivier sur les changements des propriétés physiques et chimiques est nécessaire.

6. Influence des espèces sur la rhizosphère : cas de l'olivier / figuier

Les modifications de la rhizosphère dépendent non seulement des facteurs abiotiques mais aussi de l'activité biologique qui lui est associé, qui apparait comme reliée à l'espèce végétale, à son géotype et à la fertilité des sols (Chen *et al.*, 2006). Les espèces ligneuses diffèrent dans leur influence sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols en créant ainsi un environnement de sol distinct (Chiu *et al.*, 2007 ; Calvaruso *et al.*, 2011).

Ainsi pour le phosphore, il a été montré que la microflore rhizosphérique est différente chez trois génotypes de *Brassica*, dans le maintien d'une haute biodisponibilité phosphatée (Marshner et *al.*, 2007). La rhizodéposition et la dégradation de la litière sont les principales sources de matière organique des sols (Grayston et *al.*, 1996 ; Ayres et *al.*, 2009), c'est ce qui nous a amené à considérer le figuier pour mieux comprendre et voir si les deux espèces rustiques ont un impact différent ou pas sur les propriétés des sols à proximité de la racine.

7. Le figuier

Le figuier est aussi ancien en Algérie comme dans le reste des pays Méditerranéens. Il existe en petites plantations disséminées sur le territoire algérien (Ferrah, 2009), mais sur 7 600 000 figueraies que compte l'Algérie, plus de 6 000 000 arbres sont concentrés dans les régions de Tizi-Ouzou, Bejaia et Bouira. C'est pour cette raison, qu'il est d'usage de s'attacher plus spécialement à l'étude des figueraies kabyles qui forment le fond de la production algérienne (Rebour, 2005). La culture est localisée principalement dans les zones de montagne, sur des sols pauvres, schisteux, marneux ou calcaires dans des terrains souvent accidentés (Walali et *al.*, 2003). Cependant, nous constatons que le figuier est bien une plante rustique rencontrée dans toutes les zones pédo-climatiques difficiles à travers tout le territoire national. Avec l'olivier, il représente le symbole de l'arboriculture fruitière en Kabylie. Les racines du figuier sont denses et traçantes, développées en profondeur pour chercher de l'eau et surtout dans des régions drainées où les racines peuvent croître facilement, occupent une grande surface. La densité du chevelu racinaire permet une exploitation maximale des réserves nutritives dans le sol qui vont en profondeur en cas de manque en surface (Oukabli, 2003).

7.1. Classification botanique du figuier

Spichiger, (2004) classe le figuier comme suit :

Embranchement : Phanérogames,

Sous embranchement : Angiospermes,

Classes : Eudicot,

Ordre : Rosales,

Famille : Moracées,

Genre : *Ficus*.

Espèce : *Ficus carica* L.

7.2. Exigences écopédologiques du figuier

Les besoins réels annuels en eau du figuier sont élevés. Ils ont pu être évalués à un total de 700mm d'eau répartis durant la saison végétative avec une demande importante durant la période de forte croissance. Pour ce qui est des exigences édaphiques du figuier, il est très accommodant sur la nature du sol, il préfère cependant ceux s'échauffant rapidement, de nature sablo-argileuse avec la présence de calcaire. Bien que résistant à la sécheresse, une certaine fraîcheur est favorable au développement des fruits. On le retrouve dans tous les types de sols (Vidaud et *al.*, 1997). Il est souvent considéré comme le plus robuste de tous les arbres fruitiers (Bretaudeau et Faure, 1991), tolère des sols avec un pH allant de 5,5 à 8. Le figuier est surtout exigeant en potasse et ne requiert pas de fortes doses de fumures azotées, celles-ci provoquant un développement végétatif intense et un déséquilibre en végétation et fructification (Oukabli, 2008).

Le figuier est un arbre robuste et peu exigeant. En adaptant son mode de culture, il peut être planté en toutes régions. Par le choix judicieux des variétés on peut obtenir une récolte abondante et de qualité (Goby, 2006). La production de figue au niveau mondial se situe autour d'un million de tonne dont la majorité est issue du bassin méditerranéen (Lispinasse et Leterme, 2005).

Comme dans tous les autres pays de la méditerranée, le figuier est aussi ancien en Algérie, avec l'olivier, ils représentent les deux arbres symboles de l'arboriculture fruitière en Kabylie. Il existe en petites plantations disséminées sur le territoire Algérien et s'adapte à tous les types de sol (Ferrah, 2009).

7. 3. Morphologie et cycle végétatif du figuier

Le tronc est souvent droit et circulaire, mesurant jusqu'à 1 m de circonférence, son bois est tendre et cassant traversé par un canal médullaire. L'écorce est lisse peu fissurée de couleur gris clair, conservant longtemps les traces d'insertion des feuilles et la cicatrice annulaire caractéristique laissée par les stipules. Cette caractéristique se manifeste sur les parties âgées de 2 à 3 ans. Les parties plus jeunes passent d'un épiderme vert tendre à un brun vernissé orné de nombreuses lenticelles de grande taille. L'allongement des tiges débute généralement en Mars après l'ouverture des bourgeons. Deux à trois feuilles se mettent en place entre Mars et Avril. Puis, entre Mai et Juin, le rythme d'émission des feuilles s'accélère et il s'estompe en Juillet (Vidaud et *al.*, 1997). Selon Valdeyron, (1996), vers le début Novembre, les feuilles tombent et l'arbre entre dans la phase dite *repos hivernal*.

8. Objectifs de la thèse

L'olivier représente pour l'Algérie l'espèce arboricole la plus importante par la superficie qu'elle occupe et la caractéristique du milieu socio-économique des régions où elle se développe. Les vergers oléicoles de Kabylie sont des agrosystèmes souvent déficients en éléments nutritifs et à fortes contraintes. Cette déficience est principalement liée à une pratique de fertilisation inexistante. La rhizosphère fait aujourd'hui l'objet de recherches dans différentes disciplines scientifiques, elle constitue une zone d'interaction et d'échange dynamique entre le sol, la solution du sol et la plante, ainsi que son cortège de micro-organismes (Chaignon, 2001 ; Devau et *al*, 2010). Les racines peuvent induire la dissolution de minéraux peu solubles ou la désorption d'ions chimisorbés et de mobiliser des quantités de phosphore considérées comme peu disponibles sur la base de seuls critères chimiques (Arvieu, 1998). Les faibles teneurs en phosphore dans les sols d'oliveraies du nord de l'Algérie peuvent limiter la production oléicole. Pour la région, il s'agit de savoir comment atteindre un état de fertilité durable dans des conditions économiquement acceptables. Une gestion raisonnée de la fertilisation requiert l'évaluation de la biodisponibilité du phosphore présent ou apporté dans les sols. De nombreux travaux sur la physiologie de l'olivier et les conditions édaphiques qu'il exige existent mais, bien peu sont disponibles sur sa rhizosphère. Dans ce contexte de limitation des intrants dans les sols déficients, il est nécessaire de raisonner différemment la production végétale. Une voie repose sur le concept d'intensification écologique, selon lequel il s'agit d'utiliser les organismes du sol et de l'écosystème pour accroître la disponibilité en P pour l'environnement et donc aussi sa biodisponibilité pour la plante. Un levier de l'intensification écologique consiste à utiliser les processus physiques, chimiques et biologiques opérant à l'interface sol/racines (i.e. la rhizosphère) afin d'augmenter et ce donc de manière naturelle la concentration en cet élément dans la solution du sol, facilitant ainsi la croissance des plantes (Hinsinger et *al.*, 2009). Cette facilitation de la nutrition phosphatée des plantes annuelles déjà été constatée au laboratoire et sur le terrain pour certaines espèces.

L'objectif général de la thèse est alors d'utiliser une telle approche afin d'évaluer la biodisponibilité du phosphore dans l'agrosystème oliveraie. Pour cela, il est retenu comme contexte d'étude les oliveraies de Kabylie nord de l'Algérie. La biodisponibilité du P résulte d'un grand nombre de processus comprenant l'interception racinaire, le transport dans la solution et le réapprovisionnement de la solution à partir des constituants solides (Fig. I.3). Le sujet de cette thèse porte principalement sur la biodisponibilité du phosphore dans la

rhizosphère de l'olivier, mais également sur la distribution du système de prélèvement (racines fines) de l'olivier notamment les symbiotes mycorhizogènes et la faune du sol, suivis d'une étude comparative entre l'olivier et le figuier. Ces priorités d'utilisation des terres ont été suggérées sur une gamme d'échelles géographiques principalement à travers des points chauds de la diversité ou d'endémismes, identifiés pour la préservation (Shanas et *al.*, 2011).

L'olivier (*Olea europea*) et le figuier (*Ficus carica*) sont des espèces rustiques qui connaissent un regain d'intérêt en Algérie. Elles ont été longtemps marginalisées et la baisse des rendements qu'elles enregistrent ne manque pas d'être inquiétante. Ces espèces sont de loin les plus cultivées, et s'adaptent parfaitement aux étés longs et secs de cette région. Elles sont d'une importance socio-économique considérable, étant donné la place qu'elles occupent dans la vie quotidienne des populations (Santos et *al.*, 2007 et ECCOLIV, 2008).

Les processus de transports par diffusion et par convection n'ont pas été étudiés, ni l'absorption/prélèvement par les racines. Dans le cadre de l'étude des processus de réapprovisionnement de la solution, il est important de rappeler la complexité du fonctionnement de la rhizosphère (Fig. I.7 et I.8), une complexité qui rend impossible la quantification de chacun des processus (Darrah, 1993). Dans ce travail, nous retenons donc certains des processus qui étaient potentiellement importants et nous utilisons, dans nos expérimentations, des systèmes d'étude simplifiés (Bouat, 1953 et Uterano et *al.*, 2002) pour comprendre l'impact de l'activité racinaire sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques de la rhizosphère de l'olivier.

Dans le cadre de l'étude du réapprovisionnement de la solution, il faut penser à faire : une compartimentation (inorganique et organique) du phosphore dans la rhizosphère ; quantifier les processus biologiques (minéralisation et insolubilisation) et physico-chimique (diffusion) de réapprovisionnement de la solution de sol en lien avec le statut phosphaté afin de pouvoir comparer et hiérarchiser ces différents processus.

Pour l'étude des racines fines de l'olivier les objectifs sont de déterminer la distribution verticale et horizontale des racines ; établir le lien entre la distribution des racines et celle des nutriments.

Les principaux objectifs de ce travail sont :

- de déterminer la nature des mécanismes rhizosphériques impliqués dans la disponibilité du P dans la rhizosphère de l'olivier et du figuier ;
- d'étudier les effets de propriétés physico-chimiques du sol sur les mécanismes rhizosphériques, ceci afin d'en préciser les principaux déterminants.

Au delà des connaissances nouvelles apportées dans le domaine des interactions sol-plante pour le phosphore, il y a eu la mise en place d'une véritable méthode d'étude de ces interactions, méthode dont l'utilisation doit se poursuivre afin de mieux en appréhender les limites et possibilités.

Le présent travail constitue donc l'occasion d'appliquer la même approche à deux espèces arboricoles en interaction avec des sols très différents de ceux étudiés à ce jour. En l'occurrence, les sols de la région de Kabylie.

L'intérêt fondamental d'étudier les sols des vergers de Kabylie (souvent carbonatés) réside dans l'incertitude qui demeure quand à la nature même du processus géochimique contrôlant la disponibilité du phosphore. Son originalité réside dans l'étude des interactions rhizosphériques à partir d'échantillons de terrain ; i.e. à partir d'échantillons de sol non rhizosphériques et rhizosphériques collectés *in situ*, peu remaniés, ce qui permettra de vérifier les observations citées dans la littérature, et de suivre l'évolution des interactions rhizosphériques au cours du temps.

9. Démarche suivie

Plusieurs expériences ont été conduites pour répondre aux objectifs de la thèse : étude du statut phosphaté dans la rhizosphère de l'olivier afin de déterminer la nature des mécanismes rhizosphériques impliqués dans la disponibilité en P dans la rhizosphère.

Etudier les effets de propriétés physico-chimiques du sol sur les mécanismes rhizosphériques, ceci afin d'en préciser les principaux déterminants, c'est la présentation de l'ensemble des sols des différents vergers étudiés. La racine de *Olea europea* induit des modifications physiques, chimiques et biologiques dans le sol qui lui est accolé, ceci en vue de s'adapter aux contraintes pédoclimatiques. L'objectif de ce travail est de déterminer i) l'effet du statut initial des sols, calcaires ou non, neutres, basiques ou acides, riches ou déficients en éléments nutritifs, afin de comprendre la capacité de l'olivier à s'adapter aux différents types de sols ; ii) d'une fertilisation localisée, afin de valider ou pas l'hypothèse que

la racine améliore l'effet des apports d'engrais azotés, potassiques et phosphatés avec ce mode d'apport ; iii) mettre en évidence les champignons à effet bénéfiques ainsi que la macrofaune pour comprendre leur impact sur le maintien des oliviers dans des conditions pédoclimatiques difficiles ; iiiv) comparer la rhizosphère de l'olivier à celle d'une autre espèce rustique telle que le figuier, avec une hiérarchisation des facteurs édaphiques et disposer d'un nouveau moyen de culture raisonnée et intégrée, biologique et naturelle, permettant de manière durable à chaque verger de développer son meilleur potentiel.

Chapitre II. Matériels et méthodes

Plusieurs expériences ont été conduites afin de répondre aux objectifs de la thèse : étude du statut phosphaté dans la rhizosphère de l'olivier afin de déterminer la nature des mécanismes rhizosphériques impliqués dans la disponibilité en P dans la rhizosphère. Etudier les effets de propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol sur les mécanismes rhizosphériques, ceci afin d'en préciser les principaux déterminants. Ce chapitre est consacré à la présentation de l'ensemble des sols des différents vergers étudiés, méthodes et conditions expérimentales utilisées dans cette thèse et à la présentation des objectifs de chacune des expériences.

1. Les sites étudiés.

L'échantillonnage porte sur 17 vergers d'olivier du nord de l'Algérie et quatre vergers de figuier, répartis le long d'un transect nord - sud de 60km. Quinze stations sont situées dans le climat subhumide dans la wilaya de Tizi-Ouzou et deux stations sont sous climat semi aride dans la wilaya de Bouira. Ces vergers portent tous la variété *Chemlal*, avec une densité moyenne d'environ 100 arbres / ha et reposent sur des substrats géologiques différents.

1.1. La géologie des régions d'étude

La région d'étude située au nord du Djurdjura, est intégrée dans le bassin versant de Tizi-Ouzou (Fig. 24). La lithologie de la zone d'étude est dominée par la succession de terrains imperméables, de roches métamorphiques et magmatiques (gneiss, micaschistes, granites, calcaire cristallin et schistes) du socle de grande Kabylie datant du précambrien, des roches sédimentaires consolidées et dures (grès et conglomérats) du miocène inférieur et des empilement très épais de séries tendres de nature marneuses d'âge miocène moyen (Benhassaine, 1980 ; Djemai, 1985 ; Yakoub, 1986). La géologie des stations situées dans la région de Bouira, Sidi Ziane et Oued El Bardi, est constituée par des alluvions oligocènes et cônes de déjection (Ait et Gélard , 1997).

1.2. Le climat

Différents travaux sur la climatologie et la bioclimatologie ont été réalisés sur l'Algérie par de nombreux auteurs, qui s'accordent à intégrer le climat algérien au climat méditerranéen (Seltzer, 1946 ; Stewart, 1975 ; Le-Houérou et *al.*, 1977 ; Djebaili, 1984 ; Bouazza, 1995). Ce dernier est caractérisé par deux saisons principales : une saison humide et fraîche à forte pluviométrie qui correspond à l'hiver, avec des précipitations torrentielles à grandes irrégularités interannuelles et une saison estivale sèche avec un minimum de précipitation. Ainsi, la délimitation d'une aire isoclimatique méditerranéenne résultera de l'analyse des

régimes pluviaux et de l'analyse de sa sécheresse estivale. Les conditions climatiques et pédologiques favorisent la détérioration physique, chimique et biologique des sols (Errouissi et *al.*, 2011). Dans les milieux méditerranéens, ces conditions agissent fortement sur la réduction de la dynamique de la succession des êtres vivants (Fadda et *al.*, 2008). Pour la caractérisation du climat des zones d'études, nous avons collecté des séries climatiques de l'Office Nationale de Météorologie (O.N.M.) sur une période de 15 ans.



Figure II.1. Situation géographique des régions d'études.

1.2.1. La pluviométrie

En région méditerranéenne la pluviométrie a une importance considérable, son insuffisance ou une période sèche importante, représentent un facteur limitant pour les végétaux. En Algérie l'origine des pluies est orographique. Dans la région de Tizi Ouzou, elles sont sous formes d'averses importantes du mois de novembre à janvier avec un maximal en décembre (158,2 mm). Les minimales sont enregistrées au mois de juillet (1,8 mm) (Tab. II.1). Pour la région de Bouira (Tab. II.2), les maximales sont enregistrées au mois de décembre (98,4 mm) et les minimales au mois de juillet (4,4 mm).

Tableau II.1. Moyenne des précipitations mensuelles de Tizi-Ouzou pour la période de 1995–2009.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Totaux
P (mm)	33,4	57,4	116,9	158,2	143,0	96,8	51,4	79,2	76,3	4,8	1,8	7,0	826,2

(Source : O.N.M. 2009)

Tableau II.2. Moyenne des précipitations mensuelles de Bouira pour la période de 1995–2009.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Totaux
P (mm)	33,3	34,7	72,6	98,4	98,2	63,6	29,8	52,1	51,6	6,9	4,4	14,9	560,5

(Source : O.N.M. 2009)

1.2.2. Les températures

Les températures moyennes mensuelles maximales (Tab II.3), sont enregistrées aux mois de juillet et août, (39 °C) sur une période de 15 ans. Le mois de janvier est le mois le plus froid (7,1°C). Pour la station de Bouira (Tab. II4), les températures minimales mensuelles sont enregistrées au mois de février(4.2°C) et les maximales au mois de juillet (37.2°C).

Tableau II.3. Températures mensuelles maximales, minimales et moyennes de la région de Tizi-Ouzou.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Moy annuelle
M°C	34,3	30,1	22,0	17,5	16,5	18,0	22,0	24,3	29,0	35,7	39,0	39,1	27,3
m°C	20,6	17,3	11,9	8,5	7,1	7,6	9,6	11,8	15,9	20,6	23,5	24,3	14,9
(M+m)/2	27,4	23,7	16,9	13,0	11,8	12,8	15,8	18,1	22,5	28,1	31,2	31,7	21,1

(Source : O.N.M. 2009)

Tableau II.4. Températures mensuelles maximales, minimales et moyennes de la région de Bouira.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Moy annuelle
M°C	31,2	26,0	17,9	15,1	14,2	15,4	20,1	22,7	28,3	35,4	37,2	36,7	25
m°C	19,9	16,2	10,2	7,2	4,6	4,2	7,3	9,4	14,0	17,9	22,0	23,7	13,1
(M+m)/2	25,6	21,1	14,0	11,1	<u>9,4</u>	9,8	13,7	16,0	21,1	26,7	29,6	30,2	19

(Source : O.N.M. 2009)

M : moyenne des maxima mensuels ; m : moyenne des minima mensuels ; M+m/2 : Moyennes mensuelles

1.2.3. L'évapotranspiration

L'estimation de l'évapotranspiration moyenne annuelle a révélé des valeurs de 1072,5 à 998 mm respectivement pour les stations de Tizi Ouzou et Bouira. Elle est maximale pour les mois de juillet et août. A cela s'ajoute les faibles précipitations de la région de Bouira, causant un stress hydrique qui coïncide avec les phases de fructification et de maturation des fruits.

1.2.4. Le diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen

Les données climatiques des régions d'étude nous permettent de tracer le diagramme ombrothermique, qui nous permettra de déterminer la durée et l'importance de la période sèche (Fig. 25). Sachant que Bagnouls et Gaussen, (1953), considèrent qu'un mois est sec quand le total des précipitations en mm est inférieur au double de la température en °C ($P < 2T$). La synthèse climatique nous montre que les régions d'étude subissent des périodes sèches importantes, ce qui nous a amené à calculer l'indice d'aridité de de Martone $A=P/(T+10)$. Cet indice est de 26.65 pour les oliveraies de Tizi ousou. Cet indice montre qu'elles sont sous climat subhumide. Par contre il est de 19,32 pour la région de Bouira, ce qui indique un climat semi-aride.

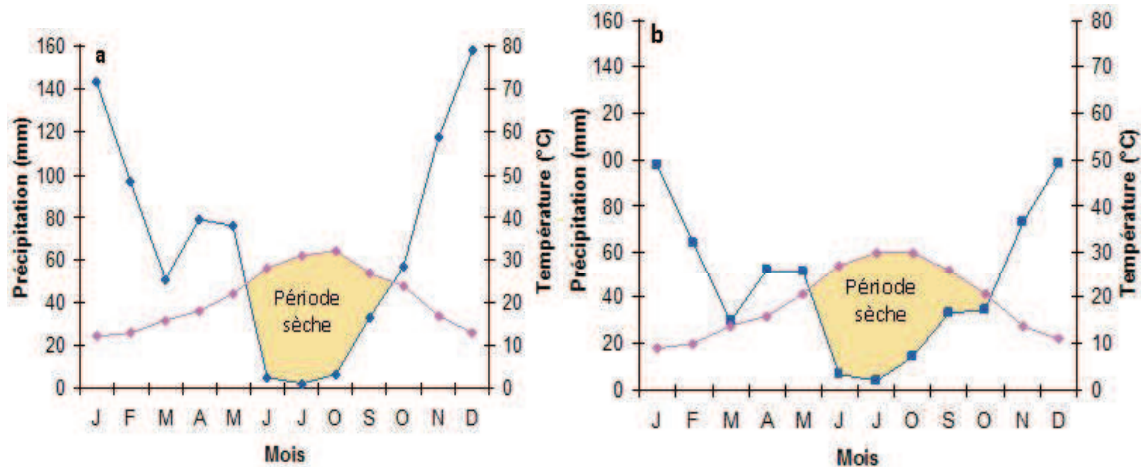


Figure II.2. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (a) région de Tizi-Ouzou et (b) Bouira.

2. Choix des vergers d'échantillonnage

Tous les vergers étudiés sont conduits en extensif, sans apport d'engrais, sans irrigation ni traitement phytosanitaires. Pour certains, un labour automnale est pratiqué rarement. Les sols sont peu remaniés et la végétation naturelle est constituée de graminées avec une densité très faible.

2.1. Les oliveraies

Les 17 vergers d'oliviers étudiés sont de la variété *Chemlal*. Nous avons retenu cette variété pour sa fréquence en Algérie. L'âge moyen des oliveraies est de 50 à 70 ans, les vergers sont en pleine production, avec une densité moyenne qui varie de 100 à 150 arbres/ha.

2.2. Les figueraies

Elles sont au nombre de quatre. Ces figueraies sont contigües aux oliveraies des stations de Nezla, Tizi-Rached Y, Guendoul dans le nord du Djurdjura et celle de Sidi Ziane au sud de la chaîne dans la wilaya Bouira. Leur âge moyen est de 40 ans, avec une densité moyenne de 100 arbres/ha.

3. Les sols étudiés.

Au delà des connaissances nouvelles apportées dans le domaine des interactions sol-plante pour le phosphore chez les légumineuses, ce présent travail constitue donc l'occasion d'appliquer la même approche à deux cultures pérennes (olivier – figuier) en interaction avec des sols très différents de ceux étudiés à ce jour. En l'occurrence, les sols carbonatés de Kabylie. L'intérêt fondamental d'étudier les sols carbonatés réside dans l'incertitude qui demeure quand à la nature même du processus géochimique contrôlant la disponibilité de phosphore : l'adsorption, comme déjà signalé par Devau et *al.*, (2009) ou bien la dissolution/précipitation de minéraux phosphatés calciques (hydroxyapatite, etc.).

L'intérêt de cette thèse ainsi que son originalité résident aussi dans l'étude des interactions rhizosphériques à partir d'échantillons de terrain ; i.e. à partir d'échantillons de sol non rhizosphériques et rhizosphériques collectés *in situ*, ce qui permettra de vérifier la justesse des observations faites au laboratoire, et de suivre l'évolution des interactions rhizosphériques au cours du temps.

3. 1. Les observations « in situ » et les descriptions.

Pour apprécier la fertilité d'un sol, nous avons eu recours à des méthodes de contrôle et d'appréciation des sols, l'ouverture et description de profil pédologique, le profil cultural ou bien le profil racinaire. Des profils pédologiques sont ouverts et décrits dans chaque verger en fonction de la roche mère. Après la phase analytique, les sols sont classés selon la classification W.R.B., (2006).

Tableau II.5. Caractéristiques des différentes stations étudiées.

Stations(Abbreviations)	Coordonnées	Altitude (m)	Matériau parental	Pente (%)	Type de sol (WRB, 2006)
Fréha	36°44'50.77"N 4°18'53.79"E	183	Argiles	5%	Cambisol
Boukhalfa	36°44'48.3"N 4°01'09.11"E	80	Marnes	5%	Vertisol
Bouira	36°15'38.22"N 3°53'11.94"E	678	Calcaires	10%	Calcisol
Tirmitine	36°39'44.79"N 4°59'02.41"E	455	Marnes calcaires	10%	Vertisol
Beni Douala	36°36'33.50"N 4°03'41.54"E	694	Gneiss	25%	Nitrosol
Yakourene Halladj	36°46'32.09"N 4°26'42.07"E	327	Grès numidiens intercalés d'argiles	30%	Cambisol (eutric)
Tizi Rached Aired	36°41' 15.71"N 12°39.27"E	216	Grès	15%	Cambisol
Thiniri colline	36°32' 34.51"N 4°00' 49' 98"E	494	Schistes	25%	Cambisol
Thiniri plaine	36° 32' 54.41"N 4° 00' 47.25" E	404	Glacis d'accumulation	5%	Cambisol
Assi Youssef 1	36°29' 37.58"N 4°00' 41.14"E	814	Glacis d'accumulation	10%	Nitrosol
Assi Youssef 2	36°29' 51.57"N 4°00' 17.50"E	790	Colluvions calcaires	0%	Calcisol
Ouadhia plaine	36°42' 30.51"N 4°04' 17.77"E	100	Schistes	5%	Nitrosol
Ouadhia colline	36° 30' 50.03"N 4° 07' 06.14"E	625	Schistes	5%	Nitrosol
Bouira Sidi Ziane	36°41' 15.71"N 3°12'39.27"E	373	Grès	15%	Cambisol
Guendoul	36°44'20.63"N 4°13'05.91"E	260	Calcaires	10%	Calcisol
Tizi Rached Yefsah	36°41' 20.87"N 4°07'43.43"E	290	Marnes	15%	Cambisol
Nezla	36°47'04.42"N 4°13'40.00"E	268	Alluvions anciennes	5%	Cambisol

Pour chaque verger, 10 arbres sont choisis dans une zone homogène. La méthode d'échantillonnage est celle de l'échantillon composite unique, elle a porté sur le sol global et le sol rhizosphérique de chaque olivier. Les prélèvements sont faits en diagonale sur 10 arbres par verger, indemnes de symptômes pathologiques, aux quatre points cardinaux autour de chaque arbre selon la méthode Uterano et *al.*, (2002).

Les racines de l'olivier réparties soit à la périphérie de la couronne et /ou au pied de la souche, et se localisant principalement dans les 30 premiers centimètres du sol sont prélevées. Les racines et le sol accolé à l'ensemble du système racinaire sont récoltés, elles sont ensuite secouées dès leur récolte, seuls les agrégats de terre inférieurs à 1 cm de diamètre accolés aux racines fines et actives dont le diamètre est inférieur à 5 mm sont retenus. Ces agrégats correspondent au sol rhizosphérique, la seconde fraction de sol prélevée est indemne de toute activité racinaire.

Ces échantillons sont systématiquement réunis et mélangés pour obtenir un échantillon composite de sol global et un autre de sol rhizosphérique pour chaque oliveraie et figueraie. Ensuite, les sols sont séchés à l'air libre et tamisés à 2 mm. Les sols secs sont utilisés pour la détermination des caractéristiques physico-chimiques et la quantification des différents compartiments du phosphore.

3.2. Le matériel végétal

Toutes les racines prélevées sont conservées dans des flacons en verre contenant de l'éthanol à 70 %. Dans chaque verger, sur les 10 arbres choisis, nous prélevons des feuilles d'oliviers à la même période d'échantillonnage que les sols. Le même nombre de feuilles (50) a été prélevé sur la partie moyenne de rameaux fructifères de l'olivier, aux quatre points cardinaux de l'arbre, à hauteur d'homme.

3.3. La faune du sol

Nous avons utilisé la méthode proposée par Coineau, (1974). Un quadrat en bois de 3dm de côté et 1dm d'épaisseur pour délimiter un volume de prélèvement qui est de 9dm³. Nous prélevons la terre à l'intérieur du quadrat sur une profondeur de 2dm. Le prélèvement est effectué sur 12 points pour chaque type de sols. Une première sélection d'animaux est faite à l'œil nu en les gardant dans des flacons contenant un conservateur.

3.4. Analyses au laboratoire et les méthodes utilisées

Tous les échantillons des fractions de sol prélevés sont séchés à l'air libre durant deux semaines environ, par contre une fraction de chaque échantillon est conservée au congélateur pour le dosage des formes de l'azote. Les sols séchés sont broyés avant de les faire passer à travers un tamis au crible de deux millimètres puis conservés dans un endroit sec. Les fragments de racines fines présents dans les sols sont difficilement retirés avec une pince. Ces échantillons ont fait l'objet des analyses physiques, chimiques et biologiques selon les méthodes standards d'analyse en pédologie (Jackson, 1967). Nous avons travaillé au laboratoire de science du sol du département des sciences agronomiques, au laboratoire Ressources Naturelles de l'université Mouloud Mammeri, au département de pédologie de l'ENASA, au laboratoire des Zones Arides de l'université d'Alger, au laboratoire des BEF INRA Champenoux Nancy et au laboratoire PESSAC INRA de Versailles.

3.4.1. Granulométrie

Elle est effectuée par la méthode internationale à la pipette de Robinson. Cela consiste en premier lieu à la destruction de la matière organique du sol en utilisant l'eau oxygénée et à la dispersion des argiles par l'hexametaphosphate de sodium. Les argiles et les limons fins sont prélevés à la pipette de Robinson. Les sables sont récupérés après siphonage afin d'éliminer les restes d'argiles et limons. Puis séchage et séparation avec la superposition de tamis, 50-200 μm pour les sables fins et 200 μm – 2mm pour les sables grossiers. Le triangle G.E.P.A. est utilisé pour déterminer les classes texturales.

3.4.2. pH eau

Le pH eau mesure l'acidité de la solution du sol. Il est déterminé à l'aide d'un pH mètre sur une suspension de terre fine avec un rapport sol/eau de 1/5.

3.4.3. Calcaire total

Le calcaire total (CaCO_3) est déterminé par la méthode gazométrique à l'aide du calcimètre de Bernard, elle consiste en une attaque d'un poids de sol connu par l'acide chlorhydrique. Le volume de CO_2 dégagé est convertit en teneur de (CaCO_3) exprimé en pourcentage.

3.4.4. Carbone organique

Le carbone organique est dosé par la méthode Walkley-Black. C'est une oxydation par voie humide du carbone organique par un mélange de bichromate de potassium et d'acide

sulfurique. L'excès de bichromate est titré par le sel de Mohr (sulfate d'ammonium et fer) en présence de diphénylamine et de fluorure de sodium.

3.4.5. La capacité d'échange cationique

La capacité d'échange cationique est déterminée par la méthode de Metson qui comprend trois étapes. L'échantillon est d'abord saturé en ions ammonium (NH_4^+) par percolations successives d'une solution d'acétate d'ammonium ($\text{CH}_3\text{CO}_2\text{NH}_4$) à 1 mol / l. Le pouvoir tampon de cette dernière permet de ramener le pH du milieu aux environs de 7, ce qui constitue une des caractéristiques essentielles de la méthode. Après avoir éliminé l'excès d'ions ammonium par percolations d'alcool éthylique, nous avons procédé à leur échange par une solution de chlorure de potassium 1N. Les ions ammonium déplacés sont distillés et titrés avec de l'acide sulfurique à N/200.

3.4.6. Les formes d'azote

L'azote total est mesuré par la méthode de Kjeldahl (1960) dont le principe est de minéraliser le sol dans de l'acide sulfurique à de haute température. L'ammoniaque est déplacée de sa combinaison par la soude, distillée et recueillie dans une solution d'acide borique, la solution est titrée avec une solution d'acide sulfurique à 1/5 de normalité.

L'azote assimilable est déterminé sur 10g de sol frais, agité dans 100 ml de KCl (1N) pendant 1heure. Après filtration, ajuster le filtrat à 100 ml, quelques gouttes de toluène sont ajoutées au filtrat pour bloquer l'activité microbienne. Le dosage de l'azote minéral est réalisé par le distillateur d'azote.

L'ammonium est dosé en prenant 20 ml du filtrat dans un matras, ajouter 4g de MgO , puis distiller. Le distillat est recueilli dans l'acide borique à 2%, la distillation est arrêtée quand le volume du distillat est de 30 ml. Le dosage se fait par titrimétrie avec de l'acide sulfurique à N/200 jusqu'au virage du vert vers le violet pourpre.

L'azote nitrique est dosé en prenant dans le matras précédant qui contient le filtrat et le MgO , dans lequel il faut ajouter 0,2g d'alliage de Dewarda puis passage à la distillation, le distillat est récupéré dans de l'acide borique à 2%, enfin dosage du NO_3^- par titrimétrie avec de l'acide sulfurique à N/200.

3.4.7. Formes phosphatées dans le sol

Le phosphore total est déterminé après une digestion à l'acide perchlorique (HClO_4) à 65%, le rapport sol/solution est de 1/10, la suspension est chauffée prudemment à différentes température jusqu'à l'apparition de fumée blanche puis diluer au volume de 100ml. Le dosage se fait par colorimètre à 660nm avec les réactifs nécessaires après élaboration d'une gamme étalon (annexe 1) à base de phosphate monopotassique (KH_2PO_4) (Jackson, 1967).

Le phosphore assimilable est déterminé avec la méthode Olsen, l'extraction de l'acide phosphorique dans cette méthode se fait avec une solution de NaHCO_3 à 0,5 M dont le pH est de 8,5. Le rapport sol/solution est de 1/20. La suspension est agitée pendant 30 mn en présence du charbon actif exempt de phosphore, afin d'enlever la coloration des extraits, ce dernier est utilisé dans toutes les méthodes chimiques. Après filtration les échantillons passent au colorimètre à 660 nm, après réduction du complexe phospho-molybdique au chlorure stanneux (SnCl_2). L'intensité de la couleur est proportionnelle à la concentration en orthophosphate (Fig. II.3).

Le phosphore soluble est dosé après une extraction simple à l'eau distillée dont le rapport sol/eau est de 1/10, puis agiter pendant deux heures. Le dosage se fait aussi par colorimétrie à 660 nm.



Figure II.3. Comparaison de l'intensité de la couleur d'une série de dosage du phosphore assimilable.

3.4.8. Phosphore foliaire

Le phosphore, le potassium, le calcium, le magnésium sont dosées sur la poudre végétale au laboratoire d'analyses chimiques de l'ENASA. Après une attaque triacide de la prise d'essai de cette poudre (10 ml de H_2SO_4 + 100 ml de HNO_3 + 40 ml de HClO_4). Pour la phosphore foliaire a été déterminé sur 1g de poudre végétale de feuilles d'oliviers. Son dosage est basé sur la formation et la réduction d'un complexe phosphomolybdique de coloration jaune, après l'ajout du complexe nitrometanovanadatemoxybdiq. Après établissement d'une gamme étalon, la solution est passée au colorimètre à une longueur d'onde de 480 nm.

3.4.9. Dénombrement de la faune des sols

L'extraction des animaux contenus dans les échantillons de sols prélevés selon la méthode de Coineau, (1974), sont extrait au laboratoire selon la méthode de Berlese-Tullgren. Le tri et le dénombrement des arthropodes ainsi que les larves d'insectes ont été faits avec une loupe binoculaire et un microscope. Pour la détermination des différents ordres ou groupes de la faune, nous nous sommes référés à plusieurs ouvrages qui utilisent quelques clés de détermination en se basant sur les caractères morphologiques du corps (Chinery, 1987 ; Paulian, 1990 ; Albony et Caussanel, 1990 et du Chatenet, 2005).

3.4.10. Etude des racines

Des coupes anatomiques sont faites sur les racines fines ayant le diamètre compris entre [0.5-3] centimètres. Elles sont colorées à la fois par le carmin acétique et par le vert d'iode (Langeron, 1949). Ensuite, des morceaux de racines ont été imprégnés dans la paraffine, puis des coupes transversales de 7 μm d'épaisseur sont réalisées à l'aide d'un microtome mécanique. Les racines de diamètre inférieur à 0,5mm, classées selon les mêmes normes (Baize et Jabiol, 1992), sont colorées selon la technique de Philips et Hayman. Des écrasement de fragments de racines de chaque arbre sont montés et écrasés entre lame et lamelle dans du glycérol et sont observés au microscope photonique pour l'observation et l'estimation du pourcentage de colonisation endomycorhizienne et DSE.

3.5. Analyses statistiques

Les comparaisons entre les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des sols globaux et des sols rhizosphériques sont réalisées en utilisant le test t par paire. Les coefficients de Pearson sont calculés par le logiciel Statistica pour déterminer des relations

entre les caractéristiques chimiques et phosphatées des sols ainsi que les différentes corrélations qui existent entre les propriétés des sols étudiés, ainsi que le logiciel R. Pour mettre en évidence la relation qui existe entre les êtres vivants et les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols, particulièrement les invertébrés et les symbiotes mycorhizogènes, nous avons utilisé le logiciel R pour traiter toutes données obtenues (Siegel and Castellan, 1988)

Chapitre III.

***Evaluation du statut
phosphaté des oliveraies :
Relation formes de phosphore
dans la rhizosphère et
diagnostique foliaire.***

Introduction

En Algérie, l'olivier (*Olea europaea* L.) constitue la principale espèce fruitière plantée et plus particulièrement en Kabylie, avec environ 50 % des oliviers existants. Cette espèce assure des fonctions multiples de lutte contre l'érosion, de valorisation des terres agricoles (Fig. III.1) et de fixation des populations dans les zones marginales (Khodja, 2005). L'oléiculture occupe une place fondamentale de par les produits qu'elle fournit et connaît un regain d'intérêt en Algérie, en témoigne plusieurs vergers plantés ces dernières années, en particulier dans le cadre de la valorisation des sols dégradés situées dans toutes les régions d'Algérie.



Figure III.1. Etat des oliveraies de Kabylie.

Pour assurer son développement, les racines de l'olivier absorbent les éléments nutritifs disponibles au niveau de la rhizosphère, cette dernière est une interface essentielle entre la plante et le sol. L'intensification écologique en relation avec le développement durable permet la valorisation et la restauration de la ressource sol. Elle consiste à utiliser les processus rhizosphériques physiques, chimiques et biologiques au niveau de l'interface sol/racine afin d'améliorer la biodisponibilité des éléments nutritifs. Divers auteurs ont signalés l'importance de ces processus, Gobran et *al.*, (1998) ; Turpault et *al.*, (2007) ; Calvaruso et *al.*, (2010) pour des écosystèmes forestiers déficients en nutriments, d'autres pour des agrosystèmes (Violante et *al.*, 1996 ; Chen et *al.*, 2006 ; Zhu et *al.*, 2006 ; Malézieux et *al.*, 2008). Ces auteurs ont montré que la racine pouvait créer des conditions propices à la fois au développement des racines et à celui des microorganismes associés.

La rhizosphère est la zone du sol qui entoure les racines vivantes des plantes où la biologie et la chimie du sol sont influencées par leurs activités (Chen et *al.*, 2006 ; Oburger et *al.*,

2010). Hiltner (1904) a employé ce mot dans le contexte spécifique de l'interaction entre diverses bactéries et les racines des légumineuses (Gregory, 2006), pour décrire la stimulation de la biomasse microbienne dans la région du sol située à l'interface sol-racine (Hinsinger, 1998). Elle est le petit volume de sol situé à proximité immédiate des racines et dont les propriétés sont affectées par celles-ci (Drenou, 2006). Cette zone n'a environ qu'un mm de largeur et n'a pas de bord distinct, mais constitue un important sous système de la pédosphère (Shi et *al.*, 2004 ; Devau, 2010). C'est une surface d'activité biologique et chimique intense influencée par les exsudats racinaires et les microorganismes qui se nourrissent de ces derniers (Darrah, 1993 ; Hinsinger et *al.*, 2005 et Lines-Kelly, 2005). L'activité de la racine et les microorganismes qui lui sont associés sont à l'origine de modifications des propriétés physiques telle que la porosité (Hinsinger et *al.*, 2005 ; Gregory 2006), biochimiques et microbiologiques (Arvieu, 1998 ; Stengel et Gelin, 1998 ; Römheld et Neumann, 2006) et minéralogiques (Calvaruso et *al.*, 2006 ; Turpault et *al.*, 2009) des sols à proximité immédiate des racines actives.

Les modèles classiques de nutrition phosphatée des plantes ne tiennent pas compte des interactions rhizosphériques (Mollier et *al.*, 2008). En effet, les processus racinaires sont méconnus ainsi que leurs effets sur le sol. Dans le sol l'anion phosphate H_2PO_4^- est adsorbé par le complexe adsorbant. Il l'est davantage que les nitrates et sa concentration relative dans la solution du sol est faible. Au cours de ses déplacements, il est fortement freiné et entraîné par le flux de convection et sa diffusion ne se produit que sur des distances très réduites autour des racines (Chamayou et Legros, 1989 ; Morel and Hinsinger, 1999). Après l'eau et l'azote, la carence en phosphore constitue un facteur limitant de la production végétale (Fardeau, 1989).

Le phosphore limite la production végétale dans de nombreux sols méditerranéens particulièrement les sols carbonatés (Pena and Torrent, 1989 ; Vance et *al.*, 2003). L'utilisation massive de fertilisants inorganiques n'est plus rentable. La raréfaction des ressources en phosphore minéral associée à l'augmentation des besoins nutritionnels, rendent nécessaire l'utilisation d'autres sources en cet élément (St Clair et Lynch, 2010). Dans ce contexte de limitation des engrais phosphatés dans les sols déficients, il est nécessaire de raisonner différemment la production végétale. Une voix repose sur le concept d'intensification écologique, selon lequel il s'agit d'utiliser les organismes vivants du sol et de l'écosystème pour améliorer le statut phosphaté pour l'environnement et donc sa biodisponibilité pour la plante. Un levier de l'intensification écologique consiste à utiliser les

Chapitre III. Evaluation du statut phosphaté des oliveraies : Relation formes de phosphore dans la rhizosphère et diagnostic foliaire.

processus physiques, chimiques et biologiques opérant à l'interface sol-racine (i.e. la rhizosphère) pour augmenter de manière naturelle la concentration en phosphore dans la solution du sol, afin de faciliter la croissance végétale (Hinsinger et *al.*, 2009).

La rhizosphère est aussi un compartiment fondamental des écosystèmes terrestres en raison de son influence majeure sur les cycles biogéochimiques (Alguacil et *al.*, 2005 ; Raynauds, 2010). Les processus rhizosphériques chez les arbres sont l'un des facteurs importants de leur développement et leur survie, par une influence bénéfique sur les cycles des nutriments (Dinesh et *al.*, 2010), particulièrement dans un milieu méditerranéen à fortes contraintes (Santos et *al.*, 2007). Dans un contexte de déficit hydrique, les sols de la région de Kabylie sont souvent déficients en matière organique et en nutriments particulièrement le phosphore et le potassium (Bourbia, 1996 ; Nait-Kaci, 1997 et Bourbia et *al.*, 2012), ce qui limite la production oléicole. De nombreuses études menées sur l'olivier ont été consacrées à l'effet du stress hydrique (Alguacil et *al.*, 2005 ; Benlloch-Gonzalez et *al.*, 2008 ; Palese et *al.*, 2010), de la fertilisation (López-Granados et *al.*, 2004 ; Morales-Sillero et *al.*, 2009). Par contre peu d'études, à notre connaissance, se sont intéressées à la compréhension des processus rhizosphériques de l'olivier *in situ*. Pour l'olivier sa vigueur est mesurée par le volume de sa canopée qui se corrèle d'une manière très hautement significative avec certaines propriétés du sol tel que le taux de matière organique (Gálvez et *al.*, 2004 ; López-Granados et *al.*, 2004). Ces études justifient notre choix sur le développement du système racinaire chez l'olivier avec l'impact de ce dernier sur les caractéristiques du sol.

La question qui se pose y a-t-il des îlots de fertilité qui se créent dans l'environnement immédiat des racines de l'olivier dans des conditions pédoclimatiques difficiles? Ceci viendrait expliquer le rôle de l'olivier dans la valorisation et la réhabilitation des sols peu fertiles et ceux dégradés. L'hypothèse posée est que la performance racinaire de cette espèce pourrait influencer les propriétés physiques, chimiques et la biodisponibilité du phosphore de différents types de sols sous oliveraies de Kabylie nord de l'Algérie.

L'objectif de cette étude est de comparer le sol global au sol rhizosphérique échantillonnés *in situ* sous 17 oliveraies dans plusieurs régions de Kabylie, afin de mieux comprendre les conditions physiques et chimiques dans lesquelles se développaient ces vergers en essayant de voir la relation entre les propriétés de la rhizosphère et un indicateur du statut nutritionnel phosphaté de l'arbre qui est le phosphore foliaire. Dans ce travail sont présentés i) les variations de certaines propriétés physiques et chimiques dans la rhizosphère de l'olivier, ii) la

distribution des formes de phosphore dans les sols rhizosphériques et les sols non rhizosphériques en relation avec le diagnostic foliaire.

I. Matériel et méthodes

I. 1. Echantillonnage des sols et du végétal

L'échantillonnage porte sur 17 oliveraies s'étendant sur un transect nord-sud de 56 km et 42 km est-ouest (Fig. II.1). Ces vergers âgés de 80 ans portent la variété *Chemlal*, leur densité moyenne est d'environ 100 arbres/ha et reposent sur des substrats géologiques différents et répartis sous trois climats différents à savoir, l'humide, le subhumide et le semi-aride (Tab. II.5). Dans chaque station 10 arbres de morphologie identique, sans symptômes pathologiques apparents ont été marqués pour cette étude. La méthode d'échantillonnage en diagonale sur les 10 sujets choisis dans chaque verger aux quatre points cardinaux autour de chaque arbre est celle de l'échantillon composite unique. L'échantillonnage du sol a été réalisé au cours du repos hivernal de l'olivier, à la récolte de décembre à janvier.

Les racines sont réparties à la périphérie de la couronne et se localisent principalement dans les 30 premiers centimètres du sol. A cette périphérie, un échantillon volumineux de sol est prélevé. Les racines et le sol accolé à l'ensemble du système racinaire sont récoltés. Nous avons procédé à l'échantillonnage de deux fractions de sol sous chaque arbre, soit le sol rhizosphérique et le sol non rhizosphérique appelé aussi le sol global ou distal « bulk soil ». Nous prélevons un échantillon volumineux dans les 30 premiers centimètres du sol pour chaque point cardinal. Les racines et le sol accolé à l'ensemble du système racinaire sont récoltés, seules les racines de 1 à 5mm de diamètre et les agrégats de terre inférieurs à 1cm de diamètre sont retenus, ces derniers correspondent au sol rhizosphérique. Dans le même trou loin de toute activité racinaire, la seconde fraction de sol est prélevée (sol global). Un échantillon moyen composite de sol rhizosphérique et un autre de sol global est constitué en mélangeant les prélèvements de sols globaux et ceux de sols rhizosphériques pour chaque verger.

Le prélèvement des feuilles a eu lieu à la même période d'échantillonnage des sols selon la méthode de Bouat et *al.*, (1951). Cette technique consiste à prélever, à la hauteur d'homme (1.60 m), durant la période du repos végétatif (décembre-janvier) afin d'échapper aux fluctuations rapides de la composition minérale des feuilles en période de croissance. Cinquante feuilles doivent être prélevées de la partie moyenne des brindilles de l'année du rameau fructifère et prélever le même nombre de feuilles dans les quatre expositions de

Chapitre III. Evaluation du statut phosphaté des oliveraies :
Relation formes de phosphore dans la rhizosphère et diagnostic foliaire.

l'arbre. Ces dernières sont lavées soigneusement à l'eau distillée puis séchées à l'étuve à 70°C pendant 48 heures. Elles sont ensuite broyées au crible de 0.5 mm.

I.2. Analyses des sols et du végétal

L'analyse des sols permet de suivre l'état de la fertilité du sol. Mais avant d'y procéder il faut d'abord mettre les deux fractions du sol à sécher à l'air libre pendant deux semaines environ, puis les broyer avant de les tamiser à deux millimètres de diamètre, après les conserver dans un endroit sec à une température ambiante. Une fois ces étapes achevées, nous procédons aux différentes analyses suivant les méthodes standards en pédologie (Jackson, 1967).

L'analyse granulométrique selon la méthode internationale par l'emploi de la pipette de Robinson qui consiste à la destruction de la matière organique avec de H_2O_2 . La dispersion des particules par l'hexametaphosphate de sodium. Le prélèvement des argiles puis les limons fins avec la pipette de Robinson. La récupération des sables se fait après siphonage, en superposant les tamis de 200 microns et 50 microns.

Le pH est mesuré à l'aide d'un pH mètre sur une suspension de terre fine dont le rapport sol/eau est de 1/5. Le calcaire total est déterminé par la méthode gazométrique à l'aide du calcimètre de Bernard, elle consiste en une attaque d'un poids de sol connu par l'acide chlorhydrique. Le volume de CO_2 dégagé est convertit en teneur de $CaCO_3$ exprimé en pourcentage. Le carbone organique est dosé par la méthode Walkley-Black. C'est une oxydation par voie humide du carbone organique par un mélange de bichromate de potassium et d'acide sulfurique. L'excès de bichromate est titré par le sel de Mohr (sulfate d'ammonium et fer) en présence de diphenylamine et de fluorure de sodium.

L'azote total est dosé par la méthode Kjeldhal. L'azote des composés organiques et transformé en azote ammoniacal sous l'action de l'acide sulfurique concentré. L'ammoniaque formé est déplacé de sa combinaison par le NaOH en excès, distillé et recueilli dans une solution d'acide borique, puis titré avec de l'acide sulfurique de normalité N/50.

La capacité d'échange cationique est déterminée par la méthode de Metson qui comprend trois étapes. L'échantillon est d'abord saturé en ions ammonium (NH_4^+) par percolations successives d'une solution d'acétate d'ammonium ($CH_3CO_2NH_4$) à 1 mol/l. Le pouvoir tampon de cette dernière permet de ramener le pH du milieu aux environs de 7, ce qui constitue une des caractéristiques essentielles de la méthode. Après avoir éliminé l'excès d'ions ammonium

Chapitre III. Evaluation du statut phosphaté des oliveraies :
Relation formes de phosphore dans la rhizosphère et diagnostic foliaire.

par percolations d'alcool éthylique, nous avons procédé à leur échange par une solution de chlorure de potassium 1N. Les ions ammonium déplacés sont distillés et titrés avec de l'acide sulfurique à N/200.

Pour le phosphore total, la méthode consiste à extraire le phosphore après une digestion triacide avec 10 ml d'acide nitrique, 5 ml d'acide perchlorique et 5 ml d'acide sulfurique. La suspension est chauffée à 100°C jusqu'à l'apparition d'une fumée blanche, puis diluée au volume de 100 ml et filtrer. Le dosage se fait par colorimétrie à 660 nm.

Le phosphore assimilable est déterminé selon la méthode Olsen. Cette méthode a la particularité d'échanger et de déplacer les ions phosphates, contrairement aux autres méthodes d'extractions chimiques du phosphore assimilable, qui dissolvent ou hydrolysent les phosphates (Conesa et Fardeau, 1994). L'extraction se fait avec une solution de bicarbonate de sodium 0.5M dont le pH est de 8,5 avec un rapport sol/eau de 1/10. Le dosage est basé sur la formation et la réduction d'un complexe phosphomolybdique de coloration bleu, après l'ajout du chlorure stanneux (SnCl_2). L'intensité de la couleur est proportionnelle à la concentration en orthophosphate. La solution est passée au colorimètre à une longueur d'onde de 660 nm. Le phosphore soluble est dosé après une extraction simple à l'eau distillée dont le rapport sol/eau est de 1/10, puis agiter pendant deux heures. Le dosage se fait par colorimétrie à 660 nm.

Le phosphore est dosé aussi sur la poudre végétale. Après une attaque triacide de la prise d'essai de cette poudre (10 ml de H_2SO_4 + 100 ml de HNO_3 + 40 ml de HClO_4). Le dosage est basé sur la formation et la réduction d'un complexe phosphomolybdique de coloration jaune, après l'ajout du complexe nitro metanovanadatémolybdique. La solution est passée au colorimètre à une longueur d'onde de 480 nm.

I.3. Analyses statistiques

Afin d'évaluer l'ampleur de l'effet racinaire de l'olivier sur les propriétés chimiques et phosphatées des sols globaux et des sols rhizosphériques, nous avons opté pour une analyse de la variance de ces propriétés et le test de Newman-Keuls pour la comparaison des moyennes avec le logiciel Statbox. . Les coefficients de Pearson sont calculés par le logiciel Statistica pour déterminer des relations entre les caractéristiques chimiques et phosphatées des sols globaux et rhizosphériques, ainsi qu'entre ces dernières et le phosphore foliaire, avec une matrice de corrélation avec le logiciel Statistica.

II. Résultats

II.1. L'analyse physique

Les résultats de l'analyse granulométrique (Tab. III.1) nous indiquent un taux d'argile élevé dans le sol rhizosphérique comparativement au sol global. Il varie significativement de 3,77% dans les sols rhizosphériques de Nezla à 44% pour le sol global de Boukhalfa. Pour Callot et *al.*, (1982), cela peut s'expliquer par le fait que les racines au cours de leur développement accroissent leur diamètre et exercent une pression sur les parois des microfissures, la phase argileuse subit donc une certaine compaction autour d'elles. De plus, la racine a tendance à acidifier son milieu, ce qui rend les minéraux en place plus sensibles à l'altération avec un enrichissement du cortège des argiles (Mouas Bourbia et *al.*, 2012). En l'occurrence Alami et *al.*, (2000), expliquent que la présence de bactéries qui ont pour rôle la structuration du sol autour des racines, transforment une partie des exsudats racinaires en exopolysaccharides induisant une meilleure agrégation du sol rhizosphérique. Les sols prédominants sont des cambisols, nitrosols, calcisols et des vertisols (W.R.B., 2006).

II.2. Résultats des analyses chimiques et l'effet rhizosphérique

Les Caractéristiques des sols globaux et rhizosphériques des 17 stations étudiées sont présentés dans le tableau (III.1).

II.2.1. Le pH

Le pH des sols étudiés varie entre 6,31 dans l'oliveraie de Yakouren (YakH) et 7,85 dans celle de Tizi-Rached (TRY) (Fig. III.3a). Il oscille de faiblement acide à légèrement alcalin globalement, nous avons une augmentation des pH au niveau des sols rhizosphériques comparativement aux sols globaux. L'analyse de la variance montre une différence très hautement significative entre les stations.

L'augmentation du pH au niveau des sols rhizosphériques peut s'expliquer par la respiration racinaire, la libération et la diffusion dans le sol des H^+ ou des OH^- pour compenser un excédent net de cations ou d'anions, respectivement, dans le bilan des charges échangées entre la racine et la solution du sol (Hinsinger, 2001). Cette augmentation est due aux prélèvements de l'eau autour des racines conduisant au dessèchement local ce qui a pour effet une importante concentration des solutés de cation au voisinage des racines qui font augmenter l'alcalinité du milieu, en plus de l'effet tampon des carbonates de calcium (Bye et Callot, 1999 ; Anoua et *al.*, 1997). Ces résultats nous montrent la tolérance de l'olivier à une

large gamme de pH, sachant que c'est sur des sols à pH compris entre 7 et 8,5 que l'on obtient son meilleur développement (Loussert et Brousse, 1978). Le pH est un facteur qui joue un rôle important dans les changements chimiques de la rhizosphère (Nye, 1986 ; Hinsinger et *al.*, 2003).

Les racines sont responsables des changements du pH rhizosphérique par plusieurs processus, il peut varier de 1 à 2 unité (Hinsinger et *al.*, 2005). La libération des composés organiques, acides ou complexant, conduit à une acidification du sol au voisinage des racines (Bonneau et Souchier, 1994 ; Turpault et *al.*, 2006). Beaucoup de ces réactions sont impliqués dans les processus de formation du sol et peuvent ainsi vivre longtemps comme les microorganismes de la rhizosphère (Hinsinger et *al.*, 1993 ; Couchesne et Gobran, 1997).

II.2.2. Calcaire total

Le taux de calcaire total varie d'une station à une autre, cette différence est très hautement significative. Il est très faiblement calcaire avec 0.87% pour les sols de Thiniri colline (ThC) à fortement calcaire avec un taux de 39,8% au niveau de l'oliveraie de Bouira (BouOEB) (Fig. III.3b). Les résultats obtenus montrent que pratiquement dans toutes les stations étudiées le taux de calcaire total des sols rhizosphériques est légèrement élevé par rapport aux sols globaux sauf pour les sols de Bouira (BouSZ) et de Tizi Rached (TRY) où cette augmentation est remarquable.

Les taux de calcaire élevés dans les sols rhizosphériques par rapport aux sols globaux, pourrait s'expliquer par un flux de masse du calcium de la solution du sol vers l'interface sol-racine qui s'y accumule. Conduisant ainsi à des précipités de carbonates de calcium autour des racines (Arvieu, 1998 ; Chaignon, 2001 et Camuzard, 2005). Cette différence significative des sols par les taux de calcaire et ceux des argiles s'explique par la nature du matériau parental de chaque oliveraie. Cependant ces vergers sont continuellement exposés à un blocage ou une déficience en éléments nutritifs tels que le phosphore, le fer, le zinc, le cuivre, le manganèse et le bore (Galvez et *al.*, 2004 ; Ramirez Rodriguez et *al.*, 2005).

II.2.3. Le carbone organique

Le taux de carbone organique varie d'une station à une autre et entre le sol rhizosphérique et le sol global, avec une différence très hautement significative ($p \leq 0.001$). Le taux le plus faible est observé dans les sols de Nezla avec 0.70%, alors que le taux le plus élevé est dans les sols de Yakouren Halladj (YakH) avec 2,50% (Fig. III.3c).

Tableau III.1. Caractéristiques des sols globaux et rhizosphériques des 17 stations étudiées.

Station (Abréviation)	Sol	pH eau	CaCO ₃ (%)	C org (%)	CEC	Nt (%)	A (%)	Textures	P-Soluble (ppm)	P-assi (Olsen (ppm)	P-Total (ppm)	Pr (%)
Fréha (Fre)	G	7.28	2.50	1.13	19.00	0.10	20.6	LS	0.035	22.43	25.35	0.103
	Rh	7.32	3.00	1.60	23.50	0.13	27.5	LS	0.04	6.21	11.24	0.103
Boukhalfu (Bouk)	G	7.3	5.00	1.51	16.44	0.14	42.9	AL	0.03	4.13	11.86	0.079
	Rh	7.85	6.25	1.56	23.19	0.16	44.00	AL	0.025	6.21	10.15	0.079
Bouira (Bou OEB)	G	7.63	39.80	1.50	14.00	0.13	31	LAS	0.012	6.75	34.13	0.077
	Rh	7.65	42.23	1.51	15.00	0.14	35	LAS	0.02	6.89	22.02	0.077
Tirmitine (Tir)	G	7.42	27.70	0.74	15.30	0.08	27.2	LSA	0.29	1.48	9.33	0.111
	Rh	7.47	28.66	1.24	16.60	0.12	30.3	LSA	0.13	1.3	11.59	0.111
Beni-Douala (Bdla)	G	7.20	1.00	1.32	12.80	0.10	12.9	SL	0.035	8.65	13.5	0.07
	Rh	7.26	1.02	2.37	14.80	0.17	17	SL	0.03	3.51	9.21	0.07
YakoureneHalladj1 (Yak.H)	G	6.30	2.73	2.50	20.10	0.16	16.3	LS	0.35	18.38	22.04	0.107
	Rh	6.41	3.63	3.43	25.10	0.20	20.8	LSA	0.30	11.38	15.59	0.107
Tizi-Rached Aired (TRA)	G	7.29	5.01	1.60	8.80	0.13	20.9	SAL	0.45	0.82	7.17	0.128
	Rh	7.83	6.62	2.62	10.02	0.2	22	SAL	0.28	0.52	9.30	0.128
Thiniri colline (ThC)	G	6.95	0.87	1.85	13.12	0.14	22.2	SAL	0.36	0.91	6.14	0.09
	Rh	7.07	1.25	2.92	17.37	0.19	24.1	SAL	0.28	0.65	8.78	0.09
Thiniri plaine (ThP)	G	6.47	3.75	1.48	17.01	0.15	28.7	SAL	0.32	0.78	6.29	0.069
	Rh	7.08	4.33	1.56	21.99	0.23	30.5	SAL	0.18	0.69	9.91	0.069
Assi Yousseff (Ay1)	G	6.60	3.00	2.01	14.22	0.16	33	AS	0.39	0.69	7.84	0.04
	Rh	7.5	3.6	3.36	16.64	0.21	33.7	AS	0.19	0.39	9.91	0.04
Assi Yousseff (Ay2)	G	6.77	5.83	2.26	13.71	0.19	22.1	LSA	0.42	0.78	6.97	0.11
	Rh	7.27	5.87	2.75	16.78	0.21	24.4	LSA	0.11	0.56	7.56	0.11
Ouadhia plaine (OuaP)	G	6.61	2.08	0.73	17.18	0.07	28.1	LSA	0.44	0.22	7.39	0.101
	Rh	6.71	3.37	1.60	18.94	0.14	29	LSA	0.37	0.56	14.97	0.101
Ouadhia colline(OuaC)	G	6.75	1.75	1.60	4.19	0.14	20.4	SL	0.30	0.95	11.59	0.04
	Rh	7.04	2.5	2.13	6.28	0.18	21	SL	0.18	0.56	13.82	0.04
Bouira Sidi-Ziane (BouSZ)	G	7.41	11.81	0.71	10.03	0.13	23.4	LS	0.015	14.28	73.80	0.16
	Rh	7.37	16.25	1.33	11.28	0.16	23.5	LS	0.01	13.09	66.18	0.16
Guendoul (Guen)	G	7.62	25.00	1.30	9.36	0.06	13.68	Lpurs	0.014	9.28	66.66	0.063
	Rh	7.5	24.17	1.63	10.54	0.07	14.48	Lpurs	0.008	7.69	56.66	0.063
Tizi Rached Yefsah (TRY)	G	7.65	11.11	1.39	14.40	0.10	21.90	LSA	0.017	10.95	62.37	0.177
	Rh	7.55	17.50	1.96	16.04	0.13	23.43	LSA	0.013	9.10	59.047	0.177
Nezla (Nez)	G	7.00	2.36	0.70	10.20	0.09	3.77	LS	0.02	15.15	58.56	0.133
	Rh	6.93	3.83	0.96	11.40	0.12	8.55	LS	0.015	11.74	52.37	0.133
Effet station		THS 0	THS 0	THS 0	THS 0	THS 0	/	/	THS 0	THS 0	THS 0	THS 0
Effet racine		THS 0	THS 0	THS 0	THS 0	THS 0	/	/	THS 0	THS 0	THS 0.0001	NS 0.99
Effet station /racine		THS 0	THS 0	THS 0	THS 0	HS 0.01	/	/	THS 0	THS 0	THS 0	NS 0.99
CV(%)		0,64 0	8,27	6,72	6	13,24	/	/	8,74	10,6	12,4	7,9

Chapitre III. Evaluation du statut phosphaté des oliveraies : Relation formes de phosphore dans la rhizosphère et diagnostique foliaire.

En plus de la nature du matériau parental, le climat et la végétation jouent un rôle dans la teneur des sols en carbone organique (Klimek et *al.*, 2009). Nous remarquons une plus forte teneur en carbone organique dans certaines stations qui se trouvent au nord de la chaîne du Djurdjura et à une forte altitude. Les stations qui se trouvent sous climat subhumide sont plus riches en carbone comparativement à celles situées sous climat semi-aride. Des études ont montré que des taux de matière organique supérieurs à 1% sont suffisants pour un bon développement des vergers oléicoles (Soyergin et *al.*, 2002). Néanmoins, d'autres signalent que ces taux doivent être supérieurs à 1,5% (Freeman et Carlson, 1994). Nous remarquons que seules, les stations de Tirmitine, Nezla et Ouadhia plaine présentent des taux de matière organique inférieurs à 1% et celles de Freha, Beni Douala et Bouira Sidi Ziane inférieurs à 1,5%.

L'effet rhizosphérique est lié au flux de carbone considérable exsudé par les racines et la rhizodéposition (Czanes et *al.*, 2000 ; Hinsinger, 2001 ; Nguyen, 2003). Il est désormais admis qu'en moyenne 20% du carbone assimilé par les végétaux supérieurs, sont exsudés et libérés dans le sol par les racines (Hinsinger et *al.*, 2005 ; Gregory, 2006). Ces exsudats représentent une source d'énergie et d'éléments nutritifs pour les microorganismes qui sont impliqués dans la dynamique et l'augmentation de la matière organique (Nguyen et *al.*, 1999 ; Morel, 1989 et Cleyet-Marel et Hinsinger, 2000). Les racines dégagent des composés organiques : les sucres et les polysaccharides, les organites et les acides aminés, les peptides et les protéines composant ainsi le volume de la rhizodéposition (Bowen et Rovira, 1999 ; Nguyen, 2003 et Jones et *al.*, 2004).

II.2.4. La capacité d'échange cationique

La CEC des sols étudiés varie d'une station à une autre. Elle varie entre 4,19meq/100g de terre dans les sols de Ouadrias colline à 25,1 meq/100g de terre dans ceux de Yakouren (YakH) (Fig. III.3d), elle oscille de faible à élevée selon la teneur en argiles et en matière organique. L'analyse de la variance montre une différence très hautement significative entre les stations ($p \leq 0,001$) et CV= 6%. La racine joue un rôle très important dans la teneur des sols en cations échangeables, ceci est montré par l'augmentation considérable de la CEC à proximité des racines comparativement aux sols globaux.

Cette augmentation peut s'expliquer par l'augmentation du taux d'argile et de la matière organique qui favorise la croissance, l'assimilation des éléments nutritifs et la formation du complexe argilo-humique. Ce qui fournira plus de sites d'échanges disponibles (Davet, 1996 ; Robert, 1996 ; Turpault et *al.*, 2005 et Chiu et *al.*, 2007). L'augmentation de la CEC peut être

liée aux microorganismes qui vont altérer les minéraux du sol ainsi que la rhizodéposition et la matière organique issue de la biomasse microbienne et des racines mortes (Davet, 1996 ; Turpault et *al.*, 2001 ; Turpault et *al.*, 2006).

II.2.5. L'azote total

Le taux d'azote total varie entre 0.06% sous l'oliveraie de Guendoul et 0,21 % à Assi Youcef 2, ce sont des sols pauvres à riches en cet élément. Cette variation est très hautement significative ($p \leq 0,001$). La figure (III.3e) présente l'effet racinaire où nous remarquons que le taux d'azote des sols rhizosphériques est plus élevé par rapport à celui dosé dans les sols globaux et cette variation est très hautement significative ($p \leq 0,001$).

L'enrichissement en azote total à proximité de la racine s'explique par l'exudation d'acides aminés par les racines qui sont une source d'azote total (Hinsinger et *al.*, 2003). Les changements des propriétés physiques affectant la structure du sol dans la rhizosphère ont également indiqué un rôle majeur pour les polysaccharides composés dont la proportion substantielle de la rhizodéposition (Czanes et *al.*, 2000). De plus la reorganisation d'azote par les microorganismes autour de la racine, constitue une réserve azotée temporairement assimilable par les plantes (Fuchs et Heriss, 1999). La libération d'azote à faible poids moléculaire est toujours élevée à proximité des racines (Violante, 1998). Bertarand et Gigou, (2000) indiquent que la minéralisation de la matière organique provenant de la racine peut libérer de l'azote.

Les microorganismes augmentent la disponibilité de l'azote par leur régulation de la dynamique de décomposition de la matière organique, la rhizosphère se trouve plus riche en azote que le distal (Gregory, 2006). La plante assimile l'azote inorganique des fertilisants et du sol et libère par voie de la rhizodéposition l'azote sous forme organique (Estevez et *al.*, 2005).

Chapitre III. Evaluation du statut phosphaté des oliveraies :
Relation formes de phosphore dans la rhizosphère et diagnostic foliaire.

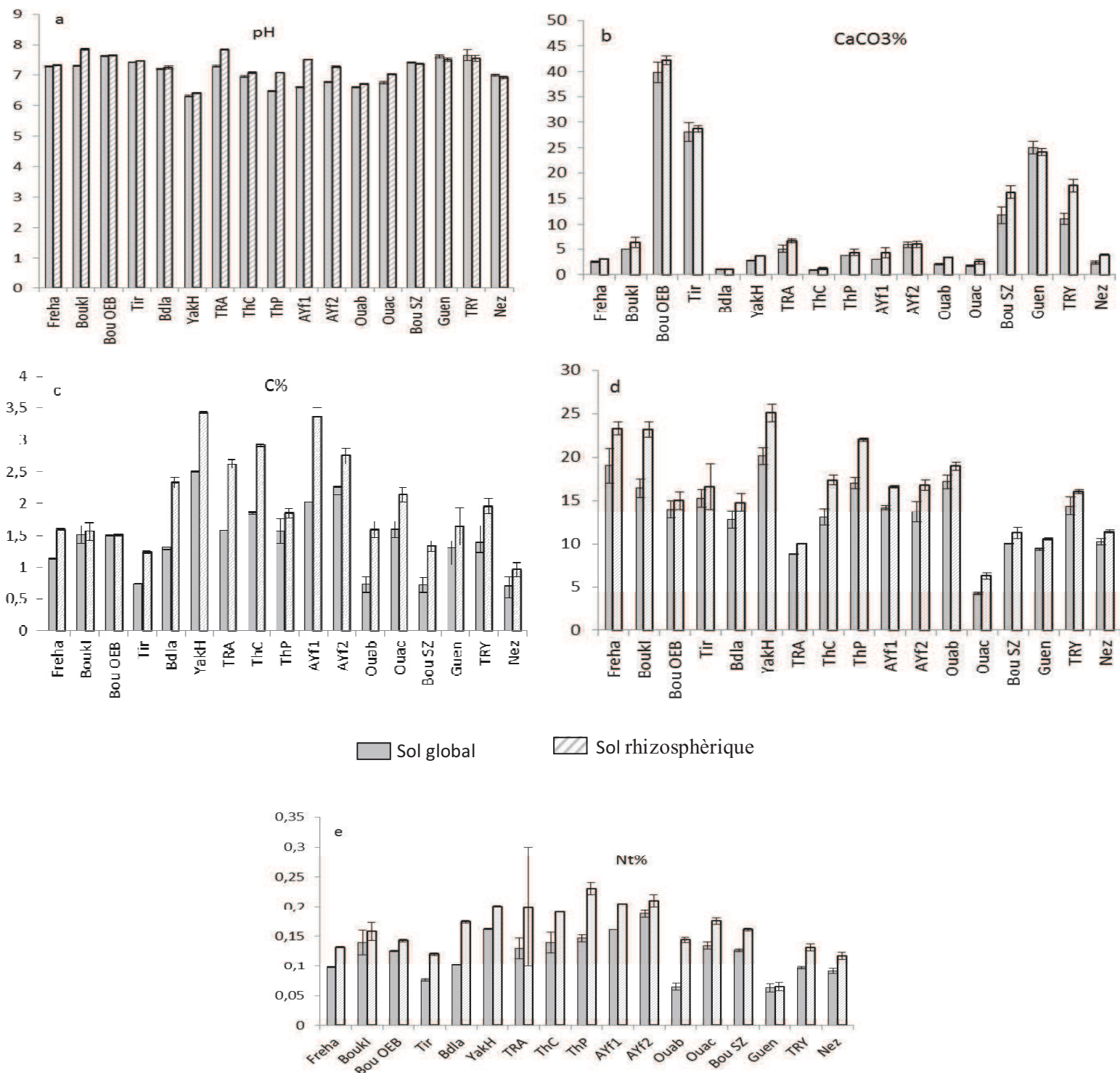


Figure III.3. a)Variation de pH ; b) du taux de calcaire ; c) de la teneur en carbone organique ;

d) de la capacité d'échange cationique et e) de l'azote total dans les sols globaux et rhizosphériques des différentes stations.

II.3. Distribution des formes du phosphore dans la rhizosphère de l'olivier

II.3.1. Le phosphore soluble dans l'eau

Les taux de phosphore soluble des différents sols étudiés sont très faibles et tendent vers le zéro (annexe 2). Cette forme varie de 0.01ppm de P dans les sols de Bouira SZ et Tizi Rached Y à 0.45 ppm de P dans ceux de Tizi Rached A (Fig. III.4).

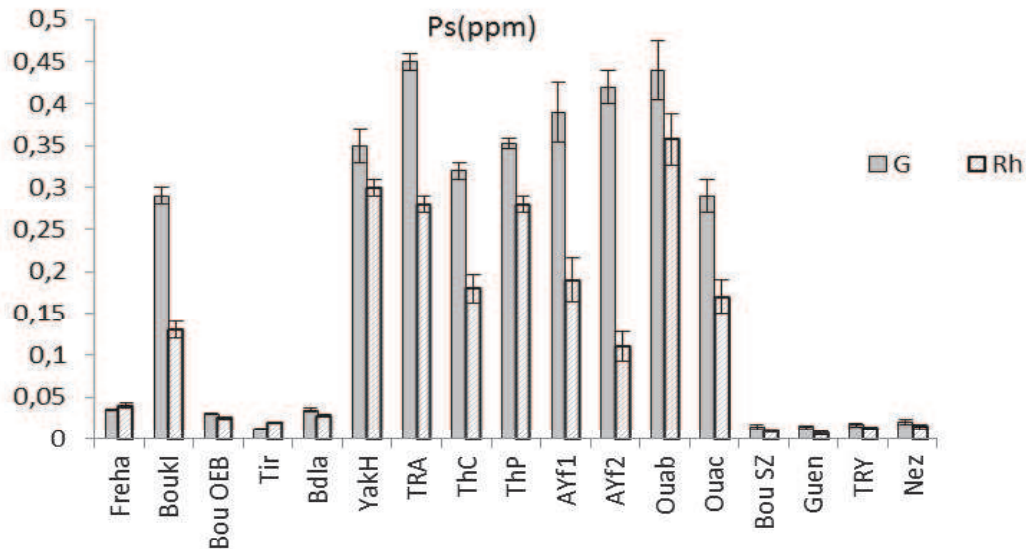


Figure III.4. Variation du taux de P assimilable des sols globaux et rhizosphériques.

Le phosphore soluble est plus élevé dans les sols globaux comparativement aux sols rhizosphériques, excepté dans les sols de Fréha et Tirmatine où le sol rhizosphérique est légèrement plus pourvu que le sol global. La variation de la concentration en phosphore dans ces sols est très hautement significative ($p \leq 0,001$). Ces teneurs en phosphore soluble sont faibles selon les normes d'interprétations proposées par Fardeau et *al.*, (1995). Pour Hinsinger (2001), le prélèvement du phosphore par les racines se traduit par une diminution de la concentration du phosphore en solution. Les fortes interactions des phosphates avec les constituants du sol, lui confèrent une faible mobilité chimique qui se traduit par une faible extension spatiale de cette zone d'appauvrissement.

La biodisponibilité du phosphore dans la rhizosphère est influencée de manière significative par des changements de pH. Ainsi les exsudats racinaires peuvent influencer directement ou indirectement la disponibilité des éléments nutritifs et/ou l'activité microbienne (Richardson, 1994). L'acidification de la rhizosphère en réponse à la déficience en phosphore a été démontrée pour un certain nombre de végétaux, elle peut alors modifier la solubilité des composés phosphatés immobilisés en particulier dans les sols alcalins (Hinsinger et *al.*, 2003). Elle peut aussi affecter la cinétique des réactions d'adsorption-

désorption des ions phosphates dans le sol et les rendre disponibles ultérieurement (Gahoonia et Nielsen, 1992; Hinsinger 2001; Neumann et Römheld 2007). Il est connu que les sols de Kabylie ont une fertilité limitée, pour répondre aux différents stress nutritionnels, les racines de l'olivier libéreraient des anions organiques dans leur rhizosphère particulièrement pour le phosphore et le fer (Hocking 2001; Neumann et Römheld, 2007). En effet, la concentration de ces composés organiques dans la rhizosphère est environ 10 fois plus supérieure par rapport à celle du sol global (Jones et *al.*, 2003).

II.3.2. Le phosphore assimilable Olsen

La teneur des sols en phosphore assimilable est très variable dans toutes les oliveraies, elle varie de très faible à moyenne (Fig . III.5). Le taux le plus faible est noté au niveau de la station de Ouadhia plaine, avec 0.22 ppm de P et le taux le plus élevé est enregistré au niveau de la station de Fréha avec un taux de 22.41 ppm de P. L'effet racinaire est considérable car nous remarquons que la teneur en phosphore assimilable des sols globaux est plus élevée comparativement aux sols rhizosphériques excepté pour la station de Boukhalfa où le taux de phosphore assimilable est plus élevé à proximité des racines. Cette variation est très hautement significative ($p \leq 0,001$).

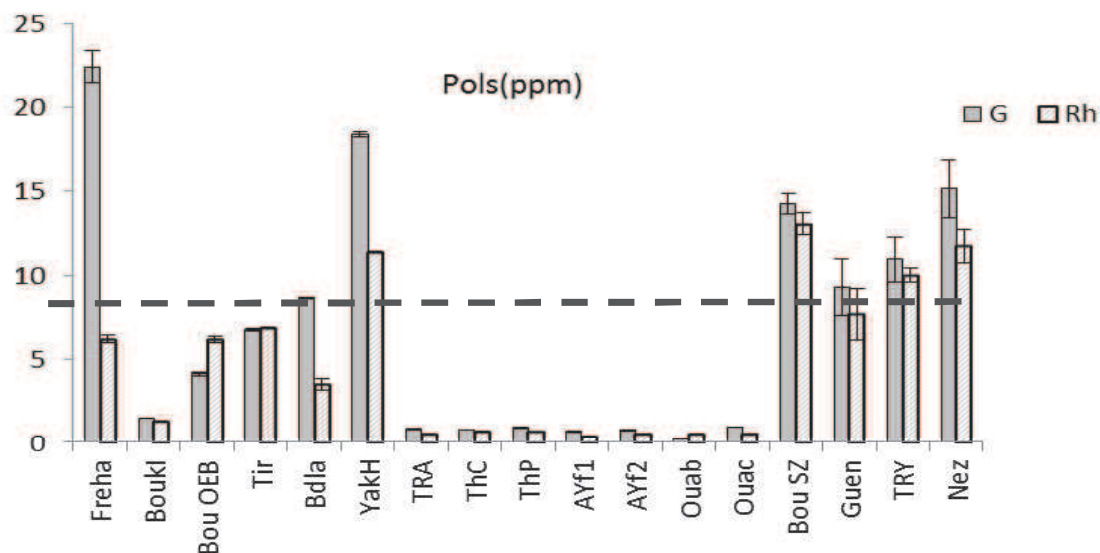


Figure III.5. Variation du taux de P assimilable des sols globaux et rhizosphériques.

Les résultats de cette forme de phosphore sont légèrement inférieurs dans les sols rhizosphériques, comparativement aux sols globaux. L'abaissement de la concentration en ions phosphates de la solution au voisinage des racines est mis en évidence par de nombreux auteurs (Barber,1995 et Guivach, 2001). Ce phénomène peut être expliqué par la vitesse

Chapitre III. Evaluation du statut phosphaté des oliveraies : Relation formes de phosphore dans la rhizosphère et diagnostic foliaire.

d'entrée des ions phosphates dans la racine qui est de 40 à 50 fois supérieur à la vitesse de pénétration des molécules d'eau et que la racine peut sélectionner les éléments entrants (Stengel et Gelin, 1998). En raison de la faible concentration en P dans la solution du sol, le processus d'advection est néanmoins très insuffisant pour couvrir le prélèvement en P de la plupart des espèces végétales, de sorte qu'il se produit une diminution de la disponibilité en P à l'interface sol/racine. Cette diminution engendre la formation d'un gradient de concentration en P disponible entre la rhizosphère et le sol global (Barber, 1995 ; Devau, 2010). Cette forme de phosphore varie de 0,22 à 22.41 ppm de P, la plupart des sols des 17 oliveraies sont en dessous de 5 ppm de P, ce qui indique une déficience en phosphore assimilable dans ces vergers. Hartmann et *al.*, (1966) ; Recalde, (1975) proposent des valeurs optimales pour le P_2O_5 assimilable comprises entre 20 et 280 ppm. Toutefois ces valeurs sont basées sur des résultats d'analyses de différentes méthodes de dosage de cet élément (Gargouri et *al.*, 2006). En Tunisie, Gargouri et Mhiri, (2002), ont déterminé un seuil critique de 8 ppm de phosphore assimilable pour l'olivier. Comparé à cette valeur de 8 ppm, l'ensemble des sols des oliveraies étudiées présentent une sévère déficience en cet élément majeur. Gargouri et *al.*, (2006) ont travaillé sur une oliveraie de 134 ha, âgée de 80ans, variété *Chemlal*, dans la région de Sfax en Tunisie, en conditions pluviales. Ils ont dosé des taux de phosphore allant de 3 à 11 ppm de P avec une moyenne de 7 ppm, ce qui indique la présence de zones de sols déficientes en phosphore. Le phosphore assimilable d'un sol n'est caractérisé que par le facteur quantité. Les limites de ces techniques sont apparues avec la multiplication des analyses de terre (Boniface et Trocmé, 1988). La solution du sol ne contient à un instant donné, dans les cas les plus favorables, que de 2 à 5% de la quantité de phosphore prélevé par les plantes (Fardeau et *al.*, 1988 ; 1991). Le phosphore de cette solution doit donc être renouvelé, au contact des racines un très grand nombre de fois durant la phase de végétation, c'est l'aptitude du sol à fournir un flux d'ions aux surfaces racinaires (Gachon, 1988). C'est ce qui expliquerait cet appauvrissement à l'interface racinaire.

En zone méditerranéenne, on rencontre une majorité de sols où la teneur en P_2O_5 est faible à très faible (Brousse et Loussert, 1978 ; Pena and Torrent, 1989). Cette déficience en phosphore des sols sous oliveraies pourrait s'expliquer par une précipitation du phosphore sous forme de phosphates calciques insolubles, dans des sols dont les pH sont neutres à alcalins (Lindsay et *al.*, 1989), mais aussi par un prélèvement continu du phosphore par les oliviers durant de nombreuses années. En l'absence d'application d'engrais, de nombreux auteurs ont constaté qu'au fil du temps les sols s'appauvrissaient en phosphore avec un impact négatif sur les rendements (Colomb et *al.*, 2007 ; Shen et *al.*, 2004 ; Wang et *al.*, 2008, 2010).

Nous notons que la ligne en pointillé correspond au seuil de phosphore en dessous duquel le sol est déficient en phosphore assimilable extrait avec du bicarbonate de sodium proposé par Olsen (Fig. III.5), sachant que cette la méthode est la mieux calibrée pour tous les types de sol.

II.3.3. Le phosphore total

La teneur des sols en phosphore total varie d'un verger à une autre allant de basse à élevée, cette variation est très hautement significative ($p \leq 0,001$). Le taux de phosphore total le plus faible est enregistré au niveau des sols de Thiniri plaine avec 6.14 ppm de P, tandis que le plus élevé est à Bouira SZ avec une teneur de 73,80 ppm de P (Fig. III.6).

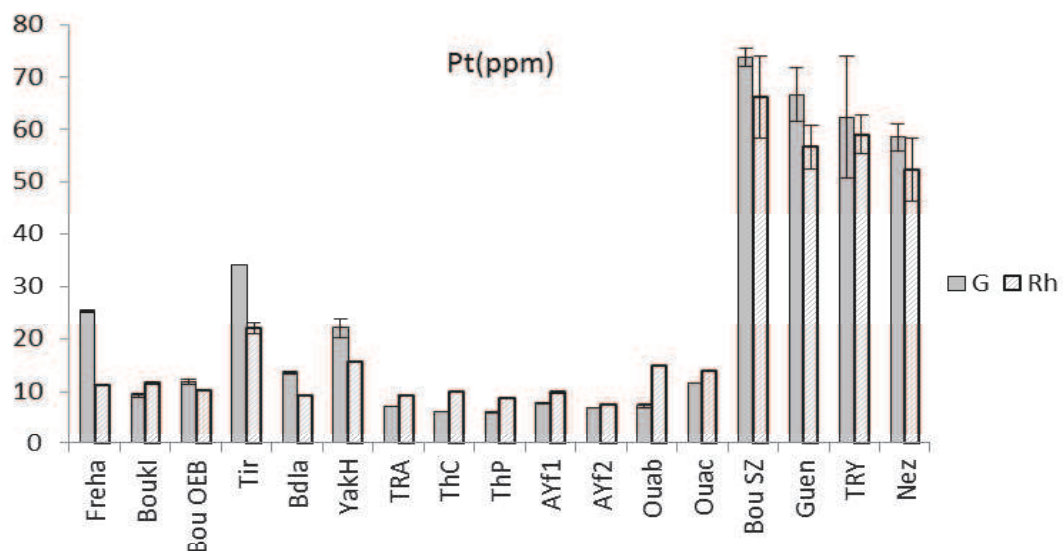


Figure III.6. Variation du taux de phosphore total des sols globaux et rhizosphériques des différentes oliveraies.

Le taux de phosphore total dosé par digestion est pour la plupart des stations plus élevé dans les sols globaux comparativement aux sols rhizosphériques excepté pour les sols des oliveraies de TRA, Thp, Thc, AYf1, AYf2, Ouab, Ouac et Boukh où le phosphore total des sols rhizosphériques est plus élevé par rapport à celui des sols globaux ($p \leq 0,001$).

L'action physique des mucilages et celle des composés carbonés notamment les phosphohydrolases augmentent la mobilité du phosphore à partir de sources peu accessibles pour la plante dans la rhizosphère (Grimal, 1994). Les formes organique et inorganique du phosphore peuvent être mobilisées grâce à l'activité des phosphatases, qui est

Chapitre III. Evaluation du statut phosphaté des oliveraies :
Relation formes de phosphore dans la rhizosphère et diagnostic foliaire.

significativement plus élevée dans la rhizosphère. En effet, cette variation est considérée comme une réponse générale des plants à une carence en phosphore (Richardson et *al.*, 2005).

Dans ce travail nous n'avons pas dosé le phosphore organique, vue les faibles teneurs en phosphore après une digestion totale à l'acide perchlorique, dans les sols sous olivier. Il est à signaler que cette fraction constitue environ 50% du phosphore total dans le sol selon le type de sol et la gestion des terres (Shand et *al.*, 1994). L'importance de ce compartiment dans la dynamique et la disponibilité ultérieure de P dans la rhizosphère est bien documenté chez plusieurs espèces végétales (Richardson et *al.*, 2005). Les racines modifient considérablement les propriétés des sols, tels que la concentration en éléments nutritifs (P), le pH et le potentiel redox, ainsi que les échanges gazeux (Hinsinger et *al.*, 2006).

II.3.4. Phosphore foliaire

Les teneurs en phosphore foliaire varient de 0,04% à AYfl et Ouac à 0,133% Nez (Fig. III.7). L'analyse statistique révèle une différence très hautement significative entre les stations ($P \leq 0,001$). La concentration en phosphore dans les feuilles d'olivier est inférieure à 0,07%, ce qui nous permet de dire que les oliviers souffrent de déficience en phosphore (Panagrotopoulos, 2001). Dans notre cas les teneurs en phosphore foliaire varient entre 0,03 à 0,17 % respectivement pour les stations de Assi Youcefl et Tizi Rached Y. Ce qui indique que la majorité des oliveraies sont nettement carencées en phosphore. Des résultats similaires sont trouvés par Gargouri et Mhiri, (2002) pour des vergers oléicoles tunisiens. Il est à signaler que Gálvez et *al.*, (2004) ont observé des corrélations significatives entre le phosphore assimilable de la zone racinaire et le phosphore des parties aériennes. Néanmoins, les feuilles des oliviers sur sols déficients en phosphore assimilable, présentaient les taux de phosphore foliaire les plus bas soient respectivement AsY1, Ouac et Guen.

Chapitre III. Evaluation du statut phosphaté des oliveraies :
Relation formes de phosphore dans la rhizosphère et diagnostique foliaire.

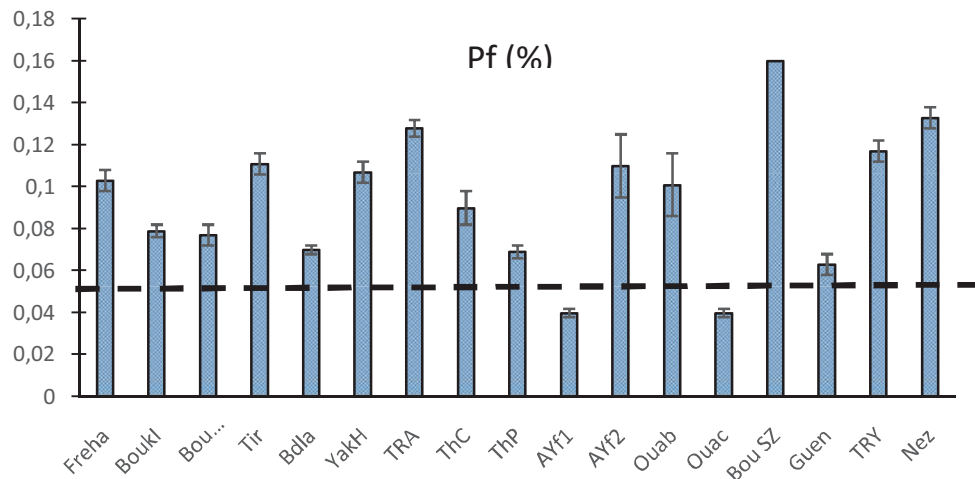


Figure III.7. Variation du phosphore foliaire dans les oliveraies.

II.4. Impacts sur les pratiques culturales

Tous les sols étudiés dans chaque oliveraie ont subi de fortes exportations durant plusieurs années. Les oléiculteurs nous ont signalé qu'il n'y a eu aucune fertilisation depuis l'installation de ces vergers. Si certains des sols globaux sont déficients en phosphore assimilable, six vergers sur les 17 étudiés ne le sont pas (Fig. III.5). Il est important de tenir compte des facteurs pédoclimatiques qui inhibent le développement du système racinaire et l'interface racinaire. L'interaction entre les facteurs biotiques et abiotiques restent mal comprise.

L'environnement du sol est très hétérogène, les racines des plantes sont particulièrement de forts modificateurs de sol. La rhizosphère qui est la zone d'influence racinaire de la plante sur le sol - est un système complexe (composé des racines, le sol et les organismes du sol) dépendants l'un de l'autre (Klimek et *al.*, 2009). Parmi lesquels il faut citer la déficience en bore, les teneurs importantes en carbonates de calcium, le manque de matière organique, la compaction des sols, la sécheresse, limitent l'acquisition du phosphore par les plantes en raison de leur effet sur la biodisponibilité du phosphore (Gargouri and Mhiri, 2002 ; Römheld and Neumann 2006). Cependant, les racines modifient considérablement les propriétés des sols, tels que la concentration en éléments nutritifs, le pH et le potentiel redox, ainsi que les échanges gazeux (Hinsinger et *al.*, 2006 Devau et *al.*, 2010). La pluviométrie et l'évapotranspiration moyennes annuelles de la région nord de l'Algérie sont des facteurs limitant de la nutrition phosphatée pour les plantes (Fardeau, 1989). A cela s'ajoute le problème d'immobilisation du phosphore dans les sols calcaires.

III. Conclusion et perspectives

Dans les sols cultivés et forestiers les ressources des sols sont inégalement réparties dans l'espace (Robinson, 1996 ; Ma *et al.*, 2007). Cette hétérogénéité est d'autant plus importante que les sols étudiés sont peu remaniés. L'aptitude des arbres avec les plantes adventices à explorer des zones enrichies dans un sol pourrait expliquer la plupart des différences entre les sols rhizosphériques et les sols non rhizosphériques (Clegg et Gobran, 1997 ; Hodge, 2004 ; de Rougemont, 2007). Ainsi, la prolifération préférentielle des racines dans des zones enrichies en nutriments surtout en présence de symbiotes mycorrhizogènes doit être prise en compte lorsque la rhizosphère s'enrichit comparativement au sol distal, ce qui est le cas des sols étudiés, qui présentent des déficiences importantes en phosphore et en d'autres éléments minéraux (Mouas Bourbia *et al.*, 2012).

Toutefois, les racines exercent des actions physiques et biochimiques, aux quelles le sol réagit dans ses composantes physiques ; teneur en eau et potentiel hydrique, chimiques ; variation de pH et de potentiel redox et microbiologiques ; excrétion d'enzymes par les bactéries et champignons (Girard *et al.*, 2005 ; Algacil *et al.*, 2010). Ainsi l'exsudation de composés organiques par la racine au cours de sa vie peut être élevée, une des clés de l'efficacité des racines est de réaffecter les photoassimilats pour soutenir la propagation racinaire dans les zones enrichies et ainsi optimiser l'absorption des nutriments (Nguyen, 2003 ; Eissenstat et Volder, 2005). Ce qui explique en partie l'enrichissement en carbone et en azote, mais l'appauvrissement en phosphore des sols rhizosphériques. Ces résultats indiqueraient que les racines de l'olivier peuvent influencer sur la biodisponibilité du phosphore avec une stratégie particulière. Cet appauvrissement en phosphore assimilable des sols rhizosphériques n'a pas empêché certaines oliveraies, comme celle de Bouk, Bouira OEB, Tir, Bdla, TRA, ThC, ThP, AssiY2 et Ouap, de ramener le niveau de phosphore biodisponible prélevé par la racine à un niveau adéquat ce qui expliquerait les teneurs en phosphore foliaire conséquentes malgré un sol déficient en phosphore assimilable dosé avec la méthode Olsen. Contrairement au phosphore dit assimilable, le potassium assimilable augmente dans la rhizosphère (Mouas Bourbia *et al.*, 2012). L'étude de l'effet de la racine de maïs par Violante *et al.*, (1998) et celle des arbres forestiers par (Turpault *et al.*, 2005) a conduit à des résultats semblables soit à une élévation des formes biodisponibles du potassium et à une diminution de celles du phosphore dans la rhizosphère. Certaines oliveraies étudiées sont sévèrement carencées en phosphore foliaire ce qui induit un appauvrissement en phosphore de la rhizosphère suite au prélèvement continu de cet élément par la racine, malgré que les sols

Chapitre III. Evaluation du statut phosphaté des oliveraies : Relation formes de phosphore dans la rhizosphère et diagnostic foliaire.

soient aussi fortement déficients en phosphore. Hinsinger et *al.*, (2009), soulignent que certaines plantes ont l'aptitude d'entrer en compétition efficacement avec le pouvoir de rétention des sols en phosphore. La déficience en phosphore des oliviers a conduit ces derniers à appauvrir la rhizosphère pour continuer à alimenter les arbres en phosphore. Cependant, la libération par les racines de composés organiques divers est un phénomène responsable de la diffusion passive et contrôlée de composés solubles riches en sucres, acides aminés et organiques (Read et Grégory, 1997 ; Hinsinger, 2010). Ces molécules permettent de faciliter l'acquisition des éléments minéraux. En effet, la photosynthèse permet à la plante d'acquérir du phosphore à partir de ses formes organiques (Tarafdar et Claassen, 1988), avec la stimulation des relations symbiotiques à l'interface sol/racine (Bais et *al.*, 2004).

Le déplacement des ions phosphates de la phase solide vers la solution du sol sous l'effet d'une diminution de leur concentration dans la solution du sol est faible en raison de la forte attirance des surfaces chargées pour les orthophosphates et de la stabilité des phosphates. En effet, la modification des processus d'adsorption-désorption et de précipitation-dissolution en réponse à une diminution de la concentration en ions phosphates dans la solution du sol ne permet généralement pas de compenser le prélèvement de P, ce qui aboutit à la diminution de la disponibilité en P dans la rhizosphère (Gahoonia et *al.*, 1992; Kirk et Saleque, 1995; Devau, 2010).

Les activités phosphatasiques ont été détectées à la surface des racines du maïs et dans la solution nutritive. Les possibilités d'action des phosphatases sont liées à l'accessibilité des phosphates organiques et des enzymes, adsorption sur les colloïdes ou précipitation. Ces résultats montrent que les mucilages par leur action physique et les composés carbonés diffusibles (phosphohydrolases notamment) contribuent à augmenter la mobilité du phosphore à partir de sources peu accessibles pour la plante dans la rhizosphère ce qui se traduit avec une modification des flux de phosphore à l'intérieur de la plante (Grimal et Morel, 2001).

Dans le cadre de l'étude du réapprovisionnement de la solution, il faut penser à faire : une compartimentation (inorganique et organique) du phosphore dans la rhizosphère ; quantifier les processus biologiques (minéralisation et insolubilisation) et physicochimiques (diffusion) de réapprovisionnement de la solution de sol en lien avec le statut phosphaté afin de pouvoir comparer et hiérarchiser ces différents processus.

Ce travail nous permet de dire que les racines de l'olivier utilisent certaines stratégies comme les photoassimilats pour s'adapter aux milieux déficients en éléments nutritifs afin de créer un environnement plus favorable à son développement et à sa pérennité. Cette allocation

Chapitre III. Evaluation du statut phosphaté des oliveraies :
Relation formes de phosphore dans la rhizosphère et diagnostique foliaire.

racinaire sous forme d'exsudation de rhizodépôts avec un développement racinaire particulier pour améliorer la nutrition minérale. Ces résultats sont une conjoncture de fournir aux oléiculteurs une nouvelle méthode de fertilisation des vergers en se basant sur la gestion de la rhizosphère et les processus rhizosphériques, dans le cadre d'une oléiculture durable. Cependant, il est souhaitable de compléter ce travail par une étude physique approfondie du sol pour mieux cerner le bilan hydrique ; une détermination des teneurs en oligo-éléments particulièrement le bore ; une identification de la microflore du sol ; une étude temporelle sur la dynamique et la biodisponibilité des éléments nutritifs.

Chapitre IV.

*Variation du phosphore biodisponible
à l'interface sol-racine de Olea
europaea L. après application d'engrais
phosphatés*

Introduction

Le potentiel alimentaire d'un sol se définit comme son aptitude à fournir aux racines un flux d'ions d'une intensité variable et plus ou moins soutenue. Il résulte de l'interaction de plusieurs facteurs : quantitatif, rétention et cinétique ou mobilité (Saragoni et Fardeau, 1988 ; Vilain, 1993). Conventionnellement, l'offre alimentaire du sol en un élément nutritif donné doit être identifiée uniquement à la réserve assimilable ou uniquement à la partie «soluble» de l'élément, partie très restreinte (Faurie et Fardeau, 1990 ; Harmsen et *al.*, 2005). Cependant Martinez et Delas, (1990), démontrent que ce pool facilement accessible ne suffit pas à établir un diagnostic de fertilité d'un sol donné. En ce qui concerne le phosphore, 98 % du phosphore extrait du sol par les racines végétales doit être désorbé de la phase solide du sol vers la solution durant la phase de végétation (Admont et *al.*, 1986 ; Morel et Fardeau, 1990). La capacité de prélèvement en phosphore d'une plante résulte de deux processus, la capacité des racines à absorber cet élément et le développement d'une bonne architecture racinaire (Vance et *al.*, 2003; Raghothama and Karthikeyan, 2005).

Pour décider d'une pratique de fertilisation adaptée aux cultures et au sol, l'agriculteur doit pouvoir disposer de références issues d'essais par exemple et avoir une connaissance de son sol. Pour ce dernier point les paramètres de description du phosphore assimilable cités précédemment n'étant pas forcément liés, il est illusoire de caractériser ce phosphore mobile par un paramètre unique, ne fournissant qu'une donnée moyenne. Il est, en effet, nécessaire de pouvoir estimer non seulement le niveau en phosphore assimilable, mais aussi le type de comportement du sol vis à vis des phosphates en terme de pouvoir fixateur et réserve (Saragoni et Fardeau, 1990 ; Bhadoria et *al.*, 1991). La nutrition phosphatée des cultures ne doit plus s'apprécier uniquement en termes de quantités présentes dans le sol, mais en terme de flux, d'interception racinaire et de biodisponibilité (Martinez et Delas, 1990). Au niveau racinaire, le prélèvement actif du phosphore crée un appauvrissement en phosphore assimilable qui vraisemblablement stimule la vitesse de libération du phosphore non échangeable (Benamara et Conesa, 1976 ; Morel et Fardeau, 1990).

Les prélèvements de phosphore par les cultures dépendent de nombreux facteurs parmi lesquels il faut citer : les besoins des cultures ; le système racinaire des espèces ; le niveau de phosphore assimilable du sol ; l'application d'engrais phosphatés et des autres fertilisants en particulier l'azote ; les possibilités offertes aux ions phosphatés de quitter les particules de sol pour rejoindre les racines via la solution du sol (Tiessen et Frossard, 1991 ; Morel et *al.*,

1992 ; Jing et *al.*, 2010 ; Zhang et *al.*, 2010).). L'utilisation de fertilisants phosphatés permet d'augmenter les stocks en cet élément dans les sols notamment les fractions biodisponibles et de lever les problèmes de carence des plantes (Payn et *al.*, 2000 ; Fox et *al.*, 2006 ; Weligama et *al.*, 2008). La caractérisation des sols rhizosphériques de l'ensemble (Chapitre III) des oliveraies étudiées a révélé que ces derniers sont pauvres en éléments nutritifs, car aucune fertilisation n'a été faite depuis leur installation. Qu'en serait-il si nous procédons à cela? L'oliveraie de Tizi-Rached A est choisie comme parcelle démonstrative au vue de sa facilité d'accès et la coopération de ses propriétaires. L'objectif de cette étude est de déterminer si l'application localisée d'engrais azoté et potassique associée à celle croissante d'engrais phosphatés pouvait affecter i) certaines propriétés chimiques et phosphatées de la rhizosphère et ii) le statut nutritionnel de cette oliveraie.

I. La fertilisation

La fertilisation d'un sol, consiste non seulement à y introduire des substances fertilisantes, minérales et organiques, mais à tout mettre en œuvre pour que le déroulement des cycles biologiques s'accomplisse activement et régulièrement, apportant aux cultures rendement, résistance et qualité et augmentant d'année en année l'aptitude à produire de ce sol (Lacharme, 2001 ; Fritsch et Lemercier, 2003). Giasson et Jaouich, (2007), signalent que ce déroulement actif nécessite que soient améliorées à la fois ses propriétés physiques (plus ou moins réalisable tel que la texture, la structure), chimiques (neutraliser progressivement le pH du sol, enrichir le complexe adsorbant en éléments nutritifs par les apports de matières organiques et des engrais) et biologiques (favoriser l'activité biologique utile).

I.1. Fertilisation phosphatée

L'alimentation phosphatée d'une culture ne s'effectue qu'à partir des réserves labiles d'un très petit volume de sol, celui qui entoure les racines dans un rayon de 1 à 2 mm au maximum. Les réserves labiles globales du sol doivent donc être supérieures aux besoins annuels des cultures (Gachon et Triboi, 1988 ; 1983 et 1989 ; Duchauffour, 1995).

Un des objectifs des agronomes en matière de fertilisation phosphatée est de fournir aux agriculteurs des conseils fiables et précis afin de placer les cultures dans une situation où leur nutrition phosphatée ne soit pas le premier des facteurs limitant la production (Morel et Fardeau, 1991 ; Morel et *al.*, 1992). En moyenne, une culture prélève 80 % du phosphore qui lui est nécessaire à partir de la fraction biodisponible et 20 % à partir de la fumure annuelle apportée avant la culture (Morel, 1988). Même si ces proportions varient en fonction du

niveau du statut phosphaté du sol et de la qualité d'engrais apportée (Morel et Fardeau, 1989), le rôle des réserves assimilables du sol en phosphore est prépondérant en toute circonstance (Duchaufour, 1995 ; Madeleine, 2006). Ce constat a conduit les agronomes à proposer de porter la réserve assimilable du sol à un niveau dit “ d'entretien ”, niveau pour lequel un apport d'engrais phosphaté n'entraîne pas d'accroissement de rendement (Boniface, 1988).

Pour étudier les rendements après une fertilisation phosphatée, il est habituel de transformer les données culturales au moyen d'un indice de rendement (IR) (Nelson et Anderson, 1980 ; Fox et *al.*, 1986 ; Boniface et Trocmé, 1988 ; Martinez et Delas, 1990) . Il est préférable de gérer la fertilisation en phosphates annuellement comme pour l'azote (Morel et Fardeau, 1990).

I. 2. Les engrais

I. 2. 1. Caractéristiques des engrais minéraux

Les engrais minéraux sont classés selon le nombre d'éléments fertilisants majeurs (N, P, K) apportés. Les engrais simples apportent un seul de ces trois éléments et peuvent contenir en plus certains éléments secondaires (Ca, Mg, S et Na) ou oligoéléments (Charler et Garnier, 2010). Les engrais composés contiennent deux ou trois de ces éléments, ce sont des engrais binaires (NP, NK, PK) ou ternaires (NPK) (Madeleine, 2006).

I. 2. 2. Emploi d'engrais minéraux

Les engrais minéraux se distinguent par leur solubilité et leur incidence sur l'acidité du sol. Ainsi, les engrais fortement solubles sont à privilégier pour corriger rapidement un déséquilibre minéral du végétal. Les moins solubles sont davantage utilisées pour rectifier la réserve minérale du sol (Fritsch et Lemercier, 2003). Différents éléments sont nécessaires à la production végétale, particulièrement (N, P et K). Ces éléments sont fournis soit par le sol soit par la fertilisation, mais pour des rendements élevés, la fourniture par le sol d'éléments minéraux est insuffisante et il est généralement nécessaire d'appliquer des fertilisants (Jung et Rahrbacher, 2003). La quantité nécessaire est celle qui permet à l'élément considéré d'être, dans les tissus de la plante, avec une concentration permettant un fonctionnement optimum des processus biochimiques et enzymatiques (Fig.IV.1). En quantité inférieure, on observe des carences et en quantité supérieure, on observe une consommation de luxe ou même une toxicité. Les éléments nutritifs doivent permettre de satisfaire les besoins de la plante aux différents périodes de son cycle végétatif (Vanhaecke, 2006).

Chapitre IV. Variation du phosphore biodisponible à l'interface sol-racine de *Olea europea* L. après application d'engrais phosphatés

Pour estimer la quantité d'engrais à apporter, on considère d'une part, la quantité totale nécessaire pour un objectif de rendement et d'autre part, la quantité qui peut être fournie par le sol et absorbée par les racines, en relation avec leur profondeur d'enracinement et les pertes éventuelles (Kawther, 2002).

AZOTE N	PHOSPHORE P	POTASSIUM K
		
tiges, feuillages	racines, résistance mal- adies, fécondation	fleurs, fruits

Figure IV.1. Utilisation des NPK dans la plante (Vanhaecke, 2006).

I. 2. 3. Facteurs influençant l'application des engrais

Il existe plusieurs paramètres qui influencent l'application des engrais liés à la nature du sol. Un apport d'engrais acides contribue à baisser le pH qui a pour conséquence la concentration excessive de l'aluminium, du fer ou de manganèse à des niveaux toxiques pour les plantes. Toutefois, les engrais acides ont l'avantage d'améliorer la disponibilité de certains éléments tels que : le phosphore, le cuivre, le fer et le manganèse dans les sols basiques (Kimba, 2010). Les conditions climatiques peuvent provoquer la volatilisation de l'ammonium (NH_4^+), ce qui réduit leur l'efficacité. Par ailleurs, en conditions d'intenses précipitations, l'azote est ruisselé d'où la nécessité de fractionner son apport en faibles doses fréquentes (Moughli, 2000 ; Saidi, 2002).

I. 2. 4. Efficience des engrais

L'efficience des engrais mesure la proportion des engrais utilisés par la culture, c'est la proportion absorbée par la culture, qui a servi à son développement et qui se retrouve pour une bonne partie dans la récolte (Lacharme, 2001). Elle est liée à différents facteurs tels que la période d'application, une application homogène des intrants sur les sols, la limitation des pertes par évaporation et par les mouvements d'eau, une bonne mise en contact des engrais

avec le système racinaire et la concurrence des mauvaises herbes (Robinson, 2001 ; Douglass et *al.*, 2005).

I. 3. Fertilisation de l'olivier

Il existe deux modes de fertilisation en fonction de la disponibilité en eau pour l'oliveraie, en pluvial ou en irrigué, ainsi les doses d'engrais sont calculées en fonction. Pour l'azote, Ferrero et *al.*, (1986), préconisent des doses allant de 0,6 à 1kg d'azote/ arbre / an en conditions pluviales. Par contre en irrigué, elles sont de 0,75 à 1 kg d'azote/ arbre / an. Hidalgo et Pastor (2005). Mais, Fernandez Escobar, (2004) préconisent des doses oscillant de 0,5 à 1kg d'azote/ arbre / an pour corriger les carences azotées pour toutes les oliveraies. Il est à noter que Morales Siloro et *al.*, (2009) considèrent qu' une dose de 0,4kg est adéquate pour la qualité de l'huile et des olives de table, tandis que les doses supérieures risquent de contaminer les nappes.

Pour la fertilisation potassique, la dose de 1kg de K_2SO_4 /arbre /an avec une pulvérisation de 10,5g de K / litre aux quatre stades de développement sont adéquates (Restrepo Diaz et *al.*, 2008). Des doses allant de 0,8 à 1kg de P_2O_5 /arbre /an sont préconisées par Walali et *al.*, (2003), c'est l'équivalent en moyenne de 2 kg de superphosphates à 46%. Il est recommandé d'utiliser du monopotassium de phosphate en pulvérisation foliaire à des concentrations comprises entre 2 et 4%, quand le stress hydrique est important avec impact négatif sur la nutrition minérale (Warquero et *al.*, 2002). Il est conseillé d'apporter le bore pour l'olivier sachant que c'est l'une des espèces fruitière la plus sensible à la carence en cet élément (Hartmann, 1996 ; Fernandez Escobar et *al.*, 1999).

Le comportement alimentaire de l'olivier en éléments majeurs est fonction des stades phénologiques. La plus forte demande de l'olivier en azote se fait au départ de la végétation et à la floraison (Tab. IV.1), tandis que les gros besoins en phosphore et en potassium sont marqués au début de la reprise végétative de l'olivier (Denis, 2000 ; Sopib, 2009). Au cours du cycle végétatif les exigences nutritionnelles varient d'un stade à un autre (Villa, 2003). Les chutes de rendement peuvent être importantes (Sibbett et Ferguson, 2002). L'olivier subit une alternance de la production (Jordano et *al.*, 1993). Cette dernière cause des fluctuations importantes de la production entre l'année "on" et l'année "off" (Rosentock et *al.*, 2010). C'est le cas de l'oliveraie tunisienne, sujette à une alternance fréquente et considérable (Benrouina et Trioui, 2002).

Tableau IV.1. Recommandation standard en N.P.K (Sopib, 2009).

Recommandation standard (g/arbre/an)			
Production	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
< 15 kg/arbre	400	200	500
15 - 30 kg/arbre	500	300	600
30 - 50 kg/arbre	700	400	800
> 50 kg/arbre	1000	500	1200

I. 3. 1. La fertilisation d'implantation

Ce type de fertilisation permet d'enrichir le sol en éléments peu assimilables nécessaires pour la croissance des jeunes plants. L'alimentation minérale est l'un des facteurs principaux affectant le rendement des oliviers, avec l'alimentation en eau et la densité de plantation (Weill et Duval, 2009).

I. 3. 2. La fertilisation de culture

Ce type de fertilisation permet à l'olivier de développer de manière équilibrée et rapidement son système racinaire et sa frondaison et favorise une fructification précoce. Les premières années, aucune fertilisation phospho-potassique n'est effectuée, mais seulement des apports en azote (Argenson et *al.*, 1999). L'olivier a besoin d'azote à deux moments précis de l'année : à la reprise végétative et à la nouaison. Cet apport en azote doit être réparti sur 2/3 au printemps et 1/3 à la nouaison (Villa, 2003).

I. 3. 3. La fertilisation de production

A partir de la cinquième-sixième année, ce type de fertilisation permet de stabiliser la production, de régler le phénomène d'alternance et de maintenir un juste équilibre entre les différentes parties de la plante (Villa, 2003 et Tombesi et *al.*, 2007).

I. 4. Fertilisation et gestion de la rhizosphère

La gestion de la rhizosphère est une utilisation des processus physiques et biochimiques à l'interface sol-racine, ces derniers permettent d'augmenter la surface des échanges racinaires dans le sol en améliorant l'absorption des éléments moins mobiles dans le sol tels que le phosphore (Chevalier et *al.*, 1990). Les microorganismes modifient la disponibilité des

éléments tels que le phosphore, le potassium et le fer, qui sont sous forme inaccessible pour le végétal.

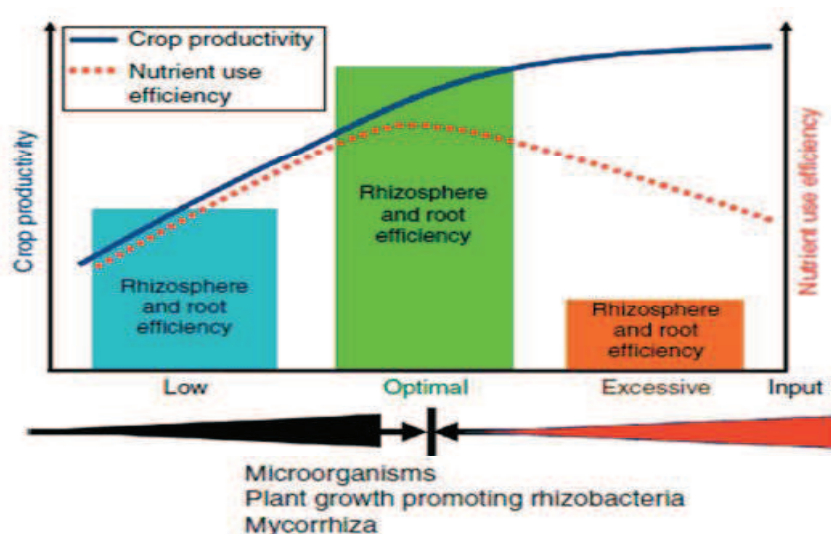


Figure IV.2. Gestion de la rhizosphère pour maximiser les processus d'acquisition des nutriments dans l'interface racinaire afin d'augmenter la productivité (Zhang et *al.*, 2010).

L'objectif de la gestion de la rhizosphère est d'optimiser l'utilisation des ressources du sol dans différents systèmes de cultures d'une manière efficace afin de diminuer les apports d'intrants. Ce concept englobe des actions sur le système racinaire (Fig. IV.2), l'amélioration de la biodisponibilité des nutriments par la manipulation de l'exsudation racinaire, l'utilisation de mycorhizes et autres micro organismes symbiotiques (Zhang et *al.*, 2010). En effet, les racines se prolifèrent rapidement dans des zones enrichies en phosphore et en azote (Hodge et *al.*, 2009 ; Mc Grath et *al.*, 2008). L'application localisée du P et N dans des sols calcaires a amélioré significativement la croissance et la prolifération racinaire avec une diminution du pH de 3 unités dans la rhizosphère (Jung et *al.*, 2010). Pour avoir des rendements importants, il faut raisonner la mobilisation et l'acquisition des nutriments en maximisant les processus rhizosphériques (Zhang et *al.*, 2010).

II. Présentation de l'olivieraie fertilisée

L'olivieraie de Tizi Rached A est située entre (36°41' 15. 71"N et 12°39.27"E) avec une altitude de 216 m. Le sol est un Cambisol formé sur des grès, se situe au nord-est du socle de la grande Kabylie (Raynold, 1976 ; Gerard, 1979). La superficie de cette olivieraie est de 0.5 ha et elle contient 48 oliviers du même âge (Fig. IV.3).



— Oliveraie de Tizi Rached A, — Parcelle expérimentale

Figure IV.3. Photo aérienne de l'oliveraie fertilisée.

III. Matériel et méthodes

III.1. Plan de fumure

Le plan de fumure minérale est réalisé en 2005 sur 20 arbres, du même âge appartenant à la même variété (*chemlal*) dans une oliveraie située à Tizi-Rached. Nous avons utilisé trois types d'engrais simples qui sont : le nitrate d'ammonium à 24% de l'azote ; le superphosphate à 46% ; le sulfate de potassium à 50%.

Les doses du potassium et d'azote sont fixées à 2 fois les besoins de l'olivier pour un rendement de 50 Kg/arbre. Par contre les doses du phosphore varient de D_1 , D_2 et D_3 , ce qui correspond respectivement à 1, 2, 3 fois les besoins de l'olivier pour un même rendement. Nous avons opté pour deux témoins, dans le premiers aucun élément n'est apporté D_0 alors que dans le deuxième nous avons apporté l'azote et le potassium seulement D'_0 . Ces engrais sont mélangés de manière à obtenir les doses suivant le tableau (IV.2).

Tableau IV.2. Plan de fumure.

Engrais/Doses (Kg/arbre)	D0	D'0	D1	D2	D3
Superphosphate	/	0	2	4	6
Nitrate d' NH_4	/	4	4	4	4
Sulfate de K	/	6	6	6	6

III. 2. Le mode d'apport de la fumure

Ces engrais sont localisés à raison de huit trous autour de chaque arbre (corolle) à 2,5 m du tronc. La profondeur des trous est de 30 cm et 50 cm de diamètre (fig. IV.4). Chaque dose d'engrais est divisée en huit fractions égales et déposées dans les trous puis mélangées à de la terre.



Figure IV.4. Disposition des points d'apport de l'engrais par rapport au tronc.

III. 3. Le dispositif expérimental

Le dispositif expérimental choisi est un carré latin, mis en place en Mars 2005. Il est utilisé dans des conditions très hétérogènes. Dans ce cas, l'hétérogénéité *in situ* est due à la pente mais aussi au matériel végétal. Malgré que les oliviers soient du même âge, il est souvent observé une forte alternance dans la production. Certains arbres présentent une production plus élevée que d'autres, et l'inverse l'année suivante.

Tableau IV.3. Répartition des doses d'engrais dans le dispositif expérimental.

D₀	D_{0'}	D₁	D₂	D₃
D_{0'}	D₁	D₂	D₃	D₀
D₁	D₂	D₃	D₀	D_{0'}
D₂	D₃	D₀	D_{0'}	D₁
D₃	D₀	D_{0'}	D₁	D₂

Ce dispositif est constitué d'un ensemble d'arbres qui forment des lignes et des colonnes, chaque objet ou traitement est présent une seule fois dans chaque ligne et chaque colonne, avec cinq répétitions pour chaque traitement NPK (Tab. IV.3).

III. 4. Echantillonnage

Nous avons échantillonné les sols au mois de février 2008, à la reprise végétative de l'olivier soit trois ans après la fertilisation. Des études expérimentales sur la fertilisation azotées et phosphatée ont observé d'effet significatif de la fertilisation qu'après 3 années de mise en place du dispositif expérimental (Jordano et *al.*, 2008). Les échantillons de sol sont prélevés dans les huit trous fertilisés autour de chaque arbre pour chaque répétition des différents traitements (Fig. IV.4), soit 25 échantillons de sol global et 25 échantillons de sol rhizosphérique, un total de 50 échantillons sont prélevés. Un échantillon moyen composite de ces fractions de sol est constitué en mélangeant les prélèvements pour chaque arbre considéré dans le dispositif expérimental. Des prélèvements de feuilles sur l'ensemble des arbres sont réalisés à la même période que pour les sols.

IV. Analyses des échantillons

Après conditionnement des échantillons prélevés, nous avons fait une analyse physique et chimique selon les mêmes protocoles cités dans les premiers chapitres.

V. Analyses statistiques

L'effet de la composition des engrais sur la les propriétés physique et chimiques de la rhizosphère pour chaque dose a été testé à l'aide de la comparaison des moyennes deux à deux en utilisant des tests Turkey HSD au seuil significatif de $\alpha = 0,05$. Puis évaluer l'ampleur de l'effet racinaire de l'olivier sur les propriétés chimiques des sols globaux et des

sols rhizosphériques après apport localisé des engrais, nous avons opté pour une analyse de la variance de ces propriétés et le test de Newman-Keuls pour la comparaison des moyennes avec le logiciel Statbox. Une matrice de corrélation pour déterminer les relations existant entre les différentes propriétés du sol, réalisée avec le logiciel Statistica.

VI. Résultats et discussion

VI.1. Effet de la fertilisation sur le système racinaire

Des profils racinaires ont été faits dans le but de mieux comprendre le comportement du système racinaire après une fertilisation. La figure (IV.5) nous montre la différence du développement racinaire entre un olivier témoin et un olivier fertilisé avec la dose D_3 . Les racines fines se développent très bien dans les vingt premiers centimètres avec des ramifications importantes, alors que pour les arbres non fertilisés, l'abondance des racines est très faible avec un chevelu racinaire moins ramifié.



Figure IV.5. Variation de la densité racinaire après apport des engrais : a) arbre témoin,
b) arbre traité avec la D_3 .

Chapitre IV. Variation du phosphore biodisponible à l'interface sol-racine de *Olea europea* L. après application d'engrais phosphatés

L'étude des racines de l'olivier nous permet de déterminer la distribution verticale et horizontale des racines afin d'établir le lien entre la distribution des racines fines et celle des nutriments.

VI.2. Résultats de l'analyse chimiques des sols

VI.2.1. Effet des doses d'engrais sur les propriétés de la rhizosphère

Les principales propriétés physiques et chimiques des sols étudiés sont présentées dans le tableau (IV.4).

Les résultats de l'analyse granulométrique nous indiquent une texture limono-sablo-argileuse (LSA), avec un taux d'argile légèrement plus élevé dans les sols rhizosphériques par rapport aux sols globaux. Les racines exercent une forte pression au cours de leur croissance, elles fragmentent et désorganisent les microfissures. Ce qui explique la présence de fines particules au niveau de la rhizosphère (Callot et *al.*, 1988 ; Morel, 1996 ; Li et *al.*, 2010).

Les sols diffèrent significativement par leur pH qui est faiblement acide et varie entre 5,8 et 6,5 (Tab. IV.4). Les sols rhizosphériques des arbres témoin présentent la plus grande valeur, alors que la plus petite est enregistrée au niveau des sols globaux traités avec la dose D₁. Nous observons une diminution du pH avec l'apport de nitrates d'ammonium dans les sols globaux ainsi que pour les sols rhizosphériques traités comparativement aux sols témoin. Cette variation de pH est liée à la fertilisation, sachant qu'une fertilisation azotée sous forme de nitrate d'ammonium peut acidifier le sol, ce qui n'est pas le cas par contre des superphosphates (Madeleine, 2006).

Le taux de carbone organique varie de 4,26 à 13,26 %. Il diminue significativement avec toutes les doses comparativement aux sols témoin. Ces teneurs sont considérées moyennes à élevées pour la culture de l'olivier (Soyergin et *al.*, 2002 ; Freeman and Carlson, 1994).

La fertilisation inorganique diminue ou augmente la décomposition de la matière organique, ce qui s'explique par l'influence des engrais sur l'activité biologique particulièrement la biomasse microbienne (Campbell et *al.*, 1991 ; Burket et Dick, 1998). La littérature signale que le sol autour des racines reçoit une plus grande entrée de carbone labile appelée la rhizodéposition (Kuzyakov et *al.*, 2006).

Tableau IV.4. Caractéristiques chimiques des deux fractions du sol.

Doses	Sol	pH	C(%)	Nt (%)	NH ₄ ⁺ (%)	NO ₃ ⁻ (%)	Nmin (%)	Pt(ppm)	Pass(ppm)
D0	G	6,45	7,5	0,161	36,71	55,93	92,64	4,10	2,08
	Rh	6,51	13,3	0,18	33,52	54,9	88,42	3,60	1,35
D'0	G	5,93	4,26	0,14	44,74	70,03	114,77	5,91	1,12
	Rh	6,22	6,9	0,14	49,87	59,1	108,97	5,14	1,37
D1	G	5,89	5,9	0,13	40,87	63,47	104,34	17,24	2,97
	Rh	6,13	9,8	0,14	45,13	75,89	121,02	14,71	2,43
D2	G	5,89	7,14	0,14	46,8	68,62	115,42	41,37	3,65
	Rh	6,13	5,3	0,13	45,01	77,17	122,18	19,39	2,83
D3	G	6,05	6,5	0,18	37,07	61,20	98,27	40,27	4
	Rh	6,26	11,1	0,14	43,71	48,42	92,13	29,05	2,9

Hinsinger et *al.*, (2005) ont montré qu'en moyenne 20 % du carbone assimilé, ou plus 40% de la matière sèche (Lynch et Whipps, 1990) produite par les végétaux supérieurs via la photosynthèse sont émis par les racines vivantes dans le sol sous forme d'exsudats solubles, de cellules desquamées, de lysats et de CO₂ (Jones et *al.*, 2009). A cela s'ajoute les résidus retrouvés dans la rhizosphère et colonisés par les micro-organismes. Ils contribuent à augmenter le taux de carbone à l'interface sol/racine (Darrah et *al.*, 2006 ; Watteau et *al.*, 2006).

Pour le statut azoté, la forme totale des sols étudiés varie entre 0.12 à 0.18 %, ces teneurs sont moyennes à élevées. Nous constatons une diminution remarquable de l'azote total dans les sols fertilisés par rapport aux sols témoin. Nous assistons à une diminution rapide de l'azote total dans le sol fertilisé au profit de l'azote absorbé immédiatement par la plante. En l'occurrence, la réorganisation microbienne devient importante sans oublier les différentes pertes liées aux conditions abiotiques (Chambenoit, 2002 ; Malloch, 2007).

Les teneurs en azote ammoniacal varient entre 33,52 et 49,87 % (tableau IV.4). Les sols fertilisés sont plus riches en cette forme azotée, comparativement aux témoins. L'engrais azoté sous forme de nitrate d'ammonium libère des ions ammonium NH₄⁺, qui vont être additionnés à l'azote ammoniacal du sol, ces ions sont facilement retenus par le complexe adsorbant (Brusset et *al.*, 2002 ; Turpault et *al.*, 2005).

Chapitre IV. Variation du phosphore biodisponible à l'interface sol-racine de *Olea europea* L. après application d'engrais phosphatés

Les nitrates varient entre 48,41 et 77,16 % (Tab. IV.4). Nous remarquons une augmentation hautement significative des taux de nitrates dans les sols fertilisés comparativement aux sols témoin. Les nitrates d'ammonium apportées présentent à la fois les caractéristiques des engrais nitriques, fournisseurs d'ions NO_3^- et des engrais ammoniacaux fournisseurs d'ions NH_4^+ , qui vont s'ajouter à la fraction d'azote assimilable du sol (Moro-Gaudry, 1997 ; Madeleine, 2006). L'azote minéral varie de 88,42 à 122,17 % (Tab. IV.4). Cette augmentation est très hautement significative dans tous les sols traités avec les engrais comparativement aux témoins. Cette fertilisation avec les nitrates d'ammoniums, engrais à forte solubilité a enrichi le sol par les deux formes d'azote minéral (Lacharme, 2001 ; Richardson et *al.*, 2009).

VI.2.2. Effet racine sur la rhizosphère après fertilisation

Les résultats révèlent une légère augmentation significative ($p \leq 0,001$) du pH des sols rhizosphériques par rapport aux sols globaux (Fig. IV.6a). Les plantes doivent compenser leur absorption ionique par une excrétion de charges au niveau des racines. Quand elles prélèvent davantage d'anions que de cations, les racines relâchent des ions hydroxydes (OH^-) ou bicarbonates (HCO_3^-) qui vont avoir tendance à augmenter le pH à proximité immédiate de la rhizosphère (Hinsinger, 2001 ; Hinsinger, 2010 ; Li et *al.*, 2010).

Cette acidification peut être expliquée par la nitrification de l'azote ammoniacal apporté par l'engrais azoté appliqué (Majdi et Bergholm, 1995). Après trois années, il semblerait qu'une certaine quantité d'ammonium continuerait encore à se minéraliser dans les sols. D'ailleurs, sur le terrain nous avons pu observer la présence d'engrais non dissous dans les parties enrichies en engrais, probablement liée au stress hydrique. Cette augmentation de pH à proximité immédiate de la racine est déjà signalée par Turpault et *al.* (2006) dans la rhizosphère du douglas. L'augmentation relative du pH à proximité immédiate de la racine de l'olivier, pourrait s'expliquer par un prélèvement plus important d'anions en l'occurrence les anions nitrates et phosphates. Ainsi la différence entre les pH de la rhizosphère et ceux des sols globaux va dépendre en grande partie du rapport cations/anions (Vetterlein et Reinhold 2003 ; Li et *al.*, 2010).

Chapitre IV. Variation du phosphore biodisponible à l'interface sol-racine de *Olea europea* L.
après application d'engrais phosphatés

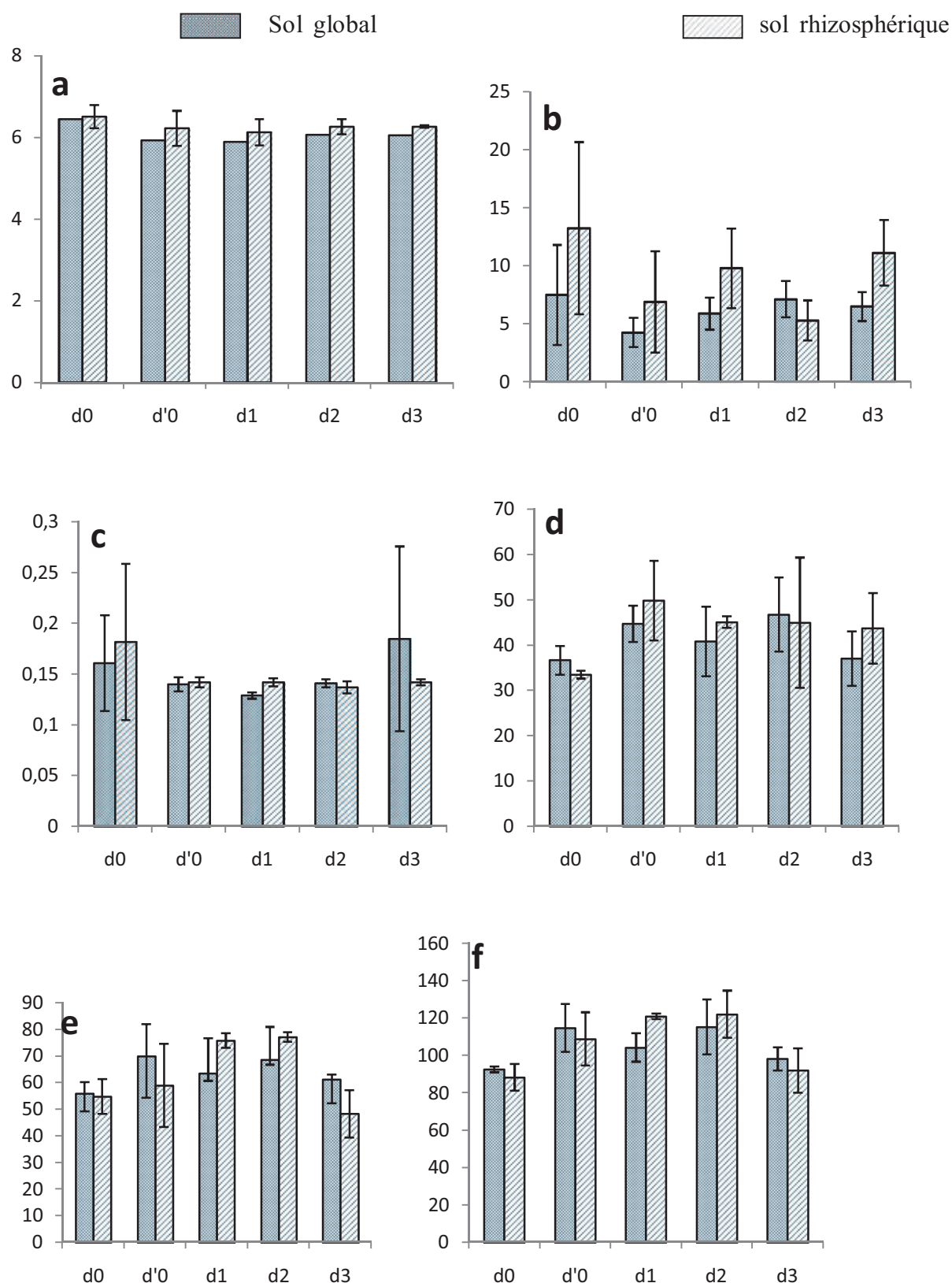


Figure IV.6. Enrichissement des sols rhizosphérique en : a) pH; b) carbone organique ; c) azote total ; d) N-NH₄⁺ ; e) N-NO₃⁻ et f) et en N minéral dans les deux fractions du sol.

Chapitre IV. Variation du phosphore biodisponible à l'interface sol-racine de *Olea europea* L. après application d'engrais phosphatés

Les variations de pH dans la rhizosphère sont expliquées par trois processus physiologiques qui sont l'absorption des ions, l'exsudation d'anions organiques et la respiration racinaire. Il est admis que l'absorption d'ions, en fait l'excrétion de H^+ ou OH^- qui en résulte, est le principal processus qui régule le pH au niveau de la rhizosphère. Il est important de savoir que l'influence de l'équilibre cation-anion sur l'exsudation de H^+/OH^- par les racines est admis.

Afin de maintenir l'électroneutralité dans le milieu intracellulaire les racines compensent le prélèvement des cations et des anions par l'exsudation de l'excès de charges positives ou négatives sous la forme, respectivement de H^+ ou d' OH^- . Si plus de cations que d'anions sont prélevés, les racines vont ainsi compenser cet influx net de cations par un efflux net de H^+ hors des racines vers la rhizosphère. Dans le cas inverse, l'influx net d'anion sera compensé par un efflux net d' OH^- (ou HCO_3^-) de la racine vers la rhizosphère. La nutrition azotée est considérée comme le principal déterminant du bilan cations-anions. L'azote peut en effet être prélevé sous forme cationique (NH_4^+), anionique (NO_3^-) sans oublier N_2 atmosphérique pour les plantes fixatrices d'azote. L'influence de l'apport de NH_4^+ et NO_3^- sur les modifications de pH dans la rhizosphère est bien documentée (Kirkby et Mengel, 1967 ; Gahoonia et *al.*, 1992 ; Zhang et *al.*, 2004 ; Betancourt, 2012).

L'absorption des nitrates et des ions phosphates à proximité de la racine s'accompagne d'une exsorption des OH^- par la racine pour rétablir l'équilibre ionique qui va provoquer l'augmentation du pH rhizosphérique (Darrah, 1993; Hinsinger et *al.*, 2003). Cette augmentation est plus importante pour les oliviers témoins NKP_0 et NKP_3 avec 0.29 et 0.25 unité de pH respectivement. Une importante absorption de potassium et d'ammonium induit une forte libération des H^+ par les racines (Delvaux et *al.*, 2005). Ainsi, l'absorption plus importante de potassium par la racine de l'olivier avec libération concomitante des H^+ pour rétablir l'équilibre ionique dans la cellule limiterait une élévation importante du pH suite à la libération des OH^- et HCO_3^- . D'autre part, l'acidité des quantités de matière organique plus élevées dans les sols rhizosphériques fertilisés avec le potassium et l'azote ammoniacal pourrait réguler les augmentations de pH.

Nous constatons que les taux de matière organique augmentent significativement dans les sols rhizosphériques par rapport aux sols globaux excepté pour les sols traités avec la D_2 (Fig IV.6b). Ce qui peut s'expliquer par le fait que les racines exsudent des composés variés

Chapitre IV. Variation du phosphore biodisponible à l'interface sol-racine de *Olea europea* L. après application d'engrais phosphatés

(minéraux et organiques), les plus essentiels sont de nature organique, qui sont la source principale de carbone pour les micro-organismes (Sollins et *al.*, 1996 ; Uren, 2000 ; Bertin et *al.*, 2003). L'augmentation des taux d'azote total dans les sols rhizosphériques par rapport aux sols globaux (Fig IV.6c) est liée à un enrichissement en cet élément à proximité de la racine qui s'explique par le fait que la plante sécrète par ses racines des exsudats riches en acides aminés (Chambenoit, 2002 ; Malloch, 2007).

Les micro-organismes jouent un rôle important dans le cycle de l'azote, ils sont capables de réaliser deux processus parallèles, mais opposés, la minéralisation qui correspond à l'assimilation d'azote et la conversion de l'azote minéral en azote organique (Monrozier et Bally, 2002 ; Richardson et *al.*, 2009). L'azote ammoniacal au niveau des sols rhizosphériques est plus élevé par rapport aux sols globaux (Fig IV.6d). Ce qui explique l'activité des micro-organismes autour des racines qui dégradent la matière organique endogène du sol, la matière organique fraîche et des cadavres microbiens. Chaque micro-organisme soustrait de l'azote pour le métabolisme et l'azote excédentaire est rejeté sous forme ammoniacale (Pousset, 2002 ; Alguacil et *al.*, 2005 ; Duget, 2005). Cependant, il n'y a aucune variation dans le taux des nitrates dans les deux fractions du sol (Fig. IV.6e). Malgré l'apport des nitrates d'ammonium dans les sols, ils sont immédiatement absorbés et assimilés par la plante (Chambenoit et *al.*, 2002). Le stress hydrique peut être à l'origine de l'accumulation des ions NO_3^- dans les sols, ce qui peut diminuer le processus de lixiviation. Le taux d'azote minéral est légèrement élevé dans les sols rhizosphériques par rapport aux sols globaux (Fig. 6f) excepté pour la D₃, où tous les sols présentent des teneurs proches. En effet, l'engrais azoté apporté comporte les deux formes assimilables, qui présente à la fois une action immédiate par sa forme nitrique et l'action plus soutenue par sa forme ammoniacale (Hacala et *al.*, 2002). La minéralisation des matières organiques par l'activité microbienne enrichit le sol en azote par la libération des protéines (Chambenoit et *al.*, 2002 ; Malloch, 2007). Toutefois, dans les prairies, il existe une forte corrélation entre le stress hydrique et l'appauvrissement en azote minéral (N-NO_3^- et N-NH_4^+) du sol rhizosphérique et la biomasse racinaire (Craine et *al.*, 2003).

VI.2.3. Appauvrissement de la rhizosphère en phosphore après application des engrais

Les résultats du phosphore total (Pt) varient de 3,6 à 41,37 ppm de P (Tab. IV.4). Les teneurs dosées dans les sols fertilisés sont plus élevées par rapport aux sols témoins et d'une manière très hautement significative. Cette augmentation des taux de phosphore total dans les

Chapitre IV. Variation du phosphore biodisponible à l'interface sol-racine de *Olea europea* L. après application d'engrais phosphatés

sols étudiés s'explique par l'apport des superphosphates qui enrichissent le sol juste après leur application, additionné aux réserves de ce dernier (Elalaoui, 2007 et Kimba, 2010). A cela s'ajoute l'effet positif des nitrates d'ammonium sur la dissolution des engrais phosphatés dans le sol (Baptendier, 1994).

Le dosage du phosphore total a révélé une augmentation significative des concentrations au niveau des sols globaux comparativement aux sols rhizosphériques (Fig. IV.7a). Cette variation s'explique peut être par le fait que le phosphore dans le sol présente une zone d'appauvrissement au contact immédiat des racines et une zone d'accumulation présentant un maximum à distance des racines (Geelhoed et *al.*, 1999 et Kirk, 1999). Tandis que les ions phosphatés sont libérés dans la solution du sol du fait de la dissolution de l'engrais phosphaté, une partie est susceptible d'être absorbée par les racines, mais une grande partie réagit vite avec les divers constituants du sol (Hinsinger, 2001a). Gahoonia et *al.* (1992) ont montré que dans les sols de type fersiallitique la dynamique de phosphore était gouvernée essentiellement par les oxydes de fer.

Les résultats du phosphore assimilable dosé avec la méthode Olsen sont faibles. Cette forme dite biodisponible varie de 1,12 à 4,00 ppm de phosphore (Tab. IV.4). Nous constatons une augmentation très hautement significative des teneurs en phosphore assimilable au niveau des sols traités avec les différentes doses d'engrais (Li et *al.*, 2010). Les superphosphates conviennent à tous les types de sols et à toutes les cultures. En raison de leur grande solubilité dans l'eau, ce sont des engrais à action rapide immédiatement assimilables par les plantes (Elalaoui, 2007). Ce qui explique l'augmentation de phosphore assimilable Olsen dans les sols traités avec les doses D₁, D₂ et D₃.

L'augmentation des taux de phosphore assimilable dans les sols D₀ peut être expliquée par le fait que les arbres fertilisés avec les nitrates et l'ammonium exsudent beaucoup, ce qui leur permet de mobiliser le phosphore non assimilable à partir des constituants du sol. Le renouvellement du pool biodisponible de phosphore sera important à partir du potentiel initial du sol (Lombi et *al.*, 2006).

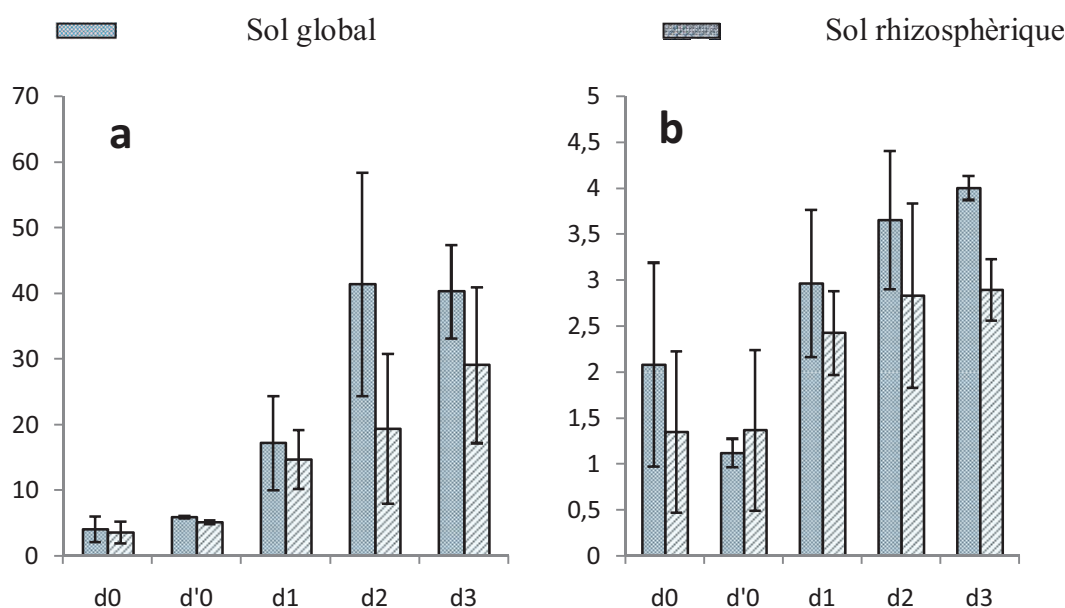


Figure IV.7. Appauvrissement de la rhizosphère en : a) phosphore total et b) phosphore assimilable.

Cependant, cette diminution en POIs est très hautement significative (Fig IV.7b). Elle indiquerait l'appauvrissement au contact immédiat des racines, en conséquence de leur activité de prélèvement (Morel et *al.*, 2007 ; Li et *al.*, 2007). Hinsinger, (2001b) a montré que la fourniture d'azote ammoniacal provoque une acidification du sol qui aboutit à une dissolution des phosphates et une libération du phosphore à partir des constituants du sol par l'excrétion des protons par les racines. Ainsi, la diffusion des exsudats tels que H^+ est plus rapide des racines vers le sol et celle des ions phosphates du sol vers les racines (Geelhoed et *al.*, 1999 et Kirk, 1999). Les racines stimulent rapidement le phosphore disponible dans la solution du sol, si elles sont en compétition par les autres puits potentiels de phosphore présents dans le sol tels que les minéraux du sol, les racines d'espèces concurrentes ou les micro-organismes de la rhizosphère (Oliveira et *al.*, 2009 ; Li et *al.*, 2010). Elles peuvent exercer une action sur les ions phosphates adsorbés à la surface des constituants du sol (McDowell *al.*, 2008) et mettent en jeu, éventuellement de façon conjointe, une désorption par échange de ligands, liée à l'appauvrissement en phosphore de la solution du sol par l'excrétion d'anions au moment de l'absorption des ions nitriques par changement phosphore par les exsudats racinaires tels que des ions bicarbonates ou carboxyliques (Hinsinger, 2001b, Hinsinger, 2010 ; Li et *al.*, 2010). L'addition des engrais azotés et potassiques dans les zones de sols enrichies de manière croissante avec des doses de phosphore a amélioré la fertilité des sols. Ce qui permet de créer

ainsi un milieu plus favorable au bon développement de l'olivier, ce qui provoquerait des prélèvements importants en phosphore. La rusticité de l'olivier et le développement de son système racinaire lui permettent de réalimenter sa rhizosphère en phosphore assimilable à partir du pool non labile.

Ces variations du phosphore assimilable, avec un appauvrissement des sols rhizosphériques peuvent être liées à l'amélioration du statut minéral des oliviers fertilisés. Nous avons observé une amélioration de la biomasse aérienne et racinaire. L'importance de l'apport d'engrais dans les sols a montré un épuisement en phosphore des sols rhizosphériques, ceci reflète l'intensité des prélèvements racinaires des oliviers. Par conséquent, la littérature nous montre que l'enrichissement des sols permet un meilleur développement de racines avec une stimulation de l'absorption (Hodge et *al.*, 2009).

La corrélation positive qui existe entre l'azote ammoniacal du sol rhizosphérique et l'azote ammoniacal du sol global est de type linéaire (Fig. IV.8a), ce qui indique que l'augmentation de l'azote ammoniacal est uniforme dans le sol rhizosphérique et le sol global, cette augmentation est due à l'enrichissement apporté par l'engrais azoté (Brusset et *al.*, 2002), à l'activité des micro-organismes et à la sécrétion des exsudats racinaires dans la rhizosphère (Pousset, 2002 et Duget, 2005).

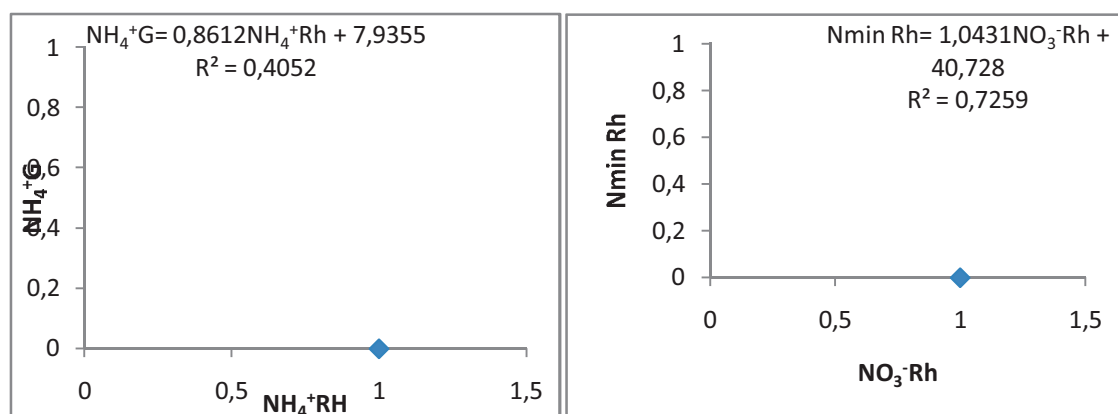


Figure IV.8. a) relation entre $\text{NH}_4^+ \text{G}$ et $\text{NH}_4^+ \text{Rh}$ et b) Nmin rh et $\text{N-NO}_3\text{rh}$.

La figure (IV.8b) indique que la relation positive qui existe entre l'azote nitrique et l'azote minéral au niveau du sol rhizosphérique est aussi linéaire, ce qui montre que l'augmentation de l'azote minéral est uniforme, puisque l'azote nitrique est l'une des formes minérales de l'azote. Cette augmentation est due à l'apport d'engrais azoté soluble (Moro-Gaudry, 1997 ; Madeleine, 2006). La décomposition de la matière organique par les êtres vivants particulièrement aboutit à

l'enrichissement de la solution du sol en azote minéral dans la rhizosphère (Chambenoit et *al.*, 2002). Les résultats obtenus, nous informent qu'il existe divers corrélations qui présentent une différence très hautement significatives entre différentes formes de phosphore en tenant compte des différentes doses apportées aux sols.

La corrélation positive entre le phosphore total du sol global et celui du sol rhizosphérique, indique que l'augmentation de cette forme de phosphore est uniforme dans tout l'environnement racinaire (Fig. IV.9a). Ce qui pourrait montrer l'effet immédiat de l'engrais phosphaté, cette première réaction rend le phosphore très actif avec les constituants du sol dès sachant que les phénomènes d'adsorption et de fixation pour cette élément surviennent rapidement (Gagnon et Beaulien, 2002). Cependant, la corrélation positive et significative entre le phosphore total du sol global et le phosphore assimilable du sol rhizosphérique (Fig. IV.9b), expliquerait l'apport d'engrais phosphaté soluble qui enrichit la solution du sol en phosphore (Kimba, 2010), avec la libération des ions phosphates à partir de la fraction minérale du sol (Hinsinger, 2001b ; Razi, 2006).

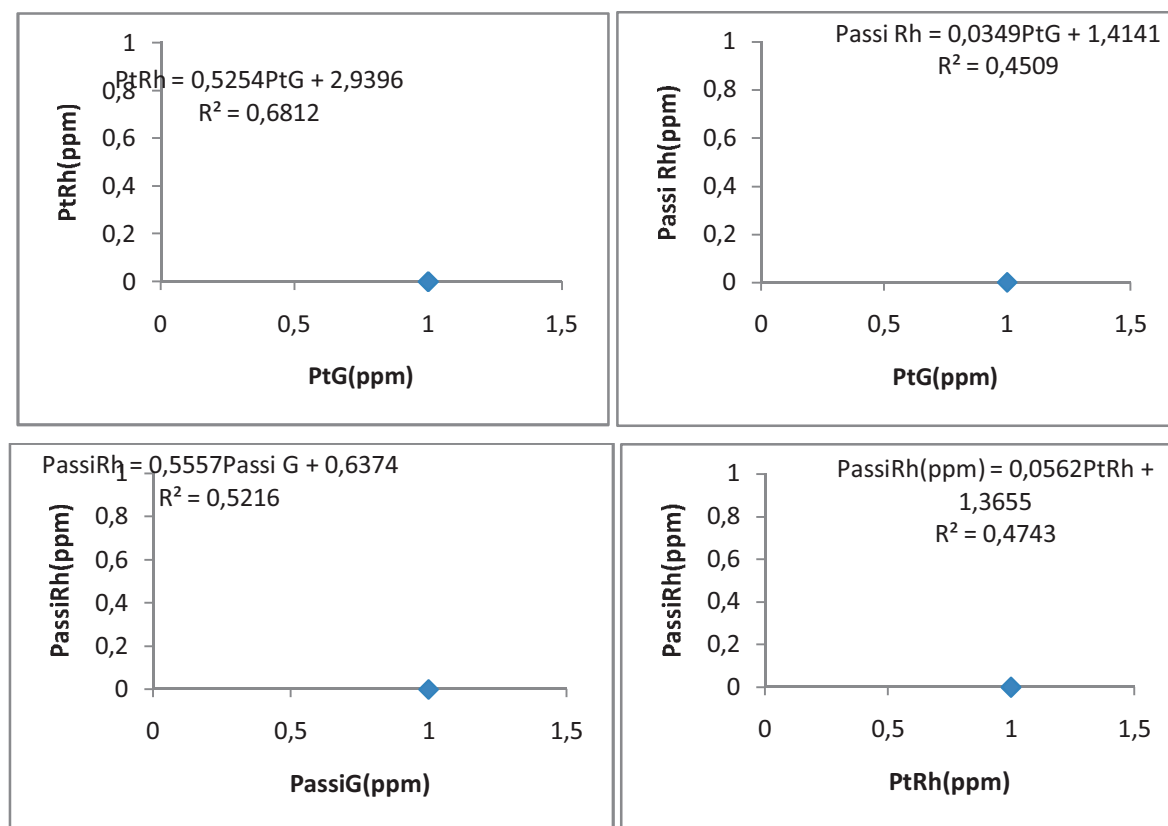


Figure IV.9. Relation entre : a) Pt G et Pt Rh ; b) Pt G et Pass Rh ; c) Pass G et Pass Rh et d) Pt Rh et Pass Rh.

En plus de l'action enzymatique de la racine et la microflore associée, cette dernière compte une large gamme de composés excrétés et capables d'hydrolyser les molécules organiques riches en phosphore (Barea et *al.*, 1997 ; Vessey, 2003 in Matsumoto et *al.*, 2005 et Mobonigada-Muhinda et *al.*, 2009). L'augmentation significative et positive de la forme assimilable dans le sol rhizosphérique et le sol global respectivement (Fig. IV.9c), indique la solubilité des engrais apportés qui ont permis le renouvellement en phosphore de la solution du sol (Illemer et *al.*, 1995 ; Whitelaw et *al.*, 1999 ; Lacharme, 2001 ; Vanhaecke, 2006). La racine sécrète des exsudats très variés dans son environnement entraînant la modification de sa rhizosphère (Fig. IV.9d), cette modification conduit à l'augmentation de la biodisponibilité du phosphore par l'accroissement de la désorption des ions phosphates de la phase solide vers la phase liquide près des racines (Hinsinger, 2001b).

Les organismes vivants du sol sont capables de libérer du phosphore. La solubilisation de P minéral s'effectue par la sécrétion de ligands ou acides organiques qui vont se complexer avec le calcium, le fer ou l'aluminium, libérant ainsi du phosphore minéral dans la solution du sol (Hinsinger, 1998 ; Jones, 1998). Le phosphore libéré dans la solution du sol par minéralisation ou solubilisation peut être absorbé par les plantes et les champignons, immobilisé par la population bactérienne, adsorbé sur les surfaces minérales ou perdu par lessivage et ruissellement (Louche, 2008).

VI. 2. 4. Intérêt agronomique de la localisation des engrais pour les oliveraies

Il est connu que les réserves en phosphore biodisponible des sols peuvent fréquemment être un facteur limitant des rendements (Ae et *al.*, 1990 et Compaoré et *al.*, 2001). Il est estimé que la plupart des sols cultivés ont une biodisponibilité phosphatée très faible pour optimiser le développement des cultures (Von Uexküll et Mutert, 1995 et Gaume, 2000). Ce travail vise à équilibrer les besoins de cette oliveraie en éléments nutritifs avec la réserve du sol et les engrais ajoutés afin d'avoir une récolte satisfaisante en rendement et qualité. Il s'avère urgent de définir des stratégies pour l'utilisation rationnelle et efficace des écosystèmes impliquant la mise en œuvre de pratiques agricoles durables et la réhabilitation des oliveraies dégradées pour non seulement atteindre les bénéfices attendus en termes de sécurité alimentaire, mais aussi restaurer les services écosystémiques (Martín-Vertedor et *al.*, 2011). Ceci inclut une meilleure connaissance des processus et des facteurs qui régissent la biodisponibilité des nutriments du sol et les fonctions de la rhizosphère. Sachant que les racines sont confrontées à une importante hétérogénéité spatiale et temporelle des nutriments.

Chapitre IV. Variation du phosphore biodisponible à l'interface sol-racine de *Olea europea* L. après application d'engrais phosphatés

En plus des contraintes liées à la mobilité des ions nutritifs particulièrement le phosphore (Francia Martínez et *al.*, 2006 ; Martín-Vertedor et *al.*, 2011).

Dans le sol non amendé, les racines de l'olivier interagissent avec les différentes contraintes abiotiques pour subvenir à leur besoins en nutriments, ce qui implique une stratégie d'adaptation et d'exploration continues ou les minéraux peu mobiles comme le phosphore ne sont pas prélevés, sans négliger les associations symbiotiques. Cette stratégie entraîne une plus grande quantité de carbone afin d'augmenter la rhizodéposition des racines qui permet d'améliorer la biodisponibilité des éléments nutritifs. Cette exploration racinaire d'un volume de sol, souvent horizontale, favorisera la productivité du végétal, mais induira une baisse de rendement de l'écosystème à long terme (Van Noordwijk et *al.*, 1998), ce phénomène est similaire au cas de l'agrosystème oliveraie (Martín-Vertedor et *al.*, 2011).

Afin d'améliorer les rendements oléicoles, la fertilisation des sols, particulièrement phosphatée selon le mode d'apport localisé présente beaucoup d'avantages. Les contraintes pédologiques sont réduites, ce qui entraîne une meilleure disponibilité des nutriments dans l'environnement racinaire. Un meilleur développement de la biomasse racinaire dans les zones amendées qui entraînera une meilleure nutrition de l'arbre. Des éléments comme le phosphore qui sont facilement immobilisés dans le sol pendant longtemps, voire définitivement. Nous avons observé un gradient d'épuisement en phosphore du sol distal vers le sol rhizosphérique excepté pour les oliviers témoins pour lesquels il y a eu apport d'azote et du potassium. L'activité rhizosphérique stimulée par la localisation des engrais ont maximisé l'absorption du phosphore par l'olivier.

Cette fertilisation des oliviers a révélé une nette amélioration du statut nutritionnel particulièrement le phosphaté. Ce qui nous amène à dire que les arbres fertilisés ont une forte demande en nutriments, alors qu'à la base les faibles teneurs en éléments nutritifs ont conduit les oliviers à limiter l'absorption. Ainsi l'arbre adopte une stratégie différente qui lui permet d'explorer les îlots de fertilité dans tout le sol. Par contre quand le potentiel alimentaire du sol est amélioré en NPK, le chevelu racinaire se développe mieux. Ce mode d'apport qui demande peu de moyens, est à la portée des oléiculteurs de la région.

VII. Conclusion

La fertilisation en mode d'apport localisé a montré une amélioration du potentiel alimentaire de la rhizosphère de l'olivier. Les modifications du pH des sols rhizosphériques sont liées à l'engrais azoté apporté, avec un enrichissement en carbone organique. Les doses croissantes d'engrais phosphatés ont causé une diminution du carbone organique avec l'augmentation des doses, par contre la rhizosphère s'est enrichie par rapport au sol distal. En effet, l'accroissement substantiel des formes azotées serait lié à la synergie entre l'azote et le phosphore en faveur de l'activité biologique.

Des gradients inverses d'éloignement de la racine apparaissent sous l'effet de l'application d'engrais phosphatés. Un gradient d'enrichissement, dans les sols d'olivier déficients en phosphore, montre une légère augmentation des formes d'azote dans la rhizosphère pour la D₁ et D₂. Un autre gradient d'appauvrissement, qui montre un épuisement en phosphore dans le sol rhizosphérique comparativement au sol global. Cette influence opposée de la racine sur les pools azoté et phosphaté semblerait liée au statut initial phosphaté du sol, ce qui pourrait déterminer différentes stratégies de prélèvement du système racinaire chez cette espèce.

Dans le cas de sols appauvris en phosphore, la plante prospecterait un volume de sol plus grand pour prélever les nutriments alors que dans des sols enrichis en phosphore, la racine appauvrit la zone amendée mise à sa disposition. L'essentiel est de quantifier l'intensité des prélèvements phosphatés à l'interface racinaire de l'olivier, ces derniers sont déterminés aussi par le statut physiologique des arbres (en *On* ou *Off*) et le statut initial de la matrice du sol. Ce travail gagnerait à être approfondi par une détermination du bilan hydrique afin de mieux comprendre la disponibilité des éléments dans la rhizosphère de l'olivier particulièrement son impact sur la solubilité des engrais phosphatés. Il est souhaitable aussi d'approfondir cette étude par une meilleure caractérisation de l'architecture racinaire chez l'olivier avec ou sans fertilisants. Il serait intéressant d'évaluer l'impact de cette fertilisation sur les rendements oléicoles en plus du diagnostic foliaire et conclure sur la dose adéquate afin d'éviter toute consommation de luxe. L'alternance des oliviers peut cacher les effets bénéfiques de cette fertilisation. Le suivi de ce verger permettrait une estimation de l'effet bénéfique de la mise en place de zones enrichies en engrais sur la production des olives et de l'huile.

Identification des symbioses dans la rhizosphère de *Olea europea* L.

1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons observé une augmentation du phosphore assimilable dans les sols fertilisés avec des engrais phosphatés localisés. Cette variation du phosphore biodisponible dosé par la méthode Olsen augmente particulièrement avec la quantité d'engrais phosphaté apportée, à l'interface sol/racine et dans les sols globaux. De plus, dans le chapitre (III) nous avons constaté une augmentation du phosphore foliaire dans les sols déficients en phosphore. L'olivier est une espèce souvent cultivée sur des sols à fortes contraintes, avec une fertilité limitée en Kabylie, au nord de l'Algérie. L'utilisation des nutriments par le végétal dépend beaucoup des conditions physiques, chimiques et biologiques du sol à proximité immédiate des racines (Darrah et *al.*, 2006). Il a été démontré qu'une gestion appropriée des mycorhizes en agriculture permet une réduction substantielle de l'apport d'intrants chimiques tout en maintenant les rendements à leur meilleur. Comme le champignon améliore la nutrition de la plante par une utilisation accrue des minéraux du sol, une diminution de 15 à 25 % et plus d'apport de fertilisants au sol peut être envisagée (Dubreuil, 2004). L'ancrage de cette culture depuis des siècles dans la plupart des pays avec des variantes climatiques et pédologiques est attribué aux caractéristiques: durabilité, rusticité, longévité et flexibilité, avec un pouvoir d'enracinement exceptionnel (Loussert et Brousse, 1978 ; Fernández-Escobar et *al.*, 2013). Comme la majorité des végétaux terrestres, l'olivier vit en collaboration avec de nombreux microorganismes du sol, parmi lesquels, les champignons mycorrhizogènes (Khelfane Goucem, 2001).

Les associations mycorhiziennes, entre les racines des plantes et les champignons, sont très fréquemment rencontrées dans presque tous les écosystèmes naturels. Ces symbioses racine-champignon jouent un rôle essentiel dans l'absorption des nutriments (Smith et *al.*, 2003 ; Redon, 2009). Elles peuvent aussi modifier l'architecture du système racinaire (Gregory, 2006). Il est généralement admis que l'efficacité du système racinaire à explorer le sol pour l'absorption de l'eau et les éléments minéraux est améliorée quand les plantes sont mycorhizées (Schröder et Hartmann, 2003). Ainsi, leur rhizosphère augmente de plusieurs centimètres de la racine grâce aux développements du mycélium (Gregory, 2006).

La mycorhization de l'olivier lui offre de meilleures conditions de croissance et de santé végétale par l'amélioration de la nutrition minérale et une tolérance aux conditions de stress

tels que la sécheresse, la salinité et la pression des pathogènes (Khelfane Goucem, 2001 ; de Rougemont, 2007). Toutefois, les racines de l'olivier peuvent être également colonisées par des champignons endophytes. Ceux-ci incluent les endophytes foncés septés (DSE) qui sont ubiquistes et dont le rôle est mal connu dans la croissance des plantes et le maintien des communautés végétales (Peterson et *al.*, 2008 ; Boudiaf Nait Kaci et *al.*, 2012). Ce sont des ascomycètes présents de plus en plus dans toutes les plantes et sont extrêmement abondants. Ils ont des hyphes pigmentés à la mélanine qui les protège des conditions extrêmes de l'environnement. Le degré de pigmentation dépend de la provenance, de l'âge et des conditions de croissance du champignon. Ils forment des microsclérotés à l'intérieur des cellules végétales et parfois un réseau de Hartig très fin. Ils forment des infections internes localisées dans le feuillage, la tige et les racines et se développent entre et dans les cellules de l'épiderme, du cortex et parfois même dans les tissus vasculaires (Horton et *al.*, 1998 ; Faeth, 2002 ; Addy et *al.*, 2005).

Dans le milieu édaphique, les racines sont aussi colonisées par un grand nombre de champignons, sans former de structures anatomiques typiques des mycorhizes ou entraîner des signes évidents de pathogènes. Ceux-ci incluent ces endophytes foncés et septés. La base de leur relation avec les plantes demeure ambiguë. Ils peuvent se présenter comme pathogènes bénins, comme saprophytes sur tissus racinaires, ou comme champignons mutualistes. Certaines études ont montré un effet positif de ces champignons endophytes foncés septés sur l'amélioration de la nutrition minérale et de la résistance des plantes dans certains milieux qui subissent des stress biotiques et abiotiques (Jumpponen and Trappe, 1998).

L'oléiculture peut dès aujourd'hui disposer d'un nouveau moyen de culture raisonnée, intégrée et biologique, permettant de manière durable à chaque olivier de développer son meilleur potentiel. Pour mieux cerner l'effet rhizosphérique sur la biodisponibilité du phosphore pour la culture de l'olivier, dans ce chapitre nous avons choisi six oliveraies parmi celles étudiées dans la première étude. L'objectif de ce travail est de i) réaliser des coupes anatomiques et des écrasements sur des racines de diamètre croissant [0.5-1], [1-2], [2-3] mm, afin de voir si il existe des symbioses mycorhiziennes ii) comparer entre les différents vergers situés sur substrat géologique et climat différents iii) voir la lignification dans chaque classe de diamètre racinaire et mettre en évidence les champignons mycorhizogènes et les endophytes foncés septés avec le calcul de leur fréquence de colonisation et comprendre leur effet sur le maintien des oliviers dans la région de Kabylie où les conditions pédoclimatiques sont contraignantes.

2. Matériels et méthodes

2.1. Echantillonnage des racines

Les sites d'échantillonnage ont été choisis en fonction de la roche mère et du climat, six vergers sont sélectionnés parmi ceux étudiés précédemment. Cinq oliveraies sous climat subhumide dans la wilaya de Tizi Ouzou : Guendoul, Nezla, Boukhalfa, Tizi Rached Y et Tizi Rached A et une oliveraie sous climat semi aride dans la wilaya de Bouira : Sidi Ziane. Nous avons échantillonné en diagonale sous quinze (15) oliviers par verger et prélevé des racines à plusieurs profondeurs (0-10, 10-35) cm selon la méthode Uterano et *al.*, (2002) pendant le repos végétatif, en décembre 2008. Certaines caractéristiques de ces stations sont présentées dans le tableau (V. 1).

2.2. Tri et conservation des racines

Au laboratoire, les racines prélevées sont conservées dans des boîtes contenant de l'alcool à 70° (Fig. V.1). Un tri de racines en fonction de leur diamètre a été effectué dans le but d'isoler les racines les plus fines qui selon les normes ISO 1992 proposées par Baize et Jabiol, (1995) sont responsables de l'absorption de l'eau et des éléments nutritifs.

Tableau V.1. Caractéristiques des oliveraies étudiées.

Stations	Coordonnées	Matériau parent:	Pente(%)	Type de sol (WRB)
Boukhalfa	36°44'48. 3"N 4°01'09. 11"E	Marnes	5%	Vertisol
Tizi Rached A	36°41' 15. 71"N 4°12'39.27"E	Grès	15%	Cambisol
Bouira S Z	36°41' 15. 71"N 3°12'39.27"E	Grès	15%	Cambisol
Guendoul	36°44'20.63"N 4°13'05.91"E	Calcaires	10%	Calcisol
Tizi Rached Y	36°41' 20.87"N 4°07'43.43"E	Marnes	15%	Cambisol
Nezla	36°47'04.42"N 4°13'40.00"E	alluvions anciennes	5%	Cambisol



Figure V. 1. Conservation des racines dans l'éthanol à 70°.

2.3. Coupes anatomiques

Des racines ayant le diamètre compris entre [0.5-1[; [1-2[et [2-3[sont colorées à la fois par le carmin acétique et par le vert d'iode (Langeron, 1949), ces colorants permettent d'identifier les tissus riches en cellulose et ceux riches en lignine. Ensuite, des morceaux de racines ont été imprégnés dans la paraffine, puis des coupes transversales de 7 μ m d'épaisseur ont été réalisées à l'aide d'un microtome mécanique.

2.4. Technique de coloration de Philips et Hayman

Seules les racines de diamètre inférieur à 0,5mm, les plus fines, classées selon les mêmes normes (Baize et Jabiol, 1992), sont colorées selon la technique de Philips et Hayman. Les racines sont découpées en petits fragments d'environ 1cm, ensuite lavées à l'eau du robinet pour retirer les traces du fixateur. Elles sont ensuite placées dans une solution de KOH à 10% qui a pour rôle de vider les cellules de leur contenu, ensuite chauffées dans une étuve à 90° C pendant une heure.

Les racines sont alors rincées soigneusement à l'eau du robinet puis sont placées 20 minutes dans une solution d'eau oxygénée à 10% dans l'étuve à 90°C pour éliminer les pigments restants. Les racines devenues blanchâtres, sont rincées plusieurs fois à l'eau du

robinet puis neutralisées dans l'acide lactique à 10% pendant 3 à 4 minutes. Elles sont alors colorées dans une solution de bleu trypan à 0,8 % dans du lactophénol pendant une heure.

2.5. Ecrasement et observation des racines

Quinze fragments de racines de chaque arbre sont montés et écrasés entre lame et lamelle dans du glycérol et sont observés au microscope photonique pour l'estimation du pourcentage de colonisation endomycorhizienne.

2.6. Estimation des pourcentages de colonisation par les champignons MA et FS

L'estimation du pourcentage de colonisation des racines est calculée selon la méthode utilisée par Nicolson (1955) in Chafi (1992). Trois passages équidistants ont été réalisés sur chaque segment de racine (Fig.V.2), lorsque ce dernier traverse le champ optique du microscope et qu'il renferme une infection, on lui donne la valeur (1). Le nombre de point colonisés compté sur le nombre total de points observés donne le rapport qui peut être ensuite converti en pourcentage calculé selon la formule suivante :

$$\% \text{ de colonisation} = \frac{\text{Nombres de points colonisés}}{\text{Nombre total de points observés}} \times 100$$

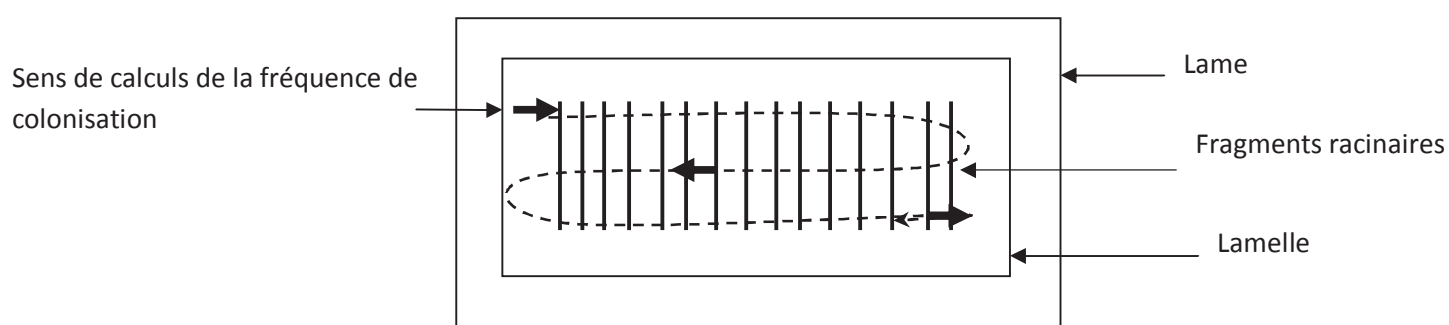


Figure V. 2. Schématisation de la méthode d'observation et de calcul de la fréquence de colonisation par les champignons mycorhizogènes et les champignons fongés septés.

2.7. Caractéristiques physique et chimiques des sols

Les caractéristiques physiques et chimiques des sols sont déterminées par les méthodes standards d'analyses en pédologie (Jackson, 1967). Le phosphore assimilable (Olsen) est extrait avec une solution de NaHCO_4 0,5M à pH 8,5. Le dosage du phosphore se fait par colorimétrie à 660 nm.

2.8. Analyse statistique

Les résultats obtenus ont subi une analyse statistique à l'aide du logiciel statistique R, après une comparaison entre les caractéristiques chimiques et phosphatées du sol global et du sol rhizosphérique, nous avons déterminé les relations entre les caractéristiques chimiques et phosphatées à l'interface sols racines et le taux d'infection mycorhizogène.

3. Résultats et discussion

3.1. Propriétés physiques et chimiques des sols des oliveraies étudiées

Les différentes propriétés des sols des oliveraies étudiées sont illustrées dans le tableau (V.2). Les stations ont des taux d'argiles différents, le taux le plus faible est enregistré dans la station de Nezla avec 8,55%, par contre la station de Boukhalfa possède le taux le plus élevé avec 44%.

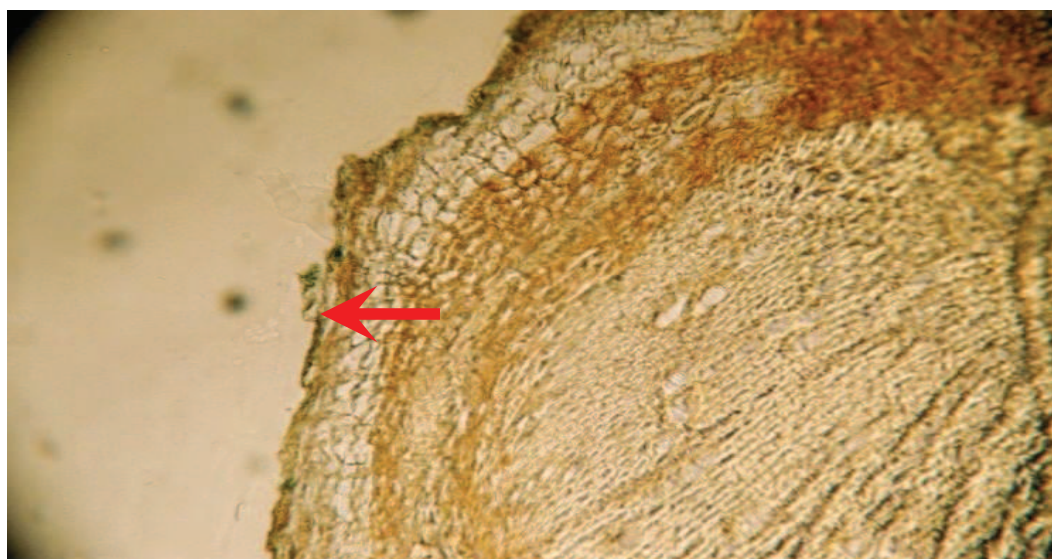
Tableau V.2. Propriétés physiques et chimiques des sols étudiés.

Station	pH	CaCO_3 %	Corg g/kg	P_{Ols} ppm	N_t %	A %
Boukhalfa	7.3	6.25	15.6	13	0.16	44
Tizi-R A	7.4	6.62	26.2	5.2	0.2	22
Tizi-R Y	7.6	17.50	19.6	9.1	0.13	23.43
BouiraSZ	7.4	16.25	13.3	11.7	0.16	23.50
Guendoul	7.6	14.17	16.3	7.7	0.07	14.48
Nezla	7.0	3.83	9.6	12.6	0.12	8.55

Les pH varie de 7 à 7,6, d'après les normes d'interprétation, ce sont des pH neutres pour les stations Boukhalfa et Nezla et légèrement alcalin pour les autre stations. Le taux de calcaire varie de 3,83 à 17,5%, ce sont des sols faiblement calcaires pour les stations de Boukhalfa, Tizi-Rached A et Nezla et modérément calcaires pour Tizi-Rached Y, Guendoul et Bouira SZ, ceci peut être expliqué par la nature de la roche mère. Ces sols sont pauvres à moyennement pauvres en matière organique, avec des taux allant de 9.6 g/kg pour la station de Nezla à 26.2 g/kg pour Tizi-Rached A. Les teneurs en phosphore assimilable extrait avec la méthode Olsen varient de basses pour les sols de Tizi-Rached A, Tizi-Rached Y et Guendoul à moyennes pour les sols Bouira, Nezla et Boukhalfa (Tab.V. 2).

3.2. Observation des coupes anatomiques des racines de l'olivier

Dans l'ensemble des coupes anatomiques des racines de diamètre [0.5-1[mm, nous observons un manteau fongique mince et discontinu (MF) qui s'étend à plusieurs assises du parenchyme cortical (Fig.V.3). Les mêmes observations sont enregistrées dans l'ensemble des coupes anatomiques des racines de diamètre de [1-2[mm, avec un début de formation d'une structure secondaire, les hyphes pénètrent entre les cellules.



→ MF : Manteau fongique

Figure V.3. Coupe transversale d'une racine mycorhizée [0.5-1[mm oliveraie de Bouira (Gx742).

3.3. Observations des racines colorées avec la technique de Philips et Hayman

L'observation des fragments racinaires prélevés dans les oliviers des vergers étudiés, a révélé la présence, sur une grande partie des fragments, de la plupart des structures caractéristiques des mycorhizes à arbuscules à savoir les hyphes mycéliens aussi bien extra, inter, qu'intracellulaires, des arbuscules ainsi que des vésicules.

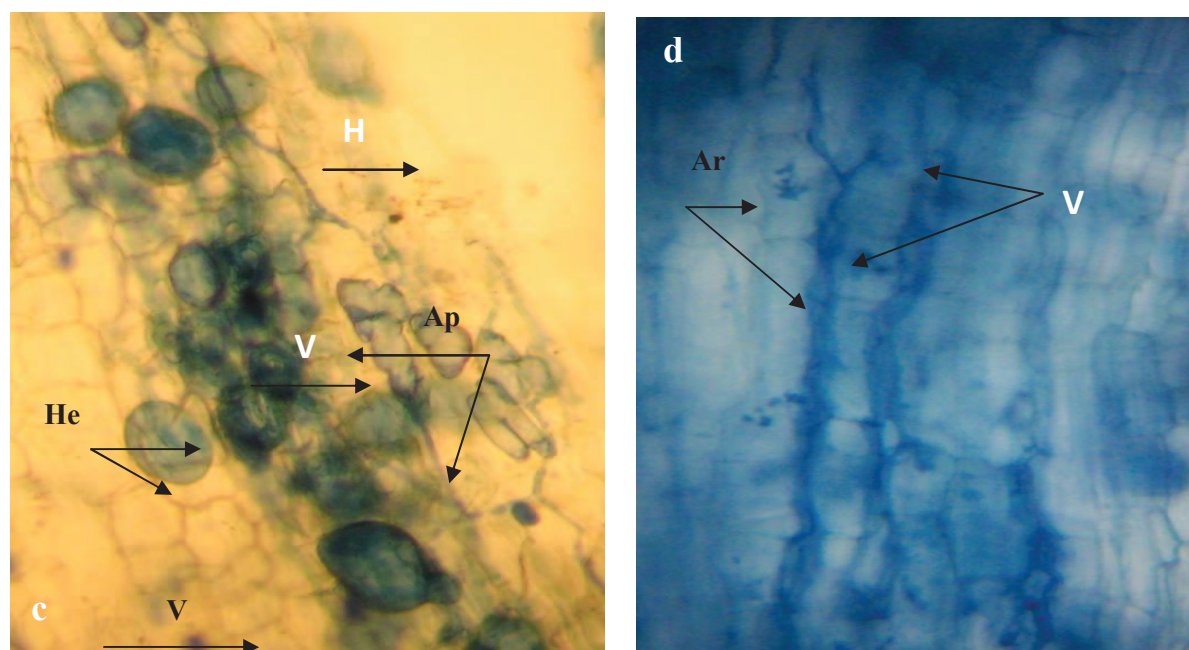


Figure V.4 . Différentes structures caractéristiques des mycorhizes à arbuscules dans les racines de l'olivier : **a)** Vésicules portées par des hyphes mycéliens sur un fragment racinaire (G x 40), **b)** Vésicules de formes variables et hyphes mycéliens d'un fragment de racine (G x 400), **c)** Formation d'appressoria sur la surface d'une racine et enroulement intracellulaire d'hyphes mycéliens (G x 68,25), **d)** Arbuscules collapsés à l'intérieur de cellules corticales (G x 400). **Ap** : Appressoria, **H** : Hyphe mycélien, **He** : Hyphe enroulé à l'intérieur de la cellule, **V** : Vésicule.

Dans certains fragments racinaires, les arbuscules observés sont bien ramifiés (Fig.V.4a). Cependant, les hyphes mycéliens sont inter et intracellulaires et parfois portent des vésicules de formes variables selon l'espace occupé sur les autres fragments. Ils sont en nombre plus ou moins importants (Fig.V.4b et c). Parfois, ces filaments s'enroulent à l'intérieur des cellules pour occuper tout l'espace cellulaire (Fig.V.4d).

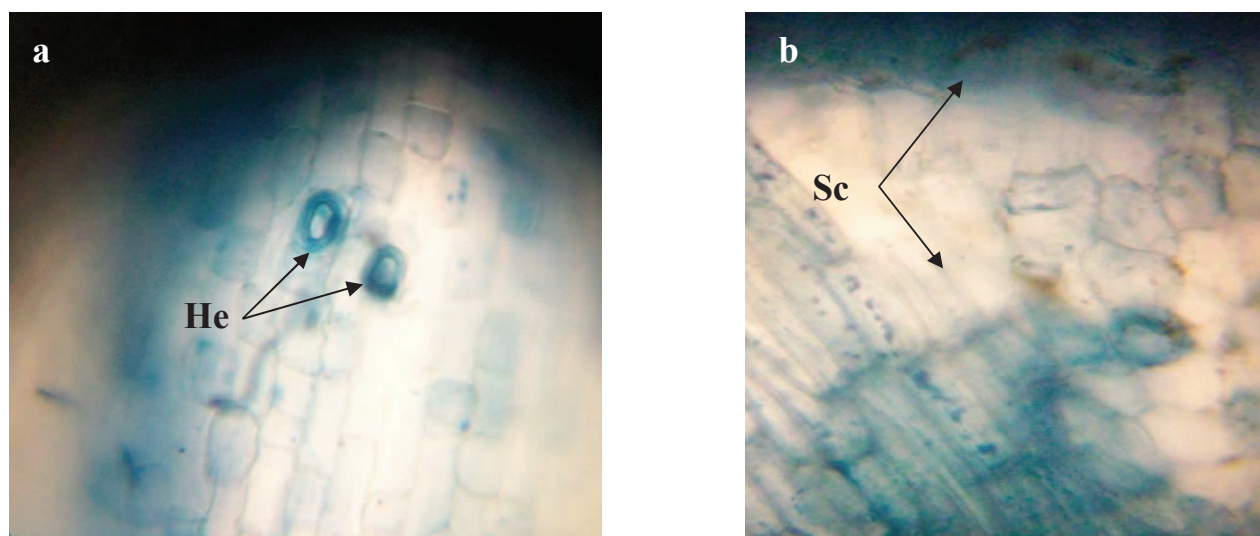


Figure V.5. Différentes structures des champignons mycorrhizogènes et fongés et septés observés dans les racines de l'oliveraie de Guendoul : **a)** enroulement intracellulaire d'hyphes du champignons mycorrhizogène G x400, **b)** formation de sclérotés associées aux filaments du champignon mycorrhizogène Gx400 et **c)** champignon fongé et septé d'un fragment racinaire Gx100.

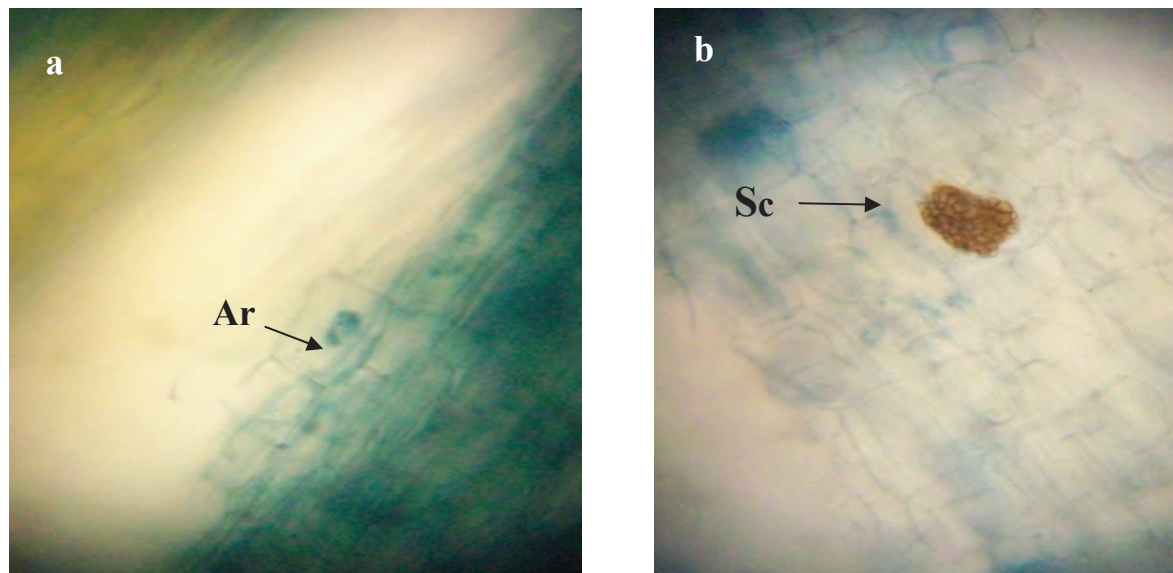


Figure V.6. Différentes structures de champignons dans la station de Nezla : **a)** formation d'un arbuscule à l'intérieur d'une cellule racinaire Gx 400, **b)** les sclérotés du champignon fongé et septé d'un fragment racinaire Gx 400 et **c)** association des filaments mycorrhiziens avec le champignon fongé septé.

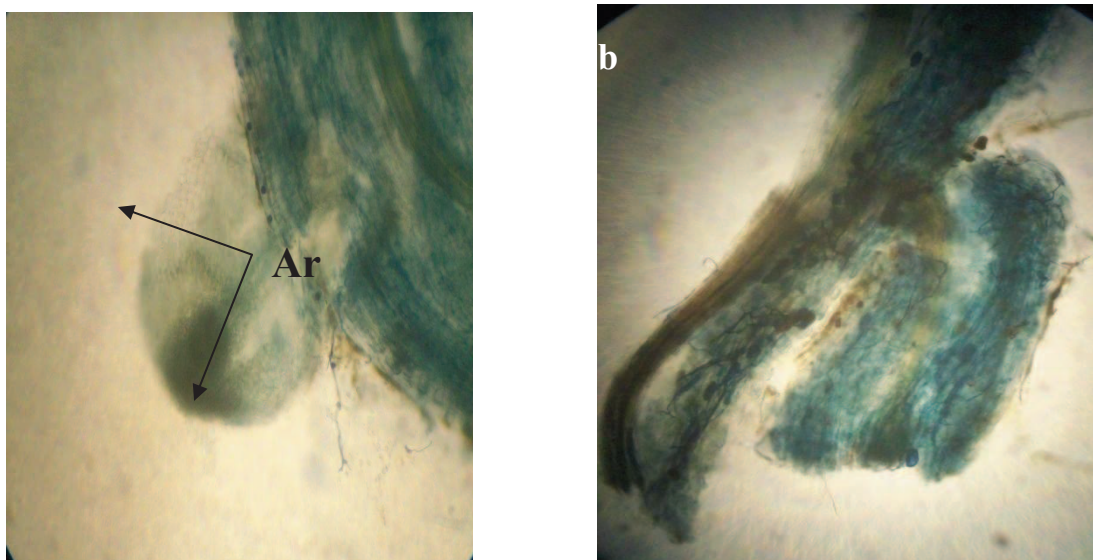


Figure V. 7. Colonisation du système racinaire des oliviers de Tizi Rached Y par les différentes structures des champignons mycorhizogènes à arbuscule et des endophytes foncés et septés : **a)** arbuscules intracellulaires d'une jeune racine Gx 400, **b)** formation d'une ramification racinaire Gx 100 et **c)** évolution du champignon foncé septé au sein d'une racine Gx 100.

Les vésicules que nous avons observé en nombre important étaient inter et intracellulaires portées par les hyphes mycéliens, et sous différentes formes : arrondies, ovales, ou allongées, en fonction de l'espace qui leur est offert (Fig.V.4b et 8d). Néanmoins, les arbuscules étaient dans certains fragments collapsés car ils sont en phase de sénescence (Fig.V.4d). Toutefois, sur la surface des racines, nous observons aussi des structures d'adhésions formées par les hyphes fongiques appelés appressoria qui constitue les points d'entrées du champignon (Fig.V.4c.), ainsi que la mise en évidence des enroulements des hyphes (Fig.V.4c et 8b).

Il est intéressant de signaler également l'observation pour la première fois d'un autre champignon à hyphes mycéliens cloisonnés et très pigmentés parfois très difficile à colorer par la technique utilisée. Ce dernier forme des structures qui lui semblent caractéristiques tels que la fragmentation des hyphes et la formation de sclérotas intracellulaires (Fig.V.5b).

Ce champignon foncé septé (FS), est rencontré dans certains fragments racinaires seul, soit en quantité très importante sur la surface racinaire ou pénétrant la racine en formant des sclérotas intracellulaires (Fig.V.5b).

Le champignon foncé septé (FS) est parfois observé dans des fragments racinaires associé au champignon mycorhizogène à arbuscule (MA) (Fig.V. 6a et 7a). Il est également présent chez les racines simples (Fig.V. 6c) ou ramifiées (Fig.V. 7b). Nous remarquons aussi la présence de structures arrondies fortement colorées au bleu de trypan, mais malheureusement les filaments mycéliens du champignon ne sont observés (Fig.V. 6c).

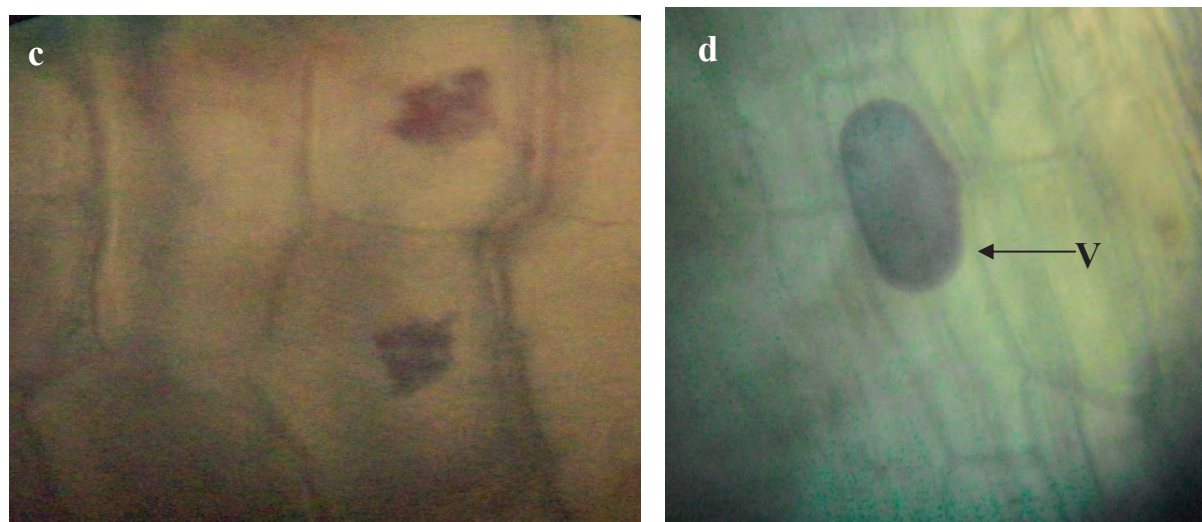


Figure V. 8. Champignons des racines des oliviers de la station de Bouira : **a)** évolution des filaments dans les racines Gx 400, **b)** enroulement des hyphes du champignon mycorrhizogène dans les cellules corticales Gx400, **c)** arbuscules dans les cellules du cortex Gx 1000 et **d)** vésicule intracellulaire Gx 1000.

3.4. Calculs des taux d'infection par les champignons MA et par le champignon FS

L'estimation du pourcentage de colonisation des racines calculée selon la méthode de Nicolson, (1955), nous montre une variabilité des pourcentages entre les différents arbres dans un même verger. Les pourcentages d'infection varient d'un arbre à un autre au sein d'un même verger et d'une oliveraie à une autre. En effet, ces pourcentages fluctuent entre 52 et 100% pour l'ensemble des stations (Fig.V.9). Néanmoins, lors de l'estimation du taux d'infection par le champignon foncé septé, nous avons remarqué que la majorité des fragments racinaires observés contiennent ce même champignon. De plus, ces fluctuations varient de 20% à 89 % dans les différents fragments racinaires prélevés.

L'examen de la figure (V.9), montre que l'infestation par MA est plus importante que celle par FS. En effet, la comparaison des taux de mycorhization par le champignon mycorrhizogène à arbuscules à ceux du champignon foncé et septé dans les stations montre qu'ils varient respectivement de 86 % et 58 % pour la station de Boukhalfa, de 83 % et 49 % pour la station de Tizi Rached A, 84% et 45% pour Tizi Rached Y, 78 % et 54 % pour Guendoul, 76 % et 52

% et 80 % et 57 % pour Bouira. Il a été observé que ce sont les racines de l'oliveraie de Boukhalfa qui sont les plus mycorhizées et les plus infectées par le champignon foncé septé.

Cependant, l'analyse statistique nous révèle que la différence entre les pourcentages d'infection des racines des différentes oliveraies n'est pas significative pour la station et le climat. Cette différence pourrait s'expliquer par les contraintes pédoclimatiques des différentes oliveraies.

4. Importance de la colonisation des racines de l'olivier par les champignons mycorhizogènes

L'observation des fragments racinaires écrasés, prélevés sous les oliviers des vergers de Tizi Rached A, Tizi Rached Y, Boukhalfa, Guendoul, Nezla et Bouira SZ, révèlent la présence des endomycorhizes à arbuscules au niveau de la majorité des racines. Ces résultats sont similaires à ceux de Khelfane Goucem, (2001) ; Calvente et *al.* (2003) ; de Rougemont, (2007), qui ont étudié l'effet du développement des plants de l'olivier en pépinière et en verger et qui ont confirmé la présence d'endomycorhizes chez *Olea europea* L.. Ces études ont démontré que l'olivier est une plante particulièrement dépendante des mycorhizes.

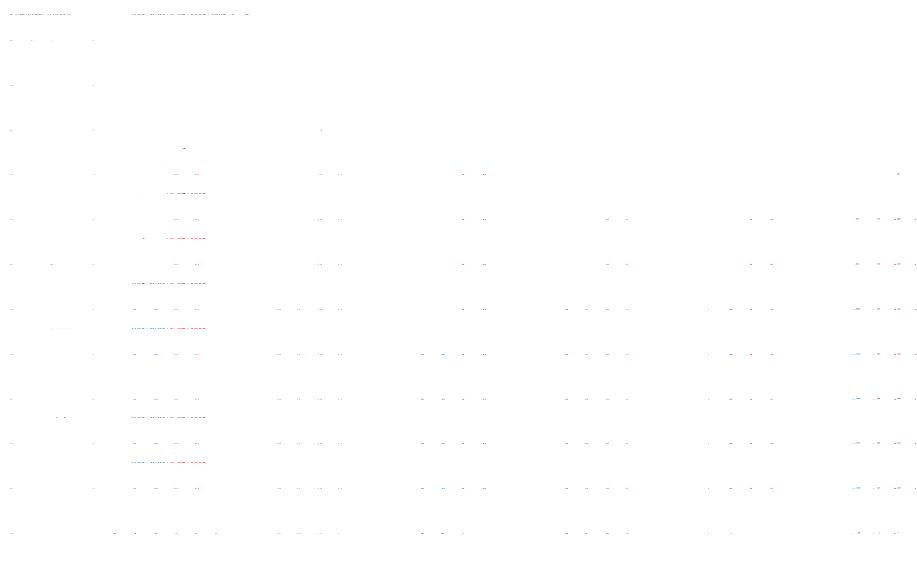


Figure V. 9. Moyennes des taux d'infection par les champignons mycorhizogènes à arbuscules (MA) et par les Endophytes foncés et septés dans les stations étudiées.

Les mêmes observations ont, aussi, révélé une présence abondante de champignons foncés et septés au niveau de la majeure partie des racines écrasées. Ces champignons se distinguent par les filaments foncés pigmentés et septés ainsi que par la formation d'un pseudo tissu à l'intérieur des cellules corticales qui se développe en sclérotés. Ces champignons foncés septés ont été observé chez beaucoup d'espèces végétales par plusieurs auteurs dont Jumpponen, (2001) et Peterson et *al.* (2008) qui les ont nommés endophytes foncés et septés (Dark Sptate Mycelium), et les sclérotés intracellulaires de microsclérotés. Il est à signaler que les endophytes sont moins nombreux comparativement aux endomycorhizes.

Ces résultats sont similaires à ceux de Menoyo et *al.*, (2007), qui ont montré que les endophytes foncés à septations sont les hôtes prédominants des forêts de *Polylepis* de l'Argentine centrale. Il en est de même pour les résultats de Horton et *al.* (1998) ; Wagg et *al.* (2007) et Wu et Guo, (2008) qui confirment l'ubiquité et la présence de ces champignons endophytes dans les milieux stressés. Ceci justifie leur présence dans toutes les oliveraies étudiées.

Pour Wagg et *al.* (2007), les microsclérotés contiennent des dépôts de polysaccharides, des polyphosphates et des protéines qui leur permettent d'agir en tant que propagules. De même, la présence persistante des hyphes mélanisés dans le sol leur permet d'agir comme inocula.

L'étude de Wu et Guo, (2008), sur les interactions entre les champignons endophytes foncés et septés et leur hôte *Saussurea involucrata*, a révélé que les endophytes FS ne pénètrent que les cellules de l'épiderme, contrairement à nos observations, où ils se trouvent aussi bien sur la surface des racines que dans les cellules corticales où les lipides pourraient servir de réserves d'énergie riches en carbone et à maintenir les cellules végétales en périodes de sécheresses prolongées ou pour le développement des hyphes mélanisés et des microsclérotés (Boudiaf-Nait Kaci, 2014). Dans son étude sur les racines de *Bouteloua gracilis* des pâturages des zones arides du sud-ouest des USA, Barrow, (2003), a observé les champignons endophytes FS dans le cylindre central, sans endommager les tissus conducteurs contrairement aux champignons pathogènes.

Les observations nous montrent la présence des champignons endophytes FS sur la surface des jeunes racines, ceci est peut être dû à la colonisation des cellules des méristèmes racinaires par le champignon EFS et qui se distribue par division dans toutes les cellules lors du développement des racines latérales (Barrow, 2003). Les formations de microscélérotés à l'intérieur des cellules corticales sont nombreuses. Toutefois, la couleur des champignons EFS des racines de l'olivieraie de Tizi-Rached A est plus claire que celle des autres stations. Cela est probablement dû à l'âge des champignons qui colonisent des arbres plus âgés et aux conditions pédoclimatiques des oliveraies. De même pour le calcul des taux d'infection mycorhizienne à arbuscules qui montrent que le taux de mycorhization varie d'un verger à l'autre. Cependant, une texture lourde et une structure compacte, exercent de fortes contraintes sur l'enracinement des oliviers, c'est le cas de la station de Boukhalfa qui présente les taux d'infection les plus élevés. La morphologie du système racinaire devient alors un facteur limitant qui conditionne le volume du sol exploité pour la nutrition des arbres (Zemoura, 2005 ; Bonin, 2006). Ce qui s'explique par la corrélation significative et positive entre les taux d'argile et les taux d'infection des mycorhizes pour l'ensemble des stations.

Au cours de ce travail, nous avons traité les résultats avec le logiciel R. En premier lieu, nous avons vérifié la normalité des données avec le test de Kolmogorov-Smirnov - `ks.test()`. Nous avons trouvé que les données sont normalement distribuées pour faire une ANOVA.

Tableau V. 3. Résultats d'analyse de variance de l'effet station sur les symbiotes.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)
Station	5	977.3	195.47	1.35	0.2521
Residuals	84	12174.7	144.94		

Au seuil de signification $\alpha = 5\%$, il n'y a pas un effet de la station vis-à-vis du taux de mycorhization (Tab.V.3). Le boxplot nous montre graphiquement la distribution de la mycorhization dans les différents vergers étudiés (Fig V.10) Cependant, il existe une relation significative ($p\text{-value} = 0.02$) entre les taux de mycorhization et le taux d'argile dont l'équation de la régression est la suivante :

$$\text{Mycorhizes} = 0.2477 A + 75.5659$$

Cette relation entre le taux de mycorhization et les propriétés physico-chimiques tend vers une modélisation avec un coefficient de détermination $r^2 = 0.05$, la variabilité du taux de mycorhization est faiblement expliquée par le taux d'argile. Il serait intéressant de chercher d'autres variables pour expliquer cette variation des endomycorhizes et les endophytes, pour une meilleure compréhension des stress abiotiques subis par ces vergers. La biodisponibilité du phosphore dans les sols est intimement liée à la mycorhization (Gianinazzi, 1986), c'est la fraction argileuse qu'il serait intéressant d'étudier afin de comprendre, dans des conditions similaires, dans quelle mesure les champignons symbiotiques peuvent améliorer l'activité racinaire. Notons qu'une faible concentration en P disponible semble stimuler la formation de la symbiose mycorhizienne et peut donc améliorer le prélèvement de cet élément (Lambers et al., 1998). Toutefois, la formation de poils racinaires fluctue en fonction de la disponibilité en P au sein de la rhizosphère (Gahoonia et Nielsen, 1997; Gahoonia et Nielsen, 2004)

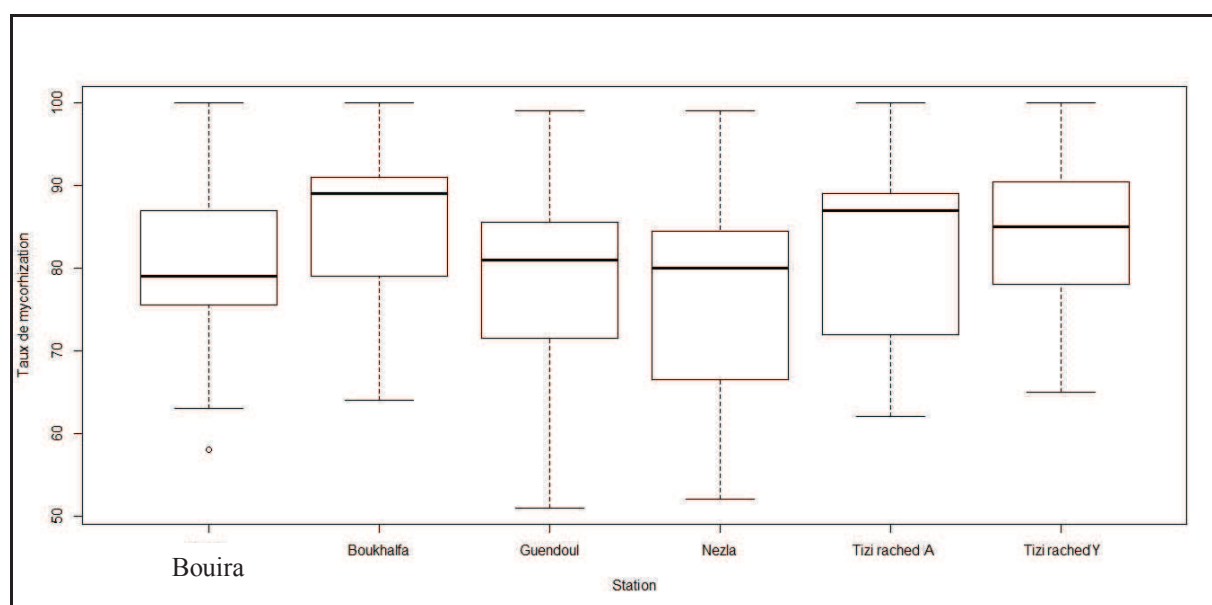


Figure V.10. Variation du taux de mycorhization dans les différents vergers.

Les champignons mycorrhizogènes ont la propriété de produire un réseau mycélien constitué de filaments multicellulaires très minces et très longs. Ce réseau se charge d'explorer un important volume de sol, en produisant une biomasse minimale (Kugler, 1986 ; Gregory, 2006). Selon Rilling, (2004) et Bonin, (2006), les mycorhizes à arbuscules jouent un rôle important dans la qualité du sol en agissant sur la physiologie de la plante hôte, sur les interactions écologiques du sol et de la préservation de la structure du sol par stabilisation des agrégats et par sécrétion de la glomaline qui est une protéine qui permet de lier les particules du sol entre elles.

4. Incidence du mutualisme sur le statut phosphaté de l'olivier

4.1. Les champignons mycorrhizogènes à arbuscules (MA)

Il est important de mettre l'accent sur la biologie, l'écologie et la diversité des champignons mycorrhiziens de l'olivier et leur intégration dans la restauration et la préservation des vergers du nord de l'Algérie. Il est urgent de définir des stratégies pour l'utilisation rationnelle et efficace de ces agrosystèmes impliquant la mise en œuvre de pratiques agricoles durables et la réhabilitation des vergers dégradés pour non seulement atteindre de bons rendements en quantité et qualité, mais aussi restaurer les services éco-systémiques tel que la régulation du cycle de l'eau, la séquestration du carbone et les cycles biogéochimiques. Ceci inclut une meilleure connaissance des processus et des facteurs qui régissent la biodisponibilité des nutriments du sol et les fonctions de la mycorrhizosphère (Saur, 1989 ; Alguacil et al., 2005 ; de Rougemont, 2007). Dans ce contexte, la gestion des mycorhizes et l'effet rhizosphérique sont capables de contribuer à l'amélioration des vergers. Cette microflore joue un rôle considérable dans la croissance des plantes et leur performance.

L'activité de ces champignons est très importante pour le développement végétal, particulièrement quand l'alimentation minérale n'est idéale, leur portée principale est d'améliorer l'absorption des nutriments nécessaires à la croissance des végétaux, en particulier l'azote et le phosphore (O'Halloran et al., 1986 ; Laheurte et Berthelin, 1988 ; Saur, 1989). En effet, pour Whitehead, (1963) ; Carolyn et al., (1988) ; Fardeau et al., (1993), les micro-organismes synthétisent des substances qui agissent à la fois par abaissement du pH et par chélation des cations responsables de la fixation du phosphore. Par ailleurs, il y a certaines espèces microbiennes capables d'assimiler directement les phosphates insolubles (Laheurte et Berthelin, 1988). Ces espèces microbiennes accumulent de grandes quantités de phosphore, une partie sous forme organique. Le phosphore ainsi immobilisé est ensuite libéré

dans le sol suivant deux mécanismes (Dommergues et Mangenot, 1970 ; Richardson et *al.*, 2010) qui sont : l'excrétion d'orthophosphates par les cellules microbiennes et l'autolyse des cellules bactériennes.

Dans les sols calcaires, l'azote et le phosphore pourraient être deux facteurs limitant de la croissance des espèces arboricoles (Plassard, 1996). Ce qui peut expliquer l'intensité des mycorhizes des oliveraies étudiées à l'exception de celle de Nezla. Le calcaire provoque l'immobilisation du phosphore en milieu basique (Fardeau et Conesa, 1994 ; Achat, 2009). La plupart des champignons mycorhizogènes excrètent dans le milieu extérieur de grandes quantités d'acides organiques, en particulier de l'acide oxalique qui est un puissant chélatant qui piège les cations (calcium), libérant ainsi le phosphate (Le Tacon et Selosse, 1997 ; Richardson et *al.*, 2010). Dans une étude sur la présence de calcaire dans le sol et son influence sur le comportement du Pin noir d'Autriche (*Pinus nigra nigricans* Host.), Le Tacon, (1978) a expliqué que la mycorhization en conditions contrôlées, aussi bien en solution nutritive que sur sol stérilisé permet de rétablir le métabolisme de l'azote tout en permettant la régulation de la nutrition cationique. Dans le même contexte, Valdecantos et *al.* (1996) n'avaient obtenus des pourcentages élevés de mycorhizations sur des semis inoculés en pépinière de *Pinus halepensis* qu'après les avoir plantés sur roche mère calcaire. Ceci pourrait expliquer nos résultats. La présence des endomycorhizes à arbuscules et à vésicules chez *Olea europea* a été confirmé par Khelfane (2001) ; Roldán-Fajardo et *al.* (1985) in Calvente et *al.* (2003) et Khabou et *al.* (2009). Dans la plupart des oliveraies nous avons remarqué un jaunissement et une chute importante des feuilles, des fruits déformés et asséchés ainsi qu'une baisse de rendement signalée par les oléiculteurs. Ceci peut justifier la forte présence des associations symbiotiques développées par les oliviers pour se maintenir en vie, à se protéger et améliorer leur état sanitaire dans les milieux contraignants.

Les travaux de Meddich et *al.*, (2000), sur le rôle des champignons mycorhiziens à arbuscules des zones arides dans la résistance du trèfle (*Trifolium alexandrinum* L.) au déficit hydrique, ont montré qu'en présence d'une contrainte hydrique sévère, la mycorhization permet à la plante de maintenir sa teneur en eau et son potentiel hydrique à des valeurs élevées au niveau de la partie aérienne de la plante.

4.2. Les Endophytes fongés et septés (EFS)

Les taux d'infection par les champignons endophytes fongés et septés ont montré que les oliviers du verger de Boukhalfa étaient les plus infectés que ceux des autres stations même si

la différence est non significative statistiquement. Le rôle des champignons EFS reste encore mal connu. En effet, Peterson et *al.* (2008), ont montré que chez certaines espèces arboricoles, l'association avec ces endophytes peut ressembler à des ectomycorhizes ou à des ectendomycorhizes. Les rares études ultrastructurales indiquent que les hyphes intracellulaires ne possèdent pas d'enveloppe périfongique dérivée de l'hôte et de matériel interfacial, deux caractéristiques propres aux interactions cellulaires biotrophiques champignon-plante.

Cependant, Faeth (2001), Barrow (2003), Wu et Guo (2007) et Peterson et *al.* (2008), signalent que, les endophytes fongés et septés s'associent aux plantes dans les milieux contraignants en améliorant leur nutrition hydrique et minérale, en les protégeant contre les herbivores en sécrétant des mycotoxines et des substances régulatrices de croissance en échange de carbone issu de la photosynthèse. Néanmoins, cette association pourrait varier du mutualiste, en neutre ou en parasite selon la résistance de la plante et la concentration des tissus en éléments minéraux (Jumpponen, 2001 ; Rodriguez et *al.*, 2009 ; Rai et *al.*, 2012). En effet, la rhizosphère est une zone très peuplée en organismes vivants du sol, particulièrement les champignons, les protozoaires et les insectes, ces derniers se nourrissent sur un large éventail de substrats. Des recherches ont démontré que les composés libérés par les racines peuvent agir comme des messagers qui initient des interactions entre racines et de nombreux organismes vivants dans le sol (Walker et *al.*, 2003).

5. Approche écologique de la mycorhization au niveau des sols des oliveraies étudiées

Les facteurs climatiques jouent un rôle important dans le développement des mycorhizes, le meilleur développement des mycorhizes est observé au printemps et en automne au moment de la chute des feuilles (Gobat et *al.*, 1998), alors que nous avons échantillonné durant la période hivernale, au repos végétatif. Même si cette période est défavorable pour le développement des mycorhizes, la mycorhization persiste. Selon Lanier, (1976), les températures optimales pour la croissance des associations mycorhiziennes se situent entre 18 et 28°C, la région de Bouira présente des températures moyennes de 18°C favorables à la mycorhization. Toutefois, le verger de Bouira SZ a subi une période de gel durant l'année de prélèvement des racines. De plus, une période sèche qui s'étale du mois de mai jusqu'à la mi-octobre affectant ainsi l'alimentation hydrique et minérale des arbres, ce qui indiquerait l'adaptation des genres fongiques autochtones à la sécheresse.

Les mycorhizes permettent à plusieurs espèces de survivre dans des milieux riches en calcaire (Lapeyrie, 1990). La solubilisation du phosphore ne peut être augmentée que lorsque

le pH diminue (Planchette, 2005). De ce fait, l'excrétion d'acide oxalique par les hyphes fongiques pourrait être le moteur principal de la solubilisation des phosphates calciques, car ce composé présente à la fois des propriétés acides et complexantes, cela se traduit par la libération de l'orthophosphate pour les racines (Lapeyrie, 1991 et Plassard, 2004).

Les hyphes extra-racinaires ont un diamètre de 2 à 5 fois plus petit que celui des racines et peuvent donc coloniser un volume de sol non exploré par la racine, par exemple en sol compacté, les hyphes vont aller chercher du phosphore en dehors de la zone d'épuisement et le transporter jusqu'à l'intérieur de la racine (Li et *al.*, 1997 et Planchette, 2005), ce qui expliquerait l'importance de l'infection des racines du verger de Boukhalifa. Les hyphes des champignons AM en dehors de la racine peuvent accéder aux ions phosphates distants de la racine et les transmettre au mycélium interne puis à l'hôte, contournant ainsi le lent procédé de diffusion dans le sol et permet l'absorption à de faibles concentrations de la solution du sol (Smith et Read, 1997 ; Joner et Jakobsen, 1994). La croissance des hyphes implique une dépense faible de carbone par unité de surface d'absorption que celle des racines, leur petit diamètre leur permet l'accès à des pores inaccessibles pour les racines, ce qui augmente le volume de sol accessible (Li *et al.*, 1991 ; Oihabi et Meddich, 1996). Par conséquent la fourniture du phosphate est 2 à 5 fois supérieure chez les plantes mycorhizées (Tinker et Nye, 2000). Ce qui explique le développement des vergers étudiés malgré les contraintes pédoclimatiques.

De plus, les mycorhizes favorisent l'absorption des nutriments par l'exploration du sol qui diminue la distance de diffusion des ions phosphates et augmentent la surface de leur absorption (Babana, 2003). Toutes ces contraintes édaphoclimatiques justifient la lignification des racines de l'olivier, qui commencent à partir de [0.5-1[mm. La présence de symbioses mycorhiziennes associées à la présence d'une zone à proximité immédiate de la racine de sol plus propice à la biodisponibilité des éléments nutritifs ne semblerait pas suffire pour satisfaire les besoins en phosphore des arbres. La lignification plus précoce des racines actives semblerait conduire à une stratégie différente d'utilisation des sols. En effet, ce serait un système racinaire plus important, avec des racines fines actives plus nombreuses avec un impact moins important sur un volume de sol donné.

Les plantes prélèvent dans le sol l'eau et les éléments minéraux dont elles ont besoin pour leur croissance. Cependant, ces ressources peuvent être parfois limitées comme dans le cas des vergers étudiés, ainsi l'olivier doit adapter sa physiologie et son système racinaire pour

résister aux différents stress, d'où la nécessité de considérer la symbiose mycorhizienne en tant que facteur d'adaptation aux contraintes environnementales (Smith et al., 2003 ; Meddich et al., 2000).

Les coupes anatomiques des racines d'olivier à différents diamètres [0.5-1[, [1-2[, [2-3[mm, ont révélé que les formations secondaires apparaissent dès le diamètre [0.5-1[mm. Il semblerait que l'olivier pallie à cette baisse d'absorption racinaire par une multiplication des racines fines et par le maintien de la mycorhization dans les racines en cours de lignification. La présence de racines fines facilite la colonisation par champignons mycorhiziens (Zangaro et al., 2005 ; Ramos-Zapata et al., 2010) et par conséquent la croissance et la survie des plantes hôtes dans les habitats perturbés particulièrement par le manque d'eau (Zangaro et al., 2003 ; Meyer et Lavergne, 2004 ; Gonzalez-Dugo, 2009).

L'impact de la mycorhization des racines est d'autant plus important, que l'analyse des caractéristiques chimiques des sols étudiés révèle la déficience des sols en éléments nutritifs notamment en phosphore et le risque de précipitation de celui-ci en phosphates calciques causé par des taux élevés en calcaire particulièrement dans les sols des stations de Guendoul, Tizi-Rached et Bouira. La sécrétion de l'acide oxalique dans le milieu par les hyphes fongiques augmente la biodisponibilité du phosphore lié aux carbonates de calcium (Leprince et Plassard, 1996 ; Douds et Milner, 1999). De plus, le phosphore étant un élément peu mobile dans le sol, sa faible diffusion peut être accentuée par la longue période de sécheresse estivale que subissent les régions d'étude. Les travaux de Babana, (2003) dans les régions arides, démontrent que les mycorhizes diminuent la distance de diffusion des ions phosphatés et augmentent le volume de sol exploré. L'enracinement des arbres peut être sensiblement affecté par les structures compactes des sols riches en limons des stations de Guendoul et Nezla. Cependant, le réseau extramatriciel peut augmenter le volume du sol exploré pour la nutrition minérale de l'olivier. En l'occurrence Li et al. (1997) et Planchette (2005), ont démontré qu'en sol compact, les hyphes extraracinaires peuvent coloniser un volume de sol non exploré par la racine et vont aller chercher le phosphore en dehors de la zone d'épuisement et le transporter jusqu'à l'intérieur de la racine. Nos résultats sont similaires à ceux de Manzoor et al. (2009), qui ont révélé une incidence élevée des associations mycorhigènes arbusculaires (AM) de 92% à 96% chez 63 espèces végétales exotiques représentant 26 familles, recueillies auprès de divers types d'habitat au Cachemire (Himalaya) en Inde. Ils soulignent la nécessité d'une enquête détaillée sur le statut mycorhizien en tenant

compte des différences entre les régions biogéographiques et les types d'habitat pour une meilleure compréhension du rôle de ces champignons AM dans la nutrition minérale.

L'acquisition des nutriments dépend fortement des hyphes mycorhiziens qui s'étendent bien au-delà de l'habituelle rhizosphère pour former une grande mycorrhizosphère. Les hyphes AM peuvent se propager à plus de 25cm à partir d'une racine, les hyphes ectomycorhiziens peuvent atteindre plusieurs mètres. Ils peuvent relier les racines pour former un vaste réseau souterrain permettant le transfert de carbone et des nutriments à partir d'un mycélium fongique dans une plante à un autre dans d'autres plantes (Smith et al., 2003 ; Meddich et al., 2000).

Conclusion

Cette première partie descriptive débouche sur un état des lieux concernant les différents systèmes symbiotiques et leur distribution en fonction des vergers choisis. Il est très important sur le plan pratique de connaître la distribution et la fréquence des mycorhizes dans différents vergers et dans différentes conditions écologiques. Cette étude préliminaire nous montre qu'en milieu naturel, la mycorhization est une réalité écologique. Il est important d'encourager le développement de nouvelles stratégies pour une gestion durable des agrosystèmes, tenant compte des effets bénéfiques de la symbiose mycorhizienne, afin de mieux gérer l'interaction plante-sol- champignons mycorhiziens et endophytes, puis leurs rôles en tant que bio-protecteurs et bio-fertilisants. Ces résultats nous permettent de mieux comprendre les résultats du dosage du phosphore foliaire qui sont importants chez les vergers les plus carencés en phosphore biodisponible (chapitre III). Que se passe-t-il dans les vergers par rapport aux autres organismes vivants (bactéries, racines adventices et invertébrés du sol)? Sont-ils pourvus ou dépourvus de faunes abondantes ainsi que la biodiversité faunistiques des sols? C'est à ces questions, d'une importance capitale pour la réussite des vergers, qu'on va essayer de répondre dans le prochain chapitre.

Chapitre VI.

**Biodisponibilité du phosphore dans
la rhizosphère de *Olea europea* L. en
relation avec les macroinvertébrés du
sol**

Biodisponibilité du phosphore dans la rhizosphère de *Olea europea* L. en relation avec les macroinvertébrés du sol

A. Etude 1 : Abondance des macroinvertébrés dans les sol sous olivier

1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons observé que les vergers étudiés vivent en symbiose avec les champignons mycorhizogènes et endophytes. Ces associations entre les racines de l'olivier et les champignons sont observées dans tous les arbres échantillonnés. Elles jouent un rôle essentiel dans l'absorption des nutriments et l'architecture du système racinaire (Gregory, 2006 ; Redon, 2009). Ainsi, la rhizosphère peut augmenter de plusieurs centimètres de la racine grâce à ce mutualisme. C'est une zone très peuplée en organismes vivants du sol, particulièrement les champignons, les protozoaires et les insectes, ces derniers se nourrissent sur un large éventail de substrats. Des recherches ont démontré que les composés libérés par les racines peuvent agir comme des messagers qui initient des interactions entre racines et de nombreux organismes vivants dans le sol (Walker et *al.*, 2003).

Les sols constituent des écosystèmes à part entière à la base de la production végétale et leur qualité agronomique repose à la fois sur des composantes physico-chimiques mais aussi biologiques qui restent mal connues (Maron-Rios et *al.*, 2010). La nécessité d'études sur le terrain de l'influence des pratiques agricoles sur les organismes vivants du sol a été souligné à plusieurs reprises (Filser et *al.*, 2002 ; Bedano et *al.*, 2006).

Le biofonctionnement des sols regroupe un ensemble de fonctions assurées par les organismes vivants, qui sont en interaction avec les composantes physiques et chimiques de celui-ci, permettant la dynamique de la matière organique et de l'eau, ainsi que le recyclage des nutriments (Antunes et *al.*, 2008 ; Decaens, 2010 ; Kumaraswamy and Udayakumar, 2011). Les invertébrés du sol présentent une diversité taxonomique importante. Ils comprennent des organismes de petite taille qui vivent dans les films d'eau autour des particules du sol (Parisi et *al.*, 2005), des organismes de taille intermédiaire qui vivent dans la porosité existante et des organismes de grande taille comme les vers de terre et certaines larves d'insectes qui créent leur propre porosité en se déplaçant dans les sols (Uvarov et Scheu, 2004 et Aubert et *al.*, 2005). En effet, ces êtres vivants sont des indicateurs de la

qualité des sols et doivent être considérés comme une ressource permettant d'améliorer les agroécosystèmes (Rebek et *al.*, 2002 ; Blake et *al.*, 2011).

Cependant, la réduction de la biodiversité en raison de la perte d'habitat et la dégradation des écosystèmes a fait qu'il est essentiel d'établir des priorités d'utilisation des sols pour leur conservation (Wilson et *al.*, 2006). Ces priorités ont été suggérées sur une gamme d'échelles géographiques principalement à travers des points chauds de la diversité ou d'endémismes, identifiés pour la préservation, ainsi la faune du sol peut être utilisée comme un moyen efficace pour caractériser et hiérarchiser les terres (Shanas et *al.*, 2011). Dans les milieux méditerranéens, les conditions climatiques et pédologiques agissent fortement sur la réduction de la dynamique de la succession des communautés (Véla et Benhouhou, 2007 ; Fadda et *al.*, 2008). Les politiques mises en œuvre et adoptées ont conduit à une dégradation des agroécosystèmes pour lesquels actuellement on tente de restaurer les fonctions (Santos et *al.*, 2007).

Dans un contexte de ressources en eau et engrais restreintes et au vu de la cherté des intrants qui sont souvent importés, on se doit de réfléchir à des actions innovatrices pour une meilleure valorisation de l'oléiculture (Centritto et *al.*, 2005). C'est ainsi que le besoin d'analyses écologiques des communautés d'organismes de ces sols s'impose. De ce fait, une meilleure connaissance du fonctionnement biologique des sols des oliveraies étudiées sur les changements des propriétés physiques et chimiques est nécessaire. La convergence climatique et topographique fait du nord de l'Algérie une région idéale pour comprendre l'effet de la topographie, du matériau parental, du couvert végétal, avec l'effet de leur interaction sur l'abondance et la diversité des invertébrés dans les sols.

En dépit de l'importance des invertébrés dans la gestion des sols, la faune des sols sous oliveraies et figueraies est mal documentée dans les régions nord-africaine méditerranéennes. Les invertébrés du sol particulièrement les arthropodes ont rarement été étudiés particulièrement dans la région de Kabylie. Ce chapitre est scindé en deux parties, la première vise à évaluer l'abondance des macroinvertébrés des sols sous oliveraies dans différentes régions de Kabylie afin de comparer la distribution de la faune des sols entre les oliveraies, en relation avec les propriétés physiques et chimiques de sols.

La seconde partie consiste à établir une meilleure connaissance du fonctionnement biologique des sols contigus sous olivier et figuier sur les changements de leurs propriétés

physiques et chimiques en deux stades phénologiques. En ce sens, il faut évaluer l'abondance et la diversité de la faune dans les sols de vergers oléicoles et figuicoles des différentes zones pédoclimatiques du nord d'Algérie et déterminer l'influence de facteurs tels que la saison, la culture et la distance par rapport à la méditerranée. L'objectif principal est d'apporter des éléments de connaissance sur la biodiversité des sols sous olivier et figuier en relation avec l'activité racinaire notamment la biodisponibilité du phosphore.

2. Matériels et méthodes

2.1. Echantillonnage des sols et de la faune

Les sites d'échantillonnage sont les mêmes vergers que ceux du chapitre (V), nous avons prélevé les sols et leur faune pendant le repos végétatif, en hiver 2007 et en été 2008 pendant la fructification. Cinq oliveraies sous climat subhumide dans la wilaya de Tizi Ouzou : Guendoul, Nezla, Boukhalfa, Tizi Rached Y et Tizi Rached A et une oliveraie sous climat semi aride dans la wilaya de Bouira : Sidi Ziane. Sur les six stations choisies, trois vergers oléicoles se trouvent sur des sols contigus avec le figuier. Nous avons échantillonné en diagonale sous dix (10) arbres par verger et prélevé des invertébrés selon la méthode du quadrat (Coineau, 1974) utilisée sur une aire de 100m² (Pesson, 1971) et qui permet de délimiter un volume de sol de 6250 cm³ sur 3 niveaux de profondeur soient N₀ qui représente la surface du sol, N₁ de 0 à 10 cm et N₂ de 10 à 20 cm.

L'extraction des invertébrés, contenus dans les échantillons de sols prélevés, est faite selon la méthode de Berlese-Tullgren, suivi d'un tri et dénombrement puis une identification (Chinery, 1987 ; Paulian, 1990 ; Albony et Caussanel, 1990 et du Chatenet, 2005). Les caractéristiques de ces stations sont présentées dans les tableaux (V.1 et 2).

2.2. Analyse statistique

Après la saisie des données sur Excel, nous les avons codifiées afin qu'elles soient acceptées par le logiciel R. En premier lieu, nous avons vérifié la normalité des données avec les deux tests `shapiro.test()` et `ks.test()` -Kolmogorov-Smirnov et `var.test()` pour l'égalité des variances. Nous avons trouvé que les données ne sont pas normales et pas d'égalité de variance pour faire une ANOVA.

3. Résultats et discussion

3.1. Abondance de la macrofaune du sol dans les vergers d'olivier

Dans un premier temps, nous présentons uniquement les résultats de l'abondance des macroinvertébrés sous les oliveraies de Tizi Rached A, Tizi Rached Y et Boukhalfa. Elle varie de 489 ind./m² pour l'oliveraie de TRA, à 311 ind./m² pour celle de Boukhalfa et 211 ind. /m² pour TRY. En effet, les Coléoptères dominent à TRA et TRY et les Diptères dans le verger de Boukhalfa. Certains groupes sont absents dans toutes les stations, tels que les Lombricidés et d'autres sont très peu représentés, les Opilions et les Chilopodes. Treize ordres ont été identifiés, ce sont les ORT, HET, HYM, ARA, DIP, GAS, LEP, HOM, COL, ISO, DIP, OPI, CHI (Tab.VI.1). Un total de 527 individus a été recensés dans les trois oliveraies. Le nombre d'invertébrés varie d'un verger à un autre avec des abondances de 143 ind. pour les sols de Boukhalfa, 147 ind. pour TRY et 237 ind pour ceux de TRA (Fig.VI.1).

Tableau VI.1. Abondance moyenne des invertébrés dans les trois oliveraies.

Station Ordres	TRA			TRY			Boukh		
	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
ORT	4	0	0	0	0	0	0	0	0
HET	14	17	3	6	3	1	1	4	3
HYM	28	19	2	10	2	3	9	6	3
ARA	9	10	1	3	3	3	0	0	3
DIPT	7	15	10	5	11	2	23	24	20
GAS	5	1	0	12	11	3	0	5	5
LEP	2	9	2	1	1	2	2	1	1
HOM	3	2	0	0	0	5	2	0	0
COL	15	27	17	9	17	8	6	14	8
ISO	0	1	0	0	3	0	0	0	1
DIPL	0	10	3	1	14	5	0	1	1
OPI	0	1	0	0	0	0	0	0	0
CHI	0	0	0	0	2	1	0	0	0

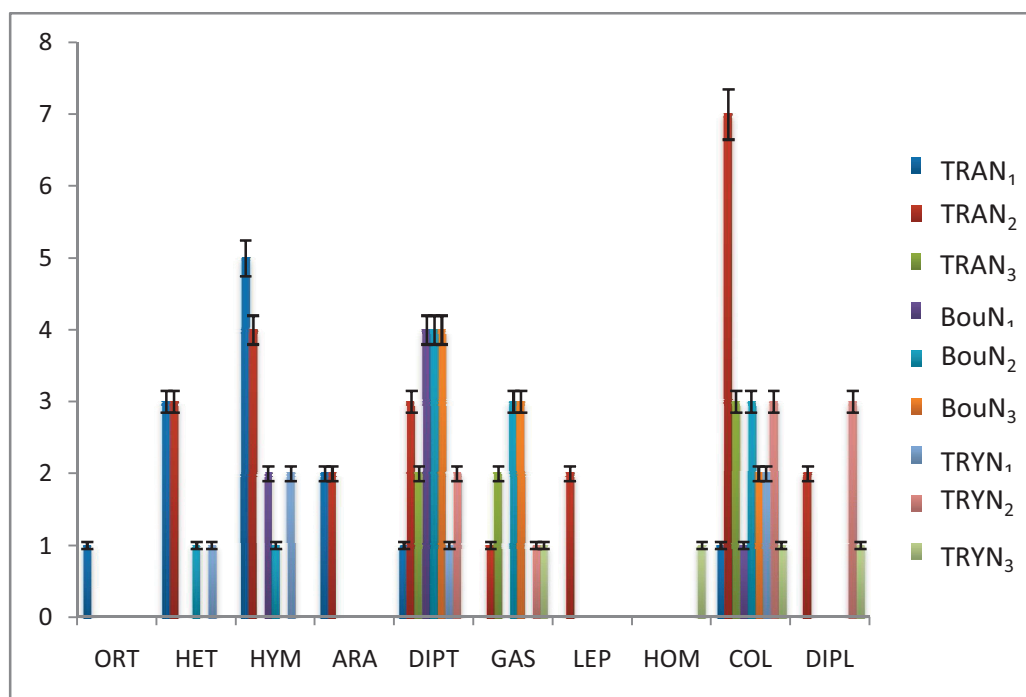


Figure VI.1. Répartition des invertébrés par niveau dans les sols sous olivier.

Les résultats révèlent une forte abondance des HET, HYM, ARA, LEP et COL pour l'olivieraie de TRA puis vient TRY et Boukh (Tab. VI.1). Nous observons un nombre très important des Gastéropodes et Diplopodes dans le verger Tizi Rached Y par rapport aux deux autres. Cependant, la station de Boukhalfa a plus de Diptères. Globalement, si nous déterminons un gradient altitudinal de la richesse faunique des sols de ces stations, nous trouverons Tizi Rached A avec une abondance importante, suivie de Tizi Rached Y, alors que celle de Boukhalfa a la plus faible abondance. Parmi les groupes identifiés, certains présentent les patrons de variations tels que, les Hyménoptères, les Gastéropodes et les Coléoptères. Ce choix a été fait par rapport à la nature de leur corps mou. Cette répartition nous permettra de cerner l'abondance et la diversité des invertébrés dans les trois vergers.

Le niveau N₁ présente une abondance plus importante par rapport au N₂ et le N₀, pour toutes les oliveraies, avec 112 ind. à TRA, 67 ind. à TRY et 55 ind. à Boukhalfa. Les groupes les plus représentatifs sont les Coléoptères, les Diptères, les Hyménoptères, les Hétéroptères et les Gastéropodes.

Cette première étude d'impact des facteurs édaphiques sur les invertébrés montre que le facteur 'niveau' a une influence hautement significative sur leur abondance. Cependant, les deux autres facteurs 'stations et arbres' n'influent pas sur le nombre total des invertébrés du sol. Notre étude nous a permis de recenser treize groupes d'animaux représentés dans la majorité des stations. Les groupes les plus représentatifs sont les Coléoptères, les Diptères, les Hyménoptères et les Gastéropodes. Le niveau N₁ est le plus riche en population d'invertébrés. La répartition de certains de ces groupes fauniques est en relation significative avec les propriétés physico-chimiques du sol.

La présente étude a montré que, la plupart des animaux ont été observés au moins au moment où nous avons échantillonné. Plusieurs raisons peuvent être invoquées pour expliquer ces abondances et ces variations dans les oliveraies choisies. Les animaux peuvent se déplacer d'un lieu à un autre par rapport à la nourriture et à la protection contre les effets indésirables (Saddaka et Ponge, 2003). Quand l'habitat est meilleur, avec une texture équilibrée et un taux de carbone organique plus élevé. Ces propriétés régissent l'abondance de la plupart des invertébrés du sol (Muys et Lust, 1992 ; Renaud et *al.*, 2004). Ce qui conduit à avoir un bon potentiel alimentaire, une meilleure protection contre les phénomènes climatiques nuisibles, comme la sécheresse et le gel, qui sont réguliers dans le nord de l'Algérie. Des études ont montré que la répartition des invertébrés en milieux méditerranéens peut être liée aussi à l'abondance des racines et leurs symbiotes (Staley et *al.*, 2007 et Frouz et *al.*, 2008). Ces auteurs ont montré que le cycle de développement des végétaux ainsi que leur systèmes racinaires peuvent jouer un rôle sur l'abondance et le cycle de vie des arthropodes. Ils ont signalé aussi que certains arthropodes peuvent vivre en diapause estivale. Ces variations peuvent être liées à des facteurs d'ordre climatiques et pédologiques de chaque site (Staley et *al.*, 2007). Des résultats similaires (Morris , 1999 et Santos et *al.*, 2007), montrent que l'abondance et la diversité des animaux sous oliveraies dépendent non seulement de la localisation des vergers, mais aussi du régime de gestion et de la végétation environnante.

Neirynck et *al.* (2000) et Clarissa et *al.* (2011), ont montré que les Hyménoptères et les Coléoptères jouent un rôle très important dans les vergers. Ils sont des prédateurs d'un éventail de proies, notamment les pucerons, les nymphes et les larves de Lépidoptères et de Diptères qui sont des ravageurs. Ceci peut expliquer leur rôle dans les sols, sachant que ces vergers ne subissent aucun traitement phytosanitaire. Leur présence alors contribue à protéger les arbres contre beaucoup de ravageurs. Sachant que la présence de la mouche de l'olive est

signalée dans tous les vergers étudiés et cause de sérieux problèmes pour l'oléiculture en Algérie. Cependant, Pereira et *al.*, (2004), ont signalé que les fourmis sont très abondantes sous oliveraies, ce qui est le cas des vergers étudiés. Elles sont considérées comme étant un prédateur de la Teigne (*Prays oleae*) de l'olivier (Morris et al., 1999 et 2002). Cette maladie est parmi celles observées sur l'ensemble des vergers étudiés particulièrement pendant la saison hivernale. Toutefois Ottonetti et *al.*, (2008), ont révélé que les fourmis sont encore mal connues dans les milieux méditerranéens et agissent comme des prédateurs de certains parasites mais aussi comme symbiotes, pareillement dans le cas des pucerons, dans les agro systèmes oliveraies. La distribution des fourmis et certains autres arthropodes est très hétérogène et variable d'un verger à un autre (Santos et al., 2007). Les labours perturbent ces communautés (Redolfi et *al.*, 1999) or le travail du sol n'a été fait dans aucun verger étudié. Toutefois les vergers conduits biologiquement ont les plus grandes abondances d'animaux avec une meilleure diversité (Ruano et *al.*, 2004). Il est fondamental de mentionner que l'olivier maintient une faune riche pendant toute l'année, contrairement aux autres végétaux (Ottonetti et al., 2008). Dans le bassin méditerranéen, la culture pluviale des espèces pérennes comme l'olivier est associée au processus de dégradation des sols. Quand ces vergers ne sont pas labourés, on observe un bon équilibre biologique dans ces sols (Duran Zuazo et *al.*, 2009).

La perturbation de la faune des sols peut causer des modifications importantes, augmenter la disponibilité des nutriments et améliorer la circulation de l'eau, augmenter la biomasse végétale qui à son tour modifie les propriétés physiques et chimiques des sols (Jones et *al.*, 1997 et Ukabi et *al.*, 2009). En effet, aucune technique culturale n'est pratiquée sur les vergers oléicoles de Kabylie, ce qui justifie notre choix pour la suite de ce travail. Une comparaison avec une autre espèce pérenne qui est le figuier dans un premier temps puis l'effet du climat associé aux effets des conditions environnementales.



Biotechnol. Agron. Soc. Environ. 2014 18(1),

Hierarchization of factors driving soil macrofauna in North Algeria groves

Malika Boudiaf Nait-Kaci ^(1,2), Mickaël Hedde ⁽¹⁾, Sophia Mouas Bourbia ⁽²⁾,
Arezki Derridj ⁽²⁾

⁽¹⁾ INRA UR251 PESSAC Centre de Versailles-Grignon, RD 10, F-78026 Versailles cedex (France);

⁽²⁾ Université Mouloud Mammeri, Département des Sciences Agronomiques, Laboratoire Ressources Naturelles, Route Hasnaoua, BP 17, 15000 Tizi Ouzou (Algérie). E-mail: malikanboud@yahoo.fr

Received on March 11, 2013; accepted on January 6, 2014.

The current study gathers new data on soil macro-invertebrates in North Algerian orchards in order to evaluate their seasonal dynamics. Invertebrate samples were collected from three sites in Kabylie; two from sub-humid areas (Nezla and Guendoul) and one from a semi-arid area (Bonira). The objectives were to determine levels of soil macrofauna abundance and to rank the factors controlling their distribution in order of importance. We particularly focused on the effects of site (climate), season and type of orchard (*Ficus carica* L. and *Olea europaea* L.). We collected 24 taxa, of which 70% were ants and 16% earthworms. Site and seasonal factors as well as the interaction between these two elements were found to significantly influence total soil macro-invertebrate abundance. In particular, earthworms were found to be highly sensitive to acidity. In contrast, the type of grove explained only a small part of earthworm variance, whereas it had a significant influence on ant abundance. In order to be able to say whether these conclusions are typical for other comparable orchards in North Africa, more studies of this kind are needed.

Keywords. Soil fauna, physico-chemical characteristics of soil, *Olea europaea*, *Ficus carica*, climate, Algeria.

Hiérarchisation des facteurs déterminant la macrofaune du sol de vergers du nord de l'Algérie. Cette étude a pour but de rassembler des données sur la macrofaune du sol et d'évaluer sa dynamique saisonnière dans les vergers du nord de l'Algérie, peu étudiés sur ce thème. Les invertébrés ont été recueillis dans trois régions de Kabylie sous climat subhumide (Nezla et Guendoul) et semi-aride (Bonira). L'importance est de déterminer les niveaux d'abondance de la macrofaune du sol et de hiérarchiser les facteurs qui contrôlent leur distribution. Les effets de site (climat), de saison et de type de verger (*Ficus carica* L. et *Olea europaea* L.) ont été étudiés en particulier. Parmi 24 taxons identifiés, les fourmis et les vers de terre sont dominants et représentent respectivement 70 % et 16 % des individus. Les facteurs « site » et « saison » ainsi que leur interaction influencent l'abondance totale des macro-invertébrés du sol, en particulier les vers de terre qui sont très sensibles aux climats plus secs. Par contre, le facteur « type de verger » influence peu l'abondance des vers de terre, mais bien significativement l'abondance des fourmis. Il apparaît que les macro-invertébrés sont principalement influencés par le climat et la saison. Afin de mieux statuer sur nos résultats et nos conclusions, il est nécessaire d'élargir ce type d'étude à différents sols et vergers sous d'autres variantes du climat de l'Afrique du Nord.

Mots-clés. Faune du sol, propriétés physico-chimiques du sol, *Olea europaea*, *Ficus carica*, climat, Algérie.

1. INTRODUCTION

Although soil fauna is known to influence soil function (Lavelle et al., 2001), invertebrate communities in North African soils are still poorly described. In Mediterranean soil ecosystems, climatic conditions have been shown to have great influence on soil macrofauna, which are often particularly sensitive to temperature (Sharon et al., 2001; Antunes et al., 2008), precipitation (Morón-Ríos et al., 2010) and soil

humidity (Dodd et al., 1997; El-Sharabasy et al., 2008). The dominant climatic and pedological characteristics of this region favour soil erosion and salinity, both of which may have a negative impact on soil biodiversity (Fucyos et al., 2007; Enouissi et al., 2011). These factors also constrain soil community dynamics (Véla et al., 2007; Fadla et al., 2008). In arid conditions the presence of macrofauna improves nitrogen nutrition and the availability of water for the horticultural plants (Ouedraogo et al., 2006). Apart from providing fruit

and bioenergy, orchards in Southern Mediterranean regions also contribute to the mitigation of soil erosion (Martins da Silva et al., 2011; Ramos et al., 2011).

In Algeria, olive (*Olea europaea* L.) and fig (*Ficus carica* L.) orchards are widespread due to their socio-economic importance and their robustness (Ruano et al., 2004; Favez et al., 2011). However, over the last few decades these orchards have been progressively neglected in favour of more high yielding horticultural systems. Such policies have led to a deterioration of agro-ecosystems in these areas, which has resulted in recent attempts to restore their functionality (Santos et al., 2007).

The aim of the present work was to understand the relative importance of three factors recognized as being important for soil invertebrate communities: the climate (sub humid vs semi-arid), the season (winter vs summer) and the orchard type (fig vs olive groves). We hypothesized that macro-invertebrate abundance would be controlled by interactions between these three factors. This study, carried out in traditional rural fig and olive orchards, beside more intensively cultivated orchards in the same region, should constitute a reference for future assessments of soil biological activity in orchard systems in this geographical area.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Study sites

Three sites were selected on a 52 km North-South transect in Kabylie in northern Algeria: Nezla (36°47'4" N; 4°36'40" E), Guendoul (36°44'20" N; 4°13'5" E) and Bouira (36°23'43" N; 3°53'14" E). Some characteristics of these sites are given in table 1. The Djurdjura Mountains separate Bouira from Nezla and Guendoul. The climate is sub-humid in Nezla and Guendoul and semi-arid in Bouira, with De Montompe

indices of 26.6 and 19.3 respectively. Both fig and olive groves were studied at each site. The mean age of trees ranged between 30 and 60 years and mean density was about 100-120 trees per hectare. Also, in both fig and olive groves studied, the composition of the plant cover is similar and composed by same species notably *Avena stierltis*, *Inula viscosa*, *Oxalis pes caprae*, *Daucus carota*, *Galactites tomentosa*, *Scophymus hispanicus*. The productivity of these groves is irregular and mainly for local consumption. Management is very low-intensity, with no use of phytosanitary products, fertilization or irrigation. Fructification and thinning cuts were made during the harvest, but this is neither a systematic nor an intensive procedure (M.A.D.R., 2009). This kind of agro-ecosystem is currently still the dominant orchard management type in the region.

2.2. Soil sampling and characterisation

The soils were Calcisols at Guendoul and Bouira and Cambisols at Nezla (WRB, 1998). Soils were sampled in January 2007 with a boring sampler (4 cm in diameter, 20 cm depth). We collected five soil samples randomly from each plot. Soil characteristics were determined on three replicates from the composite samples according to standard methods described in Jackson (1967). Particle size distribution was measured according to the Robinson pipette method (i.e. organic matter oxidation by H_2O_2 , shaking in a sodium hexametaphosphate solution). Soil pH was measured in a 1/5 soil distilled water suspension. The $CaCO_3$ content was determined using the HCl 1 M volumetric method. Cation exchange capacity (CEC) was measured according to the ammonium acetate method. Organic C was determined by sulfochromic oxidation. Bioavailable phosphorus was extracted by shaking soil samples in $NaHCO_3$ 0.5 M solution at pH = 8.5 (soil/solution ratio of 1/10) during 1 h (Olsen et al., 1977). The suspension was then filtered and phosphorus concentration in the solution was determined by colorimetry. Exchangeable-K was extracted by shaking soil samples in an ammonium acetate 1 M solution at pH 7 (soil/solution ratio of 1/10) for 1 h (Quemener, 1979). The suspension was then filtered and K⁺ concentration in the solution was determined by flame spectrometry.

2.3. Invertebrate sampling and identification

Invertebrate sampling was carried out in winter (January) and summer (June)

Table 1. Characteristics of the three studied sites *Caractéristiques des stations étudiées.*

	Nezla	Guendoul	Bouira
Altitude (m)	492	446	373
Mean annual precipitations (mm)*	826	826	560
Mean annual temperature range (°C)*	5.7 - 37.7	5.7 - 37.7	4.2-39
Grove age (years)	40	30	60
Slope	5%	5%	10%
Type (WRB)	Cambisol	Calcisol	Calcisol

* Data were measured respectively at the Boukhalfa and Ain-Bessam meteorological stations between 1996 and 2006 — *Les données ont été mesurées respectivement aux stations météorologiques de Boukhalfa et Ain-Bessam entre 1996 et 2006.*

2007 following the methodology outlined in Coineau (1974). In each selected orchard, six sampling zones of 30 x 30 cm, at least 10 m distance from each other, were set up. Two depth profiles were sampled at each sampling site. Large invertebrates were then hand-sorted in the laboratory. Remaining invertebrates were then extracted from the soil using the Berlese-Tullgren method (Pesson, 1971). After extraction, all invertebrates were preserved in 70% alcohol for later identification. Due to the still currently very incomplete taxonomic catalogue of Algerian soil fauna, invertebrates were only identified to order level in most cases. Taking account of their social behavior and the resulting aggregated distribution, ants were analyzed separately from other macro-invertebrates. Hence, total density referred to the density of all invertebrates but excluding ants.

2.4. Statistical analyses

The Kruskal-Wallis rank sum test was used for looking at soil differences between sites and orchards. Afterwards, multiple comparisons were done to identify groups that differed (Siegel et al., 1988). We also tested for the influence of the factors "site", "season" and "orchard" and their interactions on both the overall population density and the diversity of invertebrates. For this, analyses of variance were performed on log-transformed data. Tukey's "Honest Significant Difference" method was used to test for multiple comparisons of means.

3. RESULTS

3.1. Soil characteristics

Soil characteristics are detailed in table 2. No differences in pH and organic C, CaCO₃, exchangeable K and clay contents were observed between orchards from any one of the three sites. At Nezla and Guendoul, the CEC was higher in fig than in olive orchard soils. In Bouira soils, the soil available phosphorus content was slightly higher in fig than in olive groves. Regarding differences between the three sites, it appeared that Guendoul presented higher pH, organic C and CaCO₃ contents and lesser available P content than Nezla, with intermediate values in Bouira. The available phosphorus content separated Bouira and Nezla from Guendoul. Clay content was twice as high at Bouira than at Guendoul, with 25.6% and 13.7% respectively. Finally, no differences in exchangeable K content and CEC were recorded between sites.

3.2. Macro-invertebrate density and diversity

A total of 2,620 individuals were collected and 24 taxa identified. Ants and earthworms dominated the communities, representing 70% and 16% of total individuals, respectively. Total macro invertebrate density was highly influenced by the factors "site", "season" and their interaction but not by the type of grove (Table 3). Maximum population values were recorded during winter in Nezla and Guendoul (sub-

Table 2. Means (standard error) soil characteristics of the six studied groves — Moyennes (écart type) des caractéristiques des sols des six vergers étudiés.

Grove	Nezla		Guendoul		Bouira	
	Fig	Olive	Fig	Olive	Fig	Olive
pH water	7.44 (0.07)	7.00 (0.15) ns, ^b	7.46 (0.01)	7.62 (0.11) ns, ^a	7.41 (0.04)	7.41 (0.03) ns, ^{ab}
Org C (%)	0.33 (0.04)	0.40 (0.08) ns, ^b	1.25 (0.11)	1.29 (0.69) ns, ^a	0.89 (0.06)	0.71 (0.2) ns, ^{ab}
CaCO ₃ (g.kg ⁻¹)	3.7 (0.09)	2.1 (0.07) ns, ^b	26.7 (0.9)	25.0 (1.61) ns, ^a	15.1 (0.48)	11.8 (0.65) ns, ^{ab}
Tot N (g.kg ⁻¹)	0.91 (0)	0.91 (0)	1.26 (0)	0.63 (0)	1.72 (0)	1.26 (0)
CEC	15.26 (0.19)	12.24 (0.4) ^a , ^a	14.5 (0.33)	13.46 (0.31) ^a , ^a	14.16 (0.11)	13.35 (1.35) ns, ^a
P _{ass}	1.34 (0.16)	1.51 (0.17) ns, ^a	0.78 (0.16)	0.93 (0.15) ns, ^b	1.57 (0.06)	1.43 (0.04) ^a , ^a
K _{ass}	20.83 (1.48)	26.13 (1.92) ns, ^a	29.15 (1.88)	26.70 (7.33) ns, ^a	21.66 (0.88)	21.73 (0.76) ns, ^a
Clay (%)	20.37 (2.18)	16.53 (0.84) ns, ^{ab}	13.75 (0.55)	13.68 (0.63) ns, ^b	25.60 (1.08)	23.4 (1.53) ns, ^a

ns: not significant — non significatif, ^a: indicates significant differences between fig and olive groves from one site — indique les différences significatives entre les vergers de figues et d'olives d'un site; Different letters indicate significant differences between sites — les lettres différentes indiquent des différences significatives entre les sites; Data between brackets are standard error — les données entre parenthèses sont les écarts-types.

4 *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 2014 **18**(1),

Boudiaf Nait-Kaci M., Hedde M., Mouas Bourbia S. et al.

humid climate) with values ranging between 130 and 380 ind·m⁻². The lowest values were mainly found during winter in Bouira (semi-arid climate) and during summer in Nezla with more or less than 40 ind·m⁻².

This pattern was mainly driven by earthworm densities that reached high values (59 to 324 ind·m⁻²) during winter in the sub-humid climate regardless of the orchard type (Table 3). In these orchards, earthworms dominated, accounting for 42% to 86% of soil macro-invertebrate density. In other conditions, communities were characterized by scarce or null density of earthworms (0 to 22 ind·m⁻²). The population levels for ants depended significantly on the site and the type of groves (Table 3). This effect is highlighted by a difference between high densities in fig orchards at Bouira (about 750 to 1,800 ind·m⁻² depending on the season), and low densities in olive orchards at Nezla whatever the season and in fig orchards at Bouira during winter (less than 10 ind·m⁻²).

Invertebrates other than earthworms and ants were found at lower densities, *i.e.* always less than 40 ind·m⁻². Nevertheless, some groups represented up to 60% of the community. For instance, millipedes at Guendoul exhibited densities ranging from 9 to 33 ind·m⁻², representing 13% to 24% of the total population. Their density was almost stable between season and grove type. In all other conditions, millipedes were rare, except in Bouira olive groves during summer (11 ind·m⁻²). Adult coleopterans also reached up to 30 ind·m⁻² particularly during summer in all conditions (7 to 28 ind·m⁻²) and at Guendoul during winter (30 ind·m⁻²). Finally, snails were present only in Nezla although at very low densities (up to 6 ind·m⁻² and to 9% of density).

The taxonomic richness ranged between 1 and 11. Among the three factors investigated, only the factor "site" significantly influenced the taxonomic richness of macro-invertebrates. The highest values were observed at Guendoul and Bouira, with diversity values of 2.5 and 4, respectively.

4. DISCUSSION

4.1. Hierarchy of factors

Our results showed that olive and fig trees have similar effects on soil characteristics – consistent with existing literature reports (Dodd et al., 1997; Ricarte et al., 2011). Significant differences were observed with respect to available phosphorus amounts, which were low in all orchards. The low available phosphorus content probably related to the nature of the calcareous parent material, which enhanced its precipitation (Darrah et al., 1994). The type of grove within a single site did not influence total density of soil invertebrates, which is to a large extent ascribed to the similarity of soil characteristics.

The main result of this work lies on the ranking of factors by importance driving invertebrate communities in Kabylie soils. It clearly emerged from the results that the factors "site" and "season" profoundly affected the total density of soil invertebrates. These results agreed with Sharon et al. (2001). These authors showed that climate was the main factor influencing abundance and diversity of soil macrofauna in Middle East Mediterranean forests. Similar results have been reported for woodlice by Warburg et al. (1984) and Huerta et al. (2012). However, Santos et al. (2007) showed ant density to be controlled by site characteristics and orchard type. To our knowledge, the present work provides the first results from soil invertebrate communities under fig trees in Mediterranean soils. Otherwise, fig tree impacts on soil communities have been described by Merlim et al. (2005) for a tropical climate. Although we did not observe any effects of orchard type (except for ants, table 3), the type and age of vegetation have been reported to drive both abundance and diversity of soil fauna (Neirynck et al., 2000; Woodcock et al., 2005). However, the simplified structure of vegetation in orchards has been found

Table 3. Results (F values) of 3-factor analyses of variance performed on log transformed macro-invertebrate densities — Résultats d'analyse de variance de l'effet des trois facteurs sur la densité des macro-invertébrés après transformation logarithmique (valeurs F).

	Df	Total	Earthworms	Millipedes	Coleopterans	Snails	Ants
Site	2	5.4**	18.0***	24.4***	0.6	4.1*	4.6*
Season	1	10.3**	68.3***	< 0.1	3.1	1.0	3.7
Orchard	1	1.1	2.4	1.6	8	0.1	4.1*
Site x season	2	6.6**	16.9***	2.0	0.2	0.3	0.5
Site x orchard	2	0.2	2.5	0.8	1.3	0.2	1.7
Season x orchard	1	0.5	0.6	2.4	< 0.1	3.2	0.1
Site x season x orchard	2	0.5	0.5	1.1	4.0*	1.6	0.1

* : $p < 0.05$ — $p < 0.05$; ** : $p < 0.01$ — $p < 0.01$; *** : $p < 0.001$ — $p < 0.001$; Df: degree of freedom — degré de liberté.

to act negatively on abundance and diversity of soil arthropods (Van der Wal et al., 2009; Martins da Silva et al., 2011). The tree species can also influence soil biota through the interactions between their roots and the soil, such effects being apparently more important when soil organic matter content is low (Eo et al., 2008; Ivask et al., 2008). Furthermore, it has also been found elsewhere that the type of orchard influenced e.g. organic matter dynamics and pH (Cesarz et al., 2007; Carrillo et al., 2011). Some studies have also mentioned that soil fauna composition can interact with vegetation to modify soil characteristics (Jones et al., 1997; Jacob et al., 2009).

Our results also showed that there were clear differences in the densities of soil invertebrates between Nezla and Guendoul on the one hand, and Bouira on the other hand, during the winter. Differences could be due to climate rather than to soil type. Indeed, Nezla and Guendoul, both situated in a similar sub-humid climatic zone, differ from each other for soil characteristics in terms of pH, organic C, CaCO_3 and available P contents. During the summer, densities were lower, with the highest values recorded in Nezla ($109 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$) but most of them ranged between 15 and $74 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$. Surprisingly, Nezla soils hosted the highest densities during winter ($> 250 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$) and the lowest during summer ($< 40 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$). Soil characteristics probably explain this result (Lavelle et al., 2001), particularly in terms of the fact that organic C content is three times less in Nezla soils compared to those at Guendoul. Finally, in addition to the warm summers of Kabylie, soil invertebrates in Bouira were also exposed to cold winters with, for instance, 25 days of frost during winter 2007.

4.2. Effects on macrofaunal groups

Among the studied communities, taxa exhibited different responses to various environmental factors. For instance, earthworms were significantly numerous in Nezla and Guendoul soils during the winter, while millipede densities were high at Guendoul whatever the season. In the following section, responses to such factors are discussed taxon by taxon.

As previously described by Rouabah et al. (2001), the warm and dry summer of Algeria leads to a widespread cessation of earthworm activity (in this study, except for the Guendoul olive orchards). Soil dryness leads directly to a drop in worm numbers. In Bouira however, worm density was always very low, probably also since in this semi-arid zone, winters are characterized by cold temperatures and low soil humidity. Comparing densities recorded in the present study with literature on Maghrebian soils is rather difficult considering the small number of studies on earthworms, most of which have been taxonomic

studies (Omodeo et al., 2003). Moreover, even from this small sample size, some data are not considered to be reliable. For instance, Errouissi et al. (2011) reported densities of earthworms in agricultural plots, indicating that *Lumbricus terrestris* L. (1798) reached densities up to $50 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$. However, an exhaustive review, Omodeo et al. (2003) showed that *L. terrestris* is not found in the earthworm fauna of Maghreb. This confusion can probably be explained by the paucity of taxonomic expertise for soil invertebrates in North Africa.

During the winter, which corresponds to the rainy season in Kabylie, earthworms were numerous in the topsoil at Guendoul and Nezla ($59\text{-}141$ and $202\text{-}324 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$, respectively) (Table 4). These densities were rather higher than densities reported for other Mediterranean orchards. For instance, Morón-Ríos et al. (2010) found densities of 50 and $170 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$ during autumn 2002 and spring 2003, respectively. Kherbouche et al. (2012) recorded $150 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$ during springtime. However, in contrast to these groves, the Kabylie groves studied were not ploughed. The well-known negative impact of cultivation on earthworms probably explains this difference (Kherbouche et al., 2012).

In the orchards studied here, coleopteran densities were consistently low ($2\text{-}30 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$), especially in Bouira and Guendoul during winter ($< 10 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$). In comparison, Santos et al. (2007) found $250\text{-}909 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$ under olive groves in April and July, respectively, in Iberian Mediterranean orchards. Coleopterans in groves have been demonstrated to be influenced by year-round climate variations and management regimes (Ruano et al., 2004) or by soils (Martins da Silva et al., 2011). Coleopterans play important roles in orchard ecosystems such as these: in particular, they are recognized as regulators since some soil larvae are rhizophagous and other species are predators either at larval or imaginal stage (Ruano et al., 2004). Therefore, they are well documented and established as bio-indicators of soil quality (Shanas et al., 2011).

In contrast to the other groups, ant populations varied significantly according to site and grove type but not with season (Table 3). Aridity does not seem to reduce their abundance (Delsinne et al., 2010). Ants generally had very high densities on the sites studied here (Table 4), but were less abundant at Nezla during the two seasons, particularly under olive trees and they disappeared at Bouira in the wintertime. They were abundant in Guendoul ($1,806\text{-}748 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$) respectively in winter and summer under fig trees. The abundance of ants under olive trees was low and did not vary. This low density is striking compared to the results of Santos et al. (2007) who reported $1,182\text{-}3,120 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$. Other studies have shown that ants play important ecological role in such groves (Castro et al.,

Table 4. Mean densities (standard error) of macro-invertebrates in studied orchards — *Densités moyennes (écarts-types) des macro-invertébrés dans les vergers étudiés.*

Site	Season	Whithout ants					Ants	
		Orchard	Total	Earthworms	Millipedes	Coleopterans	Snails	
Nezla	Winter	Olive	378 (119) ^a	324 (105) ^a 86%	2 (2) ^b 0%	4 (2) ^b 1%	6 (3) ^a 1%	2 (2) ^b
Nezla	Winter	Fig	263 (139) ^{ab}	202 (107) ^{ab} 77%	2 (2) ^b 1%	6 (3) ^b 2%	2 (2) ^a 1%	178 (162) ^{ab}
Guendoul	Winter	Olive	235 (58) ^{ab}	141 (45) ^{ab} 60%	33 (16) ^a 14%	30 (14) ^a 13%	2 (2) ^a 1%	41 (33) ^{ab}
Guendoul	Winter	Fig	139 (33) ^b	59 (25) ^{bc} 43%	26 (6) ^a 19%	30 (11) ^a 1%	0 (0) ^a 0%	1,806 (,1547) ^a
Bouira	Winter	Olive	4 (3) ^c	0 (0) ^c 0%	2 (2) ^b 50%	2 (2) ^b 50%	0 (0) ^a 0%	44 (41) ^{ab}
Bouira	Winter	Fig	22 (8) ^c	9 (7) ^c 42%	0 (0) ^b 0%	0 (0) ^b 0%	0 (0) ^a 0%	0 (0) ^b
Nezla	Summer	Olive	15 (6) ^c	0 (0) ^c 0%	0 (0) ^b 0%	7 (3) ^b 50%	0 (0) ^a 0%	7 (3) ^b
Nezla	Summer	Fig	41 (14) ^c	2 (2) ^c 5%	2 (2) ^b 5%	19 (9) ^{ab} 45%	4 (2) ^a 9%	39 (22) ^{ab}
Guendoul	Summer	Olive	109 (37) ^b	22 (13) ^c 20%	26 (8) ^a 24%	28 (12) ^a 25%	0 (0) ^a 0%	72 (47) ^{ab}
Guendoul	Summer	Fig	74 (26) ^{bc}	0 (0) ^c 0%	9 (3) ^a 13%	11 (3) ^{ab} 15%	0 (0) ^a 0%	748 (483) ^a
Bouira	Summer	Olive	61 (10) ^{bc}	0 (0) ^c 0%	11 (5) ^a 18%	28 (10) ^a 45%	0 (0) ^a 0%	33 (14) ^{ab}
Bouira	Summer	Fig	37 (8) ^c	2 (2) ^c 5%	0 (0) ^b 0%	22 (7) ^{ab} 60%	0 (0) ^a 0%	472 (429) ^{ab}

Different letters indicate significant differences between sites — *les lettres différentes indiquent des différences significatives entre les sites.*

1996; Garrido-Jurado et al., 2011). Several authors have suggested their importance as bio-indicators for agro-ecosystems (Lobry de Bruyn, 1999), under fig trees (Merlim et al., 2005) and under olive trees with a very heterogeneous distribution and variable (Pereira et al., 2004; Santos et al., 2007). Despite this apparent ecological importance, ants are still inadequately studied in Mediterranean ecosystems (Ottonetti et al., 2008).

Gastropods were collected in very small numbers at Nezla, but nowhere else. These invertebrates are very sensitive to fluctuations in soil humidity (Pokryszko et al., 2011). Moisture has been shown to be the key determining factor of variation in their abundance and diversity in soils (Pennings et al., 2005; Cameron et al., 2006). This taxonomic group is also influenced by other soil properties and the nature of the vegetation (Omodeo et al., 2003; Ondina et al., 2004; Cameron et al., 2010).

Millipedes were mostly observed at Guendoul during both seasons, where they reached densities up to 33 ind·m⁻² (Table 4). Millipedes also represented up to 50% of community density in Bouira demonstrating their characteristic abundance in semi-arid climates (Galanes et al., 2011).

5. CONCLUSION

This study allowed us to rank three factors (soil type, climate and fruit tree) influencing the abundance of macro-invertebrates in North African olive and fig

groves. It appears for most of the macro-invertebrates studied that they are favorably influenced by humid climate and site. Moreover, it provides valuable data on the varying abundances and diversity of soil macro-invertebrates under traditional olive and fig groves in three regions of Kabylie. However, the results presented in this study may only be valid for this region. To make more general statements about the abundance of macro-invertebrates in traditionally maintained groves (in terms of soil management regime), this study should be extended to sites encompassing a wider range of different soils, orchard types, and climatic situations across North Africa. However, this study, reporting on conditions in traditionally managed fig and olive groves, which exist side-by-side with more intensively managed groves throughout the region, could constitute a valuable reference for soil biological activities in horticulture for this area.

Acknowledgements

We would like to thank Folkert van Oort for his very useful comments (UR251 PESSAC INRA Versailles). We are grateful to the owners of the orchards for having let us make our study in their groves. We thank all the students who took part in soil sampling.

Bibliography

Antunes S.C. et al., 2008. Spatial and temporal distribution of litter arthropods in different vegetation covers of Porto

- Santo Island (Madeira Archipelago, Portugal). *Eur. J. Soil Biol.*, **44**, 45-56.
- Cameron R.A.D., Pokryszko B.M. & Long D.C., 2006. Snail faunas in Southern English calcareous woodlands: rich and uniform, but geographically differentiated. *J. Conchology*, **39**, 1-13.
- Cameron R.A.D., Pokryszko B.M. & Hursak M., 2010. Land snail faunas in Polish forests: patterns of richness and composition in a post-glacial landscape. *Malacologia*, **53**, 77-134.
- Castillo Y. et al., 2011. Soil fauna alter the effects of litter composition on nitrogen cycling in a mineral soil. *Soil Biol. Biochem.*, **43**, 1410-1419.
- Castro J., Campos P. & Pastor M., 1996. Soil arthropods under the influence of soil management systems in olive orchards and sunflower. *Boletín Sanidad Vegetal*, **22**, 557-570.
- Cesarz S. et al., 2007. Earthworm communities in relation to tree diversity in a deciduous forest. *Eur. J. Soil Biol.*, **43**, 61-67.
- Coincun Y., 1974. *Introduction à l'étude des microarthropodes du sol et de ses annexes*. Paris : Doin Editions.
- Darrah P.R. & Jones D.L., 1994. Role of derived organic acids in the immobilisation of nutrient from the rhizosphere. *Plant Soil*, **166**, 247-257.
- Delsinne T., Roisin Y., Herbauts J. & Lepouce M., 2010. Ant diversity along a wide rainfall gradient in the Paraguayan dry Chaco. *J. Arid Environ.*, **74**, 1149-1155.
- Dodd M.B. & Lauenroth W.K., 1997. The influence of soil texture on the soil water dynamics and vegetation structure of a shortgrass steppe ecosystem. *Plant Ecol.*, **133**, 13-28.
- El-Sharabasy H.M., Hassan M.F. & Mohamed A.I., 2008. Occurrence of soil mites at Al-Maghara Region, Sinai Peninsula. *J. Egypt. Soc. Acarology*, **2**, 31-35.
- Et J. & Nakamoto I., 2008. Spatial relationships between roots and soil organisms under different tillage systems. *Eur. J. Soil Biol.*, **44**, 277-282.
- Erouissi F., Ben Moussa-Machraoui S., Ben-Hammouda M. & Nouira S., 2011. Soil invertebrates in durum wheat (*Triticum durum* L.) cropping system under Mediterranean semi arid conditions: a comparison between conventional and no-tillage management. *Soil Tillage Res.*, **112**, 122-132.
- Fadda S. et al., 2008. Conservation of grassland patches failed to enhance colonization of ground-active beetles on formerly cultivated plots. *Environ. Conserv.*, **35**, 109-116.
- Fayez K.A. & Mahmoud S.Y., 2011. Detection and partial characterization of a putative closterovirus affecting *Ficus carica*: molecular, ultrastructural and physiological aspects of infected leaves. *Acta Physiol. Plant.*, **33**, 2187-2198.
- Galanes I.L. & Thomlinson J.R., 2011. Soil millipede diversity in tropical forest patches and its relation to landscape structure in northeastern Puerto Rico. *Biodivers. Conserv.*, **20**, 2967-2980.
- Garrido-Jurado I., Ruano F., Campos M. & Quesada-Moraga E., 2011. Effects of soil treatments with entomopathogenic fungi on soil dwelling non-target arthropods at a commercial olive orchard. *Biol. Control*, **59**, 249-241.
- Huerta E. & van der Wal H., 2012. Soil macroinvertebrates' abundance and diversity in home gardens in Tabasco, Mexico, vary with soil texture, organic matter and vegetation cover. *Eur. J. Soil Biol.*, **50**, 68-75.
- Ivask M. et al., 2008. Invertebrate communities (Annelida and epigeic fauna) in three types of Estonian cultivated soils. *Eur. J. Soil Biol.*, **44**, 532-540.
- Jackson M.L., 1967. *Soil chemical analysis*. Englewood Cliff, N.J., USA: Prentice Hall.
- Jacob M. et al., 2009. Nutrient release from decomposing leaf litter of temperate deciduous forest trees along a gradient of increasing tree species diversity. *Soil Biol. Biochem.*, **41**, 2122-2130.
- Jones C.G., Lawton J.H. & Shachak M., 1997. Positive and negative effects of organisms as physical ecosystem engineers. *Ecology*, **78**, 1946-1957.
- Kherbouche D., Bernhard-Reversat F., Moali A. & Lavelle P., 2012. The effect of crops and farming practices on earthworm communities in Soummam valley, Algeria. *Eur. J. Soil Biol.*, **48**, 17-23.
- Lavelle P. & Spain A.V., 2001. *Soil ecology*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Lobry de Bruyn L.A., 1999. Ants as bioindicators of soil function in rural environments. *Agric. Ecosyst. Environ.*, **74**, 425-441.
- M.A.D.R. (Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural), 2009. *Statistiques agricoles, superficies et produits*. Alger : Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural.
- Martins da Silva P.M., Aguiar C.A.S., de Faria e Silva I. & Serrano A.R.M., 2011. Orchard and riparian habitats enhance ground dwelling beetle diversity in Mediterranean agro-forestry systems. *Biodivers. Conserv.*, **20**, 861-872.
- Merdim A.O., Guerra J.G.M., Junqueira R.M. & de Aquino A.M., 2005. Soil macrofauna in cover crops of figs grown under organic management. *Sci. Agricola*, **62**, 57-61.
- Morón-Ríos A., Rodríguez Miguel Á., Pérez Camacho L. & Rebollo S., 2010. Effects of seasonal grazing and precipitation regime on the soil macroinvertebrates of a Mediterranean old field. *Eur. J. Soil Biol.*, **46**, 91-96.
- Neirynck J., Mirtcheva S., Sioen G. & Tust N., 2000. Impact of *Tilia platyphyllos* Scop., *Fraxinus excelsior* L., *Acer pseudoplatanus* L., *Quercus robur* L. and *Fagus sylvatica* L. on earthworm biomass and physico-chemical properties of a loamy topsoil. *For. Ecol. Manage.*, **133**, 275-286.

- 8 *Biolectand. Agron. Soc. Environ.*, 2014 18(1),
- Olsen S.R., Bowman R.A. et Watanabe F.J., 1977. Comportement du phosphore dans le sol et interactions avec les autres éléments nutritifs. *Phosphore Agric.*, 70, 35-52.
- Omodeo P., Rota E. & Baha M., 2003. The megadile fauna (Annelida: Oligochaeta) of Maghreb: a biogeographical and ecological characterization. *Pedobiologia*, 47, 458-465.
- Ordina P., Hermida J., Outeira A. & Mato S., 2004. Relationship between terrestrial gastropod distribution and soil properties in Galicia (NW Spain). *Appl. Soil Ecol.*, 26, 1-9.
- Ottonetti L., Tucci L., Chelazzi G. & Santini G., 2008. Stable isotopes analysis to assess the trophic role of ants in a Mediterranean agroecosystem. *Agric. For. Entomol.*, 10, 29-36.
- Onédraogo E., Mando A. & Brussaard L., 2006. Soil macrofauna affect crop nitrogen and water use efficiencies in semi-arid West Africa. *Eur. J. Soil Biol.*, 42, 275-277.
- Pennings S.C. & Silliman B.R., 2005. Linking biogeography and community ecology: latitudinal variation in plant-herbivore interaction strength. *Ecology*, 86, 2310-2319.
- Pereira J.A. et al., 2004. Ants as predators of the egg parasitoid *Trichogramma cacoeciae* (Hymenoptera: Trichogrammatidae) applied for biological control of the olive moth, *Prays oleae* (Lepidoptera: Plutellidae) in Portugal. *Biocontrol Sci. Technol.*, 14, 653-664.
- Pesson P., 1971. *La vie dans les sols : aspects nouveaux, études expérimentales*. Paris : Ed. Gauthiers-Villars.
- Pokryszko B.M., Cameron R.A.D., Munnahze I. & Tskladishvili D., 2011. Forest soil fauna from Georgian Transcaucasia: patterns of diversity in a Pleistocene refugium. *Biol. J. Linn. Soc.*, 102, 239-250.
- Pueyo Y. & Alados C.L., 2007. Abiotic factors determining vegetation patterns in a semi-arid Mediterranean landscape: different responses on gypsum and non-gypsum substrates. *J. Arid Environ.*, 69, 490-505.
- Queener J., 1979. *The measurement of soil potassium*. Research topics No 4/1978. Bern: International Potash Institute.
- Ramos M.L., Robles A.B., Sanchez-Navarro A. & Gonzalez-Rebollar J.L., 2011. Soil responses to different management practices in rainfed orchards in semi arid environments. *Soil Tillage Res.*, 112, 85-91.
- Boulaf Nail-Kaci M., Heble M., Mouas Boubia S. et al.
- Ricarte A., Marcos-Garcia M.A. & Moreno C.E., 2011. Assessing the effects of vegetation type on hoverfly (Diptera: Syrphidae) diversity in a Mediterranean landscape: implications for conservation. *J. Insect Conserv.*, 15, 865-877.
- Rouabah L. & Descamps M., 2001. Biologie des Oligochètes *Lumbricus terrestris*, *Allobophora* et *Dendrobacina pygmaea* dans le Constantinois (Est Algérien). *Bull. Soc. Zool. Fr.*, 126, 49-58.
- Ruma F. et al., 2004. Use of arthropods for the evaluation of the olive orchard management regimes. *Agric. For. Entomol.*, 6, 111-120.
- Santos S.A.P., Cabanas J.L. & Pereira J.A., 2007. Abundance and diversity of soil arthropods in olive grove ecosystem (Portugal): effect of pitfall trap type. *Eur. J. Soil Biol.*, 43, 77-83.
- Shamas U. et al., 2011. Landscape and a political border determine desert arthropods distribution. *J. Arid Environ.*, 75, 284-289.
- Sharon R., Degau G. & Warburg M., 2001. Comparing the soil macro-fauna in two oak-wood forests: does community structure differ under similar ambient conditions? *Pedobiologia*, 45, 355-366.
- Siegel S. & Castellan N.J., 1988. *Nonparametric statistics for the behavioural sciences*. New York, NY, USA: MacGraw Hill Int.
- Van der Wal A. et al., 2009. Dissimilar response of plant and soil biota communities to long-term nutrient addition in grasslands. *Biol. Fertil. Soils*, 45, 663-667.
- Veia E. & Benhouhou S., 2007. Évaluation d'un nouveau point chaud de biodiversité végétale dans le bassin méditerranéen (Afrique du Nord). *C. R. Biol.*, 330, 589-603.
- Warburg M.R., Linsenmair K.E. & Bercovitz K., 1984. The effect of climate on the distribution and abundance of isopods. In: Sutton S.I. *The biology of terrestrial isopods*. Oxford: Clarendon Pr., 339-367.
- Woodcock B.A. et al., 2005. Grazing management of calcareous grasslands and its implications for the conservation of beetle communities. *Biol. Conserv.*, 125, 193-202.
- WRB (World Reference Base for Soil Resources), 1998. World Reference Base for Soil Resources. Roma: AISS, IRSIC, FAO.

(54 ref.)

Conclusion

Cette partie de la thèse regroupe les premières données concernant l'abondance des communautés d'invertébrés qui se trouvent dans les sols sous oliveraies et figueraies au nord de l'Algérie. Elle a permis de montrer en terme de variation saisonnière et d'abondance que les invertébrés sont structurellement différents. Il apparaît également que l'abondance change en fonction de l'altitude et du gradient d'aridité. Les sites étudiés présentent des densités supérieures en hiver qu'en été sous climat subhumide. Par contre sous climat semi-aride elles étaient faibles en hiver comme en été. Ce qui peut être expliqué par l'effet de l'aridité lié au gel, une pluviométrie plus faible et des températures estivales élevées.

D'un point de vue fondamental cette évaluation originale doit être confrontée à d'autres données nouvelles, notamment en raison de l'installation de nouveaux vergers d'olivier et figuier dans plusieurs régions semi arides et arides d'Algérie. Dans un cadre de la mise en valeur des sols dégradés. Il faut savoir rechercher si il existe un endémisme de la faune des sols, lié à une adaptation stricte de tolérance au stress hydrique et salin.

Les invertébrés des sols ne répondent pas aux mêmes patrons de richesse que les végétaux. Néanmoins, cette étude basée surtout sur l'abondance des bioindicateurs dans les sols est la plus complète possible (en Algérie) en ce qui concerne les agrosystèmes oliveraies et figueraies. Cette étude a permis de hiérarchiser les facteurs qui contrôlent l'abondance des macro-invertébrés édaphiques en zones subhumide et semi-aride. Elle permet aussi d'apporter des valeurs de référence dans les vergers de figuier et d'olivier du nord de l'Algérie.

Il est important de faire un aménagement raisonné des sites dans une vision de conservation de la biodiversité, et donc de l'ensemble des services écologiques que cette biodiversité pourvoit. Ce qui constitue une stratégie efficace pour le contrôle des ravageurs de l'olivier et du figuier avec un moindre coût. Pour compléter ce travail, il est opportun d'étudier l'effets des deux espèces à l'interface sol/racine sur des sols contigus, sachant que ces aspects ne sont pas documentés. Puis une étude comparative de la biomasse racinaire et la stratégie d'exploitation des sols. Ce sont ces questions, qui vont être traitées dans le chapitre suivant pour la valorisation et la durabilité de ces vergers.

Chapitre VII.

*Biodisponibilité du phosphore
dans la rhizosphère en
relation avec l'espèce : cas de
l'olivier et figuier*

Biodisponibilité du phosphore dans la rhizosphère en relation avec l'espèce : cas de l'olivier et figuier

1. Introduction

La déficience des sols en phosphore constitue un facteur limitant de la production des vergers. De nombreux travaux ont déjà souligné l'importance du phosphore dans la nutrition minérale des végétaux (Fardeau et Morel, 2002 ; Cheaib, 2006). Sa biodisponibilité serait fortement compromise par la complexité de son comportement dans le sol, particulièrement à proximité immédiate des racines (Darrah et *al.*, 2006). Il existe toute une gamme de forme de phosphore, des plus mobiles et disponibles pour la plante jusqu'aux formes quasi-immobiles. Leur transfert de la phase solide vers la solution dépend de nombreux mécanismes : physiques, chimiques et biologiques développés par les racines au niveau de la zone rhizosphérique (Darrah et *al.*, 2006 ; Romheld et Newmann, 2006). La biodisponibilité du phosphore dépend de ce fait, de l'offre en phosphore correspondant à l'aptitude de cet élément à passer en solution via les mécanismes rhizosphériques (Gobran et *al.*, 1996 ; Morel, 2002). Les racines peuvent induire la dissolution de minéraux peu solubles ou la désorption d'ions chimisorbés et de mobiliser des quantités de phosphore considérées comme peu disponibles sur la base de seuls critères chimiques (Hinsinger et Gregory, 1998 ; Arvieu, 1998). L'effet rhizosphérique détermine la magnitude des changements à l'interface sol/racine. Il est lié à l'espèce végétale, à son génotype et à la fertilité des sols (Chen et *al.*, 2006 ; Hinsinger et *al.*, 2009). Les espèces d'arbres peuvent influencer différemment les propriétés biochimiques des sols en créant un environnement de sol distinct (Augusto et *al.*, 2002 ; Dinesh et *al.*, 2010 ; Calvaruso et *al.*, 2011). Ainsi la nature et la quantité des rhizodépôts est dépendante de l'espèce végétale (Grayston et *al.*, 1996). En effet, Gahoonia et *al.*, (1992) ont montré que l'aptitude des plantes à prélever les éléments nutritifs peu disponibles est liée aussi bien à l'espèce qu'au génotype et aux facteurs abiotiques à sa proximité. La plante a un rôle fondamental dans le déterminisme de la biodisponibilité des nutriments. Cette aptitude des végétaux à changer cette biodisponibilité dans la rhizosphère peut devenir une caractéristique fondamentale lors du choix d'espèces à installer sur des sols à réhabiliter, d'où l'utilité de recherches afin d'évaluer l'importance des changements rhizosphériques sur la nutrition minérale des différentes espèces arborescentes (Redon, 2009 ; Calvaruso et *al.*, 2011).

C'est sur les sols de déprise agricole difficiles d'accès ou présentant des contraintes

pédologiques que la majeure partie des vergers a été installée. L'accroissement de la surface occupée par l'olivier en plus des résolutions prises en faveur du 'développement durable' des agrosystèmes, il est légitime d'apporter des réponses aux problèmes écologiques, soulevés par la modification de nos vergers. L'un des problèmes essentiels pour le gestionnaire est de savoir si l'introduction de nouvelles espèces peut avoir un impact sur la fertilité des sols.

Les chapitres précédents révèlent que l'olivier modifie significativement les propriétés physiques, chimiques et biologiques de sa rhizosphère. Il est connu que le figuier tout comme l'olivier est une espèce rustique et peu exigeante quant à la fertilité des sols. Dans ce contexte, il est apparu opportun d'étudier les effets des deux espèces à proximité de la racine sur des sols contigus. Cependant, la capacité des deux espèces à croître sur des sols pauvres pourrait trouver son explication dans leur aptitude à modifier positivement leur rhizosphère, sachant que ces problématiques sont peu documentées. L'objectif de cette étude est double. Il s'agit d'une part de déterminer et de comparer les propriétés chimiques du sol rhizosphérique et du sol global des deux espèces choisies, afin de mieux cerner l'effet rhizosphérique sur la biodisponibilité du phosphore pour ces deux cultures et d'autre part de discriminer la stratégie d'utilisation des sols par chaque espèce, qui consiste à réaliser des coupes anatomiques et des écrasements sur des racines de diamètre croissant (chapitre V) afin d'identifier les symbioses mycorhiziennes chez les deux espèces et voir la lignification dans chaque classe de diamètre racinaire.

2. Matériel et méthodes

2.1. Sites étudiés et échantillonnage des sols

Cette étude a été menée sur les mêmes sites que le chapitre précédent, sélectionnés sur la base du substrat géologique et chaque site comporte un couple de vergers contigu, *Oléa europea* L. et *Ficus carica* L, respectivement Nezla, Guendoul, Tizi Rached Y dans la wilaya de Tizi Ouzou et Sidi Ziane à Bouira (Tab.VII.1), correspondant à un climat allant du subhumide au semi aride (Fig.II.1.). Dans chaque site la densité est de 100 arbres/ha. Ces vergers sont caractérisés par une gestion extensive, absence de fertilisants, d'irrigation et de travail du sol. Seule un désherbage et le récolte des fruits sont pratiqués à la saison. L'échantillonnage a été fait pendant le repos végétatif au mois de décembre.

Tableau VII.1. Données de base sur les sites étudiés.

Site	Coord.Lambert	Roche mère	Pente(%)	Type de sol (WRB 2006)
Nezla	36°47'04.42''N 4°13'40.00''E 492 m	Alluvions anciennes	5%	Cambisol (eutric)
Guendoul	36°44'20.63''N 4°13'05.91''E 546 m	Marnes calcaires	10%	Cambisol (calcaric)
Tizi Rached	36°41'20.87''N 4°07'43.43''E 240 m	Marnes calcaires	5%	Cambisol (calcaric)
Bouira	36°23'43.19 ''N 3°53'14.04''E 373m	Alluvions anciennes	0%	Cambisol (calcaric)

Nous avons procédé au prélèvement de deux fractions de sol, le sol global et le sol rhizosphérique. Ces sols sont séchés à l'air libre et conservés dans un endroit sec.

2.2. Echantillonnage des racines

La récolte des sols s'est fait avec les racines, ces dernières seront ensuite secouées. Seules les racines de 2 à 5 mm de diamètre et les agrégats de 1cm sont retenus. Des racines de diamètre croissant [0.5-1[, [1-2[, [2-3[mm sont triées selon les normes ISO 1992 proposées par Baize et Jabiol, (1995) puis conservées dans de l'alcool. Parallèlement, la biomasse racinaire des deux espèces est quantifiée. Des cylindres de 250 ml de volume sont introduits dans les horizons marqués par une importante prolifération de racines fines sous les deux espèces (Danjon et Reubens, 2008). Pour l'olivier, il s'agit des profondeurs de 0-12 cm, 12-30 cm et 30-45 cm, par contre 0-15 cm, 15-25 cm et 25-40 cm pour le figuier.

2.3. Analyse au laboratoire

2.3.1. Analyse des sols

La fraction fine des sols est soumise à une caractérisation physique et chimique comportant la granulométrie, le pH, le calcaire total, le carbone organique du sol et la capacité d'échange cationique. Le potassium assimilable, le principe consiste à extraire le potassium soluble et échangeable par une solution d'acétate d'ammonium 1N à pH 7. Le potassium soluble est dissout, le potassium échangeable est déplacé par l'ammonium et libéré dans la solution d'extraction. Le dosage par le spectrophotomètre à flamme. Le phosphore total est extrait par digestion à l'acide perchlorique (HClO_4) à 60% avec un rapport sol/solution de 1/10. Le phosphore assimilable (Olsen) est extrait avec une solution de NaHCO_3 0,5M à pH 8,5, le phosphore soluble est extrait à l'eau avec un rapport sol/eau de 1/4 (Fardeau, 1993). Le dosage des différentes formes de phosphore se fait par colorimétrie à 660 nm.

2.3.2. Etude des racines

Toutes les racines contenues dans les cylindres sont lavées. Nous avons pris un échantillon composite moyen de la biomasse racinaire des arbres par station. Ces échantillons sont séchés à 60° jusqu'à constance du poids. Les résultats sont exprimés en gramme de matière sèche de racines par dm^3 de sol.

Les racines de diamètre compris entre [0.5-1[; [1-2[et [2-3[mm sont colorées à la fois par le carmin acétique et par le vert d'iode (Langeron, 1949), ces colorants permettent d'identifier les tissus riches en cellulose et ceux riches en lignine. Ensuite, des morceaux de racines ont été imprégnés dans la paraffine, puis des coupes transversales de 7 μm d'épaisseur ont été réalisées à l'aide d'un microtome mécanique. Seules les racines de diamètre inférieur à 0,5mm, sont colorées selon la technique de Philips et Hayman. Quinze fragments de racines de chaque arbre sont montés et écrasés entre lame et lamelle dans du glycérol et sont observés au microscope photonique pour observer la colonisation par les symbiotes.

2.4. Analyse statistique

Les analyses statistiques sont effectuées à l'aide du logiciel de statistique R. Les comparaisons entre les caractéristiques chimiques et potassiques du sol global et du sol rhizosphérique sont réalisées en utilisant le test t apparié.

3. Résultats et discussion

3.1. Variation des propriétés du sol sous les différents vergers

Les caractéristiques physiques, chimiques et biochimiques des sols globaux sont représentées dans le tableau (VI.2).

Tableau VI.2. Caractéristiques pédologiques des vergers étudiés.

Sites	Espèces	A(%)	Texture	pH	CaCO ₃ (%)	C (%)	Nt (%)	CEC (cmol.kg ⁻¹)	Passi (ppm)	Pt (ppm)
Bouira	<i>O. europea</i> L	24,29	LS	7,03	26,25	0,90	0,13	9,17	1,12	3,94
	<i>F. carica</i> L.	26,59		7,09	25,25	0,93	0,17	10,72	2,10	5,14
Guendoul	<i>O. europea</i> L	14,2	Lpurs	8,21	31,36	2,02	0,06	15,02	0,66	4,12
	<i>F. carica</i> L.	14,81		8,11	20,12	1,79	0,13	14,58	0,90	6,69
Nezla	<i>O. europea</i> L	17,64	LS	6,70	17,34	1,38	0,09	12,01	1,49	4,46
	<i>F. carica</i> L.	20,37		7,41	17,88	1,71	0,09	18,04	2,10	7,07
Tizi-Rached	<i>O. europea</i> L	21,9	LAS	7,04	29,12	1,05	0,12	10,40	1,01	5,04
	<i>F. carica</i> L.	26,9		7,12	28,74	1,58	0,14	19,91	1,61	7,68

Pour les vergers d'olivier la fraction argileuse varie de 14,2 à 24,29 %, les sols sont calcaires avec des teneurs en carbone organique oscillant entre 0,9 et 2,02 %, la CEC entre 9,17 et 15,02 Cmol.kg⁻¹, le phosphore assimilable Olsen varie de 0,66 à 1,49 ppm de P. Par contre les sols des figueraies ont un taux d'argiles compris entre 14,81 et 26,9 %, la teneur en carbone du sol entre 0,93 et 1,79 %, la CEC entre 10,72 et 19,91cmol. kg⁻¹, le phosphore assimilable Olsen varie entre 0,90 et 2,10 ppm de P.

La texture du sol global sous figueraie et oliveraie pour la même station, présente une faible différence pour les argiles. Elle est semblable pour les deux sols d'un même site (Tab. VI.2). Les sols de Bouira et Tizi-Rached présentent une texture limono-sablo-argileuse ; celui de Guendoul une texture limoneuse tandis qu'elle est limono-sableuse pour Nezla. Les pH sont similaires pour les deux espèces, ils sont neutres à l'exception des sols de Guendoul qui présentent un pH alcalin. Le taux de calcaire des stations de Bouira et Tizi-Rached est presque identique pour les deux espèces, par contre pour Guendoul et Nezla ce taux est

différent pour les deux espèces, le taux le plus faible est enregistré sous l'olivier de Nezla. Les résultats de l'azote total présentent une similarité pour tous les sols.

Les sols globaux sous les deux espèces pérennes présentent une certaine homogénéité pour l'ensemble des sites choisis (Tab.VI.2). En effet, l'homogénéité des sols et du substrat géologique, les conditions édaphiques et la proximité des sites d'étude permettent une comparaison des sols (Binkley, 1995). Ainsi est basé notre choix pour comparer l'effet racinaire de l'olivier avec le figuier sur des sols contigus, malgré certaines distinctions du statut initial des sols.

3.2. Impact de la racine sur les propriétés physique et chimiques des sols

Les résultats de l'analyse granulométrique révèlent une même texture pour le sol global et le sol rhizosphérique (Tab.VII.3). Toutefois, l'ensemble des sols étudiés présentent un taux d'argile plus élevé significativement ($p \leq 0,05$) dans la rhizosphère. Cette variation du taux d'argile à proximité des racines correspond aux résultats de Chiu et *al.*, (2002). Les racines jouent un rôle important dans le développement d'agrégats, par la libération de composés organiques (Gregory, 2006 ; Richardson et *al.*, 2009) qui fournissent un substrat aux bactéries de la rhizosphère qui vont à leur tour, libérer dans le milieu des composés tels que les polysaccharides responsable de l'agrégation des particules du sol entre elles (Stengel et Gelin, 1998). Et par accumulation de substances chimiques inorganiques à la surface racinaire, qui agissent comme agents cimentant (Gregory, 2006).

La matière organique libérée dans la rhizosphère pourrait induire la formation d'agrégats spécifiques (Watteau et *al.*, 2007) et favoriserait l'adhésion des particules argileuses avec des molécules de mucilage (Bonneau et Souchier, 1994). De plus les phénomènes d'humectation dessiccation favorisent l'agrégation des particules du sol entre elles (Callot et *al.*, 1982). Les racines par les fortes pressions qu'elles exercent, favorisent la microdivision des particules ce qui expliquerait l'enrichissement en argiles des sols rhizosphériques.

Tableau VI.3. Caractéristiques physique, chimiques et biochimiques des sols des deux espèces.

Stations	Espèce	sol	A%	pH	CaCO ₃ %	C %	Nt %	CEC (cmol,kg ⁻¹)	P s (ppm)	Passi (ppm)	Pt (ppm)	Kass (mg/100g)
Bouira	<i>O. europea</i>	G	21,56	7,05	11,81	0,7	0,13	8,99	1,102	1,102	3,756	8,79
		Rh	27,02	7,01	16,25	1,1	0,16	9,35	1,144	1,144	4,126	13,09
	<i>F. carica</i>	G	24,38	7,11	15,42	0,8	0,17	9,50	2,2	2,2	5,092	8,78
		Rh	28,8	7,09	17,78	1,1	0,17	11,94	1,996	1,996	5,194	15,76
Guendoul	<i>O. europea</i>	G	13,66	8,21	25	1,9	0,06	14,49	0,59	0,59	3,905	10,73
		Rh	14,74	8,22	24,17	2,2	0,07	15,54	0,72	0,72	4,342	13,82
	<i>F. carica</i>	G	14,21	8,15	26,67	1,5	0,13	14,11	0,996	0,996	6,832	10,54
		Rh	15,42	8,15	26,81	2,1	0,13	15,05	0,81	0,81	6,554	13,6
Nezla	<i>O. europea</i>	G	17,64	6,89	2,36	1,0	0,09	11,51	1,19	1,19	4,12	10,7
		Rh	20,82	6,52	3,83	1,8	0,12	12,52	1,792	1,792	4,802	13,4
	<i>F. carica</i>	G	20,37	7,47	3,75	1,5	0,09	17,71	2,2	2,2	7,206	10,54
		Rh	24,32	7,36	6,11	1,9	0,12	18,37	1,996	1,996	6,932	13,2
Tizi-Rached	<i>O. europea</i>	G	21,9	7,01	11,11	0,6	0,1	10,48	1,072	1,072	5,482	7,49
		Rh	23,43	7,07	17,5	1,5	0,13	10,32	0,94	0,94	4,606	12,88
	<i>F. carica</i>	G	26,9	7,06	8,94	1,3	0,14	21,01	1,816	1,816	8,15	12,9
		Rh	28,45	7,17	12,08	1,9	0,13	18,82	1,406	1,406	7,206	12,91

Le pH des sols est neutre à légèrement alcalins avec peu de différence entre le pH du sol rhizosphérique et celui du sol global (Fig.VII.1a). Le pH diminue significativement ($p \leq 0,016$ pour l'olivier et $p \leq 0,013$ pour le figuier) dans la rhizosphère des deux espèces. Les pH semblables dans la rhizosphère et le sol distal sont dus au fort pouvoir tampon exercé par les carbonates de calcium dans ces sols (Hinsinger et *al.*, 2003). Ström et *al.*, (2005), observent une faible voir une absence de chute de pH dans les sols calcaires. Dans les sols calcaires, l'exsudation élevée d'acide organique ne mène pas nécessairement à un abaissement mesurable du pH dans le sol rhizosphérique (Ström, 1997 in Ström et *al.*, 2005).

L'acidification des sols rhizosphériques est importante chez beaucoup d'espèces arborescentes (Augusto et *al.*, 2002 ; Ma et *al.*, 2009 ; Dinesh et *al.*, 2010). Ce fait est lié à la libération des H^+ par la respiration racinaire et l'activité des microorganismes des sols (Hinsinger et *al.*, 2006) avec la libération d'exsudats acides dans la rhizosphère (John et Darrah., 1994 ; Hinsinger et *al.*, 2009).

Le calcaire total varie dans le sol rhizosphérique de l'olivier (Fig. VII.1b), ces des sols calcaire (Tab. VII.3). La teneur en calcaire total dans les sols globaux sont légèrement élève comparativement aux sols rhizosphériques mais d'une façon non significative. Cette accumulation de calcaire dans les sols rhizosphériques s'explique par le transport de Ca^{2+} vers la surface racinaire par mass-flow et le prélèvement préférentiel de K^+ par rapport à Ca^{2+} (Hinsinger et *al.*, 2005), avec une accumulation de Ca^{2+} à proximité immédiate de la racine. Dans certaines conditions, elle peut donner lieu à la précipitation de carbonate de calcium autour de la racine (Davet, 1996 ; Devau et *al.*, 2010).

Pour les deux espèces le carbone organique est plus élevé dans le sol rhizosphérique, cette augmentation est significative avec ($p \leq 0,03$) pour l'olivier et ($p \leq 0,001$) pour le figuier, de la valeur moyenne des teneurs en carbone (Fig. VII.1c). Des observations semblables sont observées chez différents végétaux dans diverses conditions pédoclimatiques (Chen et *al.*, 2006 ; Dinesh et *al.*, 2010 ; Calvaruso et *al.*, 2011). Environ 20 % de carbone assimilé par la photosynthèse est libéré par les racines dans le sol (Nguyen, 2003 ; Hinsinger et *al.*, 2005), ainsi la zone du sol autour des racines reçoit une plus grande entrée de carbone labile ; c'est la rhizodéposition (Kuznyakov et *al.*, 2006). Ces nombreux résidus retrouvés dans la rhizosphère sont colonisés par des microorganismes, ce qui explique aussi le contenu en carbone qui augmente dans la rhizosphère (Watteau et *al.*, 2006 ; Darrah et *al.*, 2006).

La capacité d'échange cationique est moyenne et légèrement plus élevée dans les sols rhizosphériques comparativement aux sols globaux (Fig. VI.1d), ceci est expliqué par les taux de matière organique et d'argile plus importants dans la rhizosphère (Turpault et *al.*, 2006), ce qui fournit plus de sites d'échange cationique disponibles (Chiu et *al.*, 2007). Une source d'augmentation de la CEC serait, des quantités élevées de matière organique non humique (Turpault et *al.*, 2007). Toutefois, cette différence entre le sol global et rhizosphérique des deux espèces demeure non significative ($p=0,07$ pour l'olivier et $p=0,16$ pour le figuier).

L'azote total est faible excepté le sol de Bouira (Fig. VII.2), avec une légère augmentation des sols rhizosphériques. Les acides aminés sont une source possible de l'azote, sur le plan efflux, ils peuvent également être libérés pendant que la racine exsude (Hinsinger et *al.*, 2003), la libération d'azote à faible poids moléculaire a toujours été élevée à proximité immédiate des racines (Violante et *al.*, 1998). Selon Gregory, (2006), les micro-organismes augmentent la disponibilité de l'azote par leur régulation de la dynamique de décomposition de la matière organique, la rhizosphère se trouve plus riche en azote total que les sols globaux, du fait de l'intensité de l'activité microbienne (Alguacil et *al.*, 2005).

Le potassium assimilable est plus important dans le sol rhizosphérique, il augmente d'une manière très hautement significative ($p\leq 0,04$ pour l'olivier et $p\leq 0,026$ pour le figuier) dans la rhizosphère des deux espèces (Fig. VII.3). Le sol rhizosphérique des deux espèces s'est enrichi en potassium assimilable (Mouas Bourbia et *al.*, 2012).

Ces deux espèces fruitières typiques du pourtour Méditerranéen ont induit une augmentation significative du potassium à proximité de leurs racines sur les sols choisis avec un statut initial différencié. Ces résultats vont dans le même sens que ceux signalés par Majdi et Bergholm, (1995) ; Bagayoko et *al.*, (2000) ; Chen et *al.*, (2006) ; Zhu et *al.*, (2006) ; Dinesh et *al.*, (2010) sur les plantes cultivées et certaines espèces forestières sous conditions édaphiques variables. Ces taux seraient le résultat de la libération du potassium dans la rhizosphère ajouté à son prélèvement continu par la racine.

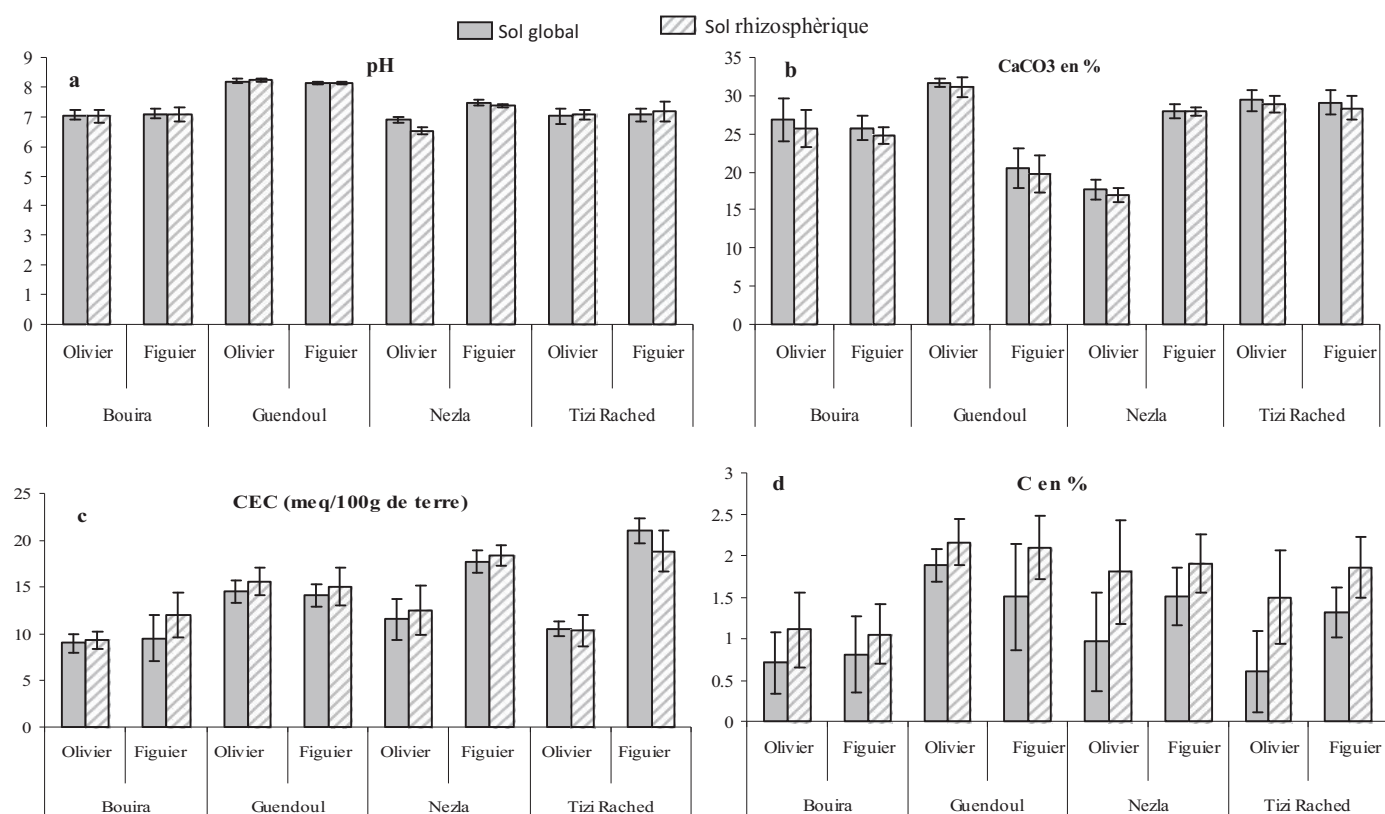


Figure VII.1. Caractéristiques chimiques des sols globaux et rhizosphériques des deux espèces a) pH (a), CaCO₃ (b), CEC (c) et Carbone (d).

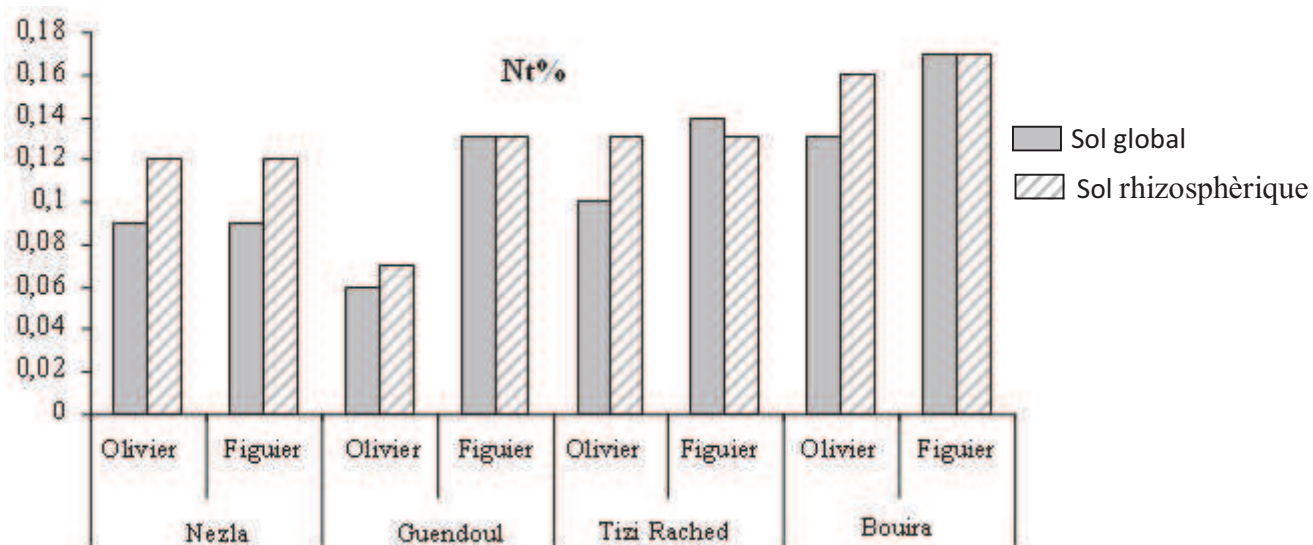


Figure VII. 2. Variation de l'azote total des sols de l'olivier et du figuier.

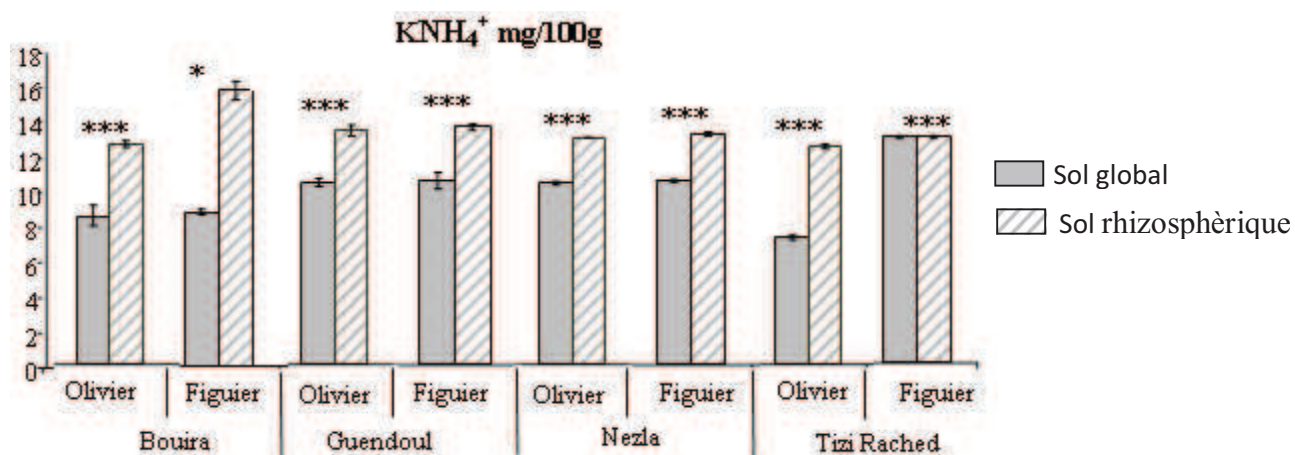


Figure VII. 3. Potassium assimilable dans la rhizosphère de l'olivier et du figuier.

La rhizosphère est enrichie en potassium. Hinsinger *et al.*, (1993), ont montré son rôle dans l'altération de certains minéraux primaires et la libération du potassium par ouverture des feuillets. Cette libération participe au rééquilibrage sol-solution dès que la concentration imposée de potassium en solution au contact du sol est inférieure à la concentration initiale (Girard *et al.*, 2005).

Ces résultats corroborent avec ceux déjà signalés par Gobran et Clegg, (1996) dans des conditions édaphiques et des espèces arborescentes différentes. Ce qui vient appuyer notre choix pour ces sites et espèces afin de mieux étudier la biodisponibilité du phosphore dans la rhizosphère de l'olivier en comparaison avec celle du figuier.

3.3. Impact de l'activité racinaire sur le statut phosphaté de la rhizosphère

Comparativement aux normes d'interprétation proposées par Jackson, (1967), les sols étudiés présentent un taux élevé en phosphore total excepté le sol rhizosphérique sous figuier de Bouira qui présente un taux moyen. Ce taux élevé en phosphore total peut être dû à la nature de la roche mère, puisque la quantité de phosphore présente dans le sol est une conséquence directe de la richesse de la roche mère en cet élément et de son degré d'altération (Stévenson, 1994). Il apparaît donc globalement que les teneurs en phosphore total sont légèrement élevées dans les sols globaux comparativement aux sols rhizosphériques (Fig. VII.4b).

Les teneurs en phosphore assimilable, dosé par la méthode Olsen, sont moyennes pour la majorité des stations à l'exception du sol de Guendoul qui a un taux faible. La majorité des sols globaux sont plus riches en POIs comparativement aux rhizosphériques (Fig. VII.4a).

La diminution de la concentration en ions phosphatés, de la solution du sol, au voisinage des racines est mise en évidence par de nombreux auteurs Barber, (1995) ; Hinsinger, (2004). Elle peut être expliquée par l'immobilisation des ions phosphatés par la biomasse microbienne suite au phénomène de réorganisation pendant la période d'absorption du phosphore par la plante (Morel, 2002). Le prélèvement important du phosphore par la racine comparativement à sa faible diffusion dans le sol et son lent transfert vers la racine (Stengel et Gelin, 1998 et Jaillard et *al.*, 2000). Cependant, l'importance de l'accessibilité des racines aux ions phosphatés suite à l'action des microorganismes stimulée par l'activité racinaire, qui elle même, participe à la dissolution des phosphates qui améliore le flux du phosphore dans le sol (Marschner et *al.*, 2005 ; Tarafdar et Claaseen, 2005). Cette variation explique l'intensification écologique liée au rôle des organismes vivants du sol dans l'accroissement de la disponibilité du phosphore pour la plante (Hinsinger et *al.*, 2009).

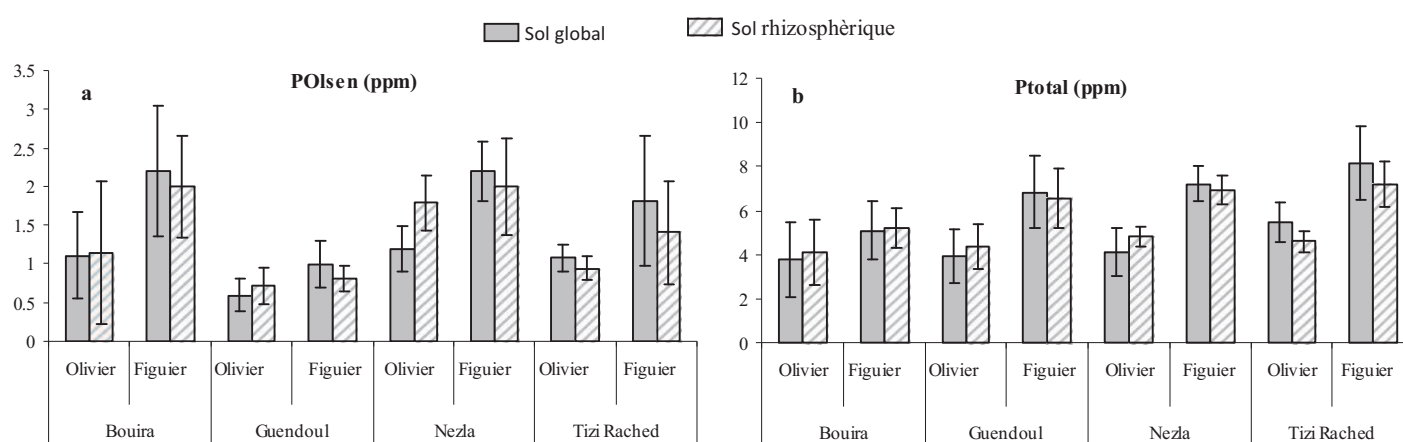


Figure VII.4. Variation des teneurs en phosphore dans les sols rhizosphériques et les sols globaux sous l'olivier et figuier, a) POls ; b) Pt.

Violante et *al.*, (1998), ont étudié la distribution de N, P et K dans la rhizosphère du maïs cultivé au champs, indiquent que les concentrations de phosphore dans les sols rhizosphériques sont sensiblement inférieures à celles des sols globaux. Les sols calcaires sont connus pour leur faible teneur en phosphore assimilable, ce qui s'explique par la formation de complexes (Ca-P et Mg-P) qui insolubilisent le phosphore (Ström et *al.*, 2005). Pour ce qui est de la diminution de la concentration en phosphore assimilable dans le sol rhizosphérique, elle est consécutive de l'intensité du prélèvement de la racine (Morel et Hinsinger, 1998 ; Stengel et Gelin, 1998 ; Devau et *al.*, 2011). Le transport convectif du phosphore vers les racines ne permet de couvrir que quelques pourcents des besoins des végétaux (Hinsinger, 2001 ; Devau et *al.*, 2009).

La forme soluble du phosphore est très faible pour l'ensemble des sols. Toutefois les teneurs en phosphore extrait à l'eau sont plus importantes dans les sols globaux comparativement aux sols rhizosphériques. Nous observons aussi une légère augmentation de cette forme de phosphore dans les sols rhizosphériques sous olivier par rapport au figuier. Cette variation peut être liée au fait que l'échantillonnage a été fait en période de repos hivernal.

3. 4. Comparaison entre les sols des deux espèces

L'analyse des corrélations, entre les propriétés des sols globaux et celles des sols rhizosphériques de l'olivier et du figuier, varie de très hautement significatives, à hautement significatives et significatives (Fig. VII. 5). Ces variations indiquent que la magnitude des modifications dans la rhizosphère dépend du statut initial des sols. Il est connu que l'importance des modifications dépend considérablement des caractéristiques initiales du sol, aussi bien de l'espèce végétale et son génotype (Barber, 1974 ; Revira et Davies, 1974 in Violante, 1998 ; Chaignon, 2002). Des propriétés aussi importantes pour la fertilité des sols comme l'azote, la CEC et l'argile sont concernées (Fig.VII.5a et VII.5b). Une corrélation très hautement significative entre le CaCO_3 Rh et pH Rh (Fig.VII.5c), qui confirme le rôle tampon du calcaire dans le maintien d'un pH neutre à alcalin dans les sols.

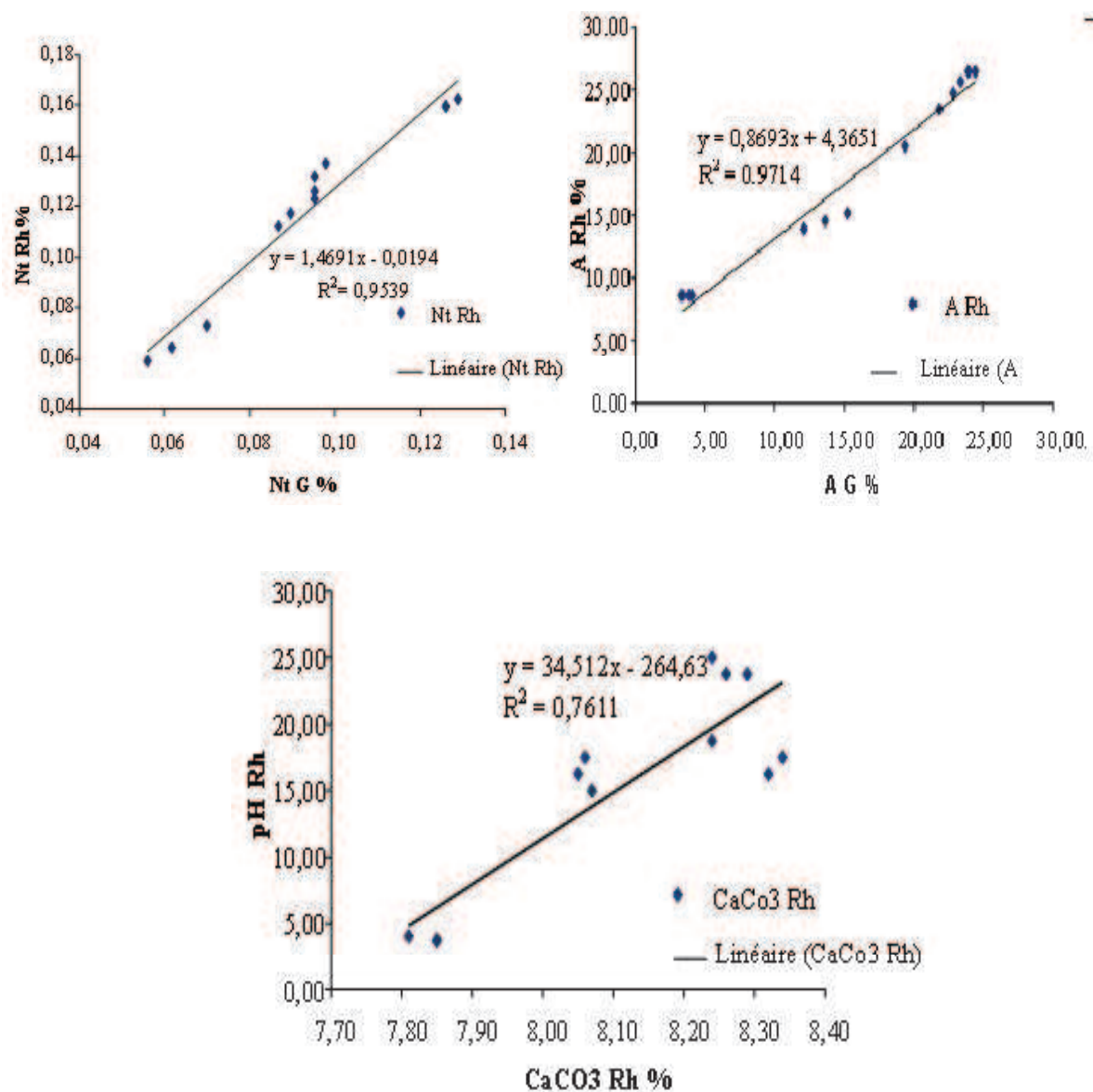


Figure VII.5. Relation entre : a) l'azote total global et l'azote rhizosphérique ; b) l'argile global et l'argile rhizosphérique et c) variation du calcaire et du pH dans les sols rhizosphériques.

Le test d'homogénéité effectué par le test de normalité compare les sols globaux de l'olivier à ceux du figuier d'une même station. L'analyse granulométrique indique que les sols rhizosphériques diffèrent entre eux pour le pourcentage d'argile et de limon, en effet le sol rhizosphérique du figuier présente une teneur plus élevée en argile.

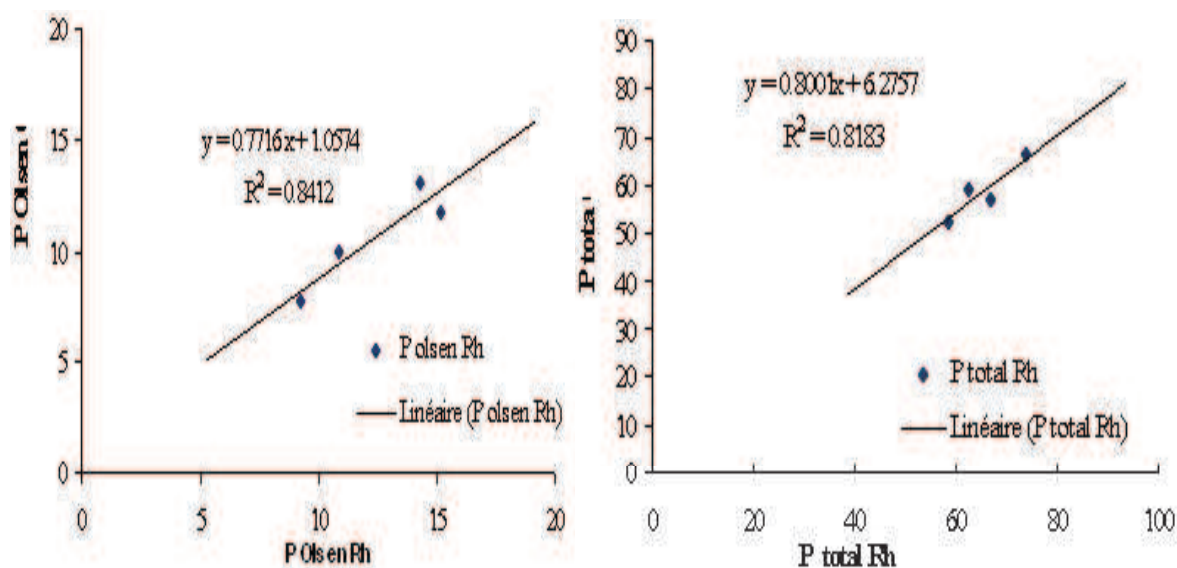


Figure VII.6. Relation entre ; a) le POls global et le POls rhizosphérique et b) le Ptot global et le Ptot rhizosphérique.

Les pH des sols rhizosphériques de l'olivier sont légèrement supérieurs à ceux du figuier de 0.1 unité à l'exception du sol de l'oliveraie de Nezla (Fig.VII.1a). Ce qui est contraire par rapport au calcaire total (Fig.VII.1b) à l'exception des sols de Tizi Rached..

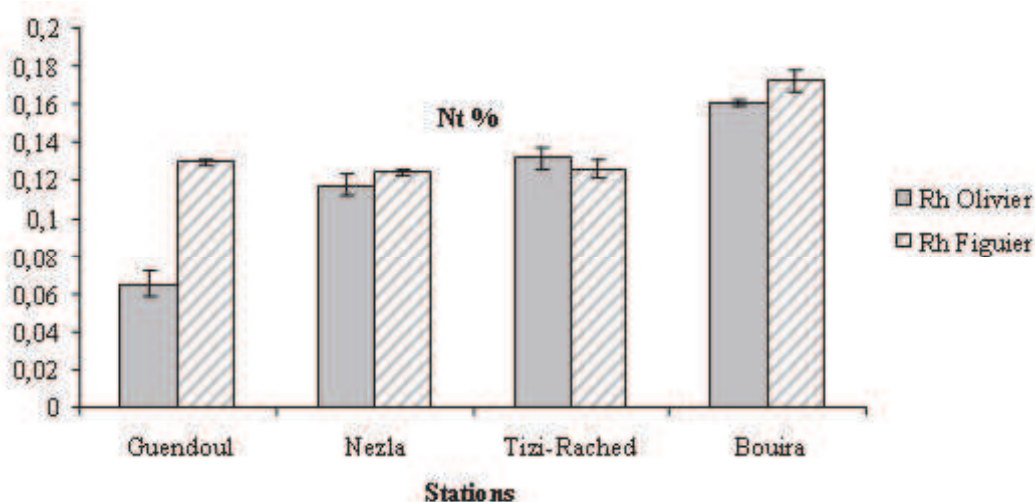


Figure VII.7. Amélioration de la teneur en l'azote total à proximité des racines du figuier

La concentration en phosphore assimilable Olsen dans la plupart de sols rhizosphériques est légèrement plus importante dans les sols du figuier (Fig. VII. 8.).

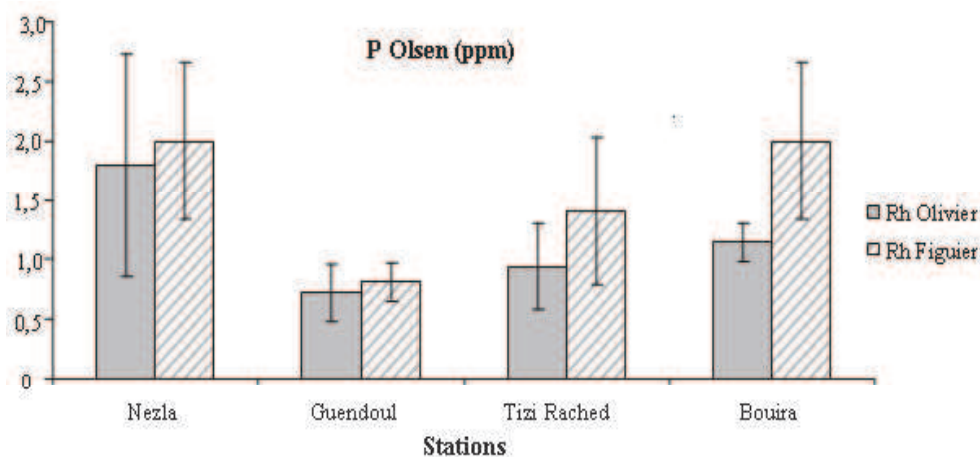


Figure VII.8 Enrichissement de la rhizosphère du figuier en phosphore assimilable.

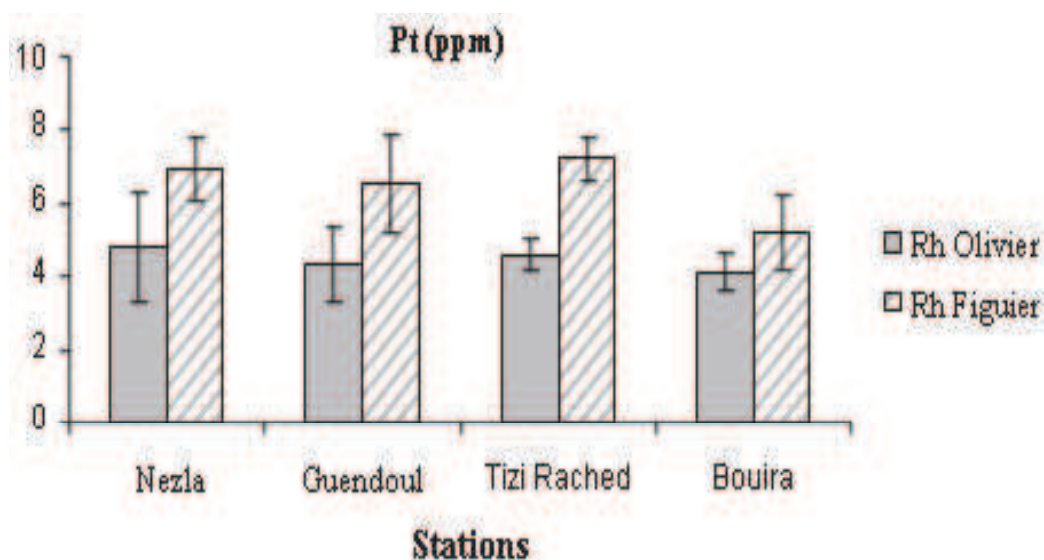


Figure VII.9. Variation du phosphore total des sols rhizosphériques de l'olivier et du figuier

La rhizosphère du figuier semble être plus active que celle de l'olivier (Fig. VII. 9.), les deux arbres étant au même stade phénologique soit au repos végétatif hivernal. Divers auteurs, ont constaté des modifications différentes des propriétés physiques, biochimiques et chimiques d'un même sol cultivé avec des espèces différentes, voire des génotypes différents. Aussi Romheld et Neumann (2006), soulignent que pour comprendre la cause et l'étendue des

changements de certaines conditions dans la rhizosphère, il est nécessaire de considérer les espèces associées aux différentes caractéristiques du sol.

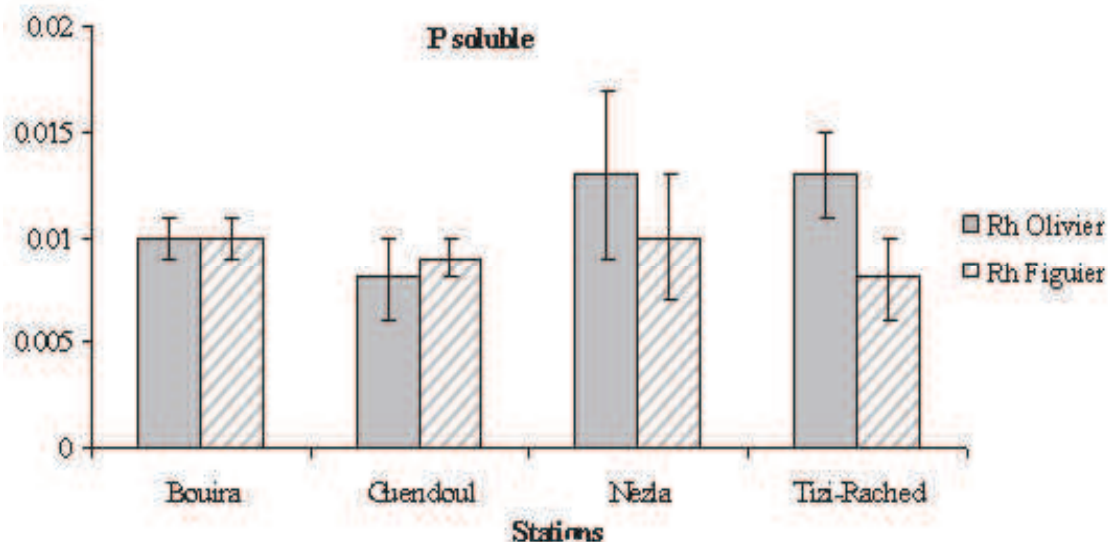


Figure VII.10. Variation du phosphore soluble des sols rhizosphériques.

Les teneurs en phosphore biodisponible, ont diminué dans la rhizosphère des deux espèces, mais de façon plus importante à proximité de la racine de l'olivier (Fig. VII. 8, 9 et 10). Ces variations entre les deux espèces pourraient être dues à la physiologie, au métabolisme et au développement du système racinaire de l'olivier plus important avec une abondance de racines fines actives.

3.5. Biomasse racinaire des deux espèces

La méthode choisie pour estimer la biomasse racinaire chez l'olivier et le figuier nous a montré que les horizons supérieurs présentent une abondance plus importante comparativement aux horizons profonds.

La biomasse des racines contenus dans le cylindre utilisé est en moyenne de $12,5 \text{ g.dm}^{-3}$ pour l'olivier dans le premier horizon (0-12cm) par contre pour le figuier, elle est de $3,94 \text{ g.dm}^{-3}$ (0-15cm). Cependant, elle est réduite à 5 g.dm^{-3} entre 10 et 25 cm pour l'olivier et $1,7 \text{ g.dm}^{-3}$ pour le figuier. Les horizons les plus profonds présentent très peu de racines fines, le système racinaire d'encrage domine. En effet, Drénou, (2006) et Gregory, (2006) ont montré

que les racines profondes sont « l'assurance-vie de l'arbre » lors de sécheresses. Des résultats similaires sont observés sur des arbres forestiers (Nepstad et *al.*, 1994 ; Canadell et *al.*, 1996). L'olivier présente la plus forte biomasse racinaire dans les deux horizons supérieurs de prospection racinaire comparativement au figuier. Il est important de signaler que les racines fines se développent loin du tronc chez l'olivier alors que chez le figuier elles sont bien réparties du tronc vers la frondaison.

L'ACP a révélé deux groupes homogènes (Fig. VII.11). Le groupe A rassemble les argiles et le carbone organique, ces propriétés influent paramètres hydriques du sol. Les racines jouent un rôle d'interface entre la plante et le sol par le contact et le volume du sol exploré qui règle, en partie, l'absorption de l'eau et des nutriments (Caldwell et *al.*, 1987). Ainsi, l'absorption préférentielle de l'eau à partir des horizons de surface, quand ils sont suffisamment humides, favorise les mouvements d'ions vers les racines ; et ces derniers se produisent dans une zone bien pourvue en éléments nutritifs (Piégay et *al.*, 2003). Face aux conditions variées du sol, la croissance des systèmes racinaires est fonction des contraintes mécaniques qu'exerce le substrat sur la racine. Cependant, lorsque la taille des particules devient trop importante, la présence d'obstacles non-mobiles oblige la plante à allouer une quantité d'énergie plus importante à la racine pour une distance donnée ; la croissance du système souterrain en est donc ralentie (Pautou et *al.*, 2003).

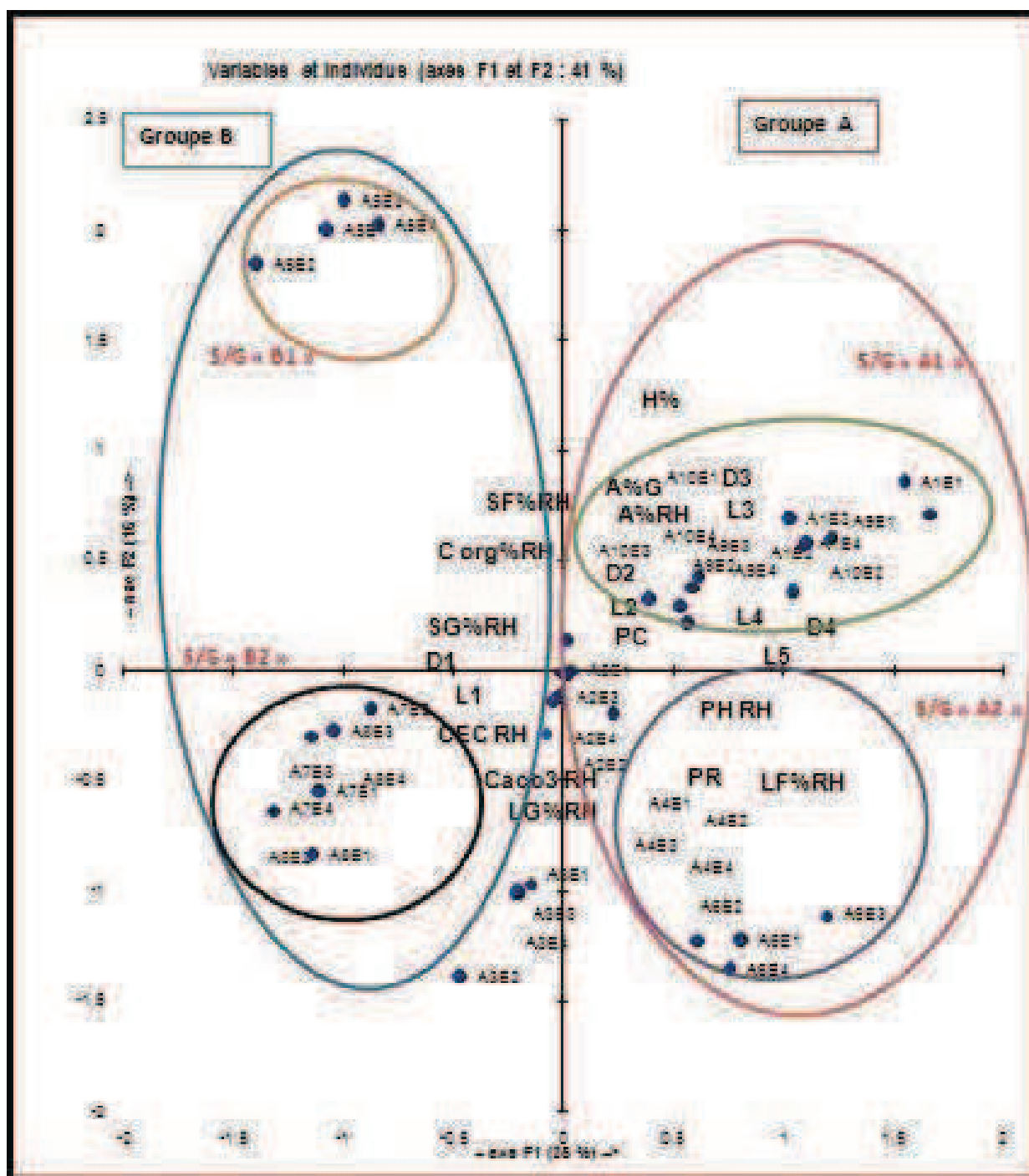


Figure VII.11. ACP de l'interaction des caractéristiques physico-chimiques et la biomasse racinaire.

Le groupe B se caractérise par la présence d'un taux de calcaire important qui peut être expliqué par l'accumulation du calcium dans la rhizosphère ce qui conduit à des précipitations de carbonates de calcium autour des racines et à la formation des concrétions (Hinsinger, 1998). La fraction calcaire, la plus fine est capable de passer en solution et d'arriver au terme de son cheminement au système racinaire. Tant qu'il reste incorporé à l'eau constitutive du sol, ce calcaire actif pulvérulent est loin d'être nocif, parce qu'il maintient la coagulation de l'argile et tend à neutraliser l'acidité humique. Mais à partir du moment où il circule, il rentre en contact avec les racines, les enrobe dans une sorte de manchon asphyxiant et bloque l'absorption du fer par la plante ; les feuilles jaunissent, s'étiolent et le sujet dépérit par chlorose (Bethemont, 1998). Souvent la fourniture du sol en calcium est supérieure aux besoins du végétal, aboutissant à une accumulation de ce cation dans la rhizosphère où il interagit avec l'acide carbonique et se précipite sous forme de calcaire (Chaignon, 2001). Une forte charge en éléments grossiers ne constitue pas une contrainte pour le développement racinaire profond ; des racines aplaties et très déformées sont observables entre les éléments grossiers. Certains arbres compensent une faible profondeur du sol par une réduction de l'allocation de ressources au pivot, au profit des racines traçantes, pivots secondaires et racines proches de la limite inférieure d'enracinement (Cucchi et *al.*, 2004).

3.6. Coupes anatomiques réalisées sur les racines d'oliviers et de figuiers

L'observation au microscope photonique des coupes anatomiques réalisées sur des radicelles de diamètres compris entre [0.5-1[, [1-2[, [2-3[mm a montré la présence d'une structure primaire dans toutes les coupes observées et le début de la formation d'une structure secondaire dans les racines les plus jeunes ayant un diamètre compris entre [0.5-1[mm. La présence d'endomycorhizes à arbuscules (chapitre 5) chez *Olea europea* L. a été confirmé par Khelfane, (2001) pour les vergers de Kabylie et par (Calvente et *al.*, 2003) dans les vergers ibériques. Par contre pour le figuier nous avons la présence d'une structure primaire dans toutes les coupes observées, avec des racines flexibles et moins ramifiées, contrairement à l'olivier. En effet, le début de formation d'une structure secondaire dans les racines ne se présente que dans la classe de diamètre compris entre [1-2[mm. L'ensemble des racines des deux espèces sont mycorhizées avec une fréquence importante, de plus la prépondérance de racines fines pour l'olivier comparativement au figuier (Nait Kaci et *al.*, 2010).

3.7. Approche écologique de la mycorhization au niveau des sols étudiés

Les facteurs pédoclimatiques jouent un rôle important dans le développement des mycorhizes, le meilleur développement des mycorhizes est observé au printemps (Avril – Mai) et en automne au moment de la chute des feuilles (Gobat et *al.*, 1998), alors que nous avons échantillonné durant la période hivernale. Même si cette période est défavorable pour le développement des mycorhizes, la mycorhization persiste.

La mycorhization des racines étudiées, malgré la présence d'une longue période sèche, indique l'adaptation des genres fongiques autochtones à la sécheresse. Les propriétés du sol ont une grande influence sur le développement des mycorhizes, la texture équilibrée des sols étudiés est plus favorable à la formation du complexe mycorhizien. Pour Boullard (1968), les sols calcaires sont peu favorables à la croissance des mycorhizes, cependant, ce qui n'est pas le cas des racines observées chez les deux espèces.

Les racines commencent à se lignifier à partir de [0.5-1[mm chez l'olivier, alors que pour le figuier, la lignification apparaît sur des racines de diamètre plus élevé soit [1-2[mm. Toutes les racines colorées par la technique de Philips et Hayman ont montré la présence des champignons mycorhizogènes à arbuscules avec la présence des endophytes chez l'olivier (chapitre V).

Il est intéressant de noter que la racine des deux espèces a prélevé sur le phosphore total, pool généralement considéré comme peu disponible. Le figuier semblerait même plus efficace dans l'utilisation de ce pool. Ce qui précède a permis de déterminer un effet espèce, la rhizosphère du figuier semblerait plus active que celle de l'olivier. La présence de symbioses mycorhiziennes associées à la présence d'une zone à proximité immédiate de la racine de sol plus propice à la biodisponibilité des éléments nutritifs ne semblerait pas suffire pour satisfaire les besoins en phosphore de l'olivier. La lignification plus précoce des racines actives de l'olivier comparativement à celles du figuier semblerait conduire à deux stratégies différentes d'utilisation des sols. Pour l'olivier ce serait un système racinaire plus important, avec des racines fines actives plus nombreuses, avec un impact moins important sur un volume de sol donné. Par contre, les racines du figuier procéderaient par un impact plus important sur le sol à leur proximité immédiate.

4. Conclusion

Les processus rhizosphériques sont reconnus comme une des stratégies majeures élaborées par les plantes afin d'augmenter la disponibilité en phosphore et ainsi améliorer leur nutrition phosphatée. Pourtant, l'effet exact de ces processus est encore mal caractérisé et quantifié. L'objectif de ces travaux a été de déterminer le rôle exercé par les modifications chimiques induites par les racines des deux espèces dans la rhizosphère. Malgré que l'olivier soit au stade phénologique de repos hivernal, le maintien des feuilles, ce qui n'est pas le cas pour le figuier, permettrait que des fonctions végétales telles que la photosynthèse et la transpiration subsistent quoique de façon plus ralentie, dans la partie aérienne de l'arbre. Au niveau des parties souterraines, en l'occurrence la rhizosphère, la rhizodéposition d'une partie des photo assimilats alloués aux racines et le mass flow généré par l'absorption de l'eau en réponse à la transpiration contribueraient à modifier significativement l'environnement racinaire de l'olivier. Par l'architecture de son système racinaire, le fonctionnement de sa rhizosphère, l'olivier, en plus de l'apport de litière au sol, contribue à maintenir la fertilité de l'agro système de l'olivier en région méditerranéenne. L'influence du figuier, en raison d'un système racinaire moins développé, sur le sol semblerait moins importante que celui de l'olivier. La compréhension de la morphologie et la fonction du système racinaire complet est nécessaire à la fois pour la production végétale et la protection de l'environnement (Abe, 2003). Les racines ont un rôle important dans le soutien de la plante, la synthèse des hormones et l'absorption de l'eau et des nutriments du sol. Dans la rhizosphère, qu'est le volume du sol influencé par les racines vivantes d'une plante, et une zone d'échange particulièrement riche en micro-organismes et leurs activités conditionnent l'importance et la qualité de la production végétale (Lucas, 2002). Cette mobilisation chimique des nutriments par les plantes, aboutit à la diminution de leur concentration dans la solution du sol due à l'absorption racinaire (Violante et *al.*, 1998). La gamme des activités racinaires fait de la rhizosphère un environnement particulier. Elle est à la base des modifications physiques, chimiques et minéralogiques des sols entourant la racine, comparativement au sol indemne de toute activité racinaire (Hinsinger et *al.*, 2005). Une étude du système racinaire et de l'impact des deux espèces sur le sol au voisinage des racines au cours de la reprise de la végétation s'avère nécessaire, suivi d'une estimation de l'effet rhizosphérique en quantifiant la biomasse microbienne et fongique, afin de mieux rendre compte de l'influence respective de l'olivier et figuier sur les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des sols.

Discussion générale & perspectives

Vers une hiérarchisation des changements rhizosphériques impliqués dans le contrôle de la biodisponibilité en phosphore dans la rhizosphère de *Olea europea*

Les différentes études ont permis de répondre aux objectifs de la thèse. Ces objectifs étaient d'évaluer la biodisponibilité du phosphore dans la rhizosphère de l'olivier dans différents sols du nord de l'Algérie. La compréhension des processus de réapprovisionnement de la solution du sol à l'interface sol/racine est suivie d'une étude du système racinaire et de ses symbiotes, avec la hiérarchisation des facteurs édaphiques. Des perspectives sont présentées après avoir donné l'intérêt de chaque partie de la thèse.

Les oliveraies constituent l'un des symboles de l'agriculture de montagne et des paysages de la Kabylie au nord de l'Algérie. Cette culture bénéficie actuellement d'un regain d'intérêt sur l'ensemble du territoire, une situation paradoxale alors que des terres propices à cette culture dans plusieurs régions d'Algérie sont actuellement laissées à l'abandon, dégradées et parfois incendiées. L'olivier et l'oléiculture, au sens large, constituent ainsi un patrimoine à préserver. L'une des stratégies possibles pour sa pérennisation repose sur une production à faibles niveaux d'intrants, telle que préconisée dans le cadre d'une agriculture biologique.

Le phosphore est un nutriment nécessaire à la croissance des végétaux supérieurs. Il est essentiel au métabolisme cellulaire de l'ensemble des organismes vivants (Mengel et Kirkby, 2001 ; Devau, 2010). Cependant, malgré son importance, il est fréquemment le moins disponible dans le sol en raison de l'aptitude d'un grand nombre de constituants du sol à le retenir fortement et de la faible solubilité des minéraux phosphatés. Il est considéré comme le nutriment, limitant le plus, la croissance et le développement des plantes dans de nombreux sols, principalement dans les sols calcaires des régions méditerranéennes (Matar et *al.*, 1992).

Dans ce contexte, l'objectif central de cette approche était donc de caractériser l'environnement physique, chimique et biologique de la rhizosphère de l'olivier et son influence sur la biodisponibilité du phosphore. Les acquis sur le fonctionnement de la rhizosphère et l'utilisation de l'effet rhizosphérique dans l'objectif d'un rendement de qualité des agroécosystèmes sont limités. Ces recherches permettent de comprendre les changements rhizosphériques qui déterminent la nutrition phosphatée d'une espèce pérenne en fonction du type de sol étudié, d'une part et hiérarchiser les facteurs qui influencent les processus à l'interface sol/racine sur la biodisponibilité de cet élément, d'autre part.

Ce travail nous permet de dire que les racines de l'olivier utilisent certaines stratégies comme les photoassimilats pour s'adapter aux milieux déficients en éléments nutritifs, afin de créer un environnement plus favorable à son développement et à sa pérennité. Cette allocation racinaire sous forme d'exsudation de rhizodépôts avec un développement racinaire particulier améliore la nutrition minérale. Ces résultats sont une occasion de fournir aux oléiculteurs une nouvelle méthode de fertilisation des vergers, en se basant sur la gestion de la rhizosphère et les processus rhizosphériques, dans le cadre d'une oléiculture durable.

Les travaux sur la rhizosphère menés en conditions contrôlées sont nombreux et nécessaires pour cerner et comprendre la multiplicité et la difficulté des processus mis en œuvre dans le fonctionnement de la rhizosphère. Cependant, malgré les progrès indéniables que ces études ont permis dans la connaissance du fonctionnement de la rhizosphère, les résultats s'avèrent difficiles à appliquer sur le terrain. Ainsi, dans ce contexte nous avons choisi de travailler dans les conditions au champs.

La principale question que nous nous sommes posés et qui résume assez fidèlement la problématique de cette thèse est : la biodisponibilité du phosphore est-elle modifiée dans la rhizosphère de l'olivier ?

En effet, les plantes grâce à leurs racines et aux microorganismes associés sont capables d'influencer les processus biogéochimiques contrôlant la disponibilité en phosphore, en modifiant les propriétés physiques et chimiques de la rhizosphère (Hinsinger, 2001 ; Devau, 2010). Il est difficile d'identifier les modifications induites par les racines impliquées dans la nutrition phosphatée dans un milieu complexe comme le sol (Jones et *al.*, 2003 ; Zhang et *al.*, 2009).

La première partie de cette thèse s'est intéressée exclusivement à l'olivier et ses exigences pédoclimatiques, à l'échelle d'un agrosystème. L'objectif principal était d'étudier la nature et la variation du statut phosphaté dans la rhizosphère de l'olivier, d'où l'originalité de ce travail à notre connaissance. Il a été donc essentiel de déterminer la concentration en phosphore pouvant être acquise dans la rhizosphère. Toutefois, les différents processus rhizosphériques responsables des changements de disponibilité en phosphore dans la rhizosphère de certaines espèces annuelles, particulièrement celle du blé dur ont dû être déterminés avec des simulations. Les processus rhizosphériques sont responsables du changement de disponibilité du phosphore avec un appauvrissement en cet élément induit par le prélèvement continu à l'interface sol/racine. Néanmoins, il est reconnu pour certaines

espèces annuelles (blé, maïs) et pérennes (essences forestières) un appauvrissement des formes de phosphore dites assimilables dans cette interface. Cette diminution est liée à la faible concentration en ions phosphates dans la solution du sol, ce qui ne permet généralement pas de compenser son prélèvement et qui aboutit à la diminution de la disponibilité en cet élément dans la rhizosphère (Gahoonia et *al.*, 1992 ; Kirk et Saleque, 1995 ; Hinsinger et Gilkes, 1995). Pour appréhender cette question, nous avons échantillonné le sol global et le sol rhizosphérique de dix sept oliveraies de la variété *Chemlal*, contrastées par la nature du substrat géologique et parfois le climat. Les résultats ont permis de mettre en évidence un appauvrissement systématique des formes biodisponibles du phosphore dans la rhizosphère de l'olivier.

Parallèlement au changement des formes biodisponibles du phosphore dans la rhizosphère de l'olivier, des modifications chimiques significatives de certaines propriétés de la rhizosphère ont été mises en évidence. La teneur en carbone organique du sol, le calcaire total et la CEC sont plus élevés dans la rhizosphère. Le pH subit une acidification, c'est une modification liée à l'activité racinaire et à la contribution des minéraux à l'adsorption du phosphore. Ces propriétés des sols sont fortement impliquées dans leur fertilité. Il est bien connu que les horizons supérieurs de sols sous arbres sont enrichis en éléments nutritifs par le jeu des cycles biogéochimiques, sachant que les racines sont bien développées dans les premiers centimètres (Chapitre V et VII). Nous avons pu montrer que l'activité de la racine de l'olivier affectait la qualité des sols et contribuait aussi à la stabilité de l'agrosystème oliveraie par la création des ilots de fertilité autour des racines. En effet, cette rhizosphère est connue comme étant le siège d'intenses modifications des propriétés physiques, biologiques et chimiques du sol induites par l'activité racinaire. Ainsi, ses propriétés diffèrent grandement de celles du sol distal. Les effets des fonctions rhizosphériques modifient la disponibilité en phosphore dans la rhizosphère et *in fine* son prélèvement par les plantes (Hinsinger, 2001 ; Hinsinger et *al.*, 2009). La rhizosphère est ainsi largement vue comme un «hot spot» biogéochimique (Darrah, 1993 ; Devau et *al.*, 2010). Cependant, il est souhaitable de compléter ce travail par une étude physique approfondie du sol pour mieux cerner le bilan hydrique ; une extraction séquentielle des formes de phosphore ; une détermination des teneurs en oligo-éléments particulièrement le bore ; une identification de la microflore solubilisatrice du phosphore dans le sol avec une étude temporelle sur la dynamique et la biodisponibilité de tous les éléments nutritifs.

En absence de fertilisation phosphatée, le phosphore prélevé par les olives est exporté hors parcelle chaque année avec pour conséquence un appauvrissement progressif des sols en cet élément. Ainsi, dans une seconde étape, nous avons cherché à évaluer les effets d'apports croissants d'engrais phosphatés appliqués en mode localisé sur les propriétés chimiques de la rhizosphère. Cependant, l'efficacité des engrais phosphatés à augmenter la disponibilité en phosphore du sol, et donc le rendement, varie fortement en fonction du sol considéré. Cette partie de la thèse a aussi porté sur la distribution des racines fines sous tous les arbres considérés dans le dispositif expérimental de l'olivieraie de Tizi Rached A.

Les observations révèlent que la densité de racines fines était plus importante dans les horizons de surface pour tous les arbres, avec une meilleure répartition de l'enracinement chez les arbres fertilisés. Cette variation est liée à la profondeur contenant par ailleurs les teneurs en matière organique et en éléments minéraux les plus élevées. Les effets de la fertilisation en mode d'apport localisé ont montré sans surprise une amélioration du potentiel alimentaire de la rhizosphère de l'olivier, avec des modifications du pH des sols rhizosphériques et un enrichissement en carbone organique. L'accroissement substantiel des formes azotées serait lié à la synergie entre l'azote et le phosphore en faveur de l'activité biologique. Ce mode d'apport des engrais phosphatés semble anticiper les changements dans cette interface racinaire. L'effet rhizosphérique de l'olivier freine l'acidification liée à l'ammonitrate apporté. Cependant, Solaiman et *al.*, (2007) et Zhang et *al.*, (2009) ont montré que suite à une fertilisation phosphatée, l'influence des variations de pH induites par les racines sur la disponibilité phosphatée semble également affectée par l'augmentation de la concentration totale en phosphore inorganique du sol. Zhang et *al.* (2009) ont ainsi mesuré une diminution de la disponibilité en P plus faible dans la rhizosphère d'un génotype de colza excréant de larges quantités de H^+ que dans celle d'un autre génotype n'excrétant que peu de H^+ dans le cas d'un sol non fertilisé, tandis que la diminution de la disponibilité en phosphore était identique pour les deux génotypes lorsque le même sol était fertilisé.

Les modifications de pH et de carbone organique ont induit des changements de la concentration des formes biodisponibles du phosphore dans la rhizosphère de l'olivier. Néanmoins, une étude ultérieure est indispensable pour apprécier dans quelle mesure les exsudats racinaires sont stabilisés dans le sol, après un apport localisé d'engrais.

Une fois que les propriétés chimiques et la biodisponibilité du phosphore dans la rhizosphère ont été établies, la question était de savoir :

si cet effet rhizosphérique s'étalait à la biologie de ces sols et si elles pouvaient constituer des indicateurs à la fois d'une pratique culturale et de la performance racinaire?

La démarche actuelle de l'impossibilité économique et environnementale de poursuivre l'augmentation de la consommation mondiale d'engrais phosphatés a fait apparaître un nouveau paradigme, qui est la nécessité d'une intensification des agrosystèmes, s'appuyant sur une meilleure exploitation des capacités des plantes à valoriser les ressources du sol en conditions de restriction des fertilisants. En effet, les résultats de la première étude (Chapitre III) indiquent que les racines de l'olivier ont un impact sur la biodisponibilité du phosphore avec une stratégie particulière. Néanmoins, l'appauvrissement en phosphore assimilable des sols rhizosphériques n'a pas empêché certaines oliveraies à améliorer leur nutrition phosphatée. Malgré la déficience des sols en phosphore, le phosphore foliaire est conséquent. Toutefois, l'exsudation racinaire est un phénomène responsable de la diffusion passive et contrôlée de composés solubles riches en sucres, acides aminés et organiques. Ces molécules permettent de faciliter l'acquisition des éléments minéraux en plus des acquis de la photosynthèse, ce qui stimule les relations symbiotiques à l'interface sol/racine. Ces composés carbonés constituent une source d'énergie pour les microorganismes présents dans la rhizosphère, sachant que la biomasse microbienne est 100 fois plus élevée dans la rhizosphère comparée au sol global (Achat, 2009 ; Devau et *al.*, 2010).

Les modifications des propriétés biologiques dans la rhizosphère sont reconnues pour influencer notamment les formes de phosphore organique à travers leurs effets sur le processus de minéralisation-organisation. L'augmentation de l'activité microbienne change les propriétés physico-chimiques du sol en affectant les processus d'adsorption-désorption et de précipitation-dissolution contrôlant la disponibilité en phosphore (Marschner et *al.*, 2006 ; Devau, 2010). Cependant, les associations symbiotiques jouent un rôle essentiel dans l'absorption des nutriments et peuvent aussi modifier la biomasse racinaire. Il est généralement admis que l'efficacité du système racinaire à explorer le sol pour l'absorption de l'eau et les éléments minéraux est améliorée quand les plantes sont dans des associations à bénéfices réciproques. Par exemple, dans le cas des mycorhizes, la rhizosphère augmente de plusieurs centimètres de la racine grâce aux développements du mycélium. Les résultats du chapitre (V), révèlent la présence des endomycorhizes à arbuscules, ainsi que des

champignons endophytes foncés septés (dark septate endophytes: DSE) au niveau de la majeure partie des racines écrasées et colorées avec la technique de Philips et Hayman. La plupart des structures caractéristiques des mycorhizes à arbuscules, les hyphes mycéliennes aussi bien extra, inter, qu'intracellulaires, des arbuscules ainsi que des vésicules ont été observées. Le champignon à hyphes mycéliens cloisonnés et mélanisés, très difficile à colorer, avec la formation de sclérotés intracellulaires. A notre connaissance, ces champignons sont observés pour la première fois chez l'olivier. Après avoir établi des relations entre les propriétés chimiques, phosphatées et biologiques des sols globaux et celles des sols rhizosphériques, nous avons constaté une relation étroite entre le phosphore soluble très utilisé pour diagnostiquer l'état nutritionnel phosphaté des sols et le phosphore assimilable dosé par la méthode Olsen, la mieux calibrée pour estimer la concentration en ions orthophosphates dans les sols.

Cette première partie descriptive débouche sur un état des lieux concernant les différents systèmes symbiotiques et leur distribution en fonction des vergers choisis. Il est très important sur le plan pratique de connaître la distribution et la fréquence de ces associations. Ce qui nous permet de conclure que ces symbioses, à effets bénéfiques, sont une réalité écologique. Il est important d'encourager le développement de nouvelles stratégies pour une gestion durable des agrosystèmes, afin de mieux gérer ces interactions, puis leurs rôles en tant que bio-protecteurs et bio-fertilisants. En effet, la mycorhization de l'olivier améliore sa nutrition minérale et lui offre une tolérance aux conditions de stress biotiques et abiotiques. Ces résultats justifient l'importance des valeurs en phosphore foliaire dans les vergers les plus carencés en phosphore Olsen (Chapitre III). Ce travail doit être complété par une analyse quantitative et comparative des processus physico-chimiques (diffusion) et biologiques (minéralisation et effet rhizosphérique) de réapprovisionnement de la solution en ions, ainsi qu'une caractérisation des racines fines sur plusieurs profondeurs (niveau concerné par le prélèvement de P par l'olivier). Faire la systématique des champignons avec l'intégration de la microflore bactérienne (technique de suspension-dilution) sur plusieurs saisons.

La composante biologique d'une rhizosphère, zone de sol « bio-influencée », intègre la capacité des racines à modifier la concentration en phosphore pouvant être prélevée à travers leurs effets sur les propriétés physico-chimiques du sol, d'où l'intérêt d'étudier la faune des sols sous ces vergers (Chapitre VI). L'importance de connaître la distribution

et l'abondance des invertébrés du sol nous a permis de mieux comprendre l'impact des variations des facteurs abiotiques sur le fonctionnement de ces organismes, sachant que les taxons sont utilisés comme bio-indicateurs des phénomènes climatiques. Cependant, les macro-invertébrés édaphiques sont connus pour leur rôle dans la régulation de nombreux processus écologiques qui participent au fonctionnement des écosystèmes terrestres. Leur abondance et leur diversité sont utilisées dans le calcul de différents indices de qualité du sol. Cette partie de la thèse décrit les facteurs qui structurent les communautés de macro-invertébrés du sol à l'échelle d'un verger. En effet, l'abondance et la diversité des communautés sont contrôlées par une suite de facteurs hiérarchisés qui agissent comme des filtres environnementaux, à des échelles spatiales et temporelles qui leur sont spécifiques. La structuration des sols dans ces régions, avec leur répartition en tenant compte de leur passé cultural sont autant d'attributs sur l'influence des communautés animales et végétales. Dans un second objectif, nous avons étudié les conséquences de l'aridité sur l'abondance de ces communautés et le fonctionnement de l'interface sol-racine. Y a-t-il une relation entre la distribution de la macro faune et les propriétés physico-chimiques de sols avec l'influence de la saison et le couvert végétal?

L'originalité dans ce chapitre est la variation hautement significative du phosphore assimilable dosé avec la méthode Olsen en fonction de l'abondance des macro-invertébrés, avec une différence entre les vergers. Ces premières données sur les macro-invertébrés des sols sous oliveraies et figueraies dans la région de Kabylie ont montré qu'en terme de variation saisonnière et d'abondance, ils sont structurellement différents et changent en fonction du gradient d'aridité. D'un point de vue fondamental, cette évaluation doit être confrontée à d'autres données nouvelles, notamment en raison de l'installation de nouveaux vergers dans plusieurs régions d'Algérie, dans un cadre de mise en valeur des sols dégradés. Il faut rechercher l'existence éventuelle d'un endémisme de cette faune des sols, lié à une adaptation stricte de tolérance aux stress, car ces invertébrés ne répondent pas aux mêmes conditions de richesse que les végétaux. Néanmoins, cette étude est la plus complète possible en ce qui concerne ces agrosystèmes en Algérie. Elle nous a permis de hiérarchiser les facteurs qui contrôlent leur abondance sous climat subhumide et semi-aride et d'apporter des valeurs de référence dans ces vergers. Malgré cela, leur rôle bénéfique dans le fonctionnement des sols et la fourniture de services écosystémiques est encore mal connu et peu utilisé par les gestionnaires du sol. Ils sont pourtant des indicateurs de la qualité des sols et doivent être considérés comme une ressource permettant de mieux gérer et améliorer les services fournis par les agro-écosystèmes.

Dans la dernière partie de la thèse, nous avons comparé l'effet rhizosphérique de *Olea europea* à celui de *Ficus carica*, espèce fruitière largement distribuée à l'instar de l'olivier dans les pays méditerranéens. Les deux espèces ont modifié significativement de façon similaire certaines propriétés de leur rhizosphère. Le carbone organique, la CEC, le calcaire total et le potassium assimilable mesurés augmentent significativement dans la rhizosphère des deux espèces, contrairement au phosphore biodisponible. Cette mobilisation chimique des nutriments par les plantes aboutit à la diminution de leur concentration dans la solution du sol due à l'absorption racinaire (Violante et al., 1998), avec un changement plus important à proximité de la racine de l'olivier. Ces variations entre les deux espèces pourraient être dues à la physiologie de l'olivier et au développement d'un système racinaire plus important, en densité et en biomasse, avec une abondance de racines fines comparativement au figuier. Ce chapitre nous a montré que les horizons supérieurs présentent une abondance racinaire plus importante comparativement aux horizons profonds chez les deux espèces. Toutefois, il est important de signaler que les racines fines se développent loin du tronc chez l'olivier alors que chez le figuier elles sont bien réparties autour du tronc vers la frondaison, flexibles et moins ramifiées.

L'observation au microscope des coupes anatomiques réalisées sur des radicelles de diamètres compris entre [0.5-1[, [1-2[, [2-3[mm a montré que les racines commencent à se lignifier à partir de [0.5-1[mm chez l'olivier, alors que pour le figuier, la lignification apparaît sur des racines de diamètre de [1-2[mm. Toutes les racines colorées et écrasées ont montré la présence des champignons mycorrhizogènes à arbuscules avec la présence des endophytes chez l'olivier uniquement. L'ensemble des racines des deux espèces est mycorhizé avec une fréquence importante. Une période sèche longue, un échantillonnage des racines en hiver, période défavorable pour le développement des mycorhizes et la présence du calcaire n'a pas empêché l'installation et la prolifération des champignons mycorrhiziens. Cette observation indique que cette microflore fongique autochtone s'adapte bien aux conditions pédoclimatiques difficiles de cette région d'Algérie.

Il est intéressant de noter que la racine des deux espèces a prélevé sur le phosphore total, pool généralement considéré comme peu disponible. Le figuier semblerait même plus efficace dans l'utilisation de ce pool. Ce qui précède a permis de déterminer un effet espèce, la rhizosphère du figuier semblerait plus active que celle de l'olivier. La présence de symbioses associées à la présence d'une zone de sol, à proximité immédiate de la racine plus propice à la

biodisponibilité des éléments nutritifs ne semblerait pas suffire pour satisfaire les besoins en phosphore de l'olivier. La lignification plus précoce des racines actives de l'olivier comparativement à celles du figuier semblerait conduire à deux stratégies différentes d'utilisation des sols. Pour l'olivier, ce serait un système racinaire plus important, avec des racines fines actives plus nombreuses, avec un impact moins important sur un volume de sol donné. Par contre, les racines du figuier procéderaient par un impact plus important sur le sol à leur proximité immédiate. Par l'architecture du système racinaire de l'olivier et le fonctionnement de sa rhizosphère, il contribue à maintenir la fertilité de l'agrosystème. Toutefois, l'influence du figuier est moins importante, ce résultat est probablement lié à sa nature caduque et sa biomasse racinaire moins développée.

Une étude du système racinaire et de l'impact des deux espèces sur le sol au voisinage des racines au cours de la reprise de la végétation s'avère nécessaire, afin de mieux rendre compte de l'influence respective de l'olivier et du figuier sur les sols. Des recherches complémentaires sont nécessaires afin d'approfondir l'effet rhizosphérique de ces deux espèces sur plusieurs stades phénologiques, en l'occurrence, la reprise de la végétation, période d'intense activité. La connaissance de la capacité de ces deux espèces à s'adapter à des sols déficients en éléments nutritifs par des processus de la rhizosphère est fondamentale. La sélection d'espèces plus aptes à mettre en œuvre ces processus pour s'adapter à des milieux déficients et dans un contexte de faibles intrants constitue l'un des leviers de l'intensification écologique.

Toutefois, des recherches ultérieures sont nécessaires pour évaluer dans quelle mesure la matière organique issue de la rhizodéposition est stabilisée dans ces sols. Parallèlement, la magnitude de la variation des concentrations en phosphore dans la rhizosphère était d'autant plus importante que celles du sol global. La prospection racinaire est orientée différemment chez les deux espèces pour gérer l'interface sol/racine d'où la nécessité d'une intensification de ces agro-écosystèmes, qui s'appuie sur une meilleure exploitation des capacités des plantes à valoriser les ressources du sol en conditions de restriction des fertilisants. Pour l'olivier non fertilisé, la prospection racinaire est plutôt horizontale avec une abondance des symbiotes mycorrhizogènes associés aux endophytes. Des études ont montré que le recours à une production à faibles niveaux d'intrants, telle que préconisée dans le cadre d'une agriculture biologique, est aussi rentable à long terme que les autres modes de production pour la réussite de l'oléiculture. Toutefois, un aménagement des sols (vergers) pensé dans une

vision de conservation de la biodiversité et des services écologiques que cette dernière fournit, constitue une forte stratégie et à moindre coût pour le contrôle de certains ravageurs. Une des limites de ce travail est la non prise en compte de la microflore bactérienne et l'identification des espèces fongiques responsables de l'intensité de l'effet rhizosphérique. Ce sont des investigations de recherches intéressantes pour la suite du travail, avec une étude parallèle en conditions contrôlées (pépinière). Ce qui nous permettra de déboucher sur d'autres perspectives de recherche comme une évaluation fiable de la biodisponibilité du P, la quantification des processus d'acquisition par les plantes, à savoir l'interception racinaire, le transport dans la solution et la mobilisation de ces ions afin de faire un bilan biogéochimique de cette biodisponibilité dans les sols des deux cultures. Ceci peut aboutir à une modélisation des relations entre sol global et sol à proximité de la racine. Ces modèles ont des conséquences importantes sur le plan agronomique. Ils permettent de pallier à la difficulté d'échantillonnage du sol rhizosphérique et/ou du rhizoplan.

- Abe J.J., 2003.** Roots : The dynamic interface between plants and the Earth. Ed. Springer .472p.
- Achat D., 2009.** Biodisponibilité du phosphore dans les sols landais pour les peuplements forestiers de pin maritime. Thèse de doctorat en Ecologie évolutive, fonctionnelle et des communautés. Université de Bordeaux1.292p.
- Addy H.D., Piercey M.M. and Currah R.S., 2005.** Microfungal endophytes in roots. Department of Biological Sciences, University of Calgary. Canada. 13 p.
- Admont P.H., Boniface R., Fardeau J.C., Jahiel M. et Morel C., 1986.** Quelques observations sur les méthodes actuelles de dosage du phosphore assimilable des sols. Application à l'étude de la valeur fertilisante des phosphates naturels. Fertilisants et Agriculture, 92 : 36 - 52.
- Ae N., Arihara J., Okada K. 1991.** Phosphorus response of chick-pea and evaluation of phosphorus availability in Indian Alfisols and Vertisols. In Phosphorus Nutrition of Grain legumes in the semi arid Tropics. Eds. C Johansen K K Lee and K L Schrawat, 33-41.
- Aghrab M., Gargouri K. et Bentaher H., 2007.** Influence de l'irrigation goutte à goutte par des eaux chargées sur un sol léger. Institut l'Olivier, Sfax, Tunisie. 5p.
- Agrawal A.A., Conner J.K. and Stinchcombe J.R., 1987.** Evolution of plant resistance and tolerance to frost damage. Ecology Letters, 53 : 1199-1208.
- Ahmim M., 2008.** Nature et biodiversité algérienne : L'olivier, l'arbre béni. 1p. (www.biodalgerie.populus.org).
- Ait M.O., et Gelard J.P., 1997.** Distension néogénèse post-collisionnelle sur le transfert de grande Kabylie (Algérie). Bulletin de la Société Géologique de France. Tome 168, N°4. pp : 423-436.
- Ait Hou A., 2003 :** Portail de l'agriculture Marocaine. Revue mensuelle du monde rurale et de l'environnement. 64ème Ed. Terre et Vie. 6 p.
- Alami Y., Champolivier L., Merrien A. et Heulin T. 2000.** Rôle de *rhizobium sp.*, rhizobactérie productrice
- Alguacil M. M., Caravaca F., Roldán A., 2005.** Changes in rhizosphere microbial activity mediated by native or allochthonous AM fungi in the reforestation of a Mediterranean degraded environment. Biol Fertil Soils (2005) 41: 59–68.
- Amouretti M.C. et Comet G., 2005.** L'olivier, éd EDISUD. 107 p.
- Angles S., 2001.** L'olivier, un arbre et une culture au cœur de la Méditerranée. La Méditerranée, éditions du Temps. pp : 113-128.
- Antoni V., 2009.** Le phosphore dans les sols : nécessité agronomique, préoccupation environnementale. Revue : Le point sur ; Commissariat Général du Développement durable N°14 ; Juin 2009. 4p.
- Antunes, S.C., Pereira, R., Sousa, J.P., Santos, M.C., Gonçalves, F., 2008.** Spatial and temporal distribution of litter arthropods in different vegetation covers of Porto Santo Island (Madeira Archipelago, Portugal). European Journal of Soil Biology 44, 45-56.

- Aragüés R., Puy J., Isidoro D., 2004.** Vegetative growth response of young olive trees (*Olea europaea* L., cv Arbequina) to soil salinity and waterlogging. *Plant Soil* 258:69–80.
- Aragüés R., Puy J., Royo A., Espada J.L., 2005.** Three-year field response of young olive trees (*Olea europaea* L., cv. Arbequina) to soil salinity: trunk growth and leaf ion accumulation. *Plant Soil* 271:265–273.
- Aragüés R., Guillén Mónica et Royo A., 2010.** Five-year growth and yield response of two young olive cultivars (*Olea europaea* L., cvs. Arbequina and Empeltre) to soil salinity. *Plant Soil* 334:423–432.
- Argenson C., Regis S., Jourdain J.M., Vays P. 1999.** Centre technique Interprofessionnel des fruits et légumes (CTIFL). In: L'olivier Ed.. 204p.
- Arquero O., Navarro C., Barranco D., De Toro C. 2002.** Use of Monopotassium Phosphate (MPK) as Leaf Fertilizer in The Olive. *Proc. 4th IS on Olive Growing Acta Hort.* **586**, 409-413.
- Arquero O., Barranco D., Benlloch M. 2006.** Potassium starvation increases stomatal Conductance in olive trees. *HortScience* **41**, 433–436.
- Arvieu J.C. 1998.** Phosphorus and potassium bioavailability in soil : concepts and factors. Symp. n° 13b, 16^e congrès mondial des sciences du sol de Montpellier (France) **259**.p.1.
- Attiwill, P.M., Adams, M.A., 1993.** Nutrient cycling in forests. *New Phytol* 124, 561–582
- Aubert M., Hedde M., Decaens T. Margerie P., Alard D. et Bureau F., 2005.** Facteurs contrlant la variabilité spatiale de la macrofaune du sol dans une hêtraie-charmaie. *Comptes Rendus Biologies* 328 : 57-74.
- Ayres E., Steltzer H., Berg S., Wall D.H. 2009.** Oil biota accelerate decomposition in high-elevation forests by specializing in the breakdown of litter produced by the plant species above them. *Journal of Ecology* **97(5)**, 901-912.
- Ayuke F.O., Pullman M.M., Vanlauwe B.de Goede R.G.M., Six J., Csuzdi C. & Brussaard L., 2011.** Agricultural management affects earthworm and termite diversity across humid to semi-arid tropical zones. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 140: 148-154.
- Badiaa A., 2010.** Filière arboricole en Algérie : Des potentialités et des projets à développer. 3p.
- Bagayoko M., Alvey S., Neumann G., Buerket A., 2000.** Root-induced increases in soil pH and nutrient availability to field grown cereals and legumes on acidic sandy soils of Sudano-Sahelian West Africa. *Plant and Soil* 255, 117-127.
- Bagnouls G. et Gaussen H., 1953.** Saison sèche et indice xérothermique, *Sol Hist. Nat.* Toulouse, 88-193.
- Bais H.P., Park S.W., Weir T.L., Callaway R.M., et Vivanco J.M., 2004.** How plants communicate using the underground information superhighway. *Trends Plant Sci*, 9.pp: 26-32.
- Bais H.P., Weir T.L., Perry L.G., Gilroy S., et Vivanco J.M., 2006.** The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms. *Ann. Rev. Plant Biol* 57. 233-266.
- Baize D. et Jabiou B., 1995.** Guide pour la description des sols. Ed. I.N.R.A, Paris. 375 p.

- Baize D., 2000.** guide des analyses courantes en pédologie ; Ed. Lavoisier, paris, 172p.
- Barber S. A., 1995.** Soil nutrient bioavailability. A mechanistic approach. 2nd Ed. Wiley and sons New York, 414p.
- Bardoulat M., 2005.** L'olivier, trésor de santé. Ed. Alpen S.A.M., 95p.
- Barea J. M., Requena N. et Jimenez I., 1996.** A revegetation strategy based on the management of arbuscular mycorrhizae, Rhizobium and rhizobacteria for the reclamation of desertified Mediterranean shrubland ecosystems. *In* Mycorrhization of Forest Plants under Arid and Semi-arid Conditions and Desertification Control in the Mediterranean. CIHEAM-IAMZ, Zaragoza. 75–86.
- Barea J. M., Toro M., Orozco O., Campos E. et Azcon R., 2002.** The application of isotopic (32P and 15N) dilution techniques to evaluate the interactive effect of phosphate-solubilizing rhizobacteria, mycorrhizal fungi and *Rhizobium* to improve the agronomic efficiency of rock phosphate for legume crops. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 63, 35–62.
- Barea J.M., Campos E. et Azcon A., 2005.** Microbial co-operation in the rhizosphere. *J. Ex .bot.* N°56 .pp: 1761-1778.
- Barrow N.J., 1989.** Relating chemical processes to management systems, 16p.
- Barrow J.R., 2003.** Atypical morphology of dark septate fungal root endophytes of *Bouteloua* in arid southwestern USA rangelands USDA. Agricultural Research Service, Jornada Experimental Range, New Mexico State University. 9 p.
- Barrow N.J., 2008.** The description of sorption curves. *Eur. J. Soil Sci.* 59: 900-9 10.
- Baptendier E., 1994.** Apports diffus de phosphore d'origine agricole : Définitions formes et biodisponibilité, conditions d'extrapolation des pertes des sols vers le Léman. Papp. Interne Comm.int. prot. Eaux. Léman contre pollut. Lausanne. pp : 207-281.
- Bazot S., 2005.** Contribution à l'étude de l'allocation des photoassimilats récents dans la plante et la rhizosphère chez une graminée pérenne (*Lolium perenne* L.). Thèse pour obtenir le grade de docteur de l'INPL. 176p.
- Beaudin I., Michaud A., Beaudet P., Giroux M., 2008.** La mobilité de Phosphore: du sol au cours d'eau. 8p.
- Bécel C., 2010.** Croissance racinaire en verger de pêchers. Influence de la distribution de l'eau dans le sol et de la disponibilité en assimilats carbonés. Docteur en Sciences Agronomiques de l'Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse. Académie d'aix-Marseille Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse.
- Becker J., Makus P., Schrader S., 2001.** Interactions between soil micro- and mesofauna and plants in an ecofarming system. *Eur. J. Soil Biol.* 37, pp:245–249.
- Bedano J.C., Canti M.P., Doucet M.E., 2006.** Soil sprintais (Hexapoda ; Collemba), symphylans and pauropods (Arthropoda ; Myriapoda) under different management in agroecosystems of the subhumid Pampa (Argentina). *European Journal of Soil Biology* 42; 107-119.

- Benamara M., Conesa A. P., 1976.** Appréciation de la fertilité phosphorique de quelques sols d'Algérie. An. Agr. I.N.A. El-harrach, vol. VI, N. 2 : 81-90.
- Ben Mimoun M., 2002 :** Institut National Agronomique de Tunisie. Atelier sur la gestion de la fertilisation potassique, acquis et perspectives de la recherche. Tunis, le 10 décembre 2002. 12 p.
- Benderradji L., Bouzerzour H., Ykhlef N. et Kellou K., 2007.** Réponse à la culture in vitro de trois variétés de l'olivier (*Olea europaea* L). 26. 27-32pp.
- Ben Hassaine M., 1980.** Recherche sur les modèles du relief et les formations superficielles dans la vallée de l'oued Sébaou. Thèse Doctorat de 3^{ème} cycle en géographie physique. Université de Paris
- Benhayoun G. et Lazzeri Y., 2007.** L'olivier en Méditerranée : du symbole à l'économie. Ed. L'Harmattan. 137 p.
- Benlloch-Gonzalez M., Arquero O., Fournier J.M, Barranco D., Benlloch M. 2008.** K⁺ starvation inhibits water-stress-induced stomatal closure Journal of Plant Physiology **165**, 623-630.
- Ben Rouina B. 2001.** Gestion technique des plantations d'olivier en conditions d'agriculture pluviale. Nouvelles perspectives. Sfax, Tunisie. pp1-15.
- Bertin C., Yang X.H., et Weston L.A., 2003.** The role of root exudates and allelochemistry in the rhizosphere. Ed. Plant Soil 256: 67-83.
- Bertrand R. et Gigou J., 2000 :** La fertilité des sols tropicaux. Volume 40 de Le Technicien d'agriculture tropicale. Ed Maisonneuve & Larose, 2000. 397 p.
- Besnard G., Henry P., Wille L., Cooke D. and Chapuis E., 2007.** On the origin of the invasive olives (*Olea europaea* L., Oleaceae) Heredity. 99, 608–619.
- Besserer A., 2008.** Etude des mécanismes d'action des strigolactones sur les champignons endomycorhiziens à arbuscules. Thèse en vue de l'obtention du Doctorat. Université de Toulouse III, Paul Sabatier. 277 p.
- Blake R.J., Woodcock B.A., Ramsay A.J., Pilgrim E.S., Brown V.K., Tallwin J.R., Potts S.G., 2001.** Novel margin management to enhance Auchenorrhyncha biodiversity in intensive grasslands. agri. Ecosyst. Environ. Doi: 10.1016/J.agee.
- Bloom, A.J., Chapin F.S. and H.A. Mooney H.A., 1985.** Resource limitation in plants - an economic analogy. Annu. Rev. Ecol. Syst. 16
- Boniface R. et Trocmé, 1988.** Diagnostic de la fertilité phosphatée des sols en fonction des méthodes d'analyse et de fertilisation phosphatée d'entretien. I. N. R. A. : 1 - 17.
- Bonin S., 2006 :** Connaissance des sols - Introduction à la pédologie : Cours de pédologie. France. 21p.
- Bonkowski M., Chengb W., Griffiths B. S., Alpehi J., Scheu S. 2000.** Microbial-faunal interactions in the rhizosphere and effects on plant growth. Eur. J. Soil Biol. **36**, 135-147.
- Bonkowski M., Griffiths B., Scrimgeour C., 2000.** Substrate heterogeneity and microfauna in soil organic 'hotspots' as determinants of nitrogen capture and growth of ryegrass, Applied Soil Ecology 14. pp: 37–53.

- Bonneau M. et Souchier B. 1994.** Pédologie 2 : constituants et propriétés du sol ; 2^{ème} édition. Ed. Masson, 665p.
- Bonneau M., 1983.** Effet de 12 et 14 ans de la fertilisation sur deux plantations d'epicéa commun de l'Ouest du massif central. Biologie et Forêt R.F.F xxxv .2.
- Bonneau M., 1988.** Le diagnostic foliaire . R. F. F. XL. N°:5, 6p.
- Bouat A., Renaud P. et Dulac J.,1951.** Etude sur la physiologie de la nutrition de l' olivier. Troisième mémoire, Ann. Agro. série A, vol.4, pp 459-489.
- Bouat A., 1953.** Physiologie de l'olivier. Relation avec son amélioration culturale, Ed., C.I.H.A.M., option méditerranéenne n° 24, 63-68pp.
- Boudiaf Nait Kaci. M., Mouas Bourbia S., Sadoun Smail. N., Derridj A., 2010.** Effet de la mycorhisation de l'olivier (*Olea europea* L.) et figuier (*Ficus carica* L.) sur la rhizosphère dans la région de Bouira. Congrès Mycomed Marrakech, 17p.
- Boudiaf Nait Kaci M., Bouhired L., Siad K. et Derridj A., 2012.** Détermination des mycorhizes sous une jeune oliveraie *Olea europea* L. au nord de l'Algérie. Journées Francophones de mycorhization Nancy.
- Boulila M. 2001.** Maladies de l'olivier en Tunisie : connaissances actuelles. Olivae, n° 87, 22-25.
- Boullard B., 1968.** Les mycorhizes. Ed. Masson, Paris. 130p.
- Bourbia Mouas S., Barré P., Boudiaf Nait Kaci M., Derridj A., Velde R.,2012.** Potassium status in bulk and rhizospheric soils of olive groves in north Algeria. Geoderma 197-198. 161-168.
- Boussadia O., Ben Mariemb F., Mechri b., Boussetta W., Brahamb M., Ben El Hadj S. 2008.** Response to drought of two olive tree cultivars (cv Koroneki and Meski). Scientia Horticulturae 116, 388–393.
- Bowen GD and Rovira A.D., 1999.** The rhizosphere : the hidden half of the hidden half. In: Plant roots: the hidden half. Waisel Y, Eshel A and Kafkafi V (eds.). Marcel Dekker, New York, pp. 641-669.
- Bretauudeau J. et Faure Y. 1991.** Atlas d'Arboriculture fruitière. Vol°.IV. 3eme Ed. Tec et Donc. Lavoisier. Paris, 227-243.
- Brookes P.C., Landman A., Prudent G. and Jenkinson S., 1984.** Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. Soil Bid. Biocfrem V. 17, N°. 6. 837-842.
- Bruand A., Cousin I., Nicoullaud B., Duval O. and Begon J.C., 1996.** Backscattered electron scanning images of soil porosity for analyzing soil compaction around roots, Soil Sci. Soc. Am. J. 60: 895- 901.
- Brussaard L., 1998.** Soil fauna, guilds, functional groups and ecosystem processes. Applied soil ecology 9: 123- 135.

- Brussaard L., Pulleman M.M., Ouédraogo E., Mando A. and Six J., 2007.** Soil fauna and soil function in the fabric of food web. *Pedobiologia* 50: 447- 462.
- Brusset I., Leveau F., Spinat P., Trani A. et Verollet J., 2002.** Le nitrate d'ammonium : description production, utilisations et précautions d'usage. 76p.
- Byé P. et Callot G., 1999.** La truffe, la terre, la vie. Ed. Quae, 210p.
- C.O.I., 2006.** Le marché mondial de l'huile d'olive. Conseil oléicole international.
- C.O.I., 2009.** Les origines de l'huile d'olive. Conseil oléicole international.
- Caldwell M.M., 1987.** Rapid shift in phosphate acquisition show direct competition between neighboring plants. *Nature* 327:615-616. Strengths and limitations of the survey approach for measuring and understanding fertility change: alternative possibilities. Ed. Oxford: Oxford University Press .pp: 45-63.
- Callot G., Chamayou H., Maertens C., Salsac L. 1982.** Les interactions sol-racine, incidence sur la nutrition minérale: collection mieux comprendre; Ed. I.N.R.A.Paris. 325p.
- Calvaruso C., Turpault MP., Frey-Klett P. 2006.** Root associated bacteria contribute to mineral weathering and to mineral nutrition trees: a budgeting analysis. *Applied and Environmental Microbiology* 72, 1258-1266.
- Calvaruso C., N'Dira V., Turpault M.P. 2011.** Impact of common European tree species and Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* Mirb. Franco) on the physicochemical properties of the rhizosphere. *Plant Soil Online* First.,
- Calvet R. 2003.** Le sol propriétés et fonctions. T2 : Phénomènes physiques et chimiques applications Agronomiques et Environnement. Ed. France Agricul., 511p.
- Campbell C.A., Lafond G.P., Latshon A.J., Zentner A.J. et Janzen H.H., 1991.** Overwinter changes in Olsen phosphorus in a 24-year crop rotation in south - western Saskatchewan. *Can. J. soil Sci.* 73 : 123 - 128.
- Cameron, R.A.D., Pokryszko, B.M., Long, D.C., 2006.** Snail faunas in Southern English calcareous woodlands: rich and uniform, but geographically differentiated. *Journal of Conchology* 39, 1- 13.
- Cameron, R.A.D., Pokryszko, B.M., Horsak, M., 2010.** Land snail faunas in Polish forests: patterns of richness and composition in a post-glacial landscape. *Malacologia* 53, 77-134.
- Canadell, J., Jackson, R.B., Ehleringer, J.B., Mooney, H.A., Sala, O.E., & Schulze, E.D. 1996.** Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. *Oecologia*, 108, 583-595.
- Carolyn J, Kroehler and Linkins A.E., 1988.** The root surface phosphatases of *Eriophorum vaginatum* : Effects of temperature, pH, substrate concentration and inorganic phosphorus. *Plant and Soil* . 105 PLSO . 7333 : 3 - 10.
- Carreira J.A. and Lajtha K., 1997.** Factors affecting phosphorus sorption along a Mediterranean, dolomitic soil and vegetation chronosequence. *Eur. J. Soil Sci.* 48: 139-149.

- Carrillo, Y., Ball, B.A., Bradford, M.A., Jordan, C.F., Molina, M., 2011.** Soil fauna alter the effects of litter on nitrogen cycling in a mineral soil. *Soil Biology and Biochemistry* 43, 1440-1449.
- Castro, J., Campos, P., Pastor, M., 1996.** Soil arthropods under the influence of soil management systems in olive orchards and sunflower. *Boletín de Sanidad Vegetal* 22, 557-570.
- Cesarz, S., Fahrenholz, N., Migge-Kleian, S., Platner, C., Schaefer, M., 2007.** Earthworm communities in relation to tree diversity in a deciduous forest. *European Journal of Soil Biology* 43, 61-67.
- Chafi M. E. H., 1992.** Prospection des plantes à associations symbiotiques de type mycorhize des zones arides algériennes. Cas de la région de Ain Ben Khellil, wilaya de Naama. Thèse de mag. UST. Oran. 114 p.
- Chaignon V., 2001 :** Biodisponibilité du cuivre dans la rhizosphère de différentes plantes cultivées. Cas de sols viticoles contaminés par des fongicides. Thèse présentée pour l'obtention du grade de Docteur de l'Université de droit, d'économie et des sciences d'Aix-Marseille. 183 p.
- Chaignon V., Di Malta D., Hinsinger P., 2002.** Fe-deficiency increases Cu acquisition by wheat cropped in a Cu-contaminated, vineyard soil. *New Phytol.* 154, 121- 130.
- Chamayou H. et Legros J.P., 1989.** Les bases physiques, chimiques et mineralogiques de la science du sol. Presses universitaires de France ed.589 p.
- Chambenoit C., Laurent F., Machet J.M. et Scheurer O., 2002.** Fertilisation azotée de la pomme de terre. Ed. INRA. France. 128p.
- Chaman., 2005.** La composition des engrais N, P, K, Mg.1p. (www.cannaweed.com)
- Charler L. et Garnier P.D., 2010.** Les engrais : Note technique. N° 52 Service du Développement Rural B.P.100 Papeete. Tahiti. pp: 1-7.
- Charpentier B., Hamon-Lorleac'H F., Harlay A., Huard A., Ridoux L., et Cnaselle S., 2008.** Guide du préparateurben pharmacie. 3ème Ed. Masson. 1358p.
- Chartzoulakis K.S., 2005.** Salinity and olive: growth, salt tolerance, photosynthesis and yield. *Agric Water Manag* 78:108–121.
- Cheaib A., 2006.** Effets de la limitation croisée en phosphore et en lumière sur la croissance et la morphogenèse aérienne et racinaire de jeunes plants de pin maritime. Thèse de doctorat en Biogéochimie de l'environnement. Université Bordeaux 1. 243p.
- Chen CR., Condeon LM., Davis MR., Sherlock RP. 2002.** Phosphorus dynamics in the rhizosphere of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) and radiata pine (*Pinus radiata* D. Don). *Soil Biol. Biochem.* 34, 487-499.
- Chen YM., Wang MK., Zhuang SY., Chiang PN. 2006.** Chemical and physical properties of rhizosphere and bulk soils of three tea plants cultivated in Ultisols. *Geoderma* 136, 378-387.

- Chevalier G., Garbaye J., Gianinazi S., Mousain D., Olivier G. et Dounez M., 1990.** Fascicule. Les mycorhizes. La symbiose mycorhizienne. 11 p.
- Chiu Z., Wang M. K., Hwong J. L., King HB. 2007.** Physical and chemical proprieties in rhizosphere and bulk soils of Tsuga and Yushania in a temperate rain forest, Journal of communications in soil science and plant analyses **33: 11**, 1723-1735.
- Cimato A., Castelli S., Tattini M., Traversi M.L., 2010.** Anecophysiological analysis of salinity tolerance in olive. Environ Exp Bot 68:214–221
- Civantos L. 1998.** L'olivier, l'huile d'olive et l'olive. Ed. Conseil Oléicole International. 130p.
- Clegg S. et Gobran GR. 1997.** Rhizospheric P and K in forest soil manipulated with ammonium sulfate and water. Can J Soil Sci. **77**, 525-533.
- Coineau Y., 1974.** Introduction à l'étude des microarthropodes et de ces annexes. Ed. Doin, 117p.
- Colomb B., Debaeke P., Jouany C. and Nolot J.M., 2007.** Phosphorus management in low input stockless cropping systems: crop and soil responses to contrasting P regimes in a 36-year experiment in southern France. Eur. J. Agron. **26**: 154-165.
- Compaoré E., Fardeau J.C., Morel J.L., Sedego M.P., 2001.** Le phosphore biodisponibles des sols : une des clés de l'agriculture durable en Afrique de l'ouest. John Libbery Eurotext, 6p.
- Courchesne F., Gobran G.R., 1997.** Mineralogical variation of bulk and rhizosphere soils from a Norway spruce stand. Soil Sci Soc Am J **61**:1245–1249.
- Czarnes S., Hallett P.D., Bengough A.G. and Young I.M., 2000.** Root- and microbial-derived mucilages affect soil structure and water transport. Eur J Soil Sci **51**.pp: 435-443.
- Dalpe Y., 2005.** Les mycorhizes: un outil de protection des plantes mais non une panacée. Agriculture et Agroalimentaire. Phytoprotection **86** : 53–59. Canada, Ottawa. 7 p.
- Damas O., 2013** : Mycorhizes, auxiliaires discrètes du jardinier. Revue de la société nationale d'horticulture de France et de ses sociétés adhérentes. 3 p.
- Danjon F., et Reubens B., 2008.** Assessing and analyzing 3D architecture of woody root systems, a review of methods and applications in tree and soil stability, resource acquisition and allocation. Plant Soil .pp: 303: 1-34.
- Darrah P.R. 1993.** The rhizosphere and plant nutrition: a quantitative approach. Plant and soil **155/156**, 1-20.
- Darrah PR. et Jones DL. 1994.** Amino-acid influx at the soil-root interface of Zea mays L. and its implications in the rhizosphere. Plant and Soil **163**, 1-12.
- Darrah, P.R. et Jones, D.L., 1994.** Role of derived organic acids in the immobilisation of nutriment from the rhizosphere. Plant and soil **166**, 247-257.
- Darrah P.R., Jones D.L., Kirk. G.J.D and Roose T. 2006.** Modelling the rhizosphere: a review of methods for up scaling to the whole-plant scale. European journal of soil science **57**, 13-25.

- Davet P. 1996.** Vie microbienne du sol et production. Ed I.N.R.A., 344 p.
- De Rougemont M., 2007** Les mycorhizes et l'olivier : Effets sur le développement des plants en pépinière et en verger. Journées Méditerranéennes de l'Olivier, Meknès. 9 p.
- Decaëns T., Bureau F., Margerie P., 2003.** Earthworm communities in a wet agricultural landscape of the Seine Valley (Upper Normandy, France). *Pedobiologia* 479-489
- Delsinne, T., Roisin, Y., Herbaults, J., Leponce, M., 2010.** Ant diversity a wide rainfall gradient in the Paraguayan dry Chaco. *Journal of Arid Environments* 74, 1149-1155.
- Delvaux B., Rufuikiri G., Dufey J., 2005.** Ion absorption and proton extrusion by banana roots. In: Turner DW, Rosales FE (eds), *Banana Root System: Towards a Better Understanding for its Productive Management*. INIBAP. Montpellier, 114-121.
- Denis L., 1975 :** L'oléiculture dans le monde. 2^{ème} séminaire oléicole international. Cordoue (Espagne), 6-17 Octobre 1975. 14 p.
- Denis J.F. 2000.** La fertilisation de l'olivier. *Journal : le nouvel olivier* n°17, 3-12.
- Devau N., Le Cadre E., Hinsinger P., Jaillard B., and Gérard F., 2009.** Soil pH controls the environmental availability of phosphorus: experimental and mechanistic modelling approaches. *Appl. Geochem.* 24, 2163-2174.
- Devau N., Le Cadre E., Hinsinger P., and Gerard F., 2010.** A mechanistic model for understanding root-induced chemical changes controlling phosphorus availability. *Annals of Botany* 105, 1183-1197.
- Devau N., 2010.** Processus rhizosphériques déterminant la disponibilité en phosphore : apport de la modélisation mécaniste géochimique. Thèse de Doct. centre international d'études supérieures en sciences agronomiques, SIBAGHE. Montpellier SupAgro, 242p.
- Dichio, B., Xiloyannis, C., Angelopoulos, K., Nuzzo, V., Bufo, S.A., Celano, G., 2003.** Drought-induced variations of water relations parameters in *Olea europaea*. *Plant Soil* 257, 381-389.
- Dinesh R., Srinivasan V., Hamza S.V.A., Parthasarathy V.A., Aipe K.C. 2010.** Physico-chemical, biochemical and microbial properties of the rhizospheric soils of tree species used as supports for black pepper cultivation in the humid tropics *Geoderma* **158**, 252-258.
- Djebaili S., 1984.** Steppe Algérienne, Phytosociologie et écologie. OPU, Alger, 171p.
- Djemai M. 1985.** Hydrologie du bassin versant du haut - sebaou. Hydrologie des formations alluviales . Thèse de 3^{ème} cycle université scientifique et médicale de Grenoble: 261 p .
- Dodd, M.B., and Lauenroth, W.K., 1997.** The influence of soil texture on the soil water dynamics and vegetation structure of a shortgrass steppe ecosystem. *Plant Ecology* 133, 13-28.
- Dommergues Y., Mangenot F. 1980.** Ecologie microbienne du sol. Ed. Masson. 280p.
- Douds D., 2004.** L'utilité des mycorhizes. Centre de recherche régional de l'Est (USDA-AES). Conférencier pour Institut Rodale. Organisé par le Club Action Billon grâce à la collaboration du Programme de soutien au développement de l'agriculture biologique. 5 p.
- Doussan C., Pages L. et Pierret A., 2003.** Soil exploration and resource acquisition by plant roots : an architectural and modelling of view . *Agronomy* 23: 419-431.

Doussan C., Pierret A., Garrigues E., Pages L., 2006. Wateruptake by plant roots: II-Modelling of water transfer in the soil root-system with explicit account of flow within the root system-Comparison with experiments. *Plant Soil* 283:99–117

Drénou C., 2006. Les racines. Face cachée des arbres. Institut pour le Développement Forestier, Paris, 335 p.

Dubreuil M., 2004. Les mycorhizes, des alliés efficaces pour l’agriculture. Conservation des sols et de l’eau. Ministère de l’Agriculture, des pêcheries et de l’alimentation Saint-Hyacinthe. Canada. 3 p.

Duchaufour P., 1995. Pedologie : Sol, végétation, environnement. Masson ed. : 325p

Duget F., 2005. Minéralisation de l’azote et du phosphore dans les sols organiques cultivés du sud-ouest du Québec. Mémoire Magister. Université Laval. Québec.105p.

Durrieu G., 1993 : Ecologie des champignons. Volume 23 de collection d’écologie. Ed. Masson. 207 p.

Egli S. et Brunner I., 2002. Les mycorhizes : Une fascinante biocénose en forêt. Institut fédéral de recherches WSL-CH-8903 Birmensdorf. Allemagne. 8 p.

Elalaoui A.C., 2007. Fertilisation Minérale des Cultures. Les éléments fertilisants majeurs (Azote, Potassium, Phosphore). Ecole nationale d’Agriculture de Meknes. 155 : 1- 4.

Eissenstat D.M., Volder A. 2005. The Efficiency of Nutrient Acquisition over the Life of Root. *Ecological Studies*, Vol. 181 H. BassiriDad (Ed.) *Nutrient Acquisition by Plants An Ecological Perspectives*, 185-220.

El-Sharabasy, H.M., Hassan, M.F., Mohamed, A.I., 2008. Occurrence of soil mites at Al-Maghara Region, Sinai Peninsula. *Journal of the Egyptian Society of Acarology* 2, 31-35.

Eo, J. and Nakamoto, T., 2008. Spatial relationships between roots and soil organisms under different tillage systems. *European Journal of Soil Biology* 44, 277-282.

Errouissi, F., Ben Moussa-Machraoui, S., Ben-Hammouda, M., Nouira, S., 2011. Soil invertebrates in durum wheat (*Triticum durum* L.) cropping system under Mediterranean semi arid conditions: A comparison between conventional and no-tillage management. *Soil & Tillage Research* 112, 122–132.

Estevez B., 2005. La rhizosphère : les racines à la loupe. 1p. (www.lavoieagricole.ca).

F.A.O., 2005. Utilisation des engrais par cultures en algérie. [Ftp://Ftp.Fao.org/alg/agLL/doc/fertusealgérie.agl.pdf](http://Ftp.Fao.org/alg/agLL/doc/fertusealgérie.agl.pdf).

F.A.O., 2006 : Statistiques de la F.A.O. pour l’oléiculture en 2006.

Fadda, S., Orgeas, J., Ponel, P., Buisson, E., Dutoit, T., 2008. Conservation of grassland patches failed to enhance colonization of ground-active beetles on formerly cultivated plots. *Environment Conservation* 35, 109-116.

Fageria N.K., 2012. The role of plant roots in crop production. CRC press. 467p.

Faeth S.H., 2002: Are endophytic fungi defensive plant mutualists? Department of Biology. Arizona State University. USA. 12 p.

Fardeau J.C., Morel C and Jahiel M.,1988. Does long contact with the soil improve the efficiency of rock phosphate? Results of isotopic studies. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 17: 3-19.

Fardeau J.C. et Consa A.P.,1994. Le phosphore : constituants et propriétés du sol. Masson. Paris. pp : 45-48.

Fardeau J. C.. 1989. Phosphore biodisponible du sol estimé par la methode des cinetiques d'échanges isotopiques entre des ions $^{31}\text{PO}_4$ et des ions $^{32}\text{PO}_4$. Tiré à part : 15 p.

Fardeau J.C. 1993. Gros plan sur le devenir du phosphore dans le sol et les systèmes sol-plante. *Perspectives agricoles*, n° 181, pp :16-23.

Fardeau J.C. et Morel C., 2002. Le phosphore « agricole et environnemental » ses relations avec le vivant. *Agronomie. INRA.*13p.

Fardeau J.C. Masse J. et Villemain P. 1995. Caractérisation du sol estimé par la méthode des cinétiques d'échange isotopiques. *Académie d'agriculture COMIFER*, 9-17.

Fardeau J.C., Morel C. and Jahiel M., 1988. Does long contact with the soil improve the efficiency of rock phosphate? Results of isotopic studies. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 17: 3-19.

Fardeau J.C., Morel C. et Boniface R.,1988. Pourquoi choisir la methode Olsen pour estimer le phosphore « assimilable » des sols. *Agronomie, N. 7* : 577 - 584.

Fardeau J.C., Morel C. et Oberson A. 1993. Phosphore matière organique et eutrophisation des écosystèmes. *Colloque sur la matière organique, Blois, France. Nov 1993* : 14 p.

Fayez, K.A. and Mahmoud, S.Y., 2011. Detection and partial characterization of a putative closterovirus affecting *Ficus carica*: molecular, ultrastructural and physiological aspects of infected leaves. *Acta Physiol Plant* 33, 2187–2198.

Fernandez-Escobar R., Moreno R., Garcõaa-Creus M. 1999. Seasonal changes of mineral nutrients in olive leaves during the alternate-bearing cycle. Departamento de Agronomia, Universidad de Cordoba, Apartado 3048, 14080, Corrdoba. Spain. *Scientia Horticulturae* **82**, 25-45.

Fernandez-Escobar R., 2004. Fertilizacion. In: Barranco, D., Fernandez-Escobar, R., Rallo, L. (Eds.), *El cultivo del olivo*. Mundi-Prensa, Madrid, pp. 287–320.

Fernández-Escobar R., Parra M.A., Navarro C., Arquero O.2009. Foliar diagnosis as a guide to olive fertilization. *Spanish Journal of Agricultural.* Vol. **7(1)**, 212-223.

Fernández F.B., Brouder S.M., Volenec J.J., Beyrouthy CA., Hoyum R. 2009. Root and shoot growth, seed composition, and yield components of no-till rainfed soybean under variable potassium. *Plant and Soil* **322**,125–138.

Ferrah A. 2009. Les figues d'Algérie : Un patrimoine génétique à considérer ([http:// :www.gredaal.com](http://www.gredaal.com)).

Filser J., Mebes K.H., Winter K., Lang A., Kampichler C., 2002. Long-term dynamics and interrelationships of soil Collembola and microorganisms in an arable landscape following land use change. *Geoderma* 105: 201- 221.

- Fox T.R., Albangh T.J., Rubilar R. and Carlson C.A., 2006.** Forest fertilization in southern pine plantations. *Better. Crops.* N°90. pp: 12-16.
- Francia Martinez J. R., Dura'n Zuazo V. H., Martinez Raya A., 2006.** Environmental impact from mountainous olive orchards under different soil-management systems (SE Spain). *Science of the Total Environment* 358, 46–60.
- Freeman M., Carlson RM. 1994.** Mineral Nutrient Availability. In: *Olive Production Manual*, Ferguson et al., eds. Publication 3353. University of California, 69-75.
- Fritsch L. et Lemercier G., 2003.** Quelle forme d'engrais minérale choisir? La juste dose, c'est mieux. *Fert'ill. Chambre d'Agriculture du Bas-Rhin.* N°50. 2p.
- Frossard E., Julien P., Neyroud J–A et Sinaj S., 2004.** Le phosphore dans les sols. Etat de la situation en Suisse. *Cahier de l'environnement* n° 368. Office fédérale de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne. 182 p.
- Frouz J., Prach K. Pizl V., Hanel L., Stary J., Tajovsky K., Materna J., Balík V., Kalcík J. and Rehounekova K., 2008.** Interactions between soil development, vegetation and soil fauna during spontaneous succession in post mining sites. *European Journal of Soil Biology* 44 : 109- 121.
- Fuchs J.G. et Herisse J.M., 1999.** Fertilité des sols, les produits biologiques : bien les connaître pour mieux les utiliser. Ed. Biophyt Sa., Agre, Biarritz. 44 p.
- Gachon, 1968.** La fertilisation phosphatée : Panorama des recherches recentes effectuées en France. *Phosphore et Agr.*, N. 53 : 18 - 19.
- Gachon L, 1988.** Etude des relations entre l'alimentation phosphatée des cultures et les valeurs E et L. Dans *phosphore et K dans les relations sol-plante* : I. N. R. A. : 205 - 215.
- Gahoonia T.S., Claassem N. et Jungk A., 1992.** Mobilization of phosphate in different soils by ryegrass supplied with ammonium or nitrate. *Plant and Soil.* N°140. pp : 241-248.
- Gahoonia T. and Nielsen N., 1997.** Variation in root hairs of barley cultivars doubled soil phosphorus uptake. *Euphytica.* 98: 177-182.
- Galanes, I.T., and Thomlinson, J.R., 2011.** Soil millipede diversity in tropical forest patches and its relation to landscape structure in northeastern Puerto Rico. *Biodivers Conserv* 20, 2967–2980.
- Gálvez M., Parra M. A., Navarro C. 2004.** Relating tree vigour to the soil and landscape characteristics of an olive orchard in a marly area of southern Spain *Scientia Horticulturae* 101, 291-303.
- Gargouri K. et Mhiri A. 2002.** Relationship between soil fertility. Phosphorus and Potassium nutrition of the olive groves in Tunisia. Ed. I.N.A., Tunisia, 156-209.
- Gargouri K., Sarbeji M., Barone E. 2006.** Assessment of soil fertility variation in an olive orchard and its influence on olive tree nutrition. "Biotechnology and Quality of Olive Tree Products Around the Mediterranean Basin". Marsala-Mazara del Vallo, Italy.

Garrido-Jurado, I., Ruano, F., Campos, M., Quesada-Moraga, E., 2011. Effects of soil treatments with entomopathogenic fungi on soil dwelling non-target arthropods at a commercial olive orchard. *Biological Control* 59, 239-244.

Geelhoed J.S., Van Rumsdijk W.H. and Findenegg G.R., 1999. Simulation of the effect of citrate exudation from roots on the plant availability of phosphate adsorbed on goethite. *Eur. J. Soil. Sci.* N°50, pp : 375-390.

Genet P., 2008. Les champignons mycorhiziens, des organismes importants dans la gestion des écosystèmes. Table ronde de la journée d'études : Une odyssée de l'ingénierie des écosystèmes. Ecole Normale Supérieure. Paris. 1 p.

Gerbault S., 2009. Les mycorhizes : Outil d'une horticulture et d'une agriculture durable. Revue mensuelle de la Société National d'Horticulture de France et de ces sociétés adhérentes n° 597. 9 p.

Gianinazzi S., Gollotte A., Binet M.N., van Tuinen D., Redecker D., et Wipf D., 2010. Agroecology: the key role of arbuscular mycorrhizas in ecosystem services. *Mycorrhiza*. pp: 3-7.

Giasson P. et Jaouich A., 2007. Les techniques de conditionnement des sols. SCT 3010.49 p.

Girard MC., Walter C., Remy J.C., Berthelin J., Morel J.L. 2005. Sol et environnement. Ed. Dunod, Paris. 816 p.

Gobat J.M., Argano M., Mattheey W. 2003. Le sol vivant. Ed. Presse polytechniques et universitaires romandes. 550 p.

Gobran G., Clegg S., Courchesne F. 1998. Rhizospheric processes influencing the biogeochemistry of forest ecosystems. *Biogeochemistry* 42, 107–120.

Gobran G., Clegg S. 1996. A conceptual model for nutrient availability in the mineral soil root system. *Can J. Soil Sci.* 76, 125-135.

Gomez-Roldan M.V., 2008. Rôle des strigolactones dans la symbiose mycorhizienne à arbuscules. Thèse Doct. Université Paul Sabatier, Toulouse III. France. 183p.

González-Guerrero M., 2005. Thèse de doctorat, CSIC-EEZ. Grenade.

Grayston S.J., Vaughan D., et Jones D., 1996. Rhizosphère carbon flow in trees, in comparison with annual plants: the importance of root exudation and its impact on microbial activity and nutrient availability. *Appl Soil Ecol* 5, pp: 29-56.

Gregory P.J., 2006. Roots, rhizosphère and soils : the roots to a better understanding of soil science? *European journal of soil science* 57, 2-12.

Gregory P. and Hinsinger P. 1999. New approach to studying chemical and physical changes in the rhizosphere : and overview. *Plant Soil* 211: 1-9.

Greven M., Neal S., Green S., Dichio B., Clothier B., 2009. The effects of drought on the water use, fruit development and oil yield from young olive trees. *Agricultural Water Management* 96, 1525–1531.

Grimal J.Y, Frossard E., Morel J.L. 2001. Maize root mucilage decrease adsorption of phosphate on goethite. *Biology and Fertility of Soils*, 33:226-230.

- Grimal J-Y., 1994.** Importance de la libération de protons sur la mobilisation du phosphore minéral et du fer par les racines. Etude des minéraux modèles calcite et goethite = Mobilisation of phosphorus by roots Study of model minerals : calcite and goethite. Thèse nouveau doctorat INPL Nancy, 139 p
- Guinberteau J. et Courtecuisse R., 1997 :** Diversité des champignons (surtout mycorhiziens) dans les écosystèmes forestiers actuels. Rev. For. Fr. XLIX .
- Guivarch A. 2001.** Valeurs fertilisantes à court terme du phosphore des boues de stations d'épuration urbaine thèse de doctorat uni. Montpellier II 150p.
- Guisso T., Bâ A.M., Saleem M. et Malik K.A., 2004:** Phosphorus uptake and growth promotion of chickpea by co-inoculation of mineral phosphate solubilizing bacteria and mixed bacterial culture. Aust.J. Exp. Agr.44, 261-269.
- Hacala S., Bodet J.M., Aubert C. et Texier C., 2002.** Fertilisation avec les engrais de ferme. 1^{er} trimestre. Ed. Oxalis. Paris. 101p.
- Hariprasad P. and Niranjana S.R., 2009.** Isolation and characterization of phosphate solubilizing rhizobacteria to improve plant health of tomato. Plant Soil, 316 : 13-24.
- Harmsen J., Rulkens W. and Eijssackers H., 2005.** Bioavailability: concept for understanding or tool for predicting? Land Con. Rec. 13:161-171
- Hartmann H.T., Uriu K., Lilleland O. 1966.** Olive nutrition, p. 252–261. In: N.F. Childers (ed.). Temperate to tropical fruit nutrition. Hort. Publ., Rutgers Univ., New Brunswick, N.J., 252-268.
- Hartmann H.T., 1996.** The effect of mineral deficiencies on the growth leaf appearance and mineral content of young olive trees. Hilgardia 3: 119-130.
- Herrick J.E. 2000.** Soil quality: an indicator of sustainable land management. Appl. Soil Ecol. 15 : 75-83.
- Hidalgo, J.C., Pastor M., 2005.** in Cultivo del olivo con riego localizado, Los nutrientes y el olivar, ed Pastor M. (Mundi-Prensa, Consejería de Agricultura y Pesca, Junta de Andalucía, Madrid), 477-504.
- Hinsinger P., Elsass F., Jaillard B., Robert M. 1993.** Root-induced irreversible transformation of a trioctahedral mica in the rhizosphere of rape. Journal of Soil Science **44**, 535-545.
- Hinsinger P. 1998.** How do plant roots acquire mineral nutrients? Chemical processes involved in the rhizosphere. Advances in agronomy **64**, 225-265.
- Hinsinger P., Gregory P.J. 1998.** Structure and function of the rhizosphere : mechanisms at the soil-root interface. Synthesis. Symp. n° 43, 16^e congrès mondial des sciences du sol de Montpellier (France). 6p.
- Hinsinger P., 2001a.** Bioavailability of the trace elements as related to root-induced chemical changes in the rhizosphere. CRC press LLC, Boca Raton, Florida, USA. pp: 25-41
- Hinsinger P. 2001.** Interactions chimiques entre racines et minéraux et la nutrition des végétaux. Mémoire de HDR. Thèse de doctorat. Univ. de Montpellier II. 147p.

- Hinsinger P., Plassard C., Tang C., Jaillard B., 2003.** Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and there response to environmental constraints: A review. *Plant and soil* 248, Montpellier (France), 43-59.
- Hinsinger P., Gobran G.R., Gregory P.J., Wenzel W. W. 2005.** Rhizosphere geometry and heterogeneity arising from root-mediate physical and chemical process., research view. *New phytologist* 168, 293-303.
- Hinsinger P., Plassard C., Jaillard J., 2006.** Rhizosphere. A new frontier for soil biogeochemistry. *Journal of Geochemical Exploration* 88, 210- 213.
- Hinsinger P., Bengough AG., Vetterlein D., Young IM. 2009.** Rhizosphere: biophysics, biogeochemistry and ecological relevance- *Plant and soil* 321, 117-152.
- Hinsinger P., Brauman L., Devau N., Gérard F., Jourdan C., Laclau J.P., Le Cadre E., Jaillard B., Plassard C. 2011** Acquisition of phosphorus and other poorly mobile nutrients by roots. Where do plant models fall? *Plant soil* 348: 29-61.
- Hishi T., Fujimaki R. McGonigle T.P., Takeda H., 2008.** Relationships among fine roots, fungal hyphae and soil micropods among different soil microhabitats in a temperate coniferous forest of *Chamaecyparis obtusa*. *European Journal of Soil Biology* 44 : 473-477.
- Hocking J.P. 2001.** The role of organic acids exuded from roots in phosphorus nutrition. In management and conservation of tropical acid soils for susbtainable crop production. Proccesings of a consultants meeing organized by the joint. FAO/ IAEA. Division of nuclear Techniques in food and Agriculture and held in Vienna.1-3 march 1999. pp: 60-70.
- Hodge A. 2004.** The plastic plant: root responses to heterogeneous supplies of nutrients. *New Phytologist* 162, 9-24.
- Hoffland, E., Findenegg, G.R., Nelemans, J.A., 1989.** Solubilization of rock phosphate by rape. II. Local root exudation of organic acids as a reponse to P-starvation. *Plant and Soil* 113, 161-165.
- Huerta, E., and van der Wal, H., 2012.** Soil macroinvertebrates' abundance and diversity in home gardens in Tabasco, Mexico, vary with soil texture, organic matter rand vegetation cover. *European Journal of Soil Biology* 50, 68-75.
- Illemer P., Barbata A. and Schinner F., 1995.** Solubilization of Hardly soluble $AlPO_4$ with P-solubilizing microorganisms. *Soil Biology and Biochemistry*. N°27. pp: 265-270.
- Ivask M., Kuu A., Meriste M. Truu J., Truu M., Vaater V., 2008.** Invertebrate communities (Annelida and epigeic fauna) in three types of Estonian cultivated soils. *European Journal of Soil Biology* 44, 532-540.
- Jackson M.L.,1967.** *Soil Chemical Analysis* . Prentice - Hall of India Private Limited New Delhi : 502p .
- Jacob, M., Weland, N., Platner, C., Schaefer, M., Leuschner, C., Thomas, F.M., 2009.** Nutrient release from decomposing leaf litter of temperate deciduous forest trees along a gradient of increasing tree species diversity. *Soil Biology & Biochemistry* 4, 2122-2130.
- Jaillard B. 2001.** Flux de proton dans la rhizosphère et acidification des sols (sol et environnement) ENSAM INRA 2p.

- Jones, C.G., Lawton, J.H., Shachak, M., 1997.** Positive and negative effects of organisms as physical ecosystem engineers. *Ecology* 78, 1946–1957.
- Jones. D., Dennis P.G., Owen A.G. and van Hees P.A.W., 2003.** Organic acid behavior in soils: misconceptions and knowledge gaps. *Plant Soil* 248: 31-41.
- Jones D.L., Hodje A., Kuzyakov Y. 2004** Plant and mycorrhizal regulation of rhizodeposition. *New Phytologist* **163**, 459-480.
- Jones D.L., Nguyen C., Finlay R. 2009.** Carbon flow in the rhizosphere: carbon trading at the soil root interface *Plant and Soil* **21 (1-2)**, 5-33.
- Jordao P.V., Mansas A., Centeno M. et Duarte M.L. 1993.** Effects of phosphorus and lime application on leaf mineral composition of olive trees grown in a schist soil. *Optimization of Plant Nutrition*. Eds Fraga MAC and van Beusichem ML **313**, 313-318
- Jumpponen A., 2001.** Dark septate endophytes – are they mycorrhizal? *Division of Biology. Kansas State University. USA* .5 p.
- Jung D. et Rohrbacher P., 2003.** Quelle forme d'engrais minérale choisie ? Piémont eau et terroirs. *Chambre d'Agriculture du Haut-Rhin*. N°50.2p
- Kabata-Pendias A., 1992.** Trace element soils and plants. 2nd Ed. CRC Press, Boca Raton, Florida, 365p.
- Karabaghli C., Sotta B., et Gay G., 1997 :** Hormones fongiques, ectomycorhizes et rhizogénèse. *Equipe de Microbiologie forestière. INRA. Centre de recherche de Nancy*. 11 p.
- Karemangingo C. , 2004.** Problèmes environnementaux liés au phosphore dans les sols. N.B. Ed. New Brunswick. Canada. 3p.
- Kawther L., 2002.** La fertilisation : Engrais et production Agricole. *Institut National de la Recherche Agronomique de Tunisie*. 9p.
- Kaye et al., 1997
- Khelfane-Goucem K., 2001.** Contribution à l'étude des endomycorhizes à arbuscules chez l'olivier, dans la région de Boghni (Tizi Ouzou): étude de l'efficacité des champignons endomycorhizogènes sur la croissance. *Thèse de mag. U.M.M.T.O.* 133 p.
- Kherbouche, D., Bernhard-Reversat, F., Moali, A., Lavelle, P., 2012.** The effect of crops and farming practices on earthworm communities in Soummam valley, Algeria. *European Journal of Soil Biology* 48,17-23.
- Kimba A., 2010.** La fertilisation des sols au Niger. *Bulletin trimestriel d'information du réseau national des chambres d'agriculture du Niger (RECA)*. N°7. 1-12pp.
- Kirk G.J.D., 1999.** A model of phosphate solubilization by organic anion excretion from plant roots. *Eur. J. Soil. Sci.* N°50. pp : 369-378.
- Klimek B., Choczyn' ski M., Juszkievicz A., 2009.** Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) roots and soil moisture did not affect soil thermal sensitivity. *European Journal of Soil Biology* 45. 442–447.
- Kumaraswamy S. et Udayakumar M., 2011.** Biodiversity banking : a strategic conservation mechanism. *Review paper. Biodivers Conserv.* 13p.

- Kuzyakov Y., Hill P.W., Jones D.L., 2007.** Root exudate compentes decomposition in a stimulated rhizosphere depending on temperature. Ed. Springer.pp: 293-305.
- Lacharme M., 2001.** La fertilisation minérale du riz. Coopération Française. 19p.
- Laheurte F. and Berthlin J.,1988.** Effect of a phosphate solubilizing bacteria maize growth and root exudation over four levels of labile phosphorus. Plant and soil. PLSO. N°105. pp : 11-17.
- Lambert M., 1998.** Maladies et Ravageurs de l'Olivier. Ed. Campanile.4p.
- Lavelle, P., and Spain, A.V., 2001.** Soil Ecology, Kluwer Academic, Publishers, Dordrecht, The Netherlands. 654 p.
- Le Dantec E., 2012.** L'olivier et les rapports biodiversité- société- l'olivier exemple concret de l'histoire des rapports de synergie-Univ. Perpignan Via Domitia depart. socio., 5p.
- Le Tacon F., 1985.** Principaux types mycorhiziens actuels représentés sur une coupe transversale de racine. INRA de Nancy. 1 p.
- Le Tacon F. et Selosse M.A., 1997.** Le rôle des mycorhizes dans la colonisation des continents et la diversification des écosystèmes terrestres. Equipe de Microbiologie forestière. Centre de Recherches de l'INRA de Nancy. 24 p.
- Leal C.Z., 2009.** Caractéristiques biologiques de l'olivier. Revue : Olivaryescuela. France 19 p.
- Lesuffleur F., 2007 :** Rhizodéposition à court terme de l'azote et exsudation racinaire des acides aminés par le trèfle blanc (*Trifolium repens* L.). Ed. S.N. 380 p.
- Lévêque C., 2008.** La biodiversité au quotidien : Le développement durable à l'épreuve des faits. Ed. Quae. 304p.
- Li L., Li S. M., Sun J. H., Zhou L. L., Bao X. G., Zhang H. G., and Zhang F. S. (2007)** Diversity en hances ag ricultu ral productivity via rh izosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils. Proc. Natl. Acad. Sci. 104, 11192-11196.
- Li H., Shen J., Zhang F., Clairotte M., Drevon J.-J., Le Cadre E., and Hinsinger P. (2008)** Dynamics of phosphorus fractions in the rhizosphere of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and durum wheat (*Triticum turgidum durum* L.) grown in monocropping and intercropping systems. Plant & Soil 312, 139-150.
- Lindsay W.L., Vlek P.L. and Chien S.H., 1989.** Phosphate minerals. In Minerals in soil environments(eds. E. Dixon and A. Weed). Soil Science Society of America Book Series, Madison.
- Lines-Kelly R. 2005.** Soil biology basics : The rhizosphere. Ed. New South Wales Department of Primary Industries. 1p.
- Lobry de Bruyn, L.A., 1999.** Ants as bioindicators of soil function in rural environments. Agriculture, Ecosystems & Environment 74, 425-441.
- Lombi E., Scheckel K.G., Armstrong R.D., Forrester S., Cutler J.N. and Paterson D., 2006.** Speciation and distribution of Phosphorus in a Fertilized Soil: Asynchrotron-based Investigation Soil Chemistry. Soil. Sci. Soc. Am. J. N°70. pp: 2038-2048.

- López-Granados F., Jurado-Expósito M., Álamo S., Garcia-Torres L. 2004.** Leaf nutrient spatial variability and site-specific fertilization maps within olive (*Olea europaea* L.) orchards Europ. J. Agronomy 21. 209
- Lorenz S.E., Hamon R.E., McGrath S.P., 1994.** Differences between soil solutions obtained from rhizosphere soils by water displacement and soil centrifugation. Eu. J. Sci.45: 431-438.
- Loussert R., Brousse G. 1978.** L'olivier Techniques agricoles et production méditerranéenne ; Ed. G.P. Masson et Larose, Paris.465p.
- Lynch J.M., 1995.** Root architecture and plant productivity, plant physiol109.pp:7-13.
- Lynch J.M., 1991.** Developments in rhizosphere microbiology.Ed.Australian Microbiologist 13. pp: 99-100.
- Lynch J.M., Whipps J.M. 1990** Substrate flow in the rhizosphere. Plant and Soil 129 (1), 1-10.
- M.A.D.R., 2009.** Statistiques agricoles, superficies et produits. Ministère de l'agriculture et développement, Alger. 18p.
- Ma Q., Rengel Z., Bowden B. 2007.** Heterogeneous distribution of phosphorus and potassium in soil influences wheat growth and nutrient uptake. Plant and Soil **291**, 301-309.
- Mabel., 2007.** L'oléiculture en Algérie. E .108/Doc. N° 4. Mise à jour n° 32. 22 p.
- Madeleine A., 2006.** Fertilisation et amendement. Ed. Educagri. Paris. 131p.
- Malézieux E., Crozat Y., Dupraz C., Laurans M., Makowski D., Ozier-Lafontaine H., Rapidel B., de Tourdonnet S., and Valantin-Morison M., 2008.**Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. Agronomy for Sustainable Development 29, 43-62.
- Malloch D., 2007.** Les micro-organismes du sol jouent un rôle fondamental dans la vie de la plante. 8p.
- Manga A., Ndiaye F., Sow H.A. et Diop T.A., 2008 :** Influence du chlorure de sodium sur la croissance, la nutrition minérale et la mycorhization de *Acacia seyal*. Journal des Sciences et Technologies. 10 p.
- Marschner, H. 1995.** Mineral Nutrition of Higher Plant, 2nd ed. Academic Press, San Diego. p.889.
- Marschner P., Yang C.H., Lieberei R., Crowley D.E. 2001.** Soil and plant specific effects on bacterial community structure in the rhizosphere. Soil Biol Biochem 33:1437–1445
- Marschner P., Kandeler E., Marschner B., 2003.** Structure and function of the soil microbial community in a long-term fertilizer experiment. Soil Biol Biochem 35:453–461.
- Marschner P., Crowley D., Yang C.H., 2004.** Development of specific rhizosphere bacterial communities in relation to plant species, nutrition and soil type. Plant Soil 261:199–208.
- Marschner P., Suleiman Z., Rengel Z., 2005.** Growth phosphorus uptake and microbial community composition of phosphorus efficient.Wheat cultivar in soils differing in Ph.journal of plant nutrition and soils science.pp:81-146

- Martins da Silva, P.M., Aguiar, C.A.S., de Faria e Silva, I., Serrano, A. R. M., 2011.** Orchard and riparian habitats enhance ground dwelling beetle diversity in Mediterranean agro-forestry systems. *Biodiversity and Conservation* 20, 861-872.
- Martinez R.L., Sanchez C.M. 1975.** Fertilisation II. Séminaire oléicole international 6-17 octobre. Cordoue (Espagne), 48-46.
- Matsumoto L.S.,Martines A.M., Avanzi M.A., Albino U.B., Saridakis D.P., Rampazo L.G.L,Zangaro W. and Andrade G., 2005.** Interaction among functional groupes. In the cyclinge of carbon, nitrogen and phosphorus in the rhizosphere of there successional species of tropical Woody trees *Applied Soil Ecology*. pp : 57-65.
- McCully, M.E. 1995.** Water efflux from the surface of field-grown grass roots: observations by cryo-scanning electron microscopy. *Physiologia Plantarum*, 95, 217–224.
- McDowell R.W., Condrón L.M., Stewart I., 2008.** An examination of potential extraction methods to assess plant-available organic phosphorus in soil. *Biol Fertil Soils* 44:707–715
- McLaughlin M.J., Smolders E. and Merckx R. 1998.** Soil–root interface: Physicochemical processes. In *Soil Chemistry and Ecosystem Health*. Soil Science Society of America, Madison, WI, USA. pp. 233-277.
- Meddich M., Oihabi A., Abbas Y. et Bizid E., 2000.** Rôle des champignons mycorhiziens à arbuscules de zones arides dans la résistance du trèfle (*Trifolium alexandrinum* L.) au déficit hydrique. Laboratoire de Physiologie Végétale, Faculté des Sciences. Semlalia, Marrakech, Maroc. 13 p.
- Menoyo E., Becerra A.G. and Daniel D., 2007.** Mycorrhizal associations in Polylepis woodlands of Central Argentina. Càtedra de Diversidad Vegetal I, Facultad de Química, Bioquímica y Farmacia, Universidad Nacional de San Luis. Argentina. 6 p.
- Merlim, A.O., Guerra, J.G.M., Junqueira, R.M., de Aquino, A.M., 2005.** Soil macrofauna in cover crops of figs grown under organic management. *Sci. Agric.* 62, 57-61.
- Meyer S., Reeb C. et Bosdeveix R., 2004 :** Botanique : Biologie et Physiologie Végétales. Ed. Maloine. 461 p.
- Meyer R.C., Steinfath M., et Lisec J., 2007.** The metabolic signature related to high plant growth rate in *Arabidopsis thaliana*. *Proc. Nath. Acad. Sci. USA* 104.pp: 4759-4764.
- Mobonigada -Muhinda JJ., Nzeyimana I., Bucagu C. et Culot M., 2009.** Caractérisation physique, chimique et microbiologique de trios sols acides tropicaux du Rwanda sous jachères naturelles et contraintes à leurs productivités. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 13 (4) : 545-558.
- Mollier A., De Willigen P., Heinen M., Morel C., Schneider A., and Pellerin S. 2008.** A two dimensional simulation model of phosphorus uptake including crop growth and P response. *Ecological Modelling* 210, 453-464.
- Monrozier L.J. et Bally R., 2002.** Interactions sol-Microorganismes-plantes. Synthèse de l'atelier. N°7.4p.
- Morel R., 1989:** Les sols cultivés .Ed. Tec. et doc. Lavoisier, Paris, 374p.

- Morel C., 2002 :** Caractérisation de la phytodisponibilité du phosphore du sol par la modélisation du transfert ions phosphates entre le sol et la solution. Mémoire préparé en vue d'obtention du diplôme d'habitation a dirigé des recherches. Institut national poly-technique de Lorraine. Ed. INRA, Bordeaux, pp :1- 48.
- Morel C. et Fardeau J.C., 1988.** Native soil and fresh fertilizer phosphorus : as affected by rate of application and phosphate fertilizers. *Plant and soil*, 115 : 123-128.
- Morel C., Leclech B. et Monique L.S.P., 2007.** Gare à la baisse de la biodisponibilité du phosphore. Centre de Recherche I.N.R.A. Bordeaux. Programme Fertibio. Paris. pp : 21-25.
- Morizot P. 1993.** L'Aurès et l'olivier. In: *Antiquités africaines*, 29. pp. 177-240.
- Morot-Gaudry J.F., 1997.** Assimilation de l'azote chez les plantes : aspects physiologique biochimique et moléculaire. Ed. INRA Paris.422p.
- Morón-Ríos, A., Rodríguez Miguel, Á., Pérez-Camacho, L., Rebollo, S., 2010.** Effects of seasonal grazing and precipitation regime on the soil macroinvertebrates of a Mediterranean old-field. *European Journal of Soil Biology* 46, 91-96.
- Morris T. et Campos M., 1999.** Predatory insects in olive-grove soil, *Zool. Baetica*. 10 : 49-160.
- Moughli L., 2000.** Les engrais minéraux : Caractéristique et utilisation. Bulletin Mensuel d'Information et de Liaison Du PNTTA. N°72. Maroc. pp : 1-4.
- Moujahid Y., Seriou N., Azzaoui A. et Bouhlassa S., 2004.** Rétention et Disponibilité du Phosphore apporté à quelque sols du Sais. *Revue. H.T.E. N°129*. pp : 46-50.
- Mousain D., Matumoto Pinto P., et Quinquampoix H., 1997.** Le rôle des mycorhizes dans la nutrition phosphatée des arbres forestiers. *Revue Franc.49.n° spécial* .pp: 67-81.
- Nabors M.W., 2009.** Biologie végétale : structures, fonctionnement, écologie et biotechnologies. Ed. Nouveau Horizon. Paris.614p.
- Nait Kaci M., 1997.** Contribution a l'étude du statut phosphaté des sols alluviaux de la région de Tadmait (Tizi Ouzou). Thèse de mag. U.M.M.T.O. 129 p.
- Negassa W. and Leinweber P., 2009.** How does the Hedley sequential phosphorus fractionation reflect impacts of land use and management on soil phosphorus: A review. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 2009, 172, 305–325.
- Neirynck J., Mirtcheva S., Sioen G., Lust N., 2000.** Impact of *Tilia platyphyllos* Scop., *Fraxinus excelsior* L., *Acer pseudoplatanus* L., *Quercus robur* L. and *Fagus sylvatica* L. on earthworm biomass and physico-chemical properties of a loamy topsoil. *Forest Ecology and Management* 133, 275-286.
- Neumann G and Römheld V., 1999.** Root excretion of carboxylic acids and protons in phosphorusdeficient plants. *Plant Soil* 211: 121-130.
- Neumann G. and Römheld V., 2007.** The release of root exudates as affected by the plant's physiological status. In Pinton R, Varanini Z, Nannipieri P (Eds.), *the rhizosphere*. New York, USA: Marcel Dekker Inc .pp: 41-94.
- Nguyen C. 2003.** Rhizodeposition of organic C by plant: mechanisms and controls. *Agronomie* 23,375-396.

- Nguyen C., 2007.** La libération de composés organiques par les racines (rhizodéposition): modélisation et impact sur la biodisponibilité des éléments minéraux pour les plantes. Mémoire de Titres & Travaux et Projet Scientifique en vue de l'obtention du Diplôme HDR. Ecole Doctorale Ressources, Produits, Procédés, Environnement. Nancy. 136 P.
- Nguyen C. 2009.** Rhizodeposition of Organic C by Plant: Mechanisms and controls. Sustainable Agriculture, Part 1, 97-123.
- Nouaïm R. et Chaussod., 1996.** Rôle des mycorhizes dans l'alimentation hydrique et minérale des plantes, notamment des ligneux de zones arides. Revue CIHEAM, Option Méditerranéennes. 18 p.
- Nultsch W. et Miesch R., 1998.** Botanique générale. Ed. De Boeck Université. 602 p.
- Nye P.H., 1986.** The diffusion of two interacting solutes in soil. J. Soil Sci. 34: 677-69 1.
- Nye PH., 1992.** Towards the quantitative control of crop production and quality I: the role of computer models in soil and plant research. J. Plant Nutr. 15: 1131-1150.
- Oburger E., Jones D. L. & Wenzel W. W., 2010.** Phosphorus saturation and pH differentially regulate the efficiency of organic acid anion-mediated P solubilization mechanisms in soil. Springer Science, Business Media B.V. Plant Soil, Regular Article 20p.
- Ogerbri., 2003.** Le secteur de l'huile d'olive et des olives de table. Document de Travail de la Direction Générale de l'Agriculture. Base documentaire à la proposition de la Commission Européenne. France. 51 p.
- Olsen S. R., Bowman R. A. et Watanabe F. J. : 1977.** Comportement du phosphore dans le sol et interactions avec les autres éléments nutritifs. Phosphore et Agriculture N. 70 : 35 - 52.
- Oliveira C.A., Alvers V.M.C., Marreil I.E., Gomes E.A., Scotti R.E., Cameiro N.P., Guimaraes C.T., Schaffet R.E. and Sa N.M.H., 2009.** Soil Biology and Biochemistry. Elsevier. N°41. pp : 1782-1787.
- Omodeo, P., Rota, E., Baha, M., 2003.** The megadrile fauna (Annelida: Oligochaeta) of Maghreb: a biogeographical and ecological characterization. Pedobiologia 47, 458-465.
- Ondina, P., Hermida, J., Outeira, A., Mato, S., 2004.** Relationship between terrestrial gastropod distribution and soil properties in Galicia (NW Spain). Applied Soil Ecology 26, 1-9.
- Ottonetti, L., Tucci, L., Chelazzi, G., Santini, G., 2008.** Stable isotopes analysis to assess the trophic role of ants in a Mediterranean agroecosystem. Journal compilation. The Royal Entomological Society. Agricultural and Forest Entomology 10, 29–36.
- Ouaouich A. et Chimi H., 2007.** Guide du producteur de l'huile d'olive. Organisation des Nations Unies pour le développement industriel, première édition. 36 p.
- Ouédraogo, E., Mando, A., Brussaard, L., 2006.** Soil macrofauna affect crop nitrogen and water use efficiencies in semi-arid West Africa. European Journal of Soil Biology 42, 275–277.
- Oukabli A. , Mimouni A., Lahlou M.M., Alabou M. 2008.** technique du figuier (Ficus carica L.) installation et conduite de la culture. Institut national de la recherche agronomique du Maroc. p.5.

Pages L., Kervella J., et Chadoeuf J., 1993. Développement du système racinaire des jeunes plants de pêcher (*Prunus persia L. Batsch*) : Une analyse morphologique n° 71. pp : 369-375.

Pages L., 1995. Growth patterns of the lateral roots of young oak (*Quercus robur*) tree seedlings. Relationship with apical diameter. Ed. New Phytol. N° 130, pp : 503-509.

Palese A.M., Nuzzoa V., Favati F., Pietrafesa A., Celano G., Xiloyannis C. 2010. Effects of water deficit on the vegetative response, yield and oil quality of olive trees (*Olea europaea* L., cv Coratina) grown under intensive cultivation *Scientia Horticulturae* **125**, 222-229.

Payn T.W., Skinner M.F., Hill R.B., Thorn A.J., Scott J., Downs S. and Chapman H., 2000. Scaling up or down: the use of foliage and soil information for optimizing the phosphate nutrition of Rodiata Pine. *For. Ecol Manage.* N°138. pp: 79-89.

Pena F. and Torrent J., 1990. Predicting Phosphate Sorption in Soils of Mediterranean Regions. *Fertilizer Research* 23, 173-179.

Pennings, S.C. and Silliman ,B.R., 2005. Linking biogeography and community ecology: Latitudinal variation in plant-herbivore interaction strength. *Ecology* 86, 2310-2319.

Pereira, J.A., Bento, A., Cabanas, J.E., Torres, L.M., Herz, A., Hassan, S.A., 2004. Ants as predators of the egg Parasitoid *Trichogramma cacoeciae* (Hymenoptera: Trichogrammatidae) Applied for Biological Control of the Olive Moth, *Prays oleae* (Lepidoptera: Plutellidae) in Portugal. *Biocontrol Science and Technology* 14, 653-664.

Pesson P., 1971. La vie dans les sols : Aspect nouveau, études expérimentales. Ed. Gauthiers-Villars, 417p.

Peterson R.L., Wagg C. and Pautler M., 2008. Association between microfungi endophytes and roots: do structural features indicate function. Department of Molecular and Cellular Biology. University of Guelph. Guelph, Ontario Canada. 12 p.

Plassard C., 1996. La mycorhization des plantes forestières en milieu aride et semi-aride : Nutrition minérale en terrains calcaires. *Revue CIHEAM, options Méditerranéenne*. 6 p.

Plenchette C., 2005. Mycorhizes et nutrition phosphatée des plantes. Arboriculture. Journées techniques fruits et légumes et viticulture biologiques. Ed. INRA de Dijon, France. 2p.

Pokryszko, B.M., Cameron, R.A.D., Mumladze, L., Tarkhnishvili, D., 2011. Forest snail fauna from Georgian Transcaucasia: patterns of diversity in a Pleistocene refugium. *Biological Journal of Linnean Society* 102, 239- 250.

Praffit R.L. 1977: Anion adsorption by soils and soils materials. *Advances in Agronomy* 30. pp : 1-50.

Pueyo Y. and Alados, C.L., 2007. Abiotic factors determining vegetation patterns in a semi-arid Mediterranean landscape: Different responses on gypsum and non-gypsum substrates. *Journal of Arid Environments* 69, 490–505.

Quemener, J., 1979. The measurement of soil potassium. IPI. Research topics N° 4/1978. Ed. International Potash Institute, Bern/Switzerland. pp. 48.

- Raghothama K and Karthikeyan A., 2005.** Phosphate acquisition. *Plant Soil* 274: 37–49.
- Ramirez Rodriguez V., Lopez Bucio J., Herrera-Estrella L. 2005.** Adaptative responses in plants to non optimal Ph. *Plant abiotic system*, 145-170.
- Ramos, M.E., Robles, A.B., Sanchez-Navarro, A., Gonzalez-Rebollar, J.L., 2011.** Soil responses to different management practices in rainfed orchards in semiarid environments, *Soil & Tillage Research* 112, 85-91.
- Raven P.H., Evert R.F., Eichhorn S.E., et Bouharmont J., 2003.** *Biologie végétale*, Ed, De Boeck Université. 968 p.
- Raven P.H., Evert R.F., Eichhorn S.E. et Bouharmont J., 2007.** *Biologie Végétale*. 2^{ème} Ed. Group de Boeck. S. a. Bruxelles. 733p.
- Raynold D.:1976.** Evolution sédimentaire et tectonique du Nord-Ouest de la grande Kabylie (Algérie) au cours du cycle Alpin. Thèse de Doctorat d'Etat. Université Pierre et Marie Curie. Paris 6. 152 p.
- Razi S., 2006.** Étude expérimentale de l'influence du gypse sur dynamique du phosphore dans le sol et sa cinétique d'absorption par le ray-grass. Thèse. Magister. Université Elhadj Lakhdar. Batna.194p.
- Read D., Gregory P.J. 1997.** The influence of root mucilages on the physical properties of the rhizosphere. Symp. n° 43, 16^e congrès mondial des sciences du sol de Montpellier (France). 2p.
- Recalde L. 1975.** Fertilisation. IIème Sem. Olei. Inter. Cordoue , 43 - 64.
- Redon P.O., 2009.** Rôle de champignons mycorhiziens à arbuscules dans le transfert du cadmium (Cd) du sol à la luzerne (*Medicago truncatula*). Thèse présentée pour l'obtention du titre de Docteur en Sciences du Sol. Université Henri Poincaré. Nancy. 205 p.
- Reinhardt D. et Didier, 2007.** Current Opinion in Plant Biology. Journées Méditerranéennes de l'Olivier, Meknès, 22-26 octobre.
- Restrepo-Diaz H., Benlloch M., Navarro C., Fernandez-Escobar R. 2008.** Potassium fertilization of rainfed olive orchards *Scientia Horticulturae* 116, 399-403.
- Ribeiro H., L . Santos L., Ilda Abreu & Mario Cunha, 2006.** Influence of meteorological parameters on Olea flowering date and airborne pollen concentration in four regions of Portugal (Meteorological parameters and Olea flowering in Portugal). Taylor and Fancis, Grana, 2006; 45: 115–121.
- Ricarte, A., Marcos-Garcia, M.A., Moreno, C.E., 2011.** Assessing the effects of vegetation type on hoverfly (Diptera: Syrphidae) diversity in a Mediterranean landscape: implications for conservation. *Journal Insect Conservation* 15, 865–877.
- Richaradson A.E., 1994.** Soil microorganisms and phosphorus availability. *Soil Biota Management in Sistainable Farming Systeme*. CSIRO. Australie. pp50-62.

- Richardson, A.E., George, T.S., Hens, M., Simpson, R.J., 2005.** Utilization of Soil Organic Phosphorus by Higher Plants. In: Turner, B.L., Frossard, E., Baldwin, D.S. (Ed.), Organic Phosphorus in the environment. CABI Publishing, Cambridge, pp. 165–184
- Richardson A.E., Barea J.M., McNeil A.M., Prigent-Combaret C., 2009.** Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms. *Plant Soil* 321: 305-339.
- Richardson A.E., Simpson R.J., George T.S., Hocking P.J., 2010.** Plant mechanisms to optimize access to soil phosphorus. *Crop Pasture Sci* 6p.
- Rilling C.M., 2004.** Arbuscular mycorrhizae, glomalin, and soil aggregation. Microbial Ecology Program, Division of Biological Sciences. University of Montana, Missoula, MT 59812. USA. 10 p.
- Robert D. et Catesson A.M., 2000.** Biologie végétale : caractéristiques et stratégies évolutives des plantes. Ed. Doin. 356 p.
- Robert L., 2011.** Le phosphore dans le sols; comprendre comment ça fonctionne. MAPAQ Chaudière- Appalaches. Beaupré. 43p.
- Robinson D. 1996.** Variation, co-ordination and compensation in root system in relation to soil variability *Plant and soil* 187: 57
- Rodrigues MA., Lopes JI., Pavao FM., Cabanas JE., Arrobas M. 2009.** Effect of Soil Management on Olive Yield and Nutritional Status of Trees in Rainfed Orchards. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 42, 993-1007.
- Romheld V., Neuman G. 2006.** The rhizosphere: Contributions of the Soil-Root interface to sustainable soil systems in Biological Approach, to sustainable soil systems. Ed. CRC Taylor and Francis Group, 91-103.
- Rouabah, L. and Descamps, M., 2001.** Biologie des oligochètes *Lumbricus terrestris*, *Allolobophora chlorotica* et *Dendrobaena pygmaea* dans le Constantinois (Est Algérien) Biology of *Lumbricus terrestris*, *Allolobophora chlorotica* and *Dendrobaena pygmaea* (Annelida, Oligochaeta) in eastern Algeria. *Société zoologique de France*, 126, 49-58.
- Rovira A.D., 1979 :** Plant root exudate. *Botany Revue* 35. pp : 35-57.
- Ruano, F., Lozano, C., Garcia, P., Pena, A., Tinaut, A., Pascual, F., Campos, M., 2004.** Use of arthropods for the evaluation of olive-orchard management regimes. *Agricultural and forest entomology* 6, 111- 120.
- Ruiz-Lozano J.M., Azcon R. et Gomez M., 1995.** Effect of arbuscular mycorrhizal *Glomus* species on drought tolerance: physiological and nutritional plant responses, *Appl. Environ. Microbiol.* 61 : 456–460.
- Saddaka N. and Ponge J.F., 2003.** Soil animal communities in holm oak forest : influence of horizon, altitude and year. *European Journal of Soil Biology* 39: 197- 207.
- Saidi O., 2002.** L’analyse du sol. Un outil incontournable de gestion de la fertilité des sols. *Bulletin mensuel d’information et de liaison du PNTTA. Rayoum du Maroc.* N° 93. pp : 1-4.

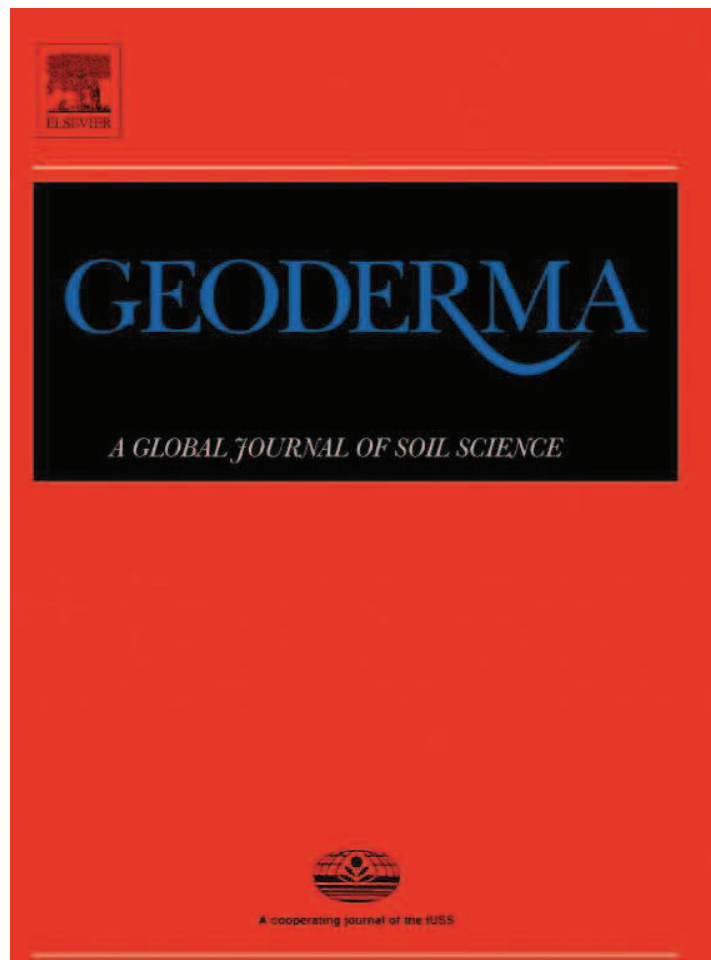
- Santos, S.A.P., Cabanas, J.E., Pereira, J.A., 2007.** Abundance and diversity of soil arthropods in olive grove ecosystem (Portugal): Effect of pitfall trap type. *European Journal of Soil Biology* 43, 77- 83.
- Saunders, M.H., Williams, E.G., 1955.** Observations on the determination of total organic phosphorus in soils. *Journal of Soil Science* 6, 247–267.
- Saur E., 1989.** Effet de l'apport de phosphore de carbonate de calcium et d'oligoéléments à 3 sols sableux acides sur la croissance et la nutrition phosphatée. *I.N.R.A. Physio.Veg. Agronomie*. N°9. pp: 931-940.
- Schroder P., Hartmann A. 2003.** Global Soils: Germany New Developments in Rhizosphere Research. Institute of Soil Ecology. Department Rhizosphere Biology, GSF - National Research Center for Environment and Health, D-85764 Neuherberg. Germany. Corresponding author (peter.schroeder@gsf.de) *JSS - J Soils & Sediments* 3 (4). 227p.
- Schvartz C., Decroux J. et Muller J.C., 2005.** Guide de la fertilisation raisonnée : grandes cultures et prairies. Ed. France Agricole, 414p.
- Seltzer P., 1946.** Le climat de l'Algérie Travaux Inst. Météor. et Phys du globe. Univ. D'Alger. 219 p.
- Shanas, U., Galyun, Y.A., Alshamlih, M., Cnaani, J., Guscio, D., Khoury, F., S. Mittler, S., Nassar, K., Shapira, I., Simon, D., Sultan, H., Topel, E., Ziv, Y., 2011.** Landscape and a political border determine desert arthropods distribution. *Journal of Arid Environments* 75, 284-289.
- Sharon, R., Degan, G., Warburg, M., 2001.** Comparing the soil macro-fauna in two oak-wood forests: does communities structure differ under similar ambient conditions? *Pedobiologia* 45, 355-366.
- Shi W., Wang X. and Yan W. 2004.** Distribution patterns of available P and K in rape rhizosphere in relation to genotypic difference . *plant and soil* 261, 11-16.
- Sheridan H., Finn J.A., Culleton N., O'Donovan G., 2008.** Plant and invertebrate diversity in grassland field margins. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 123: 225-232.
- Si Bennasseur A., 2005 :** référentiel pour la conduite technique de l'olivier (*Olea europea*). 8p.
- Si Bennasseur, A., 2005.** "Organic Farming in the World, and Case Study of Morocco: Achievements, Drawbacks and Future Perspectives." Séminaire International sur la conservation du sol et de l'eau en région Méditerranéenne, Rabat. <http://www.vulgarisation.net/agdumed2009/>
- Sibbett G.S. et Ferguson L., 2002.** Olive production manual. Ed. ANR Publi. 180p.
- Siegel, S., and Castellan, N.J., 1988.** Non parametric statistics for the behavioural sciences. MacGraw Hill Int., New York. pp 213-214.
- Skiredj A ;, 2005.** L'art de produire des légumes au maroc ; L'olivier. 1p.
- Smith S.E. and Read D.J., 2008.** Mycorrhizal symbiosis. 3 rd. Ed. Academic Press. London. 354p.

- Sollins P., Homann P. and Caldwell B.A., 1996.** Stabilization and destabilization of soil organic matter : mechanisms and controls. *Geoderma*. N°74. pp 65-70.
- Smith and Read 2007.** Mycorrhizal Symbiosis, 2nd Ed. Academic Press, London.
- Smith S.E., Smith F.A. et Jakobsen I., 2003 :** Mycorrhizal fungi can dominate phosphate supply to plants irrespective of growth responses. *Plant Physiology* 133, 16–20.
- Sood S.G. and Minhas , 1988, 2003.** Chemotactic response of plant-growth-promoting bacteria towards roots of vesicular-arbuscular mycorrhizal tomato plants. *FEMS Microbiol Ecol* 45 .pp: 219-227.
- SOPBIP., 2012.** Le sulfate de potassium et de la production d'olive. Tessenderlo Group. Rue de Trone 130 B-1050 Bruxelles Belgique. (sulphate of potash information Board) .4p.
- Spichiger S., Savolainen V., Figeat M., et Jeanmonod D., 2002.** Botanique systématique des plantes à fleurs. 2eme Ed. Press. Polytechniques et universitaires Romandes CH. 413 p.
- Staley J.T., Hodgson C.J., Mortimer S.R., Michael D. Morecroft M.D., Masters G.J., Brown V.K. and Taylor M.E., 2007.** Effects of summer rainfall manipulations on the abundance and vertical distribution of herbivorous soil macro-invertebrate *European Journal of Soil Biology* 43, pp: 189-198.
- St Clair S. B. and Lynch J. P. 2010.** The opening of Pandora's Box: climate change impacts on soil fertility and crop nutrition in developing countries. *Plant and Soil* 335, 101- 115.
- Stengel P. et Gelin S., 1998.** Le sol : Interface fragile. Collection mieux comprendre. Ed. INRA. 213 p.
- Stullu D.G. : 1991.** Les mycorhizes des arbres forestiers et des plantes cultivés. Lavoisier, Paris
- Suty L., 2010.** La lutte biologique vers de nouveaux équilibres écologiques. Ed. Quae, 328p.
- Tiessen H., 1995.** Phosphorus in the global environment. Ed. John Wiley and sons. New York. 124- 130.
- Tiessen H. et Frossard E., 1991.** Soil phosphorus transformations in the semi-arid zone of west africa : Application to soil available phosphorus, 32p.
- Tombesi A., Tombesi S.D, Andria R., Lavini A., Milagros S.S., Fernandez-Escobar R. et Jarda T., 2007.** Techniques de production en oléiculture. Espagne, 1^{er} Ed impression : Arlegraf. S.A. 348p.
- Turpault M.P., Ultramontain C., Bonnaud P., Gobran G., Righi D. et J.H., 2001.** Dynamique saisonnière des propriétés physico-chimiques et minéralogique du sol rhizosphérique et global dans un écosystème forestier acide. INRA. Pp : 59-78.
- Turpault M., Belgrande C., Tienne E., Dambrine S., Bienaime S., NYS C., Marie Pierre N. 2003.** Influence of the tree roots on the mineralisation of azote. Ed. I.N.R.A., Paris, 260-268.
- Turpault M. P., Uterano C., Boudot J.P., Ranger J. 2005** Influence of mature Douglas fir roots on the solid soil phase or rhizosphere an soil solution chemistry. *Plant and soil*. **275**, 327-336.

- Turpault M.P., Belgrande C., Tienne E., Dambrine S., Bienaime S., Nys C., et MarieA Pierre N. 2006** Dynamique seasonal of the phisical-chimical and mineralogic properties of rhizospheric and global soils in an acid forest ecosystem. Ed. I.N.R.A., Paris, 50p.
- Turpault M.P., Nys C., Calvaruso C. 2009.** Rhizosphere impact on the dissolution of test minerals in a forest ecosystem. *Geoderma* **153**,147-154
- Uren N.C., 2000.** Types, amounts, and possible functions of compunds released into the rhizosphere by soil-grown plants. *In* Pinton R, Varanini Z, Nannipieri P (Eds.), *the Plant J* **25**. pp: 641-649.
- Vance C. P., Uhde-Stone C., and Allan D. L. 2003.** Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a non renewable resource. *New Phytologist* **157**, 423-447.
- Van der Wal, A., Geerts, R.H.E.M., Korvaar, H., Schouten, A.J., Jagers op Akkerhuis, G.A.G.M., Rutgers, M., Mulder, C., 2009.** Dissimilar response of plant and soil biota communities to long-term nutrient addition in grasslands. *Biology and Fertility of Soils* **45**, 663-667.
- Vanhaecke T., 2006.** Les engrais. Les cahiers de l'Agriculture et de l'Environnement. Magquette. CANC. Mar. qxd. N°16 12-13pp.
- Véla, E., et Benhouhou, S., 2007.** Evaluation d'un nouveau point chaud de biodiversité végétale dans le bassin méditerranéen (Afrique du Nord). *C. R. Biologies* **330**, 589-605.
- Vidaud J., Baccaunaud M., Caraglio Y., Hutin C., Roger T.P. 1997.** Le figuier. Monographie. Centre technique et interprofessionnel des fruits et légumes (Ctifl). (Paris. France), 19- 34.
- Villa P., 2003.** La culture de l'olivier. Ed. De vecchi S.A. Paris. 143p.
- Vilain M., 1997.** La production végétale. La maitrise Technique de la Production. 2^{ème} Ed. Vol 2. Lavoisier. Paris. 478p.
- Violante P., Adamo P., FellecA D., Palmeri G., et Palmiro F. 1998.** N, K and P distribution in rhizosphere and bulk soils of field grown maize. Symp. N° 43, 16th World Cong.of Soil Science, Montpellier, (France).
- Viollet A., 2010.** Influence du système de sécrétion de type III bactérien dans les interactions plante-*Pseudomonass. fluorescentsnon-* pathogènes- Thèse Doc. Univ. Bourogne. Spé .Eco. Microb. 363p.
- Von Uexküll HR and Mutert E (1995)** Global extent, development and economic impact of acid soils. *Plant Soil* **171**: 1–15.
- W.R.B., 2006.** World Reference Base for Soil Resources. AISS, IRSIC, FAO. Rome, 90p.
- Wakelin et al., 2004
- Wagg C., Pautler M.,Hugues B. Massicotte H.B. and Peterson R.L., 2007.** The co-occurrence of ectomycorrhizal, arbuscular mycorrhizal, and dark septate fungi in seedlings of four members of the Pinaceae. Department of Molecular and Cellular Biology. University of Guelph. Ontario. Canada. 8 p.

- Walali L.D., Skiredj A., Elattir H. 2003.** Culture de l'olivier, l'amandier, le figuier et le grenadier au Maroc. Journal de transfert de technologie en Agriculture, N°105. 4p.
- Waligora C. et Vian J.F., 2010.** Relations racines et sol, un monde de communication et d'équilibre. Revue. Ed. Techniques culturelles simplifiées N°57. Lyon.11p.
- Walker T.S., Bais H.P., Grotewold E., et Vivanco J.M., 2003.** Root exudation and rhizosphere biology. Plant Physiol ,132.pp: 44-51.
- Wang X., Zabowski D., 1998** Nutrient composition of Douglas-fir rhizosphere and bulk soil solutions Plant and Soil **200**,13-20.
- Wang Y, He Y, Zhang H, Schroder J, Li C and Zhou D., 2008.** phosphate mobilization by citric, tartaric and oxalic acids in a clay loam Ultisol. Soil Sci. Soc. Am. J. 72: 1263-1268.
- Wang J., Liu W.Z., Mu H-F., Dang TH. 2010.** Inorganic Phosphorus Fractions and Phosphorus Availability in a Calcareous Soil Receiving 21-Year Superphosphate Application. Pedosphere **20(3)**: 304–310.
- Wang H., Inukai Y., et Yamauchi A., 2011.** Root development and nutrient uptake. Crit. Rev. Plant Sci.25 .pp: 279-301.
- Warburg, M.R., Linsenmair, K.E., Bercovitz, K., 1984.** The effect of climate on the distribution and abundance of Isopods. The Zoological Society of London, Symposium Zoological 53, 339-367.
- Watt M., Mc Cully M.E. Jeffree C.E. 1993.** Plant and bacterial mucilages of the maize rhizosphère- Comparison of their soil binding proprieties and histochemistry in a model system. Ed. Plant and soil, 151-165.
- Watteau F., Villemin G., Burtin G., et Jocteur - Monrozier L., 2006.** Root impact on the stability and types of microaggregates in silty soil under maize. Université de Lyon 1, France. European Journal of Soil Science.57 : 247-257.
- Weill A. et Duval J., 2009.** Les fertilisations autres que les fumiers et les composts. Module 7 : Chapitre 13 « Amendements et fertilisation ». Manuscrit du Guide de Gestion Globale de la Ferme Maraîchère Biologique et Diversifiée. Ed. Equi terre. pp: 1-8.
- White P.J. and Hammond J.P., 2008.** The ecophysiology of Plant-Phosphorus Interactions. Springer Science, Business Media B.V., 31p.
- Whitelaw M.A., Harden T.J. and Helyar K.R., 1999.** Phosphate solubilisation in solution culture by the soil fungus *Penicillium radicum*. Soil Biology and Biochemistry. N° 31. pp: 655-665.
- Woodcock, B.A., Pywell, R.F., Roy, D.B., Rose, R.J., Bell, D., 2005.** Grazing management of calcareous grasslands and its implications for the conservation of beetle communities. Biological Conservation 125, 193- 202.
- Wu L., Guo S., 2007.** Interaction between an isolate of dark-septate fungi and its host plant *Saussurea involucre*. Institute of Medicinal Plant, Chinese Academy of Medical Sciences and Peking Union Medical College. China. 7 p.
- Yakoub B, 1996.** Le problème de l'eau en Grande Kabylie. Le Bassin Versant du Sebaou et de la Wilaya de Tizi-Ouzou. Ed. U.M.M.T.O., 210 p.

- Zemoura A.K., 2005.** Etude comparative de quelques méthodes de dosage du phosphore assimilable des sols calcaires en région semi-aride (wilaya de Batna). Thèse Magister. 182p.
- Zhang F. and Li L., 2003.** Using competitive and facilitative interactions in intercropping systems enhances crop productivity and nutrient-use efficiency. *Plant and Soil* 248, 305-312.
- Zhang F., Shen J., Li L., Liu X., 2004.** An overview of rhizosphere processes related with plant nutrition in major cropping systems in China. *Plant and Soil* 260, 89-99.
- Zhang, C.S., Manheim, F.T., Hinde, J., Grossman J.N., 2005.** Statistical characterization of a large geochemical database and effect of sample size. *Appl. Geochem* 20, 1857-1874.
- Zhang J.L., George E. 2009.** Rhizosphere effects on ion concentrations near different root zones of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and root types of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* L.) seedlings 322 (1-2), 209-218.
- Zhang H. XUm. ZhangW., He X. 2009.** Factors affecting potassium fixation in seven soils under 15- year long-term fertilization. *Chinese Sci Bull*, 54(10), 1773-1780.
- Zhao J., Fu J. He Y., 2007.** Characterisation of root architecture in an applied core collection for phosphorus acquisition efficiency in maize seeding. *Funct Plant Biol* 31: 949-958.
- Zhu H., Liu Z., Wang C., Zhong Z. 2006** Effects of intercropping with persimmon on the rhizosphere environment of tea *Front. Biol. China* 4, 407-410.



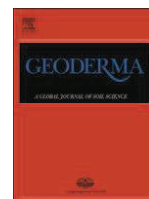
(This is a sample cover image for this issue. The actual cover is not yet available at this time.)

This article appeared in a journal published by Elsevier. The attached copy is furnished to the author for internal non-commercial research and education use, including for instruction at the authors institution and sharing with colleagues.

Other uses, including reproduction and distribution, or selling or licensing copies, or posting to personal, institutional or third party websites are prohibited.

In most cases authors are permitted to post their version of the article (e.g. in Word or Tex form) to their personal website or institutional repository. Authors requiring further information regarding Elsevier's archiving and manuscript policies are encouraged to visit:

<http://www.elsevier.com/copyright>



Potassium status in bulk and rhizospheric soils of olive groves in North Algeria

Sophia Mouas Bourbia ^{a,b}, Pierre Barré ^{b,*}, Malika Boudiaf Naït Kaci ^a, Arezki Derridj ^c, Bruce Velde ^b

^a Laboratoire Ressource Naturelle, Faculté des Sciences Biologiques et Agronomiques, UMMTO, Algeria

^b Laboratoire de Géologie, UMR 8538 CNRS-ENS, 24 Rue Lhomond, 75231 Paris Cedex 05, France

^c Laboratoire de Production, Amélioration & Protection des Végétaux & des Denrées Stockées, Faculté des Sciences Biologiques et Agronomiques, UMMTO, Algeria

ARTICLE INFO

Article history:

Received 16 November 2011

Received in revised form 19 December 2012

Accepted 10 January 2013

Available online xxxx

Keywords:

Clay minerals

North Algeria

Olive tree

Potassium

Rhizosphere

Soil

ABSTRACT

Olive (*Olea europea* L.) production is very important economically for many Mediterranean countries as in North Algeria where the present study took place. Traditionally, olive groves are found in nutrient poor marginal lands with no irrigation and on high slopes. Though K deficiency can negatively impact olive production, it is seldom corrected through fertilizer application due to farmers' lack of information on soil nutrient status and the prohibitive cost of K fertilizers. This study attempted to determine to what extent marginal lands (unsuitable for intensive cropping) in Northern Algeria planted with olive trees were K deficient and whether or not the soil K status impacted plant K status. To do so, bulk and rhizospheric soils as well as olive tree K foliar content were analyzed in 16 non-fertilized stations. The bulk soil of 7 of the 16 stations showed K deficiency. Different forms of potassium in the soils (water extractable, exchangeable and slowly-exchangeable forms) were observed to be systematically greater in the rhizosphere compared to the bulk soil. This increase was confirmed by the higher amount of "illite-like" clay layer minerals in the rhizospheric soils compared to those in the bulk soil. If rhizospheric soil properties were considered, only two stations remained K poor. Apart from the driest site, where K absorption was likely reduced due to extreme climatic conditions, these two stations were the only stations where foliar K content showed a K deficiency.

This study showed that (i) the olive tree rhizosphere was systematically K enriched compared to bulk soils; (ii) that olive trees were especially suitable for growth on K poor soils and (iii) that marginal lands of North Algeria were on average less K poor than expected.

© 2013 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Olive trees (*Olea europea* L.) are very important economically for many Mediterranean countries as in Algeria and more specifically in Kabylia where the present study took place. Traditionally, olive groves are implemented in marginal lands (dry and nutrient poor soils with high slopes unsuitable for intensive cropping). In particular, potassium deficiency has been reported for olive trees (Restrepo-Diaz et al., 2008) which can negatively impact their development. Indeed, potassium deficient olive trees have been reported to be less drought stress resistant (e.g. Cakmak, 2005), to have a lower growth rate (Arquero et al., 2006) and to be more vulnerable to pests (Argenson et al., 1999). However, in North Algeria as in many other regions, K deficiency is seldom corrected through fertilizer application due to farmers' lack of information on soil nutrient status and the high cost of fertilizers for local farmers (e.g. Römheld and Kirkby, 2010). In such areas, it is therefore important to have a better knowledge on soil K status and plant K uptake in order to improve crop production and quality (Cakmak, 2010).

Several pools of K with different plant root accessibility are classically distinguished in soils (e.g. Öborn et al., 2005; Römheld and Kirkby, 2010): (i) water extractable K; (ii) exchangeable K (K extracted in the laboratory using a 1 M NH_4^+ solution buffered at pH 7); (iii) slowly-exchangeable K (K extracted using a 1 M HNO_3 solution minus exchangeable K); and (iv) structural K (total K minus exchangeable and slowly exchangeable K). Water extractable K and exchangeable K are readily available to plants but usually constitute a minor part of soil K (Hinsinger, 2002). Slowly-exchangeable K which corresponds mainly to anhydrous K^+ ions fixed in 2:1 clay mineral interlayer sites (illite) has been reported to contribute very significantly to plant K nutrition (e.g. Barré et al., 2007b; Hinsinger, 2002; Norouzi and Khademi, 2010), though it has a lower availability to plants. Structural K consisting mainly of K in primary minerals such as K-feldspars is only available to plants through mineral weathering and is considered to be of relatively minor importance for short-term plant K nutrition.

Potassium ions are taken up in the vicinity of roots in the so-called rhizosphere zone. In this zone, soil micro-organisms are supplied with carbon compounds by plant root exudates which make the rhizosphere a hot-spot of biological activity (e.g. Hinsinger, 1998; Hinsinger et al., 2005). Classically, K uptake leads to K depletion (for

* Corresponding author. Tel.: +33 1 44 32 22 94; fax: +33 1 44 32 22 00.

E-mail address: barré@geologie.ens.fr (P. Barré).

water extractable, exchangeable and non-exchangeable K) in the rhizosphere (e.g. Claasen et al., 1986; Hinsinger, 1998; Hinsinger et al., 2011; Kuchenbuch and Jungk, 1982). Nonetheless, several authors have reported that nutrient availability is increased in the rhizosphere (e.g. Grayston et al., 1997; Hinsinger et al., 2009; Marschner, 1995). In particular, K content and availability increase in the rhizosphere zone have been reported (e.g. Bagayoko et al., 2000; Dinesh et al., 2010; Turpault et al., 2005, 2007). This increase in K has sometimes been confirmed by a higher amount of “illite-like” layers (2:1 clay mineral layer collapsed to 1 nm by K⁺ ion fixation, see Barré et al., 2007a) in the rhizosphere compared to the bulk soil (e.g. Turpault et al., 2008).

In spite of its economical importance, soil K status in olive groves is poorly documented especially in the North-African Mediterranean zone, and olive tree rhizospheric soil (where K uptake takes place) has seldom been investigated. This study attempts to compliment this lack of information to a certain extent by determining soil K status in bulk and rhizospheric soils in 16 sites in North-Kabylia and whether or not soil K status is related to plant K status in North-Kabylia. The following hypotheses were tested in this work: (i) Marginal lands planted with olive trees are indeed K poor in North-Kabylia; (ii) K deficiency is less severe in rhizospheric soil compared to bulk soil; (iii) Where the soil is K poor, olive trees are K deficient.

2. Material and methods

2.1. Site description

The study was conducted on 16 sites in North Kabylia (Algeria). The 16 sites are located along a 52 km north–south transect. All olive groves have the same characteristics: Olives are of “Chemlal” variety (as ca. 30% of Algerian olive trees), the mean age of the trees is 50 years and the mean density is about 100–150 trees per hectare.

None of the studied sites have been fertilized or irrigated. The main characteristics of the soil of the sites are presented in Table 1. At the 16 sites, soil clay fractions contained interstratified illite/smectite, illite, a low amount of hydroxyl-interlayered vermiculite and kaolinite (previous works by Bourbia, 1996; Mesrouk, 1984; Mouffok, 2001 and X-ray analyses conducted in the present study). All stations but Bouira are located north of the Djurjura Mountains in a sub-humid climatic zone (annual rainfall = 826 mm, ETP (Thornwaite) = 1072 mm). Bouira is located south of the Djurjura Mountains which diminish rainfall and consequently give a drier semi-arid zone (annual rainfall = 560 mm, ETP (Thornwaite) = 998 mm). The climatic data were measured respectively for the sub-humid and semi-arid zones at the Boukhalfa and Ain-Bessam meteorological stations between 1996 and 2006.

2.2. Sampling design

2.2.1. Soil

One composite sample of “rhizospheric” and “bulk” soils per site has been collected between December and January 2004 and 2005. For each site, 10 adjacent diagonally spaced trees have been selected in the middle of the grove in order to avoid possible boundary effects. For each of the 10 selected trees, four soil cores (diameter 7.5 cm; depth 30 cm) positioned at the extremity of a 2.5×2.5 m cross centered on the Olive tree trunk were excavated. Roots present in the core were shaken freeing large particles and soil particles adhering to the fine roots (less than 5 mm diameter) were collected which were considered to be the “rhizospheric” soil. Rhizospheric soil from the 40 cores (4 cores×10 trees) was combined, homogenized, air-dried and sieved at 2 mm which constituted the “rhizospheric” sample. In each core, the soil that was obviously root-free was collected.

Table 1
Main characteristics of the 16 stations.

Station	Coordinates	Parent material	Slope	Soil type (WRB 2006)	Total limestone (%)
Tizi-Rached	36° 41' 15.71"N 4° 12' 39.27"E	Sandstone	15%	Cambisol (eutric)	4.7
Mâatkas	36° 39' 49.41"N 4° 03' 14.53"E	Schist	20%	Cambisol (eutric)	2.1
Mechtras plaine	36° 32' 34.51"N 4° 00' 49' 98"E	Surface slope materials	0%	Cambisol (eutric)	3.4
Yakouren I	36° 46' 32.09"N 4° 26' 42.07"E	Numidien sandstone	30%	Cambisol (eutric)	2.3
Yakouren II	36° 50' 19.22"N 4° 29' 59.17"E	Numidien sandstone	25%	Cambisol (eutric)	2.5
Nezla	36° 47' 04.42"N 4° 13' 40.00"E	Old illuviale materials	5%	Cambisol (eutric)	2.3
Assi-Youcef I	36° 29' 37.58"N 4° 00' 41.14"E	Surface slope materials	10%	Cambisol (eutric, chromic)	3.0
Ouadhia	36° 42' 30.51"N 4° 04' 17.77"E	Schist	5%	Cambisol (eutric, chromic)	1.8
Mechtras colline	36° 32' 54.41"N 4° 00' 47.25"E	Mica schist	25%	Cambisol (eutric, chromic)	0.9
Agouni-gueghrane	36° 30' 50.03"N 4° 07' 06.14"E	Schist	30%	Cambisol (eutric, chromic)	4.5
Assi Youcef II	36° 29' 51.57"N 4° 00' 17.50"E	Calcareous illuvion	0%	Cambisol (calcaric)	5.5
Oued-Aissi	36° 42' 30.51"N 4° 04' 17.77"E	Carbonates	30%	Cambisol (calcaric)	33.7
Bouira	36° 23' 43.19"N 3° 53' 14.04"E	Old illuviale materials	0%	Cambisol (calcaric)	16.3
Guendoul	36° 44' 20.63"N 4° 13' 05.91"E	Carbonates	10%	Cambisol (calcaric)	13.1
Boukhalfa	36° 44' 48.3"N 4° 01' 09.11"E	Clayey limestone	5%	Vertisol	5.0
Yakouren III	36° 47' 16.67"N 4° 27' 36.88"E	Clays	0%	Vertisol	2.7

Root free soil samples from the 40 cores were combined, homogenized and sieved at 2 mm. It constituted the “bulk” soil.

The sampling design assured that “bulk” and “rhizospheric” soils were indeed representative of each site through the combination of 40 individual samples. There is no replicate per site which explains why no error bars are associated to the data for each site. The sampling effort was centered on having a representative number of sampled sites rather than on the number of replicates per site. Consequently, in this work the unit of replication is the number of sites ($n = 16$) and the statistical tests were performed accordingly.

2.2.2. Vegetation

Leaves were sampled on the same ten trees as those selected for the soil sampling at the same period (December and January are the vegetative dormant periods and consequently the mineral composition of leaves is much more constant than during the growing season). Fifty leaves per tree were randomly sampled at 1.7 m height. The 2000 leaves from the same site were combined, washed with distilled water and dried for 48 h at 70 °C. The leaves were then ground and sieved at 0.5 mm. As for the soils, sampling effort was on having a representative number of sampled sites rather than on the number of replicates per site. The statistical tests were performed accordingly.

2.3. Analyses

2.3.1. Leaf K composition analyses

The K content of the leaf samples were determined on 1 g of ground samples at the “Bureau d'Analyse CNRS”, Solaize, France. The samples were dried at 105 °C for 48 h and mineralized in an acidic solution. The solution was then analyzed using an ICP-AES. Mineral compositions are expressed on a dry weight basis.

2.3.2. Physico-chemical characteristics of soil samples

Soil characteristics were determined on the composite samples according to standard methods proposed in Jackson (1967). Particle size distribution was measured according to the Robinson pipette method (organic matter oxidation by H_2O_2 , shaking in a sodium hexametaphosphate solution). Soil pH was measured in a 1:5 soil distilled water suspension. $CaCO_3$ was determined only on bulk soil using the HCl 1 M volumetric method. Cation exchange capacity was measured according to the ammonium acetate method. Organic C was determined by sulfochromic oxidation.

2.3.3. Potassium measurements

Water extractable potassium (Kw) was determined as follows: Soil samples were shaken for 45 min in deionized water with a 1/10 soil/water ratio. The suspension was then filtered and the K^+ concentration in the solution was determined by flame spectrometry.

Exchangeable-K was extracted by shaking soil samples in a 1 M ammonium acetate solution at pH 7 (soil/solution ratio of 1/10) for 1 h (Quemener, 1979). The suspension was then filtered and the K^+ concentration in the solution was determined by flame spectrometry.

Slowly-exchangeable K was determined as follows: 25 mL of boiling 1 M HNO_3 was added to 2.5 g of soil. The suspension was boiled for 10 min and then filtered (Haylock, 1956). Potassium concentration in the solution was determined by flame spectrometry. The slowly-exchangeable K corresponded to the HNO_3 extracted K minus the NH_4^+ extracted K.

2.4. Soil clay mineralogy

2.4.1. Clay fraction recovery procedure and saturation

For each sample, 20 g of soil was dispersed in 100 mL of deionized water using ultrasonic treatment (350 J/mL). The suspended matter was left to sediment until only $< 2 \mu m$ remained in suspension (this procedure had to be repeated several times because of the high calcium

content in the samples which caused flocculation of the clays). The supernatant containing the clay fraction was poured in a beaker.

The supernatant was divided into two for Sr and K saturation respectively. The Sr saturated clays were prepared as follows: 1) a few milliliters of a 0.5 M strontium chloride solution was added to the supernatant so that the suspension reached a 0.01 M $SrCl_2$ concentration; 2) all clays were flocculated and the supernatant was discarded; 3) the flocculated clays were rinsed several times with deionized water until no more Cl^- ions in the supernatant were observed using the $AgNO_3$ test. The K saturated samples were obtained similarly with KCl instead of $SrCl_2$. About three drops of the K or Sr saturated clays were poured on a glass slide for oriented X-ray diffraction.

2.4.2. X-ray pattern acquisition and calculation of the center of gravity peak position for clay minerals

Air-dried oriented preparations were analyzed using a PANalytical Xpert Pro diffractometer (Rigaku). The instrument was set in the θ/θ Bragg-Brentano configuration, with an optical system defined using the following settings and parameters: anti-scatter and diffusion slits respectively 0.25 and $0.5^\circ 2\theta$, Soller slits of 0.04 rad, Ni filter for Cu radiation, and an Xccelerator detector counting simultaneously over an angular range of $2^\circ 2\theta$. The resulting X-ray patterns were then decomposed (after background subtraction and a four point smoothing routine) using the Decomp program (Lanson, 1997). Peak areas were determined as the product of the peak height and width at half height. The center of gravity position of the diffractograms in the (001) 2:1 clay area was calculated according to Barré et al. (2007b). This indicator gives an insight into the total amount of layers “closed” to 1 nm: the smaller the center of gravity

Table 2

pH, CEC, organic C and clay contents in the rhizospheric (Rh) and bulk (B) soils at the 16 stations.

Station		pH	CEC ($cmol^+ kg^{-1}$)	Organic C ($g kg^{-1}$)	Clay content (%)
Tizi-Rached	B	7.0	8.8	15.9	20.9
	Rh	6.6	10.0	26.2	22.0
Mâatkas	B	6.7	6.8	17.2	16.0
	Rh	6.4	9.7	20.0	17.0
Mechtras plaine	B	7.1	17.0	15.6	28.7
	Rh	6.8	22.0	19.7	30.5
Yakouren I	B	6.2	9.7	13.1	17.8
	Rh	6.1	10.9	14.7	18.5
Yakouren II	B	6.3	10.2	11.0	15.1
	Rh	5.8	11.3	20.6	15.6
Nezla	B	7.0	10.2	4.0	16.5
	Rh	6.9	11.4	6.0	20.4
Assi-Youcef I	B	7.5	13.7	20.1	33.0
	Rh	6.6	16.8	33.6	33.7
Ouahia	B	6.7	17.2	9.8	28.1
	Rh	6.6	18.9	17.6	29.0
Mechtras colline	B	7.1	13.1	18.4	22.2
	Rh	7.0	17.4	29.2	24.1
Agouni-gueghrane	B	6.9	25.5	16.2	38.8
	Rh	6.6	30.8	24.3	40.7
Assi Youcef II	B	7.3	14.2	22.6	22.1
	Rh	6.8	16.6	27.5	24.4
Oued-Aissi	B	7.5	7.5	5.5	22.4
	Rh	7.5	10.4	10.2	24.6
Bouira	B	7.4	10.0	13.3	23.4
	Rh	7.4	11.3	7.1	25.6
Guendoul	B	7.6	9.4	12.9	13.7
	Rh	7.5	10.5	16.3	14.5
Boukhalfa	B	7.9	20.3	15.1	42.9
	Rh	7.3	26.0	15.6	44.0
Yakouren III	B	6.4	20.1	11.0	51.9
	Rh	6.3	25.1	12.7	53.3

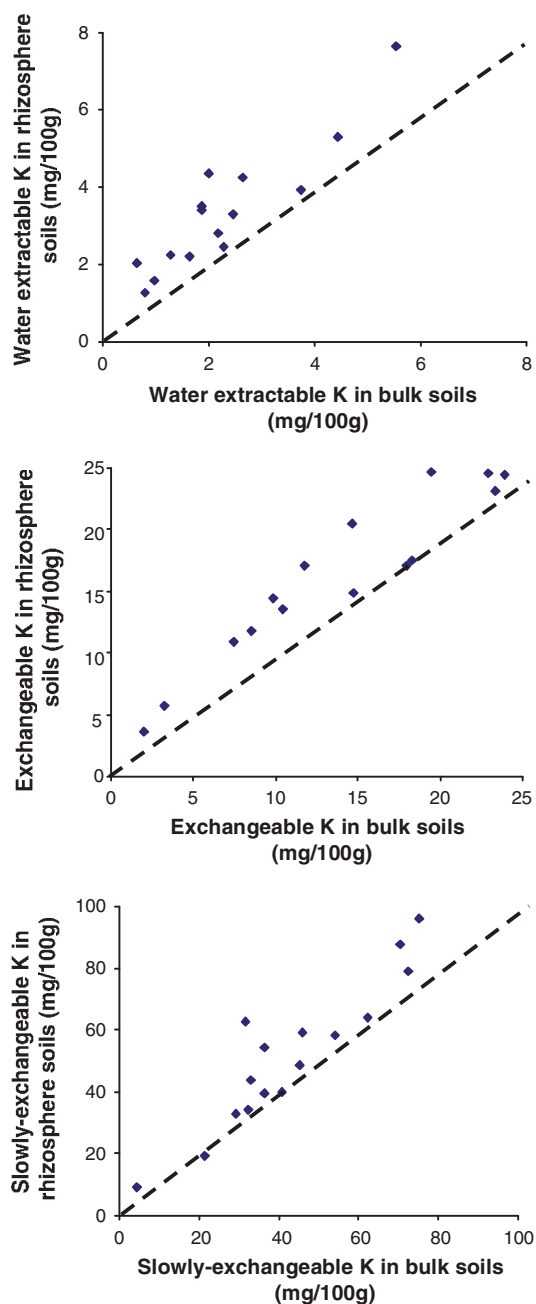


Fig. 1. Water extractable, exchangeable and slowly exchangeable K in rhizospheric soils plotted against water extractable, exchangeable and slowly exchangeable K in bulk soils. The dashed line corresponds to $y=x$. Rhizospheric soils contained significantly more water extractable K ($n=16$, $p<10^{-4}$), exchangeable K ($n=16$, $p<10^{-4}$) and slowly-exchangeable K ($n=16$, $p=0.001$).

position, the greater the number of 1 nm layers (as discrete illite or in mixed layered minerals) and the higher the potassium content.

2.5. Statistical analyses

The statistical analyses were conducted using the free software environment for statistical computing R (<http://www.r-project.org>). The comparisons of soil characteristics, quantities of K forms and mineralogical data in bulk and rhizospheric soils were conducted using a pairwise t -test. The linear regression between the K foliar content and exchangeable-K in the rhizospheric and bulk soils was run using the R “lm” procedure (fitting of a linear model).

3. Results

3.1. Soil characteristics in bulk and rhizospheric soils at the 16 sites

Soil characteristics in the bulk and rhizospheric soils are reported in Table 2. The pH values ranged from 5.8 to 7.9. The pH was significantly lower in the rhizosphere ($p<0.001$). The CEC ranged from 6.8 to 30.8 $\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$ and was significantly ($p<0.01$) higher in the rhizosphere compared to the bulk soil. This higher CEC can be explained by the significantly higher organic carbon and clay content observed in the rhizosphere compared to the bulk soil ($p<0.001$ for both OC and clays).

3.2. K status in the bulk and rhizospheric soils at the 16 sites

The quantities of water extractable K, exchangeable K and slowly-exchangeable K for rhizospheric and bulk soils of the 16 sites are presented in Fig. 1. For all soils, a small amount of water extractable K was measured (between 0.8 and 7.7 mg/100 g). The exchangeable K ranged between 4.6 and 30.4 mg/100 g; the slowly-exchangeable K was present in a higher quantity (from 4.5 to 96.0 mg/100 g). Strikingly, the amount of K was systematically higher in the rhizospheric compared to the bulk soils for the three forms of K. These differences were highly significant for each of the three forms ($p<0.001$). Gargouri and Mhiri (2000) quoted that below 8 mg/100 g of exchangeable K for the soil with less than 15% clay and 15 mg/100 g of exchangeable K for the soils with more than 15% clay, olive tree orchard soils are K poor. According to this, Tizi-Rached, Yakouren I and II, Assi-Youcef I and II, Ouadhia and Mechtras colline had low K status bulk soils (Fig. 2). Noticeably, if one considers rhizospheric soils instead of bulk soils, only Assi-Youcef II and Mechtras colline remained K poor (Fig. 2).

3.3. Clay mineralogy in the bulk and rhizospheric soils at 4 selected stations

Clay mineralogy in bulk and rhizospheric soils was studied in detail for 4 selected stations over the 16 (Tizi-Rached, Guendoul, Nezla and Bouira). The stations were selected to represent a range of soil characteristics. The X-ray patterns of air-dried Sr^{2+} and K^+ saturated clay fractions from the bulk and rhizospheric soils of Tizi-Rached station are compared in Fig. 3. The illite content (PCI + WCI) was higher for the rhizospheric soil compared to the bulk soil. The center of gravity position for the Sr^{2+} saturated sample was smaller (in nm) in the rhizospheric soil compared to the bulk soil indicating that a higher content of clay layers collapsed to 1 nm by anhydrous potassium ions. Upon K saturation, the position of the center of gravity decreased and the illite content increased. The vermiculite peak nearly disappeared due to the “closure” to 1 nm of the 1.42 nm vermiculite layer following K^+ fixation in the

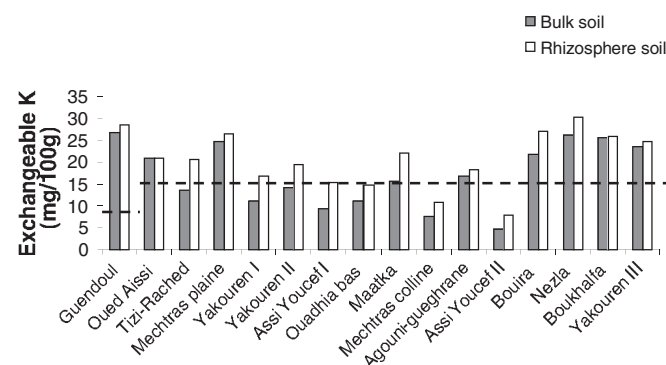


Fig. 2. Exchangeable K in rhizosphere and bulk soils. Dashed lines correspond to the thresholds delimiting low K status (8 mg/100 g for soil with less than 15% clays, 15 mg/100 g for soils with more than 15% clays).

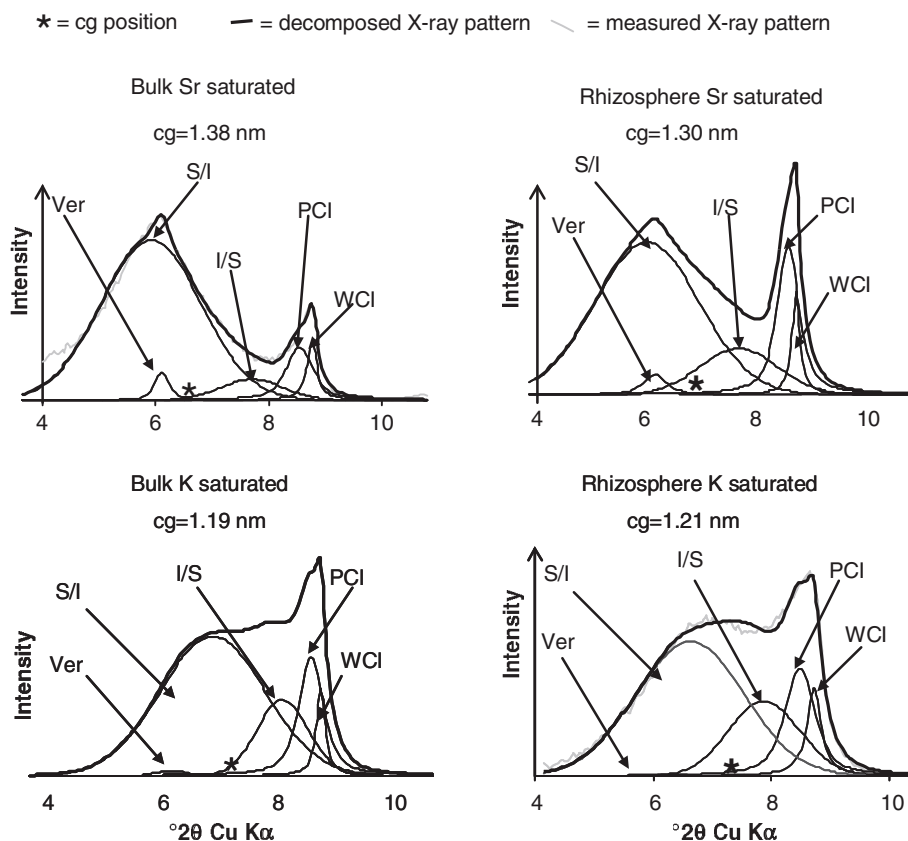


Fig. 3. X-ray patterns, Sr and K saturated, of clay samples recovered from rhizospheric and bulk soils. Ver, S/I, I/S, PCI and WCI refer to vermiculite, interstratified smectite/illite, interstratified illite/smectite, poorly crystallized illite and well crystallized illite respectively.

anhydrous state. There was no obvious difference concerning the center of gravity position for the K^+ saturated samples. These results are consistent across the 4 sites (Table 3). The lower cg position of the Sr saturated X-ray pattern of rhizospheric clays is statistically significant ($p=0.05$). The higher illite content in the rhizospheric soils is only marginally significant ($p=0.09$). For a given sample, the difference of the cg position between K and Sr saturated samples is higher for the bulk compared to the rhizospheric soils ($p=0.05$). As the soil contains illite and interstratified illite/smectite at all sites, one can hypothesize that the results would have been similar for the other sites.

3.4. K contents in olive tree leaves at the 16 stations

The K content in olive tree leaves was measured at the 16 stations. Foliar K contents ranged from 5.6 to 13.2 g/kg. It is generally considered that olive trees with a foliar K content lower than 8 g/kg are K

deficient (e.g. Morales-Sillero et al., 2009; Rodrigues et al., 2011). According to this criterion, only olive trees from Assi-Youcef II, Mechtras colline, Bouira, Yakouren I and Ouadhia are K deficient among the 16 sites studied.

Fig. 4 shows the foliar K contents plotted against the rhizospheric exchangeable K and the slowly exchangeable K. There is a general trend of foliar K increase with rhizospheric exchangeable and slowly-exchangeable K. However, the Bouira site (which is the driest site at the extreme South of the transect) seemed to behave differently from the 15 other sites. If Bouira is excluded from the analysis, there is a significant ($n=15$, $r^2=0.30$, $p=0.03$) relationship between foliar K and rhizospheric exchangeable K and a weaker relationship between foliar K and rhizospheric slowly-exchangeable K ($n=15$, $r^2=0.24$, $p=0.07$). These relationships became weaker when considering the bulk soil exchangeable K ($n=15$, $r^2=0.23$, $p=0.07$) and non-existent when considering the bulk soil slowly-exchangeable K ($n=15$, $r^2=0.03$, $p=0.55$). No relationships between water extractable and foliar K content were observed ($r^2<0.1$, for both soils).

Table 3
Relative peak areas of illite peaks, center of gravity position and center of gravity modification following K saturation ($\Delta cg = 100 \times (CgSr - CgK) / CgSr$).

Station	Soil	Relative PCI peak area (%) Sr saturated	Relative WCI peak area (%) Sr saturated	Cg position (nm) Sr saturated	Cg position (nm) K saturated	Δcg (%)
Guendoul	B	6.9	8.3	1.26	1.13	9.8
	Rh	7.0	8.5	1.25	1.15	6.8
Nezla	B	3.6	5.6	1.30	1.16	11.0
	Rh	5.6	9.3	1.26	1.16	7.7
Tizi-Rached	B	9.0	13.3	1.38	1.19	14
	Rh	16.7	21.7	1.30	1.21	7.1
Bouira	B	15.2	19.9	1.21	1.15	4.5
	Rh	21.9	27.0	1.15	1.12	3.3

4. Discussion

4.1. Soil K status in the rhizosphere compared to bulk soils of marginal lands of North Algeria

For the three forms, the amount of K was significantly higher in the rhizosphere than in the bulk soil. One would have expected that the rhizosphere would have been K-depleted due to plant K uptake (Hinsinger et al., 2011). However, if a K depletion of the rhizospheric soil is frequently observed in pot experiments (e.g. Barré et al., 2007b; Li et al., 2009; Niebes et al., 1993), our results for olive tree soils are very much in line with numerous field studies which described an

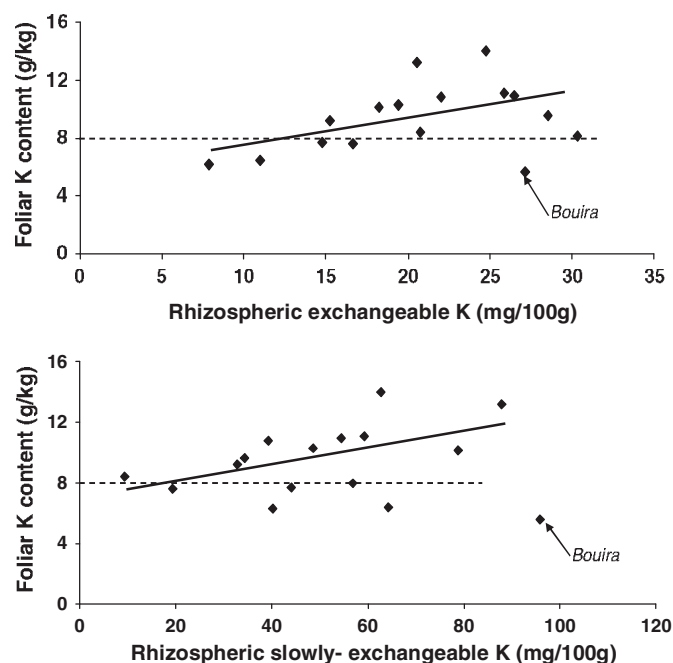


Fig. 4. Foliar K contents plotted against rhizospheric exchangeable K and rhizospheric slowly-exchangeable K. Data from Bouira have been excluded from the relationship (plain lines). There is a significant positive relationship between foliar K content and rhizospheric K content ($n=15$, $r^2=0.30$, $p=0.03$) and a trend of increasing foliar K content with rhizospheric slowly exchangeable K content ($n=15$, $r^2=0.24$, $p=0.07$). Dashed lines correspond to the threshold delimiting plant K deficiency.

increase of K in the rhizosphere (e.g. Bagayoko et al., 2000; Dinesh et al., 2010; Majdi and Bergholm, 1995; Turpault et al., 2005; Wang and Zabowski, 1998). The X-ray diffraction diagrams confirmed the chemical extraction results. The higher K concentration in the rhizosphere occurs with an increase of the “illite-like” layer content (anhydrous potassium layer) as seen from X-ray diffraction spectra (higher relative illite peak area and lower cg position in nm). This higher “illite-like” mineral content is induced by K fixation in clay mineral interlayers (e.g. Barré et al., 2007a). Such an increase in “illite-like” layer content in the rhizosphere has also been previously reported (April and Keller, 1990; Turpault et al., 2008).

Five different explanations can be proposed to explain the higher K concentration in the rhizosphere:

- (1) Some K^+ ions are brought in the vicinity of the roots through mass flow induced by plant water absorption. This can induce a concentration gradient of elements when the quantity of elements brought by mass-flow is higher than the element plant uptake. It has been described several times for Ca^{2+} in most soils (Barber, 1995) and may explain the K increase in the rhizosphere of olive trees. However, the amount of K^+ ions brought by mass-flow is usually reduced (Barber, 1995).
- (2) Clay minerals in the rhizosphere can better fix the K^+ ions. Indeed, the water uptake by roots concentrates K^+ in solution which can in turn enhance K^+ fixation (Vetterlein and Jahn, 2004). Moreover, the high frequency of wet-drying cycles in the rhizosphere in semi arid climates can favor K^+ fixation (e.g. Quemener, 1986; Zeng and Brown, 2000). This increased K^+ fixation can explain the increased quantities of K in the rhizosphere.
- (3) The weathering of primary minerals is increased in the rhizosphere due to lower pH values and the secretions of organic acids and ligands (e.g. Uroz et al., 2009). The increase of

weathering intensity can generate more K from primary minerals and contribute to its higher availability in the rhizosphere.

- (4) The CEC and clay contents are higher in the rhizospheric soil compared to the bulk soil. This could partially explain the higher exchangeable and slowly-exchangeable K values in the rhizosphere. However, it cannot fully explain the higher K values. Indeed, the increase in clay content is too small compared to the increase of slowly-exchangeable K (5 vs 20%) and this cannot explain why clay layers closed to 1 nm (“illite-like” layer) by potassium ions increase in the rhizosphere. Moreover, neither the increase of exchangeable-K nor the increase of slowly-exchangeable-K is correlated with the increase of clays or CEC in the rhizosphere.
- (5) The higher K content in the rhizosphere can be explained by the fact that roots foraged for nutrient-rich patches (e.g. Clegg and Gobran, 1996; Schötte and Dreier, 1999; Falkengren-Grerup, 1999). If so, the rhizosphere can be richer in K simply because the soil in which it developed is originally richer. Organic C content in rhizospheric soils was much higher (see Table 2). The differences between bulk and rhizospheric soils are so high (up to 90% increase) that it is unlikely that the difference can be explained only by the presence of C-rich plant exudates in the rhizosphere. It is more likely that roots re-used former root pores to develop, taking advantage of both the higher porosity and the nutrients of decomposing roots (e.g. Hinsinger et al., 2011).

Further work is needed to distinguish between these non-mutually excluding mechanisms explaining the systematic K increase observed in olive tree rhizosphere. In any event, olive tree roots are either able to increase K availability in their rhizosphere (explanations 1 to 4) or to take advantage of heterogeneous K distribution in soils (explanation 5) which makes these trees highly suitable to grow in low K status environments.

4.2. Are marginal lands from North Algeria K poor?

The soils studied were expected to be K depleted. Indeed, for every site, large amounts of K have been exported in the olives extracted from the plant–soil system (Martinez and Sanchez, 1975) for years without any K fertilization. If 7 of the bulk soils are K deficient, surprisingly most of the stations (9 of 16) are not K deficient. If one considers the rhizospheric soils, only two stations have K poor soils. The K concentration measured in the leaves of the olive trees of these two stations revealed that olive trees are K deficient. The trees of Ouadhi and Yakouren I are also K deficient but the K concentration was very close to the 8 g/kg threshold value. Even though the rhizospheric K concentration is above the threshold indicating soil K deficiency for these two sites, the soil K concentrations for these two sites are among the lowest. The case of Bouira is completely different. The leaf K concentration indicated a severe K deficiency whereas the soil analyses showed that there is apparently no K limitation. This phenomenon is most likely explained by climatic constraints. Indeed, Bouira is by far the driest station (annual rain and evapotranspiration are respectively 560 mm and 998 mm at Bouira whereas on average in the sector studied it is 826 mm and 1072 mm in the Northern part of the transect) and several authors reported that very dry soil conditions can impede K uptake by plants and lead to K deficiency even in soil with adequate K availability (Restrepo-Diaz et al., 2008; Römhild and Kirkby, 2010).

4.3. Practical incidences for agricultural practices

The present study suggests that marginally cultivatable lands of North-Kabylia are less K poor than expected. However, low K status soils were nonetheless observed at several locations. The results

presented in Fig. 4 showed that the diagnostic of adding K fertilizer would be more accurate if the measurements of exchangeable-K are conducted on rhizospheric soils. Indeed, even in a bulk soil deficient in K, olive trees can build a rhizosphere rich enough in K to sustain plant K needs. This has been observed at Tizi-Rached and Assi-Youcef and to a lesser extent at Yakouren I and Ouadhia. The K diagnostic based on rhizospheric soils can help in optimizing K fertilization which is of great importance in some regions where K fertilizers are scarce due to their high price and low accessibility to farmers. Nonetheless, rhizosphere sampling is much more complicated than bulk soil sampling. This constitutes an important limitation to the determination of plant K needs based on rhizospheric soil analyses. The results at the Bouira station stress the fact of considering possible extreme soil moisture conditions (and not only soil K status) when dealing with plant K uptake in Mediterranean regions.

From this study, we can conclude that thanks to their ability to increase K concentration in its rhizosphere, olive trees deal well with low availability K soils. It would be interesting to determine if some other trees (such as fig trees which are also very common in North-Kabylia) or even crops can also cope with K deficient soils or if it is a specific characteristic of olive trees.

5. Conclusion

The results presented in this study described the K status in bulk and rhizospheric soils of olive trees planted in marginal lands of North-Kabylia. Most of the olive orchard soils (9 over 16) are not K poor. All forms of K (water extractable, exchangeable and slowly-exchangeable) were increased in the olive tree rhizosphere. The reasons for this systematic increase are still discussed. In most cases, this K increase in the rhizosphere made the K deficient soils, based on bulk soil analysis, no longer considered as K deficient based on rhizospheric soil analyses. Furthermore, a better correlation between foliar K content was found for exchangeable K in rhizospheric soils than for exchangeable bulk soils. These results suggest that olive trees are especially suitable for growth on K poor soils and that agronomical K tests should be performed on rhizospheric soils to optimize K fertilizer use in olive orchards. The increased fixation of K^+ ions in rhizosphere clay minerals also suggests that the role of clays in stocking potassium is important for the long term conservation of this element in the rhizosphere.

Acknowledgments

Sophia Bourbia thanks the Algerian Ministry of Education and Research and the French Ministry of Foreign Office for providing a grant to pay her stay in France. The authors thank all the Algerian students that took part in soil sampling and soil analyses. Bertrand Doumert is acknowledged for having done the X-ray analyses. The helpful comments of Philippe Hinsinger on this manuscript were also much appreciated.

References

- April, R., Keller, D., 1990. Mineralogy of the rhizosphere in forest soils of the eastern United States. *Biogeochemistry* 9, 1–18.
- Argenson, C., Regis, S., Jourdain, J.M., Vays, P., 1999. Centre technique Interprofessionnel des fruits et légumes (CTIFL). In: L'olivier (Ed.), p. 204.
- Arquero, O., Barranco, D., Benlloch, M., 2006. Potassium starvation increases stomatal conductance in olive trees. *HortScience* 41, 433–436.
- Bagayoko, M., Alvey, S., Neumann, G., Buerket, A., 2000. Root-induced increases in soil pH and nutrient availability to field grown cereals and legumes on acidic sandy soils of Sudano-Sahelian West Africa. *Plant and Soil* 255, 117–127.
- Barber, S.A., 1995. *Soil Nutrient Bioavailability: a Mechanistic Approach*, 2nd ed Wiley, New York.
- Barré, P., Velde, B., Abbadie, L., 2007a. Dynamic role of “illite-like” clay minerals in temperate soils: facts and hypothesis. *Biogeochemistry* 8, 77–88.
- Barré, P., Velde, B., Catel, N., Abbadie, L., 2007b. Soil-plant potassium transfer: impact of plant activity on clay minerals as seen from X-ray diffraction. *Plant and Soil* 92, 137–146.
- Bourbia, S., 1996. Contribution à l'étude de la dynamique du potassium dans les sols alluviaux de Tadmait Tizi-Ouzou. Thèse de magister 118 pp. Tizi-Ouzou University, Algeria.
- Cakmak, I., 2005. The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 168, 521–530.
- Cakmak, I., 2010. Potassium for better crop production and quality. *Plant and Soil* 335, 1–2.
- Claassen, N., Syring, K.M., Jungk, A., 1986. Verification of a mathematical model by simulating potassium uptake from soil. *Plant and Soil* 95, 209–220.
- Clegg, S., Gobran, G.R., 1996. A conceptual model for nutrient availability in the mineral soil-root system. *Canadian Journal of Soil Science* 76, 125–131.
- Dinesh, R., Srinivasan, V., Hamza, S.V.A., Parthasarathy, V.A., Aipe, K.C., 2010. Physico-chemical, biochemical and microbial properties of the rhizospheric soils of tree species used as supports for black pepper cultivation in the humid tropics. *Geoderma* 158, 252–258.
- Gargouri, K., Mhiri, A., 2000. Relationship between soil fertility and phosphorus and potassium olive plant nutrition. *Options Méditerranéennes Série A50* (<http://ressources.ciheam.org/om/pdf/a50/04002033.pdf>).
- Grayston, S.J., Vaughan, D., Jones, D., 1997. Rhizosphere carbon flow in trees, in comparison with annual plant: the importance of root exudation and its impact on microbial activity and nutrient availability. *Applied Soil Ecology* 5, 29–56.
- Haylock, O.F., 1956. A method of estimating the availability of non-exchangeable potassium. 6th International Congress soil science 7, 300–307.
- Hinsinger, P., 1998. How do plant root acquire mineral nutrients? Chemical process involved in the rhizosphere. *Advance in Agronomy* 64, 225–265.
- Hinsinger, P., 2002. Potassium. In: Lal, R. (Ed.), *Encyclopedia of Soil Science*. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Hinsinger, P., Gobran, G.R., Gregory, P.J., Wenzel, W.W., 2005. Rhizosphere geometry and heterogeneity arising from root-mediated physical and chemical process, research view. *New Phytologist* 168, 293–303.
- Hinsinger, P., Bengough, A.G., Vetterlein, D., Young, I.M., 2009. Rhizosphere: biophysics, biogeochemistry and ecological relevance. *Plant and Soil* 321, 117–152.
- Hinsinger, P., Brauman, A., Devau, N., Gérard, F., Jourdan, C., Laclau, J.P., Le Cadre, E., Jaillard, B., Plassard, C., 2011. Acquisition of phosphorus and other poorly mobile nutrients by roots. Where do plant nutrition models fail? *Plant and Soil* 348, 29–61.
- Jackson, M.L., 1967. *Soil Chemical Analysis*. Asia Publishing House, Bombay, India.
- Kuchenbuch, R., Jungk, A., 1982. A method for determining concentration profiles at the soil-root interface by thin slicing rhizospheric soil. *Plant and Soil* 68, 391–394.
- Lanson, B., 1997. Decomposition of experimental X-ray diffraction patterns (profile fitting): a convenient way to study clays. *Clays and Clay Minerals* 45, 132–146.
- Li, X., Lu, J., Wu, L., Chen, F., 2009. The difference of potassium dynamics between yellowish red soil and yellow cinnamon soil under rapeseed (*Brassica napus* L.)–rice (*Oryza sativa* L.) rotation. *Plant and Soil* 320, 141–151.
- Majdi, H., Bergholm, J., 1995. Effect of enhanced supplies of nitrogen and sulphur on rhizosphere and soil chemistry in a Norway spruce stand in Sweden. *Water, Air, and Soil Pollution* 85, 1577–1582.
- Marschner, H., 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plant*, 2nd ed. Academic Press, San Diego, p. 889.
- Martinez, R.L., Sanchez, C.M., 1975. Fertilisation II. Séminaire oléicole international 6–17 Octobre 1975. Cordoue (Espagne), pp. 46–48.
- Mesrouk, A., 1984. Caractérisation et genèse des sols de la région de Tizi-Ouzou, Grande Kabylie. Thèse de doctorat 173 pp. Gand University, Belgium.
- Morales-Sillero, A., Fernández, J.E., Ordovás Suárez, J.M.P., Pérez, J.A., Liñán, J., López, E.P., Girón, I., Troncoso, A., 2009. Plant–soil interactions in a fertigated ‘Manzanilla de Sevilla’ olive orchard. *Plant and Soil* 319, 147–162.
- Mouffok, M., 2001. Caractérisation physico-chimique et minéralogique des sols alluviaux du moyen et haut Sebou Grande Kabylie. Thèse de magister 158 pp. Tizi-Ouzou University, Algeria.
- Niebes, J.E., Dufey, Jaillard, B., Hinsinger, P., 1993. Release of non exchangeable K potassium from different size fractions of two highly K-fertilized soils in the rhizosphere of rape (*Brassica napus* cv Dakkar). *Plant and Soil* 155/156, 403–406.
- Norouzi, S., Khademi, H., 2010. Ability of alfalfa (*Medicago sativa* L.) to take up potassium from different micaceous minerals and consequent vermiculitization. *Plant and Soil* 328, 83–93.
- Öborn, I., Andrist-Rangel, Y., Askegaard, M., Grant, C.A., Watson, C.A., Edwards, A.C., 2005. Critical aspects of potassium management in agricultural systems. *Soil Use and Management* 21, 102–112.
- Quemener, J., 1979. The measurement of soil potassium. IPI. Research topics N° 4/1978. Ed. International Potash Institute, Bern/Switzerland. pp. 48.
- Quemener, J., 1986. Important factors in potassium balance sheets. Nutrient Balance and the Need for Potassium. 13th Cong. Int. Potash. Bern Switzerland, pp. 33–63.
- Restrepo-Díaz, H., Benlloch, M., Fernandez-Escobar, R., 2008. Plant water stress and K^+ starvation reduce absorption of foliar applied K^+ by olive leaves. *Scientia Horticulturae* 116, 409–413.
- Rodrigues, M.A., Lopes, J.L., Pavao, F.M., Cabanas, J.E., Arrobas, M., 2011. Effect of soil management on olive yield and nutritional status of trees in rainfed orchards. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 42, 993–1007.
- Römhild, V., Kirkby, E.A., 2010. Research on potassium in agriculture: needs and prospects. *Plant and Soil* 335, 155–180.
- Schöttelndreier, M., Falkengren-Grerup, U., 1999. Plant induced alteration in the rhizosphere and the utilisation of soil heterogeneity. *Plant and Soil* 209, 297–309.
- Turpault, M.P., Uterano, C., Boudot, J.P., Ranger, J., 2005. Influence of mature Douglas fir roots on the solid soil phase of the rhizosphere and its soil solution chemistry. *Plant and Soil* 275, 327–336.
- Turpault, M.P., Gobran, G.R., Bonnaud, P., 2007. Temporal variations of rhizosphere and bulk soil chemistry in a Douglas fir stand. *Geoderma* 137, 490–496.

- Turpault, M.P., Righi, D., Utérano, C., 2008. Clay minerals: precise markers of the spatial and temporal variability of the biogeochemical soil environment. *Geoderma* 147, 108–115.
- Uroz, S., Calvaruso, C., Turpault, M.P., Frey-Klett, P., 2009. Mineral weathering by bacteria: ecology, actors and mechanisms. *Trends in Microbiology* 17, 378–387.
- Vetterlein, D., Jahn, R., 2004. Gradients in soil solution composition between bulk soil and rhizosphere—in situ measurement with changing soil water content. *Plant and Soil* 258, 307–317.
- Wang, X., Zabowski, D., 1998. Nutrient composition of Douglas-fir rhizosphere and bulk soil solutions. *Plant and Soil* 200, 13–20.
- Zeng, Q., Brown, P.H., 2000. Soil potassium mobility and uptake by corn under differential soil moisture regimes. *Plant and Soil* 221, 121–134.

Hierarchization of factors driving soil macrofauna in North Algeria groves

Malika Boudiaf Nait-Kaci ^(1, 2), Mickaël Hedde ⁽¹⁾, Sophia Mouas Bourbia ⁽²⁾,
Arezki Derridj ⁽²⁾

⁽¹⁾ INRA UR251 PESSAC. Centre de Versailles-Grignon. RD 10. F-78026 Versailles cedex (France).

⁽²⁾ Université Mouloud Mammeri. Département des Sciences Agronomiques. Laboratoire Ressources Naturelles. Route Hasnaoua. BP 17. 15000 Tizi Ouzou (Algérie). E-mail: malikanboud@yahoo.fr

Received on March 14, 2013; accepted on January 6, 2014.

The current study gathers new data on soil macro-invertebrates in North Algerian orchards in order to evaluate their seasonal dynamics. Invertebrate samples were collected from three sites in Kabylie: two from sub-humid areas (Nezla and Guendoul) and one from a semi-arid area (Bouira). The objectives were to determine levels of soil macrofauna abundance and to rank the factors controlling their distribution in order of importance. We particularly focused on the effects of site (climate), season and type of orchard (*Ficus carica* L. and *Olea europaea* L.). We collected 24 taxa, of which 70% were ants and 16% earthworms. Site and seasonal factors as well as the interaction between these two elements were found to significantly influence total soil macro-invertebrate abundance. In particular, earthworms were found to be highly sensitive to aridity. In contrast, the type of grove explained only a small part of earthworm variance, whereas it had a significant influence on ant abundance. In order to be able to say whether these conclusions are typical for other comparable orchards in North Africa, more studies of this kind are needed.

Keywords. Soil fauna, physico-chemical characteristics of soil, *Olea europaea*, *Ficus carica*, climate, Algeria.

Hiérarchisation des facteurs déterminant la macrofaune du sol de vergers du nord de l'Algérie. Cette étude a pour but de rassembler des données sur la macrofaune du sol et d'évaluer sa dynamique saisonnière dans les vergers du nord de l'Algérie, peu étudiés sur ce thème. Les invertébrés ont été recueillis dans trois régions de Kabylie sous climat subhumide (Nezla et Guendoul) et semi-aride (Bouira). L'importance est de déterminer les niveaux d'abondance de la macrofaune du sol et de hiérarchiser les facteurs qui contrôlent leur distribution. Les effets de site (climat), de saison et de type de verger (*Ficus carica* L. et *Olea europaea* L.) ont été étudiés en particulier. Parmi 24 taxons identifiés, les fourmis et les vers de terre sont dominants et représentent respectivement 70 % et 16 % des individus. Les facteurs « site » et « saison » ainsi que leur interaction influencent l'abondance totale des macro-invertébrés du sol, en particulier les vers de terre qui sont très sensibles aux climats plus secs. Par contre, le facteur « type de verger » influence peu l'abondance des vers de terre, mais bien significativement l'abondance des fourmis. Il apparaît que les macro-invertébrés sont principalement influencés par le climat et la saison. Afin de mieux statuer sur nos résultats et nos conclusions, il est nécessaire d'élargir ce type d'étude à différents sols et vergers sous d'autres variantes du climat de l'Afrique du Nord.

Mots-clés. Faune du sol, propriétés physico-chimiques du sol, *Olea europaea*, *Ficus carica*, climat, Algérie.

1. INTRODUCTION

Although soil fauna is known to influence soil function (Lavelle et al., 2001), invertebrate communities in North African soils are still poorly described. In Mediterranean soil ecosystems, climatic conditions have been shown to have great influence on soil macrofauna, which are often particularly sensitive to temperature (Sharon et al., 2001; Antunes et al., 2008), precipitation (Morón-Ríos et al., 2010) and soil

humidity (Dodd et al., 1997; El-Sharabasy et al., 2008). The dominant climatic and pedological characteristics of this region favour soil erosion and salinity, both of which may have a negative impact on soil biodiversity (Pueyos et al., 2007; Errouissi et al., 2011). These factors also constrain soil community dynamics (Véla et al., 2007; Fadda et al., 2008). In arid conditions the presence of macrofauna improves nitrogen nutrition and the availability of water for the horticultural plants (Ouédraogo et al., 2006). Apart from providing fruit

and bioenergy, orchards in Southern Mediterranean regions also contribute to the mitigation of soil erosion (Martins da Silva et al., 2011; Ramos et al., 2011).

In Algeria, olive (*Olea europaea* L.) and fig (*Ficus carica* L.) orchards are widespread due to their socio-economic importance and their robustness (Ruano et al., 2004; Fayez et al., 2011). However, over the last few decades these orchards have been progressively neglected in favour of more high yielding horticultural systems. Such policies have led to a deterioration of agro-ecosystems in these areas, which has resulted in recent attempts to restore their functionality (Santos et al., 2007).

The aim of the present work was to understand the relative importance of three factors recognized as being important for soil invertebrate communities: the climate (sub-humid vs semi-arid), the season (winter vs summer) and the orchard type (fig vs olive groves). We hypothesized that macro-invertebrate abundance would be controlled by interactions between these three factors. This study, carried out in traditional rural fig and olive orchards, beside more intensively cultivated orchards in the same region, should constitute a reference for future assessments of soil biological activity in orchard systems in this geographical area.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Study sites

Three sites were selected on a 52 km North-South transect in Kabylie in northern Algeria: Nezla (36°47'4" N; 4°36'40" E), Guendoul (36°44'20" N; 4°13'5" E) and Bouira (36°23'43" N; 3°53'14" E). Some characteristics of these sites are given in **table 1**. The Djurdjura Mountains separate Bouira from Nezla and Guendoul. The climate is sub-humid in Nezla and Guendoul and semi-arid in Bouira, with De Martonne

indices of 26.6 and 19.3 respectively. Both fig and olive groves were studied at each site. The mean age of trees ranged between 30 and 60 years and mean density was about 100-120 trees per hectare. Also, in both fig and olive groves studied, the composition of the plant cover is similar and composed by same species notably *Avena sterilis*, *Inula viscosa*, *Oxalis pes-caprae*, *Daucus carota*, *Galactites tomentosa*, *Scolymus hispanicus*. The productivity of these groves is irregular and mainly for local consumption. Management is very low-intensity, with no use of phytosanitary products, fertilization or irrigation. Fructification and thinning cuts were made during the harvest, but this is neither a systematic nor an intensive procedure (M.A.D.R., 2009). This kind of agro-ecosystem is currently still the dominant orchard management type in the region.

2.2. Soil sampling and characterisation

The soils were Calcisols at Guendoul and Bouira and Cambisols at Nezla (WRB, 1998). Soils were sampled in January 2007 with a boring sampler (4 cm in diameter, 20 cm depth). We collected five soil samples randomly from each plot. Soil characteristics were determined on three replicates from the composite samples according to standard methods described in Jackson (1967). Particle size distribution was measured according to the Robinson pipette method (*i.e.* organic matter oxidation by H₂O₂, shaking in a sodium hexametaphosphate solution). Soil pH was measured in a 1/5 soil distilled water suspension. The CaCO₃ content was determined using the HCl 1 M volumetric method. Cation exchange capacity (CEC) was measured according to the ammonium acetate method. Organic C was determined by sulfochromic oxidation. Bioavailable phosphorus was extracted by shaking soil samples in NaHCO₄ 0.5 M solution at pH = 8.5 (soil/solution ratio of 1/10) during 1 h (Olsen et al., 1977). The suspension was then filtered and phosphorus concentration in the solution was determined by colorimetry. Exchangeable-K was extracted by shaking soil samples in an ammonium acetate 1 M solution at pH 7 (soil/solution ratio of 1/10) for 1 h (Quemener, 1979). The suspension was then filtered and K⁺ concentration in the solution was determined by flame spectrometry.

2.3. Invertebrate sampling and identification

Invertebrate sampling was carried out in winter (January) and summer (June)

Table 1. Characteristics of the three studied sites — *Caractéristiques des stations étudiées.*

	Nezla	Guendoul	Bouira
Altitude (m)	492	446	373
Mean annual precipitations (mm)*	826	826	560
Mean annual temperature range (°C)*	5.7 - 37.7	5.7 - 37.7	4.2-39
Grove age (years)	40	30	60
Slope	5%	5%	10%
Type (WRB)	Cambisol	Calcisol	Calcisol

*: Data were measured respectively at the Boukhalfa and Ain-Bessam meteorological stations between 1996 and 2006 — *Les données ont été mesurées respectivement aux stations météorologiques de Boukhalfa et Ain-Bessan entre 1996 et 2006.*

2007 following the methodology outlined in Coineau (1974). In each selected orchard, six sampling zones of 30 x 30 cm, at least 10 m distance from each other, were set up. Two depth profiles were sampled at each sampling site. Large invertebrates were then hand-sorted in the laboratory. Remaining invertebrates were then extracted from the soil using the Berlese-Tullgren method (Pesson, 1971). After extraction, all invertebrates were preserved in 70° alcohol for later identification. Due to the still currently very incomplete taxonomic catalogue of Algerian soil fauna, invertebrates were only identified to order level in most cases. Taking account of their social behavior and the resulting aggregated distribution, ants were analyzed separately from other macro-invertebrates. Hence, total density referred to the density of all invertebrates but excluding ants.

2.4. Statistical analyses

The Kruskal-Wallis rank sum test was used for looking at soil differences between sites and orchards. Afterwards, multiple comparisons were done to identify groups that differed (Siegel et al., 1988). We also tested for the influence of the factors “site”, “season” and “orchard” and their interactions on both the overall population density and the diversity of invertebrates. For this, analyses of variance were performed on log-transformed data. Tukey’s “Honest Significant Difference” method was used to test for multiple comparisons of means.

3. RESULTS

3.1. Soil characteristics

Soil characteristics are detailed in **table 2**. No differences in pH and organic C, CaCO₃, exchangeable K and clay contents were observed between orchards from any one of the three sites. At Nezla and Guendoul, the CEC was higher in fig than in olive orchard soils. In Bouira soils, the soil available phosphorus content was slightly higher in fig than in olive groves. Regarding differences between the three sites, it appeared that Guendoul presented higher pH, organic C and CaCO₃ contents and lesser available P content than Nezla, with intermediate values in Bouira. The available phosphorus content separated Bouira and Nezla from Guendoul. Clay content was twice as high at Bouira than at Guendoul, with 25.6% and 13.7% respectively. Finally, no differences in exchangeable K content and CEC were recorded between sites.

3.2. Macro-invertebrate density and diversity

A total of 2,620 individuals were collected and 24 taxa identified. Ants and earthworms dominated the communities, representing 70% and 16% of total individuals, respectively. Total macro-invertebrate density was highly influenced by the factors “site”, “season” and their interaction but not by the type of grove (**Table 3**). Maximum population values were recorded during winter in Nezla and Guendoul (sub-

Table 2. Means (standard error) soil characteristics of the six studied groves — *Moyennes (erreur standard) des caractéristiques des sols des six vergers étudiés.*

Grove	Nezla		Guendoul		Bouira	
	Fig	Olive	Fig	Olive	Fig	Olive
pH water	7.44 (0.07)	7.00 (0.15) ns, ^b	7.46 (0.01)	7.62 (0.11) ns, ^a	7.41 (0.04)	7.41 (0.03) ns, ^{ab}
Org C (%)	0.33 (0.04)	0.40 (0.08) ns, ^b	1.25 (0.11)	1.29 (0.69) ns, ^a	0.89 (0.06)	0.71 (0.2) ns, ^{ab}
CaCO ₃ (g·kg ⁻¹)	3.7 (0.09)	2.4 (0.07) ns, ^b	26.7 (0.9)	25.0 (1.61) ns, ^a	15.4 (0.48)	11.8 (0.66) ns, ^{ab}
Tot N (g·kg ⁻¹)	0.910	0.910	1.260	0.630	1.720	1.260
CEC	15.26 (0.19)	12.24 (0.4) *, ^a	14.5 (0.33)	13.46 (0.31) *, ^a	14.16 (0.11)	13.35 (1.35) ns, ^a
P assi	1.34 (0.16)	1.51 (0.17) ns, ^a	0.78 (0.16)	0.93 (0.15) ns, ^b	1.57 (0.06)	1.43 (0.04) *, ^a
K assi	20.83 (1.48)	26.13 (1.92) ns, ^a	29.15 (1.88)	26.70 (7.33) ns, ^a	21.66 (0.88)	21.73 (0.76) ns, ^a
Clay (%)	20.37 (2.18)	16.53 (0.84) ns, ^{ab}	13.75 (0.55)	13.68 (0.63) ns, ^b	25.60 (1.08)	23.4 (1.53) ns, ^a

ns: not significant — *non significatif*; *: indicates significant differences between fig and olive groves from one site — *indique les différences significatives entre les vergers de figues et d’olives d’un site*; Different letters indicate significant differences between sites — *les lettres différentes indiquent des différences significatives entre les sites*; Data between brackets are standard error — *les données entre parenthèses sont les erreurs standard*.

shumid climate) with values ranging between 130 and 380 ind·m⁻². The lowest values were mainly found during winter in Bouira (semi-arid climate) and during summer in Nezla with more or less than 40 ind·m⁻².

This pattern was mainly driven by earthworm densities that reached high values (59 to 324 ind·m⁻²) during winter in the sub-humid climate regardless of the orchard type (**Table 3**). In these orchards, earthworms dominated, accounting for 42% to 86% of soil macro-invertebrate density. In other conditions, communities were characterized by scarce or null density of earthworms (0 to 22 ind·m⁻²). The population levels for ants depended significantly on the site and the type of groves (**Table 3**). This effect is highlighted by a difference between high densities in fig orchards at Bouira (about 750 to 1,800 ind·m⁻² depending on the season), and low densities in olive orchards at Nezla whatever the season and in fig orchards at Bouira during winter (less than 10 ind·m⁻²).

Invertebrates other than earthworms and ants were found at lower densities, *i.e.* always less than 40 ind·m⁻². Nevertheless, some groups represented up to 60% of the community. For instance, millipedes at Guendoul exhibited densities ranging from 9 to 33 ind·m⁻², representing 13% to 24% of the total population. Their density was almost stable between season and grove type. In all other conditions, millipedes were rare, except in Bouira olive groves during summer (11 ind·m⁻²). Adult coleopterans also reached up to 30 ind·m⁻² particularly during summer in all conditions (7 to 28 ind·m⁻²) and at Guendoul during winter (30 ind·m⁻²). Finally, snails were present only in Nezla although at very low densities (up to 6 ind·m⁻² and to 9% of density).

The taxonomic richness ranged between 1 and 11. Among the three factors investigated, only the factor “site” significantly influenced the taxonomic richness of macro-invertebrates. The highest values were observed at Guendoul and Bouira, with diversity values of 2.5 and 4, respectively.

4. DISCUSSION

4.1. Hierarchy of factors

Our results showed that olive and fig trees have similar effects on soil characteristics – consistent with existing literature reports (Dodd et al., 1997; Ricarte et al., 2011). Significant differences were observed with respect to available phosphorus amounts, which were low in all orchards. The low available phosphorus content probably related to the nature of the calcareous parent material, which enhanced its precipitation (Darrah et al., 1994). The type of grove within a single site did not influence total density of soil invertebrates, which is to a large extent ascribed to the similarity of soil characteristics.

The main result of this work lies on the ranking of factors by importance driving invertebrate communities in Kabylie soils. It clearly emerged from the results that the factors “site” and “season” profoundly affected the total density of soil invertebrates. These results agreed with Sharon et al. (2001). These authors showed that climate was the main factor influencing abundance and diversity of soil macrofauna in Middle East Mediterranean forests. Similar results have been reported for woodlice by Warburg et al. (1984) and Huerta et al. (2012). However, Santos et al. (2007) showed ant density to be controlled by site characteristics and orchard type. To our knowledge, the present work provides the first results from soil invertebrate communities under fig trees in Mediterranean soils. Otherwise, fig tree impacts on soil communities have been described by Merlim et al. (2005) for a tropical climate. Although we did not observe any effects of orchard type (except for ants, **table 3**), the type and age of vegetation have been reported to drive both abundance and diversity of soil fauna (Neirynck et al., 2000; Woodcock et al., 2005). However, the simplified structure of vegetation in orchards has been found

Table 3. Results (F values) of 3-factor analyses of variance performed on log transformed macro-invertebrate densities — *Résultats d’analyse de variance de l’effet des trois facteurs sur la densité des macro-invertébrés après transformation logarithmique (valeurs F).*

	Df	Total	Earthworms	Millipedes	Coleopterans	Snails	Ants
Site	2	5.4**	18.0***	24.4***	0.6	4.1*	4.6*
Season	1	10.3**	68.3***	< 0.1	3.1	1.0	3.7
Orchard	1	1.1	2.4	1.6	8	0.1	4.1*
Site x season	2	6.6**	16.9***	2.0	0.2	0.3	0.5
Site x orchard	2	0.2	2.5	0.8	1.3	0.2	1.7
Season x orchard	1	0.5	0.6	2.4	< 0.1	3.2	0.1
Site x season x orchard	2	0.5	0.5	1.1	4.0*	1.6	0.1

* : $p < 0.05$ — $p < 0,05$; ** : $p < 0.01$ — $p < 0,01$; *** : $p < 0.001$ — $p < 0,001$; Df: degree of freedom — *degré de liberté*.

to act negatively on abundance and diversity of soil arthropods (Van der Wal et al., 2009; Martins da Silva et al., 2011). The tree species can also influence soil biota through the interactions between their roots and the soil, such effects being apparently more important when soil organic matter content is low (Eo et al., 2008; Ivask et al., 2008). Furthermore, it has also been found elsewhere that the type of orchard influenced e.g. organic matter dynamics and pH (Cesarz et al., 2007; Carrillo et al., 2011). Some studies have also mentioned that soil fauna composition can interact with vegetation to modify soil characteristics (Jones et al., 1997; Jacob et al., 2009).

Our results also showed that there were clear differences in the densities of soil invertebrates between Nezla and Guendoul on the one hand, and Bouira on the other hand, during the winter. Differences could be due to climate rather than to soil type. Indeed, Nezla and Guendoul, both situated in a similar sub-humid climatic zone, differ from each other for soil characteristics in terms of pH, organic C, CaCO_3 and available P contents. During the summer, densities were lower, with the highest values recorded in Nezla ($109 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$) but most of them ranged between 15 and $74 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$. Surprisingly, Nezla soils hosted the highest densities during winter ($> 250 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$) and the lowest during summer ($< 40 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$). Soil characteristics probably explain this result (Lavelle et al., 2001), particularly in terms of the fact that organic C content is three times less in Nezla soils compared to those at Guendoul. Finally, in addition to the warm summers of Kabylie, soil invertebrates in Bouira were also exposed to cold winters with, for instance, 25 days of frost during winter 2007.

4.2. Effects on macrofaunal groups

Among the studied communities, taxa exhibited different responses to various environmental factors. For instance, earthworms were significantly numerous in Nezla and Guendoul soils during the winter, while millipede densities were high at Guendoul whatever the season. In the following section, responses to such factors are discussed taxon by taxon.

As previously described by Rouabah et al. (2001), the warm and dry summer of Algeria leads to a widespread cessation of earthworm activity (in this study, except for the Guendoul olive orchards). Soil dryness leads directly to a drop in worm numbers. In Bouira however, worm density was always very low, probably also since in this semi-arid zone, winters are characterized by cold temperatures and low soil humidity. Comparing densities recorded in the present study with literature on Maghrebian soils is rather difficult considering the small number of studies on earthworms, most of which have been taxonomic

studies (Omodeo et al., 2003). Moreover, even from this small sample size, some data are not considered to be reliable. For instance, Errouissi et al. (2011) reported densities of earthworms in agricultural plots, indicating that *Lumbricus terrestris* L. (1798) reached densities up to $50 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$. However, an exhaustive review, Omodeo et al. (2003) showed that *L. terrestris* is not found in the earthworm fauna of Maghreb. This confusion can probably be explained by the paucity of taxonomic expertise for soil invertebrates in North Africa.

During the winter, which corresponds to the rainy season in Kabylie, earthworms were numerous in the topsoil at Guendoul and Nezla ($59\text{--}141$ and $202\text{--}324 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$, respectively) (Table 4). These densities were rather higher than densities reported for other Mediterranean orchards. For instance, Morón-Ríos et al. (2010) found densities of 50 and $170 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$ during autumn 2002 and spring 2003, respectively. Kherbouche et al. (2012) recorded $150 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$ during springtime. However, in contrast to these groves, the Kabylie groves studied were not ploughed. The well-known negative impact of cultivation on earthworms probably explains this difference (Kherbouche et al., 2012).

In the orchards studied here, coleopteran densities were consistently low ($2\text{--}30 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$), especially in Bouira and Guendoul during winter ($< 10 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$). In comparison, Santos et al. (2007) found $250\text{--}909 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$ under olive groves in April and July, respectively, in Iberian Mediterranean orchards. Coleopterans in groves have been demonstrated to be influenced by year-round climate variations and management regimes (Ruano et al., 2004) or by soils (Martins da Silva et al., 2011). Coleopterans play important roles in orchard ecosystems such as these: in particular, they are recognized as regulators since some soil larvae are rhizophagous and other species are predators either at larval or imaginal stage (Ruano et al., 2004). Therefore, they are well documented and established as bio-indicators of soil quality (Shanas et al., 2011).

In contrast to the other groups, ant populations varied significantly according to site and grove type but not with season (Table 3). Aridity does not seem to reduce their abundance (Delsinne et al., 2010). Ants generally had very high densities on the sites studied here (Table 4), but were less abundant at Nezla during the two seasons, particularly under olive trees and they disappeared at Bouira in the wintertime. They were abundant in Guendoul ($1,806\text{--}748 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$) respectively in winter and summer under fig trees. The abundance of ants under olive trees was low and did not vary. This low density is striking compared to the results of Santos et al. (2007) who reported $1,182\text{--}3,120 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$. Other studies have shown that ants play important ecological role in such groves (Castro et al.,

Table 4. Mean densities (standard error) of macro-invertebrates in studied orchards — *Densités moyennes (erreur standard) des macro-invertébrés dans les vergers étudiés.*

Site	Season	Whithout ants						Ants
		Orchard	Total	Earthworms	Millipedes	Coleopterans	Snails	
Nezla	Winter	Olive	378 (119) ^a	324 (105) ^a 86%	2 (2) ^b 0%	4 (2) ^b 1%	6 (3) ^a 1%	2 (2) ^b
Nezla	Winter	Fig	263 (139) ^{ab}	202 (107) ^{ab} 77%	2 (2) ^b 1%	6 (3) ^b 2%	2 (2) ^a 1%	178 (162) ^{ab}
Guendoul	Winter	Olive	235 (58) ^{ab}	141 (45) ^{ab} 60%	33 (16) ^a 14%	30 (14) ^a 13%	2 (2) ^a 1%	41 (33) ^{ab}
Guendoul	Winter	Fig	139 (33) ^b	59 (25) ^{bc} 43%	26 (6) ^a 19%	30 (11) ^a 1%	0 (0) ^a 0%	1,806 (,1547) ^a
Bouira	Winter	Olive	4 (3) ^c	0 (0) ^c 0%	2 (2) ^b 50%	2 (2) ^b 50%	0 (0) ^a 0%	44 (41) ^{ab}
Bouira	Winter	Fig	22 (8) ^c	9 (7) ^c 42%	0 (0) ^b 0%	0 (0) ^b 0%	0 (0) ^a 0%	0 (0) ^b
Nezla	Summer	Olive	15 (6) ^c	0 (0) ^c 0%	0 (0) ^b 0%	7 (3) ^b 50%	0 (0) ^a 0%	7 (3) ^b
Nezla	Summer	Fig	41 (14) ^c	2 (2) ^c 5%	2 (2) ^b 5%	19 (9) ^{ab} 45%	4 (2) ^a 9%	39 (22) ^{ab}
Guendoul	Summer	Olive	109 (37) ^b	22 (13) ^c 20%	26 (8) ^a 24%	28 (12) ^a 25%	0 (0) ^a 0%	72 (47) ^{ab}
Guendoul	Summer	Fig	74 (26) ^{bc}	0 (0) ^c 0%	9 (3) ^a 13%	11 (3) ^{ab} 15%	0 (0) ^a 0%	748 (483) ^a
Bouira	Summer	Olive	61 (10) ^{bc}	0 (0) ^c 0%	11 (5) ^a 18%	28 (10) ^a 45%	0 (0) ^a 0%	33 (14) ^{ab}
Bouira	Summer	Fig	37 (8) ^c	2 (2) ^c 5%	0 (0) ^b 0%	22 (7) ^{ab} 60%	0 (0) ^a 0%	472 (429) ^{ab}

Different letters indicate significant differences between sites — *les lettres différentes indiquent des différences significatives entre les sites*; % : percentage with regard to the column “total” — *pourcentage par rapport à la colonne « total »*.

1996; Garrido-Jurado et al., 2011). Several authors have suggested their importance as bio-indicators for agro-ecosystems (Lobry de Bruyn, 1999), under fig trees (Merlim et al., 2005) and under olive trees with a very heterogeneous distribution and variable (Pereira et al., 2004; Santos et al., 2007). Despite this apparent ecological importance, ants are still inadequately studied in Mediterranean ecosystems (Ottonetti et al., 2008).

Snails were collected in very small numbers at Nezla, but nowhere else. These invertebrates are very sensitive to fluctuations in soil humidity (Pokryszko et al., 2011). Moisture has been shown to be the key determining factor of variation in their abundance and diversity in soils (Pennings et al., 2005; Cameron et al., 2006). This taxonomic group is also influenced by other soil properties and the nature of the vegetation (Omodeo et al., 2003; Ondina et al., 2004; Cameron et al., 2010).

Millipedes were mostly observed at Guendoul during both seasons, where they reached densities up to 33 ind·m⁻² (**Table 4**). Millipedes also represented up to 50% of community density in Bouira demonstrating their characteristic abundance in semi-arid climates (Galanes et al., 2011).

5. CONCLUSION

This study allowed us to rank three factors (soil type, climate and fruit tree) influencing the abundance of macro-invertebrates in North African olive and fig

groves. It appears for most of the macro-invertebrates studied that they are favorably influenced by humid climate and site. Moreover, it provides valuable data on the varying abundances and diversity of soil macro-invertebrates under traditional olive and fig groves in three regions of Kabylie. However, the results presented in this study may only be valid for this region. To make more general statements about the abundance of macro-invertebrates in traditionally maintained groves (in terms of soil management regime), this study should be extended to sites encompassing a wider range of different soils, orchard types, and climatic situations across North Africa. However, this study, reporting on conditions in traditionally managed fig and olive groves, which exist side-by-side with more intensively managed groves throughout the region, could constitute a valuable reference for soil biological activities in horticulture for this area.

Acknowledgements

We would like to thank Folkert van Oort for his very useful comments (UR251 PESSAC INRA Versailles). We are grateful to the owners of the orchards for having let us make our study in their groves. We thank all the students who took part in soil sampling.

Bibliography

Antunes S.C. et al., 2008. Spatial and temporal distribution of litter arthropods in different vegetation covers of Porto

- Santo Island (Madeira Archipelago, Portugal). *Eur. J. Soil Biol.*, **44**, 45-56.
- Cameron R.A.D., Pokryszko B.M. & Long D.C., 2006. Snail faunas in Southern English calcareous woodlands: rich and uniform, but geographically differentiated. *J. Conchology*, **39**, 1-13.
- Cameron R.A.D., Pokryszko B.M. & Horsak M., 2010. Land snail faunas in Polish forests: patterns of richness and composition in a post-glacial landscape. *Malacologia*, **53**, 77-134.
- Carrillo Y. et al., 2011. Soil fauna alter the effects of litter composition on nitrogen cycling in a mineral soil. *Soil Biol. Biochem.*, **43**, 1440-1449.
- Castro J., Campos P. & Pastor M., 1996. Soil arthropods under the influence of soil management systems in olive orchards and sunflower. *Boletín Sanidad Vegetal*, **22**, 557-570.
- Cesarz S. et al., 2007. Earthworm communities in relation to tree diversity in a deciduous forest. *Eur. J. Soil Biol.*, **43**, 61-67.
- Coineau Y., 1974. *Introduction à l'étude des microarthropodes du sol et de ses annexes*. Paris : Doin Éditions.
- Darrah P.R. & Jones D.L., 1994. Role of derived organic acids in the immobilisation of nutriment from the rhizosphere. *Plant Soil*, **166**, 247-257.
- Delsinne T., Roisin Y., Herbauts J. & Laponce M., 2010. Ant diversity along a wide rainfall gradient in the Paraguayan dry Chaco. *J. Arid Environ.*, **74**, 1149-1155.
- Dodd M.B. & Lauenroth W.K., 1997. The influence of soil texture on the soil water dynamics and vegetation structure of a shortgrass steppe ecosystem. *Plant Ecol.*, **133**, 13-28.
- El-Sharabasy H.M., Hassan M.F. & Mohamed A.I., 2008. Occurrence of soil mites at Al-Maghara Region, Sinai Peninsula. *J. Egypt. Soc. Acarology*, **2**, 31-35.
- Eo J. & Nakamoto T., 2008. Spatial relationships between roots and soil organisms under different tillage systems. *Eur. J. Soil Biol.*, **44**, 277-282.
- Errouissi F., Ben Moussa-Machraoui S., Ben-Hammouda M. & Nouira S., 2011. Soil invertebrates in durum wheat (*Triticum durum* L.) cropping system under Mediterranean semi arid conditions: a comparison between conventional and no-tillage management. *Soil Tillage Res.*, **112**, 122-132.
- Fadda S. et al., 2008. Conservation of grassland patches failed to enhance colonization of ground-active beetles on formerly cultivated plots. *Environ. Conserv.*, **35**, 109-116.
- Fayez K.A. & Mahmoud S.Y., 2011. Detection and partial characterization of a putative closterovirus affecting *Ficus carica*: molecular, ultrastructural and physiological aspects of infected leaves. *Acta Physiol. Plant*, **33**, 2187-2198.
- Galanes I.T. & Thomlinson J.R., 2011. Soil millipede diversity in tropical forest patches and its relation to landscape structure in northeastern Puerto Rico. *Biodivers. Conserv.*, **20**, 2967-2980.
- Garrido-Jurado I., Ruano F., Campos M. & Quesada-Moraga E., 2011. Effects of soil treatments with entomopathogenic fungi on soil dwelling non-target arthropods at a commercial olive orchard. *Biol. Control*, **59**, 239-244.
- Huerta E. & van der Wal H., 2012. Soil macroinvertebrates' abundance and diversity in home gardens in Tabasco, Mexico, vary with soil texture, organic matter and vegetation cover. *Eur. J. Soil Biol.*, **50**, 68-75.
- Ivask M. et al., 2008. Invertebrate communities (Annelida and epigeic fauna) in three types of Estonian cultivated soils. *Eur. J. Soil Biol.*, **44**, 532-540.
- Jackson M.L., 1967. *Soil chemical analysis*. Englewood Cliff, N.J., USA: Prentice Hall.
- Jacob M. et al., 2009. Nutrient release from decomposing leaf litter of temperate deciduous forest trees along a gradient of increasing tree species diversity. *Soil Biol. Biochem.*, **4**, 2122-2130.
- Jones C.G., Lawton J.H. & Shachak M., 1997. Positive and negative effects of organisms as physical ecosystem engineers. *Ecology*, **78**, 1946-1957.
- Kherbouche D., Bernhard-Reversat F., Moali A. & Lavelle P., 2012. The effect of crops and farming practices on earthworm communities in Soummam valley, Algeria. *Eur. J. Soil Biol.*, **48**, 17-23.
- Lavelle P. & Spain A.V., 2001. *Soil ecology*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Lobry de Bruyn L.A., 1999. Ants as bioindicators of soil function in rural environments. *Agric. Ecosyst. Environ.*, **74**, 425-441.
- M.A.D.R. (Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural), 2009. *Statistiques agricoles, superficies et produits*. Alger : Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural.
- Martins da Silva P.M., Aguiar C.A.S., de Faria e Silva I. & Serrano A.R.M., 2011. Orchard and riparian habitats enhance ground dwelling beetle diversity in Mediterranean agro-forestry systems. *Biodivers. Conserv.*, **20**, 861-872.
- Merlim A.O., Guerra J.G.M., Junqueira R.M. & de Aquino A.M., 2005. Soil macrofauna in cover crops of figs grown under organic management. *Sci. Agricola*, **62**, 57-61.
- Morón-Ríos A., Rodríguez Miguel Á., Pérez-Camacho L. & Rebollo S., 2010. Effects of seasonal grazing and precipitation regime on the soil macroinvertebrates of a Mediterranean old-field. *Eur. J. Soil Biol.*, **46**, 91-96.
- Neirynck J., Mirtcheva S., Sioen G. & Lust N., 2000. Impact of *Tilia platyphyllos* Scop., *Fraxinus excelsior* L., *Acer pseudoplatanus* L., *Quercus robur* L. and *Fagus sylvatica* L. on earthworm biomass and physico-chemical properties of a loamy topsoil. *For. Ecol. Manage.*, **133**, 275-286.

- Olsen S.R., Bowman R.A. et Watanabe F.J., 1977. Comportement du phosphore dans le sol et interactions avec les autres éléments nutritifs. *Phosphore Agric.*, **70**, 35-52.
- Omodeo P., Rota E. & Baha M., 2003. The megadrile fauna (Annelida: Oligochaeta) of Maghreb: a biogeographical and ecological characterization. *Pedobiologia*, **47**, 458-465.
- Ondina P., Hermida J., Outeira A. & Mato S., 2004. Relationship between terrestrial gastropod distribution and soil properties in Galicia (NW Spain). *Appl. Soil Ecol.*, **26**, 1-9.
- Ottonetti L., Tucci L., Chelazzi G. & Santini G., 2008. Stable isotopes analysis to assess the trophic role of ants in a Mediterranean agroecosystem. *Agric. For. Entomol.*, **10**, 29-36.
- Ouédraogo E., Mando A. & Brussaard L., 2006. Soil macrofauna affect crop nitrogen and water use efficiencies in semi-arid West Africa. *Eur. J. Soil Biol.*, **42**, 275-277.
- Pennings S.C. & Silliman B.R., 2005. Linking biogeography and community ecology: latitudinal variation in plant-herbivore interaction strength. *Ecology*, **86**, 2310-2319.
- Pereira J.A. et al., 2004. Ants as predators of the egg parasitoid *Trichogramma cacoeciae* (Hymenoptera: Trichogrammatidae) applied for biological control of the olive moth, *Prays oleae* (Lepidoptera: Plutellidae) in Portugal. *Biocontrol Sci. Technol.*, **14**, 653-664.
- Pesson P., 1971. *La vie dans les sols : aspects nouveaux, études expérimentales*. Paris : Éd. Gauthiers-Villars.
- Pokryszko B.M., Cameron R.A.D., Mumladze L. & Tarkhnishvili D., 2011. Forest snail fauna from Georgian Transcaucasia: patterns of diversity in a Pleistocene refugium. *Biol. J. Linn. Soc.*, **102**, 239-250.
- Pueyos Y. & Alados C.L., 2007. Abiotic factors determining vegetation patterns in a semi-arid Mediterranean landscape: different responses on gypsum and non-gypsum substrates. *J. Arid Environ.*, **69**, 490-505.
- Quemener J., 1979. *The measurement of soil potassium*. Research topics No 4/1978. Bern: International Potash Institute.
- Ramos M.E., Robles A.B., Sanchez-Navarro A. & Gonzalez-Rebollar J.L., 2011. Soil responses to different management practices in rainfed orchards in semi arid environments. *Soil Tillage Res.*, **112**, 85-91.
- Ricarte A., Marcos-Garcia M.A. & Moreno C.E., 2011. Assessing the effects of vegetation type on hoverfly (Diptera: Syrphidae) diversity in a Mediterranean landscape: implications for conservation. *J. Insect Conserv.*, **15**, 865-877.
- Rouabah L. & Descamps M., 2001. Biologie des Oligochètes *Lumbricus terrestris*, *Allolobophora* et *Dendrobaena pygmaea* dans le Constantinois (Est Algérien). *Bull. Soc. Zool. Fr.*, **126**, 49-58.
- Ruano F. et al., 2004. Use of arthropods for the evaluation of the olive-orchard management regimes. *Agric. For. Entomol.*, **6**, 111-120.
- Santos S.A.P., Cabanas J.E. & Pereira J.A., 2007. Abundance and diversity of soil arthropods in olive grove ecosystem (Portugal): effect of pitfall trap type. *Eur. J. Soil Biol.*, **43**, 77-83.
- Shanas U. et al., 2011. Landscape and a political border determine desert arthropods distribution. *J. Arid Environ.*, **75**, 284-289.
- Sharon R., Degan G. & Warburg M., 2001. Comparing the soil macro-fauna in two oak-wood forests: does community structure differ under similar ambient conditions? *Pedobiologia*, **45**, 355-366.
- Siegel S. & Castellan N.J., 1988. *Nonparametric statistics for the behavioural sciences*. New York, NY, USA: MacGraw Hill Int.
- Van der Wal A. et al., 2009. Dissimilar response of plant and soil biota communities to long-term nutrient addition in grasslands. *Biol. Fertil. Soils*, **45**, 663-667.
- Véla E. & Benhouhou S., 2007. Évaluation d'un nouveau point chaud de biodiversité végétale dans le bassin méditerranéen (Afrique du Nord). *C.R. Biol.*, **330**, 589-605.
- Warburg M.R., Linsenmair K.E. & Bercovitz K., 1984. The effect of climate on the distribution and abundance of isopods. In: Sutton S.L. *The biology of terrestrial isopods*. Oxford: Clarendon Pr., 339-367.
- Woodcock B.A. et al., 2005. Grazing management of calcareous grasslands and its implications for the conservation of beetle communities. *Biol. Conserv.*, **125**, 193-202.
- WRB (World Reference Base for Soil Resources), 1998. World Reference Base for Soil Resources. Roma: AISS, IRSIC, FAO.

(54 ref.)

Pour garantir une gestion durable des vergers oléicoles de Kabylie nord de l'Algérie, des études sont nécessaires sur la biodisponibilité du phosphore qui est un facteur limitant de la production végétale. Dans un contexte de limitation des intrants en phosphore dans les sols déficients, il est nécessaire de raisonner différemment cette production. Une voie repose sur le concept d'intensification écologique, selon lequel il s'agit d'utiliser les organismes du sol et de l'écosystème pour accroître la biodisponibilité phosphatée pour la plante. L'objectif général de la thèse porte sur l'évaluation de la biodisponibilité du phosphore dans la rhizosphère de *Olea europea* L. Dans une première partie, déterminer l'effet de l'activité racinaire sur la biodisponibilité du phosphore dans des sols à propriétés physiques et chimiques contrastées. Des processus rhizosphériques sont reconnus comme une des stratégies importantes élaborées par les plantes pour améliorer leur nutrition phosphatée. Dans une seconde partie, apprécier cet effet rhizosphérique quand le sol est soumis à des apports croissants d'engrais phosphatés localisés, suivi d'une étude biologique. Les propriétés chimiques du sol sont significativement modifiées au voisinage de la racine avec une diminution significative des formes de phosphore quelque soit le statut phosphaté initial avec des teneurs en phosphore foliaire conséquentes. L'apport localisé des engrais phosphatés a contribué significativement à corriger la fertilité du sol. L'étude biologique a permis la mise en évidence des symbiotes mycorrhizogènes avec une abondance importante des macroinvertébrés considérés comme des bioindicateurs de la qualité des sols. En plus de la comparaison de l'effet de l'activité de la racine de l'olivier par rapport à celle du figuier. Ces résultats nous permettent de faire une hiérarchisation des facteurs édaphiques et disposer d'un nouveau moyen de culture raisonnée et intégrée, permettant de manière durable à chaque verger de développer son meilleur potentiel. La connaissance de la rhizosphère, permet une meilleure prise en compte des besoins des plants. Quelque soit le type de sol, les propriétés chimiques du sol sont significativement modifiées à proximité de la racine de l'olivier, ce qui nous permet de conclure que sa rhizosphère apparaît comme un site enrichi en carbone, en argile avec une diminution du pH. Ces variations sont propices à la croissance des racines et des organismes vivants, avec une adaption à des sols souvent neutres à alcalins déficients en phosphore.

Mots-clés. Phosphore, rhizosphère, olivier, mycorhizes, endophytes, macroinvertébrés, figuier.

Abstract

To guarantee a sustainable management of the olive-growing orchards of Kabylia (Northern Algeria), studies on the bioavailability of phosphorus, limiting factor of the plant production, are necessary. In a context of reducing the inputs of soils deficient in P, it is necessary to look at this production differently. One way lies on the concept of ecological intensification, according to which it is a question of using the soil organisms and the ecosystem to increase the phosphate bioavailability for the plant. The general objective of the thesis relates to the evaluation of the bioavailability of phosphorus in the rhizosphere of *Olea europea* L. In the first part, it is a question of determining the effect of the root activity on the bioavailability of phosphorus in soils with contrasted physical and chemical properties. Rhizospherical processes are recognized like one of the important strategies carried out by the plants to improve their phosphate nutrition. The second part consists in appreciating this rhizospherical effect when the soil is subjected to increasing contributions of localized phosphate-enriched fertilizers, followed by a biological study. The chemical properties of the soil are significantly modified in the vicinity of the root with a reduction of the phosphorus forms; some is the initial phosphate status, with however, consequent foliar P contents. The localized supply of the phosphate-enriched fertilizers contributed to correct the fertility of the soil. The biological study allowed the description of the mycorrhizogene and endophytic symbionts, with an abundance of macro-invertebrates considered as bio-indicators of the soils' quality. We also proceeded to a comparison of the root activity effect of the olive-tree compared to that of the fig tree. These results enable us to make a hierarchization of the edaphic factors and thus to have a new mean of reasoned and integrated culture, making it possible, in a sustainable way, to each orchard to develop its best potential. The knowledge of the rhizosphere allows to better take into account the seedling needs. Whatsoever the type, the chemical properties of the soil are significantly modified near the root of the olive-tree, which enables us to conclude that his rhizosphere seems to be an enriched site of carbon, clay with a decrease in the pH. The olive-tree has a more important influence on the rhizosphere than the fig tree. These variations are favorable with the root growth and the living organisms, with an adaptation to often neutral to alkaline soils, deficient in phosphorus.

Key words. Phosphorus, rhizosphere, olive-tree, mycorrhizes, endophytes, macro-invertebrates, fig-tree.